

탄소중립도시 실현을 위한 무탄소 에너지원 적용 방안 연구

A Study on the Application of Carbon-Free Energy Sources for Realizing
Carbon-Neutral Cities

이은석 Lee, Eunseok

박종훈 Park, Jonghoon

지석환 Ji, Seokhwan

(a u r

일반연구보고서 2025-12

탄소중립도시 실현을 위한 무탄소 에너지원 적용 방안 연구

A Study on the Application of Carbon-Free Energy Sources for Realizing Carbon-Neutral Cities

지은이 이은석, 박종훈, 지석환
펴낸곳 건축공간연구원
출판등록 제2015-41호 (등록일 '08. 02. 18.)
인쇄 2025년 12월 28일, 발행: 2025년 12월 31일
주소 세종특별자치시 가림로 143, 8층
전화 044-417-9600
팩스 044-417-9608

<http://www.auri.re.kr>

가격: 10,000원, ISBN: 979-11-5659-541-0

이 연구보고서의 내용은 건축공간연구원의 자체 연구물로서 정부의 정책이나 견해와 다를 수 있습니다.

연구진

연구책임	이은석 연구위원
연구진	박종훈 부연구위원 지석환 연구원
연구조사원	김서영 연구조사원
외부연구진	길승호 교수 (강원대학교 생태조경학과) 이지은 연구원 (강원대학교 생태조경학과)

연구심의위원	오성훈 부원장 조영진 공간AI·빅데이터본부장 이상민 선임연구위원 김형규 홍익대학교 도시공학과 교수 최준성 충남대학교 건축학과 교수
--------	--

연구자문위원	김대희 도시건축이음 대표이사 김정곤 어반바이오공간연구소 소장 김태한 상명대학교 환경조경학과 교수 김태현 환경연구원 선임연구위원 문현석 서울연구원 선임연구위원 박창석 한국환경연구원 선임연구위원 손동화 충북대학교 건축학과 교수 오병철 광주기후에너지진흥원 녹색건축센터장 윤두원 KPA 행정중심복합도시 기획조정단 실장 윤은주 국토연구원 연구위원 이건원 고려대학교 건축학과 교수 이순명 상명대학교 전기공학전공 교수 이재혁 환경연구원 연구위원 임종연 강원대학교 건축공학전공 교수 정승현 한국건설기술연구원 연구위원 최정석 중부대학교 건축학전공 교수 최해옥 과학기술정책연구원 연구위원
--------	--

서론

■ 연구배경 및 목적

탄소중립 도시 조성의 본격화로 무탄소 에너지원(태양광, 풍력 등) 도입이 필수적이거나, 기존 도시계획시설 및 인프라를 활용한 에너지 시설의 지역 단위 공간적 입지 타당성 검토는 미흡한 실정이다. 특히, 석탄 화력발전소 폐지 지역의 대안으로서 무탄소 에너지원 전환이 논의되고 있으나, 이 역시 국가/광역 차원의 정책 수준에 머물러 지역 에너지 수급 영향 및 공간 중심의 실질적 검토가 부족하다. 따라서 기술적 타당성 외에 공간적 타당성을 확보하고 형식적 사업계획에 그치지 않도록 통합적인 도입 방안 마련이 시급하다.

따라서, 본 연구의 목적은 탄소중립도시 실현에 필수적인 무탄소 에너지원 전환을 위한 공간적 타당성 검토 기준을 제안하고, 이를 탄소중립 도시 사례지역에 적용 가능성을 제시하는 데 있다.

■ 연구 범위

본 연구는 무탄소 에너지원 중 태양광, 풍력, 수소, 소형원전(SMR)을 주요 분석 대상으로 설정하고, 이들의 개념, 국내외 법제도 및 적용 사례 분석을 통해 입지적 특성을 파악하였다.

연구의 주요 내용은 다음과 같다.

국내외 사례 및 문헌을 통해 도출된 입지 특성과 평가지표를 통합하여 무탄소 에너지원의 지역 단위 입지 기준을 마련하고 구체화하였다.

시범 적용을 위해서 탄소중립 선도도시 중 대규모 화석연료 전환이 필수적인 충청남도 보령시와 당진시를 공간적 범위로 설정하였다. 두 도시의 행정구역 단위에 대해 마련된 입지 기준을 적용하여 입지 적정성 평가를 시범 수행함으로써 도입 가능성을 평가하였다.

적용 방안에서는 기존 도시에 무탄소 에너지 입지분석 방법을 적용하기 위한 공간계획 방법론과 함께, 탄소중립도시 조성을 위한 무탄소 에너지 전환 추진 과제를 통합적으로 제시하였다.

■ 연구 방법

문헌 연구에서는 국내외 무탄소 에너지원 전환 및 탄소중립 도시계획 관련 연구, 정책 보고서, 법령, 조례, 지침 등을 종합적으로 검토하여 연구의 기초를 마련하였다.

제도 및 정책 분석에서는 현행 제도의 한계와 무탄소 에너지 기반시설 전환 시 고려해야 할 주요 요소를 분석하고, 관련 법령 및 지침(국가 및 지자체 수준) 검토를 통해 입지 및 부지 활용 시 법적·제도적 장애 요소와 개선 필요사항을 도출하였다. 입지 기준 특성 분석에서는 무탄소 에너지원별 입지적 특성을 제공하는 국내외 논문 및 관련 보고서를 분석하여 입지 기준 마련의 이론적 근거를 확보하였다.

사례 연구에서는 연구 목적 달성에 필요한 실질적인 정보와 시사점을 도출하기 위해 국내외 사례를 분석하였다. 국내 사례분석에서는 현재 시행 중인 무탄소 에너지원별 관련 법제도 및 탄소중립도시 관련 정책을 검토하였다. 또한, 무탄소 에너지 시범 적용 대상인 충청남도 보령시와 당진시의 무탄소 에너지 도입 현황을 파악하고, 이를 바탕으로 활용성이 높은 무탄소 에너지원을 선별하였다. 국외 사례 분석에서는 유럽 등 해외 주요 탄소중립 도시의 무탄소 에너지 기반시설 전환 사례 및 입지 기준 관련 내용을 조사하고, 국내 사례와의 비교 분석을 통해 정책적 시사점을 도출하였다.

무탄소 에너지 시범 적용을 위한 입지분석을 위해서 입지기준 마련과 입지 공간분석을 수행하였다. 우선 문헌 및 사례 연구를 통해 도출된 입지 특성을 바탕으로 무탄소 에너지 시설 도입 가능성 평가를 위한 입지 기준을 마련하였다. 충청남도 보령시와 당진시를 대상으로 GIS(지리정보시스템) 기반 공간분석 기법을 활용하여 무탄소 에너지 시설의 도입 가능성을 평가하였다. 분석 결과는 평점이 높은 순서대로 정리하고, 상위 지역들을 검토하여 전체적인 도입 가능성 여부를 제시하였다.

무탄소 에너지 적용방안을 마련하고, 연구 결과의 실효성과 현장 적용성을 높이기 위해 전문가 의견수렴을 진행하였다. 무탄소 에너지 전환, 도시계획, 에너지 정책, 법제도 전문가 및 지자체 실무자를 대상으로 심층 인터뷰를 실시하여 실질적 정책 운영상의 문제점과 개선 요구를 수집하였다. 결과 보완을 위해서 GIS 공간분석 결과와 연계하여 전문가들의 의견을 수렴하고, 이를 바탕으로 현장 적용성이 높은 정책 대안을 보완하여 연구에 반영하였다.

무탄소 에너지원 도입을 위한 입지기준 마련

무탄소 에너지원 전환의 정책적 방향을 고찰하고, 에너지원별 상이한 기술 및 입지 요건, 현행 법·제도의 한계를 종합적으로 분석하여, 사례 도시에 적용 가능한 시범 입지분석 대상 에너지원을 선정하고 그 입지 기준을 상세히 제시하였다.

■ 문헌 및 사례 고찰

국내 무탄소 에너지 전환은 정책적 의지는 확보되었으나, 기술적 특성과 법·제도의 정합성이 충분치 않아 실질적인 전환 속도에 제약이 있음을 확인하였다. 에너지 믹스는 석탄 감축과 함께 원자력 및 재생에너지 중심으로 재편되고 있으며, 이는 발전·송전·배전 전 과정에서의 통합적 접근을 필수적으로 요구하고 있었다.

국내 현황 분석 결과, 태양광(일조량/경사도), 풍력(풍황/계통), 수소/연료전지(안전/배관), SMR(냉각수/지질) 등 에너지원별로 요구되는 기반시설과 입지 요건이 크게 상이하여 단일한 기준으로 적용할 수 없는 '입지 다양성'을 고려해야 할 것으로 파악되었다. 현행 법·제도는 「국토계획법」, 「산업집적법」, 「환경영향평가법」 등에 의해 복합적으로 작용하고 있으나, 법령 체계의 분절성과 입지 규제의 복잡성, 기반시설 부족 등이 전환 속도를 제약하고 있었다. 따라서 국가 차원의 '무탄소 에너지 통합 가이드라인' 구축, 국토계획과 에너지계획의 제도적 연동, 그리고 기반시설의 선제적 확충이 시급한 과제로 도출되었다.

국외 사례(빌트폴츠리드, 제브리호프, 암스테르담 등) 역시 지역의 기후·지형·토지이용·기존 인프라 조건이 에너지원의 특성과 정합적으로 결합될 때 지속가능한 전원 체계가 구축될 수 있음을 보여주었다.

■ 입지분석 대상 에너지원 선정

충청남도 및 사례도시(보령시, 당진시)의 에너지 현황 및 기술적·정책적 적용 가능성을 종합적으로 고려하여 태양광, 풍력, 소형원자력(SMR), 연료전지 4가지 에너지원을 입지분석 대상 에너지원으로 선정하였다.

태양광은 충남 전체 신재생에너지 발전량 중 가장 높은 비중(46.4%)을 차지하며, 기술 성숙도와 경제성이 높아 도시 내 다양한 입지에 보편적 도입이 가능한 핵심 분산형 전원으로 판단되었다. 풍력은 현재 기여도는 낮으나, 중장기 재생에너지 공급 확대를 위해 필수적이며 연안·산지 중심의 도입 잠재력 및 전략적 위치를 고려하여 분석 대상에 포함하였다. 소형원자력(SMR)은 보령·당진의 기존 석탄화력 인프라를 활용할 수 있는 기저부하 전원으로서, 대규모 화력발전 대체 및 에너지 안보 측면에서 전략적 필요성이 높다고 판단하였다. 연료전지는 충남 발전량의 약 6.1%를 차지하며, 부지 요구 면적이 작아 도심·산업단지 등 다양한 공간에 적용 가능하고 분산전원 및 에너지 효율화를 위한 핵심 기술로 평가하여 대상으로 선정되었다.

■ 무탄소 에너지원별 입지 기준 마련

선정된 4가지 에너지원에 대해 국외 사례의 공간 특성과 기술적·안전적 요구조건을 통합하여, GIS 기반 공간분석에 활용할 세부 입지 기준 및 평가지표를 다음과 같이 설정하였다.

- 태양광 에너지 입지기준

해외 사례에서 확인된 일사량, 남향 경사 등의 공간 특성을 반영하여 경사도, 일사량, 방위를 핵심 평가항목으로 설정하였다. 특히, 경사도 5° 이상은 부적합 기준으로, 남향은 최적 조건으로 분류하여 지표화 했다.

- 풍력 에너지 입지기준

바람의 세기와 안정성, 주거지 이격 등을 고려하여 풍속과 도로와의 거리를 평가지표로 설정했다. 상대적으로 높은 풍속 지점을 선호지로 판단하고, 소음 및 안전을 위해 도로에서 500m 이내 지역을 제외하도록 지표를 설정하여 '주거지 이격' 및 '기반시설 인접성' 원칙을 반영했다.

- 소형원자력(SMR) 입지기준

인구 밀도가 낮고 냉각수 확보에 유리하며 지질적 안정성(단층)이 확보된 지역이 선호되었다. 인구밀도, 냉각수 거리, 단층, 경사도를 평가지표로 설정하고, 냉각수원은 반경 3km 이내 존재할 경우 최적으로, 단층 인접지역은 안전성 관점에서 배제하도록 기준을 명확히 했다.

- 연료전지 입지기준

도시형 분산전원으로서 가스공급 인프라와의 접근성이 매우 중요하였다. 가스공급시설 인접성과 수자원 인접성을 평가지표로 설정하여, 가스 공급망이 가깝고 열교환 및 안전관리에 유리한 하천·해양 등 수자원 인근 지역을 적합지로 판단했다.

무탄소 에너지원 도입을 위한 입지분석 시범적용

본 연구에서 마련된 무탄소 에너지원별 입지 기준은 GIS 기반 중첩분석(Overlay) 기법을 통해 충청남도 보령시와 당진시의 행정구역에 시범 적용되었으며, 입지 제한요인 필터링과 적합도 등급(Class 1~4) 부여를 통해 무탄소 전원 확보 가능성을 종합적으로 검토하였다. 시범 적용 결과, 에너지원별로 도시 공간 내 확보가능한 입지 적합성과 잠재량이 상이하게 도출되었다.

태양광은 가장 현실적인 도입 가능성을 보인 에너지원으로서, 도시 전역에서 비교적 높은 적합성을 보였다. 환경 규제나 지형적 제약이 적고, 건축물 외피(BIPV), 주차장 상부, 공공 유희부지 등 소규모 분산형 입지가 다양하게 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 분석 결과, 당진·보령 양시에서 Class 1~2 지역이 광범위하게 분포하여 기존 도시에서도 가장 현실적이고 빠른 도입이 가능한 에너지원으로 평가되었다.

육상 풍력은 입지제약이 심화된 것으로 판단되었다. 경사, 고도, 보전구역, 주거지 이격거리 등 다수의 제약으로 인해 입지 가능 지역이 매우 제한적으로 나타났다. 특히 도심·주거지역이 확장된 기존 도시의 경우 환경적·경관적 영향이 커 실질적인 적용 가능성은 낮은 것으로 평가되었다.

연료전지의 경우는 도시형 안정 전원 잠재력을 가진 것으로 판단되었다. 소규모·모듈형 특성 및 정온·저소음 특성으로 도시 내부 설치와 주거지와의 갈등 해소에 유리할 것으로 보인다. 다만, 수소 공급망, 안전거리, 부지 확보가 필요하여 주로 산업단지, R&D 캠퍼스, 공공기관 부근에서 조건부 적합(Class 2~3)이 도출되었다. 당진·보령의 산업단지는 기존 전력수요 및 기반시설이 집중되어 있어 도시형 수소 기반 전원으로 활용 가능성이 높은 것으로 확인되었다.

소형모듈원전(SMR)은 기존 인프라를 활용하는데 있어 높은 도입 가능성을 보였다. 냉각수 접근성, 전력망 연계, 비상 대응체계 등 고도의 안전 운영 조건을 필요로 하므로, 주로 도시 외곽 산업단지·항만 인근에서 Class 1~2 지역이 확인되었다. 특히, 보령화력·당진화력과 같은 기존 발전 부지는 부지·송전·냉각·안전 기반시설이 이미 갖추어져 있어 전원 전환 가능성이 가장 높은 구역으로 평가되었다.

입지적합성 분석 결과는 단순한 적합 지역 도출을 넘어, 탄소중립도시의 실질적인 에너지 계획 및 공간 전략 수립을 위한 핵심 기초 자료로 활용될 수 있는 정책적 시사점을 제공하였다.

무탄소 에너지원 도입을 위한 적용방안 마련

무탄소 에너지원의 적용은 개별 기술 도입을 넘어 도시 공간 전체의 구조적 개편을 요구한다. 본 연구의 입지 분석 결과와 과제 도출을 통해서 기존 도시가 현실적으로 무탄소 전원을 수용하기 위한 공간계획 방향을 제시하였다. 핵심은 입지 적합성을 기반으로 에너지원별 공간 전략을 세분화하고, 도시 공간유형에 맞추어 적용 모델을 지역별로 다르게 설계하며, 이 과정은 법정계획, 지구단위계획, 부지전환계획과 같은 공간계획 제도화와 결합되어야 한다는 것이다. 이를 통해 기존 도시는 "무탄소 에너지 기반의 순환형 도시공간"으로 단계적인 전환이 가능하며, 에너지 체계 개혁과 공간구조 전환을 동시에 이루는 통합형 탄소중립도시 모델을 구축할 수 있다.

기존 도시에 무탄소 에너지 전환을 실효성 있게 추진하고 지속가능성을 확보하기 위해서는 도시 계획 법체계를 내재화하는 것이 기본 방향이다. 이를 위해 「탄소중립·녹색성장 기본법」상의 탄소중립도시 조항을 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」(국토계획법)의 도시·군기본계획 체계 속에 '에너지전환 부문'으로 명시·편입하여 법적 통제력을 확보해야 한다. 또한 각 도시는 단일 기술에 편중된 공급 구조에서 벗어나 중장기적인 다원형 에너지 믹스 목표를 설정하고, 이를 '자체 에너지 포트폴리오 관리제'로 제도화하여 에너지 공급원의 다변화와 안정성을 동시에 확보할 필요가 있다. 나아가 무탄소 에너지 인프라 구축은 개별 도시 단위를 넘어 교통·산업·발전 인프라가 연결된 광역권 단위에서 추진되어야 하며, 중앙정부는 이를 위한 광역형 거버넌스 제도를 신설하여 정책을 조정·지원해야 한다. 재정 구조 역시 현재의 단기 국비보조 위주에서 벗어나 자체 생산 전력의 REC 판매 수익 등을 '순환형 지역에너지기금(지방기후기금)'으로 환류시키는

체계를 구축해야 사업의 지속성을 담보할 수 있다. 마지막으로, 온실가스 감축량 중심의 평가를 넘어 무탄소 에너지 보급률과 사회적 공편익(Co-benefits)을 동시에 평가하는 통합지표 체계를 도입하여 정책 패러다임을 전환시켜야 한다.

기술적 측면에서는 기존 화석연료 기반의 중앙집중형 공급체계의 한계를 극복하는 대응이 요구된다. 특히 건물 전기화 등으로 전력수요가 급속히 증가하는 상황에서, 변동성 전원 비중 확대에 따른 계통 안정성과 SMR·수소 등 장주기 전원 확보는 가장 핵심적인 과제이다. 소형모듈원전(SMR)의 경우 도시 인근 설치를 위한 안전·운영 기준을 새롭게 마련해야 하며, 보령·당진과 같은 대규모 화력도시는 기존 설비를 기반으로 수소·암모니아 혼소 실증을 확대하여 산업도시의 전환 비용을 최소화하는 현실적 경로를 구축해야 한다.

공간적 측면에서는 입지 적합성 분석에서 나타난 바와 같이 풍력·SMR 등이 겪는 다층적 공간 규제와의 충돌을 해소해야 한다. 지자체는 경관지구, 보전산지 등과의 충돌을 조정하기 위해 지역 특성을 반영한 무탄소 에너지 입지 지침을 선제적으로 수립해야 한다. 또한 기존 산업단지·항만을 SMR·연료전지 등 무탄소 전원의 전략적 입지로 활용하기 위해 '산업단지 에너지복합지구(가칭)' 지정 등 공간적 전략을 마련하고, 건축물 태양광(BIPV) 등 도시 내 분산형 전원 도입을 위한 소규모 공간(공공 유희지, 주차장 상부 등) 활성화 제도를 정비해야 한다.

제도적 측면에서는 에너지원별로 분절된 현행 법·제도를 통합할 프레임워크 구축이 시급하다. 「탄소중립·녹색성장 기본법」상의 '탄소중립도시' 조항을 법정 도시계획에 필수 구성요소로 내재화하는 것이 핵심이며, 태양광·SMR 등 전원별로 분리된 인허가 체계를 통합하여 사업 예측성과 절차의 간소화를 도모해야 한다. 마지막으로 사회·경제적 측면에서는 무탄소 전환이 지역사회·고용·경제 체계의 변화를 수반하는 만큼, 화력발전 축소에 따른 고용·세수 공백에 대응하는 정의로운 전환 시스템을 구축해야 한다. 또한 무탄소 시설 도입 과정에서 불가피한 이해관계자 간 갈등을 조정하는 합의 체계를 운영하고, 수소·재생·SMR 기반 신산업 육성을 통해 지역 경제 생태계의 지속가능성을 강화해야 할 것이다.

결론

본 연구는 기존 도시의 무탄소 에너지원 도입 실현 가능성을 검토하기 위해 에너지원별 입지기준 체계를 명확히 정립하고, 이를 시범적으로 도시 공간에 적용하여 입지적합성을 분석하였다.

주요 연구 결과는 다음과 같다.

입지기준을 정립하였다. 태양광, 풍력, SMR, 연료전지 등 주요 무탄소 에너지원별 기술적·공간적·제도적 특성을 반영한 실질적인 입지기준 체계를 구성하였다.

입지분석 시범 적용 결과, 태양광은 기존 도시에서 가장 높은 잠재력을 보인 반면, 풍력은 적용 가능성이 매우 낮은 것으로 나타났다. SMR은 기존 산업단지·화력 부지, 연료전지는 도시 내부 분산형 전원으로서는 유효한 적합성을 보였다.

무탄소 에너지 적용 방안이 제시되었다. 입지적합성 결과를 바탕으로 주거지, 산업단지, 항만 등 기존 도시에 적용할 수 있는 공간 유형별 에너지 조합 전략 및 도시계획과의 연계 방안을 도출하여 실무적 활용 기반을 마련하였다.

최종적으로 본 연구는 “기존 도시의 무탄소 에너지 전환은 에너지원별 공간적 수용성을 전제로 해야 하며, 입지분석 결과를 도시계획과 연계함으로써 실질적인 도입 전략이 가능하다”는 점을 실증하였다는 데 큰 의의가 있다.

본 연구 과정에서 확인된 정책적 한계(정책 지속성 약화, 사회적 합의 부재 등)를 극복하고 탄소 중립도시를 구현하기 위해 무탄소 에너지 중심의 도시계획 체계 확립, 정의로운 전환과 지역 경제 연계 강화, 지방정부 주도의 추진체계 및 법·제도 정비, 시민참여형 에너지 전환 모델 구축, 지속가능한 정책 거버넌스 구축 및 지역 맞춤형 전략 수립 등의 정책을 제언하였다.

주제어

무탄소 에너지, 탄소중립 도시, 에너지 기반시설 입지, 에너지 전환, 화력발전소 폐쇄

제1장 서론	1
1. 연구의 배경 및 목적	3
2. 연구의 범위 및 방법	6
3. 연구 수행 체계	10
4. 선행연구 검토 및 본 연구와의 차별성	13
제2장 무탄소 에너지 국내의 도입현황	17
1. 무탄소 에너지의 개념 및 정의	19
2. 국내 무탄소 에너지 도입현황	27
3. 국외 무탄소 에너지 도입사례	51
제3장 무탄소 에너지 도입을 위한 시범적용	69
1. 개요	71
2. 무탄소 에너지 시범적용 대상 설정	73
3. 무탄소 에너지 적용을 위한 입지기준 설정	86
4. 무탄소 에너지 입지분석 시범적용	94
제4장 무탄소 에너지 전환을 위한 적용방안	113
1. 무탄소 에너지 전환을 위한 공간계획 방안	115
2. 무탄소 에너지 적용을 위한 과제	124
제5장 결론	135
1. 연구 수행 및 결과 논의	137
2. 연구 한계 및 제언	141
참고문헌	145
SUMMARY	151

[표 1-1]	선행연구의 주요 내용 및 본 연구의 차별성	13
[표 2-1]	에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황 - 원자력	37
[표 2-2]	에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황 - 재생에너지(풍력)	38
[표 2-3]	에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황 - 재생에너지(태양광)	40
[표 2-4]	에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황-재생에너지(지열, 수력, 해양에너지) ..	41
[표 2-5]	에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황-신에너지(수소)	44
[표 2-6]	에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황-신에너지(연료전지)	45
[표 2-7]	에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황	46
[표 3-1]	보령시 부문별 온실가스 배출현황(단위: Gg CO ₂ eq)	76
[표 3-2]	당진시 부문별 온실가스 배출현황(단위: Gg CO ₂ eq)	78
[표 3-3]	충청남도 발전원별 발전설비 현황(2023 년도 현재, kW)	81
[표 3-4]	충청남도 시군구별 신재생 에너지원별 발전량 현황(2023 년도, MW h)	83
[표 3-5]	국외사례를 통한 무탄소 에너지원별 입지기준 참고내용	88
[표 3-6]	문헌고찰을 통한 무탄소 에너지원별 입지평가 지표 및 사용 데이터	89
[표 3-7]	주요 국외 소형원자로 입지 기준 및 주요 내용	90
[표 3-8]	사례도시의 무탄소 에너지 적용을 위한 입지기준	93
[표 3-9]	생태적 보호구역의 유형 및 분석활용을 위한 데이터	95
[표 3-10]	사회-문화적 보호구역 유형과 활용데이터	96
[표 3-11]	지형적-기술적 금지구역	96
[표 3-12]	보령시 풍력발전 입지적합성 등급별 면적(km ²)	98
[표 3-13]	당진시 풍력발전 입지적합성 등급별 면적(km ²)	99
[표 3-14]	보령시 태양광발전 입지적합성 등급별 면적(km ²)	100
[표 3-15]	당진시 태양광발전 입지적합성 등급별 면적(km ²)	102
[표 3-16]	보령시 원자력발전 입지적합성 등급별 면적(km ²)	103
[표 3-17]	당진시 원자력발전 입지적합성 등급별 면적(km ²)	105
[표 3-18]	보령시 연료전지 발전 입지적합성 등급별 면적(km ²)	106
[표 3-19]	보령시 연료전지 발전 입지적합성 등급별 면적(km ²)	107
[표 4-1]	무탄소 에너지원별 공간계획 전략과 적용성	121
[표 4-2]	무탄소 에너지원별 적용가능한 공간계획 모델	121
[표 4-3]	이재명정부의 무탄소에너지원 관련 국정과제 및 2026 년 예산안	125

[그림 1-1]	연구 배경 및 목적	5
[그림 1-2]	연구의 수행 체계	12
[그림 2-1]	미국 연방 지속가능성 계획	20
[그림 2-2]	IEA 2050 순배출 제로를 위한 에너지 부문 로드맵	21
[그림 2-3]	제 11 차 전력수급기본계획의 에너지원별 발전량 전망	23
[그림 2-4]	2025 년 1 월 기준 국내 에너지밸런스 현황	23
[그림 2-5]	국내 발전설비 용량기준 원별 비중	24
[그림 2-6]	2025 년 1 월 기준 국내 에너지밸런스 현황(전년 동월 대비)	25
[그림 2-7]	제 1 차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획의 부문별 감축정책 중 무탄소 에너지 연관 과제	27
[그림 2-8]	제 11 차 전력기본계획에서의 무탄소 에너지 정책 방향	31
[그림 2-9]	탄소중립 선도도시 사업체계	34
[그림 2-10]	탄소배출 중심의 기본도시 구조와 무탄소 에너지 개념이 도입된 탄소중립도시의 공간구조 비교	35
[그림 2-11]	탄소중립 선도도시 당진시 사업모델 개념도	36
[그림 2-12]	pebbles 지역 에너지 시장의 실시간 시각화 도구	52
[그림 2-13]	빌트폴초리드 태양광 시설	52
[그림 2-14]	빌트폴초리드 풍력 터빈 모습	53
[그림 2-15]	빌트폴초리드 바이오 매스 시설	54
[그림 2-16]	pebbles 블록체인 기반 및 지역 거래 플랫폼 다이어그램	55
[그림 2-17]	에너지 전환 다이어그램	56
[그림 2-18]	네덜란드 암스테르담 수송부문의 온실가스 감축계획	58
[그림 2-19]	네덜란드 암스테르담 에너지 전환 공간계획 요약	58
[그림 2-20]	네덜란드 암스테르담 에너지 전환 공간계획	59
[그림 2-21]	노이에 베스트슈타트의 태양광 에너지 시설	61
[그림 2-22]	노이에 베스트슈타트의 수소 에너지 시설	62
[그림 2-23]	코펜하겐 에너지 시스템 체계도(좌)와 에너지 공급망(우)	63
[그림 2-24]	뉴욕시 탄소중립을 위한 계획	64
[그림 3-1]	사례도시 무탄소 에너지원 도입을 위한 입지분석 내용 및 절차	72
[그림 3-2]	보령시와 당진시의 무탄소 에너지원 전환 추진방향	74
[그림 3-3]	서해안권에서 보령시와 당진시의 청정에너지 시설 방향	74

[그림 3-4] 보령시 화력발전소별 위치	80
[그림 3-5] 당진시 화력발전소별 위치	80
[그림 3-6] 무탄소 에너지원 입지적합성 분석 절차	95
[그림 3-7] 보령시 풍력발전 입지적합성 등급결과	98
[그림 3-8] 당진시 풍력발전 입지적합성 등급결과	100
[그림 3-9] 보령시 태양광발전 입지적합성 등급결과	101
[그림 3-10] 당진시 태양광발전 입지적합성 등급결과	103
[그림 3-11] 보령시 원자력발전 입지적합성 등급결과	104
[그림 3-12] 당진시 원자력발전 입지적합성 등급결과	105
[그림 3-13] 보령시 연료전지 발전 입지적합성 등급결과	107
[그림 3-14] 당진시 연료전지 발전 입지적합성 등급결과	108
[그림 4-1] 보령시 탄소중립 도시계획 및 무탄소 에너지 도입 사례	123
[그림 4-2] 당진시 탄소중립 도시계획 및 무탄소 에너지 도입 사례	123

제1장

서론

1. 연구의 배경 및 목적
2. 연구의 범위 및 방법
3. 연구 수행 체계
4. 선행연구 검토 및 본 연구와의 차별성

1. 연구의 배경 및 목적

1) 연구의 배경

① 무탄소 에너지원으로 전환에 필요한 공간적 검토 미흡

2024년 국토교통부와 환경부는 공동 시범사업인 탄소중립 선도도시에 4개 지자체를 선정했다. 뒤이어 2025년 2월에는 「탄소중립 도시 지정 등에 관한 고시」(환경부고시 제2025-21호, 국토교통부고시 제2025-47호)를 제정·시행하였다. 이는 향후 탄소중립 도시를 희망하는 지자체는 국가 보조사업 공모를 대기할 필요 없이 중앙정부에 지정을 요청하여 탄소중립 도시 사업을 자체적으로 수행할 수 있도록 제도가 개선되었음을 의미한다. 따라서 향후 전국 지자체의 도시 단위로 탄소중립 목표 달성을 위한 에너지 전환과 기반시설 구축이 본격화될 것으로 예상된다.

탄소중립 도시 조성 과정에서 핵심적인 온실가스 감축 수단으로 무탄소 에너지원(태양광, 풍력, 수소, 지열 등)의 도입은 필수적이다. 도시의 주요 에너지원을 화석에너지원에서 무탄소 에너지원으로 전환하면 직·간접배출량을 모두 줄일 수 있기 때문이다. 탄소중립 선도도시 공모사업에 제안한 지자체들의 계획안을 살펴보면 대부분 기존 도시계획시설과 인프라를 활용해 신·재생에너지를 적용하거나 새로운 무탄소 에너지 기반시설을 도입하려는 방안이 추진되고 있다. 그러나 이러한 시설의 입지와 적용 타당성에 대한 지역 단위의 공간적 검토는 탄소중립 도시계획상에서 확인하기 어려운 실정이다.

② 기존 에너지원의 전환 움직임과 탄소중립 도시 연계

기존 도시나 신도시는 모두 인근 또는 원거리 에너지 기반시설에서 에너지를 공급 받는다. 우리나라 에너지 공급 특성상 전력은 모든 1차 에너지원에서 생산된 전력이 혼합된 형태로 공급된다. 혼합된 전력형태 중 탄소중립도시 실현을 위해서는 석탄 화력발전소 등 대규모 온실가스 배출시설에서 공급되는 에너지를 중국에는 차단하고 도시 내부에서 무탄소 에너지를 공급하는 방법을 고려해야 한다.

여건에 따라 다르겠지만 화력발전소가 입지한 지자체의 온실가스 배출량이 인구 수준을 초월하는 경우는 국가차원의 발전소에서 발생한다. 국가적인 탄소중립 정책의 일환으로 화력발전소 폐지 정책이 적용될 경우, 화력발전소에 기반하여 인력 및 경제구조가 오랜시간 지자체와 결합이 되어 있어 연착륙을 위한 방안이 필요하게 된다. 화력발전소 폐지가 예정된 지자체에게 탄소중립 도시는 해당 부지와 연관 산업의 피해를 최소화하기 위한 미래 공간대안이며, 기존 화력발전소 부지가 무탄소 에너지원으로 대체되게 한다는 점에서 적극 검토될 필요가 있다.

이미 국가 및 충청남도 등 광역 지자체는 노후화된 석탄화력 발전시설의 단계적 폐쇄와 무탄소 에너지원로의 전환 계획을 수립하고 있다. 일부 폐쇄된 발전소 부지를 태양광, 수소, 풍력 등 무탄소 에너지 생산시설 용지로 전환하는 방안도 검토 중이다. 그러나 국가나 광역 지자체의 사업계획 또는 정책 수준에 머물고 있어, 발전량 변화에 따른 지역의 에너지 수급 영향, 기반시설 입지 조건, 폐쇄 부지의 환경 개선 방안과 같은 공간 중심의 실질적 검토는 미비하다.

③ 무탄소 에너지원 전환을 위한 도입 방안 마련 필요

무탄소 에너지원로의 전환을 추진함에 있어 기존 화석연료 에너지 전환의 기술적 타당성만이 아닌 공간적 타당성도 중요하다. 입지조건, 부지 여건, 인프라 연계성, 지역 에너지 수급 체계와의 조화, 지역주민의 수용성 등 세부적인 고려사항들이 요구된다. 이것을 간과하게 되면 탄소중립 도시를 목표로 하는 지역에서 무탄소 에너지원 도입을 위한 체계가 형식적 사업계획에 그칠 우려가 있다. 그래서, 무탄소 에너지원의 입지 적합성, 부지 활용 계획, 주변 환경과 연계된 통합적인 적용방안 마련이 필요하다.

대상도시에 신규 에너지 시설을 도입하기 위한 입지분석은 실제 공간에 시설을 설치하는 기초로서 계획의 주춧돌과 같다. 입지분석 단계에서 대상지의 사회·환경적 현황들이 충분히 검토되고, 적절한 지점들이 선정되기 때문이다. 입지분석은 새로운 에너지 기술을 적용할 때도 유용하다. 신규 무탄소 에너지원인 연료전지나 소형 원전의 경우 AI시대에 대체 에너지원으로서 도입이 활발하게 검토되고 있는 바, 입지기준과 평가에 대한 검토가 요구된다.

그러나, 무탄소 에너지원 입지분석이나 도입방안들이 공간적으로 시도된 예는 아직 부족하다. 또한, 입지도출 후 에너지원 특성에 맞는 도입방안도 아직 참고할 만한 자료는 미진한 실정이다.

2) 연구의 목적

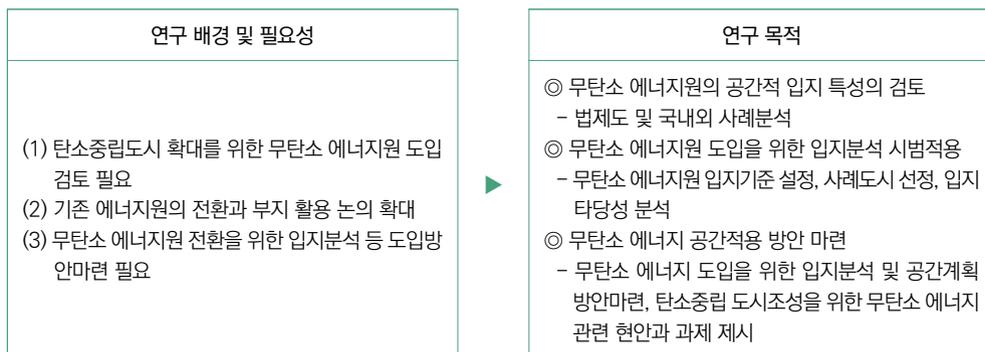
본 연구의 목적은 탄소중립도시 실현에 필수적인 에너지 전환을 무탄소 에너지원으로 할 경우에 필요한 공간적 타당성 검토의 기준을 제안하고 탄소중립 도시 사례지역에 적용가능성을 제시하는데 있다.

구체적으로는,

첫째, 무탄소 에너지원(태양광, 풍력, 연료전지 등)의 지역단위 적용을 위해서 요구되는 법제도 및 사례분석을 통한 입지특성들을 검토한다.

둘째, 무탄소 에너지원의 도입을 위한 입지기준을 마련하고, 사례도시에 시범적으로 입지분석을 시행함으로써 무탄소 에너지원의 도입가능성을 평가해 본다.

셋째, 탄소중립도시 조성을 위해 필요한 무탄소 에너지 입지분석 적용방안, 공간계획 방안, 무탄소 에너지 도입을 위한 과제들을 통해 무탄소 에너지의 공간적용 방안을 제시한다.



[그림 1-1] 연구 배경 및 목적

출처: 연구진 작성

연구 질문

Q1. 탄소중립 도시 조성을 위한 법제도와 정책에서 무탄소 에너지원은 어떻게 개념화 되어 있는가?

Q2. 무탄소 에너지를 공간에 도입하기 위한 입지적 특성은 어떻게 되며, 계획시 고려해야 할 사항들은 무엇인가?

2. 연구의 범위 및 방법

1) 연구의 범위

① 내용적 범위

■ 태양광, 풍력, 소형원전 등 무탄소 에너지원을 주요 분석 대상으로 설정

탄소중립도시를 조성하기 위해서는 기존 화석연료 기반 에너지원의 무탄소 에너지원으로의 전환이 핵심 아젠다가 된다. 그러므로 무탄소 에너지에 대한 개념과 관련 법제도, 사례분석을 통해 주요 무탄소 에너지의 유형과 특성들을 파악한다. 이 중에서 기존 도시인 사례도시에 적용검토가 필요하다고 판단되는 무탄소 에너지를 선정한다.

■ 무탄소 에너지원의 개념과 국내외 관련 현황 분석

탄소중립을 위한 필수적 수단으로서 무탄소 에너지가 무엇을 지칭하는지, 어떤 기술이 접목되어 있는지, 기존 화석연료 에너지를 얼마나 대체하고 있는지 등의 기본적인 현황을 파악한다.

국내 무탄소 에너지원의 현황은 관련 법제도와 관련 정책으로 구분되어 검토한다. 관련 법제도에서는 탄소중립이나 신재생 에너지 등과 관련된 법률에서 찾을 수 있는 무탄소 에너지 관련 사항들을 정리하여 무탄소 에너지 입지적 특성을 파악한다.

국의 무탄소 에너지원 현황은 제도보다는 적용 및 운영 사례를 찾고 분석한다. 주요 무탄소 에너지원을 활용하는 유럽이나 미국의 사례를 찾고, 주요 위치, 시설적 특징 등을 파악하고, 입지적인 특성들을 정리한다.

■ 무탄소 에너지 시범적용을 위한 사례도시 선정과 현황 검토

본 연구에서 목적하는 바, 무탄소 에너지 도입을 위해 이론상 전국단위의 최대한 많은 유형의 무탄소 에너지원의 입지기준과 입지분석을 하는 것이 필요하다. 그러나, 현 탄소중립도시 조성 초기인 상황에서 전국적인 무탄소 에너지 전환은 중장기일 것이 분명하여 시범대상을 고려했다.

그래서, 지자체 정책에 보다 실효성있는 접근을 위해 본 연구에서는 무탄소 에너지 시설들을 적용하고자 하는 사업들로서 정부 주관 탄소중립도시 조성사업인 ‘탄소중립 선도도시 조성사업’을 검토한다. 이 사업공모에 최종선정된 4개 도시들 중 도시 여건이 대규모의 화석연료 에너지의 전환없이 탄소중립이 불가능하면서도, 전환이 성공적으로 된다면 탄소중립에 보다 근접할 것이라 판단되며, 이를 위해서 무탄소 에너지원 사업들을 에너지 전환을 위한 세부사업으로 채택하고 있는 도시를 사례대상으로 검토한다.

석탄화력 발전소를 단계적으로 폐쇄함에 따라 에너지 전환이 도시의 필수 과제인 충청남도 보령시와 당진시를 무탄소 에너지 도입을 위한 시범적용 대상도시로 선정한다. 두 도시가 가지고 있는 온실가스 배출 및 석탄화력 발전현황, 무탄소 에너지원 보유 현황 등을 통해서 무탄소 에너지 도입여건을 검토한다.

■ 무탄소 에너지 도입을 위한 입지기준 마련 및 입지분석 시범적용

무탄소 에너지원을 사례도시에 적용하는 것은 입지기준을 마련하고, 공간 입지분석을 함으로써 이루어지며, 이런 일련의 과정이 본 연구에서는 무탄소 에너지 도입을 위한 시범적용을 의미한다. 입지기준의 마련은 국내외 무탄소 에너지 현황과 사례를 통해 도출된 입지특성을 종합하고, 사례도시에 무탄소 에너지를 적용하기 위해 공간분석에 필요한 평가지표들을 통합하는 것을 범위로 한다. 입지 평가지표를 구체화하기 위해서 무탄소 에너지 입지관련 문헌들을 관련 논문들을 중심으로 하되, 소형원전의 경우 관련 해외기관에서 제시하는 문서도 참고한다.

입지분석 시범적용은 보령시와 당진시 내 행정구역에 대한 입지 적정성 평가를 수행하는 것으로 이루어졌고, 평가등급별로 나누어 두 도시에 속해 있는 기초단위 행정구역들을 분류한다. 입지 분석 결과에서는 주요 입지 적정성이 높은 지역들을 제시하고, 대상이 된 무탄소 에너지의 전체적인 도입가능성 여부를 제시한다.

■ 무탄소 에너지 적용방안

무탄소 에너지 적용방안은 본 연구에서 제시하고 있는 무탄소 에너지 입지분석 방법을 기존 도시에 적용하기 위한 방안과 이를 통합하는 전체적인 무탄소 에너지 공간계획 방안, 그리고, 초기 도입 단계인 무탄소 에너지 전환추진에 필요한 과제들을 제시하는 것으로 구성한다.

무탄소 에너지 공간계획 방안은 기존 도시에 무탄소 에너지를 도입하기 위한 공간계획 방법론을 다루며, 주요 계획단계별로 구성요소와 방법론을 제시하고, 아울러서 계획한 사례도 제시한다. 무탄소 에너지 도입을 위한 적용과제에서는 탄소중립 선도도시와 같은 무탄소 에너지와 직결되는 사업들의 현안들을 정리한다. 우선은 본 연구의 사례대상인 보령시와 당진시가 탄소중립도

시 조성사업 추진에 있어 당면하고 있는 과제들을 정리하고, 새 정부의 국정과제에서 무탄소 에너지 전환의 현안은 무엇인지 제시하고, 이를 탄소중립 도시 조성이라는 장기적인 목표를 위해 무엇이 필요한지를 제시한다.

② 공간적 범위

본 연구는 무탄소 에너지 도입을 위한 시범적용을 위해서 충청남도 보령시와 당진시를 설정하고, 탄소중립 및 온실가스 배출, 에너지 현황등을 위해서 충청남도의 시군구에 대한 현황을 파악한다.

무탄소 에너지원의 도입을 위해서 개별 에너지원에 대한 입지기준을 설정하였는데, 주로 고려된 공간단위는 도시적인 차원이며, 입지기준 상에서 고려된 공간적인 특성들은 무탄소 에너지 시설의 입지가 갖는 특성, 즉, 경사도, 인구밀집지역과의 이격거리, 규제로 인한 도입불가 지역 등이 그것이다. 이를 위해서 국내의 경우 무탄소 에너지원이 적용될 수 있는 일반적인 기존 도시를 주된 공간범위로 하고, 국외사례의 경우 분석대상들의 공간범위는 해당 무탄소 에너지원 시설들이 위치하고, 에너지 운영의 영향이 미치는 도시지역, 마을, 지구 등으로 한다.

2) 연구의 방법

① 문헌 연구

국내외 무탄소 에너지원 전환과 탄소중립 도시계획 관련 연구, 정책 보고서, 법령, 조례 및 지침을 검토하여 현행 제도의 한계와 무탄소 에너지원 전환 시 고려해야 할 주요 요소를 분석한다. 특히, 무탄소 에너지 기반시설 전환과 관련된 현행 법령, 지침, 조례(국가 및 지자체 수준)를 분석하고, 입지 및 부지 활용 시 법적·제도적 장애 요소와 개선 필요사항을 도출한다.

무탄소 에너지 시설의 입지기준을 마련하기 위해서 무탄소 에너지원별 입지적 특성을 제공하는 국내외 논문, 관련 보고서를 분석한다.

② 사례 연구

국내 사례연구 대상으로 검토된 공간적 범위는 국가적인 범위와 도시적인 범위 두 가지이다. 우선 국가적인 범위에서는 현재 시행 중인 무탄소 에너지원별 관련 법제도와 탄소중립도시를 포함한 관련 정책들을 검토하였다. 도시적인 범위는 입지분석 시범적용 대상인 충청남도 보령시와 당진시이며, 이 도시들이 가진 탄소중립 도시 전환을 위한 여건으로서 무탄소 에너지 도입현황을 통해 활용성이 높은 무탄소 에너지원을 선별한다.

본 연구목적을 달성하기 위해서 주요 무탄소 에너지 도입을 위한 입지적 특성들을 국외사례를

중심으로 분석한다. 주요 대상은 유럽 등 해외 주요 탄소중립 도시의 무탄소 에너지 기반시설 전환 사례와 입지기준 관련 내용들을 조사하고, 국내 사례와 비교 분석하여 시사점을 도출하는 것으로 한다.

③ 무탄소 에너지 시범적용을 위한 입지 기준 마련과 입지 분석

충청남도 보령시와 당진시를 대상으로 GIS 기반 공간분석 기법을 활용하여 선정된 무탄소 에너지 시설의 도입 가능성을 입지분석을 통해 평가한다. 평점이 높은 순서대로 정리하고, 높은 순위인 지역들을 검토한다.

④ 무탄소 에너지 적용방안 마련을 위한 전문가 의견수렴

무탄소 에너지 전환, 도시계획, 에너지 정책, 법제도 전문가 및 지자체 실무자를 대상으로 심층 인터뷰를 실시하여 실질적 정책 운영상의 문제점과 개선 요구를 수집한다. GIS 공간분석 결과와 연계하여 현장 적용성 있는 정책 대안을 보완한다. 또한, 주요 결과들에 대한 전문가들의 의견을 수렴하여 연구에 반영한다.

3. 연구 수행 체계

① 탄소중립도시 무탄소 에너지원 전환관련 정책·제도 현안 진단

본 연구에서의 무탄소 에너지원이 갖는 개념과 도입현황을 검토한다.

■ 무탄소 에너지 개념 정의 및 법제도적 특성 분석

국제기구 및 해외 주요국, 우리나라의 무탄소 에너지 개념을 분석하고, 탄소중립도시 조성에서의 무탄소 에너지의 적용 가능성을 분석한다. 또한, 국내 법제도 사례를 통해 유형별 시설적 특성 및 입지기준에 대한 내용을 분석하고, 본 연구의 무탄소 에너지원 시설 입지 기준을 마련하는데 활용한다.

② 무탄소 에너지원 관련 사례 및 현황 분석

국외 사례도시의 무탄소 에너지원 전환 현황을 분석하고, 본 연구의 사례도시에 대한 무탄소 에너지원 적용 관련 현황들을 분석하여 무탄소 에너지원 도입을 위한 입지특성을 정리한다.

■ 국외 무탄소 에너지원 사례분석

사례도시를 지역단위, 지구단위, 도시단위로 구분하여 지역단위에서는 독일 빌트폴츠리드, 스위스 제브리호프의 에너지 자립형 커뮤니티 사례를, 지구단위에서는 네덜란드 암스테르담, 독일의 노이에 베스트슈타트의 무탄소 전환 사례를 검토한다. 도시단위 사례로는 덴마크 코펜하겐, 미국 뉴욕의 사례를 검토한다. 구체적으로는 이들 사례지역이 가진 무탄소 에너지 설비 시설, 에너지원 전환 특성, 입지기준 관련 현황들을 분석한다. 분석결과는 본 연구의 탄소중립도시의 무탄소 에너지 도입을 위한 입지기준 마련에 활용한다.

■ 사례도시 및 소속 광역지자체의 무탄소 에너지원 관련분석

광역지자체 및 사례도시의 온실가스 배출현황, 에너지원 현황, 무탄소 에너지원 전환과 관련된 계획 등 무탄소 에너지원과 관련된 내용들을 분석하여 사례도시가 갖는 탄소중립 전환의 특성, 에너지원 관점에서의 특성이 무탄소 에너지원 도입 마련에서 검토되도록 한다.

③ 사례 적용을 통한 무탄소 에너지원 기반시설 입지기준 마련 및 입지 분석

보령시와 당진시를 대상으로 GIS 기반 입지분석을 실시하여 무탄소 에너지 기반시설의 최적 입지를 도출하고, 도입을 위한 전략을 마련한다. 이를 위해서 우선, 지역의 산업·환경 여건, 토지 이용현황, 기반시설 접근성, 환경규제 등을 고려하여 입지 기준을 설정한다. GIS 공간분석을 통해 보령시와 당진시 내 최적의 무탄소 에너지 기반시설 설치 후보지역들을 제시한다.

④ 기존 도시에 활용할 수 있는 무탄소 에너지원 적용방안 마련

본 연구는 지역여건과 사례분석 결과를 바탕으로 다음과 같은 입지 및 활용 전략을 제안한다.

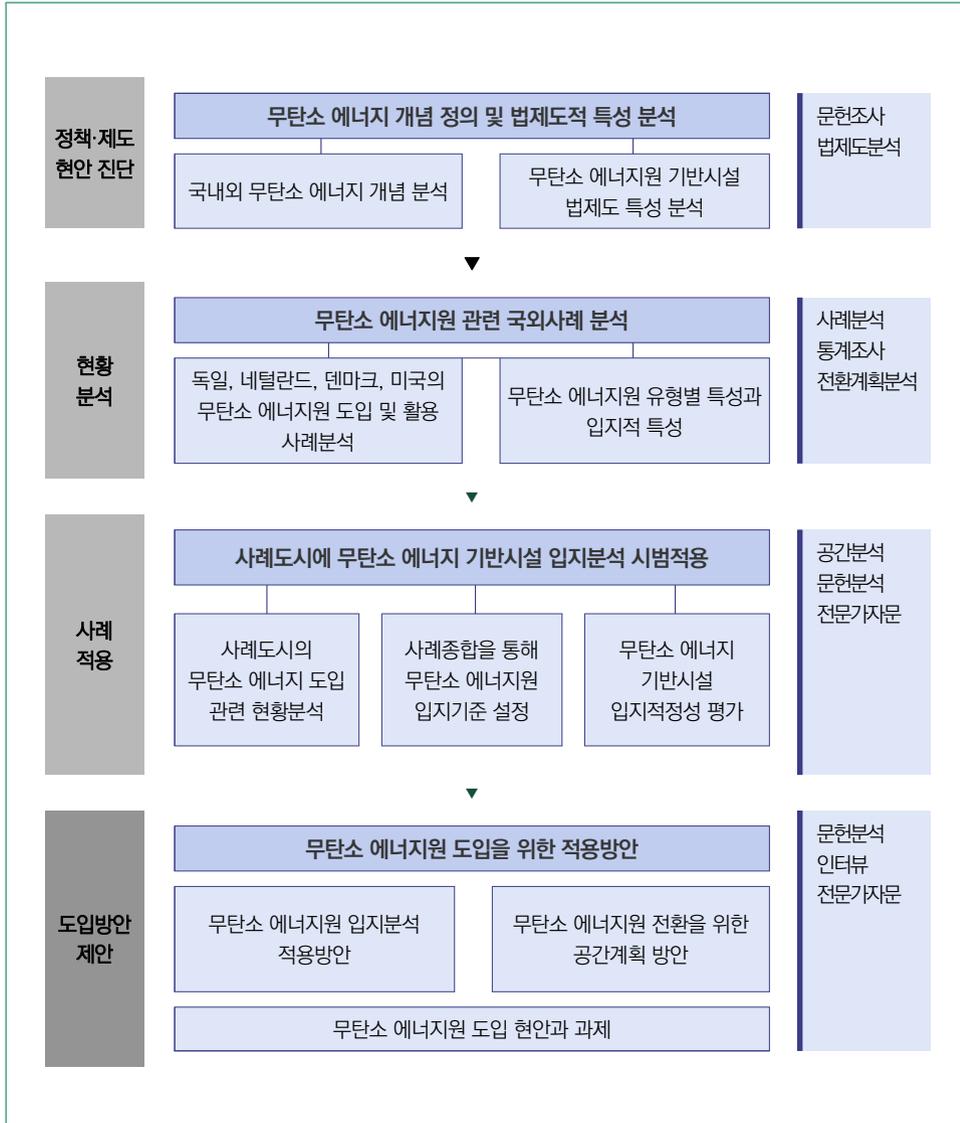
■ 무탄소 에너지원 기반시설의 입지 및 활용 전략 마련

사례도시의 특성을 고려한 무탄소 에너지 전환 방안을 제시하고, 이를 기존 도시로 확장하여 일반적인 관점에서 적용할 수 있도록 무탄소 에너지 공간계획방안을 마련한다.

