

Research Paper

탄소중립 이행을 위한 수소연료로의 전환과 환경영향평가

– I. 수소 혼소 및 전소 발전 –

최현진 · 김태윤

한국환경연구원, 환경평가본부

Environmental Impact Assessment of the Transition to Hydrogen Fuel for Carbon Neutrality

– I. Hydrogen Co-firing and Hydrogen-Fired Power Generation –

HyunJin Choi · TaeYun Kim

Korea Environment Institute, Environmental Assessment Group

요약: 탄소중립 달성을 위한 에너지 전환 과정에서 수소 혼소 및 전소 발전은 기존 LNG 기반 발전시설을 활용한 온실가스 감축 수단으로 주목받고 있다. 그러나 수소연료의 도입은 연소 특성과 배출 물질의 변화를 수반함에 따라, LNG-석탄과 같은 전통적 화석연료를 대상으로 한 기존 환경영향평가 체계만으로는 환경적·사회적 영향을 충분히 반영하는 것에 한계가 존재한다. 이에 본 연구는 수소 혼소 및 전소 발전의 도입 확대를 고려하여 환경영향평가 관점에서 주요 평가 항목과 개선 방향을 종합적으로 검토하고 체계화하는 것을 목적으로 수행되었다. 특히 대기환경과 온실가스 배출 특성 변화, 사회적 수용성 확보 및 안전관리 체계 구축 방안을 중점적으로 살펴보았다. 수소 혼소 및 전소는 이산화탄소 배출 저감 효과가 클 것으로 기대되지만, 연소온도 상승에 따른 질소산화물 배출 증가 가능성과 특정 연소조건에서의 아산화질소와 같은 신규 배출 물질의 관리 필요성이 제기된다. 이에 따라 연소조건 최적화, 배출 특성의 정밀한 평가 및 기존 대기오염방지시설 체계에 대한 충분한 적정성 검토 등이 중요한 것으로 판단된다. 사회적 수용성 확보를 위해서는 발전시설의 환경영향, 안전관리 방안을 주민들에게 투명하게 공개하는 것이 바람직하다. 아울러, 안전관리 체계 구축 차원에서 수소 사용에 따른 추가적 안전 리스크 관리가 요구되므로 기존 시설의 안전 시스템을 보완하고, 새로운 감시 및 관리 시스템 구축을 통해 사고 발생 가능성을 최소화해야 한다. 본 연구는 수소 혼소 및 전소 발전을 대상으로 한 환경영향평가의 기술적·제도적 개선 방향을 제시함으로써, 지속가능한 연료전환과 탄소중립 이행을 지원하는 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 탄소중립, 온실가스 감축, 수소연료, 수소 혼소-전소, 환경영향평가

Abstract: Hydrogen co-firing and hydrogen-fired power generation are considered key options for reducing greenhouse gas emissions from existing LNG-based power plants in the transition toward

carbon neutrality. However, the use of hydrogen changes combustion characteristics and emission profiles, revealing limitations in current environmental impact assessment (EIA) frameworks developed for conventional fossil fuels. This study reviews and organizes key EIA considerations for the extension of hydrogen co-firing and hydrogen-fired power generation, focusing on air quality and greenhouse gas emissions, social acceptance, and safety management systems. While hydrogen utilization is expected to significantly reduce carbon dioxide emissions, potential increases in nitrogen oxides due to elevated combustion temperatures and the need to manage emerging emission species such as nitrous oxide under specific combustion conditions are identified as critical issues. Accordingly, the study emphasizes the importance of optimizing combustion conditions, conducting detailed emission assessments, and reviewing the adequacy of existing air pollution control systems. In addition, transparent disclosure of environmental impacts and strengthened safety management are highlighted as essential for improving social acceptance. The findings provide directions for improving EIA frameworks to support sustainable fuel transition and carbon neutrality goals.

Keywords: Carbon Neutrality, Greenhouse gas mitigation, Hydrogen fuel, Hydrogen co-firing and hydrogen-fired power generation, Environmental impact assessment

I. 서론

국제에너지기구(IEA)는 2050년까지 수소와 암모니아의 수요가 전 세계 최종 에너지 수요의 약 19%를 차지할 것으로 전망하고 있으며, 이는 해당 에너지원이 미래 에너지 시스템에서 핵심적인 역할을 수행할 것임을 시사한다(Song et al., 2024). 특히 기후변화 대응과 탄소중립 달성을 위한 전 세계적인 에너지 전환 흐름 속에서, 기존 전력공급의 핵심 역할을 담당해 온 석탄과 LNG 기반 화력발전은 온실가스 다배출로 인해 점진적인 축소 및 퇴출이 가시화되고 있다(Kim and Lee, 2021). 이에 따라 각국은 재생에너지 확대와 더불어 수소 기반 발전 기술을 주요 감축 수단으로 채택하며, 전력 계통 안정성과 공급 신뢰도를 동시에 확보할 수 있는 에너지 전환을 모색하고 있다. 국내에서도 이와 관련하여 '2050 탄소중립 시나리오'를 통해 발전 부문의 근본적인 구조 전환을 추진하고 있다. 해당 시나리오는 석탄 및 LNG 발전 비중을 최소화하고 태양광·풍력 등 재생에너지와 원자력, 수소 기반 발전을 중심으로 전력 공급 구조를 재편하여, 2050년 발전 부문 온실가스 배출량을 0~20.7백만 톤 수준으로 감축하는 것을 목표로 한다(Carbon Neutrality and Green Growth Commission, 2021). 특히 수소 기반 발전은 재생에너지의 변동성 보완, 계통 유연성 확보, 장기 에너지 저장 수단으로 기대되

고 있다.

아울러, 2021년 공고된 '제1차 수소경제 이행 기본계획'은 재생에너지 기반 수소 생산 확대와 함께 수소 발전의 단계적 도입을 주요 추진 과제로 설정하고 있다. 동 계획에서는 기존 LNG 가스터빈 발전시설을 대상으로 혼소 비율을 점진적으로 확대하고, 중·대형급 전소 기술의 실증 및 상용화를 통해 2050년까지 수소 기반 발전 체계를 구축하는 것을 목표로 하고 있다. 구체적으로는 2030년 소형 상용화 및 중·대형 혼소 실증, 2040년 중·대형 혼소 상용화 및 대형 전소 실증, 2050년 대형 전소 상용화를 단계적으로 추진하는 로드맵을 제시하고 있으며, 이를 분산형 전원, 열병합, 산업용 전원 등 다양한 분야에 적용될 계획이다(Government of the Republic of Korea, 2021).

이와 같이 발전 부문의 온실가스 감축과 전력 계통 안정성 확보를 동시에 달성하기 위한 정책적 수단으로 수소 혼소 및 전소 발전의 도입이 가속화될 것으로 전망되나, 실제 사업 적용 시 온실가스 감축 효과와 기술적·환경적 한계, 특히 기존 화력발전 대비 환경영향 변화에 대한 종합적 검토는 아직 충분히 이루어지지 못한 실정이다. 세부적으로는 수소 혼소 및 전소 시 연소 특성 변화에 따른 질소산화물(NOx), 아산화질소(N₂O) 등 대기오염물질의 배출 특성 변화와 기존 대기오염방지시설의 적용 적정성, 보완 필요성 등에 대한 체계적

인 평가가 요구된다고 할 수 있다. 기존 국내·외 연구는 수소 혼소 및 전소 발전의 연소 안정성, 발전효율, 터빈 설계, 질소산화물 저감 기술 등에 주로 초점을 맞추어 왔다. 그러나, 실제 사업 단계에서 적용되는 환경영향평가 제도와의 연계성, 평가 항목 설정, 배출 특성의 정량적 반영 방법 등에 대한 연구는 매우 제한적인 상황으로 볼 수 있다. 또한 현행 환경영향평가 체계는 기존 화석연료 기반 발전시설을 중심으로 구축되어 있어, 수소 연소 특성에 따른 배출 특성 변화와 온실가스 감축 효과를 충분히 고려하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다.

