

무탄소 신전원 활용기술과 해외 활용사례 - 일본을 중심으로¹⁾

김재엽 에너지경제연구원 부연구위원(iamchamp@keei.re.kr)



1. 서론

최근 해외 선진국들을 중심으로 한 ‘2050 탄소중립(net zero)’ 선언은 에너지 및 환경 정책의 주류 트렌드로 자리 잡고 있는 듯하다. 우리 정부도 2050년 탄소중립 목표를 달성하기 위해 ‘2050 탄소중립위원회’를 구성하여 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 구체적인 로드맵을 제시하려는 노력을 기울이고 있으며, 그 결과 지난 10월 국내 탄소 순배출량을 제로화하는 ‘2050 탄소중립 시나리오 최종안’이 발표되었다. 이와 더불어 2050 탄소중립 목표 달성의 중간 목표로 ‘2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안’도 비슷한 시기에 확정되면서 기후변화 대응과 탄소배출 저감은 국민의 일상에 보다 가까이 다가오게 되었다.

국내에서 ‘무(無)탄소 신(新)전원’이라는 표현은 2050 탄소중립 시나리오 초안에서 공식화되었는데, 해외에서는 저탄소(low-carbon) 에너지원 또는 무탄소(carbon-free) 에너지원으로 통용되는 개념이다. 그

1) 본고는 김재엽 · 이태의, 2021, “무탄소 신전원 해외사례 및 정책방향 연구,” 에너지경제연구원 수시연구보고서의 주요 내용을 부분적으로 요약한 것임(자세한 내용은 김재엽 · 이태의(2021)의 내용을 참고).

그러나 무탄소 신전원이 어떤 에너지원을 포함하고 있는지에 대해 합의가 이루어진 바는 없는 관계로, 무탄소 신전원의 활용기술과 사례를 살펴보기 위해서는 먼저 무탄소 신전원의 범위가 먼저 정의되어야만 한다. 지금까지 석탄과 가스복합 화력발전은 각각 기저부하와 첨두부하를 맡아 전력공급의 안정성 유지에 기여해 온 발전원들이었다. 그러나 에너지전환 이슈가 대두되고 국가별 NDC 상향 및 2050 탄소중립 이행까지 이어지면서 변동성 재생에너지원 보급 확대를 위한 정책적 지원은 개도국을 제외한 국가그룹에서 일반적인 현상으로 자리 잡았다. 그 결과 석탄, 가스 등 전통전원 중심의 전원믹스는 변동성 재생에너지 중심의 전원믹스로 눈에 띄는 변화를 보이고 있는데, 에너지전환에서 탄소중립으로 이어지는 일련의 기후환경 변화 대응은 산업정책에서부터 금융·재정지원정책에 이르기까지 전방위적인 정책변화를 유발하며 신(新) 경제질서를 구축하고 있다. 이는 에너지산업 발굴 등 새로운 기회를 창출하기도 하지만 화력발전을 포함한 기존 산업에 갑작스럽고 큰 충격을 발생시켜 고용 불안정과 지역별 경제활동 위축을 가져오고 사회적 갈등의 시발점이 되기도 한다.

전환(발전)부문에서는 탄소중립 이행 과정에서 화력발전 퇴출에 따른 사회적·경제적 충격을 완화하는 한편 변동성 재생에너지 확대에 따른 계통운영의 안정성 확보도 동시에 달성해야 하는 상황이다. 무탄소 신전원의 활용은 화력발전 중심에서 재생에너지 발전 중심으로 에너지정책을 전환하는 과정에서 전력시스템이 직면하는 정책적 과제들을 해소하는 하나의 방안으로 작용할 수 있다. 이하에서는 그러한 무탄소 신전원이 어떤 에너지원을 포함하고 있으며, 해외에서는 어떤 역할을 수행하고 있는지를 간략히 살펴보고자 한다. 특히 우리나라 전력산업 거버넌스와 유사한 측면이 많은 일본의 '무탄소 신전원 활용전략'을 간단히 살펴봄으로써 에너지전환의 사회적·경제적 충격을 완화하면서 지속가능한 재생에너지 보급을 가능하게 하는 정책의 필요성 및 효과를 타진해보려 한다.