■ 무탄소 에너지원 도입 현안과 바람직한 전환 방향 모색

탄소중립 선도도시 사업에 대한 보령시와 당진시 추진 현안을 관련 지자체과 논의하고, 개선방향을 제시하며, 새 정부의 국정과제를 검토하여 지속적으로 추진해야 할 무탄소 에너지 도입방향을 과제의 형태로 제시한다.

⑤ 연구의 수행 체계



[그림 1-2] 연구의 수행 체계

출처: 연구진 작성

4. 선행연구 검토 및 본 연구와의 차별성

1) 선행연구 검토

선행연구 검토결과 대부분의 연구는 탄소중립도시 조성을 위한 정책·제도적 방향에 초점을 맞추거나, 해외 사례 분석을 통한 시사점 도출에 집중하고 있었다. 일부 연구는 기술 로드맵 및 거버넌스 구축 방안을 제시했으나, 실질적인 실행방안과 도시별 차별화된 접근법은 아직 미진하였다.

또한, 개별 연구들은 중앙정부·지방정부·산업계·시민 간 협력구조를 포괄적으로 다루지 않거나, 도시 특성을 반영한 맞춤형 실행 전략이 부족하였다.

2) 본 연구의 차별성

본 연구는 탄소중립도시 선도도시 조성계획에서 제시된 탄소중립도시 조성의 핵심적 사업인 에너지 관련 도시기반시설 사업들에 대한 적용성 검증을 시행한다.

무탄소 에너지원 기반시설들의 활용에 있어 기존 시설들의 전환, 신규 시설들의 적용에 따른 법제도적인 문제점과 해결방향을 모색하고, 기초지자체를 대상으로 적용해 봄으로써 타당한 입지에 대하여 검토해 보고자 한다.

[표 1-1] 선행연구의 주요 내용 및 본 연구의 차별성

	연구목적	연구방법	주요 연구내용
선행 연구	<ul style="list-style-type: none"> • 과제명 : 한국형 탄소중립도시 지정 및 제도마련 연구 • 연구자(년도) : 박창석 외(2025)(진행 중) • 연구목적 : 탄소중립도시 정책사업의 효과적 이행과 확산을 도모할 수 있도록 현재 수준의 법제도를 검토하고 고도화 방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내외 관련 사례 및 법제도 분석 • 탄소중립도시 지정을 위한 지정제도 및 계획 분석 • 전문가 의견수렴 및 정책포럼(16개 지역연구원, 중앙부처, 국책연구기관, 지역대학 등) 운영 • 제도 이행기반 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소중립도시 제도 개선방향 마련 • 국내외 관련 사례 및 법제도 분석을 위해서 탄소중립도시 지정 관련 법제도, 국외 탄소중립도시 지정사례와 특징, 국내 관련 도시지정 사례와 특징을 분석하고, 탄소중립도시 지정제도 개선 필요성 제시 • 탄소중립도시 사례 분석, 탄소중립 선

연구목적	연구방법	주요 연구내용
		<p>도도시 계획분석, 전문가 의견수렴, 제도 이행 기반 분석을 통해서 탄소중립도시 지정제도의 주요 이슈 및 쟁점을 정리</p> <ul style="list-style-type: none"> • 한국형 탄소중립도시 지정 제도 방향 마련
<ul style="list-style-type: none"> • 과제명: 탄소중립도시 조성요소의 규제 샌드박스 도입현황 및 과제 • 연구자(년도): 이은석 외(2024) • 연구목적: 탄소중립도시 실현을 위한 탄소중립도시 조성요소 도입현황과 규제 샌드박스 활용 현황 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 문헌조사 • 지자체 탄소중립도시 사업 관련 사례 조사 • 탄소중립기본법 등 연계법령 분석 • 도시계획시설을 분석의 틀로 활용 • 규제 샌드박스의 활용성 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 2030 NDC 목표 달성에 필요한 탄소중립도시 조성 종합계획안 분석 • 탄소중립도시 조성요소를 탄소중립 기술이나 사업의 기반이 되는 도시계획시설로 정의하고, 현재 탄소중립 기술과 관련 지자체 사업이 활용하는 탄소중립도시 조성요소 특성을 분석 • 규제 샌드박스, 규제특례제도에서 탄소중립도시 조성요소 활용현황을 분석하여 탄소중립도시 조성에 필요한 규제활용방향 제시
<ul style="list-style-type: none"> • 과제명: 탄소중립도시 전환을 위한 미활용 자원 및 에너지 지능형 순환 시스템 기술개발 기획 • 연구자(년도): 박송동 외(2024) • 연구목적: 수소시범도시, 스마트도시 등을 포함한 도시공간의 특성·현황을 고려한 지역 맞춤형 저탄소·고효율 지능형 도시자원·에너지 순환 시스템 기술개발 및 실증 사업기획을 통해 정부 예산확보를 위한 예비타당성 평가 대응 	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소중립과 관련된 국내 법령 및 제도 분석 • 국내외 탄소중립도시 정책 및 연구 동향 조사 • 기술개발 기획 및 실증 방안 수립 • SWOT 분석을 통한 사업 전략 도출 • 사업 추진 로드맵 및 예산 계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소중립도시를 위한 미활용 자원 및 에너지 순환 시스템 개념 정립 • 탄소중립도시 기술개발 방향으로서 탄소중립형 도로 발전 인프라 기술 개발 필요성 제시, 지역 맞춤형 재생에너지(태양광, 풍력 등)와 스마트그리드 연계 방안 제시, 폐자원 에너지화 및 순환경제 기반 구축 필요성 제시 • 탄소중립 실증 사업 기획 및 경제성 분석 결과로 주요 대상 지역에 대한 실증 가능성 검토(수소도시, 스마트시티 등), 탄소저감 효과 및 경제적 파급효과 예측, 정부 지원 및 민간투자 유치 전략 마련
<ul style="list-style-type: none"> • 과제명: 기후위기 대응력 강화를 위한 탄소중립도시 종합계획 수립 방안 연구 • 연구자(년도): 이은석 외(2023), 건축공간연구원 • 연구목적: 탄소중립도시 조성을 위한 계획체계 및 정책적 방향성 제시, 도시 기후위기 대응력 강화를 위한 공간 및 도시계획적 접근법 연구, 탄소중립 정책과 도시계획의 연계성 강화 	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소중립기본법 및 연관 하위 및 관계 법령 분석 • 국내외 탄소중립도시 정책사업 변천사 분석 • 탄소중립도시 계획 및 설계 방안 도출 • 탄소중립도시 종합계획 수립 방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소중립도시의 개념과 필요성 정리 • 국외 탄소중립도시 사례로서, 독일 프라이부르크, 덴마크 코펜하겐, 영국 런던 등의 탄소중립도시 전략 검토 • 국내 탄소중립도시 사례로서, 수원, 서울, 인천 등의 탄소중립 정책 및 실천 사례 분석 • 탄소중립도시 종합계획을 위한 주요 수립 방향을 제시. 도시공간 구조 변화, 녹색 인프라 확대, 저탄소 교통체계 구축, 건물 에너지 효율화 및 재생에너지 활용 확대, 스마트 기술 활용 • 제도적 개선 방향으로 탄소중립 목표를 고려한 도시·국토계획 수립 지침 개정, 지방정부의 역할 강화 및 탄소중립 이행 관리 체계 정비, 도시계획과 환경정책 간 연계성 강화 등 제시

연구목적	연구방법	주요 연구내용
<ul style="list-style-type: none"> • 과제명 : 탄소중립도시를 위한 제도 개편 및 정책연구 • 연구자(년도) : 조만석(2022), 국토연구원 • 연구목적 : 탄소중립도시 조성을 위한 제도 개편 및 정책 방향 제시 	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소중립과 관련된 국내 법령 및 제도 분석 • 해외 주요 도시의 탄소중립 추진 사례 분석 • 전문가 인터뷰 및 워크숍 	<ul style="list-style-type: none"> • 부처별로 분산된 탄소중립 관련 정책에 따른 통합적 추진 필요성 제시 및 지자체의 재정 및 인력 부족의 한계 지적 • 덴마크 코펜하겐과 독일 프라이부르크 등의 사례를 통해, 중앙정부와 지방정부 간의 협력과 시민 참여의 중요성을 강조 • 탄소중립 추진을 위한 전담 조직 신설 및 부처 간 협력 체계 구축을 제안. 지자체의 역량 강화를 위한 재정 지원 및 교육 프로그램 마련을 강조
<ul style="list-style-type: none"> • 과제명 : 탄소중립도시 추진방안 마련 연구 • 연구자(년도) : 왕광익(2022), (주)코비즈 • 연구목적 : '2030 NDC' 및 '2050 탄소중립 추진전략' 등 탄소중립 사회로의 이행을 위한 범정부적 정책 실현에 기여하고 탄소중립기본법에 따른 탄소중립도시 지정권한이 부여된 국토부·환경부 공동주체가 시행할 탄소중립도시 추진방안 마련 	<ul style="list-style-type: none"> • 문헌연구 • 탄소중립도시 관련 국내외 정책분석 • 전문가 의견수렴 • 국내외 사례조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내외 관련 정책 등 검토를 통하여 탄소중립도시 개념 정립 및 탄소중립도시 추진전략 및 방향 제시 • 탄소중립도시 실현을 위한 공간구조 및 토지이용계획 등을 포함하는 지정요건과 탄소중립도시 계획 및 관리(인증) 체계 등 마련 • 탄소중립 공간계획을 우선 수립하여 도시 공간을 탄소 다배출축, 흡수축, 집중관리구역을 설정하고 집중관리 구역에 에너지 자립 향상, 인프라 구축을 추진하는 등의 국가지원사업 방안 등을 검토 • 탄소중립을 위해 국토부, 환경부 간 협력체계를 제시하고 국토계획법에 따른 도시계획과 탄소중립도시 조성계획 및 사업 실행계획을 연계하기 위한 지침(안) 마련
<ul style="list-style-type: none"> • 과제명 : 국내외 탄소중립기술 로드맵 분석 및 거버넌스 구축 연구 • 연구자(년도) : 유동현 외(2021), 에너지경제연구원 • 연구목적 : 탄소중립 실현을 위한 국내외 기술 로드맵을 분석하고, 효과적인 거버넌스 구축 방안을 제안 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내외 기술 로드맵 분석 • 탄소중립 기술개발 정책 검토 • 거버넌스 구축 방안 연구 	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 탄소중립 기술 로드맵 분석 결과로서 탄소포집·저장(CCS), 재생에너지, 수소 경제, 스마트그리드 등의 기술 분야 정책들을 제시 • 탄소중립 기술개발을 위한 R&D 정책 방향으로 국내 탄소중립 R&D 예산의 증가 추세를 분석하고, 투자 우선순위를 제안 및 산학연 협력 체계를 강화하여, 기술 개발과 실증을 연계할 필요성 강조 • 탄소중립 추진을 위한 거버넌스 구축 방안으로서 중앙정부, 지방정부, 민간기업, 연구기관 간 역할 분담과 협력 체계 명확화 필요성 필요성 제시. 탄소중립 기술 혁신을 위한 법·제도 정비와 인센티브 제공 방안을 검토 제시

	연구목적	연구방법	주요 연구내용
	<ul style="list-style-type: none"> • 과제명 : 탄소중립도시 조성을 위한 도시계획전략 연구 • 연구자(년도) : 김정곤 외(2011) • 연구목적 : 기후변화 및 에너지 시대의 대안으로 도입된 탄소중립도시의 계획이론 및 조성전략을 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 문헌 연구를 통한 탄소중립도시의 개념 정립과 필요성 이해 • 국내외 사례 분석을 통해서 탄소중립 도시 조성을 위한 도시계획 전략을 도출 	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소중립도시는 생태도시와 지속가능한 도시의 개념을 포함하며, 탄소 배출량을 최소화하고 에너지 효율성을 극대화하는 도시 모델로 정의 • 탄소중립도시 조성을 위한 도시계획 전략을 4가지로 정리. 고밀도 개발과 혼합토지이용을 활용한 도시 구조 및 토지 이용, 대중교통과 저탄소 교통 계획, 재생에너지와 에너지 효율화 건축물을 중심으로 한 에너지 관리, 도시 내 녹지와 도시 숲을 통한 탄소흡수능력 향상
본 연구	<ul style="list-style-type: none"> • 과제명: 탄소중립도시 실현을 위한 무탄소 에너지원 적용 방안 연구 • 연구목적 : <ul style="list-style-type: none"> - 탄소중립도시 실현을 위한 무탄소 에너지원의 적용 타당성을 지역 단위에서 검토 - 탄소중립도시 사례지역에 무탄소 에너지원 기반시설을 도입하여 적용성을 파악 	<ul style="list-style-type: none"> • 문헌 연구 • 사례 연구 • 입지 타당성 분석 (GIS 공간분석) • 전문가 인터뷰 및 설문조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소중립도시 무탄소 에너지원 전환 관련 정책·제도 현안 진단 • 무탄소 에너지원 관련 사례 및 현황 분석 • 사례 적용을 통한 무탄소 에너지원 기반시설 최적 입지 분석 • 무탄소 에너지원 도입을 위한 정책 전략 및 실행방안 마련

출처: 연구진 작성

제2장

무탄소 에너지 국내외 도입현황

1. 무탄소 에너지의 개념 및 정의
2. 국내 무탄소 에너지 도입현황
3. 국외 무탄소 에너지 도입사례

1. 무탄소 에너지의 개념 및 정의

1) 국제사회의 무탄소 에너지 개념

■ 무탄소 에너지 개념의 등장배경

무탄소 에너지(Carbon-Free Energy, CFE) 개념이 본격적인 정책 용어로 사용되기 시작한 것은 2020년 전후로 UN(United Nations), IEA(International Energy Agency) 등 국제기구에서 탄소중립을 위한 핵심수단 중 하나로 제시되면서 부터다.

무탄소 에너지 개념은 태양광, 풍력, 수력 등 재생에너지원뿐만 아니라 소형원자력, 청정수소 등 다양한 기술 기반의 에너지원까지 포함하는 방향으로 확장되고 있다. 특히, 탄소중립을 위한 전략적 수단으로서의 에너지믹스 구성을 고려할 때, ‘무탄소’의 판단 기준은 단순한 연료의 기원이 나 지속가능성의 관점에 머물지 않고 실질적인 온실가스 배출계수, 계통 연계 가능성, 시간대별 대응력 등 다기능적 조건을 포함하는 방향으로 진화하고 있다. 이러한 맥락에서 무탄소 에너지 개념은 단순한 에너지원의 분류를 넘어 에너지원 자체의 전력 생산과정에서 탄소 배출 여부와 함께 전력 수요와의 실시간 정합성, 전력망과의 계통 연계성 등 복합적인 조건을 포괄하는 개념으로 확장되고 있다.

■ 국제기구 및 해외 주요국의 무탄소 에너지 정의

- UNFCCC, “24/7 Carbon-Free Energy” : 하루 24시간, 매 시간 소비되는 전력이 무탄소 전원으로 충당되는 것

UNFCCC는 2021년 “24/7 무탄소 에너지(24/7 Carbon-Free Energy) 이니셔티브”를 출범하면서 무탄소 에너지를 “하루 24시간, 매 시간 소비되는 전력이 무탄소 전원으로 충당되는 것”으로 정의하고 있다(UNFCCC, 2021). 이는 단순히 연간 총량 기준의 재생에너지 사용을 넘어 전력 수요와 공급이 시간 단위로 정합되도록 요구하는 개념으로 실시간 무탄소 전력 매칭을 강조하고 있다. UNFCCC는 이 개념이 전력 부문 탈탄소화를 가속화하기 위한 실질적 이행 수단이자 기업·도시·국가가 무탄소 전력을 실시간으로 안정적으로 확보하기 위한 기준점이 될 수 있다고 보고 있다.

- 미국 연방정부, “Carbon pollution-free electricity” : 탄소를 배출하지 않는 자원에서 생산된 전기

미국 연방정부는 「연방 지속가능성 계획(Federal Sustainability Plan, 2021)」에서 2030년까지 연방정부 시설에 100% “탄소 무배출 전력(Carbon pollution-free electricity)”을 공급하는 목표를 설정하고, 탄소 무배출 전력에 대하여 “탄소를 배출하지 않는 자원에서 생산된 전기”로 정의했다(The White House, 2021, p.17). 여기에 해당하는 에너지원으로는 태양광, 풍력, 수력, 원자력, 지열, 재생 가능한 수소와 탄소포집 및 저장(CCS) 기술을 적용한 화석연료 기반 전력까지 포함된다.



[그림 2-1] 미국 연방 지속가능성 계획

출처 : The White House Washington(2021, p.11)

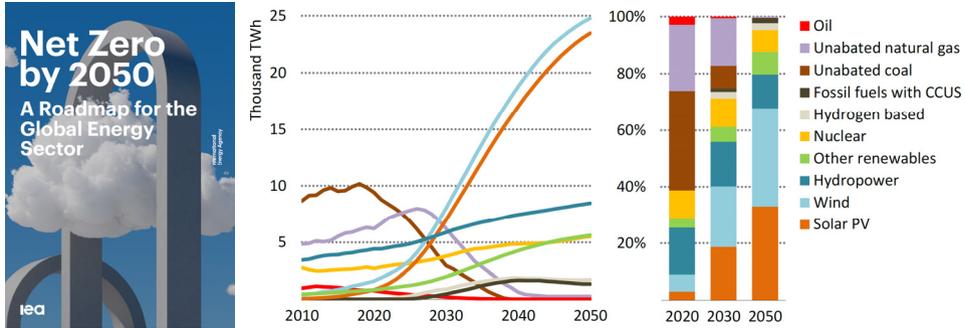
- EU, “Non-emitting Energy Sources” : 온실가스 배출량이 100g CO₂eq/kWh 이하인 전원

유럽연합 EU는 지속가능경제분류체계(EU Taxonomy)에서 무탄소 에너지를 온실가스 배출량 기준으로 제도화하고 있다. EU는 발전 에너지원의 온실가스 배출량이 100g CO₂eq/kWh 이하인 경우 이를 지속가능하거나 탄소중립에 부합하는 전원으로 분류하며, 이 범주에는 재생에너지는 물론 일부 원자력, 청정수소도 포함된다(European Commission, n.d.).

- IEA, “Low-emissions electricity” : 재생에너지, 원자력, 탄소포집 및 저장 기술을 적용한 화석연료를 기반으로 생산된 전력

국제에너지기구 IEA는 「2050 순배출 제로를 위한 에너지 부문 로드맵(2050 Net Zero by 2050 : A Roadmap for the global Energy Sector, 2021)」에서 재생에너지, 원자력, 탄소포집저장(CCUS)을 적용한 화석연료를 포함한 전력을 “저배출 전력원(low-emissions electricity sources)”으로 규정(IEA, 2021, pp.99)하고, 이를 전력 부문의 탈탄소화를 위한 핵심 수단으로

제시하고 있다. 다만 UN이나 미국 연방정부와 달리, IEA는 ‘무탄소(Carbon-Free)’라는 표현을 사용하지 않고 온실가스 배출을 낮추는 전원이라는 점에 방점을 둔 ‘저배출(low-emissions)’ 개념으로 접근하고 있다.



[그림 2-2] IEA 2050 순배출 제로를 위한 에너지 부문 로드맵

출처 : IEA(2021, p.46)

2) 국내 무탄소 에너지 개념 및 정의

■ 우리나라 주도 무탄소 연합 공식 출범과 무탄소 에너지 기준 마련 착수

2023년 9월, 제 78회 UN총회 기초연설에서 우리나라는 ‘무탄소 연합(Carbon Free Alliance)’의 공식 출범을 제안하며, 무탄소 에너지의 국제적 확산을 위한 글로벌 협력 플랫폼 필요성을 주장하였다. 이 자리에서 제시된 “무탄소 에너지(Carbon-Free Energy)”의 정의는 다음과 같다.

무탄소 에너지 개념

전기 생산 과정에서 직접 탄소를 배출하지 않는 모든 에너지원으로,

- 재생에너지(태양광, 풍력, 수력, 지열, 바이오매스 등)는 물론 원자력, 청정수소, 탄소포집·활용·저장(CCUS)까지 포함
- 특정 에너지원을 사전에 지정하기 보다 온실가스 배출량의 최소 기준을 정하고 그 이하를 일컫는 ‘기술 중립적’ 개념

출처 : 산업통상자원부(2023, 9월 21일 보도자료p.3)

이 개념은 기존의 재생에너지 중심 접근을 보완하고자 하는 의도를 반영한다. 특히, 기업의 탄소 중립 이행수단이 재생에너지(RE100)에만 제한될 경우, 국가 간 여건 차이와 기술적 현실을 반영하지 못하는 한계가 지적되어 왔다. CF 연합은 이에 대응하여 원자력, 수소, CCUS 등 비 재생에너지 기반의 무탄소 기술까지 포함하는 기술 중립적 에너지 이니셔티브를 지향한다.

무탄소 연합의 주요 미션 중 하나는 무탄소 에너지의 이행·검증 체계 및 국제표준 수립이다. 즉, 무탄소 에너지 공급부터 소비까지 전 과정에 대한 인증제도 설계 및 국가 간 상호인정 체계 마련을 위한 국제적 기준을 수립한다. 이에 2023년 10월에 무탄소 연합이 출범(국무조정실, 2023, 10월27일 보도자료)했으며, 2025년 2월에 무탄소 에너지 글로벌 작업반 제1차 회의가 개최되면서 무탄소 에너지 국제기준 마련이 본격 착수되었다(산업통상자원부, 2025, 2월9일 보도자료).

■ 「환경친화적 산업구조로의 전환 촉진에 관한 법률」 개정안의 무탄소 에너지 정의

2024년 12월, 「환경친화적 산업구조로의 전환 촉진에 관한 법률」 일부개정안에서 무탄소 에너지의 법적 정의를 명문화하려고 시도한 사례가 있다. 2024년 10월에 무탄소 에너지 연합 청정에너지장관회의에서 무탄소 에너지 이니셔티브 글로벌 작업반이 공식 출범하면서 향후 무탄소 에너지 확산에 대비하여 무탄소 에너지에 대한 정의 규정과 공급 인증에 대한 규정을 신설하고자 하였다. 법안의 제2조 제14호에서는 무탄소 에너지를 다음과 같이 정의하고 있다.

환경친화적 산업구조로의 전환촉진에 관한 법률 일부개정법률안

환경친화적 산업구조로의 전환촉진에 관한 법률 일부를 다음과 같이 개정한다.

제2조에 제14호를 다음과 같이 신설한다.

14. "무탄소 에너지"란 생산 과정에서 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 제2조제5호의 온실가스를 배출하지 아니하는 에너지로서 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 것을 말한다.

- 가. 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」 제2조제1호 및 제2호에 따른 신에너지 또는 재생에너지나, 「원자력안전법」 제2조제1호에 따른 원자력
- 다. 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 제2조제7호의2에 따른 청정수소
- 라. 그 밖에 대통령령으로 정하는 것

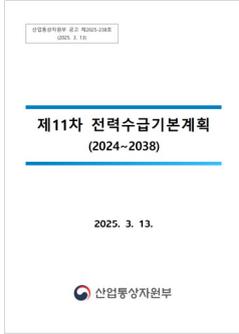
출처 : 환경친화적 산업구조로의 전환촉진에 관한 법률 일부개정법률안(의안번호 6657)

법안에서는 무탄소 에너지의 정의를 탄소 배출 여부에 대한 기능적 기준을 설정하면서도 구체적인 에너지원 목록을 명시함으로써 제도 운용의 명확성과 유연성을 동시에 확보하려고 한 것으로 보인다. 개정안은 아직 시행되고 있지는 못하고 있으나 국내에서 무탄소 에너지의 법적 정의를 명확히 하고 공급 인증 체계를 제도화하고자 한 첫 입법적 시도로서 의의가 있다.

■ 제11차 전력수급기본계획에서의 “무탄소전원” 본격화

산업통상자원부가 2025년 3월에 공고한 「제11차 전력수급기본계획(24~38)」에서 “무탄소 전원” 개념이 정책적으로 본격 도입되었다. 해당 계획에서는 “무탄소 전원”에 대한 명확한 정의가 제시되지는 않았지만, 계획 전반에 걸쳐 주요 정책과제에 반복적으로 사용되며 정책 용어로서 실질적인 의미를 갖기 시작한 것으로 평가된다.

계획에서 무탄소 전원은 탄소중립 목표 달성을 위한 전원 구성의 핵심 원칙으로 제시되고 있다(산업통상자원부, 2025, p.47). 무탄소 범주에는 원자력, 재생에너지(태양광 및 풍력), 청정수소 발전, 암모니아 혼소 발전 등이 포함됐다(산업통상자원부, 2025, p.44). 이러한 분류는 단지 재생에너지 중심의 접근을 넘어 탄소 배출이 없거나 극히 낮은 전원을 포괄하는 기술 중심의 기준을 지향하고 있다. 특히 “무탄소 전원 믹스 확보”, “무탄소 에너지 중심의 전원 구성”, “무탄소 전원의 역할” 등이 다양한 맥락에서 용어가 활용되며, 단편적인 재생에너지 중심의 협의적 접근을 넘어 전력계통 내 공급 안정성과 기능적 역할까지 고려되고 있다.



연도	구분	원전	석탄	LNG	재생e	신e	청정수소 암모니아	기타	합계	탄소	
										탄소	무탄소
'23년 (실적)	발전량	180.5	184.9	157.7	49.4	7.2	-	8.3	588.0	358.2	229.9
	비중	30.7	31.4	26.8	8.4	1.2	-	1.4	100.0	60.9	39.1
'30년	발전량	204.2	110.5	161.0	120.9	18.7	15.5	11.8	642.6	302.0	340.6
	비중	31.8	17.2	25.1	18.8	2.9	2.4	1.8	100.0	47.0	53.0
'35년	발전량	236.0	88.9	101.1	179.9	24.3	32.8	28.5	691.5	242.8	448.7
	비중	34.1	12.9	14.6	26.0	3.5	4.7	4.1	100.0	35.1	64.9
'38년	발전량	248.3	70.9	74.3	205.7	26.4	43.9	34.9	704.5	206.7	497.8
	비중	35.2	10.1	10.6	29.2	3.8	6.2	5.0	100.0	29.3	70.7

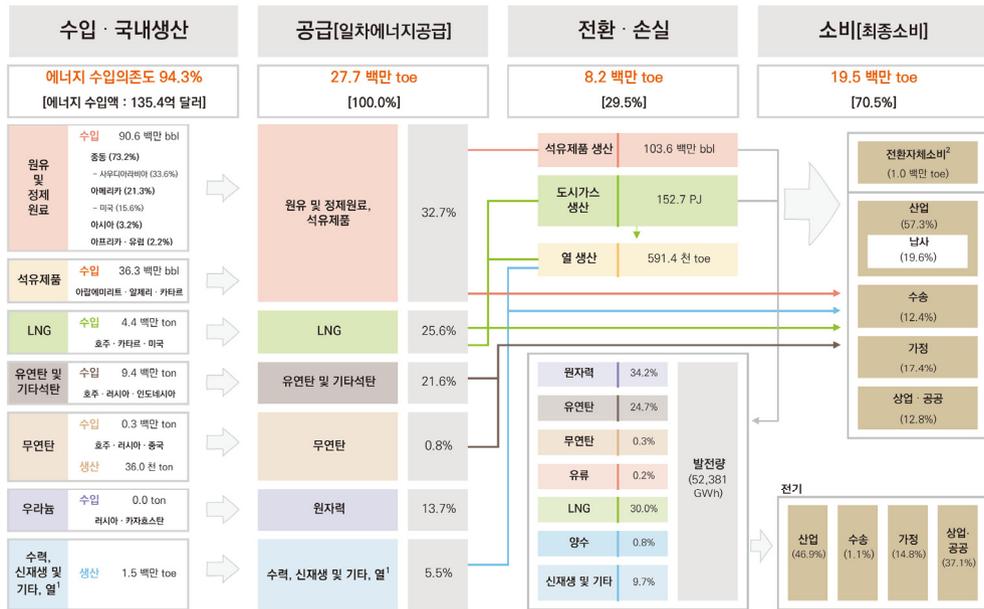
* 무탄소발전 : 원전 + 재생 + 청정수소·암모니아
 ** 신규설비 중 '무탄소경쟁' 물량은 수소전소(0.7GW) 및 ESS연계형 태양광(0.8GW)으로 반영

[그림 2-3] 제11차 전력수급기본계획의 에너지원별 발전량 전망

출처 : 산업통상자원부(2025, p.51)

3) 국내 에너지 밸런스 현황

① 우리나라 에너지원 구성 현황 및 공급·수요 구조

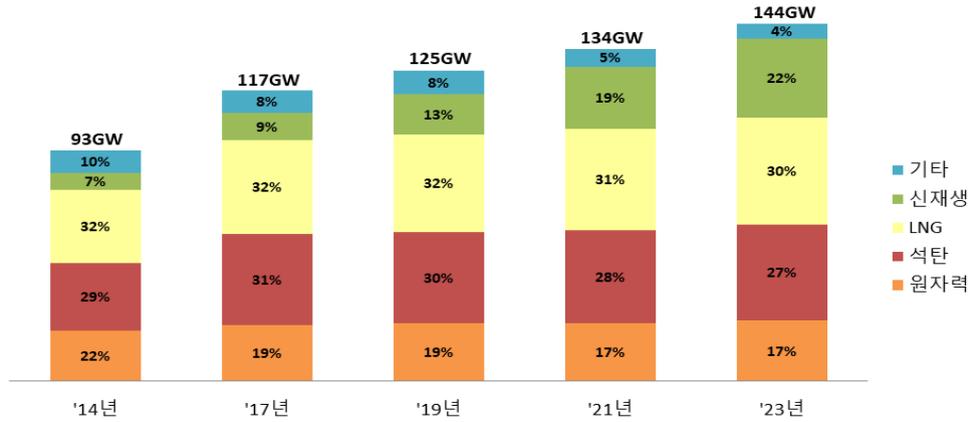


[그림 2-4] 2025년 1월 기준 국내 에너지밸런스 현황

출처 : 산업통상자원부·에너지경제연구원(2025, p.2)

우리나라는 매우 높은 수입 의존형 에너지 공급구조를 가지고 있어, 국제 에너지 시장의 가격 변동과 지정학적·외교적 리스크에 대해 구조적으로 취약한 상황에 놓여 있다. 무연탄 36,000톤과 수력·신재생에너지 및 기타, 열에너지 등 국내 생산 150만 TOE를 제외하면, 원유·석유제품, 천연가스(LNG), 유연탄 등 대부분의 주요 에너지원은 모두 해외 수입에 의존하고 있는 실정이다.

특히, 일차에너지 공급 기준으로 보면, 원유·석유제품이 32.7%, 천연가스가 25.6%, 유연탄·무연탄이 22.4%를 차지하며 80.7%가 화석연료 기반 에너지로 구성되어 있다. 이에 비해 수력, 신재생 및 기타, 열에너지 등을 통해 국내에서 생산·공급하는 비율은 5.5%에 불과하며, 이는 OECD 국가들의 평균 재생에너지 발전 비중(30%¹⁾)과 비교했을 때 현저히 낮은 수준이다.



[그림 2-5] 국내 발전설비 용량기준 원별 비중

출처 : 산업통상자원부. (2025, p.5)

에너지 전환 과정에서 발생하는 손실량도 전체 에너지공급량의 약 29.5%, 즉 820만 TOE에 달하는 것으로 나타난다. 이는 정제, 발전, 도시가스·열 생산 등의 전환 과정에서 에너지가 상당 부분 손실되거나 자체 소비됨을 의미하며 전환 효율 측면에서의 구조적 개선 필요성을 시사한다.

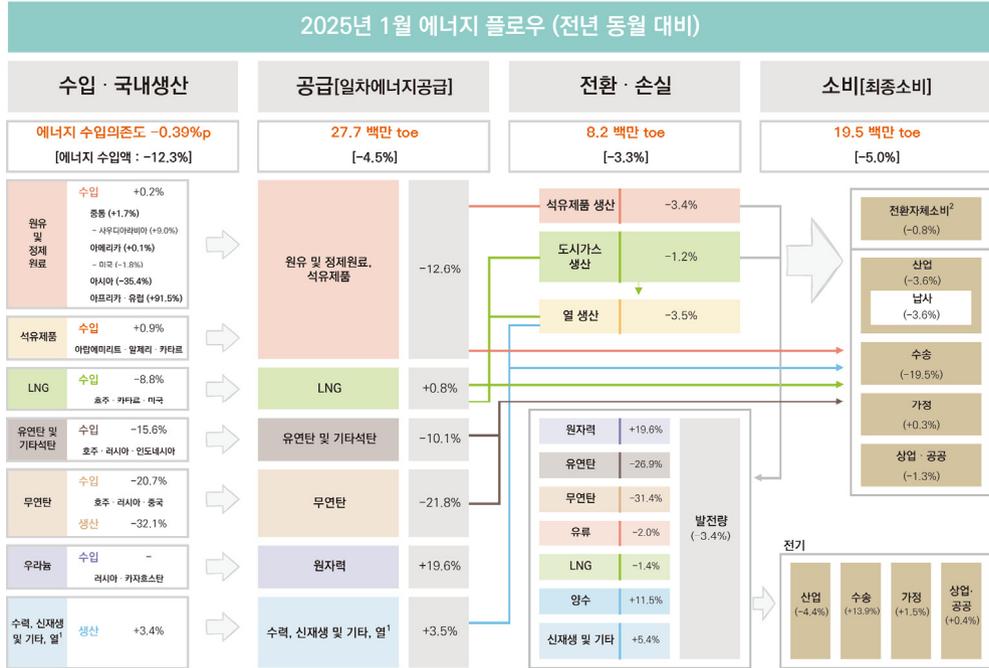
최종에너지 소비 단계에서는 산업 부문이 57.3%로 가장 높은 비중을 차지하고 있으며, 이 중에서도 납사(석유화학 원료)의 비중이 상당히 높은 점은 국내 산업구조가 제조업 중심으로 구성되어 있음을 보여준다. 건물 부문에 해당하는 가정 부문과 상업·공공 부문은 각각 17.4%와 12.8%를 차지, 합산 시 약 30%를 상회하는 에너지 수요 비중을 보인다. 전기 소비 측면에서는 가정 부문이 전체 전력 소비의 14.8%, 상업·공공 부문이 37.1%를 차지하고 있어 전력 소비가 가정보다 상업·공공 부문에서 더 집중적으로 발생하고 있음을 보여준다.

② 화석연료 및 비화석연료 에너지 현황

우리나라의 에너지 공급 및 발전 구조는 여전히 화석연료 중심의 체제에서 크게 벗어나지 못한 상황이다. 2025년 1월 기준 발전에 사용된 주요 에너지원의 비중을 살펴보면, 원자력(34.2%)을

1) IEA(2024, https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/oecd-share-of-electricity-generation-by-source?utm_source=chatgpt.com)

제외한 유연탄(24.7%), LNG(30.0%), 무연탄(0.8%) 등 화석연료 기반 발전이 전체의 55.5%를 차지하고 있어 탄소 배출을 수반하는 전력 생산 비중이 과반 이상을 차지하는 구조다.



[그림 2-6] 2025년 1월 기준 국내 에너지밸런스 현황(전년 동월 대비)

출처 : 산업통상자원부-에너지경제연구원(2025, p.2)

한편, 비화석연료 에너지원에 해당하는 발전원 중 원자력은 34.2%의 발전 비중을 기록하며 전년 동월 대비 19.6% 증가하였다. 신재생 및 기타 발전원 또한 9.7%의 발전 비중으로 전년 동월 대비 5.4% 증가하며 완만한 성장세를 보이고 있으나 전기 생산량에서 차지하는 비율은 여전히 매우 제한적이다. 이는 전반적으로 우리나라의 에너지 밸런스 구조가 화석연료에서 비화석연료 기반의 무탄소 전원으로 구조적 전환을 이루기 위해서는 원자력에 대한 높은 의존도를 줄이고 재생에너지 중심의 체계로 이행하는 전략이 병행되어야 함을 의미한다.

4) 소결

무탄소 에너지원은 단일 기술군을 의미하는 것이 아니라, 전력 생산 과정에서 탄소를 직접 배출하지 않는 모든 전원을 포괄하는 기술 중립적 개념으로 정립되는 것으로 나타났다. 이는 태양광·풍력·수력·지열 등 재생에너지뿐 아니라, 원자력, 청정수소, 암모니아 혼소, CCUS 기반 전원까지 포함하는 확장된 범주이며, 각 전원의 기술 특성을 구분하면서도 탄소 배출량을 최소화한다는 공통 목적을 기준으로 묶는 개념이다. 이러한 정의는 최근 국제사회에서 제시된 24/7 Carbon-Free Energy 논의, 그리고 대한민국이 주도한 ‘무탄소 연합(Carbon Free Alliance)’ 구상과 연계되며, 국내 정책에서도 무탄소 에너지 개념을 전원 구성의 핵심 기준으로 도입하는 배경이 되고 있다.

국내 전력·에너지 구조 측면에서 보면, 무탄소 에너지원은 단순한 전원의 선택 문제가 아니라, 한국 에너지 시스템의 구조적 한계를 해소하기 위한 핵심 전략임이 분명하게 확인된다. 그 이유는 우리나라 1차 에너지 공급의 약 85% 이상이 화석연료 수입에 의존하고 있으며, 국내 생산은 5% 수준에 불과하다는 점을 보더라도 그러하다. 발전 부문 또한 화석연료 발전 비중이 55.5%로 여전히 절대적이며, 재생에너지 비중은 10% 내외에 머물러 있다. 더불어 에너지 전환 과정에서 발생하는 손실이 전체 공급의 29.5%에 달하는 구조적 비효율성도 존재한다. 이러한 현실은 기존의 화석 중심 공급 체계만으로는 장기적 에너지안보, 전력계통 안정성, 탄소중립 목표를 동시에 달성하기 어렵다는 점을 시사한다.

이러한 구조적 제약 속에서 무탄소 에너지원은 다음과 같은 점에서 국내 에너지 밸런스를 재구성할 수 있는 핵심 축으로 기능한다. 첫째, 원전·재생·수소 등 국내에서 조달 가능하거나 국내 생산 비중을 높일 수 있는 전원을 기반으로 수입 의존형 공급 구조를 완화할 수 있다. 둘째, 산업·도시·수송의 전기화가 확대되는 상황에서, 전력 자체의 탄소 배출을 최소화함으로써 최종 부문의 탄소중립을 실질적으로 보장할 수 있다. 셋째, 전력계통 운영 측면에서 원전·수소·재생에너지의 조합을 통해 기저전원·변동전원·피크 대응이 가능한 균형적 포트폴리오를 구축할 수 있어 전력 공급의 안정성과 예측 가능성을 향상시키는 기여가 크다고 할 수 있다.

결론적으로, 무탄소 에너지는 한국의 에너지 시스템을 화석연료 기반에서 무탄소·국내 생산 중심 구조로 전환시키기 위한 필수적이고 전략적인 전원군이다. 업로드된 문서가 제시한 국내 에너지 구조 분석은 무탄소 전원의 확대가 단순한 친환경적 선택이 아니라, 국가경제·전력안보·국민생활 안정과 직결된 구조적 요구임을 분명히 보여준다.

이러한 무탄소 에너지 개념의 동향을 바탕으로 우리나라에서는 어떠한 관련 정책과 법·제도가 운영되고 있는지를 파악하고자 한다.

2. 국내 무탄소 에너지 도입현황

1) 국내 무탄소 에너지 정책 동향

① 제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획에서의 무탄소 에너지 정책

정부는 2023년 3월 「제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획(2023~2042)」을 수립하고 에너지 시스템 전반에 걸친 구조적 전환을 본격화하고 있다. 특히 전력과 열을 중심으로 하는 기존의 화석연료 기반 에너지 체계를 무탄소 에너지원 중심으로 전환하는 것이 핵심이다. 이는 단순히 발전원의 구성을 바꾸는 수준을 넘어 에너지 시스템 전반의 연쇄적 구조를 고려해 발전·열 공급 중심의 전환부문은 물론, 건물·수송·수소 등 도시 기반 부문의 에너지 전환을 종합적으로 접근하고 있다.

제1차 국가 탄소중립·녹색성장 정책 기조는 발전 중심의 전력 공급 전환을 넘어, 도시와 건축 공간 단위의 에너지 수요 감축과 전기화, 그리고 이와 연계된 재생에너지 분산형 보급 전략까지 포함하는 구조적 개편을 지향하고 있다

부문별 감축정책	전 환	산 업	건 물	수 송	농 축수 산
	<ul style="list-style-type: none"> · 석탄발전 감축 · 원전+재생e↑ · 수요 효율화 	<ul style="list-style-type: none"> · 핵심기술 확보 · 기업지원 · 배출권 고도화 	<ul style="list-style-type: none"> · 제로에너지 건축물 확대 · 그린리모델링 	<ul style="list-style-type: none"> · 무공해차 보급 · 철도·항공·해운 저탄소화 	<ul style="list-style-type: none"> · 저탄소 농업구조 전환 · 어선 및 시설 저탄소화
	폐 기물	수 소	흡수원	CCUS	국제감축
	<ul style="list-style-type: none"> · 지속가능한 생산·소비체계 · 자원 순환 이용 확대 	<ul style="list-style-type: none"> · 청정수소 공급 확대 · 수소활용 생태계 강화 	<ul style="list-style-type: none"> · 산림순환경영 · 내륙·연안습지 복원 및 보호 	<ul style="list-style-type: none"> · 법령, 저장소 등 인프라 마련 · 기술확보·상용화 R&D 	<ul style="list-style-type: none"> · 민관합동지원 플랫폼 · 부문별 사업 발굴 및 이행

[그림 2-7] 제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획의 부문별 감축정책 중 무탄소 에너지 연관 과제

출처: 관계부처 합동(2023, p.24)

■ 전력 생산 방식의 전면적인 개편

기존 석탄화력 중심의 발전 시스템에서 벗어나 원자력, 재생에너지, LNG 등의 전원을 조합해 저탄소 및 무탄소 중심으로 발전구조 전환을 추진한다(관계부처 합동, 2023, p.26). 특히 석탄발전은 신규 건설 없이 노후설비 28기를 2036년까지 폐지하고 일부는 LNG로 전환되며, 발전믹스에 서의 퇴출 수순이 본격화되고 있다. 이는 전력 생산 구조 자체를 바꾸는 조치로서 장기적 공급 안정성과 탄소감축 목표 간의 균형을 고려한 계획이다. '원자력은 "무탄소 전원"으로서 정책적으로 다시 중심에 배치되어 건설 재개(신한울 3·4호기) 및 지속적인 운전이 추진되고 있다(관계부처 합동, 2023, p.26).

■ 에너지 공급-수요 간 연계구조 최적화

공급 측면의 무탄소 에너지 전환과 동시에 수요 측면의 효율화와 감축을 유도하는 구조적 연계 정책을 병행한다.

건물부문에서는 제로에너지건물(ZEB), 고효율 설비, 에너지관리시스템 보급이 확대되고, 수송 부문에선 전기차와 수소차 보급이 연계되며 전체 수요부문의 전력화 및 효율 제고가 추진된다. 이는 전력공급 구조의 무탄소 전환이 수요구조와 분리되어서는 실효성이 낮다는 점을 전제로 한 것으로, 에너지 수요-공급 간의 통합적 감축 구조 설계를 의미한다. 정부는 특히 수요관리 효율화와 함께 가격신호를 통한 합리적 소비 유도 및 피크 수요 억제 정책도 병행하고 있다(관계부처 합동, 2023, pp.28-29).

■ 전력계통 운영 및 전력시장 제도 정비

무탄소 에너지 확대에 따라 기존의 전력시장 구조와 계통운영 방식이 이를 뒷받침할 수 있도록 개선하는 것이 요구된다. 정부는 실시간 가격 반영, 계통 혼잡 해소, 비화석 전원에 대한 시장 인센티브 확보 등 탄소중립 친화적인 전력시장 개편 방안을 추진하고 있으며, 특히 재생에너지와 같은 간헐성 전원 증가에 따른 계통 안정성 문제를 제도적으로 보완하려는 노력이 동반된다(관계부처 합동, 2023, p.31). 이는 전력공급만이 아니라 시장 설계와 운영 규칙 전반이 '무탄소 전원 중심'으로 전환되는 체계적 변화로 해석된다.

■ 전력 인프라의 무탄소 에너지 적합성 강화

무탄소 전원의 확대가 실제로 가능하려면, 이를 수용할 수 있는 전력계통-송배전 인프라의 정비가 선행되어야 한다. 정부는 "선(先) 계통·후(後) 발전설비" 전략을 통해 대규모 풍력발전지구에 대한 공동접속설비 선 구축을 추진하고 있으며, 에너지저장장치(ESS) 보급 확대, 계통 연계 보조

설비 설치, 계통 수용성 제고 기술 확보 등도 병행하고 있다(관계부처 합동, 2023, pp, 27, 30). 이러한 기반 강화는 무탄소 전원 도입의 물리적 한계를 해소하는 데 핵심적인 요소이며, 특히 지역분산형 전원 확산과 연계된 지방계획 체계와의 통합도 함께 추진 중이다.

■ 건물 부문에서의 에너지 전환 및 재생에너지 확대

건물 부문은 에너지효율 향상과 함께 에너지원을 전기·재생에너지 중심으로 전환하는 전략이 동시에 추진된다.

건축물의 에너지효율 향상 측면에서는 신규·기존 건축물의 제로에너지건물 의무화 단계적 확대, 공공건축물 선도 적용, 민간 확대 등의 조치를 통해 건축물 자체의 에너지 수요를 줄이는 대책이다. 또한 고효율 설비 도입(LED, 고효율 히트펌프 등) 및 건축물 에너지관리시스템(BEMS) 보급을 강화해 건물 내 에너지 소비 효율을 실질적으로 향상시키고 있다(관계부처 합동, 2023, p, 47).

무탄소 에너지 전환 측면에서는 도시재생 등 연관 정책사업과 연계해 화석연료 사용 건축물의 연료를 단계적으로 전력화를 추진한다. 또한 태양광, 지열, 수열 등 건물 내외부에서의 재생에너지 직접 활용이 본격화되며, 도시 단위 분산형 에너지 생산·소비 체계를 정착시키려는 노력이 진행 중이다(관계부처 합동, 2023, p, 47).

이러한 조치는 단순한 건물 에너지 절감 차원을 넘어, 도시 차원에서의 무탄소 에너지 순환 시스템 구현을 위한 핵심 기반으로 기능하게 된다.

■ 도시 인프라와 연계된 수송부문 무탄소 에너지 전환

도시기반시설과 밀접한 수송 부문은 전기차, 수소차 등 무탄소 연료 기반 교통수단의 확산을 통해 전환이 추진되고 있으며, 이는 도시 공간 구조 및 인프라의 계획적 연계와 불가분의 관계에 놓여 있다. 제1차 국가계획에서는 특히 수송부문을 도시 단위의 에너지 소비 구조 전환과 직접 연결되는 전략 분야로 규정하고, 전기화 및 수소화 중심의 교통수단 전환, 이를 뒷받침할 충전 인프라 확충, 운송수단 전환을 위한 제도 기반 구축 등을 다층적으로 병행하고 있다(관계부처 합동, 2023, pp, 50-54).

전기차는 충전속도 개선, 보조금 재설계 등을 통해 민간 수요를 견인하며, 수소차는 공공차량·화물차 등 특정 영역 중심으로 선도적으로 도입된다. 전기차용 급속·완속 충전기뿐 아니라, 수소차를 위한 충전소 확대가 병행되며, 특히 도시 내 거점 기반 복합형 충전소(전기+수소 통합형) 구축도 주요 과제로 추진된다. 노후경유차 교체, 전기버스·전기택시 보급, 친환경 선박(연안 여객선), 전기철도 확대 등을 통해 공공교통 인프라 차원의 무탄소화도 적극적으로 병행한다(관계부처 합동, 2023, pp, 51-52).

이러한 수송수단의 변화는 단순한 차량 전환을 넘어, 도시공간 내 인프라 배치, 주차시설 계획, 충전망 공간계획 등 도시계획 요소와 긴밀히 통합되어야 하며, 정부는 이를 위한 제도 기반도 구축하고 있다(관계부처 합동, 2023, pp, 51-52).

■ 무탄소 에너지원으로서 수소에너지 도입 전략

수소는 단순한 산업용 원료가 아닌 산업·발전·수송·건물 부문 전반에 걸쳐 활용 가능한 범용적 무탄소 에너지원으로, 이를 기반으로 한 에너지 체계 전환을 적극 추진하고 있다. 특히 기존의 부생수소 중심 공급 구조에서 벗어나, 수전해 기반의 그린수소 및 탄소포집 기반의 청정수소 등 탄소 배출이 없는 수소 생산방식으로 점진적인 구조 전환을 도모하고 있다. 이러한 방향은 수소 생산 기술의 고도화와 경제성 확보 방안을 병행하여 추진되고 있다(관계부처 합동, 2023, p.73).

또한 정부는 수소의 탄소중립적 활용을 제도적으로 담보하기 위해 청정수소 인증제를 도입하고, 이를 기반으로 수소 발전시장 제도화와 같은 거래 및 보조정책을 연계하는 등 수소 유통과 소비 전 과정의 체계적 전환을 설계하고 있다. 수소의 활용 측면에서는 연료전지 기반의 건물용·이동형 에너지 시스템 확산, 수소혼소 발전기술의 개발, 그리고 수소 배관 및 저장 인프라의 기술 확보 등을 통해 기반기술의 다각화와 실용화를 동시에 추진하고 있다(관계부처 합동, 2023, p.74-75).

이와 함께, 수소 공급과 활용이 도시 단위에서 집적적으로 이루어지는 ‘수소도시’ 실증사업이 추진되고 있으며, 이를 통해 건축물, 교통수단, 전력공급 등 도시 전반의 에너지 시스템을 통합적으로 수소 기반으로 전환하는 모델이 제시되고 있다. 이러한 수소 중심의 무탄소 도시 모델은 향후 에너지 전환의 지역 확산 및 공간 기반 적용을 위한 실증적 기반으로 기능할 것으로 기대된다(관계부처 합동, 2023, p.76).

② 제11차 전력수급기본계획에서의 무탄소 에너지 정책

「제11차 전력수급기본계획(24~38)」은 무탄소 전원의 양적 확대뿐 아니라 제도적·인프라적 기반을 정비하는 방향으로 무탄소 에너지 중심의 전력공급 구조 전환을 지향하고 있다. 2024년부터 2038년까지의 중장기 전력 수요 증가에 대응해 기존 화석연료 기반 전원의 점진적 감축과 더불어 무탄소 전원 비중 확대를 위한 다각적 전략을 제시하고 있다.