이에 본 연구는 수소 혼소 및 전소 발전의 도입 확대를 고려하여 기존 화석연료 중심으로 시행되어 오던 환경영향평가 방식에서 연료전환 특성을 반영한 평가 적용 방향을 제시하는 것을 목적으로 수행되었다. 이를 위해 국내외 정책자료, 기술 문헌 및 선행 연구를 수집한 후 환경영향평가 항목 체계에 따라 대기질, 온실가스, 사회환경 분야로 구분하여 검토하였다. 이후 각 문헌에서 제시된 영향 특성과 관리 요소를 비교·정리하고, 연료전환 상황에서 환경영향평가 수행 시 고려되어야 할 사항을 도출하였다. 본 연구 결과는 향후 관련 시설의 환경영향평가에서 평가 항목과 검토 범위를 명확히 하는 기초 자료로 활용될 수 있으며, 수소 에너지 도입 확대 과정에서 발생할 수 있는 평가상의 불확실성을 줄이는 데 참고 자료로 활용될 것으로 기대된다.

II. 발전 연료로서의 수소

수소는 화석연료를 대체할 가스터빈의 연료로 주목받고 있으며, 전소할 경우 이산화탄소의 배출 없이 증기 형태의 물과 일부 부산물만 발생시키는 장점이 있다. 아울러 기존 화석연료의 2배 이상의 발열량(120MJ/kg)을 가지며 석유 대비 연소열이 크다. 그러나 연소 시 화염 속도가 빠르고, 가연 범위가 넓으며, 점화 에너지가 낮은 특성이 있어 이를 고려한 연소 안정성 확보 및 화염 동역학 개선이 필요하다(Lee et al., 2024). Figure 1은 수소 혼소율에 따른 화염 특성을 비교한 결과로 화염의 위치를 나타내는 지시자(indicator) OH-의 분포와 온도 분포를 나타낸다. 수소 혼소 비율이 높을수록 연소

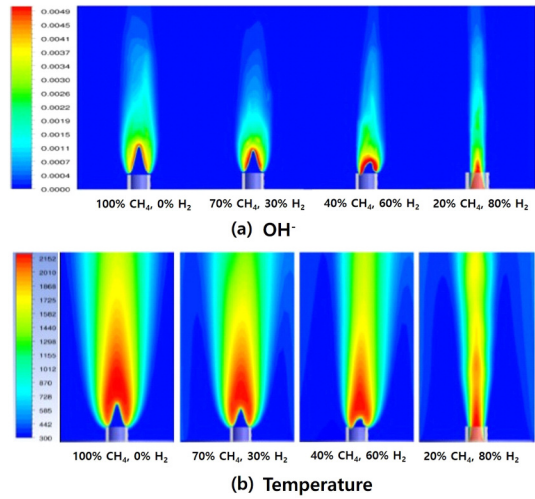


Figure 1. Flame Characteristics with Hydrogen Co-firing Ratios (Joo et al., 2020)

영역이 노즐 방향과 근접하며, 80% 혼소 시 화염이 노즐 안쪽에서 형성됨을 볼 수 있다(Joo et al., 2020).

수소의 경우 밀도가 매우 낮으므로 수소 혼소 시 LNG 단독 연소와 비교하여 부피 유량은 증가하고 질량 유량은 감소하게 된다. 이에 따라 연료공급 계통의 배관 직경 및 저장·공급 설비 용량 증대가 불가피하며, 이는 전체 설비 시스템 설계 및 경제성 측면에서 불리한 요소로 작용한다. 아울러 수소취성으로 인해 금속 재료의 반응기나 열교환기, 배관 내부 수명을 단축할 수 있으며, 저장 및 운반도 어려운 단점이 있다(Lee et al., 2024). 또한 기존 LNG 연소 설비를 대상으로 수소를 혼소할 경우 연료-산화제 혼합기의 노즐 출구 유속이 변하게 된다. 이러한 유속 변화는 연소기의 유동 및 연소 안정성에 영향을 미치며, 특히 화염 역류(backfire), 화염 탈락(blow-off), 국부 고온 영역(hot spot) 형성 등의 연소 불안정성을 유발할 수 있으므로, 노즐 및 연소기 설계 시 이를 면밀하게 고려하는 것이 중요하다. 또한, 기존 가스터빈의 연료로 수소-LNG를 혼입하는 경우 배관, 열교환기, SCR(Selective Catalytic Reduction)과 같은 후단 설비에 대한 영향을 최소화하기 위해서 연소기로 유입되는 총 입열량(발열량×유량)은 LNG 단독 연소 시와 동일하게 유지하는 것이 필요하다(Joo et al., 2020).

수소 혼소에 따른 기대 효과로는 우선 온실가스 배

Table 1. CO₂ reduction rate with Hydrogen Co-firing Ratios

H ₂ Co-firing ratio	15%	30%	50%	75%	100%
CO ₂ reduction rate	5%	11%	23%	48%	100%

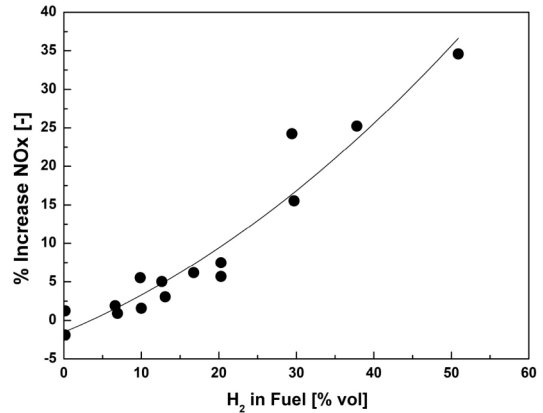
Kim & Lee, 2021

출의 저감을 들 수 있다(Joo et al., 2020; Kim and Lee, 2021; Kim et al., 2024). 현재 가스터빈 내 수소를 혼소하여 발전할 경우 LNG 단독 연소 대비 이산화탄소 저감율은 혼소율 50%에서 23% 수준으로 보고된 바 있다(Table 1). 다음으로 재생에너지의 출력 변동성을 보완하는 역할을 기대할 수 있다. 현재 가스터빈은 석탄, 원자력에 비해 빠른 가동시간 및 운전속도로 첨두부하를 담당하고 있다. 향후 재생에너지의 지속적 확대에 따른 가장 큰 불만 요소는 출력 변동성과 계통 불안정성의 심화로 볼 수 있으며, 이에 가스터빈의 유연운전능력을 더욱 확보할 필요가 있다. 수소 혼소는 가스터빈의 유연성을 더욱 강화할 수 있으며, 동일 연소 성능 하에 혼소율이 높을수록 높은 출력을 달성함과 동시에 상대적으로 낮은 부하에서 운전이 가능하다(Joo et al., 2020). 단, 전술하였듯 수소를 발전 연료로 사용하기 위해서는 화염 역화와 폭발 안전성 등과 같은 문제 해결이 선행되어야 하며, 화염 속도 역시 메탄이 주성분인 LNG와 비교하여 약 10배 높으므로, 노즐로 연료가 역화할 위험성을 보완해야 한다. 또한 수소의 희박 폭발 한계가 매우 낮은 것도 면밀하게 고려되어야 할 과제이다(Lee et al., 2024).