2. 무탄소 신전원의 범위

가. 전환 부문 2050 탄소중립 시나리오 최종안

2021년 10월 관계부처 합동으로 발표된 '2050 탄소중립 시나리오 최종안'에서는 부문별 탄소배출 저감을 통해 국내 탄소 순배출 제로화를 목표로 2개의 시나리오(A안, B안)를 제시하고 있다. 2018년에 공개된 'IPCC 1.5°C 특별보고서'를 토대로 모든 국가가 2050년까지 탄소중립을 추진하는 전제하에 국외 감축분이 없는 2050년을 가정한 시나리오로 구성되어 있는데, A안은 화력발전 전면 중단을 가정하며 B안은 일부 LNG 화력발전이 잔존하는 대신 CCUS 등의 탄소제거 기술을 적극 활용하는 것을 가정하고 있다. 전환(발전)부문 탄소중립 시나리오별 전원구성을 살펴보면 '무탄소 가스터빈(GT)'이 전원믹스의 한 축을 구성하고 있다. 당초 전환 부문 2050 탄소중립 시나리오 초안에서 '무탄소 신전원'으로 표현되었다가 무탄소 가스터빈으로 구체화된 것으로 보인다. 가스터빈을 언급하였다는 것은 일본 등을 중심으로 구체화되고 있는 수소 및 암모니아 혼소 및 전소 발전을 무탄소 전원으로 고려하고 있음을 의미한다. 전환 부문 정책 제언에서도 R&D 확대를 통해 수소터빈 등 신규 발전원의 조기 상용화를 추진하겠다고 밝히고 있어 우리 정부가 무탄소 전원으로 수소 또는 암모니아를 활용하는 방안을 구체적으로 검토하고 있음을 알 수 있다.

표 1 전환 부문 2050 탄소중립 시나리오 최종안 전원믹스

구분	발전량(TWh)									배출량 (백만 톤)
	원자력	석탄	LNG	재생 E	연료전지	동북아그리드	무탄소GT	부생가스	합계	
A안	76.9	0	0	889.8	17.1	0	270.0	3.9	1,257.7	0
B안	86.9	0	61.0	736.0	121.4	33.1	166.5	3.9	1,208.8	20.7

자료: 관계부처합동, 2021.10. 『2050 탄소중립 시나리오안』, p.3~4 내용 참조

전환 부문 탄소중립 시나리오 최종안의 전원믹스를 살펴보면 2050년 전환 부문에서의 온실가스 목표 배출량이 0~20.7백만 톤 수준으로 설정되어 있다. 탄소배출 제로 및 최소화를 위해 전원믹스 측면에서는 석탄 및 가스복합 화력발전의 비중을 크게 줄이고 재생에너지와 수소 및 암모니아 기반의 발전을 확대하려는 정책방향이 엮보이는 가운데, 화력 발전을 완전 퇴출시키는 A안과 달리 B안에서는 가스복합화력의 일부를 유연성 내지 예비력 자원으로 활용하는 상황을 가정하였다. 향후 2050년까지 변동성 재생에너지 발전원의 보급이 급격히 확대될 경우 안정적 전력공급 및 계통운영 차원에서의 대응도 동시에 고려한 결과로 추정된다.

나. 전환 부문 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상황안

2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)는 2050 탄소중립이라는 장기 목표를 달성하기까지의 중간 목표에 해당한다. 유럽, 미국, 일본 등 해외 주요 선진국들은 국가별 배출정점 연도 또는 배출정점 인접연도로부터 2050년 탄소중립 달성까지 균등감축 수준으로 NDC를 상향하고 있다. 우리 정부는 기후위기의 심각성과 경제규모에 걸맞은 역할 등을 고려하여 NDC 상황안 마련에 노력을 기울여왔는데, 지난 8월에는 ‘탄소중립 기본법’에 NDC 최소 기준(2018년 대비 최소 35% 이상의 온실가스 배출량 감축)을 명시하였고 이후 국제 NDC 동향 등을 감안하여 2030 NDC 상황안을 최종 결정하게 되었다.