3 제11차 전력수급기본계획 수립방향

- ◇ 미래 전력수요를 과학적으로 산정 및 반영
- ◇ 공급 안정성, 효율성, 탄소중립 등 고려하여 전원믹스 구성
- ◇ 무탄소전원 확대를 위한 선제적 계통보강, 시장 고도화 추진

수요전망

- ▶ 첨단산업, 전기화 등 신규 수요 과학적 산정
- 첨단산업, 데이터센터, 전기화 등 수요 증가 요인 선별, 과학적으로 전력수요 산정·반영

수요관리

- ▶ 감축 목표의 이행력 강화를 위한 합리적 방법론 설정
- 수행기관별 목표량 산정으로 수요관리 이행력 강화
- 신규 고효율기기 보급지원 사업을 통해 수요관리 확대

설비계획

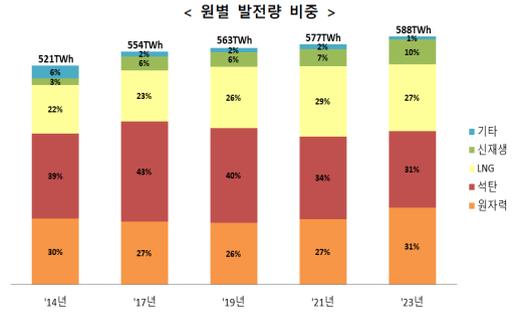
- ▶ 에너지 공급안정성, 효율성, 탄소중립 등 정책원칙을 종합 고려하여 전원믹스 구성
- ① 노후 석탄발전의 무탄소전환 등 추진 (LNG 추가전환 중단)
- ② 무탄소전원으로서 원전 지속 활용
- ③ NDC 달성이 가능하면서도, 체계적인 재생에너지 확대
- ④ 정정수소-암모니아 발전 확대
- ⑤ 집단에너지를 전력수급 관리 체계로 편입

전력계통

- ▶ 신규 설비 및 재생e 확대를 고려한 전력망 건설 반영
- 선제적 전력망 확충 및 안정적 전력계통 운영 체계 마련

전력시장

- ▶ 수급안정, 전원 분산 등 전력시장의 역할을 더욱 확대
- 진입(계약유통시장)부터 급전(실시간시장)까지 시장경쟁 적용
- 지역입지 선호 강화를 통해 분산에너지 활성화 촉진



< 전원별 발전량 전망 (단위: TWh) >

연도	원전	석탄	LNG	재생e	신e	정정수소 암모니아	기타	합계	탄소	무탄소*
'30년	204.2	110.5	161.0	120.9	18.7	15.5	11.8	642.6	302.0	340.6
'32년	215.4	102.8	135.5	149.1	21.1	22.8	18.4	665.1	277.9	387.2
'34년	233.0	97.1	103.8	169.1	23.2	28.5	27.0	681.7	251.1	430.6
'36년	236.9	83.5	91.1	190.4	24.9	36.1	30.4	693.3	230.0	463.4
'38년	248.3	70.9	74.3	205.7	26.4	43.9	34.9	704.5	206.7	497.8

* 무탄소발전 : 원전 + 재생e + 정정수소-암모니아

[그림 2-8] 제11차 전력기본계획에서의 무탄소 에너지 정책 방향

출처: 산업통상자원부(2025, pp.5, 13, 53)

■ 노후 석탄·LNG 화력발전의 단계적 감축과 예비력 관리의 균형 추구

정부는 노후 석탄 및 LNG 화력발전에 대한 구조적 전환을 계획의 첫 번째 과제로 구성하고 노후 석탄화력 발전설비에 대한 계획적 수명 종료 및 설비 정비를 병행하는 정책을 추진하고 있다. 석탄화력의 일방적 축소가 전력수급 불안으로 이어지는 것을 방지하기 위해, 설비 폐지와 예비력 확보 간 균형을 고려한 관리 방식을 채택하고 있으며, 수명 만료 시점에 도달한 설비는 기술적·경제적 타당성을 평가한 후 폐지 또는 정비 여부를 결정하게 된다.

기존 운영 중인 노후 석탄설비는 기존 10차 계획에서 추진한 LNG로 대체하는 계획을 중단하고 양수, 수소 등 무탄소 에너지원으로 대체하며, 설비 개조만 할 경우 LNG에 암모니아 혼소는 허용하기로 하였다. 노후 LNG 발전은 집단에너지로 전환하거나 수소혼소를 할 경우 제한적으로 허용한다(산업통상자원부, 2025, p.34).

이러한 조치는 기존 발전소를 활용하면서도 전력공급 안정성과 탄소감축의 균형을 추구하는 전략적 접근으로 볼 수 있다.

■ 무탄소 전원으로서 원자력 발전의 안정적 활용과 소형모듈원전 (Small Modular Reactor, SMR) 도입 추진

원자력은 탄소를 배출하지 않으면서도 안정적인 전력공급이 가능한 기저 전원으로서 「제11차 전력수급기본계획」에서도 중요한 전략적 에너지원으로 활용하고 있다. 원자력을 안정적인 기저 전원으로 유지하며 탄소중립 체제 하에서도 일정한 비중 이상을 지속 확보할 수 있도록 방향을 제시하고 있다.

이러한 정책은 단순한 원전 의존을 넘어, 비화석 전원 내의 안정성 확보와 공급 능력 보안을 위한 선택지로 원자력을 지속 활용하겠다는 국가 에너지믹스 전략의 일환이다. 다만, 기술 안전성, 폐기물 처리, 주민 수용성 등 여전히 해결해야 할 과제가 많기 때문에 정부는 이와 관련한 규제체계 개편과 이해관계자와의 협의를 병행 추진하고 있다.

한편, 기존 대형 원전 중심의 정책뿐 아니라 차세대 원자력 기술로 주목받는 소형모듈원자로 (SMR) 개발과 실증을 새로운 전략축으로 설정하고 있다. SMR은 기존 원전 대비 안전성, 입지 유연성, 초기 투자비용 측면에서 장점을 보유하고 있어, 산업단지, 도서지역, 군기지 등 분산형 수요지에 적합한 무탄소 전원으로 활용 가능성이 크다. 정부는 관련 기술 개발을 위해 민관 합동 SMR 개발 로드맵 수립, 실증부지 확보, 규제 정비, 국제 협력을 본격 추진하고 있으며, 특히 2030년대 초 SMR 상용화를 목표로 하고 있다(산업통상자원부, 2025, p.35).

■ 재생에너지 발전 확대 및 계통 수용성 개선

「제11차 전력수급기본계획」에서 재생에너지는 해상풍력과 태양광을 중심으로 한 보급 확대와 시장제도 개편을 추진한다. 특히 해상풍력 발전의 경우, 해상입지 확보와 주민 수용성 확보 문제를 해결하기 위한 제도적 기반이 병행될 계획이다. 해상풍력은 산업화 가능성이 높은 분야로 평가되어 발전사업자와 지역사회 간의 이익공유, 해양공간계획과의 연계 등을 통해 추진 동력을 확보할 것으로 보인다. 태양광발전은 전력 계통과 주민수용성이 우수한 산단태양광을 전략적으로 보급하고, 건물일체형태양광(BIPV)을 제로에너지건축물 의무화와 연계하여 보급한다(산업통상자원부, 2025, p.36).

이와 동시에 수용성 문제, 계통 제약, 출력 예측 한계 등 기존 문제의 해소를 위한 복합적 전략이 병행된다. 특히 계획입지 제도 개선, 계통 연계 지연 해소, 계통 보강 투자 확대 등의 조치가 통합적으로 추진되며 출력 예측 정확도 향상 기술 도입 및 분산자원 확대도 주요 수단으로 제시했다.

계획입지제도 개선은 재생에너지 입지 갈등을 완화하고 개발 예측성을 높이는 제도로, 지역 주민 수용성과 행정절차 간소화를 함께 도모한다. 아울러 정부는 계통 혼잡 해소를 위해 송배전망의 적기 확충과 투자비용 보전 메커니즘 마련도 검토 중이다. 이는 재생에너지 확대를 단순한 설비 중심에서 실질적 발전량 확보 중심으로 정책 전환하고 있다는 점에서 의의가 있다.

■ 청정수소·암모니아 연료 기반의 무탄소 발전 도입

정부는 수소 및 암모니아를 연료로 하는 무탄소 전원기술을 차세대 전략적 전원으로 인식하고 실증부터 인프라 조성까지 단계별 추진전략을 수립했다. 특히 석탄 및 LNG 발전소에서 기존 설비를 활용한 혼소 발전 기술 도입이 현실적 대안으로 제시되고 있으며, 이 과정에서 연료공급망 구축, 발전설비 실증, 규제 정비 등 다층적인 과제가 동시 추진되고 있다.

아울러 정부는 암모니아 혼소 20% 이상 실증, 수소 전소 기술개발, 연료 운송 및 저장 인프라 확충을 위한 거점항만 지정 등과 같은 인프라 기반 투자 계획도 병행하고 있다(산업통상자원부, 2025, p.38). 이처럼 수소·암모니아 기반 발전은 기존 화력발전 인프라의 전환 활용 가능성을 최대화하고 기술 성숙도에 따라 점진적 비중 확대를 유도하는 점진적 도입 전략을 취하고 있다.

■ 집단에너지 및 열병합발전의 저탄소 전환 추진

도시 기반 열공급 시스템의 한 축을 담당하는 집단에너지 및 열병합발전 부문에서도 탈탄소 전환이 적극 추진되고 있다. 특히 기존 열병합 발전소는 주로 LNG를 연료로 사용하고 있으나, 향후에는 수소, 바이오가스, 바이오매스 등 저탄소 또는 무탄소 연료 전환을 유도하고 있다(산업통상자원부, 2025, p.39).

정책적으로는 노후 설비의 고효율화 교체, 신증설 최소화, 연료 다변화가 핵심 과제로 설정되며, 기후 대응과 지역 에너지 자립도를 동시에 고려한 분산형 에너지 시스템 구축도 함께 병행된다(산업통상자원부, 2025, p.39). 이는 주거지 인근에서의 에너지 소비에 있어 온실가스 감축과 지역기반 에너지 형평성 확보라는 이중 목표를 동시에 달성하기 위한 전략으로 평가된다.

④ 탄소중립도시 정책에서의 무탄소 에너지 전략

탄소중립도시 정책은 도시 차원의 탄소중립을 실현을 목표로 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 제29조에 근거해 추진되고 있다. 탄소중립도시는 탄소중립 의제를 필두로 환경정책과 도시공간정책의 통합적 접근을 요구하고 있다(이은석 외, 2023, p.41).

■ 탄소중립도시 지정 제도 및 선도도시 지정 현황

「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 제29조에 근거한 탄소중립도시 지정 제도는 지자체가 수립한 탄소중립도시 종합구상안과 사업계획을 환경부와 국토교통부가 평가해 지정하는 방식으로 운영되고 있다. 지자체는 사업대상지의 온실가스 배출현황 및 특성을 분석하고 지자체의 여건 등을 종합적으로 고려해 탄소중립 실현을 위한 종합구상안과 지역에서 중점적으로 추진할 사업을 구체적으로 제시한다. 탄소중립도시에 선정된 지자체는 환경부·국토교통부와 협력해 탄소중립도시 조성 기본계획을 수립하고 이후 본격적인 사업에 착수하게 된다.

환경부와 국토교통부는 탄소중립 지정 제도를 기반으로 2023년 5월 전국 지자체를 대상으로 한 공모를 거쳐 충남 당진시, 보령시, 서울 노원구, 제주특별자치도를 탄소중립 선도도시로 지정하였다. 이들 선도도시는 각각 산업중심형(당진), 관광도시형(보령), 대도시 내 자치구형(노원), 독립적 섬 지역형(제주)이라는 도시 유형별 특성을 대표하며 향후 지역별 탄소중립도시 모델의 기반이 될 예정이다.



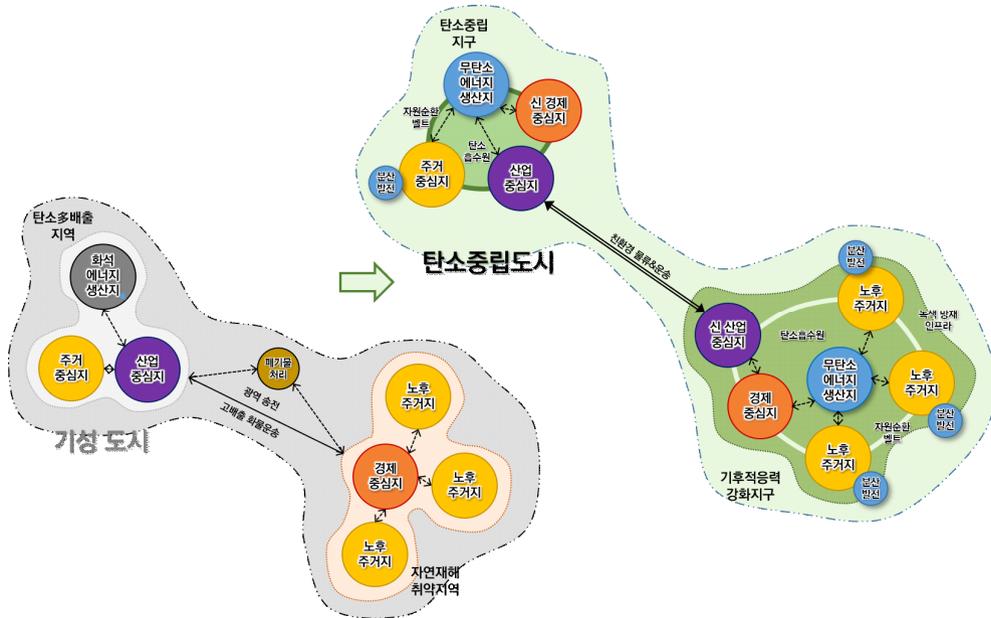
[그림 2-9] 탄소중립 선도도시 사업체계

출처 : 환경부·국토교통부(2024, p.3)

■ 탄소중립도시 실현을 위한 무탄소 에너지의 핵심적 역할

탄소중립도시의 실현은 도시 공간 내 다양한 감축 요소의 집적적 연계와 구조적 전환을 요구하며, 이 과정에서 무탄소 에너지의 도입과 확산은 도시 전환 전략의 핵심 축을 형성한다. 특히 에너지 소비가 집중되는 건물 및 기반시설, 교통, 산업 활동 등을 무탄소 에너지 기반으로 전환하는 것은 도시 차원의 실질적 감축 효과를 견인하는 핵심 전략이다.

선행연구에 따르면, 기존 도시들은 대부분 고정된 송전망과 중앙집중형 발전 구조에 기반하여 에너지를 수용하고 있어, 에너지 생산과 소비 간의 거리와 효율성 측면에서 구조적 한계를 내포하고 있다. 따라서 탄소중립도시는 이러한 공급 방식에서 벗어나, 분산형 무탄소 에너지 시스템으로의 전환, 즉 도심 내 또는 인접 지역에서 태양광, 지열, 수소 등 무탄소 에너지원을 직접 생산·공급·이용하는 구조로의 전환이 필수적이다(이은석 외, 2023, pp.49-50).



[그림 2-10] 탄소배출 중심의 기본도시 구조와 무탄소 에너지 개념이 도입된 탄소중립도시의 공간구조 비교

출처 : 이은석 외(2023, p.50)

무탄소 에너지원의 도입은 도시기반시설의 구조 개편과도 밀접하게 연결된다. 예컨대, 전력망 중심의 수요관리를 넘어 건물단위 또는 블록단위에서의 에너지 생성·저장·활용 체계, 도시형 재생에너지 집적지 조성, 지역별 수소 공급망 구축 등은 무탄소 에너지 기반 도시모델의 구체적 수단으로 제시되고 있다.

■ 탄소중립도시 정책에서의 무탄소 에너지 활용 동향

- 탄소중립도시 정책과 무탄소 에너지의 개념적 연계

탄소중립도시는 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 제29조에 따라 추진되는 도시 차원의 탄소중립 실현 전략으로, 도시 공간 구조, 에너지 시스템 등을 총체적으로 전환하는 것을 핵심 목표로 한다. 이러한 정책 구조 속에서 원자력, 신재생에너지, 수소 등 무탄소 에너지원은 도시 기반 인프라의 탄소 배출을 제거하는 핵심 수단으로 설정된다. 특히 건축물, 교통, 산업 부문 등 에너지 다소비 영역의 에너지원을 탈탄소화하는 데 있어 무탄소 에너지 도입은 구조적 수단이자 정책적 전제가 된다.

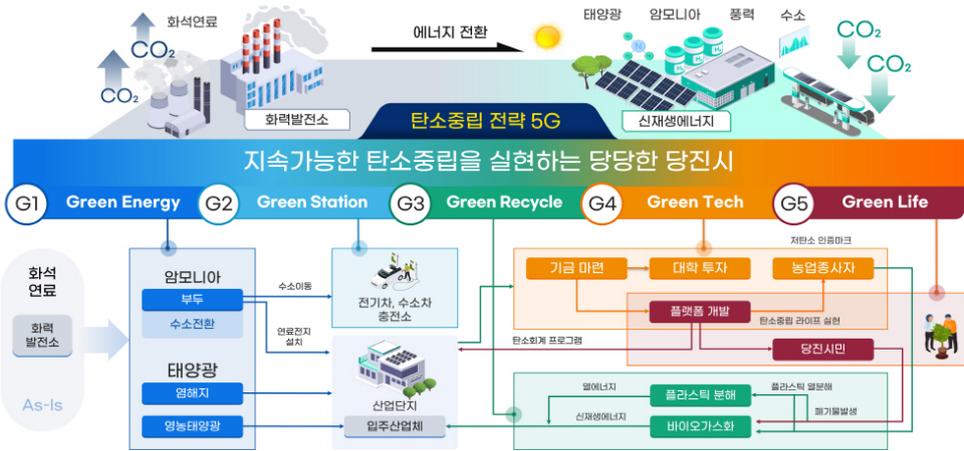
- 탄소중립 선도도시 지정과 무탄소 에너지 인프라 실증 추진

환경부와 국토교통부는 2023년부터 당진, 보령, 서울 노원구, 제주를 탄소중립 선도도시로 지정하고, 탄소중립도시 조성을 본격화하고 있다. 이들 도시에서는 기존 화석연료 기반 열공급 시설의 전환, 태양광 및 지열 시스템 설치, 건물 내 분산형 전원 도입, 수소 기반 대중교통 인프라 구축

등 지역 맞춤형 무탄소 에너지 시스템이 통합적으로 설계, 추진되고 있다.

특히 당진시는 국내 최대 석탄화력발전 단지를 보유한 지역으로, 기존 화력발전소 부지를 활용한 900MW급 수소 전소 발전단지를 당진 송산면 일원에 조성하는 계획을 추진 중이다. 수소 전소 발전은 청정수소를 연료로 작동하는 무탄소 전원이며 당진 그린 에너지 허브는 그린수소 공급 → 발전 → 산업단지/데이터센터 공급을 하나의 클러스터로 구성해 기존 화석연료 전원 시스템을 무탄소 체계로 대체하는 구조를 실증한다(충청남도, 2024, 11월26일자 보도자료).

이처럼 당진시 사례는 탄소중립도시 정책에서 무탄소전원을 기존 발전 인프라 위에 병행 추가하는 방식이 아닌, 화석 중심 인프라를 무탄소 체계로 구조 전환하는 모델이라는 점에서 정책적 의미가 있다.



[그림 2-11] 탄소중립 선도도시 당진시 사업모델 개념도

출처 : 당진시청 내부자료

2) 무탄소 에너지 시설 설치 관련 법·제도 현황

국내 에너지밸런스 현황과 같이 우리나라에서 운영 중인 에너지원 중 원자력, 양수, 신재생 및 기타 에너지원을 무탄소 에너지로 분류할 수 있다. 무탄소 에너지원이 활용되는 시기반시설과 관련 법령을 정리하여 각 시설과 부대시설을 설치하기 위한 공간적 기준을 파악하고자 하였다.

■ 원자력에너지 관련 법·제도 현황

원자력 발전은 변전소, 항만·철도 등의 운송 기반 시설, 그리고 방사능 감시소와 녹지 완충 공간 등과 같은 복합 기반 시설이 필요하며, 관련 법령으로는 「원자력안전법」 및 「물류정책기본법」이 적용된다. 이러한 도시기반시설은 발전시설의 안전성과 주민 수용성을 높이는 데 핵심적인 역할을 한다. 특히 방사능 감시소와 방재 도로, 대피소 등은 비상 상황에 대비한 물리적·제도적 장치로서 필수적이며, 관련 기준은 「원자력안전법 시행규칙」 및 「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」에 명시되어 있다. 따라서 원자력 기반 무탄소 에너지의 안정적 확산을 위해서는 기술적 요건 뿐만 아니라 복합적인 인프라 구축과 법적 기반 마련이 병행되어야 한다.

[표 2-1] 에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황 - 원자력

무탄소 에너지원	발전시설	도시기반시설	관련법령
원자력	원자력 발전소	변전소(공동)	「원자력안전법」 제10조(건설허가)
			「원자력안전법」 제26조(기록과 비치)
			「원자력안전법 시행령」 제8조(방사선발생장치)
			「원자력안전법 시행령」 제9조(관계시설)
		교통 인프라(항만, 특수 철도)	「물류정책기본법」 제29조(위험물질운송안전관리센터의 설치·운영)
		방사능 감시소	「원자력안전법」 제98조(보고·검사 등)
			원자력안전법 시행규칙」 제4조(건설허가의 신청)
			「원자력안전법 시행규칙」 제18조(방사능재난대응시설·방지의 기준)
			「원자력안전법 시행규칙」 제87조(방사성폐기물관리시설등의 건설·운영허가의 신청 등),
		방사능 방재도로, 대피소	「원자력안전법」 제74조(사고의 조치 등)
			「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」 제15조(도시공원의 세분 및 규모),
		녹지공간(방사능 차폐용 산림 등)	「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」 제2조(정의)
「원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙」 제17조(원자로의 설계),			

출처: 국가법령정보센터(<https://www.law.go.kr/LSW/main.html>, 접근일 : 2025.11.28.)를 참고하여 연구진 작성

■ 풍력에너지 관련 법·제도 현황

풍력은 변전소와 접근도로, 유지관리 기반, 통신망 등이 함께 조성되어야 하며, 이는 「전기사업법」, 「도로법」, 「건축법」 등과 연계되어 설치된다. 이러한 인프라는 발전소 자체보다 넓은 범위의 계획과 법적 검토를 요구하는 복합 공간으로 기능한다. 특히 육상풍력은 산지 및 농지 등 자연환경과의 조화를 고려해야 하며, 해상풍력은 공유수면 점용, 해저 케이블 매설, 해상 변전소 설치 등 고도의 기술과 해양공간계획이 수반된다. 이에 따라 「산지관리법」, 「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 등 다수의 분야별 법령이 동시에 적용되어야 한다. 결과적으로 풍력에너지는 단순한 발전시설 설치를 넘어, 주변 환경과의 통합적 조정과 지역사회 수용성 확보를 위한 전략이 필수적이다.

[표 2-2] 에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황 - 재생에너지(풍력)

무탄소 에너지원		발전시설	도시기반시설	관련법령		
재생에너지 (바이오, 폐기물 제외)	풍력	육상풍력 발전단지	변전소(공동)	「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고)		
				「전기사업법」 제7조(전기사업의 허가)		
				「전기사업법」 제67조(기술기준)		
				「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제43조(도시·군계획시설의 설치·관리)		
				「환경영향평가법」 제22조(환경영향평가의 대상)		
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지기준의 고시내용 등)		
			접근도로	「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)		
				관리사무소 및 유지보수 시설	「도로법」 제61조(도로의 점용 허가)	
					「도로법」 제62조(도로점용에 따른 안전관리 등)	
					「도로법 시행령」 제 54조(도로의 점용 허가 신청 등)	
					「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위의 허가)	
					「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제58조(개발행위허가의 기준)	
			「산지관리법」 제14조(산지전용허가)			
			통신망	「건축법」 제11조(건축허가)		
				「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위의 허가)		
				「전기통신사업법」 제22조(부가통신사업의 신고 등)		
						「전기통신사업법」 제28조(이용약관의 신고 등)
						「전파법」 제19조(허가를 통한 무선국 개설 등)

무탄소 에너지원	발전시설	도시기반시설	관련법령
	해상풍력발전 단지	변전소(공통)	「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고)
			「전기사업법」 제7조(전기사업의 허가)
			「전기사업법」 제67조(기술기준)
			「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제43조(도시·군계획시설의 설치·관리)
			「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지기준의 고시내용 등)
			「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준 고시내용 등)
			「환경영향평가법」 제22조(환경영향평가의 대상)
		해상 변전소	「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고)
			「전기사업법」 제7조(전기사업의 허가)
			「전기사업법」 제67조(기술기준)
			「항만법」 제41조(항만시설의 사용)
			「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지기준의 고시내용 등)
			「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)
			「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 제8조(공유수면의 점용·사용허가)
		해저 케이블	「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고)
			「전기사업법」 제67조(기술기준)
			「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 제8조(공유수면의 점용·사용허가)
		운영 및 유지보수 기지	「건축법」 제11조(건축허가)
			「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위의 허가)
			「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제33조(해양시설의 신고 및 변경신고)

출처: 국가법령정보센터(<https://www.law.go.kr/LSW/main.html>, 접근일: 2025.11.28.)를 참고하여 연구진 작성

■ 태양광에너지 관련 법·제도 현황

태양광 에너지는 무탄소 에너지원 중 설치 유연성과 접근성이 가장 높은 방식으로, 전국 단위 확산이 가능하다는 장점을 가진다. 그러나 발전소 설치에는 일조량 확보 외에도 변전소, 접근도로,

배수시설, 관리동 등 다양한 도시기반시설이 필요하며, 이에 따른 「전기사업법」, 「도로법」, 「하수도법」, 「건축법」, 「농지법」 등 복수의 법령 적용이 수반된다. 특히 태양광 발전은 농지, 산지 등 기존 토지 이용과 충돌 가능성이 높아, 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 따른 개발행위 허가와 환경영향평가의 엄격한 기준이 함께 적용된다. 따라서 태양광의 효과적 도입을 위해서는 기술적 효율성과 함께, 토지이용계획, 법적 인허가 절차, 주민 수용성 등을 종합적으로 고려한 설치 전략이 필요하다.

[표 2-3] 에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황 - 재생에너지(태양광)

무탄소 에너지원		발전시설	도시기반시설	관련법령
재생에너지 (바이오, 폐기물 제외)	태양광	태양광 발전소	변전소(공통)	「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고)
				「전기사업법」 제7조(전기사업의 허가)
				「전기사업법」 제67조(기술기준)
				「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제43조(도시·군계획시설의 설치·관리)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지 기준의 고시내용 등)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)
			접근도로	「환경영향평가법」 제22조(환경영향평가의 대상)
				「도로법」 제61조(도로의 점용 허가)
				「도로법」 제62조(도로점용에 따른 안전관리 등)
				「도로법 시행령」 제 54조(도로의 점용 허가 신청 등)
				「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위의 허가)
				「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제58조(개발행위허가의 기준)
			배수 시설	「산지관리법」 제14조(산지전용허가)
				「농지법」 제34조(농지의 전용허가·협약)
				「하수도법」 제27조(배수설비의 설치 등)
				「농어촌정비법」 제54조(생활환경정비계획의 수립)
			관리동	「농어촌정비법」 제55조(생활환경정비계획의 내용)
				「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위의 허가)
				「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위의 허가)
				「건축법」 제11조(건축허가)

출처: 국가법령정보센터(<https://www.law.go.kr/LSW/main.html>, 접근일 : 2025.11.28.)를 참고하여 연구진 작성

■ 지열·수력·해양에너지 관련 법·제도 현황

지열·수력·해양에너지는 각각의 발전 방식에 따라 고유한 기반시설과 법적 기준이 존재한다.

지열에너지는 고온의 지하열수 자원을 개발하기 위해 시추공, 열수 배관망, 냉각탑 등의 전용 시설이 필수적으로 설치된다. 이러한 설비는 「지하수법」, 「산업안전보건법」, 「고압가스 안전관리법」 등 다양한 법률에 따라 안전성과 환경 영향을 고려해 허가·관리된다.

수력에너지는 하천수의 낙차를 활용하는 구조로, 댐, 수로, 수문, 저수지 등 수리 기반 인프라가 핵심적이다. 이와 관련된 설치 및 운영은 「하천법」과 「댐건설·관리법」 등 수자원 및 수공간 관리에 관한 법령에 따라 엄격히 규제된다.

해양에너지는 조류, 파랑, 온도차 등을 활용한 발전으로, 해상 구조물, 해저 케이블, 계류시설 등의 복합적인 해양 인프라가 필요하다. 「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」, 「항만법」 등 해양 공간과 관련한 법령이 주요 설치 및 점용 요건을 규정한다.

[표 2-4] 에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황-재생에너지(지열, 수력, 해양에너지)

무탄소 에너지원		발전시설	도시기반시설	관련법령
재생에너지 (바이오, 폐기물 제외)	지열	지열발전소	변전소(공통)	「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고)
				「전기사업법」 제7조(전기사업의 허가)
				「전기사업법」 제67조(기술기준)
				「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제43조(도시·군계획시설의 설치·관리)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지기준의 고시내용 등)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)
				「환경영향평가법」 제22조(환경영향평가의 대상)
			지하 굴착시설 (시추공)	「지하수법」 제7조(지하수개발·이용의 허가)
				「광업법」 제38조(광업권의 등록)
				「산업안전보건법」 제38조(안전조치)
			열수 배관망(파이프라인)	「산업안전보건법」 제38조(안전조치)
				「고압가스 안전관리법」 제4조(고압가스의 제조허가 등)
			냉각탑	「건축법」 제11조(건축허가)
				「대기환경보전법」 제16조(배출허용기준)
「물환경보전법」 제32조(배출허용기준)				
발전소 건물	「건축법」 제11조(건축허가)			

무탄소 에너지원	발전시설	도시기반시설	관련법령	
			「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위의 허가) 「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지 기준의 고시내용 등) 「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등) 「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제13조(공장설립등의 승인)	
	수력	수력발전소	변전소(공동)	「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고)
				「전기사업법」 제7조(전기사업의 허가)
				「전기사업법」 제67조(기술기준)
				「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제43조(도시·군계획시설의 설치·관리)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지 기준의 고시내용 등)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)
				「환경영향평가법」 제22조(환경영향평가의 대상)
			댐 또는 저수지	「댐건설·관리 및 주변지역지원 등에 관한 법률」 제4조(댐관리기본계획)
				「하천법」 제33조(하천의 점용허가 등)
				「하천법」 제50조(하천수의 사용허가 등)
	수로 시설	「하천법」 제33조(하천의 점용허가 등)		
		「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위의 허가)		
	발전소 건물	「건축법」 제11조(건축허가)		
「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위의 허가)				
「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지 기준의 고시내용 등)				
「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)				
「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제13조(공장설립등의 승인)				
수문 및 비상 방류 시설	「하천법」 제33조(하천의 점용허가 등)			
	「하천법」 제50조(하천수의 사용허가 등)			
해양	해양에너지 발전소	변전소(공동)	「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고)	

무탄소 에너지원	발전시설	도시기반시설	관련법령
			「전기사업법」 제7조(전기사업의 허가)
			「전기사업법」 제67조(기술기준)
			「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제43조(도시·군계획시설의 설치·관리)
			「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지기준의 고시내용 등)
			「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)
			「환경영향평가법」 제22조(환경영향평가의 대상)
		해저 케이블	「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고)
			「전기사업법」 제67조(기술기준)
			「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 제8조(공유수면의 점용·사용허가)
		계류 시설	「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 제8조(공유수면의 점용·사용허가)
			「어선법」 제2조(정의)
		해상 구조물	「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 제8조(공유수면의 점용·사용허가)
			「항만법」 제41조(항만시설의 사용)
			「항만법」 제10조(항만개발사업실시계획의 수립과 승인 등)
		운영 및 유지보수 기지	「건축법」 제11조(건축허가)
「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위의 허가)			

출처: 국가법령정보센터(<https://www.law.go.kr/LSW/main.html>. 접근일 : 2025.11.28.)를 참고하여 연구진 작성

■ 수소에너지 관련 법·제도 현황

신에너지 중 수소 에너지원은 크게 수소 생산시설과 수소 혼소/전소 터빈 발전소로 구분되고 있다. 수소 생산시설 중 연료전지 발전소는 비교적 저소음 시설에 안전한 도심 설치를 위한 응용 설계 기술에 집중되어 있으며(전원표, 2022; 정용주, 2021), 또한, 수소터빈발전소는 대규모 발전소용 수소 혼소 및 전소의 안전성 확보 및 경제성 평가 중심으로 연구가 다루어지고 있다(최민준 외, 2022; 김대식, 2019).

특히 무탄소 에너지원으로서 수소에너지는 발전 과정에서 탄소를 배출하지 않기 때문에, 탄소 중립 도시 구현을 위한 핵심 에너지원으로 부각되고 있다. 이에 따라 수소 연료전지 및 수소터빈 발전소의 도심 내 또는 인근 설치를 위해, 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제43조 등과 같이 도시·군계획시설 지정, 변전소 및 배관망 설치 등 도시기반시설 확보가 선행되어야 한다.

[표 2-5] 에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황-신에너지(수소)

무탄소 에너지원		발전시설	도시기반시설	관련법령
신에너지	수소	수소 생산시설 & 수소터빈 발전소	변전소(공동)	「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고)
				「전기사업법」 제7조(전기사업의 허가)
				「전기사업법」 제67조(기술기준)
				「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제43조(도시·군계획시설의 설치·관리)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지기준의 고시내용 등)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)
			수소 저장 및 운송 시설	「환경영향평가법」 제22조(환경영향평가의 대상)
				「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 제19조(수소연료 공급시설 설치 등)
				「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 제41조(안전관리 규정), 「고압가스 안전관리법」
				「고압가스 안전관리법」 제4조(고압가스의 제조허가 등)
				「고압가스 안전관리법」 제11조(안전관리규정), 「산업안전보건법」 제38조(안전조치)
			산업단지 및 배관망	「산업안전보건법」 제38조(안전조치)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제13조(공장설립등의 승인)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제14조(공장의 건축허가)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)
			폐수 및 폐기물 처리 시설	「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제19조(공장설립등의 승인절차)
				「물환경보전법」 제12조(공공시설의 설치·관리 등)
				「물환경보전법」 제32조(배출허용기준)
				「물환경보전법」 제33조(배출시설의 설치 허가 및 신고)
				「물환경보전법」 제48조(공공폐수처리시설의 설치)
「폐기물관리법」 제18조(사업장폐기물의 처리)				

출처: 국가법령정보센터(<https://www.law.go.kr/LSW/main.html>, 접근일: 2025.11.28.)를 참고하여 연구진 작성

■ 연료전지 관련 법·제도 현황

연료전지 발전소의 설치에는 「전기사업법」 제7조와 제61조에 따른 전기사업 허가 및 전기설비 공사계획 인가가 필수이며, 발전 전력을 계통에 연계하기 위한 변전소는 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제43조에 따라 도시계획시설로 지정되어야 한다. 또한, 발전소 건물은 「건축법」 제 11조와 「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조·시행령 제12조에 따른 공장입지기준을 충족해야 하며, 입지에 따라 「환경영향평가법」 제22조에 따른 환경영향평가 대상이 될 수 있다. 이 외에도 수소 연료공급을 위한 설비는 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 및 「도시가스사업법」에 따라 안전 및 설치기준을 충족해야 하며, 냉각수·배수 설비와 대기·폐기물 처리시설도 관련 법령에 따라 도시기반 인프라로 구축되어야 한다.

[표 2-6] 에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황-신에너지(연료전지)

무탄소 에너지원		발전시설	도시기반시설	관련법령
신에너지	연료전지(수소, 인산, 용융 탄산염, 고체 산화물, 고분자 전해질)	연료 전지 발전소	변전소(공통)	「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고)
				「전기사업법」 제7조(전기사업의 허가)
				「전기사업법」 제67조(기술기준)
				「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제43조(도시·군계획시설의 설치·관리)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지기준의 고시내용 등)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 시행령 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)
				「환경영향평가법」 제22조(환경영향평가의 대상)
			연료 공급 시설	「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 제19조(수소연료공급시설 설치 등)
				「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 제41조(안전관리규정)
				「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 제49조(허가 및 등록의 취소 등)
				「도시가스사업법」 제11조(시설공사계획의 승인 등)
				「도시가스사업법」 제26조(안전관리규정)
			냉각수 공급 및 배수 시설	「수도법」 제17조(일반수도사업의 인가)
				「하수도법」 제27조(배수설비의 설치 등)
대기오염 방지 시설	「대기환경보전법」 제16조(배출허용기준)			
	「대기환경보전법」 제23조(배출시설의 설치 허가 및 신고)			
발전소 건물	「건축법」 제11조(건축허가)			

무탄소 에너지원		발전시설	도시기반시설	관련법령
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지기준의 고시내용 등)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)
				「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위의 허가)
			폐열 활용 시설	「집단에너지사업법」 제9조(사업의 허가)

출처: 국가법령정보센터(<https://www.law.go.kr/LSW/main.html>, 접근일: 2025.11.28.)를 참고하여 연구진 작성

■ 석탄 가스화 액화 관련 법·제도 현황

석탄 가스화·액화 발전소(IGCC)는 대용량 설비로 인해 「전기사업법」에 따른 허가 및 발전소 계획은 물론, 대규모 석탄 저장·운송을 위한 항만시설(「항만법」 제41조) 및 철도 인프라(「철도사업법」 제2조)와의 연계가 필요하다. 또한 석탄 취급의 특성상 「산업안전보건법」 제38조에 따른 안전조치와, 「대기환경보전법」, 「폐기물관리법」, 「물환경보전법」 등에 따라 오염 방지 및 폐기물관리시설을 도시기반시설로 구축해야 한다. 발전소 건물과 관련해서도 「건축법」 및 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위 허가)에 따른 허가 절차가 요구되며, 해당 시설이 입지하는 지역의 공장입지기준도 「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」을 따라야 한다.

[표 2-7] 에너지통계 기준 무탄소 에너지원 관련 법령 현황

무탄소 에너지원		발전시설	도시기반시설	관련법령
신 에너지	석탄 가스화·액화	석탄 가스화 복합 발전(IGCC) 플랜트	석탄 저장 및 운송 시설	「항만법」 제41조(항만시설의 사용)
				「산업안전보건법」 제38조(안전조치)
				「철도사업법」 제2조(정의)
		발전소(공동)	「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고)	「전기사업법」 제7조(전기사업의 허가)
				「전기사업법」 제67조(기술기준)
				「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제43조(도시·군계획시설의 설치·관리)
				「환경영향평가법」 제22조(환경영향평가의 대상)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지기준의 고시내용 등)
				「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)
				「폐기물관리법」 제18조(사업장폐기물의 처리)
폐기물 처리 시설				

무탄소 에너지원	발전시설	도시기반시설	관련법령
		냉각수 공급 및 배수 시설	「수도법」 제17조(일반수도사업의 인가)
			「하수도법」 제27조(배수설비의 설치 등)
		대기오염 방지 시설	「대기환경보전법」 제16조(배출허용기준)
			「대기환경보전법」 제23조(배출시설의 설치 허가 및 신고)
		발전소 건물	「건축법」 제11조(건축허가)
			「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지기준의 고시내용 등)
			「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)
			「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위의 허가)
		변전소(공통)	「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고)
			「전기사업법」 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고) 제67조(기술기준)
			「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제43조(도시·군계획시설의 설치·관리)
			「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지기준의 고시내용 등)
			「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)
			「환경영향평가법」 제22조(환경영향평가의 대상)
		석탄 저장 및 운송 시설	「항만법」 제41조(항만시설의 사용)
			「산업안전보건법」 제38조(안전조치)
「철도사업법」 제2조(정의)			
액체 연료 저장 및 운송 시설	「석유 및 석유대체연료 사업법」 제10조(석유판매업의 등록 등)		
	「석유 및 석유대체연료 사업법」 제15조(석유비축계획)		
	「고압가스 안전관리법」 제4조(고압가스의 제조허가 등)		
	「고압가스 안전관리법」 제11조(안전관리규정)		
	「위험물안전관리법」 제6조(위험물시설의 설치 및 변경 등)		
폐수 및 폐기물 처리 시설	「물환경보전법」 제12조(공공시설의 설치·관리 등), 제32조(배출허용기준), 제33조(배출시설의 설치 허가 및 신고), 제48조(공공폐수처리시설의 설치), 「폐기물관리법」 제18조(사업장 폐기물의 처리)		
대기오염 방지 시설	「대기환경보전법」 제16조(배출허용기준)		
	「대기환경보전법」 제23조(배출시설의 설치 허가 및 신고)		
발전소 건물	「건축법」 제11조(건축허가)		
	「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지		

무탄소 에너지원	발전시설	도시기반시설	관련법령
			준의 고시내용 등)
			「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등)
			「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제56조(개발행위의 허가)

출처: 국가법령정보센터(<https://www.law.go.kr/LSW/main.html>, 접근일 : 2025.11.28.)를 참고하여 연구진 작성

3) 소결

국내 무탄소 에너지 전환은 탄소중립 실현을 위한 핵심 전략으로 추진되고 있으며, 「제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획」과 「제11차 전력수급기본계획」을 중심으로 정책적 방향이 구체화되고 있다. 아울러서, 우리나라 무탄소 에너지 체계는 전원 구성의 재편, 재생에너지 보급 확대, 수소·연료전지 기반 신에너지 도입, 전기화(Electrification) 및 효율혁신 등 다층적인 전환 흐름 속에서 제도적 기반과 기술적 인프라가 병행 구축되고 있다. 그러나, 무탄소 에너지원별 입지 특성과 법·제도의 정합성이 충분히 확보되지 못한 한계도 동시에 확인되고 있었다.

■ 무탄소 에너지원으로 전환하기 위한 방향추진 - 에너지 믹스의 구조적인 변화

국가 차원의 에너지 밸런스는 석탄의 단계적 감축과 함께, 원자력 및 재생에너지 중심으로 재편되고 있다. 원전은 탄소중립 달성을 위한 기저전원 역할 강화가 제시되고 있으며, 태양광·풍력·수소·지열·해양 등 다양한 무탄소 에너지원이 지역 단위로 확산되고 있다. 이러한 구조적 변화는 발전·송전·배전 전 과정에서 계통 안정성 확보, 분산형 전원 확대, 전력시장 제도개선 등을 병행적으로 요구하는 특징을 갖는다. 이는 도시·지역 계획과 에너지 계획을 연동하는 통합적 접근이 필수적인 이유이기도 하다.

■ 무탄소 에너지원별 기술 및 입지요건의 상이성

국내현황을 분석한 결과, 에너지원별로 요구되는 기반시설과 입지요건이 크게 상이한 것으로 나타났다.

- 태양광은 일조량·경사도·가용부지 확보가 핵심이며, 토지 이용 갈등과 산지 규제 등이 입지에 결정적 영향을 미친다.
- 풍력은 풍황²⁾(풍속·풍향·풍속분포 등을 통칭)·접근도로·송전계통 편입 등이 필수 조건으로, 해상풍력의 경우 공유수면 점용, 항로 안전, 어업권 조정 등이 동반된다.

2) “풍황(風況)”이란 특정지역의 풍력자원을 계산하기 위하여 필요한 평균풍속, 주(主)풍향, 풍력밀도 및 난류강도 등의 제반 정보를 말한다.(출처: 해상풍력 보급 촉진 및 산업 육성에 관한 특별법 제2조제9호(법률 제20845호))

- 지열은 시추공 설치, 지하수 함양·보전, 지하구조물과의 충돌 여부 등이 중요한 변수이다.
- 수력은 환경보전구역·어도 설치·하천관리 계획 등 다양한 환경·수자원 규제와 연계된다.
- 해양 에너지는 어업권, 항만시설, 해양보호구역 등 입지 갈등 요인이 크고, 기술적 특성상 초기 투자와 기반시설 구축 부담이 큰 편이다.
- 수소 및 연료전지는 생산·저장·이송 단계에서의 안전 규제, 도시가스·배관망 연계, 산업단지 입지와 결합된 공간 전략이 필요하다.

이렇듯, 각 에너지원은 기술적 특성과 법령 체계의 영향을 복합적으로 받기 때문에, 단일한 기준으로 적용할 수 없는 '에너지원별 입지 다양성'을 고려하여 에너지 믹스를 추진하는 것이 국내 무탄소 에너지 정책의 방향이 될 수 있음을 확인하였다.

■ 현행 법·제도의 구조와 한계

무탄소 에너지원 확대는 단순한 발전설비의 도입을 넘어, 이를 수용할 수 있는 도시기반시설의 구축과 법·제도적 기반 마련이 병행되어야 실질적인 전환이 가능하다. 특히 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제43조(도시·군계획시설의 설치·관리)는 이러한 기반 구축의 핵심적인 법적 토대를 제공한다. 해당 조항에 따르면 발전시설을 포함한 주요 기반시설은 도시·군관리계획을 통해 사전에 위치, 규모, 종류 등이 결정되어야 하며, 이에 따라 무탄소 에너지 기반의 발전소와 연계 인프라도 제도적으로 뒷받침되어야 한다.

이와 함께 「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조와 그 시행령 제12조는 발전소와 같은 설비의 입지 기준을 명시하고 있으며, 특히 환경오염을 유발할 가능성이 있는 시설에 대해 입지를 제한하거나 기준을 설정할 수 있도록 하고 있다. 이는 신재생에너지, 수소, 소형원자로(SMR) 등 다양한 무탄소 에너지원이 도입될 때 각각의 입지 요건과 지역 특성을 고려한 계획 수립이 필요함을 의미한다.

또한 「환경영향평가법」 제22조는 에너지 개발사업, 도시개발, 산지개발, 송유·수면 매립 등의 기반시설을 환경영향평가 대상 사업으로 규정하고 있어, 무탄소 에너지의 도입 과정에서도 환경 영향을 사전에 면밀히 검토하고 최소화하는 설계가 필수적이다. 특히 발전원별 기술 특성에 따라 요구되는 환경 조치와 인프라 조건이 달라지기 때문에, 이에 대한 맞춤형 제도 정비가 필요하다.

결국 무탄소 에너지 전환은 기술적 도입뿐 아니라, 이를 수용할 수 있는 물리적 인프라와 함께 법·제도적 기반이 동시에 마련되어야 가능하다. 따라서 향후 에너지 전환 정책은 공간계획, 기술 적용, 법령 체계를 유기적으로 통합하는 방식으로 추진되어야 하며, 이를 통해 지역 수용성과 실행 가능성을 함께 확보할 수 있을 것이다.

■ 도시·지역 차원의 적용 가능성

국내 탄소중립도시 및 지역 에너지 계획 사례에서 나타난 특징을 보면, 무탄소 에너지 기반시설은 지역의 산업구조·환경조건·토지이용 특성과의 정합성이 매우 중요하다. 발전소 이전지, 산업단지, 항만·배후도시, 농촌지역 등 지역 유형에 따라 도입 가능한 에너지원의 종류와 그 배치 방식이 달라지며, 지자체의 계획 역량과 주민 수용성 또한 핵심 요인이다.

특히, 산업 중심 도시의 경우 송전·저장·수소공급 인프라가 결합되어야 하고, 농촌 지역은 태양광·풍력 중심의 분산형 전원이 효과적이며, 도심 지역은 건물 지붕형 태양광·연료전지·에너지효율화 중심으로 접근해야 한다. 이는 무탄소 에너지 전환이 단순히 발전설비의 설치 문제가 아니라, 지역 특성을 고려한 공간 전략으로 접근되어야 함을 시사한다.

■ 시사점 종합

전체 분석을 종합하면, 국내 무탄소 에너지 전환은 정책적 의지는 충분하나, 아직 제도적·입지적·기반시설적 측면의 불균형이 존재한다. 효율적 전환을 위해 아래와 같이 시사점을 정리한다. 에너지원별 통합적 입지기준 마련이 필요하다. 현행처럼 법령 단위로 산발적으로 규정할 것이 아니라, 국가 차원의 '무탄소 에너지 통합 가이드라인'을 구축할 필요가 있다.

도시·지역계획과 에너지계획의 정합성 강화가 필요하다. 국토계획·도시관리계획과 에너지계획의 연동을 제도적으로 의무화해야 한다.

기반시설(송전·저장·배관)의 선제적 확충도 요구된다. 생산설비 중심의 정책에서 벗어나, 계통 및 저장설비를 포함한 전주기 인프라 확충 전략이 필요하다.

주민 수용성 제고 및 이익공유 모델 도입이 고려되어야 한다. 특히 풍력·수소는 지역사회와의 갈등이 큰 만큼 수용성 제도 개선이 필수적이다.

지역 맞춤형 무탄소 에너지 포트폴리오를 구축할 필요가 있다. 이는 산업·농촌·도시 등 지역 유형별 차별화된 전략이 된다.

국내 무탄소 에너지 전환은 기술적 다양성과 정책 추진 동력이 확보되고 있으나, 법·제도 체계의 분절성과 입지 규제의 복잡성, 기반시설 부족 등이 전환 속도를 제약하고 있다. 또한, 에너지원별 입지 특성과 지역 여건을 통합적으로 고려한 무탄소 에너지원 적용방안을 확보하기에는 실질적인 기준을 제시하지 못하고 있다.

이에 무탄소 에너지를 활용하고 있는 국외사례를 통해서 주요 에너지원의 입지적 특성들을 파악하고자 한다.

3. 국외 무탄소 에너지 도입사례

1) 개요

무탄소 에너지 도입이 아직 초기 단계인 우리나라 기존 도시에서 우선 고려할 것은 도입하게 되는 기반시설의 타당성이다. 이를 위해서 어떤 무탄소 에너지원이 효율적인지를 선정하고, 그러한 무탄소 에너지원 기반시설들이 요구하는 입지적인 특성을 파악하게 된다. 시설입지에 있어서 중요하게 고려되는 요소들은 무탄소 에너지원 적용의 가부를 판단하게 하기 때문이다.

주로 활용되고 있는 무탄소 에너지원과 그 입지적인 특성을 파악하기 위해서 이미 무탄소 에너지원 전환이 이루어진 국외 사례를 마을단위, 도시단위로 구분하여 무탄소 에너지가 미치는 공간범위와 함께 주요한 입지적 특성을 파악하고자 하였다.

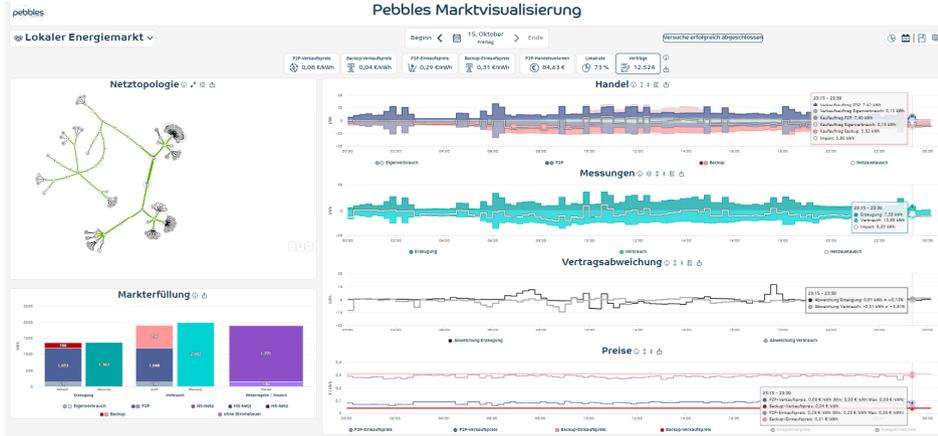
2) 마을단위 에너지 자립형 커뮤니티에서의 무탄소 에너지 도입사례

① 주민주도형 분산전원 기반 농촌형 에너지 자립마을: Wildpoldsried, Bayern, Germany

독일 바이에른주에 위치한 빌트폴츠리드는 면적 약 21.35km², 인구 약 2,600명의 농촌 마을로, 1999년부터 자발적인 에너지 전환을 추진하고 있다. 기후변화 대응과 탄소중립 실현을 목표로, 태양광·풍력·바이오가스·바이오매스 등을 복합적으로 활용한 에너지 자립 시스템을 구축했다. 2013년까지 마을 전력 수요의 8배 이상을 자체 생산하는 자립 모델을 완성하였으며, 현재까지도 소비량의 약 5배에 달하는 재생에너지 생산을 지속하고 있다. 재생에너지 판매를 통해 연간 수익원 상당의 수익을 창출하며, 이를 공공복지와 교육, 문화시설에 재투자함으로써 지역순환형 에너지경제 기반을 조성했다. 이후에는 스마트그리드, 전기차 충전, P2P 에너지 거래 시스템 등 디지털 기반의 에너지 관리 체계까지 실증하며 기술적 확장 가능성을 검증하였다³⁾.

빌트폴츠리드는 다양한 무탄소 에너지원을 상호 연계한 다중 분산형 에너지 시스템을 구축하고 있으며, 개별 설비 간 기술적 통합을 통해 안정적인 에너지 자립 구조를 실현하고 있다.

3) 김정근, 최정은 (2023, p.20)



[그림 2-12] pebbles 지역 에너지 시장의 실시간 시각화 도구

출처: pebbles 공식 홈페이지(<https://pebbles-projekt.de/projekt/>, 검색일 2025.05.13.)

■ 무탄소 에너지 기반시설의 입지기준

빌트폴츨리드의 에너지 자립 성공은 태양광, 풍력, 바이오가스, 바이오매스, 스마트그리드 인프라 등의 설비 특성이 해당 지역의 지리환경 및 자원 조건과 상호 보완적인 연계를 이루었기 때문이며, 주요 입지기준은 다음과 같다.

- 태양광 에너지: 일조량 및 지형 고도

독일 바이에른주 남부 내륙 고원지대에 위치하며, 평균 해발 724m의 고도와 완만한 경사지형을 갖춘 지역이다. 해당 지역은 알프스 북부 전이대에 속해 연중 대기 오염도가 낮고, 구름 간섭이 적어 태양 복사량이 상대적으로 높은 특성을 보인다. 이러한 기후·지형 조건은 지붕형 태양광 설비의 일사 효율을 높이고, 전력 생산량의 계절별 편차를 완화하는 데 유리하게 작용한다.



[그림 2-13] 빌트폴츨리드 태양광 시설

출처: 김정근, 최정은 (2023, p.30, 33.)

주민 참여형 '태양광 캠페인(Wildpoldsrieder Solarktionen)'을 통해 민간 주택과 공공건물(학교, 소방서, 마을회관 등) 지붕에 총 26,400㎡ 규모의 태양광 설비가 설치되었고, 이는 지역 전력

자립률 향상에 기여함과 동시에 분산형 에너지 생산 기반 구축의 핵심 요소로 기능하고 있다⁴⁾.