III. 수소 혼소 및 전소 발전의 환경영향과 평가

1. 대기환경 및 온실가스

기존 LNG 발전에 수소를 혼소 또는 전소할 경우 대기오염물질 배출의 관점에서 메탄과는 다른 특성이 나타난다. 수소 활용의 가장 큰 특징은 연소 시 이산화탄소가 거의 배출되지 않는 점이지만, 동시에 연소 안정성 및 화염구조 변화로 국부 고온 영역이 확대되면 Thermal NO_x가 증가할 수 있다는 것이다. 비록 수소 자체에는 질소 성분이 없으므로 Fuel NO_x 발생은 없다고 볼 수 있으나, 높은 연소온도로 인해 공기 중 질소가

Figure 2. NO_x emission rate with Hydrogen Co-firing ratios (Goldmeer and Catillaz, 2022)

고온에서 더욱 쉽게 산화하여 배출되기 때문이다(Kim et al., 2022; Kim et al., 2024). Figure 2는 연료 내 수소 비율에 따른 가스터빈의 질소산화물 배출 증가율을 나타낸다. 수소 비율이 낮으면 질소산화물 배출 증가는 미미하나, 부피 기준 혼소율 50vol%일 경우 질소산화물 배출이 최대 35%까지 증가할 수 있는 가능성이 제시되었다(Goldmeer and Catillaz, 2022). 공업로를 활용하여 메탄 전소 기반 수소 혼소율 증가에 따른 질소산화물 배출 특성을 고찰한 국내 연소시험 결과에서도 메탄 전소 조건(100% CH₄)에서 질소산화물이 약 66.9 ppm(@10% O₂)이 배출되며, 50% 혼소 시에는 67.2 ppm(@10% O₂)으로 메탄 전소와 거의 유사한 배출 특성을 나타내었다. 그러나 수소 전소(100% H₂) 조건에서는 98 ppm(10% O₂)으로 질소산화물의 배출이 크게 증가하는 것을 확인하였다(Lim et al., 2024). 이러한 결과들은 수소 혼소율이 증가함에 따라 연소 특성이 변화하고 화염온도 및 질소 반응 경로가 달라지면서, 특정 연소 조건에서는 질소산화물 배출이 증가할 가능성이 있음을 시사한다. 이는 수소 혼소율 증가가 질소산화물 배출 증가의 요인으로 작용할 수 있음을 의미한다.

단 위의 결과는 연소로 후단 배기가스의 처리 전 배

출량을 가리키며, 신규 건설되는 수소 혼소 발전시설은 충분한 용량 및 고효율의 SCR 설비 설치, 신형 저녹스 버너 적용 등을 통해 추가되는 질소산화물 배출을 억제할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 가연 범위가 4~75%로 타 연료 대비 상대적으로 넓은 수소의 특성을 고려하여, 희박 조건에서 연소가 이루어지도록 하면 화염온도가 낮아짐에 따라 질소산화물 배출을 효과적으로 줄일 수 있음이 제시된 바 있다(An et al., 2022; Kim et al., 2022; Lim et al., 2024). Lim et al.(2024)의 연구에서는 수소 전소 시 공기비 1.2까지는 질소산화물 배출이 큰 폭으로 증가하다 이후 질소산화물 배출이 감소함을 확인하였다(Figure 3). 이에 대해 우선 공기비 1.2까지는 빠른 공기유동으로 역화가 완화되어 반응성이 향상되고, 충분한 공기로 인해 질소산화물 배출이 증가하는 것으로 판단하였으며, 이후 조건에서는 과잉 공기로 인한 냉각 효과로 질소산화물 생성이 억제된 것으로 기술하였다. 그러나 과도한 희박 연소의 경우 연소로의 냉각에 따른 열 손실을 초래할 수 있으므로, 열 손실과 조업 조건을 고려하여 적절한 희박 연소조건을 선정하는 것이 필요함을 함께 제안하였다(Lim et al., 2024). 즉, 기존 발전시설을 수소 혼소로 전환할 경우 현재의 질소산화물 배출 수준, 기 설치된 SCR 설비의 성능 등을 다각도로 고려해야 한다. 또 다른 완화 방안으로는 발전소의 출력을 낮춰 기존 배출허용기준 내에서 운전을 유지하는 방법이 있을 수 있다(Goldmeier and Catillaz, 2022).

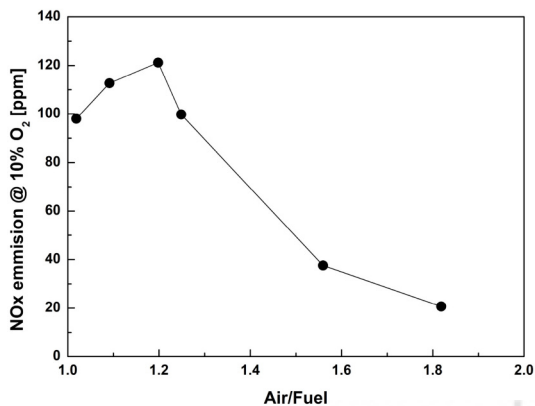


Figure 3. Effect of Excess Air Ratio on NOx Emissions during Hydrogen-Fired Combustion (Lim et al., 2024)

한편, 국외 선형 연구에서는 메탄-수소 혼소 시 발생하는 질소산화물 배출량을 기존 부피농도 방식으로 평가할 경우 실질적 질량 배출량에 비해 과도하게 높은 수치가 산출될 수 있음이 확인되었다(Douglas et al., 2022). 동 연구는 현재 발전시설에서 통용되는 배출가스 내 질소산화물 농도(ppmv) 기반 측정 방식은 연료의 조성변화에 따른 배출 특성을 충분히 반영하지 못하며, 이러한 문제로 인해 수소 혼합비가 높아질수록 배출량이 과도하게 평가될 수 있음을 지적하였다. 이는 수소 연소 후 생성되는 연소가스 내 수증기(H₂O)와 산소(O₂)의 비율이 순수 메탄 연소에 비해 높아지며, 이에 따라 동일 조건에 동일한 양의 질소산화물이 생성되더라도, 배출가스 내 부피농도로 측정된 값은 수소의 혼합비가 높을수록 인위적으로 증가하는 경향을 보였기 때문이다. 연구 결과에 따르면, 수소 50% 혼소 시 NO_x 배출은 실제보다 약 7% 높게 나타날 수 있으며, 80% 혼소에서는 약 17%, 순수 수소 전소 시에는 약 37% 까지 과대평가 될 수 있는 것으로 분석되었다. 반면, 천연가스와 디젤 등 일반적인 탄화수소 연료 간의 비교에서는 이러한 보정값이 2% 이내로 미미하여 실무상 무시될 수 있는 수준이었다. 연구에서는 이러한 과대평가 문제가 발전소의 대기오염물질 배출허용기준 준수 여부를 판단하는 과정뿐 아니라, 후단 처리 설비(SCR 등)의 설계 및 환경영향평가과정 전반에 걸쳐 불필요한 과잉 투자나 환경영향에 관한 오판을 초래할 수 있음을 제기하였다. 특히 수소 혼소율이 높은 신형 가스터빈 발전소의 경우, 실제 배출량은 법적 기준을 충분히 만족하더라도, ppmv 기준의 측정값이 왜곡되어 과도한 규제로 작용할 가능성이 존재함에 따라 이러한 측정 방식의 한계를 보완하기 위한 제도적·기술적 대응이 필요함을 제안하였다(Douglas et al., 2022).