국내 전환 부문 2030 NDC 상황안에서는 2030년까지의 GDP 상승과 친환경 전기자동차 보급 확대에 따른 전력수요 증가, 수요관리 이행력 강화 등이 반영되어 제9차 전력수급기본계획에서의 2030년 목표수요(542.5TWh)보다 약 4.5% 증가한 567TWh의 전력수요를 전망하고 있다. 이를 송배전 손실과 소내소비율을 반영하여 발전단 기준 발전량으로 역산해 보면 약 612.4TWh 수준으로 추정되는데, 전환 부문 NDC 상황안에서는 612.4TWh의 전력을 공급하기 위한 주요 전원으로 원자력, 석탄, LNG, 신재생, 암모니아, 양수를 제시한다.

표 2 2030 NDC 상황안에서의 전원믹스 구성

구분	원자력	석탄	LNG	신재생	암모니아	양수/기타	합계
발전량(TWh)	146.4	133.2	119.5	185.2	22.1	6.0	612.4
비중(%)	23.9	21.8	19.5	30.2	3.6	1.0	100.0

자료: 관계부처합동, 2021.10. 『2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상황안』, p.6 표 재인용

한편 전환 부문 2030 NDC 상향안의 전원믹스 간 세부 연관관계를 살펴보면 온실가스 배출량 저감(2030년까지 전환 부문 온실가스 배출량 1.5억 톤 달성)을 위해 화력발전(유류, 석탄, LNG)의 비중은 축소되는 대신 신재생에너지 발전 비중의 확대 및 암모니아 등 무탄소 연료의 혼소발전 도입이 명시되어 있다. 다만 현재 기술단계에서는 수소의 폭발력을 감안할 때 저장 및 연료투입 시 충분한 주의를 기울여야만 한다. 따라서 수소 대비 폭발력이 작고 안정적이면서 저장기술은 성숙단계에 접어든 암모니아가 2030 NDC 상향안에서의 주요 무탄소 전원으로 제시된 것으로 보인다.

다. 무탄소 신전원의 범위 설정

전환 부문 2050 탄소중립 시나리오 최종안과 2030 NDC 상향안을 통해 우리 정부가 2050 탄소중립이라는 장기 목표의 달성을 위해 발전연료로서의 수소와 암모니아 활용을 고려하고 있음을 확인할 수 있다. 한편 탈원전 기조가 강화되는 상황에서도 2050년까지 일정수준의 원자력 발전이 잔존하고 있는데 탄소중립 달성 과정에서 원전의 역할을 일정 수준 인정할 결과일 수 있다. 다만 기존 대형원전의 신규도입이나 가동 중단이 확정된 원전의 계속운전에 의한 원전 발전량이 아닌 탈원전 과정에서 남은 잔여원전 내지는 SMR과 같은 차세대 소형 모듈형 원자로의 활용이 반영되었을 것으로 조심스럽게 추측해본다.

결과적으로 2050 탄소중립 목표 달성에 기여할 주요 무탄소 신전원은 수소와 암모니아로 보아야 할 것인데, 중단기적으로는 암모니아의 활용이 기술경제적 측면에서 수소 대비 경쟁력이 있을 것으로 평가되고 있다. 암모니아와 수소는 물리적, 화학적 특성에서 상호 상반되는 특징이 있으며, 암모니아를 수소 캐리어로 활용 가능하다는 측면에서 두 연료를 완전 독립적인 별개의 연료로 보기는 어렵다(암모니아에서 수소를 추출하여 수소연료로 활용 가능). 이하에서는 암모니아와 수소 혼소의 기술적 특성과 두 연료의 혼소발전 시 CCUS의 결합 활용의 이점에 대해 구체적으로 살펴보고자 한다.