- 풍력 에너지: 풍속 및 내륙 풍력 조건

빌트폴츠리드는 해발 약 724m의 고지대에 위치한 내륙 마을로, 알프스 북부 전이대에 속한 지형적 특성상 상승기류가 형성되기 쉬운 환경을 갖추고 있다⁵⁾. 내륙 풍력은 해안과 달리 평균 풍속이 낮은 경우가 많아, 설치 위치와 터빈의 높이 확보가 풍력 발전 효율에 결정적이다.

1996년부터 약 2년간의 장기 풍속 측정이 선행되었으며, 10m·30m·40m의 세 가지 고도에서 측정된 데이터를 토대로 가장 바람 조건이 우수한 능선 지역과 적정 설치 높이를 도출하였다⁶⁾. 이에 따라 총 11기의 풍력 터빈이 고지대 능선에 설치되었고, 이 중 9기는 Wildpoldsried 관할 구역에, 나머지 2기는 인접한 오스트알게우(Ostallgäu) 지역에 설치되어 있다⁷⁾. 설치된 터빈은 발전 용량과 사양이 서로 다른 기종으로 구성되어 있으며, 설치는 2000년부터 2015년까지 단계적으로 추진되었다.

지형 고도와 기류 조건에 따라 각 터빈의 로터 직경과 허브 높이는 최적 조건에 맞게 조정되었으며, 이는 내륙 고지대 환경에서의 발전 효율을 극대화하는 데 기여하였다⁸⁾.



[그림 2-14] 빌트폴츠리드 풍력 터빈 모습

출처: Gemeinde Wildpoldsried. Film zum Windstutzpunkt. (2022, <https://www.youtube.com/watch?v=MRLIWRtS99s>, 검색일 2025.05.13.)

- 바이오가스: 농립 기반의 바이오매스 자원

빌트폴츠리드는 농촌지역 중심의 토지 이용 구조를 가지고 있으며, 지역 내 가축 사육과 작물 재배가 활발하게 이루어지는 환경이다. 이러한 농업 기반은 바이오가스 발전의 주요 원료인 가축 분뇨, 곡물 잔사, 유기성 폐기물 등을 지역 내에서 안정적으로 공급할 수 있는 조건을 제공한다. 바이오가스 설비는 열병합 발전 방식(Co-generation)을 적용하여 전력과 열을 동시에 생산하

4) Wildpoldsried 공식 홈페이지(<https://www.wildpoldsried.de/>, 검색일 2025.05.13.)

5) Wildpoldsried 공식 홈페이지(<https://www.wildpoldsried.de/>, 검색일 2025.05.13.)

6) 김정곤·최정은 (2023, p.24)

7) Wildpoldsried 공식 홈페이지(<https://www.wildpoldsried.de/>, 검색일 2025.05.13.)

8) 김정곤·최정은 (2023, p.25)

고 있으며, 생산된 전력은 마을 내 소비와 외부 송전, 열에너지는 주택단지 및 산업단지에 공급되는 지역난방망을 통해 활용된다⁹⁾. 장기 운영을 통해 회수율 90% 이상의 고효율을 유지하고 있으며, 전력 자립뿐 아니라 난방 수요 대응 측면에서도 중요한 역할을 수행하고 있다¹⁰⁾.

바이오가스 설비는 단순한 전력 생산을 넘어, 축산·농업 활동과의 유기적 연계를 통해 자원 순환형 에너지 체계를 실현하고 있으며, 이는 마을의 지속가능한 에너지 구조 구축에 기여하고 있다. 지역 주민과 농민이 협동조합 또는 사업 파트너 형태로 직접 운영에 참여함으로써, 기술적 지속가능성과 사회적 수용성을 동시에 확보하고 있는 사례로 평가된다¹¹⁾.



[그림 2-15] 빌트폴츠리드 바이오 매스 시설

출처: Wildpoldsried 공식 홈페이지(<https://www.wildpoldsried.de/>, 검색일 2025.05.13.)

- 무탄소 에너지 활용: 에너지 저장·디지털 인프라 역량

빌트폴츠리드는 지역 내에서 자체 생산된 무탄소 에너지를 저장하고, 자가 소비하거나 이웃 간 공유 및 판매하는 체계를 구축함으로써, 에너지의 생산-소비-순환이 지역 내부에서 완결되는 지속가능한 구조를 실현하고 있다¹²⁾. 이러한 통합 에너지 자립 시스템은 단순한 생산 중심에서 벗어나, 저장·분배·거래까지 포함한 전체 에너지 생애주기를 지역 단위에서 관리할 수 있도록 기술적으로 뒷받침되고 있다.

특히 2011년부터 2013년까지 수행된 IRENE 프로젝트(Integration of Renewable Energy and Electromobility)와 2014년부터 2018년까지 이어진 IRENE2 프로젝트를 통해, 분산형 재생에너지원을 기반으로 한 지능형 전력망(Smart Grid)이 마을 단위에 적용되었다. 프로젝트에서는 태양광, 풍력, 바이오가스 등 다양한 에너지원의 변동성을 통합적으로 관리하고, 전기차 충전 수요와 연계하여 전력 수요·공급을 최적화하는 알고리즘이 실증되었다¹³⁾.

9) 김정곤, 최정은 (2023, p.25)

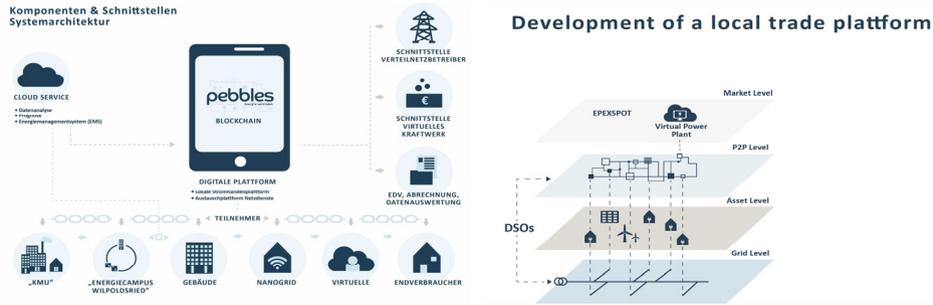
10) Wildpoldsried 공식 홈페이지(<https://www.wildpoldsried.de/>, 접근일 : 2025. 05.13)

11) 김정곤, 최정은 (2023, p.36)

12) 김정곤, 최정은 (2023, p.36)

13) 김정곤, 최정은 (2023, p.31)

IRENE2의 연장선에서 블록체인 기반의 P2P 전력 거래 플랫폼도 시범 운영되었으며, 이를 통해 생산자와 소비자 간 직접 전력 거래, 실시간 모니터링, 에너지 인증 등이 가능해졌다. 이 시스템은 기술 공급자, 통신 플랫폼 운영자, 배전망 사업자, 지역 주민 간 협력 구조를 기반으로 하며, 분산형 에너지 운영의 현실적 가능성을 입증한 사례로 평가된다¹⁴⁾.



[그림 2-16] pebbles 블록체인 기반 및 지역 거래 플랫폼 다이어그램

출처: pebbles 공식 홈페이지(<https://pebbles-projekt.de/projekt/>, (검색일 2025.05.13).)

이처럼 빌트폴츠리드는 기술 기반의 저장 및 디지털 에너지 인프라를 활용하여 에너지 생산과 소비를 지역 내에서 통합적으로 관리하고 있으며, 이는 마을 단위의 에너지 자립성과 장기적 지속가능성을 확보하는 핵심 요소로 작용하고 있다.

② 저 에너지 건축과 공동체 자립이 결합된 지속가능한 주거 커뮤니티: Seebrihof, Hausen am Albis, Switzerland

제브리호프는 스위스 취리히 남서부에 위치한 하우스젠 암 알비스(Hausen am Albis) 지역에 조성된 에너지 자립형 주거 단지로, 무탄소 에너지 중 하나인 재생가능 전력을 활용한 수소 저장 시스템을 중심으로 한 계절 간 장기 저장 구조를 실증하고 있는 대표적인 사례다¹⁵⁾. 본 단지는 2000년대 초반부터 계획이 시작되어, 2020년 착공 후 순차적으로 가동되고 있으며 2025년까지 최종 완공을 목표로 하고 있다.

프로젝트의 핵심은 여름철 태양광 발전을 통해 생성된 잉여 전력을 지역 내에서 수소로 변환 저장하고, 겨울철 전력 및 열 수요가 증가하는 시기에 이를 연료전지를 통해 다시 전기와 열로 전환해 사용하는 ‘Power-to-Gas-to-Power’ 기반의 순환형 에너지 시스템 구축이다. 이로써 단지는 약 1,200kWh 규모의 수소 저장 능력과 40% 수준의 전기 자급률을 실현하며, 도시형 주거지 내 장기 저장 기반 무탄소 에너지 활용 모델을 선보이고 있다.

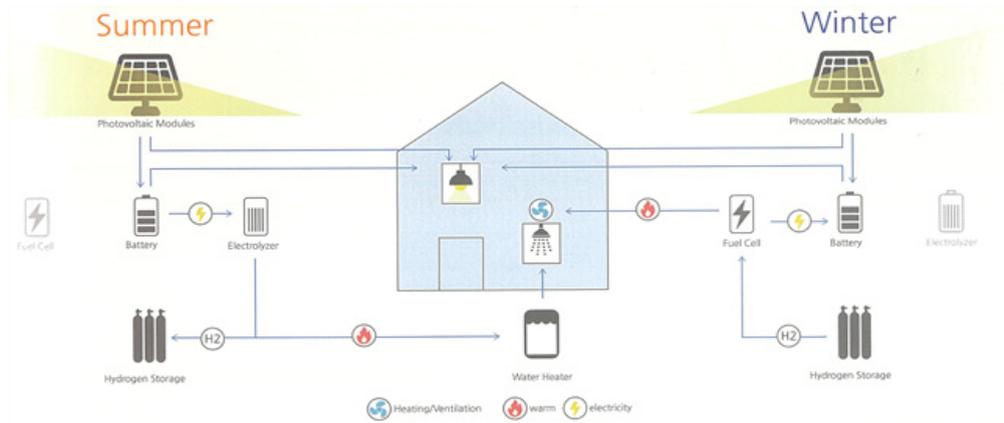
이처럼 제브리호프는 재생에너지 기반 수소를 무탄소 에너지의 계절 간 저장 매체로 활용함과

14) 김정근, 최정은 (2023, p.34, 36)

15) 김정근, 최정은 (2023, p.21)

동시에, 친환경 기술과 공동체 생활이 결합된 지속가능한 주거 모델을 구현하고 있다. 분양형 주택 7세대와 조합 임대주택 28세대로 구성된 단지는 채소밭, 과수원, 클럽하우스 등 다양한 주민 공유 공간을 통해 커뮤니티 중심의 자율적 운영이 이루어지고 있으며, 이는 기술 중심 실증을 넘어 생활 기반의 탄소중립 실현 가능성을 보여주는 모범사례로 평가된다¹⁶⁾.

제브리호프는 태양광 발전, 수소 저장, 연료전지, 에너지 배터리 등 복합 설비 간의 유기적 조합을 통해 무탄소 에너지 기반의 자립 구조를 구현하고 있다. 특히, 잉여 재생에너지의 저장을 단기(배터리)와 장기(수소)로 나누어 구성한 이중 저장 체계는 계절 간 에너지 수급 불균형을 해결하는 데 중추적인 역할을 하고 있다.



[그림 2-17] 에너지 전환 다이어그램

출처: 김정근, 최정은 (2023, p.43)

■ 무탄소 에너지 기반시설의 입지기준

제브리호프는 여름철 과잉 전력을 겨울철 수요에 대응할 수 있도록 전환·저장·재활용하는 계절 간 장기 저장 기반 무탄소 에너지 시스템을 구축한 사례로, 다음과 같은 입지적 특성을 갖추었다.

- 태양광 에너지: 안정적인 일사량과 전력 생산 여건

해당지역은 취리히 남서쪽에 위치한 중산지형 마을로, 여름철 일사량이 풍부하여 태양광 발전의 생산량이 높은 특성을 갖는다¹⁷⁾. 지형이 완만하고, 남향이 탁 트여 가구별 지붕형 태양광 모듈 설치에 유리하였고, 이는 모든 가구가 자가 발전 실현을 가능케 하였다. 특히, 여름철 수요 초과 전력을 안정적으로 생산할 수 있을 만큼 일조 조건과 건축 구조의 조합이 우수한 편이다.

- 수소 저장: 장기 저장을 위한 공간 구조 및 안전성 확보

16) 김정근, 최정은 (2023, p.43, 45, 46)

17) Weather Spark (2025, <https://weatherspark.com>, 검색일: 2025.06.19.)

제브리호프는 기존 농가 부지를 활용하여 개발된 단지로, 저밀도 단독·공동주택형 커뮤니티 구조를 바탕으로 수소 저장 인프라가 자연스럽게 통합되었다. 수소 저장 탱크는 단지 내 정원 하부에 지하 매립 형태로 설치되었으며, 주거 공간과 일정 거리를 유지한 채 열과 전기를 동시에 공급하는 분산형 구조로 배치되었다. 이러한 형태는 수소의 안전한 저장 및 연료전지 연계에 필요한 물리적 요건을 만족시키면서, 주민의 일상생활과도 공존할 수 있는 공간적 구조를 제공한다¹⁸⁾.

- 계절 간 저장 적합성: 수요 변동성과 기술 수용성

해당 지역은 여름과 겨울의 에너지 수요 편차가 크고, 겨울철에는 일조량 감소와 난방 수요 증가가 동반된다. 이러한 조건은 배터리 기반의 단기 저장 기술로는 대응하기 어렵기 때문에, 잉여 전력을 수소로 전환·저장 후 겨울철 재활용하는 장기 저장 시스템(P2G+연료전지)이 효과적으로 작동할 수 있다¹⁹⁾.

- 통합형 커뮤니티 기반: 단지계획과 에너지 설비의 일체화

제브리호프는 민간 주택과 임대형 조합주택이 혼합된 소규모 주거단지로서, 주택 간 공간 공유·관리 시스템이 잘 구축된 공동체 단지이다. 이 같은 단지 구조는 단순한 기술 도입을 넘어서, 에너지 시스템과 주거환경이 유기적으로 연결될 수 있는 기반이 되었다. 클럽하우스, 정원, 커뮤니티 앱을 중심으로 이루어진 정보 공유와 자율적 운영 구조는 수소 기반 에너지 흐름의 수용성과 효율성을 동시에 확보하는 요인으로 작용하였다²⁰⁾.

3) 도시 통합형 시스템 전환 계획에서의 무탄소 에너지 기반시설 도입사례

① 에너지, 자원, 공간계획의 통합을 통한 도시 시스템 전환: Amsterdam

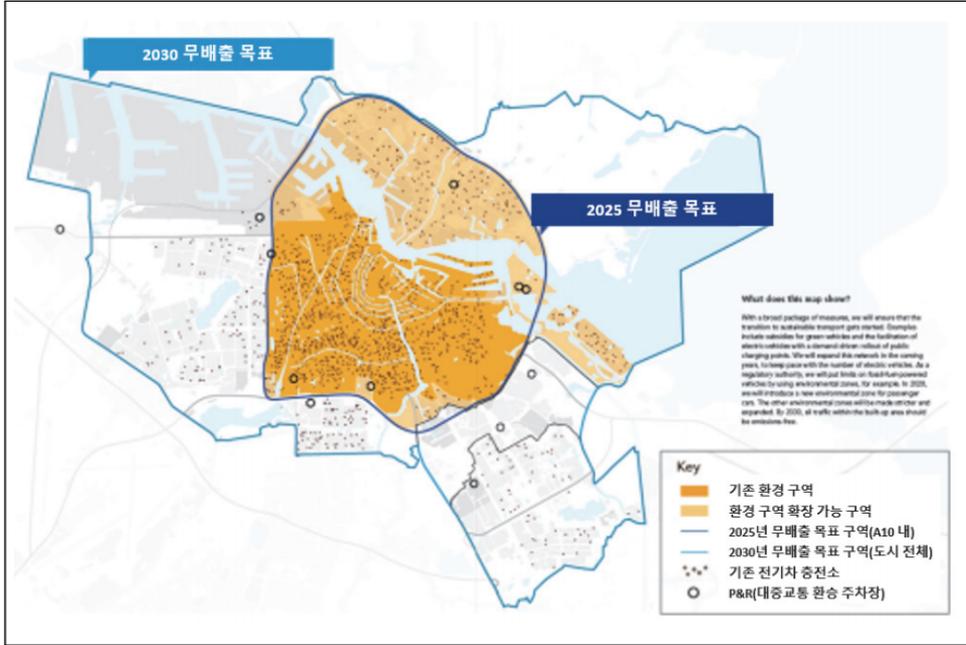
암스테르담은 기존 Hemweg 석탄발전소 부지를 전환하여 탄소중립 에너지 허브로 재편 중이다. 기후위기 대응과 도시 내 에너지 수요 증가에 발맞춰 대규모 재생에너지 인프라를 다층적으로 도입하고 있다. 2019년, 대량 온실가스를 배출하는 Hemweg 발전소를 폐쇄함으로써 도시 차원의 에너지 전환 의지를 명확히 했다. 이후에는 바람·태양·수소 등 다양한 무탄소 에너지원과 저장·전환 시스템을 유기적으로 통합한 지속가능 도시 전략을 추진 중이다. 암스테르담은 도심 내 에너지 자립과 온실가스 감축이라는 이중 목표 하에, 기존 기반시설(Park & Ride, 건축물 지붕, 수상공간 등)의 다차원적 활용과 함께 수소 기반 에너지 체인과 국가 차원의 전력망 연계도 병행하고 있다²¹⁾.

18) 김정곤, 최정은 (2023, p.45)

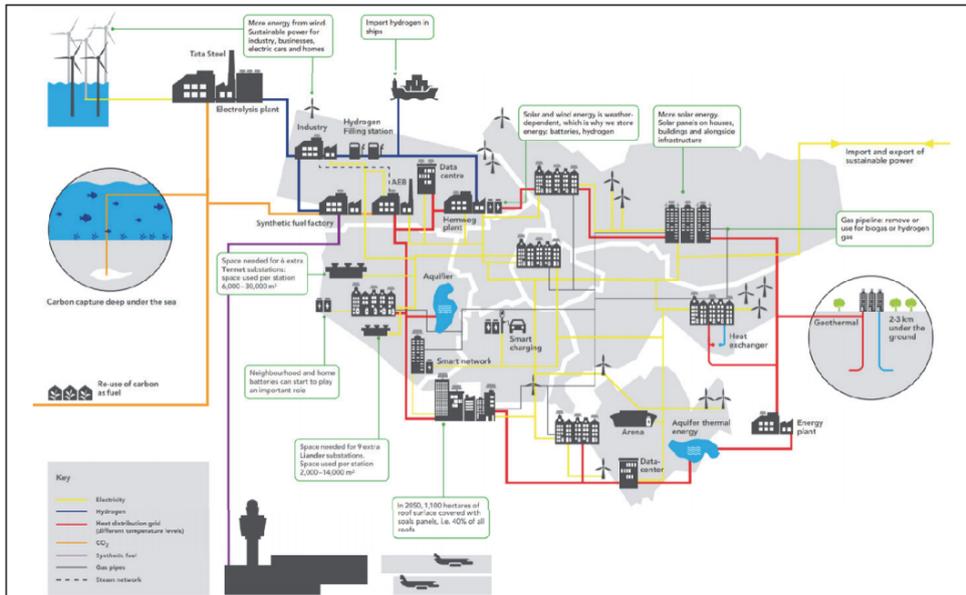
19) 김정곤, 최정은 (2023, p.43)

20) Seebrighof 공식 홈페이지(n.d. <https://seebrighof.ch/vision>, 검색일: 2025.06.19.)

21) City of Amsterdam(2020, p.179), 재인용: 윤은주 외(2023, p.47)



[그림 2-18] 네덜란드 암스테르담 수송부문의 온실가스 감축계획
 출처: 윤은주 외(2023, p.48) 원출처: City of Amsterdam(2020, p.106-107)



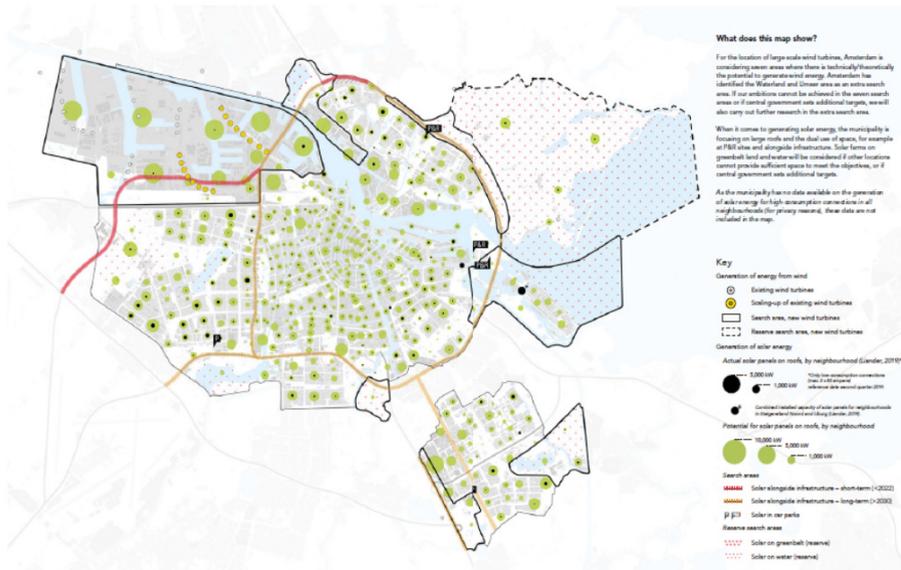
[그림 2-19] 네덜란드 암스테르담 에너지 전환 공간계획 요약
 출처: 윤은주 외(2023, p.49) 원출처: City of Amsterdam(2020, p.176-177)

■ 무탄소 에너지원 기반시설 도입을 위한 입지적 특징

암스테르담의 무탄소 에너지 전략은 입지의 기후적 조건, 산업·교통 인프라와의 연계성, 그리고 기존 고탄소 배출 시설의 구조적 대체 가능성 등을 종합적으로 고려해 추진되었다. 특히, Hemweg 석탄화력발전소 부지는 에너지 전환의 상징적 장소로 선정되었으며, 이는 고탄소 기반 에너지 생산시설을 폐쇄하고 친환경 에너지 허브로 전환한다는 도시 차원의 선연적·전략적 의미를 담고 있다.

또한, 암스테르담은 연중 비교적 균일한 바람 자원을 바탕으로 풍력 발전에 유리한 기후조건을 갖추고 있으며, 이를 활용하기 위해 풍력 발전이 가능한 후보지를 사전에 지정하고 체계적으로 확보하였다. 특히, 항만 및 산업지대와 인접한 북해 운하 지역은 해상풍력·수소생산·저장·수송이 통합된 복합 에너지 지대로서, 재생에너지의 생산과 소비, 그리고 국가 수소 네트워크와의 연계가 용이한 전략적 입지로 활용되고 있다.

도시 내부적으로는 교통 및 주차 인프라와 재생에너지 설비를 결합하는 공간 전략이 핵심적으로 추진되었다. 특히 Park and Ride(P&R) 부지들은 접근성이 뛰어난 위치에 있으며, 태양광 패널과 전기차 충전소가 함께 설치되어, 교통 거점이 에너지 자립형 인프라로 전환될 수 있는 입지적 이점을 갖는다. 아울러, 암스테르담은 건물 옥상, 수면 공간 등 입체적 공간 자원을 적극 활용하여 태양광 패널 설치를 확대하고 있으며, 이는 도심 내 한정된 가용 공간에서 최대한의 에너지 생산 효율을 확보하기 위한 물리적 대응전략으로 이해된다.



[그림 2-20] 네덜란드 암스테르담 에너지 전환 공간계획

출처: 윤은주 외(2023, p.49) 원출처: City of Amsterdam(2020, p.176-177.)

② 에너지 시스템 통합과 탄소중립 도시재생의 결합: Neue Weststadt, Germany

노이에 베스트슈타트(Nue Weststadt)는 독일 바덴뷔르템베르크 주 에슬링엔 암 네카르(Esslingen am Neckar)에 위치한 약 12ha 규모의 복합 도시 개발 지구로, 탄소중립 도시 실현을 목표로 조성된 독일의 대표적 무탄소 에너지 실증 사례다. 과거 독일 철도공사(Deutsche Bahn)의 화물역 부지였던 이 지역은 철거 이후, 600여 세대의 주거시설과 업무·상업시설, 대학 캠퍼스, 녹지 공간이 어우러진 복합 커뮤니티로 재탄생했다. 본 사업은 2017년부터 개발이 본격화되었으며, 2025년 완공을 목표로 독일 연방경제에너지부(BMWi) 및 연방교육연구부(BMBF)의 지원 하에 추진 중에 있다²²⁾. 이 지구는 '1인당 연간 CO₂ 배출량 1톤 미만'이라는 독일 탄소중립 도시 구현 목표를 실현하기 위한 실험적 적용 사례이다. 재생에너지 기반 수소 생산·저장·활용과 고효율 건축, 스마트 그리드 기반의 통합 에너지 시스템 등 최첨단 에너지 솔루션이 집약된 특징이 있다. 특히 전력·난방·냉방·운송 부문이 상호 연결되는 섹터 커플링(Sector Coupling)²³⁾을 구현하여, 도시 내 다양한 에너지 수요를 연계·최적화하는 실증 플랫폼으로 작동 중이다. 건물 단위의 에너지 자립, 지역단위 에너지 순환, 그린 수소 생산 등 다양한 전략이 결합되어 미래 도심형 무탄소 에너지 모델을 제시하고 있다²⁴⁾.

노이에 베스트슈타트는 도심 내에서 탄소중립을 실현하기 위한 에너지 자립형 지구로, 재생에너지 생산·저장·변환·활용 전 과정을 하나의 통합 에너지 시스템으로 구축한 대표적 사례이다. 지구 내 다양한 유형의 건축물에 고효율 설비가 배치되고, 전력·열·수소 등 에너지 매체 간 연계를 통해 섹터 커플링 기반의 고효율 분산형 시스템이 실현되고 있다²⁵⁾.

■ 무탄소 에너지원 기반시설 도입을 위한 입지기준

노이에 베스트슈타트는 독일 바덴뷔르템베르크 주 에슬링엔 암 네카르(Esslingen am Neckar)의 도시 중심부에 위치한 약 12ha 규모의 유허 철도부지에 조성된 지구로, 해당 지역의 물리적·기후적 조건은 무탄소 에너지 기반 도시 조성에 있어 다음과 같은 입지 적합성을 제공하였다.

- 재생에너지 생산에 유리한 기후 조건

독일 전역의 연평균 일사량은 주로 900~1,200 kWh/m² 수준이며 에슬링엔은 독일 남서부에 위치해 연평균 일조량이 1,100~1,200kWh/m²에 달하며 태양광 발전 기반의 에너지 자립을 위한 최적의 조건을 갖춘 지역이다²⁶⁾. 이와 함께 연중 온도 편차가 뚜렷하여, 여름철 태양광 발전

22) 김정곤, 최정은(2023, p.96, 104)

23) 섹터 커플링(Sector Coupling)은 전력, 난방, 교통, 산업 등 여러 에너지 수요 부문을 상호 연계하여, 잉여 전력이나 폐열을 다른 부문에서 효율적으로 활용함으로써 전체 에너지 시스템의 탄소 배출을 줄이고 지속가능성을 높이는 개념이다.

24) 김정곤, 최정은(2023, p.96, 108)

25) 김정곤, 최정은(2023, p.96, 106)

26) Fraunhofer ISE, 2024

량이 풍부하고 겨울철 난방 수요가 높은 기후 특성은 계절 간 에너지 저장 기술(P2G2P)을 실증하기에 적합한 환경을 제공한다.



[그림 2-21] 노이에 베스트슈타트의 태양광 에너지 시설

출처: Neue Weststadt 공식 홈페이지(<https://neue-weststadt.de/energiekonzept/#>, 검색일 2025.05.13.)

- 대규모 단일필지로서의 공간 자원 확보

본 지구는 과거 독일철도공사(Deutsche Bahn AG)의 화물역이 위치했던 대규모 야적장으로, 도심 내 드물게 남아 있던 연속적 저활용 부지였다. 12ha에 달하는 단일 필지 위에 고밀 주거, 업무, 상업, 교육시설뿐만 아니라 태양광 설치, 수소 저장, 열병합발전 등 다양한 무탄소 에너지 설비를 집약 배치할 수 있는 입체적 공간 구조가 가능했다²⁷⁾.

- 다기능 복합지구에 적합한 인프라 여건

대상지는 기존 도시 인프라와 밀접하게 연결되어 있어, 전력망·열망·교통체계와의 연계가 용이한 입지적 장점을 지닌다. 특히, 수소 생산 및 저장 인프라, 중앙 에너지센터, 열병합발전 시스템, 태양광 발전설비 등이 공간적으로 통합 설계·운영되며, 주변 상업·주거·교육 블록과 연계한 도심형 섹터 커플링(Sector Coupling) 실현이 가능하다²⁸⁾. 이는 독일 연방정부의 도시 탄소중립 전략을 실증하는 데 이상적인 구조로 작용하였다.

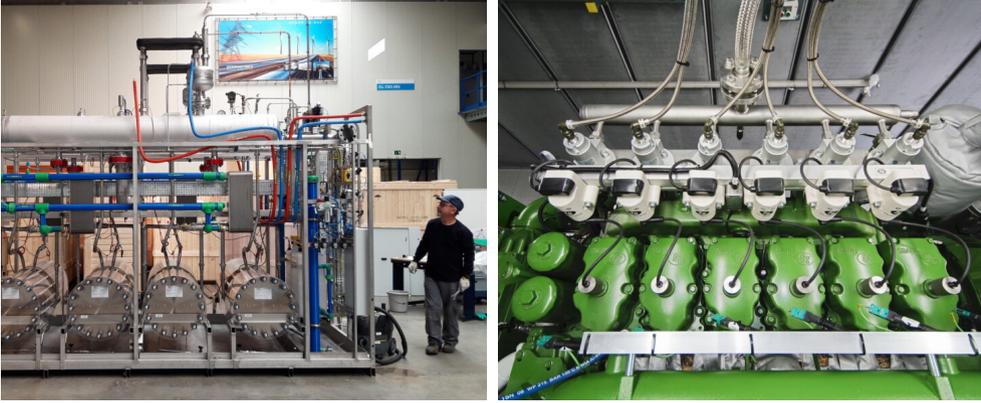
- 에너지 전환을 위한 정책적 수요와 도시 전략의 정합성

에슬링엔은 독일 연방정부의 2045년 탄소중립 목표 실현을 위한 실험지구로 전략적으로 지정되었으며, 노이에 베스트슈타트는 도시 차원의 에너지 자립, 생활환경 개선, 지속가능 교통 연계 등을 포괄한 탄소중립 도시 전환의 마이크로 스케일 실증 거점으로 선정되었다²⁹⁾. 해당 지역은 지역대학, 시청, 스타트업, 기술기관 등이 밀집해 있어 지속적인 기술 도입과 사용자 참여형 테스트가 가능한 지역 거버넌스 기반도 확보하고 있다.

27) 김정근, 최정은(2023, p. 96, 99)

28) 김정근, 최정은(2023, p.108)

29) 김정근, 최정은(2023, p. 110)



[그림 2-22] 노이에 베스트슈타트의 수소 에너지 시설

출처: Neue Weststadt 공식 홈페이지(<https://neue-weststadt.de/energiekonzept/#>, 검색일 2025.05.13.)

③ 지역 열·녹지·교통이 결합된 복합 저탄소 도시모델: Copenhagen, Denmark

덴마크의 수도 코펜하겐은 2025년까지 세계 최초의 탄소중립 수도 달성을 목표로, 실현하기 위한 중장기 전략으로 「2025 기후 계획(CPH 2025 Climate Plan)」을 수립하여 단계적으로 이행해 중이다³⁰⁾. 현재는 세 번째 실행 로드맵(2021-2025)을 추진 중이며, 이 로드맵은 에너지 전환, 교통, 건물, 도시 생태계 등 전 영역을 아우르는 통합적 감축 방안을 포함한다³¹⁾. 코펜하겐은 2005년부터 2018년 사이에 인구가 약 22% 증가한 반면, 1인당 탄소배출량은 57% 감소하는 등 도시 성장과 기후 대응을 동시에 달성한 대표적 사례로 주목 받고 있다³²⁾. 향후에도 지속적인 인구 증가가 예상됨에 따라, 신규 건물 및 교통수단에 대한 저탄소 인프라의 수요도 함께 확대될 것으로 전망한다³³⁾.

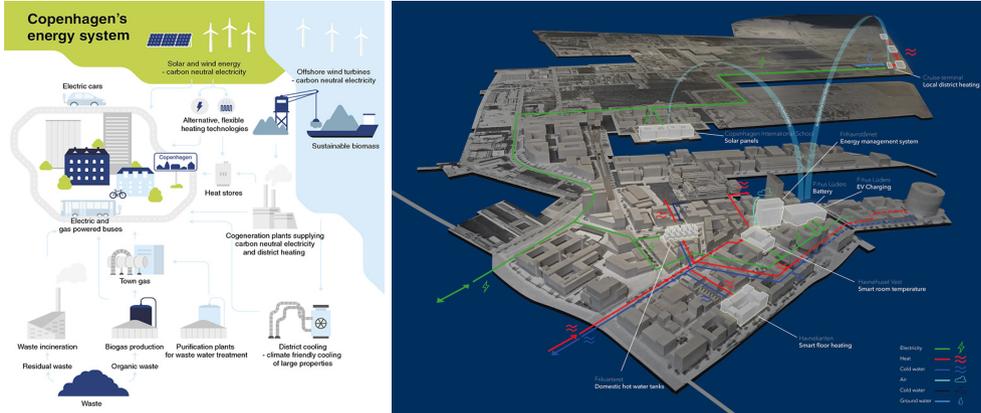
이러한 여건 속에서 가장 핵심적인 감축 영역은 에너지 부문으로, 코펜하겐의 전체 온실가스 배출량 중 약 59%가 에너지 생산과 소비에서 비롯하고 있어 고민이 필요하다(City of Copenhagen, 2020, p. 27.; 윤은주 외, 2023, p. 49). 이에 따라 해상풍력, 해수열, 바이오에너지, 분산형 열공급, PtX(Power-to-X) 등 다양한 무탄소 에너지 기반의 기술과 시스템 도입에 집중하고 있다. 이처럼 코펜하겐의 탄소중립 전략은 단순한 설비 도입을 넘어, 도시 공간 구조 전반을 저탄소 에너지 시스템과 연결하려는 총체적 접근 방식을 가지며, 기존 도시기반시설의 탈탄소화를 넘어, 도시 전체의 운영방식과 공간이용 패턴을 변화시키는 방향으로 이어지고 있다.

30) 윤은주 외(2023, p.49)

31) City of Copenhagen(2020, p.9)

32) 윤은주 외(2023, p.49)

33) City of Copenhagen(2020, p.9)



[그림 2-23] 코펜하겐 에너지 시스템 체계도(좌)와 에너지 공급망(우)

출처: World Economic Forum 홈페이지(<https://www.weforum.org/stories/2019/05/the-copenhagen-effect-how-europe-can-become-heat-efficient/>, 검색일 2025.06.13.)

■ 무탄소 에너지원 기반시설 도입을 위한 입지기준

- 해수 및 지하수를 활용한 지역 냉방 시스템 입지 적합성

코펜하겐은 발트해와 인접한 해양도시로, 연중 비교적 일정하고 안정된 수온을 유지하는 바닷물과 지하수를 냉방 에너지로 활용할 수 있는 입지적 조건을 가진다. 이러한 수자원 기반의 열 교환 시스템은 여름철 냉방 수요가 높은 대규모 건물 밀집 지역에 적합하며, 고효율 지역 냉방 시스템으로서 기존의 개별 냉방보다 에너지 소비와 탄소배출을 대폭 줄이는 효과를 갖는다³⁴⁾.

- 해상풍력 발전에 적합한 해양성 기후 조건

코펜하겐은 풍속이 일정하고 강한 해양성 기후를 보유하고 있어, 대규모 해상풍력 단지 구성에 매우 적합하다. 현재 410MW 규모의 해상풍력단지가 운영되고 있으며, 향후 추가 확장이 용이할 만큼 안정적인 풍향 조건이 된다³⁵⁾. 이러한 기후적 특성은 도시 전력 수요를 재생에너지 기반으로 충당할 수 있는 실질적 조건을 형성하며, 장기적인 에너지 자립 기반으로 가능하다.

- PtX(Power-to-X) 추진을 위한 교통 인프라 밀집 및 물류 연계성

코펜하겐은 국제공항과 항만, 철도, 대규모 물류 단지가 도시 내부에 집적된 복합 교통 거점 도시로, 수소 연료 및 e-kerosene 같은 대체 연료의 생산·유통·공급이 가능한 최적의 입지이다. 이는 PtX 프로젝트 추진을 위한 입지적 요건을 충족하는 동시에, 수소 및 친환경 항공 연료의 대규모 수송·물류 인프라와 연계되어 국제적인 탄소중립 물류 거점으로서의 기능 확장성을 갖는다.

34) City of Copenhagen(2020, p. 29-30)

35) City of Copenhagen(2020, p. 32; 윤은주 외, 2023, p. 49)

- 도시 공간 구조와 분산형 시스템의 적합성

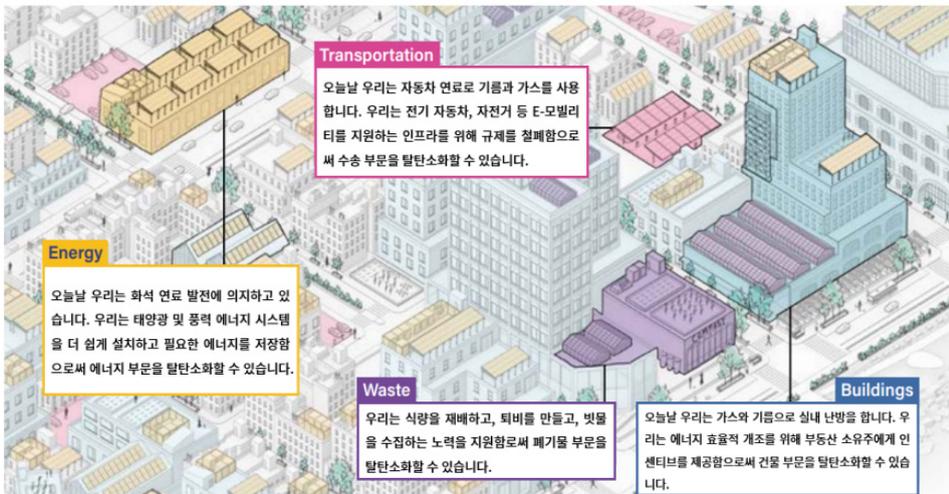
코펜하겐은 밀도 있는 도시 구조와 함께 효율적인 지역난방·냉방망이 구축되어 있어, 열병합발전소 및 바이오에너지 시스템의 입지로 적절하다. 도심 외곽과 중심부 간의 거리도 짧아 에너지 전달 손실이 적고, 분산형 전원의 도입이 용이하다³⁶⁾.

- 도심 외곽 활용 가능성과 경관적 배려

에너지 생산 인프라를 시가지로부터 일정 거리 이격된 외곽 지역에 배치함으로써, 도심 경관을 저해하지 않으면서도 접근성과 유틸리티 효율성을 확보하고 있다. 예컨대 BIO4는 도심에서 2km 떨어진 곳에 설치되어 시민 생활권과 충돌하지 않으면서도 시각적 상징성과 경관적 조화를 동시에 확보하고 있다³⁷⁾.

④ 건물 중심의 탄소감축과 점진적 도시 리트로핏: New York City, USA

뉴욕시는 2022년, 도시 차원의 탄소중립 실현을 위한 포괄적 제도 개선 프로젝트인 ‘City of Yes’ 전략을 발표했다. 전략은 ① 경제 기회(Economic Opportunity), ② 주거 기회(Housing Opportunity), ③ 탄소중립(Carbon Neutrality)의 세 축으로 구성한다. 이 중 ‘City of Yes for Carbon Neutrality’는 무탄소 에너지 기반 도시 전환을 위한 핵심 전략으로 작동하고 있다³⁸⁾.



[그림 2-24] 뉴욕시 탄소중립을 위한 계획

출처: 윤은주 외(2024, p. 76) 원출처: City Of Yes(2022)

특히, 전체 온실가스 배출량의 약 80%가 건물 냉난방, 화석연료 기반 교통, 전력 생산 등 도시 일

36) City of Copenhagen(2020, p.28)

37) City of Copenhagen(2020, p.28) ; State of Green(2015)

38) City of Yes(2023) ; 윤은주 외(2024, p.76)

상에서 발생하는 ‘운영 탄소(Operational Carbon)’에 기인한다. 뉴욕시는 태양광 및 풍력 등 재생에너지 확산, 에너지 저장 인프라(ESS) 설치 확대, 건물 전기화 및 고성능 외피 리트로핏, 전기차 충전 인프라 강화, 자원순환형 폐기물 관리 등을 위한 도시계획 조례(Zoning Resolution) 전면 개정을 추진 중이다³⁹⁾.

이러한 조치는 ‘80×50 로드맵’을 기반으로, 2005년 대비 2050년까지 탄소 배출량 80% 감축 및 탄소중립 완성을 목표로 하고 있으며, 기존 시설 위주의 공간을 재구성하여 분산형 에너지 공급, 청정 모빌리티 인프라, 녹색 건축 리모델링 등을 제도적으로 가능케 하는 구조로 설계했다⁴⁰⁾.

■ 무탄소 에너지 기반시설 도입을 위한 입지기준

뉴욕시는 도시 전역에 분산된 무탄소 에너지 인프라를 유연하게 도입하기 위해, 고밀도 도시 구조와 기존 건축자산의 특성, 민간·공공공간의 혼재 상태, 제도적 유연성 등 다양한 입지 기반 조건을 고려하여 도시계획 조례 개정을 추진하였다.

• 수직·다층 공간의 다양성

고층 건물이 밀집한 뉴욕시는 옥상, 주차장 상부, 외부 공간 등 다양한 수직적·다층적 공간 구조를 활용할 수 있는 잠재력이 크다. 이를 기반으로 도시계획 조례에서는 건물 옥상의 태양광 패널 설치를 위한 높이 기준을 완화하고, 평지붕의 경우 15피트까지 시스템을 설치할 수 있도록 허용하였다(City of Yes, 2023). 또한, 수천 에이커에 달하는 주차장 위 공간을 태양광 캐노피 설치에 활용할 수 있도록 규정을 개정함으로써, 기존 수평적 공간의 한계를 극복하고 도심 속 에너지 자립 구조를 확장하고 있다⁴¹⁾.

• 기축 건물의 집중도 고려

뉴욕시는 약 100만 개 이상의 기축 건물이 도시 전역에 분포하고 있으며, 이 중 다수가 화석연료 기반의 냉난방 설비를 유지 중이다. 또한 도시계획 조례는 외부 기계설비의 옥상 및 마당 설치를 허용하고, 에너지 성능 개선을 위한 외벽 리트로핏 시 용적률 공제 인센티브를 적용하는 등 기존 건축물의 전기화 전환을 제도적으로 지원한다. 이는 단지 신축이 아닌 기존 도시 자산을 활용한 탈탄소화 전략이라는 점에서 도시 내 건물 밀집도를 고려한 핵심 입지 대응책이 된다⁴²⁾.

• 민간 공간과 공공 인프라의 혼재

민간 소유지와 공공 기반시설이 복합적으로 분포한 뉴욕시의 도시구조는 분산형 에너지 시스템

39) City of Yes(2023) ; 윤은주 외(2024, p.75)

40) City of Yes(2023) ; 윤은주 외(2024, p.76)

41) City of Yes for Climate Neutrality Text Amendment. Project Description(n.d. p. 4-5)

42) City of Yes for Climate Neutrality Text Amendment. Project Description(nd.d p. 7-9)

도입에 적합한 조건을 제공한다. 이를 반영하여, 전기차 충전소는 모든 상업·제조지역에 설치 가능하도록 규정되었고, 부속 주차장의 최대 20%, 공용 주차장의 최대 100%까지 공유형 충전소로 활용할 수 있도록 허용되었다. 태양광, 에너지 저장 시스템, 자전거 및 마이크로모빌리티 충전 설비 등도 민간과 공공의 다양한 공간 유형에 적용가능하도록 입지 기준이 유연하게 설정되었다⁴³⁾.

- 제도 기반의 유연성 확보

뉴욕시는 기술 변화와 도시 요구에 선제적으로 대응하기 위해 제도적 유연성을 기반으로 한 도시계획 조례 개정안을 추진하였다. 태양광, 풍력, ESS, 전기차 충전소, 자전거 주차장, 옥상 온실 등 다양한 인프라를 '주용도' 또는 '부수적 용도'로 명확히 정의하고, 이에 따라 건축 규제를 조정함으로써 기존 제도의 경직성을 완화하였다. 또한, 시계획위원회(CPC) 승인 절차의 간소화, 용적률 공제 확대, 허용 돌출물 목록 정비 등 세부적인 제도 개선을 통해 지속가능한 도시 인프라 확산을 제도적으로 뒷받침하고 있다⁴⁴⁾.

4) 소결

해외 무탄소 에너지 기반시설의 사례들은 각 지역의 기후·지형·토지이용·기존 인프라 조건이 에너지원의 특성과 정합적으로 결합될 때 지속가능한 무탄소 전원 체계가 구축될 수 있음을 공통적으로 보여준다. 빌트폴츨리드는 고원지대의 높은 일사량과 완만한 경사지형을 활용하여 지붕형 태양광을 대규모로 보급하였으며, 장기간 풍속 예측과 지형 능선을 활용한 내륙풍력 단지도 구축되었다. 또한 농업 중심의 토지구조는 가축분뇨·농업부산물을 활용한 바이오가스 기반 열병합 시스템 운영의 토대가 되었으며, 스마트그리드 프로젝트(IRENE·IRENE2)를 통해 생산-저장-소비-거래가 연계된 분산형 에너지 체계를 마을 단위에서 구현하였다.

제브리호프 사례는 태양광과 수소 기반 계절 간 저장 시스템이 결합된 독자적 구조를 보여주었다. 여름철 풍부한 일사량과 남향 지형조건은 충분한 잉여전력 생산을 가능하게 했고, 단지 내부의 저밀도 주거구조는 수소 저장 탱크를 지하에 안전하게 매립할 수 있는 공간적 여건을 제공하였다. 이 시스템은 겨울철 난방 수요 증가에 대응하는 장기저장(P2G+연료전지) 구조의 실제 적용 가능성을 입증하였다. 커뮤니티 중심의 공간구조는 단순한 기술 도입을 넘어 주민수용성과 자율적 운영체계까지 뒷받침하였다.

암스테르담은 항만·물류·산업 인프라의 집적을 활용해 해상풍력·수소·에너지 저장을 결합한 복합 에너지 허브를 구축한 사례로, 기존 석탄발전소(Hemweg) 부지를 무탄소 전력 거점으로 전

43) City of Yes for Climate Neutrality Text Amendment. Project Description(n.d. p. 9-11)

44) City of Yes for Climate Neutrality Text Amendment. Project Description(n.d. p 4-6, 10-14)

환한 점이 특징적이다. 또한 건물 옥상, 수면 공간, P&R 부지 등 도시 내부의 입체적·다층적 공간을 적극적으로 활용하여 태양광·전기차 인프라를 도입하는 전략을 펼쳤다.

코펜하겐은 해수·지하수를 활용한 지역 냉방 시스템, 안정적인 해상풍력 자원, 국제공항·항만·물류단지를 기반으로 한 PtX 적용 가능성 등, 기후·수자원·교통 인프라 등 도시 고유의 물리적 조건을 에너지 기반시설과 결합하였다. 도시 외곽을 활용한 시설배치, 지역난방·바이오에너지 시스템과의 결합은 고밀도 도시구조에 적합한 분산형 전원 운영의 기반을 형성하였다.

뉴욕시는 고층건물이 밀집한 도시구조와 민간·공공부지가 혼재된 여건을 활용하여, 옥상 태양광·주차장 태양광·전기차 충전소와 같은 분산형 인프라 도입을 위해 도시계획 조례를 유연하게 개정하였다. 건축 규제 완화, 용적률·높이 기준 조정, 기계실·설비 설치 허용범위 확대 등을 통해 기존 건축자산의 전기화·재생에너지화를 제도적으로 지원하였다.

종합하면, 서로 다른 도시들이 자신의 물리적·환경적·사회적 조건에 적합한 에너지원 조합을 선택하고, 이를 공간구조와 일체화하는 방식으로 무탄소 에너지 기반을 구축한다는 점을 명확히 보여준다.

이에 국외사례에서 얻은 입지적 특성을 제3장의 입지기준 마련을 위한 도구로 활용하고자 한다.

제3장

무탄소 에너지 도입을 위한 시범적용

1. 개요
2. 무탄소 에너지 시범적용 대상 설정
3. 무탄소 에너지 적용을 위한 입지기준 설정
4. 무탄소 에너지 입지분석 시범적용

1. 개요

본 장에서는 보령시와 당진시를 사례도시로 하여 기본 도시공간 구조 전환을 위한 무탄소 에너지 도입 계획방향을 제안하고, 이를 실현할 수 있는 무탄소 에너지원 기반시설들의 입지 적합성을 GIS 기반 공간분석으로 파악하고자 하였다.

보령시와 당진시는 충청남도 내 온실가스 다배출 지역으로, 석탄화력발전소와 같은 화석연료 기반 산업구조를 전환해야 하는 중요한 과제를 안고 있다. 두 도시는 충청남도에서 온실가스 감축과 무탄소 에너지 전환을 위한 전략적 중심지로 설정되고 있으며, 전환 과정에서 지역경제, 고용, 사회적 수용성 등 다양한 쟁점을 동반한다.

앞장의 국외 무탄소 에너지 도입사례를 통해 도출한 입지기준과 관련 연구를 통해 주요 무탄소 에너지 시설의 유형과 입지를 검토하였다. 사례도시에 적용할 수 있는 무탄소 에너지원으로서 풍력, 태양광, 바이오에너지, 연료전지 등의 도입사례와 주요 입지기준들을 검토하였다.

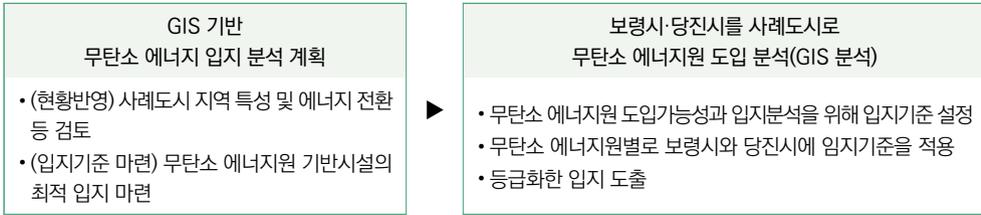
두 지역은 충청남도 전체 온실가스 배출량의 상당 부분을 차지하며, 주된 배출원은 화력발전소와 대규모 산업단지다. 온실가스종합정보시스템 및 충청남도 탄소중립 계획 자료를 통해 부문별 배출량을 분류하고 수치와 비율을 비교 분석하여, 지역별 감축 잠재력과 우선 감축 대상 부문을 도출하였다.

에너지 공급 체계는 화석연료 중심 구조가 뚜렷하며, 태양광, 소수력, 풍력 등 무탄소 에너지원의 기여도는 상대적으로 낮다. 충청남도 발전 현황 통계와 무탄소 에너지원 보급 자료를 바탕으로 두 지역의 기존 에너지원 기여도를 분석하였다.

충청남도의 탄소중립 계획과 연계해 두 지역은 석탄화력발전소의 단계적 폐쇄, 재생에너지 특구 지정, 수소 기반 산업 육성 등을 포함한 에너지 전환 계획을 추진 중이다. 지역별 무탄소 전환 계획의 주요 방향과 목표를 정리하고, 이를 도시공간 구조 전환과 연계할 수 있는 가능성을 분석하였다.

무탄소 에너지 시설의 유형을 풍력, 태양광, 소형원자력, 연료전지 등으로 설정하고, 보령시와 당진시의 지역적 특성과 무탄소 에너지 기반시설의 입지 특성이 고려된 무탄소 에너지원 기반시

설의 입지기준을 도출하였다. 이를 토대로 입지 적합성 분석을 위한 방법론을 설정하여 사례도시에 적용하였다.