수소 혼소 및 전소에서 고려해야 할 또 다른 배출 물질로는 아산화질소(N₂O)를 들 수 있다. 해당 물질은 이산화탄소의 약 300배에 달하는 온실효과 지수를 가짐에 따라(Park et al., 2021), 대기로 배출되면 수소 활용으로 기대되는 온실가스 감축 효과를 상쇄할 수 있다. 전술한 바와 같이 수소 자체는 연료 내 질소 성분을 포함하지 않으므로, 연소 과정에서 아산화질소가 직접적으로 많이 생성되지는 않지만, 질소산화물 억제를 위

한 희박 연소에 따른 온도 저하, SCR 등 후처리 과정에서 부수적으로 발생할 가능성이 존재한다. 특히 수소의 높은 화염온도는 일반적으로 아산화질소의 생성을 억제하나, 희박 연소에 따라 연소로 온도가 낮아지고 저온 반응 경로의 상대적 기여가 커지면 아산화질소의 생성 경로가 활성화될 수 있으므로 운전 시 유의해야 하며, 적절한 모니터링 역시 요구된다(Mashruk et al., 2022a; Mashruk et al., 2022b; Alnajideen et al., 2024).

전반적으로 수소 혼소 및 전소 발전은 기존 LNG 발전과 비교하여 일산화탄소와 미연탄화수소의 배출이 낮고, 미세먼지 역시 유사하거나 낮은 것으로 볼 수 있다. 이산화탄소의 배출 저감 역시 기대할 수 있으나, 질소산화물의 배출 제어는 매우 주요한 과제로 볼 수 있다. 이에 지속적인 연소 기술 보완, 후처리 강화 등을 통해 대기환경의 관점에서 현재의 기준을 충족하거나, 더욱 개선된 질소산화물 배출 특성을 확보하는 것이 중요하다. 정책적 측면에서 현재 부재한 수소연료 도입에 따른 적정 대기오염물질 배출허용기준을 신규 검토·도입하여야 하며, 이를 통해 연료전환에 따른 환경 편익은 최대화하되, 오염을 최소화하는 것이 필요하다.

전술한 결과를 토대로 수소 혼소 및 전소 시설에 대한 환경영향평가 단계에서 가장 중점적으로 고려해야 할 사항을 살펴보면, 우선 연료전환으로 인한 대기오염물질 배출 특성 변화로 볼 수 있으며, 특히 질소산화물이 가장 주요한 물질로 판단된다. 수소연료는 연소 온도의 상승으로 인해 Thermal NOx의 증가 가능성이 크므로, 혼소·전소 적용 후의 연소 특성 분석과 이를 반영한 배출량의 변화 산정이 필수적으로 요구된다. 배출량은 기존 LNG 연소 대비 수소 혼소 비율에 따라 단계적으로 산정하고, 이를 관련 시설의 실증 데이터 등과 비교·검토하여 확정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 또한 추가로 고려해야 할 물질은 아산화질소를 들 수 있다. 아산화질소는 기후변화 측면에서 매우 중요한 물질로 연소조건(산화성·환원성 분위기, 연소 온도 등)에 따라 배출 특성이 민감하게 반응하므로, 이를 고려하여 배출량을 평가할 필요가 있다.

기존 대기오염방지시설 체계에 대한 충분한 적정성 검토와 평가를 통해 운영 시 대기오염물질 배출을 최소화하는 것 역시 매우 중요하다. 전술하였듯 수소가

연료로 적용될 경우 질소산화물이 증가할 가능성이 크므로, 기존의 SCR 설비는 추가 발생하는 질소산화물을 처리하기에 충분한 설계 여유 용량을 확보하고 있는지 검토해야 한다. 또한 SCR 성능 확보를 위해 암모니아를 과도하게 투입할 경우 미반응 암모니아 슬립의 대기 배출이 증가할 수 있으므로 이를 유의해야 하며, SCR 설비 후단 암모니아 산화 촉매를 추가 설치하는 방안을 도입할 수 있다. 아산화질소의 경우에도 설비 최적화 등을 통해 생성 자체를 사전 예방하는 것이 중요하며, 불가피하게 배출될 경우 적정 촉매 설치를 고려하는 것이 바람직하다. 발전소 굴뚝의 TMS(굴뚝 자동측정기기)에 암모니아와 아산화질소 측정 장치를 추가로 설치하고 운영 단계에서도 실시간 모니터링을 실시할 수 있도록 검토할 필요가 있다. 또한 이를 사후환경영향조사계획에 포함하고, 협의 과정에서 암모니아와 아산화질소 배출에 대한 별도의 모니터링 및 관리 계획을 조건으로 부과하는 것이 바람직하다.

이상의 결과를 종합하면 수소 혼소 및 전소 시설의 환경영향평가 중 대기질과 온실가스 항목은 배출량의 증감 자체보다는 연료의 전환에 따른 영향의 변화를 중심으로 해석될 필요가 있다. 이는 단일 배출량 결과의 적정성을 판단하는 방식이 아니라, 기존 규제 물질의 변화, 신규 영향 요인의 발생, 그리고 관리 가능성을 함께 고려하는 평가로 접근하는 것이 타당하다. 아울러, 동일한 설비라 할지라도 혼소율, 연소온도, 공기비, 후처리 설비의 운전 조건 등에 따라 질소산화물과 아산화질소의 배출 특성이 크게 달라질 수 있음을 유의해야 한다.

또한 평가 과정 중 시설 운영으로 인한 예측 결과의 수치 자체보다 그 의미를 해석하기 위한 판단 기준을 사전에 설정할 필요가 있다고 판단된다. 즉 (1) 온실가스 저감효과와 대기오염물질 배출 변화 여부, (2) 아산화질소와 같은 신규 온실가스 배출 여부, (3) 혼소율과 같은 주요한 운전 조건 변화 등을 우선 구분하고, 각 조건에 따라 중점 검토 사항을 달리할 필요가 있다. 예를 들어 이산화탄소의 감소와 질소산화물 증가가 동시에 발생하면 대기환경 영향 검토를 강화하고, 질소산화물은 감소하나 아산화질소 배출이 동반되는 경우 온실가스 항목의 중점적 검토가 요구된다. 또한 전소 조건에

서는 기존 LNG 발전 기준의 단순 적용이 아니라 연소 특성 변화로 발생할 수 있는 영향 요인을 반영하여 평가 항목의 조정 또는 추가 여부를 검토한다. 아울러 Douglas et al. (2022)의 선행연구에서 지적인 바와 같이 수소 연소 시 배출가스 유량 증가 및 희석 특성으로 인해 농도 기준만으로 영향 정도를 비교하면 실제 영향과의 괴리가 클 가능성이 있으므로, 필요시 질량배출량 또는 기존 연료 대비 증가율을 병행 해석하는 접근이 요구된다. 이러한 관점에서 기존 현장 실증 자료의 충분한 활용, 면밀한 대기확산 모델링의 수행은 영향의 절대적 크기를 산정하기 위한 수단이 아니라 관리 필요성을 판단하기 위한 근거로 활용될 수 있으며, 이를 토대로 현 저감시설 체계의 적정성 평가를 포함한 면밀한 관리 및 모니터링 계획의 필요성을 판단할 수 있다. 아울러 평가 결과를 기반으로 기존 온실가스 감축, 기후변화 대응 관련 국가와 지자체의 정책 부합성 역시 함께 검토될 필요가 있다.