3. 주요 무탄소 신전원의 활용기술

가. 암모니아 혼소

IEA에서는²⁾ 발전부문에 대한 저탄소 암모니아의 활용과 관련하여 2025년까지 1GW급 석탄화력 발전소에 대한 암모니아 혼소율이 20%까지 확대될 것으로 전망한다. 화력발전 부문에서의 암모니아 활용은 일본을 중심으로 혼소연구와 실증 테스트가 광범위하게 이루어지고 있고, Mitsubishi 중공업 등 글로벌 가스터빈 제조업체들은 장기적으로 가스터빈에도 수소 외 암모니아 주입이 가능하도록 R&D를 진행 중이다.

2) IEA. 2021a. "The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector." pp.26~27 참조

1) 발전연료로서의 암모니아

질소와 수소로 구성되어 있는 암모니아는 연소 시 온실가스가 배출되지는 않으나 질소산화물(NOx) 및 독성물질이 배출되는 문제가 있다. 또한 암모니아는 수소 함량이 높고 수소 대비 에너지 밀도가 높은 장점이 있는데, 실제 암모니아의 평균 수소 함량은 약 120kgH₂/m³ 수준으로 액화 수소의 수소 함량이 약 70kgH₂/m³, 압축 수소의 수소 함량이 약 40kgH₂/m³ 수준인 점을 감안할 때 상당히 높은 수준의 수소 함량을 보여준다. 한편 암모니아는 수소보다 액화가 용이하여 운송 및 저장 측면에서의 기술적 성숙도가 높고 수소 캐리어로서의 역할도 충실히 수행할 수 있다. 1기압 조건에서 암모니아의 액화온도는 영하 33℃, 수소의 액화 온도는 그보다 훨씬 낮은 영하 253℃이므로 액화 및 운송·저장 측면에서 암모니아는 탁월한 강점을 보유하고 있다. 연소 측면에서는 암모니아의 장단점이 극명하게 엇갈리는데, 암모니아의 평균 연소속도가 약 7cm/s 수준이며 수소의 평균 연소속도가 170~291cm/s 수준인 점을 비교해보면 암모니아의 발화력과 연소효율이 수소보다 크게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 지나치게 낮은 연소속도 및 화염 안정성은 상용 가스복합화력 발전소의 대형 가스터빈에 대한 암모니아 활용을 저해하는 요소기도 하다. 그러나 암모니아의 희박폭발한계(lean flammability limit)는 약 0.63 수준으로 수소의 희박폭발한계인 0.1 수준보다 높아 연료저장의 안정성 측면에서 수소보다 활용이 용이한 특성을 보인다.

표 3 발전연료 간 특성 비교(암모니아, 천연가스, 수소)

특성	암모니아	천연가스	수소
열량(MJ/kg)	18.6	53.3	120
연소속도(cm/s)	7	46~52	170~291
희박폭발한계	0.63	~0.5	0.1

자료: 전력연구원 발전기술연구소. 2021.11. 「Carbon-free 암모니아 발전기술」. 에경연-전력연구원 세미나 발표자료, p.5 표 일부 발췌

현재 가스터빈에는 수소가 주입되는 경우가 일반적이지만 질소와 수소로 구성된 암모니아도 이론상으로는 가스터빈 연료로 직접 주입이 가능하다. 전환 부문 2050 탄소중립 시나리오에서 무탄소 가스터빈의 연료로 암모니아도 충분히 활용될 수 있는 것이다. 2021년 현재 300kW 수준의 소규모 가스터빈에 대해 암모니아의 직접 주입과 연소 안정성 테스트가 성공한 것으로 파악되며, 향후 보다 큰 규모의 가스터빈으로의 적용을 위해서는 암모니아의 낮은 연소속도와 독성물질 및 질소산화물 배출 문제가 적절히 해결되어야 할 것이다.