[그림 3-1] 사례도시 무탄소 에너지원 도입을 위한 입지분석 내용 및 절차

출처: 연구진 작성

무탄소 에너지원 전환과 관련하여 보령시와 당진시는 화력발전소 폐쇄에 따른 지역경제의 충격(지역세수 축소, 인구 유출, 일자리 감소 등)과 주민 수용성이 중요한 쟁점으로 부각되고 있다. 이를 정리함으로써 탄소중립도시로의 전환시 고려해야 할 사항들을 제시하고자 하였다.

보령시와 당진시는 무탄소 에너지원 사업을 탄소중립도시 사업으로 고려해 왔고, 화력발전시설의 대체 에너지원으로 적극 추진하고자 하였다. 그러나, 사업계획 초기와 달리 여러 부정적인 상황들에 직면하면서 사업 시행에 난관을 겪고 있다. 그 구체적인 상황과 시사점을 제시하고자 하였다. 또한, 새로운 정부가 들어서면서 바뀌게 된 무탄소 에너지 사업들을 검토하여 탄소중립도시 조성에 우려되는 문제점들을 진단하였다.

마지막으로 무탄소 에너지 기반시설이 도입되기 위한 적용방안을 정리하였다. 탄소중립도시의 중요한 사업으로 여겨지던 무탄소 에너지 사업이 탄소중립도시와 통합되는 것이 아닌 동떨어진 기술사업의 형태로 바뀌고 있음을 적지하여, 기존 다배출 도시가 탄소중립도시로 전환되는데 결코 바람직하지 않음을 강조하고자 하였다. 아울러서, 이를 타개하기 위해 무탄소 에너지 사업 추진의 방향이 어때야 하는지를 제시하고자 하였다.

2. 무탄소 에너지 시범적용 대상 설정

1) 시범적용 대상지로 보령시와 당진시를 선정

본 연구에서는 무탄소 에너지 입지분석의 시범적용 대상지로 보령시와 당진시를 선정하였다. 두 도시는 충청남도 내 에너지생산 구조와 산업구조의 변화를 선도하고 있는 지역으로, 무탄소 에너지로의 전환을 검토하기에 적합한 조건을 갖추고 있다. 시범적용 대상지의 선정 사유는 다음과 같다.

첫째, 보령시와 당진시는 화력발전소의 단계적 폐쇄가 진행되고 있는 지역으로, 전원전환의 필요성과 기대효과가 매우 큰 도시이다. 두 도시는 전국 최대 규모의 석탄화력발전단지를 보유하고 왔으며, 발전소 폐쇄 이후 대체전원의 확보가 지역 산업과 도시기능 유지에 중요한 과제가 되고 있다. 향후 무탄소 에너지원이 도입될 경우, 전력공급 안정성, 지역경제 전환, 대기환경 개선 등 전환효과가 크게 나타날 것으로 판단되어 시범지로서의 타당성이 높다.

둘째, 두 도시는 이미 탄소중립도시를 목표로 한 정부 공모사업에 선정되어 관련 계획과 사업을 추진해 온 경험을 보유하고 있다. 정부의 탄소중립 시범도시 사업 및 지역 에너지전환 사업을 통해 탄소감축 전략, 에너지 효율화, 재생에너지 도입 등의 정책적 기반을 조성해 왔으며, 무탄소 에너지 도입을 위한 행정적·제도적 준비도가 높은 도시이다. 이러한 정책적 기반은 시범적용 과정에서 사업의 실현가능성을 검증할 수 있는 중요한 조건이 된다.

셋째, 보령시와 당진시는 이미 다양한 무탄소 에너지원을 도입해 온 경험이 풍부한 지역으로, 실증적 관점에서 새로운 기술의 적용성을 검토하기에 유리하다. 두 도시는 태양광·연료전지·바이오 등 신재생에너지 설비를 일정 규모 이상 보급해 왔으며, 산업단지·항만·공공부지 등을 활용한 에너지사업의 추진 경험을 축적해 왔다. 이러한 경험은 향후 무탄소 에너지의 입지적 특성과 제도적 여건을 검증하는 데 유용한 기반이 된다.

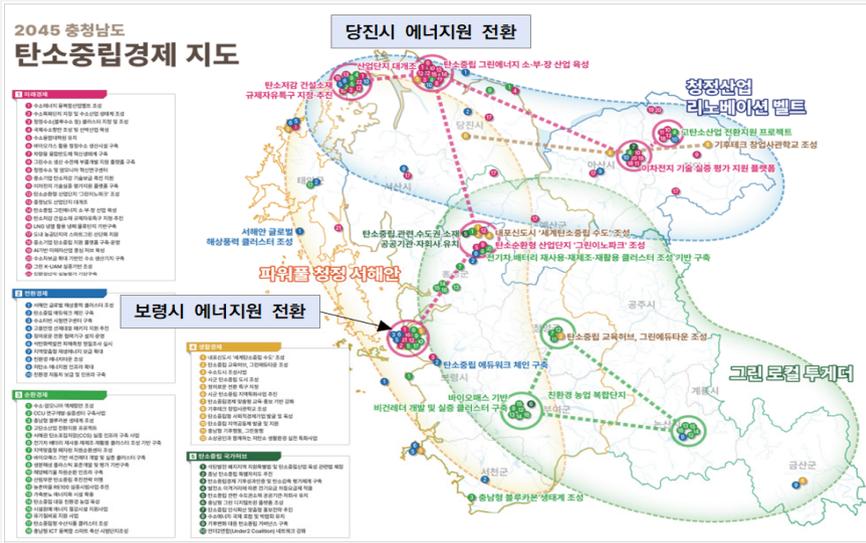
이와 같은 조건을 종합하면, 보령시와 당진시는 전환효과가 크고, 정책 기반이 마련되어 있으며, 다양한 에너지사업 경험을 갖춘 지역으로서 무탄소 에너지 입지분석의 시범적용 대상지로 적합한 도시임을 확인할 수 있다.

[충청남도에서 당진시와 보령시는 에너지원 전환의 주요 축을 담당]

충청남도는 전국 최대 온실가스 배출지역이라는 특성을 고려하여 화석연료 중심 구조에서 벗어나 태양광·풍력·수소 등 신재생 중심의 저탄소 산업구조로 전환을 추진하고 있다. 이러한 지역적 상황 속에서 보령시와 당진시는 무탄소 에너지원 입지분석의 시범대상지로서 특히 높은 타당성을 갖는다.

보령시는 석탄화력 중심의 에너지구조를 전환하기 위해 수소도시 조성, 해상풍력·태양광 확대, 바이오가스 생산, CCUS 도입 등 27개의 전환사업을 추진하고 있으며, 2030년까지 320만 톤 감축 목표를 설정하는 등 대규모 전환 필요성과 실행기반을 동시에 보유한 도시이다.

당진시는 2017년 이후 신규 석탄화력 계획을 철회하고, 시민 공론화를 통해 LNG 전환, 태양광 확대, 대규모 ESS 단지 유치, RE100 산업단지 조성 등 친환경 전환전략을 선도적으로 추진하는 도시로 자리매김하였다. 산업구조 저탄소화와 시민참여형 에너지정책을 적극 도입하고 있어 무탄소 에너지 도입의 효과가 클 것으로 예상된다.



[그림 3-2] 보령시와 당진시의 무탄소 에너지원 전환 추진방향

출처: 충청남도(2023, p.7)를 기반으로 내용 일부 수정



[그림 3-3] 서해안권에서 보령시와 당진시의 청정에너지 시설 방향

출처: 충청남도(2023, p.187)를 기반으로 내용 일부 수정

2) 시범적용 대상지의 특성

① 보령시 온실가스 배출 현황

■ 개요

보령시의 총 온실가스 배출량은 2018년 34,759.65 Gg CO₂eq에서 2022년 25,286.24 Gg CO₂eq로 약 27% 감소하였다. 순배출량은 같은 기간 34,572.83 Gg CO₂eq에서 25,109.48 Gg CO₂eq로 줄어들었다. 이러한 감소는 주로 에너지산업 부문의 발전량 감축 및 효율개선에 따른 결과로 평가된다. 보령시 온실가스 배출 구조의 가장 큰 특징은 연료연소를 통한 에너지산업 부문이 총배출량의 95% 이상을 차지한다는 점이다. 연료연소-에너지산업 부문의 배출량은 2018년 33,548.65 Gg CO₂eq에서 2022년 24,105.93 Gg CO₂eq로 감소하였으나, 총배출량 대비 비중은 여전히 95% 이상을 유지하고 있다.

보령시의 온실가스 배출 구조는 석탄화력발전 등 에너지산업에 절대적으로 의존하는 형태로, 총배출량은 감소하고 있으나 에너지 전환 등을 통한 구조적 전환 없이는 장기적인 온실가스 감축에 한계가 있다. 보령시의 탄소중립을 위해서는 부문별 세부 감축목표 설정과 더불어, 석탄기반 연료연소 에너지원의 전환 전략, 흡수원 관리 강화, 탈루 및 소규모 부문에 대한 종합적 감축 방안이 필요하다.

■ 에너지산업 부문

보령시 온실가스 배출 구조에서 가장 지배적인 부문은 연료연소를 통한 에너지산업 배출이다. 2018년 총배출량 대비 96.51%, 2022년에는 95.34%를 차지하며, 이는 보령시가 석탄화력 발전 중심의 단일화된 배출 구조를 지니고 있음을 시사한다. 발전 설비의 점진적 감축에도 불구하고 여전히 절대적인 비중을 유지하고 있으며, 이는 구조적 전환의 필요성을 강하게 시사한다.

■ 탈루 배출과 산업 공정 부문

탈루 부문은 고체연료 관련 배출이 중심을 이루며, 2018년 254.81 Gg CO₂eq에서 2022년 240.67 Gg CO₂eq로 소폭 감소하였다. 탈루 배출은 발전 및 산업 공정의 비정상 연소나 공정 중 방출에서 발생하고 있는 것으로 나타났다. 산업공정 및 제품생산 부문에서는 광물산업이 절대적 비중을 차지한다. 해당 부문 배출량은 2018년 108.2 Gg CO₂eq에서 2022년 103 Gg CO₂eq로 안정적인 수준을 유지하였다. 금속·화학·전자 산업 등 기타 산업공정의 기여도는 미미하다.

■ 농업과 폐기물

농업 부문은 2018년 307.63 Gg CO₂eq에서 2022년 324.62 Gg CO₂eq로 다소 증가하였다. 가축분뇨처리와 비재배가 주된 배출원이며, 장내발효 배출량도 소폭 증가 추세를 보였다. 폐기물 부문은 2018년 69.22 Gg CO₂eq에서 2022년 66.47 Gg CO₂eq로 소폭 감소하였다. 폐기물 매립이 주요 배출원이나, 총배출량에서 차지하는 비중은 0.2~0.3%로 낮다.

■ LULUCF (산림 및 토지이용)

LULUCF 부문은 산림지를 중심으로 연평균 약 -160~-180 Gg CO₂eq 수준의 탄소흡수를 기록하고 있다. 산림지의 탄소흡수 기능은 지역 탄소중립 목표 달성에 기여하며, 향후 산림 관리 및 복원 정책 강화가 필요하다.

[표 3-1] 보령시 부문별 온실가스 배출현황(단위: Gg CO₂eq)

구분	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년
총배출량	34,759.65	32,940.53	32,405.50	26,693.97	25,286.24
순배출량	34,572.83	32,770.58	32,244.87	26,524.48	25,109.48
에너지	34,274.60	32,463.74	31,866.18	26,181.42	24,792.15
A. 연료연소	34,019.79	32,213.05	31,619.03	25,937.80	24,551.48
1. 에너지산업	33,548.65	31,733.23	31,151.88	25,490.58	24,105.93
2. 제조업 및 건설업	36.61	35.67	33.36	29.65	29.58
3. 수송	220.57	228.33	219.86	221.9	221.46
4. 기타	210.75	213.12	212.49	194.32	192.02
5. 미분류	3.22	2.71	1.44	1.36	2.49
B. 탈루	254.81	250.69	247.15	243.62	240.67
1. 고체연료	254.76	250.63	247.1	243.56	240.61
2. 기타배출(석유, 천연가스 등생산사)	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07
산업공정 및 제품 생산	108.2	91.55	156.22	117.55	103
A. 광물산업	100.78	80.38	146.5	107	93.23
B. 화학산업	-	-	-	-	-
C. 금속산업	-	-	-	-	-
D. 비에너지 연료 및 용매 사용	0.68	0.6	0.59	0.84	1.4
E. 전자 산업	-	-	-	-	-
F. 오존층파괴물질의 대체물질 사용	-	-	-	-	-
G. 기타 제품제조 및 소비	6.74	10.57	9.13	9.71	8.37
농업	307.63	314.64	314.23	326.49	324.62
A. 장내발효	58.25	61.03	62.19	66.26	70.89
B. 가축분뇨처리	114.02	121.23	119.18	122.62	122.1
C. 벼재배	97.65	93.87	90.28	89.34	83.97
D. 농경지토양	36.46	37.23	40.05	45.14	45.18
E. 사바나 지역의 인위적 소각	-	-	-	-	-
F. 작물잔사소각	0.13	0.13	0.86	1.38	1.54
G. 석회사용	0.03	0.02	0.04	0.04	0.03
H. 요소사용	1.09	1.11	1.62	1.72	0.92
I. 기타 유기질 비료	-	-	-	-	-
J. 기타	-	-	-	-	-
LULUCF	-186.82	-169.96	-160.63	-169.49	-176.76
A. 산림지	-196.22	-179.19	-173.55	-178.42	-188.1
B. 농경지	10.98	10.03	9.5	10.25	10.41
C. 초지	-2.05	-2.29	-2.31	-2.39	-2.43
D. 습지	3.45	7.78	8.19	8.36	7.78
E. 정주지	-	-	-	-	-
F. 기타토지	-	-	-	-	-
G. 벌채된 목재활용 제품	-2.98	-6.28	-2.46	-7.29	-4.41
H. 기타	-	-	-	-	-
폐기물	69.22	70.61	68.86	68.5	66.47
A. 폐기물매립	62.73	64.12	63.77	62.73	61.47
B. 고형폐기물의 생물학적 처리	0.49	0.52	0.52	0.56	0.57
C. 폐기물소각 및 노천소각	2.81	3.37	2.1	2.99	2.29
D. 하폐수처리	3.19	2.61	2.47	2.22	2.14
E. 기타	-	-	-	-	-

출처: 온실가스종합정보시스템, 2024년 지역 온실가스 통계 총남 중 보령시 공표 자료(vkt(차량등록대수 및 주행거리 활용) 기준)(www.gir.go.kr, 검색일 : 2025.06.16.)을 활용하여 연구진 재작성

② 당진시 온실가스 배출 현황

■ 개요

당진시는 발전소·철강업 중심의 에너지산업과 금속산업이 온실가스 배출 구조를 지배하고 있다. 에너지산업 연료연소가 총배출량의 약 59%, 금속산업이 약 13%를 차지하며, 지역경제 구조가 곧 온실가스 배출 구조로 직결되는 특징을 가진다.

2018년 당진시의 총 온실가스 배출량은 67,239 Gg CO₂eq로 나타났으며, 2022년에는 60,592 Gg CO₂eq로 약 10% 감소하였다. 순배출량 또한 2018년 67,205 Gg CO₂eq에서 2022년 60,493 Gg CO₂eq로 감소하는 양상을 보였다. 이는 당진시에서 온실가스 감축 노력이 일부 진행되고 있음을 의미하나, 연평균 감축속도는 온실가스 감축목표(NDC 등) 달성에는 부족한 수준이다

■ 에너지 부문

에너지 부문은 당진시 온실가스 배출의 절대 다수를 차지하며, 2022년 51,343 Gg CO₂eq로 총 배출량의 약 85%를 차지하였다. 연료연소는 에너지 부문 배출의 대부분(51,328 Gg CO₂eq, 2022년)으로, 특히 에너지산업에서 35,814 Gg CO₂eq가 배출되며 총배출량의 약 59%를 차지하였다. 제조업 및 건설업의 연료연소는 2022년 14,910 Gg CO₂eq로, 에너지 부문 내 29%에 달했다. 수송 부문은 422 Gg CO₂eq, 기타 연료연소는 181 Gg CO₂eq, 미분류는 0.6 Gg CO₂eq로 소규모였다. 탈루 부문은 에너지 부문 내 비중은 낮았으나, 2022년 15 Gg CO₂eq를 기록하며 고체연료(14.4 Gg)와 석유·천연가스 기타배출(0.7 Gg)으로 구성되었다.

■ 산업공정 및 제품생산

2022년 산업공정 및 제품생산 부문 배출량은 8,612 Gg CO₂eq였다. 금속산업이 7,948 Gg CO₂eq로 거의 대부분을 차지하며, 철강·금속가공 등의 산업 구조를 반영했다. 광물산업은 621 Gg CO₂eq였으며, 지속적인 감축 추세를 보였다(2018년 743 Gg → 2022년 621 Gg). 비에너지 연료·용매 사용은 소규모이나, 1.7 Gg CO₂eq 수준이었으며, 기타 제품제조 및 소비 배출량은 40 Gg CO₂eq로 점진적 감소세를 보였다.

■ 농업 및 폐기물

농업 부문은 2022년 477 Gg CO₂eq로, 당진시 총배출량에서 미미한 수준이었으나 가축분뇨, 벼재배 장내발효 등 농촌지역 특성을 일부 반영하고 있었다. 폐기물 부문은 2022년 161 Gg CO₂eq를 배출하였다. 폐기물소각 및 노천소각이 87 Gg CO₂eq로 가장 큰 비중을 차지하였고, 폐기물매립은 60 Gg CO₂eq, 하폐수처리 12 Gg CO₂eq를 보였다. 고형폐기물 생물학적 처리는 1.3 Gg CO₂eq의 미미한 배출량을 보였다.

■ LULUCF (토지 이용 및 산림 부문)

LULUCF 부문은 2022년 -99 Gg CO₂eq를 보여 온실가스 흡수원이 기능하는 것으로 나타났다.

구체적으로는, 산림지에서 -112 Gg CO₂eq를 흡수하며 거의 전량을 차지하였다. 초지도 미미하게나마 -2 Gg CO₂eq로 흡수기능을 보였다. 다만, 농경지와 습지는 7~8 Gg CO₂eq 정도의 소규모의 온실가스 배출을 보였다.

[표 3-2] 당진시 부문별 온실가스 배출현황(단위: Gg CO₂eq)

구분	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년
총배출량	67,239.22	67,002.69	60,380.06	59,943.29	60,592.09
순배출량	67,204.97	66,966.52	60,338.05	59,864.79	60,493.01
에너지	57,338.39	57,102.24	51,212.86	51,041.38	51,342.66
A. 연료연소	57,322.48	57,086.46	51,197.41	51,026.04	51,327.52
1. 에너지산업	41,870.10	40,630.00	36,383.20	36,404.18	35,813.81
2. 제조업 및 건설업	14,844.66	15,830.70	14,211.67	14,011.57	14,910.16
3. 수송	406.53	429.22	411.36	419.34	422.32
4. 기타	200.63	196.12	190.61	190.32	180.66
5. 미분류	0.56	0.42	0.57	0.62	0.57
B. 탈루	15.91	15.78	15.45	15.33	15.14
1. 고체연료	15.29	15.04	14.83	14.61	14.44
2. 기체배출(석유, 천연가스 등 생산)	0.62	0.74	0.62	0.72	0.7
산업공정 및 제품 생산	9,264.44	9,307.82	8,584.22	8,254.75	8,611.63
A. 광물산업	743.05	747.47	707.01	675.96	621.2
B. 화학산업	-	-	-	-	-
C. 금속산업	8,457.55	8,460.68	7,804.07	7,526.86	7,948.48
D. 비에너지 연료 및 용매 사용	1.32	1.2	1.95	1.88	1.72
E. 전자 산업	-	-	-	-	-
F. 오존층파괴물질의 대체물질 사용	-	-	-	-	-
G. 기타 제품제조 및 소비	62.52	98.47	71.2	50.06	40.23
농업	503.67	502.64	489.52	483.58	476.56
A. 장내발효	84.46	84.63	83.16	82.84	83.45
B. 가축분뇨처리	145.82	151.14	147.04	143.81	142.68
C. 벼재배	213.92	206.67	199.48	196.04	190.34
D. 농경지토양	56.92	57.79	57.5	58.34	57.95
E. 사바나 지역의 인위적 소각	-	-	-	-	-
F. 작물잔사소각	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04
G. 석회사용	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06
H. 요소사용	2.43	2.31	2.22	2.46	2.04
I. 기타 유기질 비료	-	-	-	-	-
J. 기타	-	-	-	-	-
LULUCF	-34.25	-36.17	-42.02	-78.5	-99.07
A. 산림지	-63.74	-63.94	-70.99	-89.59	-111.91
B. 농경지	21.47	22.08	22.94	4.75	6.96
C. 초지	-1.85	-1.97	-2.06	-1.97	-1.9
D. 습지	9.87	7.66	8.1	8.31	7.77
E. 정주지	-	-	-	-	-
F. 기타토지	-	-	-	-	-
G. 벌채된 목재활용 제품	-	-	-	-	-
H. 기타	-	-	-	-	-
폐기물	132.72	89.99	93.46	163.58	161.24
A. 폐기물매립	67.52	64.97	62.73	61.16	60.32
B. 고형폐기물의 생물학적 처리	3.55	1.23	1.7	1.67	1.31
C. 폐기물소각 및 노천소각	53.63	14.56	20.56	80.9	87.49
D. 하폐수처리	8.01	9.24	8.48	19.85	12.12
E. 기타	-	-	-	-	-

출처: 온실가스종합정보시스템, 2024년 지역 온실가스 통계 총남 중 당진시 공표 자료(vkt(차량등록대수 및 주행거리 활용) 기준)(www.gir.go.kr, 검색일 : 2025.06.16.)을 활용하여 연구진 재작성

3) 사례도시의 화력발전 기여도와 무탄소 에너지 현황

① 사례도시 에너지원이 충청남도 에너지 수급에 기여하는 수준

■ 충청남도 내 보령시, 당진시의 발전용량 기여도

충청남도 기력발전⁴⁵⁾ 설비는 18,246,058 kW이며, 이 중 보령시는 5,088,000 kW(27.9%), 당진시는 6,040,000 kW(33.1%)를 나타냈다. 보령시와 당진시는 충남 기력 발전의 절반 이상(61.0%)을 담당하고 있어, 화석연료 의존 구조의 중심지역임을 확인할 수 있었다. 한편, 보령발전본부, 신보령발전본부, 당진발전 등의 발전소는 신재생 발전설비를 보유하고 있는데, 이는 충남 전체 신재생 발전용량 3,988,902 kW 중 보령시 발전소의 경우 27,368 kW(0.7%), 당진시 발전소는 52,500 kW(1.3%)를 보유하고 있다.

기력 발전설비 에너지원을 신재생에너지로 전환함에 있어 보령시와 당진시는 기존 기력 발전설비 폐쇄에 따른 신재생 발전설비가 확충이 필요하다.

- 기력 발전설비에서 보령시와 당진시의 기여도

충청남도의 기력 발전설비 총 용량은 18,246,058 kW이다. 이 용량은 유연탄을 주연료로 하는 발전소에서 대부분 발생하고 있으며, 충남 발전설비 용량의 구조에서 화석연료 의존도가 높음을 보여준다.

보령시는 기력 발전 부문에서 5,088,000 kW의 발전설비를 보유하고 있으며, 보령화력발전본부와 신보령화력발전본부 두 설비로 구분된다. 보령화력발전 본부의 설비 용량은 3,500,000 kW로 충남 기력 발전설비 전체의 약 16.7%에 해당한다. 신보령발전 본부는 2,038,000 kW를 보유하여 충남 기력 발전의 11.2%를 차지하고 있었다.

당진시는 기력 발전 부문에서 6,040,000 kW의 발전설비를 보유하고 있으며, 충남 기력 발전설비의 33.1%를 차지하는 것으로 나타났다. 당진화력발전소는 단일 시설로서 전국적으로도 가장 높은 발전용량⁴⁶⁾을 보유하고 있다.

보령시와 당진시를 합하면 충남 기력 발전설비 용량의 절반 이상을 차지하며 이 두 지역이 충남 기력 발전의 핵심 지역임을 알 수 있다. 특히 이들 지역의 기력 발전설비는 화석연료인 유연탄 기반으로 이루어져 있어 두 도시의 온실가스 배출량의 대부분을 차지하고 있다.

45) 기력발전(Steam) 연료를 보일러에서 연소시켜 발생한 증기를 이용하여 증기터빈을 가동하고 이와 연결된 발전기로부터 전기를 생산하는 발전 방식(출처: 전력통계정보시스템(<https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectMain.do?locale=>)에서 전력용어 검색. 접근일: 2025.06.17.)

46) 당진 발전설비는 에너지원 전체에서도 가장 높은 발전용량을 나타내고 있으며, 2위는 전남의 한빛 원자력(5,900,000 kW), 3위는 인천 영흥 기력발전소 (5,080,000 kW)를 차지하고 있다. (출처: 전력거래소. 2024. p38-39)

[보령시 화력발전시설 개요]

보령시는 충청남도 서해안에 위치한 에너지 산업의 중심지로, 한국중부발전(주)에서 운영하는 대규모 화력발전소가 입지하고 있다. 보령발전본부와 신보령발전본부로 구분되며, 각각 석탄(유연탄)을 연료로 하는 석탄화력발전소이다. 발전소에서 생산된 전력은 충남 내 산업단지(특히 천안, 아산, 서산, 당진 등 서북부 산업단지)와 대형 공장, 그리고 전국 전력계통을 통해 다양한 지역에 공급되고 있다. 본 발전소는 충남 내 전력수요의 상당 부분을 충족시키는 역할을 하면서도, 전국적으로도 전력 수급의 중요한 거점이다. 발전소 인근인 서북부 산업단지(천안, 아산, 서산, 당진 등), 대형 공장, 대형 수요처에서 전력을 활용하고 있으나, 전체 생산량 중 일부만이 해당 지역에서 소비되고 있다.



[그림 3-4] 보령시 화력발전소별 위치

출처: 구글맵(<https://maps.app.goo.gl/gYgVcbiTwMm9fqoQA>, 접근일 : 2025.06.16.)를 참조하여 연구진 재작성

[당진시 화력발전시설 개요]

당진시는 충청남도 서해안 북부에 위치한 국내 최대 규모의 전력 생산 거점 중 하나로, 한국동서발전(주)에서 운영하는 대규모 화력발전소(당진화력발전소)가 있다. 주로 석탄(유연탄)을 연료로 하는 초대형 석탄화력발전 설비로 구성되며, 설비용량 기준으로 전국에서도 손꼽힌다. 당진화력의 생산전력은 충남 북부 산업벨트(송산·석문국가산업단지, 아산·천안 제조업 클러스터, 서산 화학단지 등)의 주요 수요처로 공급될 뿐만 아니라, 전국 단위 전력계통을 통해 수도권 및 여러 권역으로 송전된다. 당진시 발전단지는 충남 지역의 전력 수요를 충족시키는 핵심 기반시설일 뿐만 아니라, 국가 전력 수급 안정성 측면에서도 큰 비중을 차지한다. 발전소 인근의 산업단지와 대규모 공장, 지역 내 주요 수요처에서 생산 전력의 일부를 소비하지만, 전체의 상당 부분은 전국 송전망을 통해 수도권·충남권·호남권·영남권 등 다양한 지역으로 분산 공급된다.



[그림 3-5] 당진시 화력발전소별 위치

출처: 구글어스(<https://www.google.com/intl/ko/earth/index.html>, 접근일 : 2025.11.28.)를 참조하여 연구진 재작성

■ 보령시와 당진시의 발전소에서 담당하는 신재생 발전설비 용량 기여도⁴⁷⁾

충청남도 신재생 발전설비 총 용량은 3,988,902 kW로서, 태양광, 연료전지 등 다양한 발전원 설비용량이 포함되어 있다. 보령시는 보령발전본부와 신보령발전본부를 중심으로 신재생 발전설비 용량으로 27,368 kW를 보유하고 있으며, 충남 전체에서 볼 때, 0.7%에 해당한다. 세부적으로는 소수력이 12,500 kW 태양광이 7,388 kW, 연료전지가 7,480 kW를 차지한다. 당진시는 신재생 발전설비 용량으로 52,500 kW를 보유하고 있으며, 소수력이 8,200 kW 태양광 등의 발전원이 44,300 kW를 차지하고 있으며, 충남 전체의 1.3%를 차지하고 있다.

[표 3-3] 충청남도 발전원별 발전설비 현황(2023년도 현재, kW)

원별	시군별 발전설비	발전설비 용량	보령시		당진시	비고	
			보령발전본부	신보령발전본부	당진발전		
원자력	-	-	-	-	-		
기력	유연탄	보령	3,050,000	3,050,000	-	한국중부발전	
		신보령	2,038,058	-	2,038,000	한국중부발전	
		태안	6,100,000	-	-		
		당진	6,040,000	-	6,040,000	한국동서발전	
		신서천	1,018,000	-	-		
		소계	18,246,058	3,050,000	2,038,000	6,040,000	
	무연탄	-	-	-	-	-	
	LNG	-	-	-	-	-	
	소계		18,246,058	3,050,000	-	-	
	복합 화력	경유	대산	465,800	-	-	
LNG		보령	1,350,000	1,350,000	-	한국중부발전	
		당진	2,261,750	-	-	GS EPS	
		소계	3,611,750	-	-		
소계		4,077,550	1,350,000	-	-		
내연력	경유	도서내연	3,810	-	-		
	소계		3,810	-	-		
집단 에너지	유연탄	-	-	-	-		
	LNG	-	-	-	-		
	LNG 복합	아산배방 열병합	101,700	-	-		
		내포그린 에너지	495,000	-	-		
	기타	-	-	-	-		
소계		596,700	-	-			
신재생	수력	일반수력	-	-	-		
		소수력	32,297	7,500	5,000	8,200	한국중부발전, 한국동서발전, GS EPS
	태양광, 풍력, 기타	3,956,605	태양광 3,315 연료전지 7,480	태양광 4,073	태양광 44,300		
	기타	-	-	-	-		
소계		3,988,902	18,295	9,073	52,500		
기타		9,390	-	-	-		
합계		26,922,410 (100%)	4,418,295 (16.4%)	2,047,073 (7.6%)	6,092,500 (22.6%)		

47) 보령시와 당진시의 신재생 발전설비로 검토된 자료는 보령발전본부와 신보령발전본부, 당진발전소에서 운영 중인 신재생 발전설비만을 다루고 있으므로 보령시와 당진시 전체의 신재생에너지를 지칭하는 것은 아님

원별	시군별 발전설비	발전설비 용량	보령시		당진시	비고
			보령발전본부	신보령발전본부		
원자력	-	-	-	-	-	

출처: 전력거래소. 2024. 2023년도 발전설비 현황. p14-16, 38-39, 중부발전 홈페이지 중 보령화력발전본부와 신보령화력발전본부 설비용량(<https://www.komipo.co.kr/kor/content/35/main.do?mnCd=FN021108>. 접근일: 2025.6.17.), 동서발전 홈페이지 중 당진발전 설비용량(<https://www.ewp.co.kr/kor/subpage/content.html?pc=D8QGHQ7JVMSUTUDJS1NAWO2HHV0B2Y>. 접근일: 2025.6.17.)을 참고하여 연구진 재작성

② 사례도시의 주요 무탄소 에너지원 현황

충남 전체 신재생에너지 발전은 태양광과 바이오가 중심이며 IGCC⁴⁸⁾와 연료전지가 이를 보조하는 구조를 가진다. 앞서 언급되었던 발전소 내 신재생에너지 설비를 포함하여 보령시와 당진시의 신재생에너지 발전량을 파악하였을 때, 보령시는 태양광, 수력, 바이오매스⁴⁹⁾, 연료전지 등 다양한 발전원이 혼합된 지역형 신재생에너지 발전 모델이라 할 수 있다. 반면 당진시는 바이오 발전 중심의 단일화된 발전구조로 대규모 산업형 공급 모델의 특징을 보인다.

• 충남 전체 신재생 에너지원 발전 현황

충남 전체 신재생에너지 발전량은 약 860만 MWh 수준이다. 이 중 태양광 발전은 399만 MWh로 전체 발전량의 46.4%를 차지하며 가장 비중이 크다. 바이오 발전은 약 302만 MWh로 전체의 35.1%를 차지하여 두 번째로 높은 비중을 보였다. IGCC 발전은 약 100만 MWh로 전체의 11.6%를 차지하였다. 연료전지는 약 52만 MWh로 전체의 6.1퍼센트를 기록하고 재생폐기물 발전은 1.6만 MWh로 0.2퍼센트 수준이다. 풍력과 해양 발전은 거의 기여도가 없으며 수력 발전은 5만 MWh 수준으로 0.6퍼센트에 그쳤다

• 보령시와 당진시의 신재생에너지 현황

보령시 총 신재생에너지 발전량은 40만 MWh로 충남 전체의 4.7%를 차지하고 있어 다소 낮은 신재생에너지 발전량 기여를 하고 있다. 신재생에너지 발전량을 분류해 보면, 수력이 57.4%로 가장 높고, 연료전지(13.2%), 태양광(6.3%)의 순으로 높았다.

당진시의 총 신재생에너지 발전량은 약 231만 MWh로 충남 전체의 26.9%를 차지한다. 이 중 바이오 발전이 약 193만 MWh로 당진시 발전량의 높은 기여도를 차지하고 있다. 태양광 발전량은 약 32.8만 MWh(8.2%)로 두 번째 주요 에너지원이며, 연료전지는 약 4.5만 MWh로 1.9%를 보

48) IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle, 석탄가스화복합화력발전)는 석탄, 바이오매스, 폐기물 등 고체 연료를 고온·고압에서 산소와 증기와 반응시켜 합성가스(syngas)로 만든 뒤, 이 가스를 연소해 가스터빈과 증기터빈을 동시에 돌려 전기를 생산하는 발전 방식이다. 석탄을 직접 태우지 않고 오염물질을 가스화 단계에서 미리 제거하므로 온실가스를 감축시키는 에너지원으로 고려되고 있다. 그러나, 설비비용이 매우 높은 단점이 있다(출처: 충청남도. 2021. p.57, 321-322)

49) 바이오매스를 활용한 발전은 가축분뇨, 하수슬러지, 음식물쓰레기에서 발생한 바이오가스, 목재펠릿, 농업부산물 등 고형 바이오매스, 석탄과 바이오매스를 혼합연소하여 전력을 생산하는 혼합연소 발전이 포함된다(출처: 충청남도. 2021. p. 48-53)

였다. 신재생에너지원 중 풍력, 수력, 해양, IGCC는 보령시와 당진시에서 기여도가 거의 없었고, 재생폐기물은 미미한 수준으로 나타났다.

[표 3-4] 충청남도 시군구별 신재생 에너지원별 발전량 현황(2023년도, MWh)

구분	태양광		풍력		수력		해양		바이오매스	
	발전량	비율	발전량	비율	발전량	비율	발전량	비율	발전량	비율
계룡시	4,626	0.1%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
공주시	247,759	6.2%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	242	0.0%
금산군	247,252	6.2%	0	0.0%	10,449	19.2%	0	0.0%	0	0.0%
기타	2,989	0.1%	5	0.7%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
논산시	427,069	10.7%	0	0.0%	917	1.7%	0	0.0%	4,001	0.1%
당진시	328,256	8.2%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	1,935,288	64.1%
보령시	250,120	6.3%	0	0.0%	31,334	57.4%	0	0.0%	67,498	2.2%
부여군	313,040	7.8%	0	0.0%	2	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
서산시	461,568	11.6%	3	0.4%	0	0.0%	0	0.0%	958,794	31.8%
서천군	248,006	6.2%	35	4.8%	882	1.6%	0	0.0%	0	0.0%
아산시	263,807	6.6%	21	2.9%	244	0.4%	0	0.0%	2,620	0.1%
예산군	188,437	4.7%	0	0.0%	354	0.6%	0	0.0%	0	0.0%
천안시	216,589	5.4%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
청양군	85,419	2.1%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	4,956	0.2%
태안군	479,734	12.0%	52	7.1%	10,372	19.0%	0	0.0%	44,992	1.5%
홍성군	226,606	5.7%	619	84.2%	0	0.0%	0	0.0%	982	0.0%
합계	3,991,277	100.0%	735	100.0%	54,554	100.0%	0	0.0%	3,019,373	100.0%

구분	재생폐기물		연료전지		IGCC		합계	
	발전량	비율	발전량	비율	발전량	비율	발전량	비율
계룡시	0	0.0%	7	0.2%	0	0.0%	4,633	0.1%
공주시	0	0.0%	332	0.1%	0	0.0%	248,333	2.9%
금산군	0	0.0%	73	0.0%	0	0.0%	257,774	3.0%
기타	0	0.0%	27	0.9%	0	0.0%	3,021	0.0%
논산시	0	0.0%	66	0.0%	0	0.0%	432,053	5.0%
당진시	1,893	0.1%	44,957	1.9%	0	0.0%	2,310,394	26.9%
보령시	874	0.2%	53,097	13.2%	0	0.0%	402,923	4.7%
부여군	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	313,042	3.6%
서산시	4,398	0.2%	381,359	21.1%	0	0.0%	1,806,122	21.0%
서천군	23	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	248,946	2.9%
아산시	0	0.0%	817	0.3%	0	0.0%	267,509	3.1%
예산군	0	0.0%	33	0.0%	0	0.0%	188,824	2.2%
천안시	9,053	3.4%	41,054	15.4%	0	0.0%	266,696	3.1%
청양군	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	90,375	1.1%
태안군	0	0.0%	0	0.0%	996,517	65.1%	1,531,667	17.8%
홍성군	0	0.0%	133	0.1%	0	0.0%	228,340	2.7%
합계	16,241	0.2%	521,955	6.1%	996,517	11.6%	8,600,652	100.0%

출처: 한국에너지공단 신·재생에너지 센터(<https://www.knrec.or.kr/biz/main/main.do>). 보급통계 발전량 중 충남 지역별 발전량 자료를 참고하여 연구진 재작성(접근일 : 2025.06.17.)

4) (소결) 시범적용을 위한 무탄소 에너지 대상 선정

충청남도 시군별 신재생에너지 발전현황을 살펴보면, 지역별로 에너지원 구성과 공급구조에 상당한 차이를 보이고 있다. 충남 전체 신재생에너지 발전량은 약 860만 MWh 규모이며, 이 중 태양광(46.4%)과 바이오(35.1%)가 대부분을 차지하고 있었다. 반면 풍력·수력·해양에너지는 기여도가 매우 낮아 현재로서는 보조적 전원 역할에 머무르고 있다. 또한 연료전지는 약 52만 MWh(6.1%)로 확인되어 일부 시군에서 의미 있는 기여도를 보이는 등 지역적 편차가 존재한다.

사례도시인 보령시와 당진시의 경우에도 신재생에너지의 구성은 상이하다. 보령시는 수력(57.4%)과 연료전지(13.2%), 태양광(6.3%)이 결합된 '혼합형 지역 신재생에너지 구조'를 보이며, 상대적으로 다양한 전원의 조합을 갖추고 있다. 반면 당진시는 바이오 발전이 193만 MWh로 전체의 64.1%를 차지하는 '대규모 산업형 에너지 공급 구조'를 보이고 있으며, 태양광과 연료전지는 각각 8.2%, 1.9% 수준으로 나타났다. 이러한 지역별 전원구조는 향후 무탄소 에너지원 도입을 위한 입지적합성 분석 대상 선정에 반영될 필요가 있다. 한편, 태양광 중심의 재생에너지 발전 비중은 높아지고 있으나, 도시 전체 에너지수요를 안정적으로 충족하기에는 간헐성과 계통수용성 한계가 존재한다. 이러한 지역 여건을 고려할 때, 기저부하 전원 확보가 가능한 소형원자력(SMR)⁵⁰⁾은 무탄소 전원 전환의 핵심 대안으로서 검토가 필요하다.

이에 충청남도 및 사례도시의 에너지현황, 기술적·공간적·정책적 적용가능성을 종합하여 태양광, 풍력, 소형원자력(SMR), 연료전지를 무탄소 에너지원 입지분석 대상 에너지원으로 선정하였다. 각 에너지원의 선정 근거는 다음과 같다.

■ 태양광

태양광은 충청남도 전체 신재생에너지 발전량 중 가장 높은 비중(46.4%)을 차지하는 핵심 에너지원이며, 대부분의 시군에서 안정적으로 보급이 이루어지고 있다. 보령·당진 등 사례도시에서도 주요 에너지원으로 확인되며, 건축물·공공부지·산업단지 등 도시 내 다양한 입지에 적용이 가능하다는 점에서 지역 특성과 무관하게 보편적인 도입이 가능한 전원이다. 기술성숙도와 경제성이 높고, 도시형 분산전원의 적용에 유리하여 입지분석 대상에 포함하였다.

50) 소형원자력 또는 소형원전(Small Modular Reactor, SMR)은 차세대 무탄소 기저부하 전원으로서 국제적으로 높은 기대를 받고 있으며, 보령·당진처럼 대규모 화력발전소 폐쇄가 진행되는 지역에서는 태양광·풍력 등 재생에너지로만 도시 전력수요를 충족하기 어려울 가능성이 있으므로, 전원 대체·전력공급 안정성 확보 차원에서 중요한 정책적 대안이 될 수 있다 (IAEA, 2025). 따라서 본 연구에서는 무탄소 에너지원의 입지적합성 분석에 소형원자력을 포함하였다.

■ 풍력

충청남도 내 풍력 발전량은 매우 낮은 수준(735 MWh, 0.0%대)으로 확인되었으나, 해안·연안·산지 등 특정 입지에서 발전 가능성이 존재하며, 중장기적으로 재생에너지 공급비중 확대를 위해 필수적으로 고려되어야 하는 전원이다. 현재의 보급 현황은 미미하지만, 향후 도입 잠재력 및 연안 중심의 입지 확장 가능성을 고려하여 분석 대상으로 포함하였다. 이는 탄소중립 및 무탄소 전환 시나리오에서 풍력이 차지하는 전략적 위치를 반영한 결정이다.

■ 소형원자력(SMR)

충청남도는 석탄화력 중심의 발전구조가 크고, 보령·당진은 전국 최대 규모의 화력발전 클러스터를 운영하고 있는 지역이다. 이러한 기존 전력 인프라(송전망, 냉각수 이용성, 에너지산업 기반 등)는 소형원자력(SMR) 도입에 유리한 조건을 갖추고 있다. 소형원전은 화력발전 대체가 가능한 기저부하 전원으로 평가되며, 도시 외곽 산업단지·항만 등 기존 에너지 기반시설을 활용할 수 있어 입지전환 비용을 최소화할 수 있다. 에너지안보·전원다변화 측면에서도 전략적 필요성이 높아 입지분석 대상으로 선정하였다.

■ 연료전지

연료전지는 충청남도 전체 발전량의 약 6.1%를 차지하며, 보령이나 천안 등 일부 시군에서는 상대적으로 높은 기여도를 보인다(보령시 13.2%, 천안시 15.4%). 연료전지는 부지 요구면적이 작고 도심·산업단지·공공시설 등 다양한 도시공간에 적용할 수 있는 장점이 있으며, 분산전원·열병합·도시형 그리드 구축 등 도시 내 에너지효율화를 위한 핵심 기술로 평가된다. 실제 지역 내 운영사례도 확인되므로, 현황과 잠재력을 모두 고려하여 입지분석 대상에 포함하였다.

3. 무탄소 에너지 적용을 위한 입지기준 설정

1) 무탄소 에너지 적용을 위한 입지기준 설정의 개요

본 절에서는 앞 절의 4가지 무탄소 에너지원 적용을 위한 입지기준을 체계적으로 설정하기 위해, 2장의 국외 사례와 사례도시에 보다 근접하여 무탄소 에너지의 입지를 평가할 수 있도록 문헌고찰을 수행하였다⁵¹⁾.

2장의 국외사례로부터 독일 빌트폴츠리드, 스위스 제브리호프, 뉴욕시, 암스테르담, 코펜하겐 등 대표 해외 도시·지역의 사례를 검토하여, 태양광·풍력·수소 등 다양한 무탄소 에너지원의 설치가 어떤 지형·기후·사회·공간 조건에서 성립되는지를 정리한다. 이러한 분석을 통해 무탄소 에너지 기반시설의 입지적인 특성을 도출하였다.

무탄소 에너지원별 입지기준을 마련하기 위해서 10편의 선행 문헌에 대한 체계적 문헌고찰을 수행하였다. 이를 통해 풍속·일사량·경사도·방위·도로 접근성·인구밀도·냉각수·단층 등 각 에너지원의 입지 기준을 핵심요소를 도출하고, 해당 요소가 국내에서 활용 가능한 공간데이터(GIS 가용성·해상도·갱신주기 등)에 부합하는지 검토하였다.

앞절의 시범적용 무탄소 에너지원 대상인 태양광·풍력·소형원자력(SMR)·연료전지를 중심으로, 국외사례의 입지적 특성과 문헌 기반 지표를 조합하여 시범적용이 가능한 무탄소 에너지 입지분석을 위한 입지기준을 제시한다. 각 에너지원에 대해 기후·지형적 요건(일사량, 풍향·풍속, 경사 등), 기술적·안전적 요건(단층, 냉각수, 가스공급), 사회·공간적 요건(인구밀도, 주거지 이격거리, 산업단지 연계) 등을 종합하여, 설치 적합성 판단의 기준을 명확히 하였다. 특히 소형원자로(Small Modular Reactor, SMR)의 경우 국제 원전협회인 IAEA(International Atomic Energy Agency), 미국의 NRC(Nuclear Regulatory Commission), 캐나다의 CNSC(Canada Nuclear Safety Commission) 등에서 제공하는 입지기준을 비교하여 국내 적용 시 고려해야 할 필수 요소를 정리하였으며, 연료전지의 경우 당진·보령 지역의 실제 가스공급·수소충전 인프라 데이터를 반영하여 입지 판단 기준을 제시하였다.

51) 2장의 국내 현황분석에서 무탄소 에너지원 입지관련 내용이 나왔으나, 국외 사례의 주요 입지특성과 대동소이하고, 실제로 운영되고 있으므로 국외 사례의 무탄소 에너지 시설의 입지적 특성을 고려하였다.

2) 국외사례 및 문헌고찰을 통한 무탄소 에너지원 기반시설 입지기준(안) 마련

① 국외사례를 통한 입지조건

무탄소 에너지 기반시설의 성공적인 도입과 안정적인 운영은 설비 특성과 지역의 지리·환경·사회적 조건이 조화를 이룰 때 가능하다. 2장에서 분석한 해외 사례를 바탕으로 주요 무탄소 에너지원별 핵심 입지기준을 정리하였다.

■ 태양광 에너지의 입지적 특성

기후·지형 조건의 경우 연중 대기오염도가 낮고 구름 간섭이 적어 일사량이 풍부한 지역이 유리하다. 독일 빌트폴츠리드처럼 평균 해발고도가 높은 고원지대는 태양 복사량이 높아 효율 확보에 긍정적이다. 스위스 제브리호프 사례와 같이, 완만한 경사와 탁 트인 남향 배치가 가능한 지형은 지붕형 모듈 설치에 적합하다.

태양광 에너지의 공간적 입지를 고밀도 도시에서 고려할 경우 수직적·입체적 공간 활용이 핵심이다. 뉴욕시는 건물 옥상, 주차장 상부 등 약 3,400ha의 유휴공간을 잠재적 설치 공간으로 보고, 높이 제한 등 관련 조례를 완화했다. 암스테르담은 대중교통 환승 주차장(P&R) 부지를 활용하여 교통 인프라와 에너지 생산 기능을 통합했다. 빌트폴츠리드에서는 공공건물(학교, 소방서 등) 지붕에 선도적으로 설치하여 에너지 자립의 상징물로 활용했다.

■ 풍력 에너지의 입지적 특성

풍력 에너지 시설은 해안 지역뿐만 아니라 내륙의 고지대 능선도 중요한 입지가 될 수 있다. 빌트폴츠리드는 해발 약 724m 고지대의 상승기류가 형성되기 쉬운 지형적 특성을 활용했으며, 2년간의 장기 풍속 계측 데이터를 통해 최적의 설치 지점을 도출했다.

공간적 입지의 경우 주거지와와의 이격거리 확보를 통한 경관 및 소음 간섭 최소화가 중요하다. 빌트폴츠리드는 터빈을 마을 외곽 초지와 산림 인접 지역에 배치했다. 암스테르담은 항만 구역 등 산업·물류 기능과 인접하고 송배전망 연결이 용이한 7개 후보지를 전략적으로 사전 지정하여 관리하고 있다. 코펜하겐은 안정적인 해풍을 활용할 수 있는 발트해 인근 해역에 대규모 해상풍력 단지를 조성했다.

■ 수소 에너지 (생산·저장·활용)의 입지적 특성

수소 에너지 시설을 위한 입지는 잉여 재생에너지를 안정적으로 공급받을 수 있는 곳이 중요하게 고려되어야 한다. 노이에 베스트슈타트와 제브리호프 모두 태양광 발전으로 생산된 잉여 전

력을 수소 생산의 원천 에너지원으로 활용한다. 또한, 수소 에너지 시설은 연료전지에 에너지를 집적할 수 있으므로 연료전지의 입지에도 중요하다.

수소 에너지 저장 시설의 안전성 확보와 공간 효율성 또한 중요하다. 제브리호프는 수소 저장 탱크를 정원 하부에 지하 매립 형태로 설치하여 안전과 경관을 동시에 확보했다. 노이에 베스트슈타트는 지구 중앙 에너지센터 지하에 전해조와 저장탱크, 열병합발전기를 통합 배치하여 에너지 흐름을 효율적으로 제어한다. 암스테르담과 코펜하겐은 국가 수소 네트워크 및 국제 물류망과 연계가 용이한 항만, 공항 인근을 수소 클러스터의 전략적 입지로 활용하고 있다.

[표 3-5] 국외사례를 통한 무탄소 에너지원별 입지기준 참고내용

에너지원	기후·지형 조건	공간적 입지 특성	주요 해외 사례
태양광	<ul style="list-style-type: none"> 구름과 대기오염이 심하지 않은 지역 남향·완만한 경사지 고원지대 유리(높은 일사량) 	<ul style="list-style-type: none"> 고밀화된 도시는 입체적 공간 활용(옥상·주차장 상부 등) 건물지붕 활용 	<ul style="list-style-type: none"> 빌트폴츠리드: 고원지대 일사량 활용, 공공건물 지붕 설치 스위스 제브리호프: 남향 경사지 지붕 형 모듈 최적화 뉴욕시: 3,400ha 도시 유휴공간 발굴 및 규제 완화 암스테르담: 주차장 상부 태양광 설치
풍력	<ul style="list-style-type: none"> 해안·연안 지역 내륙 고지대 능선(상승기류 형성 지형) 장기 풍속 측정 기반 최적 입지 도출 	<ul style="list-style-type: none"> 주거지와 이격거리 확보 산업·물류기능 인접 지역(항만·물류단지) 안정적인 계통 연계 가능 지역 	<ul style="list-style-type: none"> 빌트폴츠리드: 724m 고지대 능선 활용, 2년 풍속 예측 암스테르담: 항만 중심 7개 후보지 사전 지정 코펜하겐: 발트해 해상풍력 클러스터 조성
수소에너지(생산·저장·활용)	<ul style="list-style-type: none"> 잉여 재생에너지 공급이 되는 지역 대규모 태양광·풍력과 연계 가능 지역 	<ul style="list-style-type: none"> 저장시설의 안전성 확보 중요 지하 매립·에너지센터 통합 배치 등 공간 효율 고려 항만·공항 등 국가 물류망 연계 지역 	<ul style="list-style-type: none"> 노이에 베스트슈타트: 태양광 잉여전력 기반 수소 생산 제브리호프: 수소탱크 지하 매립(정원 하부)로 안전·경관 확보 암스테르담·코펜하겐: 항만·공항 인근 수소 클러스터 운영

출처: 연구진 작성

③ 문헌고찰을 통한 무탄소 에너지원별 입지기준 마련

무탄소 에너지원에 대한 개별적인 입지기준은 입지를 위한 공간분석을 위하여 마련되었다.

각 에너지원별 선행연구 10편에 대한 체계적 문헌고찰을 통해 후보군을 도출한 뒤, 각 요인의 문헌 내 언급 빈도와 국내 공간데이터의 자료 가용성(공개 여부·공간해상도·갱신주기·신뢰도)을 기준으로 선별하였다. 구체적으로는 무탄소 에너지원별로 후보 요인을 목록화하고, 빈도와 가용성 평가를 통해 우선순위를 부여하여 최종 지표군을 확정하였다. 아울러 대상지 적용 가능성, 지표 간 중복상관성도 보조 기준으로 검토하였다.

그 결과 풍력에 대한 입지평가 지표는 도로와의 거리, 풍속, 태양광의 경우 경사도, 일사량, 방위, 소형원자력의 경우 인구밀도, 냉각수, 단층, 경사도로 설정하였다.