2. 사회환경

환경영향평가는 전술한 대기환경 등과 같은 전통적 환경 매체에 대한 영향뿐만이 아닌 사회적 수용성까지 포함하는 종합적 의사결정 절차로 볼 수 있다. 특히 발전시설은 입지 선정과 용지매수, 시공, 그리고 운영 과정에서 다양한 사회적 갈등을 유발하는 기피 시설로 볼 수 있다. 이에 대한 원인으로서는 위험시설 입지로 인한 안전 불안, 환경오염으로 인한 삶의 질 저하, 지역의 지가 하락과 같은 경제적 손해에 관한 우려 등이 복합적으로 작용한다(Park and Lee, 2022). 기존 발전시설을 대상으로 수소 혼소 및 전소 발전이 도입되면 지역사회의 주민들은 시설의 안정성 및 위험성 관련 우려를 가질 수 있으며, 이는 지역사회 갈등의 요인으로 충분히 작용할 수 있다. 수소 관련 인프라에 대한 불신의 배경으로 선행연구는 우선 수소폭탄으로 각인된 관련 지식, 화재 폭발과 독성가스 배출로 인한 위험성 우려, 과거 강릉 과학단지 수소탱크 사고 사례 발생 등에 따라 수소라는 물질 자체에 대한 부정적 인식이 복합적으로 작용하기 때문에 제시한 바 있다(Lee, 2021).

이러한 특성은 사회환경 측면의 영향이 수소 혼소 및 전소 발전시설의 환경영향평가에서 주요한 요인으로

고려될 필요가 있음을 시사한다. 따라서 사업 계획 초기 단계부터 해당 지역사회와 깊이 있는 소통을 하며 협의하는 것이 중요하고, 환경영향평가 단계에서는 공청회 등을 통해 소통을 더욱 강화할 필요가 있다. 이는 사회적 영향이 저감대책 이후 단계의 문제가 아니라 평가과정에서 선제적으로 검토되어야 할 항목임을 의미한다. 특히 사업의 추진 과정에서 지역사회가 충분한 정보에 접근하고 의견을 개진할 창구가 존재해야 하며, 시설 운영 과정에서도 개방적이고 투명한 정보 공개로 신뢰를 구축하는 것이 중요하다고 볼 수 있다(André et al., 2006). 아울러 발전시설 주변 지역에 대한 지원방안, 예를 들어 지역 인재 채용 시 가점 부여, 충분한 지원금 규모 설정 등을 통해 주민들의 기대를 충족시키는 것이 필요하다. 또한 발전설비의 경우 환경친화적 설비의 구성과 운영에 비용과 노력이 요구된다. 고효율 가스터빈 및 대기오염방지시설 설비 설치, 안전관리 대책의 면밀한 수립 등을 적극 채택하되, 그럼에도 불구하고 우려되는 환경영향 등을 지역사회와 가감 없이 소통·공유하는 것이 중요한 요소로 작용한다(Park and Lee, 2022).

3. 안전관리 체계 구축

발전시설 운영 단계의 안전관리 체계는 환경영향평가의 직접적 평가 대상이라기보다는, 사고 발생 시 환경과 인체에 미치는 잠재적 영향을 최소화하기 위한 관리 수단의 성격으로 보는 것이 타당한 것으로 판단된다. 즉, 안전관리 계획 자체의 기술적 적정성을 평가하는 것이 목적이라기보다, 사고 가능성이 초래할 수 있는 환경적 영향과 그 관리 가능성을 환경영향의 관점에서 검토하는 접근방식이 필요하다. 특히 단, 수소 연료의 특성을 고려할 때 사고 위험에 대한 주민 인식, 사회적 수용성 확보 여부는 사업 추진의 핵심 결정 요인으로 작용할 수 있으며(Park and Lee, 2022), 위험 소통과 주민 참여는 효과적 환경영향평가의 필수 요소로 볼 수 있다(André et al., 2006). 이에 본 연구에서는 수소 혼소 및 전소 발전시설을 대상으로, 사고 위험 인식과 위험 소통 체계를 중심으로 한 사회적 수용성 확보의 관점에서 안전관리 요소를 검토하고자 한다.

수소의 경우 메탄보다 인화성이 더 높다. 메탄의 공

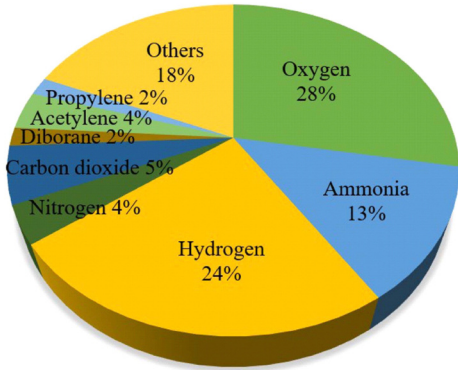


Figure 4. Frequency of High-Pressure Gas Accidents by Gas Type over the last 5 years (Gu and Lee, 2024)

기 중 폭발 하한계 메탄 약 5%지만 수소는 약 4%이다. 또한 수소의 폭발 상한계는 75%로 메탄의 15%에 비해 매우 높다. 2023년 발표된 5년(2019~2023년)간 54건의 가스 사고 현황 및 분석 결과 중 가스별 사고 발생 결과를 살펴보면, 산소가 28%로 가장 많이 발생하였으며 두 번째로 수소가 24%를 차지하였다(Figure 4). 이러한 결과는 사고 발생 가능성 자체를 단정하기 위한 근거라기보다, 동일 조건에서 관리 요구 수준이 상대적으로 높아질 수 있음을 의미한다. 따라서 수소 누출 등을 고려한 발전소 안전 절차, 안전 구역 또는 출입제한 구역 등의 변경이 필요하며, 이와 관련된 안전 관리 리스크가 증가할 수 있음을 유의해야 한다(Goldmeier and Catillaz, 2022). 또한 국내에서는 「고압가스 안전관리법 시행규칙」에 따라 처리시설 및 압축가스 설비로부터 30m 이내 보호시설이 있는 경우 폭발에 충격을 견딜 수 있도록 방호벽을 설치해야 한다. 그럼에도 불구하고 도심지역과 인접하여 분포하고 있는 기존 LNG

발전시설의 특성을 고려하여 관련 계획의 적정성을 면밀하게 검토하고 더욱 강화된 안전관리 체계를 구축하는 것이 바람직하다(Gu and Lee, 2024).