2050 탄소중립 달성을 적극적으로 추진할 경우 2050년 기준 석탄화력 발전소에 대한 암모니아 연료의 투입량은 연간 6천만 톤에 이를 것으로 예상되며 석탄과 암모니아의 혼소를 통해 생산되는 전력량은 연간 약 140TWh 수준으로 전망된다.³⁾ World Energy Outlook 2021에서는⁴⁾ 2050년 전 세계 발전량을 약

3) IEA. 2021a. "The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector." p.27 참조

4) IEA. 2021b. "World Energy Outlook 2021." 지속가능개발 및 넷제로 배출 시나리오 데이터(데이터 추출: 2021.11.15.)

71,163TWh로 전망하고 있는 바, 140TWh의 발전량은 2050년 전 세계 발전량 전망치의 0.2% 수준에 불과하지만 향후 대규모 석탄화력 발전소에 대한 암모니아 혼소율이 올라가고 대형 가스터빈에 대한 암모니아 활용이 가능해진다면 암모니아로부터의 발전량도 그에 비례하여 큰 폭으로 증가할 수 있다. IEA에서는 1GW급 단일 석탄화력 발전소에 대해 암모니아를 20% 비율로 혼소한다면 연간 약 50만 톤의 암모니아가 투입될 것으로 예상하고 있으며,⁵⁾ 인도와 중국 등 신흥국 석탄화력 발전소를 중심으로 암모니아가 혼소가 본격적으로 확대된다면 전 세계 발전용 암모니아 소비가 대폭 증가할 것이다.

2) 암모니아 혼소율 제고를 위한 과제

암모니아는 천연가스와 수소에 비해 연소속도가 느리고, 희박폭발한계도 높은 편이라 연소효율을 좌우하는 화염 안정성을 일정수준 이상 유지하는 것이 쉽지 않다. 따라서 기존의 석탄과 가스복합화력 발전소를 암모니아 혼소용으로 개조할 때는 보일러 외에 암모니아 저장 탱크, 기화기 등 추가적인 설비보강이 요구된다. 한편 암모니아 연소 과정에서 발생하는 질소산화물을 처리하는 기술적 노하우와 인프라는 충분히 확보되어 있는데, 석탄화력 발전소의 경우 배연가스(flue gas)에 선택적 촉매환원법(selective catalytic reduction, SCR⁶⁾)을 적용하여 질소산화물을 저감시키고 있다.

사실 암모니아 혼소발전에 있어 가장 중요한 사항은 석탄-암모니아 간 적정 혼소비율 및 암모니아 주입 방법이다. 현재 기술적으로 검증된 석탄-암모니아 혼소율은 30~60% 수준인데, 석탄-암모니아 혼소율이 60%일 경우 복사 열전달(radiative heat transfer)은 크게 감소하는 것으로 나타났으며 보일러 벽체로의 열전달량은 약 3% 감소하는 특징을 보였다. 암모니아를 석탄 노즐에서 혼합하거나 암모니아 주입관(ammonia gun)으로 주입되면 혼소율 30%까지는 질소산화물 배출량이 증가하지 않았다. 이러한 일련의 실험결과들을 토대로 환경오염물질의 배출을 최소화와 발전효율 극대화를 동시에 달성할 수 있는 ‘최적 혼소율’을 찾아가야 한다.

암모니아 혼소에 있어 마지막 이슈는 독성과 부식성에 대한 대응이다. 암모니아는 수소 대비 발화위험이 적어 연료저장이 상대적으로 용이하다. 그러나 독성과 부식성은 연료 활용 시 안전문제로 직결되므로 지속적인 기술개발을 통해 극복되어야 한다. 액체 암모니아를 증발시키지 않고 가스터빈에 직접적으로 주입할 수 있다면 암모니아 혼소발전 시 안전비용을 절감하면서 발전효율을 제고하는 효과를 기대해 볼 수 있다.