[표 3-6] 문헌고찰을 통한 무탄소 에너지원별 입지평가 지표 및 사용 데이터

무탄소 에너지원	평가 지표	평가 조건	사용 데이터	참고 문헌
풍력	도로와의 거리	500m 이내 지역 제외, 그 외 지역은 교통 접근성 고려하여 가까울수록 유리	• 도로구간	Rediske et al., 2021; Shao et al., 2020
	풍속	연구지역 내 풍속은 대체로 7m/s 이하이므로, 상대적으로 풍속이 큰 지역 선호	• 풍속기상자원지도 • (80m, 2016.07 ~ 2021.06)	Asadi et al., 2023; Şahin et al., 2025
태양광	경사도	5° 이상 지역 부적합, 낮을수록 유리	• 수치지형도 • (2024, 2025)	Al Garni & Awasthi, 2017; Yilmaz et al., 2024
	일사량	깊이 클수록 적합	• 태양광기상자원지도 • (2016.07 ~ 2021.06)	Yilmaz et al., 2024; Ayough et al., 2022
	방위	남향 최적, 동남향/서남향 차선, 동·서향 일부 유리, 북향 부적합	• 수치지형도 • (2024, 2025)	이기림 & 이원희, 2015; Noorollahi et al., 2022
소형 원자력	인구밀도	낮을수록 적합	• 국토통계 인구정보 총인구수 • (2024.04, 2024.10)	Sakib et al., 2025; Kassim et al., 2016
	냉각수	반경 3km 이내 수원 존재 → 최적 8km 이내 수원 부재 → 부적합 응용수원 제외	• 실폭하천	Sakib et al., 2025; Baskurt & Aydin, 2018
	단층	근접 시 부적합, 단층 지역 제외	• 단층 • (2023)	Abudeif et al., 2015; Shahi et al., 2018
	경사도	12% 이하 지역 적합	• 수치지형도 • (2024, 2025)	Baskurt & Aydin, 2018; Damoom et al., 2019
연료전지	가스공급 시설의 인접성	가스 생산·저장·배관·충전시설 등 가스공급 인프라와의 거리가 가까울수록 적합함	• 충청남도 당진시_고압가스 저장소 현황(2025) • 충청남도 보령시 고압가스 저장설비현황(2025) • 한국가스안전공사_수소 충전소 현황(2025) • 유통·공급시설 현황(2025)	Guleria & Bajaj, 2020; Li et al., 2023
	수자원의 인접성	해양수 및 내륙 수자원(하천, 호소 등)에 근접할수록 적합함	중분류 토지피복도(2024)	

출처: 연구진 작성

[국외 소형원자로 입지기준]

국외 주요국은 소형모듈원자로(SMR)에 대해 아직 독자적인 국제 표준을 갖추고 있지 않으나, 공통적으로 기존 대형원전의 입지 기준을 기본 틀로 유지하되 SMR 특성을 반영해 입지 유연성을 확대하는 방향으로 규제를 정비하고 있다.

1. IAEA(국제 기준)의 기본 틀

IAEA는 SMR을 위한 별도 규정은 없지만, 「SSR-1」을 통해 네 가지 핵심 기준을 제시한다. 이는 모든 국가가 공통적으로 참고하는 기본 틀이다.

① 지진·지반 안정성, ② 냉각수 확보 가능성, ③ 외부 재해(홍수·폭풍·산불 등) 평가, ④ 주변 인구 및 비상계획구역(EPZ).

2. 미국(NRC)의 특징 : EPZ 축소를 통한 입지 유연화

미국은 기존 16km 규모의 비상계획구역을 SMR에 대해 1~3km로 축소하는 방안을 검토하고 있으며, 이는 산업단지·도시 외곽 등 다양한 지역으로의 입지를 고려한다. SMR는 냉각수 요구량이 적어 내륙·산업단지 입지 가능성도 높다.

3. 캐나다(CNSC)의 특징 : 가장 구체적인 SMR 지침

캐나다는 지진·지반, 냉각수, 극한기후, 인구·EPZ 등 기존 원전 기준에 더해, SMR 특성을 반영한 상세 지침(내륙 입지 허용, 산업인프라 연계성 등)을 명확히 규정하고 있다.

국외 기준을 종합하면 다음 네 가지가 SMR 입지의 핵심 조건으로 수렴한다.

- 지진·지반 안정성 확보는 절대 기준
- 소규모 EPZ(비상계획구역)**를 통해 다양한 입지가 가능
- 냉각수 요구량 감소로 기존 원전보다 내륙·산업지역 배치 용이
- 기존 발전소·산업단지 등 인프라 보유 지역이 우선 후보지

(시사점) SMR은 대형원전과 달리 안전성은 유지하면서 입지 유연성은 크게 확대된 에너지설비로 인식되고 있으며, 기존 화력발전 지역이나 산업단지 중심 도시에서 대체전원 또는 산업전력 공급원으로 활용 가능성을 높게 보고 있다

[표 3-7] 주요 국외 소형원자로 입지 기준 및 주요 내용

국가 (기관)	입지 기준 요소	주요 내용	출처
IAEA	<ul style="list-style-type: none"> • 지진·지반 안정성 • 냉각수 확보 • 외부 위험요소 • 주변 인구 및 비상계획 	<ul style="list-style-type: none"> 활성 단층 회피, 지반 안정성 검토 필수 충분한 수량·온도 안정성·수질 평가 홍수·해일·극한기후·산불·폭발·테러 등 평가 EPZ 규모 설정, 인구밀도 분석 	IAEA, 2019
미국 (NRC)	<ul style="list-style-type: none"> • 지진·지반 • 냉각수 • EPZ 축소 • 외부 위험 	<ul style="list-style-type: none"> 10 CFR Part 100에 따른 원전 부지 안전성 평가 기존 원전 대비 요구량 완화 가능 SMR의 경우 기존 16km → 1-3km 축소 검토 홍수·화재·폭풍·테러 등 평가 	<ul style="list-style-type: none"> U.S. NRC, 2025 U.S. NRC, 2023 U.S. NRC, 2020 U.S. NRC, 2018
캐나다 (CNSC)	<ul style="list-style-type: none"> • 지진·지반 • 수자원 확보 • 주변 인구·EPZ • 기후·환경 	<ul style="list-style-type: none"> 지진 위험도·지반 구성·단층 평가 냉각수 수량·질·온도 변화 평가 SMR 적용 위한 소규모 비상계획구역(EPZ) 검토 극한기후·홍수·빙설·산불 등 평가 	CNSC, 2025

출처: 각 출처 내용을 바탕으로 연구진 작성

3) (소결) 무탄소 에너지원 시범적용을 위한 입지기준

무탄소 에너지원의 도입가능성에 대한 공간입지를 분석하기 위하여, 국외사례에서 확인되는 입지특성과 사례도시에 적용가능하다고 세부 입지 분석지표를 입지기준으로 통합하였다.

대상이 되는 무탄소 에너지원은 태양광·풍력·소형원자력(SMR)·연료전지 등으로서 에너지원별로 기후·지형 조건, 공간적 입지특성, 기술적·안전적 요구조건을 종합 검토하였고, 해당 특성을 국내 공간자료(GIS)를 활용할 수 있게 하였다.

무탄소 에너지원별 입지 조건은 단순히 특정 기술의 최적 설치환경을 의미하는 것이 아니라, 도시·산업·주거 구조와의 연계를 통해 실제로 적용 가능한 후보지를 식별하는 기반으로 기능한다. 아래에서는 각 무탄소 에너지원별 입지기준을 상세히 제시한다.

■ 태양광 에너지 입지기준

태양광 발전은 지형·기후·공간구조의 영향을 복합적으로 받는 대표적 분산형 전원으로, 해외 사례에서는 일사량이 풍부하고 남향 경사 또는 남향 지붕이 확보된 지역에서 높은 효율을 보인 것으로 나타났다. 독일 빌트폴츠리드와 스위스 제브리호프는 해발고도가 상대적으로 높은 고원지대를 기반으로 일사량 확보가 용이하고, 완만한 경지와 남향 지붕을 활용한 발전이 주도되었다. 반면 뉴욕시나 암스테르담과 같이 고밀도 대도시는 옥상·주차장 상부 등 입체적 공간을 적극 활용하여 태양광의 공간적 제약을 해결하는 전략을 택하고 있다.

이와 같은 해외 사례의 공간특성을 반영하여 경사도, 일사량, 방위를 핵심 평가항목으로 설정하였다. 경사도가 낮을수록 시공성과 발전효율이 높고, 5° 이상에서는 설치 난이도와 구조적 제약이 증가하기 때문에 5°를 부적합 기준으로 설정하였다. 일사량은 태양광 기상자원지도를 기반으로 값이 큰 지역을 선호하는 방식으로 평가지표를 설정하였다. 방위는 남향이 최적 조건이며, 동남향·서남향은 차선으로 평가하고 동·서향은 부분적인 적합성을 인정하는 한편, 북향은 부적합 방향으로 분류하도록 지표를 설정하였다.

■ 풍력 에너지 입지기준

풍력 에너지는 바람의 세기와 안정성, 지형의 고도 및 지류 형성, 주거지와 이격거리 등 다양한 요인을 종합적으로 고려하였다. 빌트폴츠리드 사례에서는 해발 724m 능선부의 상승기류를 활용하여 최적의 발전효율을 확보하였으며, 설치 전 2년에 걸쳐 장기 풍속 측측이 이루어졌다. 암스테르담은 항만·물류 중심지역을 풍력 후보지로 사전 지정하여 계통연결 및 유지관리 효율을 확보하였고, 코펜하겐은 안정적인 해풍을 활용하여 대규모 해상풍력단지를 구축한 바 있다.

이와 같은 입지적 특성을 고려하여 국내 분석에서는 풍속과 도로와의 거리를 평가지표로 설정하였다. 풍속은 연구지역 대부분이 7m/s 이하이지만, 상대적으로 풍속이 높은 지점은 발전효율 측면에서 경쟁력이 있으므로 선호지로 판단하였다. 도로와의 거리는 500m 이내 지역을 소음·경관·안전상의 이유로 제외하고, 그 외에는 접근성이 높을수록 유지관리 효율 측면에서 유리한 것으로 평가하도록 지표로 설정하였다. 이는 해외 사례에서 확인된 '주거지 이격'과 '산업·물류 기반시설 인접성'이라는 두 가지 입지 원칙을 국내 공간데이터로 반영한 결과로 이해할 수 있다.

■ 소형원자력(SMR) 입지기준

소형원자력(SMR)은 고밀도 도시보다는 기존 산업단지나 항만·화력발전 부지 등 에너지 인프라가 이미 조성된 지역에서 도입 가능성이 높은 기저부하 전원이다. SMR은 부지 규모가 상대적으로 작고 냉각수 확보에 유리한 지역을 선호하며, 지진·단층과 같은 지질적 안정성이 반드시 고려되어야 한다. 국내는 물론 국외에서도 소형원자력의 입지기준으로 명확하게 운영되고 있지는 않으나 IAEA, 미국 NRC, 캐나다 CNSC 등의 자료를 통해서 입지기준 마련에 활용하였다.

소형원자력 입지를 위한 평가지표로 인구밀도, 냉각수 거리, 단층, 경사도를 설정하였다. 인구밀도는 낮을수록 입지 적합성이 높고, 냉각수원은 반경 3km 이내 존재할 경우 최적, 8km 이내 수원이 없으면 부적합으로 평가하도록 설정하였다. 단층 인접지역은 안전성 관점에서 배제하였으며, 경사도는 12% 이하의 완만한 지형이 적합하다고 판단하였다.

■ 연료전지 입지기준

연료전지는 도시형 분산전원으로서 가스공급 인프라(저장·배관·충전소 등)와의 접근성이 매우 중요하며, 설비 운영과 안전성 측면에서 수자원의 근접성도 고려된다. 해외에서는 수소충전소 및 가스 공급망과의 연계가 가능한 항만·공항 등 물류 거점 지역 또는 산업단지 인근에 연료전지 설비가 배치되는 사례가 다수 보고되고 있다.

이에 따라 연료전지 입지기준으로 가스공급시설 인접성과 수자원 인접성을 설정하였다. 가스공급시설은 당진·보령 지역의 고압가스 저장소, 수소충전소, 공급망 현황 등을 종합하여 거리가 가까울수록 적합하다고 평가하고자 한다. 또한, 하천·해양·호소 등 수자원 인근 지역은 열교환 및 안전관리 측면에서 유리하므로 적합지로 판단하였다.

[표 3-8] 사례도시의 무탄소 에너지 적용을 위한 입지기준

에너지원	무탄소 에너지 적용을 위한 입지기준		평가 조건	사용 데이터	참고문헌
	국외 사례 기반 입지 특성	국내 적용 평가 지표			
태양광	<ul style="list-style-type: none"> • 안전한 경사지 최적 • (뉴욕 3,400ha 유희공간)• 공공건물 지붕 활용(빌트폴츠리드) • 고원지대·구름 없는 지역 등 • 고밀도 도시는 옥상 주차장 상부 등 • 남향이 최적 	<ul style="list-style-type: none"> • 경사도 • 일사량 • 방위 	<ul style="list-style-type: none"> • 5° 이상 부적합, 낮을수록 적합 • 값이 클수록 적합 • 남향 최적, 동·서향 일부 적합, 북향 부적합 	<ul style="list-style-type: none"> • 수치지형도(2024, 2025) • 태양광기상자원지도 (2016.07~2021.06) • 수치지형도(2024, 2025) 	<ul style="list-style-type: none"> • Al Gami & Awasthi, 2017 • Yilmaz et al., 2024 • Yilmaz et al., 2024 • Ayough et al., 2022 • 이기림 & 이원희, 2015 • Noorollahi et al., 2022
풍력	<ul style="list-style-type: none"> • 항만·물류 중심지(암스테르담) • 해안 연안 고지대 능선의 상승기류 활용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 도로와의 거리 • 풍속 	<ul style="list-style-type: none"> • 500m 이내 제외, 가까울수록 유리 • 상대적으로 풍속 큰 지역 선호(연구지역 7m/s 이하 대부분) 	<ul style="list-style-type: none"> • 도로구간 • 풍속기상자원지도(80m, 2016-2021) 	<ul style="list-style-type: none"> • Rediske et al., 2021 • Shao et al., 2020 • Asadi et al., 2023 • Şahin et al., 2025
소형원자력 (SMR)	<ul style="list-style-type: none"> • 주변 인구-EPZ • 냉각수 및 수자원 확보 • 지진·지반 안정성 - 	<ul style="list-style-type: none"> • 인구밀도 • 냉각수 • 단층 • 경사도 	<ul style="list-style-type: none"> • 낮을수록 적합 • 3km 이내 수원 존재 시 최적 • 8km 이내 수원 부재 시 부적합 • 음용수원 제외 • 단층 인접 및 포함 지역 부적합 • 12% 이하 적합 	<ul style="list-style-type: none"> • 국토통계 인구정보 (2024.04, 2024.10) • 중분류 토지피복도(2024) • 단층자료(2023) • 수치지형도(2024, 2025) 	<ul style="list-style-type: none"> • Sakib et al., 2025 • Kassim et al., 2016 • IAEA, 2019 • CNSC, 2025 • Sakib et al., 2025 • Baskurt & Aydin, 2018 • IAEA, 2019 • U.S. NRC, 2023 • Abudeif et al., 2015 • Shahi et al., 2018 • IAEA, 2019 • U.S. NRC, 2023 • CNSC, 2025 • Baskurt & Aydin, 2018 • Damoom et al., 2019
연료전지	-	<ul style="list-style-type: none"> • 가스공급시설 인접성 • 수자원 인접성 	<ul style="list-style-type: none"> • 가까울수록 적합 • 해양·하천·호소 인근 지역 적합 	<ul style="list-style-type: none"> • 당진·보령 고압가스저장소 현황 (2025) • KGS 수소충전소 현황(2025) • 유통·공급시설(2025) • 중분류 토지피복도(2024) 	<ul style="list-style-type: none"> • Guleria & Bajaj, 2020 • Li et al., 2023

출처: 표에 기입한 참고문헌을 바탕으로 연구진 재작성

4. 무탄소 에너지 입지분석 시범적용

1) 무탄소 에너지원 발전시설의 입지분석의 개요

무탄소 에너지원을 적용한다면 어디에 하는 것이 적절할지를 파악하기 위해서 사례지역을 대상으로 무탄소 에너지원의 입지적합성을 수행하였다. 무탄소 에너지원으로 고려된 유형은 태양광, 풍력, 소형원자력, 연료전지이며, 각 무탄소 에너지원별 기반시설의 입지기준을 설정하고, 입지분석을 통한 평점을 등급화하였다.

입지분석은 무탄소 에너지원 기반시설이 설치되지 못하는 금지구역을 우선 도출하여 이를 제외한 지역에서의 입지평가 지표를 평가하는 것으로 이루어졌다.

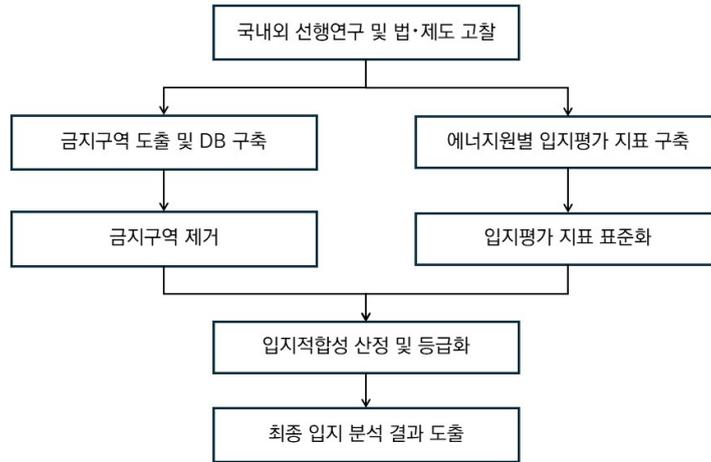
우선 금지구역을 도출하기 위해서 DB를 구축하였다. 이는 선행연구와 법·제도 고찰을 바탕으로 환경공간정보서비스 및 생물지리정보서비스를 활용하여 생태·사회·기술적 요인을 반영한 법적·환경적 금지구역을 도출하고, 이를 GIS 기반 데이터베이스로 구축하였다.

이후 무탄소 에너지원별 입지평가 지표 구축하였다. 선행연구를 기반으로 무탄소 에너지원(태양광·풍력·소형원자력·연료전지) 발전시설의 주요 입지평가 지표를 선정하고, 이에 필요한 공간 데이터를 확보하였다.

입지분석 시행은 금지구역 제거 및 대상지 설정을 함으로써 시작되었다. 구축된 금지구역 DB를 적용하여 발전시설 입지가 불가능한 지역을 공간적으로 제외하고, 잔여 지역을 입지적합성 분석의 대상으로 설정하였다.

입지분석 결과를 명확하게 나타내기 위해서 입지평가 지표의 표준화를 수행하였는데, 각 지표를 0~1 범위로 정규화하여 단위 차이를 보정하고, 값이 클수록 입지 적합성이 높도록 방향성을 통일하였다. 이를 기반으로 입지적합성을 산정하고 등급화하였는데, 표준화된 지표를 중첩·합산하여 종합 적합도를 산정하고, 결과를 5개 등급(Class 1~5)으로 구분하였다

위의 과정을 통해서 최종 결과를 도출하고 시각화하였다. 무탄소 에너지원별 입지적합성 지도를 제작하고, 분석 결과를 시각적으로 표현하여 지역별 발전소 입지 특성을 제시하였다.



[그림 3-6] 무탄소 에너지원 입지적합성 분석 절차

출처: 연구진 작성

2) 무탄소 에너지원 발전시설의 입지분석 방법

① 무탄소 에너지원 입지에 대한 금지구역의 설정

■ 생태적 보호구역

무탄소 에너지원 발전시설 입지 분석에서 우선적으로 고려해야 할 것은 해당 지역이 생태·환경적 가치가 높은지에 대한 여부를 확인하는 것이다. 이러한 지역은 법률에 의해 지정·보호되고 있으며, 생태계 보전·수질 관리·문화재 보호 등을 목적으로 발전소 건설이 전면적으로 금지되게 된다. 분석 대상지에서 고려한 주요 생태적 보호구역의 범위, 관련 법규 및 사용 데이터를 정리해 본 생태적 금지구역은 표3-9와 같다. 습지보호구역·상수원보호구역·생태자연도는 본 연구 대상지 내에 존재하지 않아 적용하지 않았다.

[표 3-9] 생태적 보호구역의 유형 및 분석활용을 위한 데이터

생태적 보호구역 유형	설명	관련 법규	활용 데이터
자연환경보전지역	자연환경·수자원·생태계·상수원·문화재 보전을 위해 지정된 지역으로 발전소 건설 불가	· 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제6조, 제42조, 제76조 · 시행령 관련 조항	자연환경 보전지역
농업보호구역	농업진흥구역의 용수원과 수질을 보호하기 위해 지정된 지역으로 발전소 건설 불가	· 「농지법」 제28조, 제29조 · 「농업진흥지역관리규정」	농지/농업 진흥지역
지하수보전구역	지하수의 수량·수질 보전을 위해 지정된 지역으로 발전소 건설 불가	· 「지하수법」 제2조, 제12조 · 시행령 제19조	지하수 보전구역

출처: 연구진 작성

■ 사회·문화적 보호구역

무탄소 에너지원 발전시설 입지에 있어 공공시설 보호와 문화재 보존, 교통 안전과 관련된 문제들을 고려해야 한다. 이러한 보호구역은 사회적·문화적 가치와 안전성 확보 차원에서 법령 또는 계획에 따라 지정되며, 무탄소 에너지원 발전시설의 건설이 제한된다. 이에 본 분석 대상지에서 고려된 주요 구역은 공장설립 제한지역, 문화유산 보호구역, 철도 등이며, 이에 맞는 데이터를 구축하였다.

[표 3-10] 사회·문화적 보호구역 유형과 활용데이터

사회·문화적 보호구역 유형	설명	관련 법규	활용 데이터
공장설립 제한지역	상수원보호구역 및 취수시설 주변 수질보전을 위해 지정된 구역으로 발전소 건설 불가	<ul style="list-style-type: none"> • 「수도법」 제7조의2 • 「수도법 시행령」 제14조의2 	수도/공장설립 제한지역
문화유산보호구역	역사·예술·학술적 가치를 지닌 문화유산 보존·관리를 위해 지정된 구역으로 발전소 건설 불가	<ul style="list-style-type: none"> • 「문화유산 보존 및 활용에 관한 법률」 제2조, 제27조 • 「문화유산 보존 및 활용에 관한 법률」 시행령 제13조 • 「국가유산기본법」 제3조 	문화유산보호
철도	소음·안전·교통흐름에 영향을 미치므로 발전소 건설 제한 또는 불가	-	철도경계

출처: 연구진 작성

■ 지형적·기술적 금지구역

무탄소 에너지원 발전시설 입지 선정에 있어 법적·제도적 요인 외에도 지형적·기술적 요인으로 인해 건설이 불가능한 지역이 존재하게 된다. 이러한 지역은 무탄소 에너지원 발전시설의 안정적인 운영을 위해 반드시 배제되어야 하며, 본 연구에서는 경사, 수역, 도시지역을 주요 지형적·기술적 금지구역으로 설정하였다.

[표 3-11] 지형적·기술적 금지구역

지형적·기술적 금지구역 종류	설명	사용 데이터	참고 문헌
경사	경사도 20° 초과 지역은 토목·구조적 안정성이 부족하여 발전소 건설 불가	수치지형도 (2024, 2025)	Şahin et al., 2024; Zambrano-Asanza et al., 2021; Baskurt & Aydin, 2018
수역	하천·호수 등 수역은 토지 기반이 없어 발전소 부지로 활용 불가	실목하천	Shen et al., 2025
도시지역	인구밀도와 시설 밀집으로 인한 소음·전자파·안전사고·경관 훼손·주민 건강 문제로 모든 발전소 건설 부적합	용도지역 (도시지역)	Rediske et al., 2021; Shao et al., 2020; Sakib et al., 2025

출처: 연구진 작성

② 입지적합성 분석

발전소 입지 적합성을 정량적으로 평가하기 위해 각 평가 지표를 최대·최소 표준화(min-max normalization) 기법을 이용하여 0~1 범위로 표준화하고, 지표 간 상호 비교가 가능하도록 처리하였다. 표준화된 지표를 중첩·합산하여 종합 입지적합도를 산정하였으며, 그 결과를 바탕으로 에너지원별 입지적합성 결과를 도출하였다.

최종 산출된 입지적합성 결과는 자연분류법(Natural Breaks)을 적용하여 5개 등급(Class 1~5)으로 구분하였으며, 각 등급의 의미는 다음과 같다.

- Class 1 (최적합): 발전소 입지에 가장 적합한 지역
- Class 2 (적합): 발전소 입지에 비교적 적합한 지역
- Class 3 (보통): 발전소 입지 여건이 중간 수준인 지역
- Class 4 (부적합): 발전소 입지로서 제약이 큰 지역
- Class 5 (금지구역): 법적·환경적 제한으로 입지가 불가능한 지역

분석 결과는 발전소 유형별 입지적합성 등급도로 시각화하여 제시하여 정책 수립 및 의사결정 지원에 활용할 수 있도록 하였다.

3) 사례도시에 대한 무탄소 에너지원 발전시설의 입지분석 시범적용 결과

① 풍력발전 입지 적합성 분석 결과

■ 보령시 풍력발전 입지 적합성 분석 결과

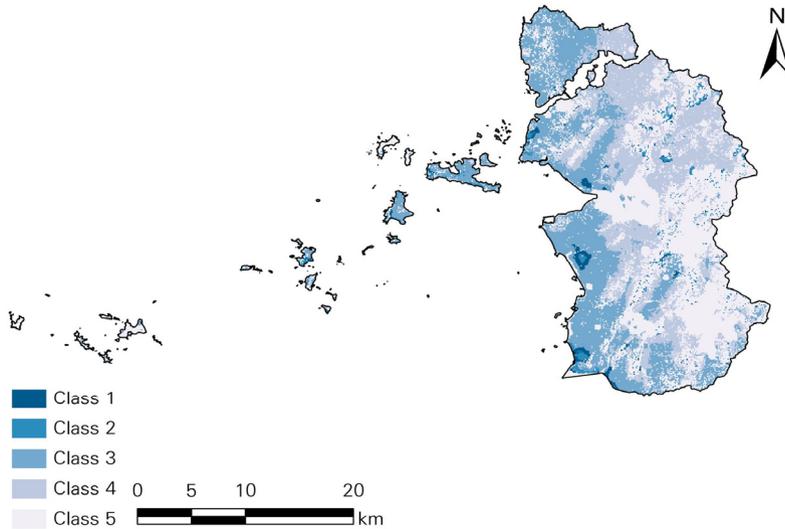
보령시는 전체 면적 중 약 1.62%가 입지 최적합(Class 1) 지역으로 분류되어 풍력발전에 적합한 지역은 제한적인 것으로 판단된다.

세부 등급별 면적을 살펴보면, Class 1(최적합) 지역은 약 9.25km²(1.62%), Class 2(적합) 지역은 약 9.19km²(1.61%), Class 3(보통) 지역은 약 161.37km²(28.30%), Class 4(부적합) 지역은 약 160.14km²(28.09%)로 분석되었다. 반면, Class 5(금지구역)은 약 230.23km²(40.38%)를 차지하여 전체 면적의 상당 부분을 구성하고 있었다. Class 5(금지구역)은 약 570.93km²(96.95%)로 보령시의 대부분을 차지하였다. 적합 이상 지역(Class 1~2)은 전체 면적의 3.23%에 불과하며, 이는 보령시 내에서도 풍력발전에 적합한 입지가 매우 제한적임을 보여준다.

[표 3-12] 보령시 풍력발전 입지적합성 등급별 면적(km²)

행정구역 (Range)	Class 1 (1.1 ~ 1.9)	Class 2 (0.7 ~ 1.1)	Class 3 (0.4 ~ 0.7)	Class 4 (0 ~ 0.4)	Class 5 (0)
오천면	1.31	1.73	21.86	6.68	16.59
주산면	0.98	0.17	15.05	12.22	13.46
남곡동	0.00	0.00	2.45	1.00	0.70
신흥동	0.11	0.06	7.34	0.86	1.33
요암동	0.00	0.00	2.46	0.20	0.16
대천동	0.10	0.00	1.04	0.23	3.91
동대동	0.00	0.00	0.00	0.60	3.63
죽정동	0.00	0.03	0.00	1.39	2.84
화산동	0.00	0.01	0.01	2.98	0.94
미산면	0.44	0.51	6.81	11.07	46.91
청라면	0.93	2.37	1.88	35.33	29.95
내항동	0.00	0.00	0.02	0.06	4.98
주포면	0.00	0.02	3.35	6.34	3.76
청소면	0.14	0.20	2.46	23.82	11.09
주교면	0.95	0.49	13.75	13.62	7.37
천북면	0.15	0.00	32.41	11.45	10.35
공촌동	0.00	0.00	0.06	0.00	0.93
명천동	0.00	0.00	0.00	0.68	5.66
성주면	0.75	0.93	2.55	2.59	33.97
남포면	1.93	0.61	19.28	17.50	9.93
웅천읍	1.46	2.06	28.59	11.52	21.77
총계(km ²)	9.25	9.19	161.37	160.14	230.23
비율(%)	1.62	1.61	28.30	28.09	40.38

출처: 연구진 작성



[그림 3-7] 보령시 풍력발전 입지적합성 등급결과

출처: 연구진 작성

■ 당진시 풍력발전 입지 적합성 분석 결과

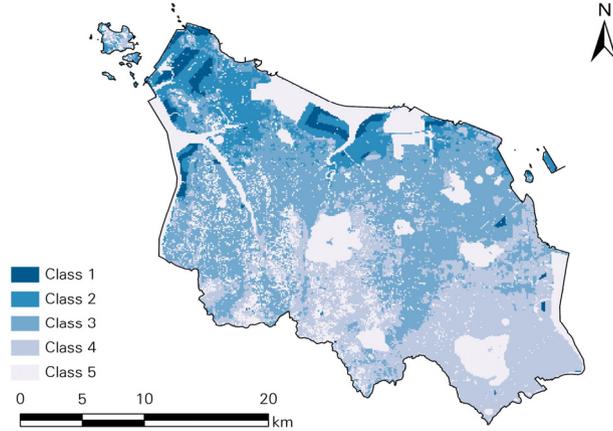
당진시도 보령시와 비슷하게 전체 면적 중 2.55%가 Class 1(최적합) 지역으로 분류되어, 풍력발전에 적합한 지역은 매우 제한적인 것으로 나타났다.

세부 등급별 면적을 살펴보면, Class 1(최적합) 지역은 약 17.94km²(2.55%), Class 2(적합) 지역은 약 67.24km²(9.56%), Class 3(보통) 지역은 약 251.37km²(35.74%), Class 4(부적합) 지역은 약 197.79km²(28.13%)로 분석되었다. 반면, Class 5(금지구역)은 약 168.90km²(24.02%)를 차지하여 발전소 입지에 부적합한 지역이 상당한 비중을 보였다. 특히 Class 1~2 지역(적합 이상)은 전체 면적의 12.11% 수준에 불과하며, 주로 석문면 일대에 집중적으로 분포하고 있었다. 이외에도 송산면, 고대면, 송악읍, 대호지면 일부 지역에서 소규모로 확인되었다. 이는 당진시 내 풍력발전에 적합한 지역이 한정적임을 보여주는 결과이다.

[표 3-13] 당진시 풍력발전 입지적합성 등급별 면적(km²)

행정구역 (Range)	Class 1 (1.1 ~ 1.9)	Class 2 (0.6 ~ 1.1)	Class 3 (0.4 ~ 0.6)	Class 4 (0 ~ 0.4)	Class 5 (0)
우두동	0.00	0.00	1.75	0.50	2.49
읍내동	0.00	0.00	0.13	0.00	2.04
시곡동	0.00	0.00	2.44	3.74	0.89
행정동	0.00	0.00	0.19	1.38	1.60
대호지면	2.42	2.81	36.89	4.53	19.11
합덕읍	0.10	0.00	0.00	37.11	13.79
수청동	0.00	0.00	0.26	1.22	2.18
우강면	0.24	0.00	1.57	29.16	7.80
신평면	0.71	0.90	18.73	23.75	9.31
송악읍	0.47	5.23	56.67	9.12	8.86
정미면	0.05	0.00	19.71	16.95	12.63
순성면	0.00	0.00	17.54	22.87	3.91
채운동	0.00	0.00	0.09	0.32	3.51
송산면	1.95	10.61	30.43	3.28	17.47
용연동	0.00	0.00	0.13	3.78	2.02
고대면	0.07	8.11	39.80	2.96	12.21
석문면	11.87	39.54	19.56	2.86	29.41
사기소동	0.00	0.00	0.34	3.44	1.46
대덕동	0.00	0.00	0.30	3.01	2.77
구룡동	0.00	0.00	0.20	2.82	2.24
면천면	0.06	0.04	4.00	23.35	11.47
원당동	0.00	0.00	0.64	1.64	1.73
총계(km ²)	17.94	67.24	251.37	197.79	168.90
비율(%)	2.55	9.56	35.74	28.13	24.02

출처: 연구진 작성



[그림 3-8] 당진시 풍력발전 입지적합성 등급결과

② 태양광발전 입지 적합성 분석 결과

■ 보령시 태양광 발전 입지 적합성 분석 결과

보령시의 경우 전체 면적의 대부분이 금지구역(Class 5)으로 분류되었으나, 풍력발전과 비교하면 태양광발전에서 상대적으로 적합 지역의 비율이 높게 나타났다. 이는 보령시가 태양광발전 에 일정 수준의 입지 가능성을 갖고 있음을 보여준다.

세부 등급별 면적을 살펴보면, Class 1(최적합) 지역은 약 41.41km²(7.35%), Class 2(적합) 지역은 약 120.17km²(21.32%), Class 3(보통) 지역은 약 101.58km²(18.03%), Class 4(부적합) 지역은 약 71.10km²(12.62%)로 분석되었으며, Class 5(금지구역) 은 약 229.25km²(40.68%)를 차지하였다.

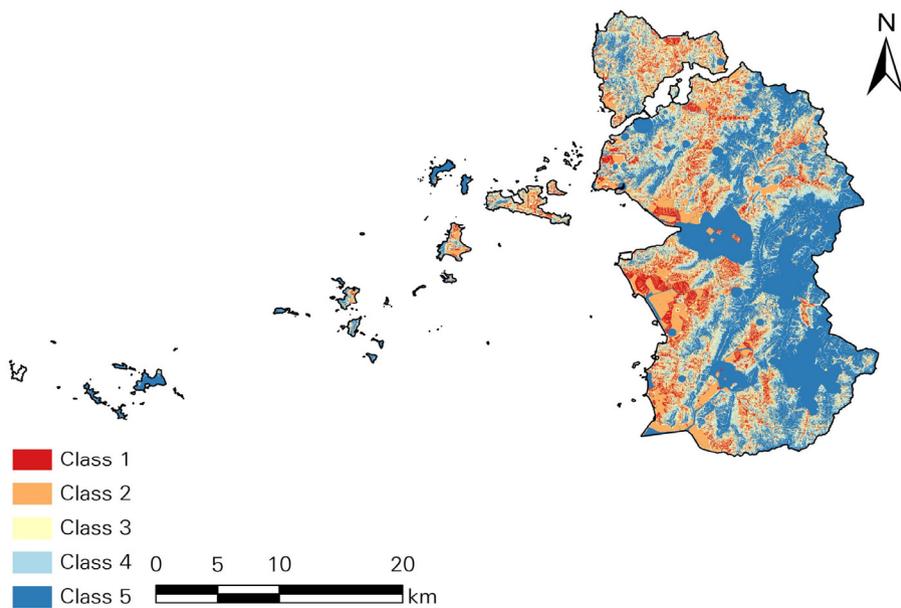
Class 1~2(적합 이상) 지역은 전체 면적의 약 28.67%로, 남포면·웅천읍·천북면·주교면·청라면 일대에 주로 분포하였다. 이 중 남포면과 웅천읍은 Class 1 면적이 상대적으로 넓어, 보령시 내 태양광 발전의 주요 잠재 입지로 평가되었다.

[표 3-14] 보령시 태양광발전 입지적합성 등급별 면적(km²)

행정구역 (Range)	Class 1 (2.0 ~ 2.9)	Class 2 (1.5 ~ 2.0)	Class 3 (1.1 ~ 1.5)	Class 4 (0.1 ~ 1.1)	Class 5 (0)
오천면	3.19	10.12	9.36	7.08	16.69
주산면	2.77	10.04	8.93	6.14	13.46
남곡동	0.39	1.21	1.14	0.77	0.77
신흥동	2.29	3.76	1.41	0.76	1.21
요암동	0.54	1.01	0.69	0.37	0.19

행정구역 (Range)	Class 1 (2.0 ~ 2.9)	Class 2 (1.5 ~ 2.0)	Class 3 (1.1 ~ 1.5)	Class 4 (0.1 ~ 1.1)	Class 5 (0)
대천동	0.26	1.16	0.05	0.01	3.73
동대동	0.08	0.17	0.21	0.22	3.55
죽정동	0.24	0.49	0.37	0.21	2.92
화산동	0.25	0.84	1.09	0.86	0.90
미산면	0.72	4.04	6.78	6.62	47.00
청라면	3.22	10.91	13.96	11.79	30.07
내항동	0.00	0.00	0.00	0.00	4.98
주포면	1.67	3.42	2.94	1.69	3.62
청소면	3.51	9.11	8.59	5.53	10.78
주교면	3.90	12.52	7.45	4.31	7.73
천북면	4.77	14.09	14.74	8.54	9.89
공촌동	0.00	0.07	0.00	0.00	0.91
명천동	0.04	0.10	0.23	0.28	5.69
성주면	0.11	1.29	2.72	2.67	33.93
남포면	8.30	17.97	8.09	5.06	9.71
웅천읍	5.15	17.84	12.81	8.20	21.52
총계(km ²)	41.41	120.17	101.58	71.10	229.25
비율(%)	7.35	21.32	18.03	12.62	40.68

출처: 연구진 작성



[그림 3-9] 보령시 태양광발전 입지적합성 등급결과

출처: 연구진 작성

■ 당진시 태양광 발전 입지 적합성 분석 결과

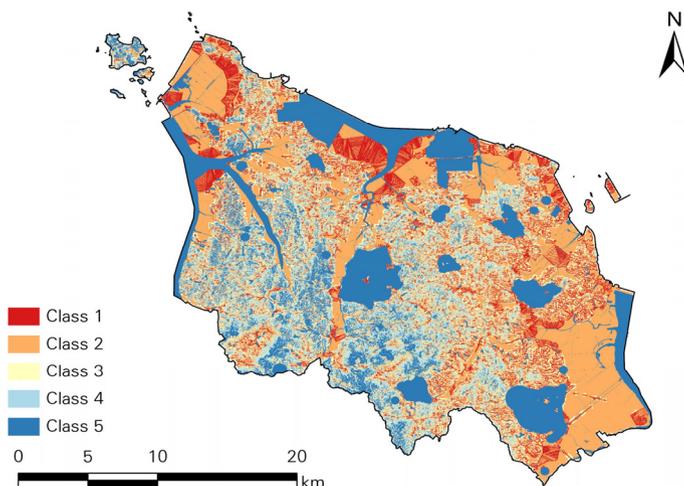
당진시의 태양광 발전소 입지 적합성 분석 결과, 전체 면적 중 약 10.95%가 Class 1(최적합) 지역으로 분류되었으며, Class 1~2(적합 이상) 지역의 비율이 상대적으로 높아 풍력발전에 비해 유리한 입지 조건을 보였다.

세부 등급별 면적을 살펴보면, Class 1(최적합) 지역은 약 76.38km²(10.95%), Class 2(적합) 지역은 약 244.64km²(35.08%), Class 3(보통) 지역은 약 130.38km²(18.70%), Class 4(부적합) 지역은 약 76.56km²(10.98%), Class 5(금지구역)은 약 169.34km²(24.29%)를 차지하였다. Class 1~2(적합 이상) 지역은 전체 면적의 약 46.04%로, 석문면·송악읍·신평면·송산면·우강면 일대에 집중적으로 분포하고 있었다. 특히 석문면과 송악읍은 Class 1~2 면적이 가장 넓어, 당진시 내 태양광 발전의 핵심 입지로 확인되었다.

[표 3-15] 당진시 태양광발전 입지적합성 등급별 면적(km²)

행정구역 (Range)	Class 1 (1.9 ~ 2.8)	Class 2 (1.5 ~ 1.9)	Class 3 (1.0 ~ 1.5)	Class 4 (0 ~ 1.0)	Class 5 (0)
우두동	0.10	1.35	0.51	0.37	2.43
읍내동	0.08	0.04	0.02	0.00	2.04
시곡동	0.42	1.53	2.40	1.76	0.90
행정동	0.33	0.67	0.32	0.32	1.53
대호지면	4.37	16.80	14.00	11.31	18.96
합덕읍	4.92	22.22	6.58	2.17	13.68
수청동	0.16	0.37	0.47	0.34	2.38
우강면	1.95	26.47	2.47	0.18	7.77
신평면	10.57	23.50	8.23	1.05	9.25
송악읍	11.70	32.82	18.12	7.97	9.00
정미면	2.96	10.32	12.24	10.76	12.50
순성면	5.05	13.95	13.65	7.62	4.07
채운동	0.00	0.40	0.04	0.04	3.45
송산면	8.45	22.36	9.99	5.02	17.86
용연동	0.14	0.81	1.36	1.58	2.03
고대면	4.74	22.95	14.83	8.61	12.06
석문면	17.62	38.76	11.26	4.70	29.69
사기소동	0.22	0.76	1.36	1.45	1.44
대덕동	0.16	0.65	1.14	1.28	2.83
구룡동	0.18	0.67	1.03	1.15	2.11
면천면	2.01	6.59	9.59	8.34	11.64
원당동	0.26	0.65	0.79	0.56	1.74
총계(km ²)	76.38	244.64	130.38	76.56	169.34
비율(%)	10.95	35.08	18.70	10.98	24.29

출처: 연구진 작성



[그림 3-10] 당진시 태양광발전 입지적합성 등급결과

출처: 연구진 작성

③ 소형원자력발전 입지 적합성 분석 결과

■ 보령시 소형원자력발전 입지 적합성 분석 결과

보령시의 원자력 발전소 입지 적합성 분석 결과, 전체 면적 중 약 17.03%가 Class 1(최적합)으로 분류되었으나, 원자력 발전에 적합한 지역은 여전히 제한적인 것으로 나타났다.

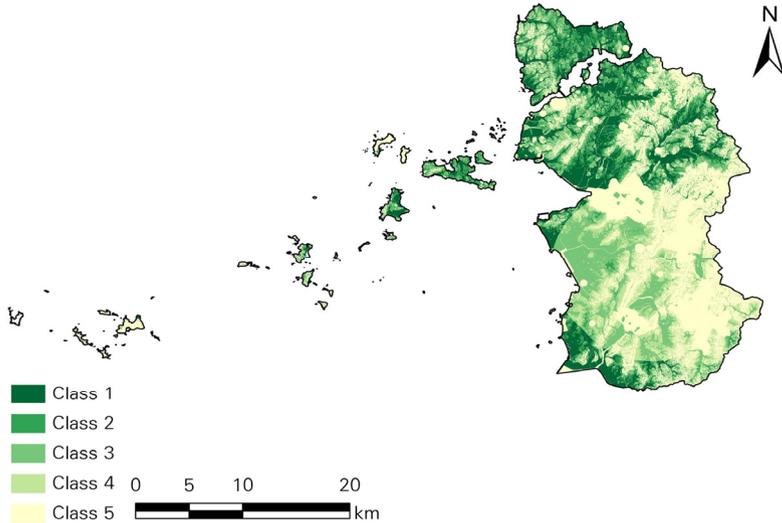
세부 등급별 면적을 살펴보면, Class 1(최적합) 지역은 약 97.65km²(17.03%), Class 2(적합) 지역은 약 53.90km²(9.40%), Class 3(보통) 지역은 약 139.66km²(24.35%), Class 4(부적합) 지역은 약 53.03km²(9.25%)로 분석되었으며, 반면 Class 5(금지구역)은 약 229.21km²(39.97%)를 차지하였다. Class 1~2(적합 이상) 지역은 전체 면적의 약 26.43%로, 천북면·청라면·주교면 일대에 일부 분포하고 있었다. 특히 천북면과 청라면은 해안 인접성과 상대적으로 완만한 지형을 갖추고 있어, 보령시 내 원자력 발전의 잠재 입지로 평가되었다.

[표 3-16] 보령시 원자력발전 입지적합성 등급별 면적(km²)

행정구역 (Range)	Class 1 (2.7 ~ 3.6)	Class 2 (2.2 ~ 2.7)	Class 3 (1.6 ~ 2.2)	Class 4 (0 ~ 1.6)	Class 5 (0)
오천면	12.21	6.58	13.90	0.00	16.69
주산면	6.61	3.28	11.41	7.08	13.46
남곡동	0.39	0.54	1.50	1.22	0.77
신흥동	3.09	1.32	3.94	0.50	1.21
요암동	0.00	0.13	1.53	0.95	0.19
대천동	1.12	0.00	0.39	0.00	3.73
동대동	0.02	0.01	0.21	0.45	3.55
죽정동	0.78	0.16	0.36	0.00	2.92

행정구역 (Range)	Class 1 (2.7 ~ 3.6)	Class 2 (2.2 ~ 2.7)	Class 3 (1.6 ~ 2.2)	Class 4 (0 ~ 1.6)	Class 5 (0)
화산동	0.93	1.14	0.94	0.03	0.90
미산면	0.06	1.06	6.99	10.51	47.00
청라면	14.18	9.94	16.18	0.02	30.07
내항동	0.00	0.00	0.00	0.00	4.98
주포면	4.92	2.33	2.47	0.00	3.62
청소면	12.17	6.06	9.23	0.00	10.78
주교면	15.34	5.90	7.45	0.00	7.73
천북면	17.84	11.50	15.72	0.00	9.89
공촌동	0.00	0.00	0.07	0.00	0.91
명천동	0.00	0.00	0.15	0.55	5.66
성주면	0.13	0.51	2.37	3.83	33.93
남포면	0.00	0.70	27.36	11.59	9.71
웅천읍	7.87	2.75	17.49	16.29	21.52
총계(km ²)	97.65	53.90	139.66	53.03	229.21
비율(%)	17.03	9.40	24.35	9.25	39.97

출처: 연구진 작성



[그림 3-11] 보령시 원자력발전 입지적합성 등급결과

출처: 연구진 작성

■ 당진시 소형원자력발전 입지 적합성 분석 결과

당진시의 원자력 발전소 입지 적합성 분석 결과, 전체 면적 중 약 2.65%가 Class 1(최적합)으로 분류되었으며, Class 1~2(적합 이상) 지역의 비율이 비교적 높아 다른 발전원에 비해 유리한 입지 조건을 보였다

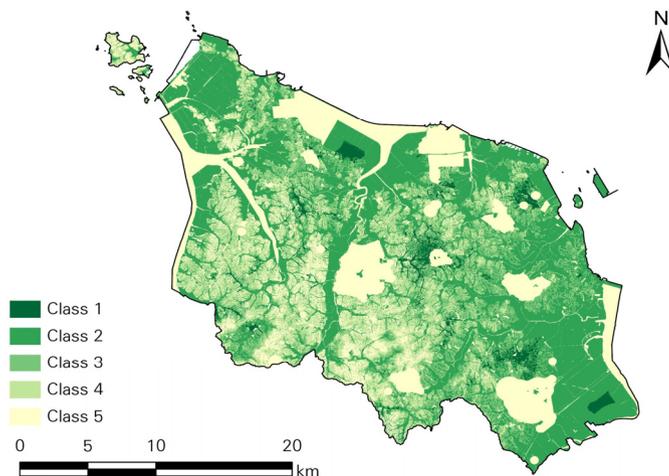
세부 등급별 면적을 살펴보면, Class 1(최적합) 지역은 약 18.67km²(2.65%), Class 2(적합) 지역은 약 289.66km²(41.15%), Class 3(보통) 지역은 약 110.81km²(15.74%), Class 4(부적합) 지역은 약 115.44km²(16.40%)로 분석되었으며, 반면 Class 5(금지구역)은 약 169.29km²(24.05%)를 차지하였다. Class 1~2(적합 이상) 지역은 전체 면적의 약 43.80%로, 석문면과 송악읍 일대에 집중적

으로 분포하였다. 이 지역들은 상대적으로 완만한 지형과 냉각수 확보가 가능한 해안 인접성을 갖추고 있어, 원자력 발전 입지로서의 잠재성이 높은 것으로 평가되었다.

[표 3-17] 당진시 원자력발전 입지적합성 등급별 면적(km²)

행정구역 (Range)	Class 1 (3.1 ~ 4.0)	Class 2 (2.8 ~ 3.1)	Class 3 (2.3 ~ 2.8)	Class 4 (0 ~ 2.3)	Class 5 (0)
우두동	0.00	1.61	0.25	0.47	2.42
읍내동	0.00	0.13	0.00	0.00	2.04
시곡동	1.71	1.28	1.99	1.12	0.90
행정동	0.00	1.04	0.20	0.38	1.54
대호지면	0.90	18.89	8.77	18.28	19.00
합덕읍	1.28	26.23	6.77	3.05	13.69
수정동	0.00	0.47	0.33	0.55	2.37
우강면	1.84	27.46	1.56	0.19	7.77
신평면	0.33	31.79	9.81	2.50	9.24
송악읍	2.89	38.47	17.64	12.18	9.00
정미면	0.61	12.55	8.94	14.80	12.50
순성면	2.53	14.75	12.32	10.68	4.06
채운동	0.00	0.47	0.00	0.00	3.45
송산면	2.10	27.92	8.02	7.90	17.84
용연동	0.00	0.76	0.81	2.34	2.03
고대면	1.54	25.43	11.66	12.52	12.04
석문면	2.40	49.92	10.33	11.05	29.64
사기소동	0.00	0.71	0.96	2.12	1.44
대덕동	0.00	0.76	0.85	1.61	2.84
구룡동	0.00	0.99	0.71	1.47	2.12
면전면	0.51	7.24	8.32	11.36	11.64
원당동	0.03	0.81	0.55	0.86	1.73
총계(km ²)	18.67	289.66	110.81	115.44	169.29
비율(%)	2.65	41.15	15.74	16.40	24.05

출처: 연구진 작성



[그림 3-12] 당진시 원자력발전 입지적합성 등급결과

출처: 연구진 작성

④ 연료전지 입지 적합성 분석 결과

■ 보령시 연료전지 발전시설 입지 적합성 분석 결과

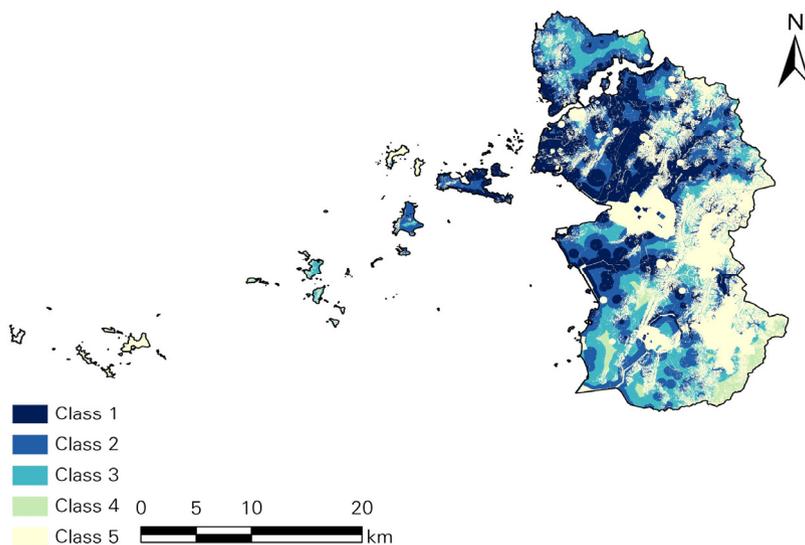
보령시의 연료전지 발전소 입지 적합성 분석 결과, 전체 면적 중 약 20.99%가 Class 1(최적합)으로 분류되었으며, 풍력발전에 비해 상대적으로 유리한 입지 조건을 보였다.

세부 등급별 면적을 살펴보면, Class 1(최적합) 지역은 약 120.36km²(20.99%), Class 2(적합) 지역은 약 125.72km²(21.92%), Class 3(보통) 지역은 약 82.93km²(14.46%), Class 4(부적합) 지역은 약 15.24km²(2.66%)로 분석되었으며, 반면 Class 5(금지구역)은 약 229.21km²(39.97%)를 차지하였다. Class 1~2(적합 이상) 지역은 전체 면적의 약 42.91%로, 남포면과 청라면 일대에 집중적으로 분포하고 있었다. 이외에도 오천면, 천북면, 주교면 등 일부 지역에서도 소규모로 확인되어, 보령시 내 연료전지 발전 입지로서의 잠재성이 높은 것으로 평가되었다.