아울러 기존 발전소에 설치된 유해가스 감지 시스템은 일반적으로 탄화수소계 연료를 대상으로 설계되어 있다. 그러나 수소의 경우 공기 중 농도가 증가하면 이러한 감지기의 민감도가 저하될 개연성이 있으므로, 이를 탐지할 수 있는 새로운 시스템이 요구된다. 또한 수소 화염은 탄화수소 화염보다 광도가 낮으므로, 육안 감지가 어렵다(Figure 5). 따라서 수소 화염의 감지를 위한 전용 화염 감지 시스템의 도입 역시 요구되며, 연료 특성에 적합한 센서 및 계측장비의 설치가 필요하다(Goldmeier and Catillaz, 2022)

수소의 연료 활용은 발전시설의 다른 구성요소에도 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어 배열회수보일러 내 덕트 버너, 또는 보조 버너가 설치된 기존 발전소의 경우, 수소의 안전성 측면에서 시설 개선이 필요할 수 있다. 나아가 연료용 수소 생산 위치 및 공급 중단 가능성에 따라 일정량을 현장에 저장할 필요가 생길 수 있으며, 저장탱크 주변 안전 구역 설정 기준에 따라 발전소의 전체 설계 구성의 변경이 필요할 수 있다. 즉 기존 화력 발전시설을 대상으로 수소 혼소 및 전소를 위해서는 발전시설 시스템 전반에 관한 정밀 감시와 안전 운전을 위한 체계적 계획 수립이 선행되어야 하며, 배관 등 설비 소재의 변경 역시 필요하다. 수소의 경우 메탄보다 분자의 크기가 작으므로 기존의 밀폐성 또는 불투과성으로 간주하던 실(Seal)을 통과할 수 있고, 이에 따라 기존 LNG 기반 실링 시스템은 용접 등으로 더욱 강화되어야 한다. 특히 수소는 일부 금속 재질, 특정 강철 합금

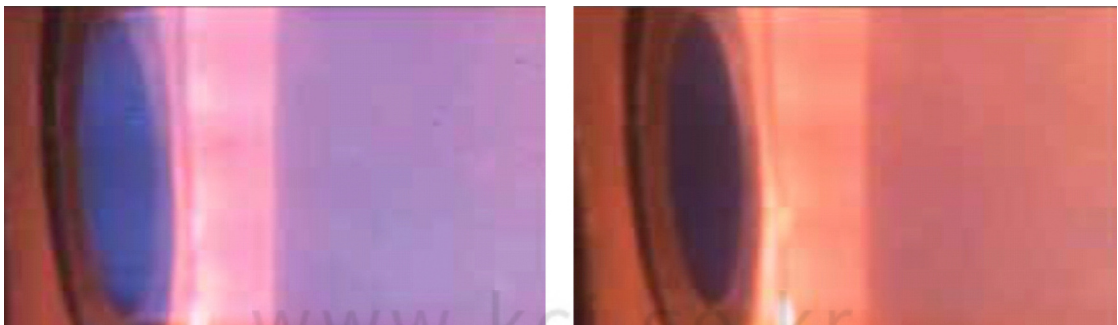


Figure 5. Comparison of Flame Characteristics between LNG (Left) and Hydrogen (Right) (Goldmeier and Catillaz, 2022)

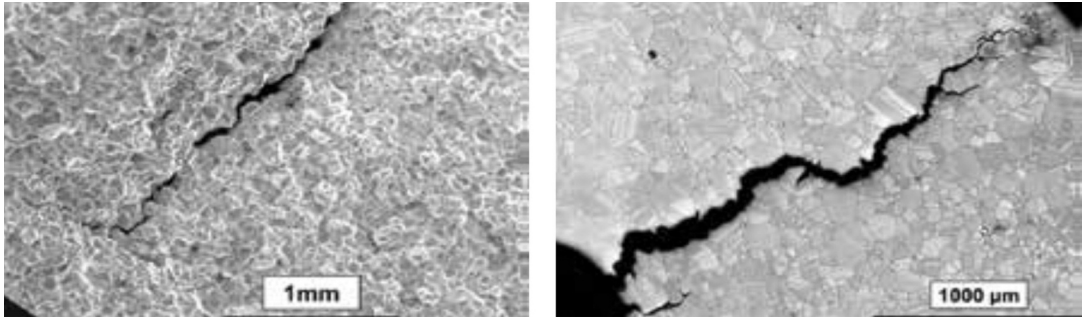


Figure 6. Examples of Equipment Damage Caused by Hydrogen Embrittlement (Goldmeer and Catillaz, 2022)

에 침투할 수 있는 수소취성 특성이 있으며, 이는 Figure 6에서 볼 수 있듯 재료의 강도를 저하한다. 따라서 이에 대한 저항성이 높은 적절한 대체 재료의 사용 역시 고려하는 것이 적절하다(Goldmeer and Catillaz, 2022; Lee et al., 2024).

선행연구는 Table 2와 같이 화학물질 취급 공정에서 폭넓게 활용되고 있는 정성적 위험성 평가 방법의 하

나인 HAZOP(Hazard and Operability study) 기법을 이용하여 현존 LNG 복합화력발전소에 수소를 연료로 적용하였을 경우 발생할 수 있는 사고의 원인과 안전성을 평가하고, 이를 향상하기 위한 개선 사항을 제언하였다(Gu and Lee, 2024). 이와 같은 연구 결과는 안전성 승인 여부를 결정하기 위한 근거라기보다, 잠재적 사고 시나리오를 전제로 환경적 영향 범위를 예측하고 제

Table 2. HAZOP results of LNG-H2 Co-firing power plant

Node	Deviation	Cause	Consequence	Current safety measure	Improvement recommendation
1	HIGH FLOW	<ol style="list-style-type: none"> 1. Only manual valves installed 2. Unable to control flow remotely 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Decrease in operational efficiency 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Installation/operation of gas detector 2. Install pressure instrumentation 	<ol style="list-style-type: none"> 1-1. Install automatic valve 1-2. Install emergency shutdown valve 1-3. Regular inspection needed 1-4. Installation of flow alarm low/high
	SAFETY	<ol style="list-style-type: none"> 1. Impact or vehicle collision with external piping during external work 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ductile failure of the piping 2. Risk of H₂ leakage 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Safety work permit 2. Installation/operation of gas detector 3. Activation of purge nitrogen upon fire detection 	<ol style="list-style-type: none"> 1-4. Establish restricted access zone 1-5. Conduct safety training for workers 1-6. Install collision barriers 1-7. Enclose the piping indoors 1-8. Install shutoff valves and purge nitrogen supply lines at regular intervals in hydrogen supply pipes both indoors and outdoors 1-9. Installation of fire detector
2	HIGH PRESSURE	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pressure increase due to Pressure Relief Valve (PRV) failure 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Increased pressure in H₂ gas transfer 2. Increased risk of leakage at fittings when piping operation pressure exceeds normal levels 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Installation/operation of gas valve 2. Measurement of fuel concentration using a gas detector 	<ol style="list-style-type: none"> 2-1. Regularly inspect PRV 2-2. Install additional PRV in the piping after the gas separator 2-3. Install emergency shutdown valve 2-4. Installation of pressure alarm low/high

Table 2. Continued

Node	Deviation	Cause	Consequence	Current safety measure	Improvement recommendation
3, 4	LOW PRESSURE	1. Nozzle openings become smaller due to internal pipe corrosion	1. Decreased flow and pressure inside the piping 2. Decrease in operational efficiency	No measure	3-1. Use metal materials with a small potential difference combination 3-2. Increase corrosion resistance by using cathodic protection or electroplating 3-3. Replace pipes that have exceeded their lifespan regardless of corrosion status
5, 6	HIGH TEMP	1. External fire	1. Increase in internal pipe temperature	1. Installation/operation of fire detector 2. Installation/operation of gas detector 3. Activation of purge nitrogen upon fire detection	4-1. Regular training for hydrogen gas fire 4-2. Use and maintain fireproof insulation 4-3. Lower the surrounding temperature of the fire with high-pressure water spray 4-4. Equip with a ventilation system (intelligent control system)

Note: Node 1=external hydrogen supply line; Node 2=internal main hydrogen header; Node 3=internal pilot fuel branch; Node 4=internal main fuel branch; Node 5=gas turbine pilot fuel line; Node 6=gas turbine main fuel line.

Gu and Lee, 2024

Table 3. Environmental impacts of hydrogen power generation and their implications for environmental impact assessment

Category	Potential Environmental Impact	Approach in EIA	Applicable Management / Mitigation Measures	Supporting Literature
Air Quality & Greenhouse Gas	Possible increase in NOx emissions (with higher hydrogen blending ratio)	Air dispersion modeling and combustion-condition scenario assessment	Low-NOx burners, combustion temperature control, SCR optimization	An et al., 2022; Goldmeer and Catillaz, 2022; Kim et al., 2022; Kim et al., 2024; Lim et al., 2024
	Formation potential of N ₂ O depending on combustion conditions	Scenario-based emission factor assessment reflecting combustion regime	Combustion optimization and monitoring of operating conditions	Alnajideen et al., 2024; Mashruk et al., 2022a; Mashruk et al., 2022b
Socio-environment	Public risk perception and social acceptance issues	Inclusion of risk communication and stakeholder engagement in EIA	Information disclosure, consultation committees, community benefit programs	André et al., 2006; Lee, 2021; Park and Lee, 2022
Safety Management	Expanded explosion range and increased potential impact radius	Evaluation of management feasibility	Safety distance establishment, protective barriers, gas detection systems	Goldmeer and Catillaz, 2022; Gu and Lee, 2024
	Hydrogen embrittlement and leakage risks	Review of facility modification and accident scenario analysis	Material substitution, enhanced monitoring systems	Goldmeer and Catillaz, 2022; Lee et al., 2024

시된 관리 대책의 충분 여부를 검토하기 위한 참고 자료로 활용될 수 있다. 아울러, 이와 같은 선행연구의 결과를 참조하여 시설별 특성이 반영된 적절한 안전관리 매뉴얼, 비상조치 계획을 수립·적용할 수 있을 것으로 기대되며, 발전 연료로서 수소의 적용 시 안전성을 담보하는 것이 중요한 것으로 판단된다.

Table 3은 전술한 연구 결과를 토대로 수소 발전에서 발생할 수 있는 환경영향과 환경영향평가 적용 방안을 종합하여 나타낸 결과이다. 해당 표는 영향유형-근거-평가-관리 방향을 연계하여 제시함으로써 환경영향평가 실무에서 활용이 가능한 판단 틀을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결론 및 제언

본 연구는 수소 혼소 및 전소 발전의 도입 확대를 고려하여 기존 화석연료 중심의 환경영향평가 체계에서 연료전환에 따른 환경영향 특성 변화를 종합적으로 검토하고, 대기질 및 온실가스뿐 아니라 사회·안전 등 주요 평가 분야에서 중점적으로 고려되어야 할 사항을 다수의 문헌조사 및 분석을 통해 정리하였다. 또한 본 연구는 개별 영향의 정량적 수준 제시보다 연료전환 상황에서 환경영향평가 결과의 해석에 적용될 수 있는 관점을 제시하는 데 중점을 두었다.

LNG-수소 혼소 및 전소는 이산화탄소 배출량을 크게 감소시키지만, 높은 연소온도로 인한 Thermal NOx 배출 증가 문제가 존재한다. 혼소율 증가 시 질소산화물 배출량이 현저히 증가할 수 있으나, 적절한 희박 연소조건을 설정하면 질소산화물 배출을 효과적으로 억제할 수 있다. 다만, 과도한 희박 연소로 인한 열 손실 우려가 있으므로, 기술적·경제적 측면을 두루 고려한 연소조건 최적화가 필수적이다. 아울러 아산화질소의 생성 가능성도 면밀하게 고려해야 하며, 질소산화물 배출 제어 기술과 후처리 설비를 강화하여 이산화탄소 저감효과를 최대화해야 한다.

사회적 수용성 확보를 위해서는 발전시설의 환경영향, 안전관리 방안을 주민들에게 투명하게 공개하는 것이 바람직하다. 지역사회와의 지속적인 소통과 협력을 통해 지역경제 활성화 및 일자리 창출 등의 긍정적

효과를 강조하며, 주민의 실질적 참여 기회를 확대하는 것이 필요하다. 특히 안전관리 체계 구축 차원에서 수소 사용에 따른 추가적 안전 리스크 관리가 요구된다. 따라서 기존 시설의 안전 시스템을 보완하고, 새로운 감지 및 관리 시스템 구축을 통해 사고 발생 가능성을 최소화해야 한다. 시설별 특성을 고려한 정기 안전 점검과 비상 대응 계획의 수립 및 개선 사항 도출 역시 필수적이라 할 수 있다.

환경성 평가 측면에서는 수소 혼소·전소 적용 시설에 대한 환경영향평가 절차에서 혼소율 및 신규 배출물질의 영향을 포함한 상세한 평가 체계를 마련해야 한다. 기존의 규제 물질뿐 아니라 아산화질소와 같은 신규 배출물질의 영향 평가를 위해 모델링과 현장 실증 데이터를 활용한 심도있는 예측이 이루어져야 한다. 이를 통해 주변 지역의 대기질 영향 및 온실가스 배출 정도를 면밀히 평가하고, 평가 결과를 기반으로 적절한 배출 기준 설정 및 관리계획 수립이 이루어져야 한다.

또한 사후환경영향조사 단계에서 아산화질소 및 미반응 암모니아의 배출을 모니터링하되, 신규 배출물질의 대기환경 및 기후변화 관점의 영향을 면밀하게 평가하고 관리계획을 수립하는 것이 필수적이다. 아울러 평가 결과를 기반으로 기존 온실가스 감축, 기후변화 대응 관련 국가와 지자체의 정책 부합성 역시 함께 검토되어야 한다. 본 연구는 수소 혼소 및 전소 발전의 도입 확대를 고려한 환경영향평가의 기술적·제도적 개선 방향을 제시함으로써, 향후 관련 시설의 환경영향평가 시 평가 항목의 설정, 검토의 범위를 명확히 하는 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 수소 에너지 도입 확대 과정에서 발생할 수 있는 평가상의 불확실성을 줄이는 데 참고 자료로 활용될 것으로 기대된다.

사사

이 원고는 한국환경연구원의 2025년도 연구과제 “무탄소 전원 환경성평가 방안 연구(2025-033)”의 일부로 기후에너지환경부의 지원으로 이루어졌습니다.