[표 3-18] 보령시 연료전지 발전 입지적합성 등급별 면적(km²)

행정구역 (Range)	Class 1 (1.7 ~ 2.0)	Class 2 (1.6 ~ 1.7)	Class 3 (1.3~ 1.6)	Class 4 (0 ~ 1.3)	Class 5 (0)
오천면	19.82	10.55	1.97	0.35	16.69
주산면	0.48	11.84	15.25	0.80	13.46
남곡동	0.90	1.34	1.41	0.00	0.77
신혹동	3.50	3.56	1.79	0.00	1.21
요암동	0.33	1.05	1.23	0.00	0.19
대천동	1.50	0.01	0.00	0.00	3.73
동대동	0.28	0.39	0.02	0.00	3.55
죽정동	1.19	0.11	0.00	0.00	2.92
화산동	1.25	1.27	0.52	0.00	0.90
미산면	1.95	2.77	5.57	8.33	47.00
청라면	13.08	18.94	8.24	0.07	30.07
내향동	0.00	0.00	0.00	0.00	4.98
주포면	8.90	0.81	0.01	0.00	3.62
청소면	13.07	10.95	3.42	0.02	10.78
주교면	23.72	4.93	0.04	0.00	7.73
천북면	9.35	19.85	14.73	1.13	9.89
궁촌동	0.07	0.00	0.00	0.00	0.91
명천동	0.15	0.50	0.04	0.00	5.66
성주면	0.84	1.83	4.09	0.08	33.93
남포면	16.14	15.88	7.02	0.62	9.71
웅천읍	3.84	19.13	17.58	3.84	21.52
총계(km ²)	120.36	125.72	82.93	15.24	229.21
비율(%)	20.99	21.92	14.46	2.66	39.97

출처: 연구진 작성



[그림 3-13] 보령시 연료전지 발전 입지적합성 등급결과

출처: 연구진 작성

■ 당진시 연료전지 발전시설 입지 적합성 분석 결과

당진시의 연료전지 발전소 입지 적합성 분석 결과, 전체 면적 중 약 19.55%가 Class 1(최적합)으로 분류되었으며, Class 1~3 지역의 비율이 비교적 높아 풍력발전에 비해 유리한 입지 조건을 보였다.

세부 등급별 면적을 살펴보면, Class 1(최적합) 지역은 약 137.60km²(19.55%), Class 2(적합) 지역은 약 175.81km²(24.98%), Class 3(보통) 지역은 약 171.93km²(24.42%), Class 4(부적합) 지역은 약 65.93km²(9.37%)로 분석되었으며, Class 5(금지구역)은 약 152.64km²(21.68%)를 차지하였다.

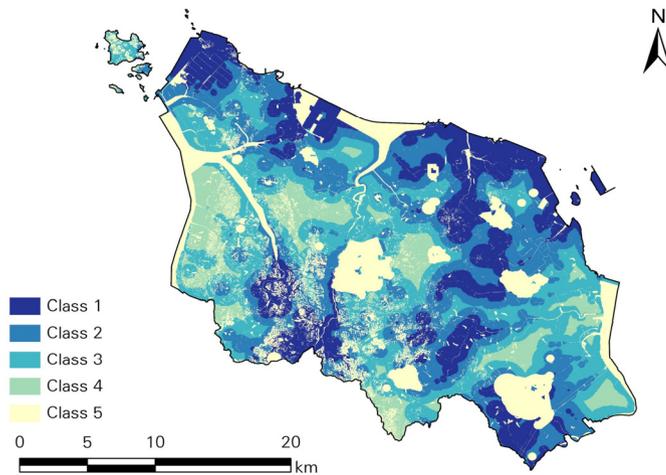
Class 1~2(적합 이상) 지역은 전체 면적의 약 44.53%로, 송악읍과 석문면 일대에 집중적으로 분포하고 있었다. 이외에도 송산면과 순성면 일부 지역에서도 소규모로 확인되어, 당진시 내 연료전지 발전 입지가 상대적으로 양호한 것으로 평가되었다.

[표 3-19] 보령시 연료전지 발전 입지적합성 등급별 면적(km²)

행정구역 (Range)	Class 1 (1.6 ~ 2.0)	Class 2 (1.3 ~ 1.6)	Class 3 (1.1 ~ 1.3)	Class 4 (0 ~ 1.1)	Class 5 (0)
우두동	0.00	0.47	1.88	0.00	2.40
읍내동	0.00	0.08	0.06	0.00	2.04
시곡동	0.00	0.00	1.16	4.94	0.90
행정동	0.69	0.73	0.21	0.00	1.52
대호지면	0.82	4.52	21.55	19.93	18.93
합덕읍	12.43	14.52	7.69	2.69	13.67

행정구역 (Range)	Class 1 (1.6 ~ 2.0)	Class 2 (1.3 ~ 1.6)	Class 3 (1.1~ 1.3)	Class 4 (0 ~ 1.1)	Class 5 (0)
수청동	0.00	0.47	0.79	0.07	2.39
우강면	0.07	6.62	17.87	6.54	7.75
신평면	6.94	13.74	19.12	4.65	9.25
송악읍	37.22	26.14	7.70	0.35	8.92
정미면	17.42	12.96	6.35	0.13	12.50
순성면	12.99	16.25	7.99	3.04	4.07
채운동	0.06	0.43	0.00	0.00	3.44
송산면	17.16	20.48	14.28	2.99	8.86
용연동	0.15	1.07	2.67	0.00	2.03
고대면	2.82	14.45	21.41	12.43	12.08
석문면	25.64	30.50	23.47	1.64	22.11
사기소동	1.23	2.19	0.36	0.00	1.43
대덕동	0.00	1.07	1.91	0.24	2.85
구룡동	1.67	1.48	0.01	0.00	2.11
면천면	0.28	7.03	13.95	6.13	11.64
원당동	0.00	0.62	1.47	0.16	1.74
총계(km ²)	137.60	175.81	171.93	65.93	152.64
비율(%)	19.55	24.98	24.42	9.37	21.68

출처: 연구진 작성



[그림 3-14] 당진시 연료전지 발전 입지적합성 등급결과

출처: 연구진 작성

4) 소결

본 절은 사례도시를 통한 무탄소 에너지원 도입 가능성을 체계적으로 검토하기 위해, 에너지원별 기술적 특성과 도시공간의 규제·입지 여건을 통합한 입지적합성 분석을 수행하였다.

우선, 경사도·고도·보전산지·상수원보호구역·문화재보호구역 등 입지 제한요인을 중심으로 도시 전체의 잠재 부지를 1차적으로 필터링하였다.

이어서 각 에너지원의 설치요건(주거지 이격, 풍향·일사량, 전력망 접근성, 냉각수 접근성 등)을 고려하여 적합도 등급(Class 1~4)을 부여하였다.

GIS 기반 중첩분석(Overlay)을 통해 태양광·풍력·연료전지·SMR 등 에너지원별 적합 지역을 도출하고, 보령시·당진시의 공간구조 및 기존 에너지 인프라 현황과 결합하여 도시단위 무탄소 전원 확보 가능성을 종합적으로 검토하였다.

■ 에너지원별 입지분석 결과의 특성

태양광은 도시 전역에서 비교적 높은 적합성을 보인 에너지원이다. 환경 규제나 지형적 제약이 상대적으로 적고, 건축물 외피(BIPV), 주차장 상부, 공공유희부지 등 소규모 분산형 입지가 다양하게 존재한다. 분석 결과, 당진·보령 양 시에서 Class 1~2 지역이 광범위하게 분포하여 기존 도시에서도 가장 현실적이고 빠른 도입이 가능한 에너지로 평가되었다.

육상풍력은 경사·고도·보전구역·주거지 이격거리 등 다수의 제약으로 인해 입지 가능 지역이 매우 제한적으로 나타났다. 특히 도심·주거지역이 확장된 기존 도시의 경우 환경적·경관적 영향이 커 실질적인 적용 가능성은 낮은 것으로 평가되었다.

연료전지는 소규모·모듈형 특성이 있어 도시 내부에도 설치가 가능하며, 정온·저소음 특성으로 인해 주거지와외의 갈등이 적다. 다만 수소 공급망, 안전거리, 부지 확보가 필요해 주로 산업단지·R&D캠퍼스·공공기관 부근에서 조건부 적합(Class 2~3)이 도출되었다. 특히 당진·보령의 산업단지는 기존 전력수요와 기반시설이 집중되어 있어 도시형 수소 기반 전원으로 활용 가능성이 높은 것으로 나타났다.

소형모듈원전(SMR)은 냉각수 접근성·전력망 연계·비상대응체계 등 고도의 안전 운영 조건을 필요로 하므로, 주로 도시 외곽 산업단지·항만 인근에서 Class 1~2 지역이 확인되었다. 보령화력·당진화력과 같은 기존 발전부지는 부지·송전·냉각·안전 기반시설이 이미 갖추어져 있어 전원 전환 가능성이 가장 높은 구역으로 평가된다.

■ 입지분석의 활용을 위한 시사점

- 도시별 무탄소 에너지 적용 잠재량 산정에 활용

입지적합성 분석(Class 1~4 등급)은 도시 내에서 에너지원별로 실질적으로 확보 가능한 설치 잠재량을 산출하기 위한 기초자료로 활용할 수 있다. 태양광, 연료전지, 소형모듈원전(SMR) 등 각 에너지원에 대한 적합부지의 규모와 분포를 정량적으로 파악함으로써, 도시가 목표연도(예: 2030·2035년)에 달성해야 하는 무탄소 전원 공급량의 가능성을 평가할 수 있다. 이는 탄소중립 도시의 목표 설정 및 부문별 에너지수요 대응전략을 수립하는 데 유용하다.

- 도시 차원의 무탄소 전원 포트폴리오 구성에 활용

입지분석 결과는 도시가 어떤 무탄소 에너지원 조합을 통해 안정적인 지속가능한 전력·열 공급체계를 구축할 것인지 결정하는 데 중요한 근거자료가 된다. 에너지원별 적합성, 도입규모, 운영특성을 종합하여 태양광 중심의 분산형 전원, 연료전지 기반의 도시형 안정전원, SMR 기반의 기저부하 전원 등 다원형 에너지 믹스를 설계할 때 활용할 수 있는 기초자료가 된다.

- 무탄소 에너지 적용 시나리오 구축시 활용

입지적합성 분석은 도시가 단계적·증장기적 전환전략을 수립하는 데 활용될 수 있다. 구체적으로는 에너지원별 물리적 도입 가능성과 설치 제약을 고려하여, 단기-중기-장기 적용 시나리오 전략을 만들 때 활용할 자료로 이용할 수 있다. 예를 들면, 단기(1단계)에서의 무탄소 에너지로서 태양광, BIPV, 소규모 연료전지를 활용하기 위한 입지분석에 활용할 수 있으며, 중기(2단계)에서 산업단지 기반 연료전지, 수소 기반 인프라 확충을 위한 적지분석을 위한 기초자료를 제공할 수 있다. 장기(3단계)로는 SMR 도입 및 기저전원 전환을 위한 검토용으로 활용가능하다.

- 도시공간구조와 연계한 무탄소 에너지 공간전략 수립에 적용가능

입지분석 결과는 탄소중립도시에서 에너지-공간 연계를 강화하는 공간전략 수립에 활용될 수 있다. 에너지원별 적합지역의 공간적 분포를 바탕으로 산업단지, 항만, 주거지, 공공유희지 등 도시공간 위계를 고려하여 에너지시설 배치 계획을 마련하는데 기초자료로 용이하다. 구체적으로 예를 들어 보면, 산업단지에 연료전지·SMR 등 대용량 전원의 전략적 배치를 한다거나, 주거·상업지역에 태양광·BIPV 등 분산형 전원을 적용한다거나 항만·공항의 경우 수소·연료 공급 플랫폼으로 기능을 확장하고자 할 때 활용할 수 있을 것이다.

- 무탄소 에너지 인프라 구축의 우선순위 및 로드맵 설계에 활용

입지적합성 등급의 평가방식은 무탄소 에너지 인프라 구축의 우선순위를 설정하는 기준으로 활용될 수 있다. Class 1 지역은 1단계 우선 개발지역으로, Class 2 지역은 인프라 연계 후 도입 가능 지역으로 설정하며, Class 3·4 지역은 규제 해소나 장기 검토 대상지역으로 분류할 수 있다.

이러한 단계적 접근을 위한 구역배분을 위한 로드맵은 예산 배분, 사업화 추진, 부지 확보 전략 등 탄소중립도시 조성계획을 구체화하는 데 기여할 수 있을 것이다.

- 기존 에너지시설 전환계획 수립의 기초자료

보령·당진 등 기존 화력발전 중심 도시의 경우, 입지분석 결과는 기존 발전부지를 활용한 무탄소 전원 전환 계획의 기초자료로 활용될 수 있다. SMR 도입 가능성 평가, 연료전지 기반 산업단지 리모델링, 냉각수·송전망 재활용 계획 등 기존 발전부지의 미래 활용방향을 구체화할 수 있으며, 이는 지역 산업구조와 고용구조 변화까지 고려한 도시형 에너지전환 전략 마련에 기여한다.

- 탄소중립도시 에너지-공간 통합계획의 근거자료

입지분석 결과는 탄소중립도시계획, 도시·군기본계획, 기후·에너지 종합계획 등 법정·비법정 계획에서 무탄소 에너지 적용방향을 구체화하는 데 필수적인 자료로 활용된다. 특히 도시 내 에너지 공급·소비 구조의 전반적 재편이 요구되는 상황에서, 에너지-공간 간 연계성을 높이는 실질적 수단으로 적용될 수 있을 것이다.

제4장

무탄소 에너지 전환을 위한 적용방안

1. 무탄소 에너지 전환을 위한 공간계획 방안
2. 무탄소 에너지 적용을 위한 과제

1. 무탄소 에너지 전환을 위한 공간계획 방안

1) 개요

본 장에서는 앞 장에서 시범적용했던 무탄소 에너지 입지조건과 입지분석 방법이 무탄소 에너지 전환을 위한 공간계획에 어떻게 활용할 수 있는지에 대하여 정리하였다.

무탄소 에너지를 활용하는 기반시설을 적용하기 위한 공간계획은 우선 대상지의 온실가스 현황, 주요 에너지원에 대한 현황, 대상지의 자연환경 현황 및 인문환경 현황 등 사회환경적인 관점에서의 현황분석을 우선 수행한다. 다음으로는 대상지에 필요한 무탄소 에너지원에 대한 전략을 세우면서 대상 에너지원이 설정되고, 해당 에너지원이 필요로 하는 에너지 설계량을 맞출 수 있는 기반시설들이 결정되며, 이러한 시설들이 요구하는 입지기준을 적용하게 된다. 여기서, 기반시설의 설계용량의 결정은 입지가 우선 중요한 경우 최적입지에 맞게 재조정되어야 한다. 이후 가장 적절하게 해당 무탄소 에너지원이 위치할 수 있도록 입지분석이 이루어지게 된다.

따라서, 이 장이 목적하는 바는, 무탄소 에너지 전환을 위한 전체 공간계획에서 본 연구에서 도출한 입지기준과 입지분석을 활용하기 위한 방안을 제시하는 것이다.

2) 무탄소 에너지 도입을 위한 입지분석 적용방안

본 절에서는 기존 도시를 대상으로 한 무탄소 에너지 도입 시, 에너지원별 특성을 고려한 입지분석 수행 방법과 적용방향을 제시하고자 한다. 앞에서 축적한 일사량·풍향·지형·제척구역·사회수용성 등의 분석 요소를 종합하여 도시 내 적합지 탐색, 공간유형별 적용전략, 에너지원별 입지조건 설정 방법 등을 체계적으로 정리하였다.

이를 통해 입지분석이 무탄소 에너지계획의 기초자료를 넘어, 향후 도시 전환전략을 뒷받침하는 핵심 계획도구로 활용될 수 있음을 밝히고자 한다.

① 입지분석 개념 및 필요성 고려방안

■ 무탄소 에너지 입지분석의 개념 설정

입지분석은 무탄소 에너지원(태양광, 풍력, SMR, 수소, 바이오가스 등)의 물리적·환경적·사회적 조건을 정량화하여, 도시 내 적합지역을 공간적으로 도출하는 일련의 과정을 의미한다. 에너지 원별로 요구되는 시설 요건과 제약조건이 상이하기 때문에, 입지분석은 공통조건 설정 → 에너지원별 조건 설정 → GIS 기반 공간중첩 → 적합지역 분류(Class 1~4)의 구조를 고려해야 한다.

■ 입지분석의 필요성 마련

기존 도시는 에너지 수요가 집중되어 있으나, 무탄소 에너지 기반시설은 설치 면적, 안전거리, 계통 접근성 등 다양한 제약을 수반한다. 또한 지자체 단위에서 실질적인 설치 가능부지를 선별하지 못한 상태에서 목표량만 설정하게 되면, 계획의 실행력을 확보하기 어렵다.

따라서 무탄소 에너지 전환계획을 수립할 때는 입지분석이 필수적이며, 아래와 같은 이유를 필요로 한다. 아래의 지자체의 여건과 수립하고자 하는 계획에 따라 취사선택할 수 있다.

- 도시 내 실현 가능한 설치부지를 사전에 검토하여 계획의 현실성 확보
- 에너지원별 최적입지 도출을 통한 전원믹스 구성의 합리성 강화
- 인허가 및 주민수용성 문제를 고려한 사회적 갈등 예방
- 기존 에너지시설과 연계한 전환전략 및 단계적 대체 시나리오 마련 등

② 입지분석 체계 및 절차 수립방안

■ 분석대상 에너지원의 선정

입지분석은 에너지원별로 기술적 특성을 반영한 개별 입지조건 설정이 필요하다. 아래는 각 무탄소 에너지원 별로 필요한 입지적 특성이며, 입지조건 설정시 활용할 수 있다.

- 태양광: 일사량, 경사도, 주변 음영, 건물 지붕·부지 활용성
- 풍력: 풍속·풍향, 소음이격거리, 경관·조망 규제
- 소형모듈원전(SMR): 냉각수 접근성, 전력계통 연결, 안전반경
- 수소에너지(수전해·혼소) 또는 연료전지: 전력공급 접근성, 물공급, 위험물 규제

해당 도시가 어떤 에너지원에 상대적으로 적합한지를 선별하는 것이 우선 시행되어야 한다.

■ (입지조건 설정) 제척조건과 평가조건의 구분

입지분석은 설치가 불가능한 지역(제척조건)과 설치 가능성을 차등화하는 평가조건을 구분하여 적용한다.

- 제척조건은 법령 또는 물리적 제한으로 인해 설치가 불가능한 지역을 의미한다.

제척조건으로 검토할 필요가 있는 지역은 군사시설보호구역, 수자원·생태·환경보호구역, 개발제한구역, 문화재보호구역, 인구밀집 주거지(특히 SMR·수소시설) 등이다.

제척조건은 이진(Binary) 방식으로 처리하여 분석 대상에서 배제할 수 있다.

- 평가조건은 설치 가능하지만 적합성이 달라지는 지역을 구분하는 평가 항목이다.

주요 평가항목은 자연조건(일사량, 풍속, 경사도, 해발고도 등), 기반시설 조건(전력계통·도로·항만 접근성 등), 기후·환경 조건(침수위험, 산사태위험, 폭염 취약성 등), 사회적 조건(인구밀도, 민원 민감도, 수용성 등) 등이 검토될 수 있다.

평가조건은 0~5점의 등급화 방식 혹은 연속값으로 처리하여 적합도를 산정하게 된다.

■ 공간중첩 기반의 적합도 분석(GIS Spatial Overlay)

입지요건을 정량화한 후, GIS를 활용하여 다음과 같은 순서로 공간중첩 분석을 수행하게 된다.

- 제척지역 Layer 처리
- 에너지원별 핵심요건 Layer 구축
- 환경·기후·사회적 민감도 Layer 구축
- 모든 Layer를 가중치 방식으로 중첩
- 최종적으로 Class 1(적합)~Class 4(부적합)로 구분

이 방식은 다양한 입지요건을 동시에 고려할 수 있으며, 도시계획·에너지계획·환경계획 등 여러 부분의 공간데이터를 통합적으로 활용할 수 있다는 장점이 있다.

③ 에너지원별 입지특성 고려방안

입지분석은 단순히 적합·부적합 여부를 판단하는 것이 아니라, 도시 특성에 따라 어떤 에너지원이 전략적으로 유리한지를 판단하는 도구이다. 아래는 본 연구에서 검토했던 무탄소 에너지원의 입지적 특성이며, 해당 에너지원의 도입을 고려시 활용할 수 있다.

■ 태양광의 입지특성

태양광 에너지 시설의 경우 도시 내 가장 설치 가능 영역이 넓으며, 건물 외피(BIPV), 공장지붕, 주차장 상부, 공공부지 등 활용성이 높다. 핵심적인 공간변수는 그늘영향·경사도·일사량이 된다. 앞 장에서도 살펴 보았듯이 태양광은 기존 도시에서 가장 우선 도입 가능한 무탄소 전원으로 활용될 수 있다. 물론 태양광 일변도의 설치 패턴은 지양할 필요가 있다

■ 풍력의 입지특성

풍력의 경우 도시 내부는 풍속·소음 문제로 제약 크며, 해상풍력은 조망·어업권·환경영향 등 사회·환경 변수가 큰 실정이다. 그러므로 기존 도시보다는 외곽·해안 중심에 입지하는 것을 주로 검토해야 한다.

■ 소형모듈원전(SMR)의 입지특성

산업단지, 항만 등 냉각수와 전력망 접근이 용이한 지역 유리하다. 방재계획, 대피계획 등 안전요건 반영이 필요하다. 아직 도입이 된 사례가 없는 것이 가장 큰 걸림돌이 될 것이다. 그럼에도 기존 대규모 화력발전 부지의 대체입지로 전략적 의미가 있다.

■ 수소·연료전지 입지의 활용

수전해는 전력공급(태양광·풍력)과 물공급이 핵심이며, 혼소·연료전지는 기존 발전소·항만·산단에 적합하다. 도시 내 분산형 에너지 허브를 구성할 때 쓸 수 있는 수단이 된다.

아울러서 연료전지의 경우에는 점차 에너지 수요가 높아지는 AI산업에 대응하기 위한 에너지원으로서 중요하게 고려되고 있는 바, 지역에서는 주민 수용성을 포함한 보다 면밀한 입지기준이 마련될 필요도 있다.

④ 입지분석의 적용방안

입지분석은 단독의 분석 결과물이 아니라, 도시의 무탄소 에너지 전환계획을 뒷받침하는 핵심 기반이다. 본 연구에서는 이를 도시계획 및 에너지정책의 여러 단계에서 활용하는 방안을 다음과 같이 제시한다.

■ 무탄소 에너지 적용전략 수립의 기본자료로 활용

입지분석의 결과물들은 도시 전체의 잠재량(설치면적·에너지량) 산정시에 활용이 가능하며, 기술적으로 실현 가능한 전원믹스를 구성할 때, 사업 우선순위 설정 및 정책효과 분석을 수행할 때 활용할 수 있다.

■ 공간유형별 전략 설정의 기준 마련

입지분석 결과는 도시를 산업형·주거형·농촌형 등 공간유형으로 구분하고, 유형별로 도입 가능

한 에너지원 구성을 제시하는 데 활용할 수 있다. 예를 들면, 산업지역의 경우에는 소형원자력, 수소, 혼소를 무탄소 에너지원으로 활용할 수 있고, 주거지역의 경우 BIPV, 지열을 활용할 수 있다. 농촌지역의 경우에는 영농형 태양광 또는 바이오가스 등이 무탄소 에너지원 활용전략으로 활용될 수 있다.

■ 기존 에너지시설의 단계적 대체전략 수립

보령·당진과 같은 화력발전 중심 도시의 경우 기존 대규모 석탄화력 발전부지의 폐쇄에 따른 에너지 할당기능의 전환가능성을 분석하는데 기초자료로 활용이 가능하다. 또한, 소형원자력·수소·저장시설·계통보강 등의 복합입지 전략 수립도 가능할 것이다.

■ 도시·군기본계획, 에너지기본계획과의 연계

입지분석 결과는 법정계획과의 연계를 통해 실질적인 실행력을 확보할 수 있다. 도시계획에서는 무탄소 에너지 전용구역 지정에 활용할 수 있고, 에너지계획에서는 지역전원 포트폴리오 설정에 활용가능하며, 인허가시 예비 타당성 검토 기반자료로 활용할 수 있다.

3) 무탄소 에너지 전환을 위한 공간계획 방안

본문에서는 앞서 제시한 입지분석 적용방안을 포함하면서도 기존도시가 무탄소 에너지 전환을 공간적으로 실현하기 위해 필요한 계획 방향과 전략을 제시한다. 이는 도시 전체의 공간구조 조정, 산업·주거·공공부문별 세부 전략, 기존 에너지시설의 전환 전략, 분산형 에너지 기반의 도시 계획 체계 등으로 구성된다.

① 무탄소 에너지 전환을 위한 공간계획의 기본 방향

무탄소 에너지원은 각 에너지원마다 요구하는 공간적 조건, 안전성, 규제 충돌 정도, 주민수용성 등이 다르며, 기존도시에서의 적용 가능 역시 상이하다. 따라서 도시 공간계획은 에너지원 특성 기반의 공간전략, 도시 기능구조와의 연계, 입지규제 조정, 제도 통합을 중심으로 다음과 같은 기본 방향을 설정하여야 한다.

■ 에너지-공간 통합형 도시구조의 구축이 필요

무탄소 에너지 도입은 개별 시설 설치가 아니라, 도시 전체의 공간계획과 통합된 체계를 필요로 한다. 통합된 체계로서 필요한 방향은 도시 내부 에너지 인프라를 도시 계획요소로 활용하는 것이다. 또한, 산업·주거·공공부문을 연결하는 다핵 분산형 에너지체계를 구축하는 방안도 마련될 필요가 있다.

기존도시가 무탄소 에너지원을 통해서 탄소중립을 이루기 위해서는 하나의 기반시설만이 아닌 도시 전체가 유기적으로 탄소저감이 실현되어야 하며, 이는 에너지-산업-환경-교통의 순환형 도시 시스템과 같은 통합시스템 구축을 통해 가능하게 된다.

■ 에너지원 특성 기반 공간전략 수립마련 필요

에너지원별로 요구되는 공간요건이 다르므로 다음의 전략이 필요하다. 기존 도시에 무탄소 에너지를 적용하기 위해서는 태양광의 경우 건축물 및 도시 유휴공간 중심의 내재화가 필요하고, 소형원자로의 경우에는 도시보다는 산업단지·항만·기존 발전소 중심의 중대형 기저전원으로서의 활용이 중요하게 고려되어야 한다. 풍력에너지도 도시보다는 도시 외곽의 산지·연안 중심의 광역형 전원으로서 활용이 고려될 필요가 있다. 수소·연료전지는 산업·모빌리티·공공수요 연계형 에너지 허브의 역할을 감당할 수 있도록 공간마련 전략을 수립할 필요가 있다.

[표 4-1] 무탄소 에너지원별 공간계획 전략과 적용성

에너지원	공간계획 전략	핵심 공간요소	도시적 적용성
태양광(BIPV·지상형)	도시 내재화(건축물 외파·유희지 중심)	지붕·외벽, 공공부지, 주차장 상부	기존도시에서 가장 높은 적용성
SMR(소형모듈원전)	산업·항만 중심 기저전원 배치	산업단지, 항만, 기존 발전소 부지	도시 외곽 중심 중대형 전원의 역할
풍력(육상·해상)	외곽·연안 중심 광역형 전원	산지 외곽, 항만·연안	환경·경관 제약이나 광역형 가능
수소·연료전지	산업·모빌리티 연계 에너지 허브	산업단지, 항만, 공공시설	도시형 분산전원 역할 가능

출처: 연구진 작성

② 공간유형별로 활용가능한 무탄소 에너지 적용모델

기존도시는 공간구조와 기능이 서로 다르기 때문에, 무탄소 에너지 적용 또한 공간유형에 따라 차별적인 전략이 요구된다. 이에 본 연구에서는 도시를 산업도시형 / 도심·주거지형 / 농촌·외곽형 / 항만기반형 / 기존 발전소 전환형으로 구분하여 에너지원 조합과 도입방식을 제시하였다.

[표 4-2] 무탄소 에너지원별 적용가능한 공간계획 모델

공간유형	주요 특징	적용 가능한 에너지원	공간계획 모델
산업도시형(보령·당진 등)	대규모 인프라·송전망·항만 접근성	SMR, 수소혼소, 연료전지, 태양광, ESS	기존 화력발전소 → 에너지전환 클러스터, RE100 산업지구
도심·주거지형	고밀도·생활수요 중심	BIPV, 지열, 소규모 ESS, 연료전지	도시형 미니그리드, 시민참여형 태양광, 건물 기반 분산전원
농촌·외곽지역형	저밀도·대규모 공간 가능	대규모 태양광·풍력	광역형 전원벨트, 경관·환경보전 연계형 개발
항만·복합기반시설형	해상·물류 기반시설 우수	해상풍력, 수전해 수소·ESS	해상풍력-수소-항만 복합허브
기존 발전소 전환형	탈석탄·시설전환 필요	SMR, 수소혼소, ESS	기존 설비 활용형 무탄소 전환부지 모델

출처: 연구진 작성

③ 무탄소 에너지 전환을 위한 공간계획의 단계별 실행체계

위의 전략과 모델을 실제 도시계획에 반영하기 위해서는 다음과 같은 단계별 접근이 요구된다.

■ 1단계: 공간 기반 진단(Spatial Diagnostics)

진단을 위해서 도시 내 용도지역·경관·환경·규제조항을 GIS 기반으로 재구조화하고, 에너지원별 입지적합성 지도(Class 1~3)를 생성하며, 기존 발전소·항만·산업단지 중심의 에너지전환 잠재구역들을 도출한다.

■ 2단계: 공간-에너지원 매칭(Spatial-Energy Matching)

대상도시의 공간정보와 대상 에너지원의 입지기준을 조합하여 도시 전체에 대한 에너지 포트폴리오 지도를 구축한다. 여기서 태양광·SMR·수소·연료전지 등의 무탄소 에너지에 대한 종합 계획을 구상하게 된다.

■ 3단계: 공간계획 제도화(Planning Institutionalization)

무탄소 에너지 입지기준을 도시관리계획 항목에 반영하고, 산업단지·항만을 에너지복합지구로 지정하며, 주거지·도심을 분산전원 허용구역으로 설정하는 등의 구역을 구분한다.

■ 4단계: 통합 이행관리(Integrated Implementation)

기존 도시계획과, 지자체 에너지 계획, 지역 탄소중립녹색성장 기본계획 등에 무탄소 에너지 공간도입 계획을 연동시킨다. 도입방식은 공공부지에 우선 적용하고, 민간에 확산하는 구조를 형성한다. 예산의 경우 지역기후기금과 연계한 지속적 확장 모델 구축 및 운영을 통해서 안정적인 무탄소 에너지 전환이 이루어지도록 관리한다.

4) 소결

무탄소 에너지원의 적용은 개별 기술의 도입을 넘어, 도시 공간 전체의 구조적 개편을 요구한다. 본 장에서는 에너지원별 공간전략과 공간유형별 적용모델을 제시함으로써, 기존도시가 현실적으로 무탄소 전원을 수용하기 위한 공간계획 방향을 체계적으로 제시하였다.

핵심은 다음과 같다. 입지적합성을 기반으로 에너지원별 공간전략을 세분화해야 하며, 도시 공간유형에 맞추어 적용모델을 지역별로 다르게 설계해야 하고, 이 과정은 법정계획·지구단위계획·부지전환계획과 같은 공간계획 제도화와 결합되어야 한다.

이를 통해 기존도시는 “무탄소 에너지 기반의 순환형 도시공간”으로 단계적으로 전환할 수 있으며, 에너지체계 개혁과 공간구조 전환을 동시에 이루는 통합형 탄소중립도시 모델을 구축할 수 있을 것이다.

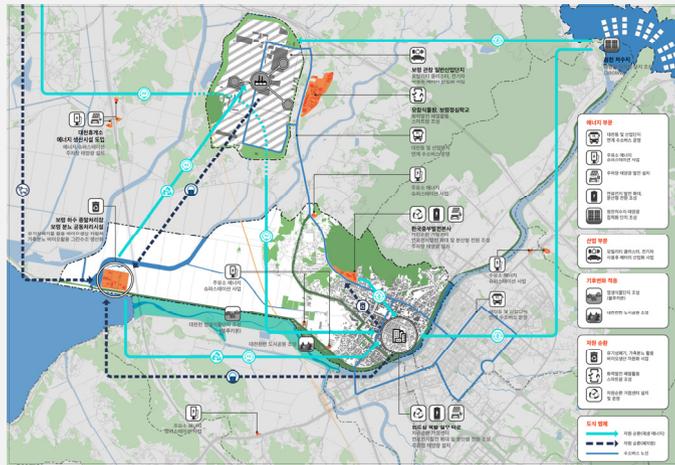
[무탄소 에너지원 도입을 위한 탄소중립도시 계획방안의 예]

충청남도 탄소중립도시 전략은 시군의 여건에 따라 보령시는 기후변화 적응 특화, 당진시는 온실가스 감축 중심으로 목표를 설정하고, 이에 맞는 에너지전환 및 공간계획을 제시하고 있다.

보령시는, 주교면 화력발전소와 대천동의 높은 에너지 소비로 인해 에너지 전환 필요성이 큰 지역이다. 이에 따라 수소 중심 전환(그린수소 생산·수소 클러스터·수소교통), 청천저수지 태양광, 자원순환 네트워크 구축, 노후주택 그린리모델링, 도시숲·녹지 확충 등 적응·감축을 연계한 전략이 제안되었다.

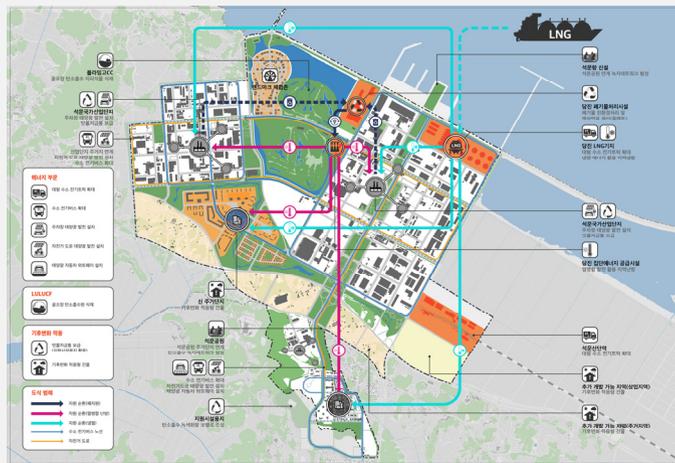
당진시는, 석문면 화력발전소를 비롯한 대규모 산업 배출이 주요 문제로 지적되며, 이를 대체하기 위해 풍력·수력·태양광·바이오·LNG복합 등 다양한 신재생 전원을 지역별로 확대하는 방향이 설정되었다. 또한 석문·송악·송산 권역을 연계하여 탄소중립 도시구역을 설정하고, 수소도시 실증, LNG 냉열 활용, 친환경 물류·교통체계(수소화물차, 전기교통), RE100 기반 산업 생태계 구축 등이 추진 방향으로 제시되었다.

요약하면, 보령시는 기후적응과 신재생 중심의 에너지전환, 당진시는 산업구조 전환을 위한 다양한 무탄소 전원 도입과 수소 기반 산업·물류 체계 구축을 핵심 방향으로 설정하고 있다.



[그림 4-1] 보령시 탄소중립 도시계획 및 무탄소 에너지 도입 사례

출처 : 이은석 외(2023. p 207)



[그림 4-2] 당진시 탄소중립 도시계획 및 무탄소 에너지 도입 사례

출처 : 이은석 외(2023. p 192)

2. 무탄소 에너지 적용을 위한 과제

1) 개요

무탄소 에너지 도입은 탄소중립도시를 실현하기 위한 주요 정책적 수단으로 간주되어 왔고, 이를 위해서 탄소중립 선도도시 시범사업도 추진되고 있었다. 추진과정에서 정부가 새롭게 바뀌고, 부처의 여건이 변화되면서 해당 사업들이 정체 또는 지연되는 현안이 발생하였다.

탄소중립도시를 조성하기 위해서는 생각보다 더 오랜 기간의 추진이 요구될 수 있다. 탄소중립 도시의 여건이 때로는 긍정적이거나 때로는 부정적일 수 있다. 그러나, 탄소중립의 실현을 위해서 탄소중립도시에 요구하는 기여는 바뀔 수 없다. 여기에 무탄소 에너지원 확대를 지속화하고, 도시의 일부라도 조성해 나가는 것이 필요한 시점이다.

무탄소 에너지원이 도시의 곳곳에 자리를 잡고, 온실가스 감소를 점차 만들어나가기 위해서 필요한 과제들은 무엇인지 정리해 보았다.

2) 지자체 무탄소 에너지원 전환에 대한 국정현안 변화

① 새정부 국정과제에서 탄소중립도시는 약화, 무탄소 에너지원 도입은 지속

새 정부의 국정과제(5개년 계획안)에서는 '탄소중립도시'라는 명시적 과제가 사라지고, 그 대신 '무탄소 에너지 전환', '재생에너지 중심 구조', '기후적응력 강화' 등으로 재편되었다. 이는 탄소중립을 도시 차원에서 종합적으로 구현하려는 접근에서, 에너지 시스템 중심의 부문별 전환정책으로 초점이 옮겨졌음을 의미한다. 따라서, 지난 정부가 추진하던 '탄소중립 선도도시 조성사업(국토부·환경부 주관)'은 단일 정책사업의 지위를 잃었고, 이 사업에 선정되어 추진 중이던 보령시나 당진시 등의 지자체는 국비 연속지원의 불확실성, 신규 사업의 축소 등 정책·재정 공백에 직면하게 되었다. 2026년 예산안을 보면 무탄소 에너지 관련 예산은 여전히 유지되고 있으나, 그 중심축이 아래와 같이 태양광 중심의 단일화 경향으로 기울고 있다.

[표 4-3] 이재명정부의 무탄소에너지원 관련 국정과제 및 2026년 예산안

국정과제	2026년 예산안(부처·금액)
<ul style="list-style-type: none"> • (국정41) 탄소중립 경제구조 개혁: 제로에너지건축(ZEB), 그린리모델링, 히트펌프 보급 	<ul style="list-style-type: none"> • 난방 전기화(공기열 히트펌프) 90억 (환경부) • 자가용 재생에너지 보급지원 2,021억(산업부) • 영농형 태양광 금융지원(재생E금융지원 6,480억 中 포함, 산업부)
<ul style="list-style-type: none"> • (국정38) 에너지고속도로 구축: 첨단 전력망, 지역별 전기요금제 • (국정39) 재생에너지 중심 전환: RE100 산단, 햇빛·바람연금 • (국정41) 경제구조 개혁: 주력산업 탈탄소화, 녹색금융 투자 	<ul style="list-style-type: none"> • 전기차 전환 지원금 1,775억 (환경부) • 전기·수소차 구매 용자 737억, 인프라펀드 740억(환경부) • AI 기반 분산 전력망 1,196억(산업부) • 분산에너지 특화지역 지원 100억(산업부) • 기후변화 대응산단(탄소중립형) 10억(국토부)
<ul style="list-style-type: none"> • (국정43) 기후적응 역량 강화: 도시 기후탄력성(도시숲 생활정원), 인프라 기후안전성 강화 • (국정42) 순환경제 생태계 조성: 플라스틱 폐기물 감축, 자원순환 	<ul style="list-style-type: none"> • AI 시범도시 조성 40억 (국토부) • 스마트시티 확산(자율계정 총 1.3조 中 일부, 국토부) • 하수관로 정비(도시침수대응) 3,855억(환경부) • 대심도 빗물터널 199억(환경부) • 생태축 연결 413억(환경부)
<ul style="list-style-type: none"> • (국정40) 탄소중립 실현: 2030 NDC, 산업·건물 수송 감축전략 • (국정43) 기후적응 역량 강화: 철도·항만·하천 인프라 안전 강화 	<ul style="list-style-type: none"> • GTX A·B·C 건설 총 4,361억 (국토부) • 인천발 KTX 1,143억, 수원발 KTX 376억(국토부) • K패스 대중교통비 환급지원 5,274억(국토부) • AI 홍수예보 인프라 215억(환경부)
<ul style="list-style-type: none"> • (국정39) 재생에너지 중심 전환: 영농형 태양광, 주민참여형 지립 • (국정42) 순환경제: 지역기반 자원순환산업 육성 	<ul style="list-style-type: none"> • 주민주도 햇빛연금 시범사업 49억 (환경부) • 지역투자 촉진보조금 8,835억(산업부 균형성장예산) • 농어촌 기본소득 시범사업 0.2조(기재부)
<ul style="list-style-type: none"> • (국정39) 재생에너지 중심 전환: 수상태양광·풍력 보급 • (국정42) 순환경제: 순환자원 활용, 일자리 창출 • (국정44) 쾌적한 환경 구현: 미세먼지 저감, 안전한 물 관리 • (국정45) 4대강 자연성 회복: 생태계 복원, 생물다양성 보전 	<ul style="list-style-type: none"> • 유기성 폐자원 바이오가스화 309억 (환경부) • 물순환 촉진지원 16억(환경부) • 에너지 바우처 5,172억(산업부) • 탄소중립포인트(녹색생활) 181억 (환경부) • 오염원관리·녹조대책 2,037억(환경부) • 국토환경 녹색복원 98억(환경부)

출처: 이재명정부 국정운영 5개년 계획(안)

■ 건물·시설의 전기화

공기열 히트펌프 보급이나 자가용 재생에너지 보급지원 사업은 건축물·시설의 에너지 소비를 전기 기반으로 전환하는 소비단 전기화 중심 사업이다. 특히 히트펌프는 화석연료 기반 난방을 대체하는 핵심 기술로서, 탄소배출 저감 효과는 크지만 전력 수요 증가를 유발한다. 건물 부문의 전기화에 따른 전력수요 증가 대응을 위해 재생전력(특히 태양광) 공급 확대와 직접적으로 연결된다. 정책적으로는 전기화를 추진하고 있으나, 무탄소 에너지원인 태양광 공급이 부족한 전기 수요를 담당하게 될 것으로 판단된다.

■ 재생에너지 확대

영농형 태양광과 수상형 태양광 지원이 이루어지는 것으로 정부의 재생에너지 보급정책이 사실상 태양광 중심으로 편중되어 있음을 알 수 있다. 그러한 이유로는 수상형·영농형 태양광 사업이 농촌 및 저수지 부지를 활용한 저비용·고효율형 태양광 설치 모델로, 풍력·수소·바이오 등 다른 에너지원 대비 추진속도가 빠르다는 데 있을 것이다. 이는 재생에너지 정책의 균형성이 약화되고, 무탄소 에너지원의 다양성이 축소되는 현상이 발생할 수 있다.

한편으로는 앞서 무탄소 에너지 기반시설 입지분석에서 나타난 바와 같이 태양광에 대한 입지 적합성이 보령시와 당진시에서도 높았으므로 국정과제와 연계된 정책수단으로 활용할 필요가 있다.

■ 지역형 무탄소 에너지 기반시설 사업

주민주도 햇빛연금 시범사업과 같이 지방정부와 주민이 직접 참여하는 소규모 분산형 태양광 사업의 형태로 무탄소 에너지원 확보지원도 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다. 다만, 참여형 구조이긴 하지만 실질적 에너지원은 여전히 태양광에 한정되어 있음도 에너지 다양성 측면에서는 편중 현상이 지속됨을 보인다.

■ 산업단지형 사업

RE100 산업단지, 탄소중립형 산단 시범사업들은 산업단지 내 전력소비를 재생에너지 기반으로 전환하기 위한 사업으로, 태양광 발전과 전력구매(PPA) 구조가 핵심이다. 일부 산단은 기업 자가발전 및 직접전력계약(VPPA) 형태로 추진 중이며, 태양광 전력의 구매·거래를 통한 간접 탈탄소화를 추구한다.

그러나, 수소·연료전지 등은 부지·비용 제약으로 인해 아직 실증단계 수준에 머물러 있다. 이런 현상은 보령시와 당진시에도 같은 상황을 보인다. 탄소중립 선도도시 관련 사업들이 무탄소 에너지 확보를 위해 계획되었으나 아직 시행되고 있지 못하고 있다.

② 정부부처의 탄소중립 선도도시 사업지원과 축소

보령시와 당진시가 탄소중립 선도도시로 선정된 이후 사업추진 현황을 정리하기 위해서 지자체를 방문하여 담당자를 인터뷰를 시행하였다. 그 결과 해당사업의 진척이 제대로 이루어지지 않고 있음을 파악할 수 있었다. 보령시와 당진시의 탄소중립 선도도시 사업은 계획 단계에서 온실가스 감축과 기후적응을 위한 목표를 두고, 에너지전환과 감축사업들을 도구로 신규와 기존 사업들과 연계하도록 설계되었다. 그러나, 실행 단계에서는 예산 축소, 정책 연속성 약화, 행정 구

조의 분절로 인해 사업 추진이 기대만큼 진척되지 못한 것으로 파악되었다. 이렇게 추진되는 사업이 탄소중립선도도시 선정과정에 주도적으로 참여하던 탄소중립지원기구의 역할이 거의 없는 상태임도 확인되었다. 이는 해당사업이 탄소중립도시 달성이라는 초기의 목적에서 축소되고 벗어나 있음을 보여주고 있었다. 주요 이슈는 아래와 같다.

■ 예산 축소와 사업 구조의 축소화

보령시와 당진시 인터뷰 결과 초기 계획(1,000억 규모)이 200억 내외로 축소되며, 통합형 사업이 다수의 소규모 시범사업으로 재편되었음이 확인되었다. 이러한 예산 축소로 인해 사업의 핵심 철학인 통합 플랫폼-에너지전환-시민참여 연계가 유지되지 못하고, 부문별로 분절될 수밖에 없는 상황으로 보여진다. 소규모 예산으로 가능한 눈에 보이는 사업 위주로 구성되어, 기후적응형 공원, 태양광 쉼터, 시각적 인프라 중심의 전환을 고민하고 있었다.

■ 중앙-지자체 간 권한 불균형과 추진 거버넌스 부재

사업실행을 위한 기관으로 환경부에서는 K-water를 선정하였으나, 기존 탄소중립 선도도시 사업논의의 중심역할을 하던 탄소중립도시 지원기구에는 별다른 역할이 부여되지 않았다. 이에 사업시행기관인 K-water가 선정된 사업계획을 조정하는 과정에서 지자체의 계획·조정 권한을 약화시켰고, 사업 방향이 상위기관에 종속적으로 결정되고 있는 것으로 판단된다.

지자체는 정책 의사결정 과정이나 사업내용 조정과정에서 의견을 제시하는 영역이 극히 한정되고 있는 상황이었다. 이러한 상황들은 사업계획의 구체화가 이루어지는 과정 속에서 계획과 실행의 연계가 깨지게 되며, 지자체 사업의 추진의지가 꺾이게 될 것으로 보인다.

■ 행정추진력의 약화와 인력 부족

탄소중립 선도도시 부처 담당자가 교체되면서 사업의 연속성이 떨어지고, 지자체의 경우 한 부서에서 사업을 담당하다 보니 사업을 실행하는데 있어 인력부족의 한계가 있음이 파악되었다. 공모이후 실행단계의 전담인력들이 제대로 확보되지 못하거나 주요 사업에 대한 기획이 외주화 되는 경향, 혹은 지자체 내 부서 간 협업의 부족으로 인한 탄소중립도시 사업 실행을 위한 충분한 검토가 이루어지지 못하는 점도 지적되었다.

■ 탄소중립도시의 면모가 훼손될 우려

사업의 축소는 두 지자체에서 기획부터 이끌어 오고 있는 담당자들에게 사업의 지속을 고민하게 하는 상황을 만들고 있으며, 축소된 예산으로 가능한 사업들이 핵심사업에서 담당하던 에너지 전환이 아닌 탄소흡수를 위한 공원조성 등의 특색을 잃게 될까 매우 우려하고 있었다.

3) 사례도시를 통해 본 무탄소 에너지원 적용방향

보령시와 당진시의 탈석탄 전환은 단순한 발전소 폐쇄를 넘어 지역경제 재편, 산업 다각화, 공동체 지속가능성을 재구성하는 과제이다. 이를 위해 고용·경제·환경의 균형 있는 대안을 마련하고, 주민 공감과 사회적 합의를 이끌어 내는 과정이 핵심이다. 그러나 아직 탄소중립도시 실행에 있어서 해당사업들이 성공적으로 수행되는 데에는 여러 장애요인이 있는 것도 사실이다. 그런데, 보령시와 당진시가 당면한 문제들은 과연 그들 도시들만의 것일까?

탄소중립도시 조성은 이제 시작되었고, 시범도시를 추진하는 과정이 이렇게 매끄럽지 않다면 탄소중립도시를 통해서 국가 전체를 탄소중립화하려는 장기적인 목표에도 그들이 질 수 밖에 없다. 즉, 모든 기존 도시들이 마주할 수 밖에 없는 공통의 문제이기도 한 것이다. 따라서, 두 도시의 경험은 국가나 지역단위 탄소중립 정책 수립과 시행에 중요한 사례와 교훈을 제공하게 된다. 그 내용을 아래와 같이 정리해 보았다.

① 탄소중립도시 정책이 한계에 부딪힌 이유

■ 도시 정책에서 에너지 기술 사업으로의 기형적 축소

탄소중립도시는 도시를 탄소중립형으로 전환시키는 공간계획이 아니라, 에너지 공급 기술의 집합체로 변모했다. 지난 정부(2021~2024)의 탄소중립도시 선도도시 사업은 도시 전체를 대상으로 한 종합계획을 표방했지만, 실제 집행은 개별 기술 중심의 시범사업으로 축소되는 상황이다. 건물부문(제로에너지건축, 히트펌프), 교통부문(수소차·전기차), 산업부문(RE100 산단) 등 부문별로 분리되어 추진되면서 도시 단위 통합계획이 실질적으로 해체되었다. 결과적으로, “도시가 저탄소 구조로 변한다”는 목표 대신 “탄소저감 기술이 설치된 도시”로 전략하였다.

■ 법정계획과의 괴리로 인한 도시 통합력 상실

탄소중립도시가 도시계획의 핵심 틀을 바꾸지 못한 채, 여전히 비법정 계획의 이벤트성 사업으로 존재하게 되었다. 「탄소중립·녹색성장기본법」은 지자체의 ‘탄소중립 기본계획’ 수립을 규정하지만, 이는 국토계획 체계(도시·군기본계획)와 직접 연동되지 않는다. 도시의 에너지 구조, 토지이용, 산업입지, 교통망 계획은 여전히 기존의 고탄소 패턴 위에서 움직이고 있는 현실이다. 이런 상황에서 탄소중립 사회를 이끌 것이라 예상되었던 ‘탄소중립 선도도시 사업계획’이 도시의 마스터플랜 위에 병렬적으로 존재하는 별도 문서에 머물러 있고, 그 추진여건도 상당히 상실되어 개발·투자사업과 연계되지 못하고 있다.

■ 국비보조형 재정 구조와 에너지전환의 단기성과 편향

재정 기조가 '도시계획형 전환'에서 '에너지기반형 전환'으로 이동하고 있음이 확인되었다. 탄소중립도시 관련 사업 대부분은 2~3년 단기 국비보조 형태로 추진되었으며, 이후의 유지·확산 재원은 확보되지 않았다. 이 구조는 사업이 종료되면 전환도 멈추는 프로젝트 종속형 도시를 만들 수 밖에 없다. 더욱이 2025~2026년 예산에서 탄소중립도시 명목의 항목은 축소된 반면, 무탄소 에너지 관련 사업(태양광, 히트펌프, 분산전력망, 재생E 금융지원 등)은 유지 또는 확대되었다. 무탄소 에너지 시설의 시너지는 탄소중립도시가 조성되고 유지되어야 가능하다는 공간전환 차원의 논의는 사라지고 있다.

■ 성과의 기술화: 온실가스 감축량 중심의 평가

현재 사업평가는 MRV 방식으로 정량적 감축량 중심으로 이루어진다. 그러나 이 평가는 히트펌프, 태양광, 전기차 등 기술적 감축효과만 반영할 수 있을 뿐, 도시 구조개선·주거밀도·대중교통 연계 등 도시공간적 감축요소는 제외될 수 밖에 없다. 결과적으로, 도시의 기후대응능력을 높이는 통합적 거버넌스·적응·회복력 요소가 정책 인센티브로 작동하지 않는다. 따라서, 탄소중립 도시는 기후도시가 아닌, 온실가스 감축 기술단지로 전락하게 된다.