References

- Alnajideen, M., Shi, H., Northrop, W., Emberson, D., Kane, S., Czyzewski, P., Alnaeli, M., Mashruk, S., Rouwenhorst, K., Yu, C., Eckart, S., & Valera-Medina, A. (2024). Ammonia combustion and emissions in practical applications: a review. *Carbon Neutrality*, 3, 13. <https://doi.org/10.1007/s43979-024-00088-6>
- André, P., Enserink, B., Connor, D., & Croal, P. (2006). Public Participation International Best Practice Principles, IAIA Special Publication Series, NO. 4.
- 안소정, 박진제, 배운상, & 이영재. (2022). 0D 모델을 활용한 메탄-수소 혼소에 따른 MILD 연소 및 NOx 배출 특성 해석 연구. *한국수소및신에너지학회논문집*, 33(4), 400-412. <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.4.400>
- An, S., Park, J., Bae, Y.-S., & Lee, Y. (2022). Simulation Analysis of MILD Combustion and NOx Formation for Methane-Hydrogen Mixture Using 0D Model, *Trans. Journal of Hydrogen and New Energy*, 33(4), 400-412. <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.4.400>
- 2050 탄소중립녹색성장위원회. (2021). 2050 탄소중립 녹색성장 전략 및 이행계획. 대한민국 환경부.
- Carbon Neutrality and Green Growth Commission. (2021). 2050 Carbon Neutral Strategy and Implementation Plan. Republic of Korea.
- Douglas, C., Emerson, B., Lieuwen, T., Martz, T., Steele, R., & Noble, B. (2022). NOx Emissions from Hydrogen-Methane Fuel Blends. Georgia Tech Strategic Energy Institute.
- Goldmeer, J., & Catillaz J. (2022). Hydrogen for power generation –Experience, requirements and implications for use in gas turbines-. GE.
- 구예빈, & 이민철. (2024). 가스터빈 복합 화력발전소에 수소연료 적용을 위한 HAZOP 위험성 평가 연구. *한국수소및신에너지학회논문집*, 35(5), 572-582. <http://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.572>
- Gu, Y. B., & Lee M. C. (2024). A HAZOP Risk Assessment Study for the Application of Hydrogen Fuel in a Gas Turbine Combined Cycle Power Plant. *Journal of Hydrogen and New Energy*, 35(5), 572-582. <http://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.5.572>
- 주용진, 김미영, 박정극, 박세익, & 신주곤. (2020). 수소 혼소용 가스터빈의 요소기술 및 국내외 기술개발 동향. *한국수소및신에너지학회논문집*, 31(4), 351-362. <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.4.351>
- Joo, Y., Kim M., Park J., Park S., & Shin J. (2020). Hydrogen Enriched Gas Turbine: Core Technologies and R&D. *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, 31(4), 351-362. <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.4.351>
- 관계부처 합동. (2021). 제1차 수소경제 이행 기본계획. Government of the Republic of Korea. (2021). The 1st Basic Plan for Hydrogen Economy Implementation.
- 김형우, 진옥화, 고영진, 최민준, 구인영, 백민해, 김규태, & 신동혁. (2022). 탄소중립 가스터빈 연소 기술 동향, *한국연소학회지*, 27(2), 14-38. <https://doi.org/10.15231/jksc.2022.27.2.014>
- Kim, H., Jin, U., Go, Y., Choi, M., Gu, I., Back, M., Kim, K. T., & Shin, D.-H. (2022). A review of Carbon Neutral Gas Turbine Combustion Technology. *Journal of The Korean Society of Combustion*, 27(2), 14-38. <https://doi.org/10.15231/jksc.2022.27.2.014>
- 김재엽, 이태의. (2021). 무탄소 신전원 해외사례 및 정책방향 연구. 에너지경제연구원.
- Kim, J., & Lee, T. (2021). A Case Study on the Use of Low-Carbon Energy for Korean Energy Policy. Korea Energy Economics Institute.
- 김인혜, 오정재, 김태성, 임민석, & 조성현. NGCC 기반 천연가스, 암모니아, 수소 혼소 발전 비율에 따른 CO₂와 NOx 배출량 및 전력 생산량 분석. *한국화학공학회*, 62(3), 225-232. <https://doi.org/10.9713/kcer.2024.62.3.225>

- Kim, I., Oh, J., Kim, T., IM, M., & Cho, S.. (2024). Analysis of Gas Emissions and Power Generation for Co-firing Ratios of NG, NH₃, and H₂ Based on NHCC. *Korean Chemical Engineering Research*, 62(3), 225-232. <https://doi.org/10.9713/kcer.2024.62.3.225>
- 이지훈. (2021). 전주·완주 수소시범도시 주민수용성 분석. *신재생에너지*, 17(4), 28-35. <https://doi.org/10.7849/ksnre.2021.0026>
- Lee J.-H. (2021). Analysing the Acceptability of Jeonju-Wanju Hydrogen Demonstration City. *New & Renewable Energy*, 17(4), 28-35. <https://doi.org/10.7849/ksnre.2021.0026>
- 이진희, 김지현, 김현지, 이다혜, 김진호, 강석환, 이창엽, 이민정, & 김동욱. (2024). 탄소중립 대응을 위한 수소와 암모니아 활용 무탄소 연료 기술 개발 동향. *에너지기후변화학회지*, 19(1), 115-131. <https://data.doi.or.kr/10.22728/jecc.2024.19.1.115>
- Lee, J.-H., Kim, J.-H., Kim, H.-J., Lee, D.-H., Kim, J.-H., Kang, S.-H., Lee, C.-Y., Lee, M.-J., & Kim, D.-W. (2024). Trends in the Development of Carbon-Free Fuel Technology Using Hydrogen and Ammonia to Respond to Carbon Neutrality. *Journal of Energy & Climate Change*, 19(1), 115-131. <https://data.doi.or.kr/10.22728/jecc.2024.19.1.115>
- 임호, 김태순, 박영도, 김량균, 권종서, & 김규보. (2024). 공업로 적용을 위한 메탄-수소 혼소 시 NO_x 배출 특성. *한국유체기계학회 논문집*, 27(1), 57-61. <http://doi.org/10.5293/kfma.2024.27.1.057>
- Lim, H., Kim, T., Park, Y., Kim, R.-G., Kwon, J., & Kim, G.-B. (2024). Investigation on the NO_x Emission Characteristics of Methane-Hydrogen Co-Firing for Industrial Combustor. *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, 27(1), 57-61. <http://doi.org/10.5293/kfma.2024.27.1.057>
- Mashruk, S., Okafor, E.C., Kovaleva, M., Alnasif, A., Pugh, D., Hayakawa, A., & Valera-Medina, A. (2022a). Evolution of N₂O production at lean combustion condition in NH₃/H₂/air premixed swirling flames. *Combustion and Flame*, 244, 112299. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112299>
- Mashruk, S., Zitouni, S.E., Brequigny, P., Mounaim-Rousselle, C., & Valera-Medina, A. (2022b). Combustion performances of premixed ammonia/hydrogen/air laminar and swirling flames for a wide range of equivalence ratios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(97), 41170-41182. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.165>
- 박주원, 이태화, 박대근, 김승곤, & 윤성환. (2021). 반응 온도 및 체류시간에 따른 아산화질소 열분해 효과. *해양환경안전학회지*, 27(7), 1074-1081. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2021.27.7.1074>
- Park, J., Lee, T., Park, D., Kim, S. G., & Yoon, S. (2021). Pyrolysis Effect of Nitrous Oxide Depending on Reaction Temperature and Residence Time. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 27(7), 1074-1081. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2021.27.7.1074>
- 박동규, & 이재현. (2022). LNG 발전소 입지선정에 관한 주민 수용성 제고연구. *플랜트 저널*, 18(3), 41-51.
- Park, D., & Lee, J.-H. (2022). On the Social Acceptance of Site Selection for a LNG Power Plant. *THE PLANT JOURNAL*, 18(3), 41-51.
- 송상화, 이지환, 문형민, 김승모, 김경민, & 전충환. (2024). 화력발전 무탄소 에너지 전환을 위한 보일러 모사 장치에서 암모니아 주입 전략 연구. *한국연소학회지*, 29(4), 1-11. <http://doi.org/10.15231/jksc.2024.29.4.001>
- Song, S.-H., Lee, J.-H., Moon, H.-B., Kim, S.-M., Kim, G.-M., & Jeon, C.-H. (2024). Carbon-free Energy Transition in Thermal Power Plant: Ammonia Injection Strategies Analysis in Boiler Simulator. *Journal of The Korean Society of Combustion*, 29(4), 1-11. <http://doi.org/10.15231/jksc.2024.29.4.001>