■ 무탄소 에너지의 '단일화'—태양광으로의 편중

국정과제에서 무탄소 에너지와 관련된 사업의 2026년 예산 구조를 보면, 무탄소 에너지원 항목의 대부분이 태양광 관련 항목으로 집중되어 있다. 이에 반해 풍력·바이오·수소·지열 등의 무탄소 에너지 사업은 사업비 규모가 미미하거나 기술검증 단계에 머물러 있는 상황이다. 이러한 편중은 보령시와 당진시와 같이 화력발전을 전환하여 풍력·수소·CCUS 등의 에너지로 다변화를 추진하던 지자체에 불리하게 작용하고 있으며, 지역 간 에너지전환 격차를 확대하게 될 것이다.

② 보령시와 당진시 사례를 통한 기존 도시 무탄소 에너지원 적용방향

■ 충청남도 온실가스 감축과 탄소중립 계획에서 보령시·당진시의 역할은 매우 중요

보령시와 당진시는 국내 온실가스 배출의 대표적 기여 지역으로, 석탄화력발전소와 대규모 화석연료 기반 산업에 의존해온 지역경제 구조를 가지고 있다. 이에 따라 두 지역의 에너지 부문 전환은 충청남도 전체 탄소중립 전략의 실질적 성패를 좌우하는 핵심 요소로 작용하고 있다. 특히 온실가스 감축과 탄소중립 달성을 위한 전환은 단순한 에너지원 변경을 넘어, 지역경제 재편과 공동체 지속가능성 확보를 동시에 추구하는 종합적 접근이 필요하다.

■ 무탄소 에너지원 기반시설을 활용한 지역경제 재편의 필요

석탄화력발전소 단계적 폐쇄와 더불어, 태양광·해상풍력·수소 등 무탄소 에너지원 기반시설을 지역 내 주요 기점(산업단지, 항만, 주거단지 등)과 유기적으로 연계하게 되면 온실가스 감축 이외에도 기대할 효과가 있다. 인구소멸과 지역경제 축소라는 구조적 위기 해소의 무탄소 에너지원 시설운영이 실질적 방안이 되기 때문이다. 이러한 기반시설은 지역 경제의 새로운 성장 동력으로 작용하며, 녹색 일자리 창출과 지역경제 재도약을 견인하는 역할을 수행할 것이다.

■ 신재생에너지 수용에 대한 지역사회 공감과 전환 추진의 방향설정 필요

보령과 당진 지역사회는 석탄화력발전소 폐쇄에 대한 주민과 이해관계자의 입장이 다소 상이하지만, 신재생에너지 전환 자체의 필요성에는 대체로 공감하고 있다. 발전공기업과 협력업체 노동계는 고용보장을 전제로 한 정의로운 전환을 요구하고 있으며, 주민과 시민사회는 생태계 복원, 관광 연계형 녹색산업 육성을 통한 지역경제 활성화를 기대하고 있다. 이에 따라 전환 계획은 다양한 이해관계자 간의 입장 차이를 조율하고, 지역적 수용성을 충분히 고려한 사회적 합의를 기반으로 추진될 필요가 있다.

■ 탄소중립도시 사업 축소에 따른 무탄소 에너지원 적용방안 수정 필요

보령시와 당진시의 탄소중립도시 사업은 기획은 앞섰으나 실행은 따라가지 못하는 전형적 사례이다. 예산 축소와 중앙집중적 구조로 인해 지방정부의 자율성과 사업의 추진력이 약화되었다. 이는 단지 두 도시의 문제가 아니라, 한국형 탄소중립도시 정책의 구조적 한계를 보여준다. 석탄 산업을 전환하기 위해 사업계획을 마련하였으나, 현실적인 벽으로 인해 무탄소 에너지원에 대한 도입이 어려울 수도 있는 상황에서 보다 면밀한 사업의 구체적인 방안이 강구될 필요가 있다. 사업계획에서 넓은 범위로 고려되었던 무탄소 에너지 유형들을 보다 현실적인 차원에서 고려하여 범위를 축소할 필요가 있다. 기존 석탄화력발전소를 무엇으로 대체하는 것이 타당한지에 대한 검토도 본 연구에서 입지분석 과정에서 제시한 바와 같은 여러 대안들을 검토할 필요가 있다. 새 정부에 들어서면서 탄소중립 선도도시 사업이 국정차원에서 이루어지기 어렵게 되면서 무탄소 에너지 전환사업도 변화가 예상된다. 다행이라고 생각해 볼 수 있는 것은 영농 태양광 등 기존의 관련 사업들이 파편화되어 있지만 지속될 것이라는 점이다. '햇빛연금' 등 주민참여형 모델도 태양광 단일구조를 넘어, 지역 자원순환형 에너지(바이오가스, 열에너지 등)로 확대될 수 있도록 제도적 기반을 강화해야 한다.

4) 기존 도시에 무탄소 에너지를 적용하기 위한 과제

① 기존도시에 무탄소 에너지 적용을 위한 기본 방향

■ 무탄소 에너지 전환의 도시계획 법체계 내재화

무탄소 에너지 전환을 도시 차원에서 실효성 있게 추진하기 위해서는, 「탄소중립·녹색성장 기본법」상의 탄소중립도시 조항을 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」(국토계획법)의 도시·군기본계획 체계 속에 ‘에너지전환 부문’으로 명시·편입할 필요가 있다. 도시별 에너지 총량, 무탄소 전원 비율, 분산전력망 구성 등을 도시기본계획의 정량적 지표로 설정하고, 도시계획의 법적 통제력을 통해 에너지 사용·공급 구조 전환의 이행력을 확보해야 한다. 이를 통해 도시·에너지·산업계획 간 연동성이 강화되고, 도시계획 자체가 무탄소 에너지 전환의 핵심 도구로 기능하도록 하는 제도적 기반이 마련될 것이다.

■ 도시단위 무탄소 에너지 포트폴리오 설정

각 도시는 단일 기술(예: 태양광)에 편중된 공급 구조에서 벗어나, 중장기적인 다원형 에너지 믹스 목표를 설정해야 한다. 예를 들어, 2035년까지를 목표로 태양광 40%, 풍력 20%, 바이오가스 10%, 수소·지열 10%, 외부조달 20%와 같은 도시별 에너지 포트폴리오를 제시하고, 이를 ‘지자체 에너지 포트폴리오 관리제’로 제도화할 필요가 있다. 이러한 관리제 틀 안에서 재생에너지 PPA, 시민참여형 햇빛연금, 지역 바이오가스화 사업 등을 도시 에너지 총량제의 일부로 관리함으로써, 에너지 공급원의 다변화와 안정성을 동시에 확보해야 한다.

■ 거버넌스 혁신: 광역권 기반 ‘무탄소 에너지 클러스터’ 구축

무탄소 에너지 인프라는 개별 도시 단위를 넘어 교통·산업·발전 인프라가 연결된 광역권 단위에서 구축될 필요가 있다. 예를 들어 충남권(보령·당진·서산 등)을 ‘무탄소 에너지 전환벨트’로 지정하여, 해상풍력, 수소·암모니아 혼소, 지역열망, ESS 연계 등을 하나의 광역 에너지 클러스터로 통합 운영하는 방식이다. 이를 위해 중앙정부는 광역형 탄소중립·무탄소 에너지 거버넌스 제도를 신설하여, 발전소 폐쇄, 송전망 조정, 수요관리 정책을 광역 단위에서 조정·지원하는 체계를 마련해야 한다.

■ 국비보조형에서 ‘순환형 지역에너지기금’으로 전환

현재와 같은 단기 국비보조 위주의 구조로는 무탄소 에너지 전환사업의 지속성을 담보하기 어렵다. 지자체가 자체 생산한 무탄소 전력(태양광·풍력·바이오가스 등)의 REC 판매 수입과 전력거

래(PPA) 수익을 지방기후기금으로 환류시키는 순환형 재정구조를 구축할 필요가 있다. 이를 통해 국비 지원이 종료되더라도 도시의 에너지 전환이 지속적으로 추진될 수 있으며, 기금은 재생 에너지 확대, ESS, 수소 인프라 구축 등 무탄소 에너지 확충 재원으로 사용될 수 있다.

■ 무탄소 에너지 기반의 공편익 평가체계 도입

기존 탄소정책 평가는 온실가스 감축량 중심의 MRV 체계에 치우쳐 있다. 무탄소 에너지 확대가 실질적으로 도시의 복합적 성과를 창출할 수 있도록, 무탄소 에너지 보급률과 사회적 공편익(Co-benefits)을 동시에 평가하는 체계를 도입해야 한다. 예를 들어, 히트펌프 보급률과 전력피크 저감률, 지역일자리 창출효과를 함께 평가하고, 태양광 보급률과 열섬 완화, 시민참여율을 통합적으로 측정하는 방식이다. 이러한 통합지표 체계는 도시의 탄소중립을 ‘에너지-사회-환경’ 복합성으로 인식하는 방향으로 정책 패러다임을 전환시키는 데 기여할 것이다.

② 기존 에너지 체계 전환을 위한 핵심 과제

■ (기술적 과제) 기존 인프라와 무탄소 전원의 정합성 확보

기존 도시는 화석연료 기반 중앙집중형 공급체계를 전제로 설계되었기 때문에, 무탄소 에너지 전환을 위해서는 기존 인프라의 구조적 한계를 극복하는 기술적 대응이 요구된다.

전력수요 증가에 대응하는 공급 안정성 확보가 필요하다. 건물 전기화 확대와 전력 중심 에너지 정책으로 전력수요가 급속히 증가하고 있으나, 공급구조는 여전히 태양광에 편중되어 있다. 변동성 전원 비중 확대에 따라 계통 안정성과 장주기 전원 확보는 가장 핵심적인 기술 과제가 되고 있다. SMR·수소·암모니아 등 대체전원의 안전·운영 기준 확립이 요구된다. 소형모듈원전(SMR)은 기존 산업단지·항만부지를 활용할 수 있는 유력한 무탄소 전원이지만, 도시 인근 설치를 위해서는 냉각수, 방재계획, 비상대응체계, 방사선 영향범위 등 도시형 SMR 안전기준을 새롭게 마련해야 한다. 수소·암모니아 연료전환 기술 또한 기존 화력발전소 전환 가능성을 높이지만, 혼소비율 확대, 연료 공급 인프라, 장기적 안전성 검증 등 기술적 과제가 남아 있다.

기존 화력발전 자원의 단계적 전환기술 확보도 필요하다. 특히 보령·당진과 같은 대규모 화력도시는 기존 설비를 기반으로 수소·암모니아 혼소 실증을 확대하는 것이 필수적이며, 이를 통해 산업도시의 전환비용을 최소화하는 현실적 경로를 구축해야 한다.

■ (공간적 과제) 도시구조와 무탄소 기반시설의 공간적 충돌 해소

입지적합성 분석 결과, 태양광은 비교적 높은 입지성을 보였으나 풍력·SMR은 지형, 환경규제, 주거지 이격거리 등 다양한 요인으로 제약을 받는 것으로 나타났다. 이는 기존 도시가 무탄소 에

너지를 수용하기 위해 공간계획 기반의 재구조화가 필요함을 의미한다.

공간규제와 무탄소 시설 간 충돌 조정이 필요하다. 경관지구, 보전산지, 농지, 문화재보호구역 등 다층적 공간규제가 무탄소 시설 입지와 충돌하고 있다. 지자체는 지역 특성을 반영한 무탄소 에너지 입지지침을 수립하여, 적합·조건부·부적합 구역을 선제적으로 구분·조정해야 한다.

산업단지·항만의 에너지전환 전략 수립이 필요하다. 기존 산업단지·항만은 전력망·냉각수 접근성이 높아 SMR·연료전지 등 무탄소 전원의 전략적 입지로 활용될 수 있으나, 용도지역 변경, 기반시설 부족, 환경영향 등으로 전환이 지연되고 있다. 이를 해결하기 위해 '산업단지 에너지복합 지구(가칭)' 지정 등 공간적 전략을 마련할 필요가 있다.

도시 내 분산형 전원 도입을 위한 소규모 공간 확보를 해야 한다. 건축물 태양광, BIPV, 소규모 ESS 등 분산형 인프라 설치에 고밀도 도시일수록 중요하지만, 현재 관련 인센티브와 허용기준은 미비하다. 공공유희지, 도로변, 폐철도부지, 주차장 상부 등 소규모 공간을 활성화하기 위한 제도 준비가 요구된다.

■ (제도적 과제) 도시계획-에너지계획 통합 프레임워크 구축

현행 법·제도는 에너지원별로 분절되어 있어 도시 차원의 통합적인 무탄소 에너지 전환을 어렵게 만든다. 이를 해결하기 위한 과제로서 일부를 제시해 본다.

법정 도시계획에 무탄소 에너지 전환 부문을 반영할 필요가 있다. 「탄소중립·녹색성장 기본법」의 '탄소중립도시' 조항은 도시·군기본계획과 충분히 연계되지 못해 실효성이 낮다. 무탄소 에너지 부문을 도시계획의 필수 구성요소로 내재화하는 법·제도 개선이 필요하다.

기술별 분리 인허가에서 통합 인허가체제로 구축되어야 한다. 태양광·풍력·SMR·수소 등 전원별로 분리된 인허가 체계는 사업기간을 증가시키고 예측성을 떨어뜨린다. 다원형 전원을 포괄하는 통합 인허가체계 도입을 통해, 절차를 간소화하고 사업의 안정성을 제고해야 한다.

단기 국비보조 중심 사업구조의 한계를 극복해야 한다. 2~3년 단기사업 중심의 국비지원은 도시의 중장기 전환계획과 부합하지 않는다. 순환형 지방기후기금 등 지역 차원의 재정 자립체계를 구축하여, 도시가 자체적으로 무탄소 전환을 지속할 수 있도록 해야 한다.

■ (사회·경제적 과제) 정의로운 전환과 지역수용성 확보

무탄소 에너지 전환은 무엇보다 지역사회·고용·경제체계의 변화를 수반하는 과제이다. 지역적 인 수용성이 높아야 신규 무탄소 에너지원 시설유치가 용이하고, 그 운영에 있어서도 지역주민들의 경제를 제고할 수도 있다.

전환 과정에서의 고용·세수 공백에 대응해야 한다. 화력발전과 증공업에 의존해 온 도시에서는 발전소 축소에 따른 고용감소와 세수 감소가 현실적 문제로 나타난다. 이를 완화하기 위해 전환 기금 조성, 직무 전환 교육, 대체 산업 육성 등 정의로운 전환 시스템을 구축해야 한다.

이해관계자 간 갈등 조정 및 합의체계가 구축되고 운영되어야 한다. 무탄소 시설 도입 과정에서 주민·노동계·기업 간 이해충돌은 불가피하다. 지자체 주도의 공론장, 3자 협약, 주민참여형 프로젝트 등을 통해 사회적 합의·조정 메커니즘을 마련해야 한다.

지역경제 생태계의 지속가능성 강화가 필요하다. 수소·재생·SMR 기반 신산업과 에너지서비스업을 육성하고, 기존 산업과 연계하는 지역 산업전환 전략을 수립함으로써, 무탄소 전환을 지역경제 활력 제고의 계기로 삼을 필요가 있다.

제5장

결론

1. 연구 수행 및 결과 논의
2. 연구 한계 및 제언

1. 연구 수행 및 결과 논의

1) 연구 수행 결과의 요약

본 연구는 기존 도시에서 무탄소 에너지원 도입의 실현 가능성을 검토하기 위해 에너지원별 입지기준을 정립하고, 이를 시범적으로 도시공간에 적용하여 입지적합성을 분석하며, 도출된 결과의 공간계획적 활용 가능성을 연구결과로 제시하였다. 연구는 기술적·공간적·제도적·사회적 요소를 종합적으로 고려한 일련의 분석체계를 구축하였으며, 이는 기존 도시의 무탄소 에너지 전환을 위한 실질적인 근거를 제공한다는 점에서 의미가 크다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같이 정리된다.

① 무탄소 에너지원 도입을 위한 입지기준 체계의 명확한 정립

본 연구는 태양광·풍력·수소·연료전지·소형모듈원전(SMR) 등 주요 무탄소 에너지원별 입지기준을 단계적으로 구성하였다. 이는 기존 도시 공간에서 에너지원별 수용 가능성을 판단하기 위한 실질적·정량적 기준틀을 제공하였다.

■ 태양광 입지기준

태양광은 일사량, 경사도, 음영, 지형방향, 주변 이격거리, 토지이용규제 등 환경·지형·제도 조건을 종합한 기준체계를 갖춘 에너지원으로 정리되었다. 태양광 에너지가 가장 광범위하게 적용 가능한 전원임을 입증하는 기준으로 기능한다.

■ 풍력 입지기준

풍력은 풍속·고도·지형능선·소음·경관영향·환경보전구역 등 제약요소가 매우 많은 에너지원으로 정리되었다. 업로드된 자료는 풍향 조건, 보호구역, 이격거리 등 필수 요건들이 대부분 기존 도시에서 충족되기 어렵다는 점을 분명히 제시하고 있으며, 이에 따라 풍력은 도시지역 내 도입 가능성이 매우 낮은 전원으로 판단된다.

■ 수소 및 연료전지 입지기준

수소 연료전지는 저장·공급 인프라 접근성, 안전이격거리, 주변 시설과의 조화 가능성 등을 기준으로 하며, 소규모 단위의 분산형 전원으로 분류된다. 고정형 연료전지가 건축물·공공부지·산업단지 등에 적용 가능하며 공간적 제약이 상대적으로 적다는 점은 장점으로 판단된다.

■ 소형모듈원전 입지기준

소형모듈원전은 냉각수 접근성, 송전망 연계성, 안전반경 확보, 주변 용도와의 조화 등 복합적 기준을 필요로 하는 에너지원으로 정리되었다. 자료에서는 기존 화력발전 부지·산업단지·항만 배후지 등 대규모 기반시설이 확보된 공간에서 상대적으로 높은 입지성을 가짐을 제시하였다.

② 무탄소 에너지 입지분석을 통해 입지기준을 사례도시에 적용

입지기준을 실제 도시공간에 적용하여 수행한 시범적 입지분석은 기존 도시의 구조 속에서 무탄소 에너지원이 공간별로 전혀 다른 수준의 수용 가능성을 가진다는 점을 명확하게 확인하였다.

■ 태양광: 기존 도시에서 가장 높은 잠재력

입지분석 결과, 금지구역을 제외한 대부분 지역이 Class 1~2로 나타나, 태양광은 기존 도시에서 가장 빠르게 도입 가능한 전원임이 증명되었다. 도시 내부 지붕, 주차장 상부, 공공유희지 등 적용 가능성 매우 높을 것이다. 또한, 태양광은 공간적 제약이 적고 분산형 전원 구축에 즉시 활용이 가능하다.

■ 풍력: 도시형 적용 가능성 매우 낮음

분석결과 대부분 지역이 Class 3 또는 부적합으로 분류되며, 풍향·지형·규제의 제약이 강해 도시 내 적용성은 거의 없음이 실증되었다. 내륙 풍력은 지형·풍향이 부족하고, 소음·경관 등 규제가 광범위하게 작용하는 것이 원인인 것으로 판단되었다.

■ 소형모듈원전: 도시 외곽 및 산업입지에서 적합성 높음

보령시와 당진시에 시범적용한 결과, 산업단지·항만부·배후부지 등에서 Class 1~2 지역이 명확히 나타났다. 이는 기존 석탄화력 부지를 대체할 수 있는 실질적 후보지로 고려해 볼 수 있음을 의미하며, 송전망·냉각수 등 SMR의 필수 조건 데이터를 충족하는 구역이 존재하고 있음을 보여 주었다.

■ 연료전지·수소: 도시 내부의 분산형 전원으로 적용 가능

연료전지는 대부분 공간에서 부적합 구역이 적게 나타났으며, 건물·공공시설·산업부지 등 다중 공간에 적용 가능한 전원으로 나타났다. 이는 도시 전기화 열수요 관리에 실질적으로 기여할 수 있는 결과로 볼 수 있다.

③ 입지분석 결과의 활용 및 무탄소 에너지 전환을 위한 적용방안 제시

무탄소 에너지원별 입지특성과 시범 입지분석 결과를 근거로, 도시계획 차원의 적용방안을 도출하였다. 주요 적용 방향은 다음과 같다.

■ 공간유형별 적용전략 수립에 활용

입지적합성 분석결과, 주거지·상업지·산업단지·항만·도시외곽 등 공간유형별로 적용 가능한 에너지 조합이 상이하게 나타났다. 따라서 도시별로 아래와 같은 전략적 조합 구성이 가능한 것으로 정리하였다.

- 주거지역: 태양광(BIPV), 소규모 연료전지
- 상업·업무지역: 태양광, 연료전지, ESS
- 산업단지: SMR, 연료전지, 태양광
- 항만지: SMR, 수소, 연료전지
- 외곽지역: 태양광 중심, 풍력은 극히 제한적

■ 도시계획·관리계획과의 연계

입지적합성이 높은 Class 1·2 지역을 무탄소 에너지 우선 배치구역으로 설정하여 도시관리계획·지구단위계획·산업단지 계획에 반영할 수 있으며, 이는 지자체가 무탄소 에너지 도입을 계획적으로 관리하는 기반을 제공할 수 있다.

■ 기존 발전부지 전환 시나리오 마련

소형원자로·태양광·연료전지의 적합 지역이 기존 화력발전소 주변과 산업입지에서 도출됨에 따라, 화력발전에너지에서 무탄소 에너지 전환 로드맵 수립이 가능할 수 있음을 확인하였다.

■ 지자체 무탄소 전원 포트폴리오 구축

입지분석 결과를 토대로 지자체는 무탄소 에너지 유형들을 혼합하여 활용할 수 있다. 유효할 것으로 판단되는 혼합형태는 태양광이 중심이 되고, 소형원자로나 연료전지로 보완하는 것이 가능할 것이다. 다만, 아직 소형원자로나 연료전지가 보편화된 기술이 되지 못하였고, 기반시설을 설치하기까지는 넘어야 할 안전관련 규제의 벽이 높을 것으로 예상된다.

④ 연구의 종합적 의의와 정책적 시사점

본 연구는 업로드된 자료만을 활용하여 기존 도시의 무탄소 에너지 전환에 필요한 입지기준-입지분석-적용방안의 전 과정을 체계적으로 정리하였으며, 그 결과 다음과 같은 연구적 성과를 명확히 도출하였다.

본 연구는 탄소중립도시 조성에 활용을 목적으로 무탄소 에너지원별 입지기준을 통합된 체계로 정리하였다. 기존 연구들이 단일 에너지원 중심에 머물렀던 것과 달리, 본 연구는 태양광·풍력·연료전지·수소·소형원자력 등 다양한 무탄소 에너지원들을 발굴하고, 입지요건을 도시공간의 관점에서 정량화하였다.

입지기준을 실제 도시공간에 적용하여 에너지원별 공간적 수용성을 명확히 구분하였다. 태양광은 광범위한 적용이 가능하며, 아직 풍력에너지는 도시형 적용이 불가하며, 소형원자로는 산업·항만 중심의 후보지가 있을 때 유효하며, 연료전지는 도시 내부의 분산전원으로 유효할 것이다.

입지분석 결과는 도시계획·에너지계획·산업단지 재편 등과 연계 가능한 기초자료로서 기능할 수 있다. 이는 또한 지자체가 무탄소 에너지 전환 전략을 수행하는 데 있어 실무적으로 활용가능한 참고자료로 활용될 수 있다.

본 연구는 또한 기존 도시에서 실현 가능한 무탄소 전원 조합을 명확히 제시함으로써, 도시 공간 속에서 에너지 밸런스 전략에 활용할 수 있는 방안을 제시하였다.

최종적으로 본 연구에서는,

“기존 도시의 무탄소 에너지 전환은 에너지원별 입지기준을 기준으로 명확히 구분된 공간적 수용성을 전제로 해야 하며, 입지분석 결과를 도시계획과 연계함으로써 실질적인 도입 전략이 가능하다.”는 점을 제시하였다.

2. 연구 한계 및 제언

1) 연구한계

무탄소 에너지 도입을 위한 입지분석은 태양광·풍력·소형원자로·연료전지를 대상으로 수행되었으나, 풍속·지형·환경규제 등으로 인해 실제 입지 가능면적이 제한되어, 정책적 실현성 검증이 미흡하였다. 분석이 화석발전소가 위치한 사례도시에 국한되어 있어 결과가 모든 도시에 적용할 수 있도록 일반화되기에는 추가 연구가 필요하다. 그럼에도 연구를 통한 입지기준과 입지분석의 절차는 다른 특성을 가진 대상도시에 무탄소 에너지원을 적용하고자 할 때 유용할 것이다.

연구는 행정주도형 접근에 머물러, 지역주민·산업계·발전사 등 주요 이해관계자 간의 사회적 대화와 합의 형성 과정이 반영되지 못했다. 특히 석탄화력발전소 폐쇄와 관련해 주민들은 생태복원과 정의로운 전환을 요구했지만, 실제 정책은 고용·산업 다각화 대안이 부족하여 사회적 갈등을 완화하는 실행전략을 추가적으로 발굴하는데 한계가 있었다.

새 정부 출범 이후 ‘탄소중립도시’ 과제가 국정과제에서 제외되면서, 기존의 통합형 도시정책이 ‘무탄소 에너지 전환’ 중심의 부문별 기술정책으로 축소되었다. 그 결과, 보령·당진을 비롯한 지방정부의 무탄소 전환 사업은 국비 연속지원이 불확실해지고, 계획 대비 사업규모가 축소되는 정책 지속성의 한계를 드러냈다. 탄소중립도시 조성사업이 보다 활발하게 진행되었더라면 실제 에너지 시설의 규모와 예산에 대한 내용도 추가적으로 검토할 수 있었을 것이다.

종합적 탄소중립 평가체계가 여전히 부재하였다. 입지분석과 현황진단은 주로 공간적 요인에 초점을 두었으나, 에너지 공급망, 경제효과, 고용효과 등 통합적 영향평가 시스템은 구축되지 않았다. 이에 따라 도시 차원의 무탄소 전환이 사회·경제·환경 부문 간 상호작용을 충분히 반영하지 못한 점이 한계로 지적된다.

2) 탄소중립도시 구현을 위한 제언

탄소중립도시는 단순한 에너지 구조의 저탄소화가 아니라, 도시의 공간구조·산업체계·거버넌스·시민참여가 통합적으로 작동하는 전환 플랫폼으로 구축되어야 한다. 보령시와 당진시의 사례를 통해 확인된 한계를 보완하기 위해, 다음의 정책적·제도적 제언을 제시한다.

■ 무탄소 에너지 중심의 도시계획 체계 확립 필요

탄소중립도시 구현의 핵심은 무탄소 에너지의 안정적 공급과 공간 내 통합이다. 이를 위해 국토 계획 및 도시관리계획에 무탄소 에너지원 입지를 사전에 반영하고, 태양광·수소·바이오 등 지역 맞춤형 전원을 도시공간 구조 속에 기반시설로 제도화해야 한다.

‘도시형 무탄소 에너지 계획구역’ 제도를 신설하여, 건축물·산업단지·교통시설의 에너지 수요를 통합적으로 관리. 도시기반시설(공공부지, 도로, 하천, 항만 등)에 분산형 태양광 및 에너지저장장치(ESS)를 우선 배치하는 등의 정책추진이 요구된다. 탄소흡수 중심의 녹지사업에서 벗어나, 에너지순환형 도시 인프라로의 전환도 필요하다.

■ 정의로운 전환과 지역경제 연계 강화

무탄소 에너지 도입은 단순한 기술적 치환이 아닌 지역산업과 고용의 재구조화를 동반해야 한다. 석탄화력 폐쇄 이후의 보령·당진 사례처럼, 발전소 부지 및 주변 산업단지를 활용해 그린수소, 재생에너지, 탄소저감산업단지로 전환하는 것이 필요하다. 이를 위해 정부와 지자체는 다음의 실행체계를 고려해야 한다. 폐화력발전 부지를 ‘무탄소 산업전환 거점’으로 지정하고, 재생에너지·수소·ESS 복합단지를 조성해야 한다. 에너지산업 기반의 지역일자리 전환 프로그램(재교육, 재고용) 운영하고, 산업전환과 지역공동체 회복을 연계한 정의로운 전환 펀드를 조성하고 운영해야 한다.

■ 지방정부 주도의 추진체계 및 법·제도 정비

탄소중립도시의 실행력은 지자체의 자율성과 정책 연속성 확보에 달려 있다. 현행 중앙부처 중심의 단년도 공모방식은 지속적 실행을 어렵게 하므로, 「탄소중립·녹색성장 기본법」 하위에 ‘탄소중립도시 지정 및 지원 제도’를 명문화하고, 장기 재정지원(5년 이상)과 광역-기초 간 공동기획 구조를 제도화해야 한다. 또한, 에너지계획과 도시계획을 연계하는 통합관리 플랫폼(One-Map System)을 구축하여 입지, 인허가, 주민의견 수렴을 통합 관리할 필요가 있다.

■ 시민참여형 에너지 전환 모델 구축

탄소중립도시는 시민이 직접 전환과정에 참여할 때 지속가능성이 확보된다. 보령·당진 사례에서 쟁점들은 정보 비대칭과 소통 부재에서 비롯된 측면이 크다. 이에 따라 다음의 제도적 장치가 요구된다.

에너지 커뮤니티 제도화를 통해서 주민이 직접 발전사업에 투자·운영할 수 있는 구조(햇빛연금, 마을발전소 등)가 마련되어야 한다. 공공정보 공개 강화를 통해서 건물 에너지성능, 온실가스 감축성과 등이 투명하게 공개되어 시민들이 그 효과를 체감할 수 있어야 한다. 탄소중립 시민참여 플랫폼을 구축해, 정책 기획·실행·평가 단계별 피드백 체계를 마련해야 한다.

■ 지속가능한 정책 거버넌스의 구축

새 정부 국정기조 변화로 탄소중립도시 과제가 축소되면서, 정책 연속성이 약화되었다. 이를 극복하기 위해서는 중앙-지방 간 역할분담을 명확히 하고, 지속가능한 운영체계를 갖춘 '탄소중립도시 추진협의체' 구성이 필요하다. 탄소중립지원기구의 역할도 새롭게 재정의하여 탄소중립도시 조성을 위한 협의체가 활발하게 활동하도록 국가적 차원에서 지원이 요구된다.

또한, 무탄소 에너지원의 기존 도시 적용을 위해 환경부·국토부·산업부가 공동으로 '무탄소 도시 전환 로드맵'을 수립하고, 광역단위에 '에너지 전환 지원센터'를 두어 계획-기술-재정 컨설팅을 통합적으로 지원하는 거버넌스를 구축하고 또한 운영하는 것을 검토할 필요가 있다.

■ 지역 맞춤형 에너지 믹스 전략의 수립

모든 도시에 동일한 전환 모델을 적용하기보다, 지역별 입지여건과 산업특성에 따른 차별화된 에너지 믹스 전략이 필요하다. 예를 들어, 보령시는 해양과 산지를 활용한 수상태양광·해상풍력·바이오에너지 복합형 믹스단지가 필요하다. 또한, 당진시는 간척지·산업단지 기반의 태양광+수소복합형 모델이 적합하다. 이러한 지역별 특화모델은 향후 탄소중립도시의 실질적 경쟁력을 높이는 전략적 수단이 될 것이다.

■ [보고서 및 논문 자료]

관계부처합동. (2023). 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획. 대통령직속2050탄소중립녹색성장위원회. p.3, 5, 12, 21, 24, 27-28, 125.

길형배, 김현하, 김철후, & 이선엽 (2022). 무탄소 에너지원으로서 암모니아 기술의 부상 및 시사점. 기계기술정책 정책지,(108), p.1-32.

김대식. (2019). 수소 가스터빈 연소기술 개발 동향 고찰. 한국연소학회지, 24(4), 1-10.

김선욱 (2024, 3). 무탄소 에너지(CFE) 이니셔티브 추진 동향과 향후 과제. 에너지 포커스, 21(1), 52-62.

김재엽, 조성진 (2024). 석탄 발전소 폐쇄 지원 방식에 대한 해외 사례의 국내 도입 가능성 연구. Korea Energy Economics Institute.

산업통상자원부. (2025). 제11차 전력수급기본계획(2024~2038). p.5

산업통상자원부-에너지경제연구원. (2025). 5월 에너지통계월보. 41(4).

안지영, 김기환. (2024). 국내 청정수소 생산 기반 확대 연구(1/3). 에너지경제연구원.

이기림, 이원희. (2015). GIS와 계층분석법을 이용한 태양광 발전소 입지 분석. 한국지리정보학회지, 18(4), 1-13.

이은석, 김성준, 지석환. (2023). 기후위기 대응력 강화를 위한 탄소중립도시 종합계획 수립 방안 연구. 건축공간연구원.

전원표. (2022). 발전용 수소 연료전지의 저소음·저진동 냉각모듈 개발에 관한 연구. 한국기계가공학회지, 21(12), 61-68.

정용주. (2021). 수소경제에서 연료전지발전의 역할. 경영과학, 38(1), 15-29.

최민준, 구인영, 신영준, 조은성, 신동혁. (2022). 산업용 가스터빈 연소기에서 연소 모델에 따른 수소 화염의 역화 특성 비교연구. 한국연소학회지, 27(4), 40-49.

추예찬. (2023). 글로벌 수소 시장 선점을 위한 원전 수소 등 생산방식 다양화 및 수소 가격 경쟁력 확보 방안 모색. 산업통상자원부.

■ [국외자료]

Kaur, S., Kumar, R., Singh, K., Singh, S. (2025). Systematic review of hydrogen, biomass, biogas, and solar photovoltaics in hybrid renewable energy systems: Advancements, challenges, and future directions. International Journal of Hydrogen Energy, 137, 160-189.

- Abudeif, A. M., Moneim, A. A., Farrag, A. F. (2015). Multicriteria decision analysis based on analytic hierarchy process in GIS environment for siting nuclear power plant in Egypt. *Annals of Nuclear Energy*, 75, 682-692.
- Al Garni, H. Z., Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy*, 206, 1225-1240.
- Asadi, M., Ramezanzade, M., Pourhossein, K. (2023). A global evaluation model applied to wind power plant site selection. *Applied Energy*, 336, 120840.
- Ayough, A., Boshruai, S., Khorshidvand, B. (2022). A new interactive method based on multi-criteria preference degree functions for solar power plant site selection. *Renewable Energy*, 195, 1165-1173.
- Baskurt, Z. M., Aydin, C. C. (2018). Nuclear power plant site selection by Weighted Linear Combination in GIS environment, Edirne, Turkey. *Progress in Nuclear Energy*, 104, 85-101.
- City of Amsterdam. (2020). *New Amsterdam Climate: Amsterdam Climate Neutral Roadmap 2050*. Amsterdam: City of Amsterdam. 63, 124-125, 145-146, 179.
- City of Copenhagen. (2020). *CPH 2025 Climate Plan Roadmap 2021-2025*. 9-10, 27-32, 35
- Damoom, M. M., Hashim, S., Aljohani, M. S., Saleh, M. A., Xoubi, N. (2019). Potential areas for nuclear power plants siting in Saudi Arabia: GIS-based multi-criteria decision making analysis. *Progress in Nuclear Energy*, 110, 110-120.
- Kassim, M., Heo, G., Kessel, D. S. (2016). A systematic methodology approach for selecting preferable and alternative sites for the first NPP project in Yemen. *Progress in Nuclear Energy*, 91, 325-338.
- Noorollahi, Y., Senani, A. G., Fadaei, A., Simaee, M., Moltames, R. (2022). A framework for GIS-based site selection and technical potential evaluation of PV solar farm using Fuzzy-Boolean logic and AHP multi-criteria decision-making approach. *Renewable Energy*, 186, 89-104.
- Rediske, G., Burin, H. P., Rigo, P. D., Rosa, C. B., Michels, L., Siluk, J. C. M. (2021). Wind power plant site selection: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111293.
- Sahin, G., Koç, A., van Sark, W. (2024). Multi-criteria decision making for solar power-wind power plant site selection using a GIS-intuitionistic fuzzy-based approach with an application in the Netherlands. *Energy Strategy Reviews*, 51, 101307.
- Şahin, G., Koç, A., Şenyiğit Doğan, S., Rustemli, S., van Sark, W. G. (2025). Exploring of wind energy potential and optimal site selection for wind energy plants installations in Erzurum/Turkey based on multicriteria site selection. *International Journal of Energy Research*, 2025(1), 2629977.
- Sakib, K. N., Aktar, S., Mim, A. S., Islam, T., Muktedir, M. G., Tasnim, M. M., Ali, M. I. (2025). Siting of potential areas for the construction of nuclear power plant using geographic information system and analytical hierarchy process: A case study on South Central and Southeastern parts of Bangladesh. *Nuclear Technology*, 1-21.
- Shao, M., Han, Z., Sun, J., Xiao, C., Zhang, S., Zhao, Y. (2020). A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection. *Renewable Energy*, 157, 377-403.
- Shahi, E., Alavipoor, F. S., Karimi, S. (2018). The development of nuclear power plants by

means of modified model of fuzzy DEMATEL and GIS in Bushehr, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 83, 33-49.

Shen, J., Wang, R., Zhang, S., Wang, J., Wang, C., Cai, W. (2025). A high spatial resolution suitability layers to support feasible power plant site selection in China. *Scientific Data*, 12(1), 608.

Yilmaz, İ., Kocer, A., Aksoy, E. (2024). Site selection for solar power plants using GIS and fuzzy analytic hierarchy process: Case study of the western Mediterranean region of Türkiye. *Renewable Energy*, 237, 121799.

Zambrano-Asanza, S., Quiros-Tortos, J., Franco, J. F. (2021). Optimal site selection for photovoltaic power plants using a GIS-based multi-criteria decision making and spatial overlay with electric load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110853.

■ [법령 및 인터넷 자료]

「건축법」 제11조(건축허가)

「고압가스 안전관리법」 제4조 (고압가스의 제조허가 등), 제11조(안전관리규정)

「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 제8조(공유수면의 점용·사용허가)

「광업법」 제38조(광업권의 등록)

「국가유산기본법」 제3조(정의)

「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제33조(해양시설의 신고 및 변경신고), 제43조(도시·군계획시설의 설치·관리), 제56조(개발행위의 허가), 제58조(개발행위허가의 기준)

「농어촌정비법」 제54조(생활환경정비계획의 수립), 제55조(생활환경정비계획의 내용)

「농지법」 제34조(농지의 전용허가·협의)

「대기환경보전법」 제16조(배출허용기준), 「대기환경보전법」 제23조 (배출시설의 설치 허가 및 신고)

「댐건설·관리 및 주변지역지원 등에 관한 법률」 제4조(댐관리기본계획)

「도로법」 제61조(도로의 점용 허가), 제62조(도로점용에 따른 안전관리 등)

「도로법 시행령」 제 54조(도로의 점용 허가 신청 등)

「도시가스사업법」 제11조(시설공사계획의 승인 등), 제26조(안전관리규정)

「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」 제2조(정의), 제15조(도시공원의 세분 및 규모)

「문화유산 보존 및 활용에 관한 법률」 제2조(정의), 제27조(보호물 또는 보고구역 지정)

「문화유산 보존 및 활용에 관한 법률」 시행령 제13조(보호물 또는 보고구역 지정)

「물류정책기본법」 제29조(위험물질운송안전관리센터의 설치·운영)

「물환경보전법」 제12조(공공시설의 설치·관리 등), 제32조(배출허용기준), 제33조(배출시설의 설치 허가 및 신고), 제48조(공공폐수처리시설의 설치), 제33조(배출시설의 설치 허가 및 신고), 제 48조(공공폐수처리시설의 설치)

「산업안전보건법」 제38조(안전조치)

「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률」 제8조(공장입지기준의 고시내용 등), 제13조(공장설립등의 승인), 제14조(공장의 건축허가)

「산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률 시행령」 제12조(공장입지기준의 고시내용 등), 제19조(공

장설립등의 승인절차),

「산지관리법」 제14조(산지전용허가)

「석유 및 석유대체연료 사업법」 제10조(석유판매업의 등록 등), 제15조(석유비축계획)

「수도법」 제7조의2(상수원보호구역 외의 지역에서의 공장설립의 제한), 제17조(일반수도사업의 인가)

「수도법 시행령」 제14조의2(공장설립이 제한되는 지역의 범위)

「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 제19조(수소연료공급시설 설치 등), 제41조(안전관리 규정), 제49조(허가 및 등록의 취소 등)

「어선법」 제2조(정의)

「원자력안전법」 제10조(건설허가), 제26조(기록과 비치), 제74조(사고의 조치 등), 제98조(보고·검사 등)

「원자력안전법 시행령」 제8조(방사선발생장치), 제9조(관계시설)

「원자력안전법 시행규칙」 제4조(건설허가의 신청), 제18조(방사능재난대응시설·방지의 기준), 제87조(방사성폐기물관리시설등의 건설·운영허가의 신청 등)

「원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙」 제17조(원자로의 설계),

「위험물안전관리법」 제6조(위험물시설의 설치 및 변경 등)

「전기사업법」 제7조(전기사업의 허가), 제61조(전기사업용 전기설비의 공사계획의 인가 또는 신고) 제67조(기술기준)

「전기통신사업법」 제22조(부가통신사업의 신고 등), 제28조(이용약관의 신고 등)

「전파법」 제19조(허가를 통한 무선국 개설 등)

「지하수법」 제7조(지하수개발·이용의 허가)

「집단에너지사업법」 제9조(사업의 허가)

「철도사업법」 제2조(정의)

「폐기물관리법」 제18조(사업장폐기물의 처리)

「하수도법」 제27조(배수설비의 설치 등)

「하천법」 제33조(하천의 점용허가 등), 제50조(하천수의 사용허가 등)

「항만법」 제10조(항만개발사업실시계획의 수립과 승인 등), 제41조(항만시설의 사용)

「해상풍력 보급 촉진 및 산업 육성에 관한 특별법」 제2조(정의) 제9호

「환경영향평가법」 제22조(환경영향평가의 대상)

산업통상자원부. (2025). 제11차 전력수급기본계획(2024~2038). p.5

구글맵. <https://maps.app.goo.gl/gYgVcbiTwMm9fqoQA> (접근일 : 2025.06.16.)

구글어스. <https://www.google.com/intl/ko/earth/index.html> (접근일 : 2025.11.28.)

동서발전 홈페이지. <https://www.ewp.co.kr/kor/subpage/content.html?pc=D8QGHQ7JVSMSTUDJS1NAWO2HHV0B2Y>. 접근일: 2025.6.17.

세종연구소. (2022, April 29). 정세와 정책 2022-5월호 제26호: 윤석열 정부의 에너지 정책 과제, 세종연구소. https://sejong.org/web/board/1/egofiledn.php?bd_seq=6494&conf_seq=2&file_seq=18190(검색일 : 25.6.13)

온실가스종합정보시스템. www.gir.go.kr. 검색일 : 2025.06.16.

전력통계정보시스템. <https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectMain.do?locale=> (접근일: 2025.06.17.)

- 중부발전 홈페이지. <https://www.komipo.co.kr/kor/content/35/main.do?mnCd=FN021108> (접근일: 2025.6.17.)
- 한국에너지공단 신·재생에너지센터. <https://www.knrec.or.kr/biz/main/main.do>. (접근일 : 2025.06.17.)
- Canadian Nuclear Safety Commission(CNSC). (2025). REGDOC-1.1.1: Site Evaluation and Site Preparation for New Reactor Facilities, Version 1.3.
<https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/acts-and-regulations/regulatory-documents/published/html/regdoc1-1-1-v1-3/> (검색일 : 2025.12.01.)
- City Of Wes. (2022).
<https://www.nyc.gov/assets/planning/downloads/pdf/our-work/plans/citywide/city-of-yes-carbon-neutrality/carbon-neutrality-hero-series.pdf> (검색일: 2025.6.18.)
- City of Yes for Climate Neutrality Text Amendment. Project Description. (n.d).
<https://www.nyc.gov/assets/planning/download/pdf/plans-studies/city-of-yes/carbon-neutrality/carbon-neutrality-project-description.pdf>. (검색일 : 2025.5.13.)
- European Commision. (n.d.). Electricity generation from fossil gaseous fuels.
<https://ec.europa.eu/sustainable-finance-taxonomy/activities/activity/315/view>
(검색일 : 2025.06.11.)
- Gemeinde Wildpoldsried. Film zum Windstutzpunkt. (2022)
<https://www.youtube.com/watch?v=MRLIWRtS99s> (검색일: 2025.5.13.)
- IAEA. (2019). Site evaluation for nuclear installations: Specific safety requirements No. SSR-1. www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1837_web.pdf (검색일 : 2025.12.1.)
- IAEA. (2025). Small Modular Reactor up to 300 MW(e).
<https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors> (검색일 : 2025.12.1.)
- IEA. (2021). Net Zero by 2050 : A Roadmap for the global Energy Sector.
<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (검색일 : 2025.06.11.)
- IEA. (2024). OECE share of electricity generation by source.
https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/oecd-share-of-electricity-generation-by-source?utm_source=chatgpt.com (검색일:2025.06.11.)
- Pebbles Projekt. (n.d.). <https://pebbles-projekt.de/projekt/> (검색일 : 2025.5.13.)
- Seebrighof. (n.d.). <https://seebrighof.ch/vision/>(검색일: 2025.6.19.)
- State of Green. Amagerværket BIO4.(2015).
<https://stateofgreen.com/en/solutions/amagervaerket-bio4> (검색일: 2025.6.19.)
- The White House Washington. (2021). Federal Sustainability Plan.
<https://www.sustainability.gov/archive/biden46/federalsustainabilityplan/index.html>
(검색일 : 205.06.11.)
- UNFCCC. (2021). 24/7 Carbon-Free Energy Compact. UN Climate Change.
https://climateaction.unfccc.int/Initiatives?id=24-7_Carbon-Free_Energy (검색일 : 25.6.13)
- U.S. Nuclear Regulatory Commission(NRC). (2025). 10 CFR Part 100: Reactor site criteria.
<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part100/index> (검색일 : 2025.12.01.)
- U.S. Nuclear Regulatory Commission(NRC). (2023). NUREG-0800 SMR Review Plan - Section 2.4. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr0800/index>.

(검색일 : 2025.12.01.)

U.S. Nuclear Regulatory Commission(NRC). (2020). SECY-20-0045. p. 12.
<https://www.nrc.gov/docs/ML1926/ML19262H055.html> (검색일 : 2025.12.01.)

U.S. NRC. (2018). Regulatory Guide 1.206.(Rev.1)
<https://www.nrc.gov/docs/ML1813/ML18131A181.pdf> (검색일 : 2025.12.01.)

Weather Spark: The Typical Weather Anywhere on Earth (2025). <https://weatherspark.com>
(검색일 : 2025.6.19.)

Wildpoldsried Energie- und Heimatdorf. (n.d.). <https://www.wildpoldsried.de/> (검색일:
2025.5.13.)

■ [단행본 및 기타자료]

국정기획위원회. (2025). 이재명정부 국정운영 5개년 계획(안)

김정곤, 최정은. (2023). 도시수업 탄소중립도시: 도시는 왜 탄소중립을 이루어야 하는가. 베타랩도시
환경연구소.

윤은주, 서민호, 안예현, 박종화, 조용혁, 홍나은, 강혜원, 황우현, 김인환, 이재현, 김유민, 이주영.
(2024). 한국형 탄소중립도시 실현방안 연구(2): 감축수단 간 통합적 공간계획 방안 중심으로.
국토연구원

윤은주, 이현주, 안승만, 안예현, 이치주, 박종화, 강혜원. (2023). 한국형 탄소중립도시 실현방안
연구(1): 개념정립과 공간계획 방안 중심으로. 국토연구원

전력거래소. 2024. 2023년도 발전설비 현황. p38-39.

충청남도. (2023). 충청남도 탄소중립경제 특별도 추진전략

충청남도. (2021). 노후석탄화력발전소의 단계적 폐쇄와 친환경에너지(발전소) 전환 타당성 연구(2차
년도): 충청남도 정의로운 전환 전략과 과제. p. 57, 321-322

A Study on the Application of Carbon-Free Energy Sources for Realizing Carbon-Neutral Cities

Lee, Eunseok Park, Jonghoon Ji, Seokhwan

Introduction

This study was conducted to examine the feasibility of introducing carbon-neutral energy sources in existing urban areas by establishing site suitability criteria for each energy source, applying them to urban spaces on a pilot basis, and presenting the planning implications of the derived results. The research established a comprehensive analysis framework integrating technical, spatial, institutional, and social factors, providing meaningful practical evidence for the transition of existing cities toward carbon neutrality. The key findings of this study are summarized as follows.

The accelerating push for carbon-neutral cities necessitates the introduction of carbon-free energy sources (solar, wind, etc.). However, there is a current lack of spatial site suitability reviews for energy facilities utilizing existing urban infrastructure and facilities. Specifically, discussions on converting coal-fired power plant sites to carbon-free energy are limited to national/regional policy levels, lacking practical, spatial-centric reviews concerning local energy supply impacts. Therefore, the primary objective of this study is to propose comprehensive spatial suitability review criteria for the transition to carbon-neutral energy essential for realizing carbon-neutral cities, and to demonstrate the feasibility of applying these criteria to case study cities.

The scope of the study focused on Solar PV, Wind, Hydrogen, and Small Modular Reactors (SMRs). The research involved establishing regional-level site criteria by integrating locational characteristics and evaluation metrics derived from domestic and international literature. For the pilot application, Boryeong-si and Dangjin-si in Chungcheongnam-do, cities facing mandatory large-scale fossil fuel transition, were

selected as the spatial scope for a suitability assessment. The final deliverable includes spatial planning methodologies and integrated transition tasks for applying the site analysis results to existing cities.

Key Research Findings

The study established a clear framework of site criteria for major carbon-free energy sources. This provided a practical, quantitative basis for judging the spatial acceptance of each energy source in existing urban spaces.

Solar PV. Criteria were established considering environmental, topographical, and regulatory conditions (insolation, slope, shading, land use regulations). The analysis confirmed that Solar PV is the most widely applicable and fastest deployable energy source in existing urban areas, with broad distribution of Class 1-2 suitability zones, particularly utilizing building envelopes (BIPV), parking lot canopies, and public unused land.

Wind Power. Due to numerous limiting factors (wind speed, elevation, noise, landscape impact, protected zones), the criteria highlighted that Wind Power has extremely low applicability within urban areas. Most regions were classified as Class 3 or unsuitable, making it practically infeasible for city-centric deployment.

Hydrogen and Fuel Cells. Criteria focused on access to storage/supply infrastructure, safety buffer zones, and compatibility with surrounding facilities. Fuel cells emerged as a viable distributed power source, showing suitability (Class 2-3) primarily near industrial complexes, R&D campuses, and public facilities, contributing practically to urban electrification and thermal management.

SMRs. Criteria integrated complex requirements, including access to cooling water, grid connection, safety radius, and compatibility with surrounding land use. The analysis clearly identified industrial sites, port areas, and especially existing coal-fired power plant sites (Boryeong/Dangjin Thermal Power) as having high suitability (Class 1-2), positioning SMRs as a feasible replacement for base-load power where infrastructure is pre-existing.

Policy Implications and Recommendations

The site analysis demonstrated that carbon-free energy sources possess entirely different levels of spatial acceptance within the structure of existing cities. The overarching finding is that the transition requires differentiating strategies based on

locational criteria and linking these findings directly to urban planning mechanisms.

The most significant policy recommendations to overcome institutional and implementation limits are:

Establish a Carbon-Free Energy-Centric Urban Planning System: Mandate the inclusion of the "Energy Transition Sector" within the City/County Master Plan under the National Land Planning Act. Furthermore, establish a 'City-Type Carbon-Free Energy Planning Zone' to institutionalize the strategic placement of distributed sources like solar and storage (ESS) on public infrastructure (roads, harbors).

Reinforce Just Transition and Local Economy Linkage: For cities phasing out coal power, utilize retired power plant sites as 'Carbon-Free Industry Transition Hubs' for SMRs, hydrogen, and renewables. Implement Just Transition Funds and job retraining programs to mitigate economic and employment gaps, linking the energy transition to regional economic revitalization.

Strengthen Local Government-Led Implementation: Replace short-term, central government-led competitive funding models with the establishment of a long-term (5+ years) statutory support system for carbon-neutral cities, ensuring policy continuity. Additionally, build an Integrated Management Platform (One-Map System) that links site suitability data with urban planning, permitting, and public consultation processes.

Adopt Regional Custom-Fit Energy Mix Strategies: Avoid a uniform national approach. Instead, tailor the energy portfolio to regional conditions (e.g., Solar PV + Hydrogen Complex in Dangjin, Marine/Mountain-based Composite Mix in Boryeong), which will be essential for enhancing the competitiveness of carbon-neutral cities.

In conclusion, this research validates that the effective transition of existing cities to carbon-free energy must be predicated on clearly defined spatial acceptance criteria and realized through integration with formal urban planning and management tools.

Keywords :

Carbon-Free Energy (CFE), Carbon-Neutral City, Energy Infrastructure Siting, Energy Transition, Thermal Power Plant Decommissioning