나. 수소 혼소

1) 발전연료로서의 수소

2021년 현재 수소는 전 세계 발전량의 0.2%를 차지하고 있어⁷⁾ 발전부문에서의 역할은 미미하다. 그러나

5) IEA. 2021a. “The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector.” pp.27~28 참조

6) 선택적 촉매 환원법은 질소산화물(NOx)을 처리하는 데 있어 검증된 방법들 중 하나로, 발전설비 등 고정오염원에서 배출되는 NOx를 효율적으로 제거하는 기술이다. 환원제를 주입하여 NOx를 인체 및 환경에 무해한 질소 또는 물로 전환시키는 방법이며, 연료를 연소시켰을 때 배출되는 NOx의 제어를 위해 배기가스에 미리 공기와 스팀으로 혼합된 환원제를 주입하면서 혼합시켜준다.

7) IEA. 2021a. “The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector.” p.24 참조

산업계에서는 이미 철강, 석유화학, 정제업 부문에서 수소 혼합가스를 널리 활용하고 있고, 특히 정유와 석유화학 등의 분야에서는 소규모 터빈에서 90% 이상의 수소 혼소를 성공한 사례가 존재한다.

발전연료로 수소를 적극 활용하는 방안에 대해 국가적인 차원에서 구체적인 목표와 로드맵을 제시한 나라는 거의 찾아보기 힘들다. 그러한 가운데 일본 정부는 2030년까지 수소 기반의 발전설비 1GW를 보급하고 발전연료로서의 수소 투입량을 30만 톤까지 확대할 계획을 수립하였다. 여기에서 더 나아가 장기 목표로 수소 기반 발전설비를 15~30GW 확대할 계획을 밝히기도 하였는데, 이때 일본 내 발전부문에서의 수소 소비량은 0.05~1억 톤까지 확대될 것으로 전망된다.

최근까지 유럽과 미국, 일본 등 주요 선진국을 중심으로 가스터빈-수소 혼소 프로젝트가 광범위하게 진행되고 있다. 이 프로젝트들은 대체로 최대 500MW급 상용 발전설비를 수소 혼소발전용으로 개조하는 계획을 포함한 것으로 알려졌다. 특히 일본 Mitsubishi 社에서는 500MW급 이상의 상용 가스복합화력 발전소에 대해 30% 이상의 수소 혼소를 2025년까지 완료하고 2045년까지는 수소 전소가 가능한 체제를 구축할 계획을 밝힌 바 있다. 전 세계 가스터빈-수소 혼소 프로젝트 추진현황을 아래 <표 4>에 간략히 정리해 보았다. 소규모 가스터빈에 대해 이미 다양한 혼소율을 적용하여 발전을 성공한 사례가 두드러지며, 2050 탄소중립 이행 과정에서 기구축된 가스복합화력 발전의 좌초자산화(stranded asset)를 예방하는 차원에서 재생에너지 확대 시 계통안정성 유지에 필요한 유연성 자원으로 활용하기 위해 500MW급 대형 가스터빈에 대한 혼소율 제고를 도모하는 것으로 보인다.

표 4 글로벌 가스터빈-수소 혼소 프로젝트 추진 현황

프로젝트명	설명	상태	지역
FLEXnCONFU	전력부문 컨소시엄(European consortium)을 구성, 전력회사에 대한 저탄소 발전연료 공급 지원	진행 중	유럽 5개 시범 지역
Hydrogen to Magnum	2025년까지 440MW 가스 터빈 유닛 1기를 100% 수소로 전환	발표	네덜란드
Mitsubishi Power	2024년까지 40MW의 암모니아 연소 가스 터빈을 개발, 2025년까지 터빈 배기열로 암모니아를 수소로 분해	발표	일본
GE	가스터빈 25개를 수소를 연료로 운영 중(부피 기준 수소 혼소율 50% 이상)	운영 중	전 세계 여러 지역
Energy Australia	2024년까지 300MW 이상의 가스 발전소에 수소 혼소	발표	호주
HyFlexPower	12MWe 열병합(CHP) 장치를 수소 혼소용으로 개조	파일럿 PJT 진행	프랑스
Long Ridge Energy Terminal	485MW 복합 발전소를 수소 혼소 5%로 개조 후 향후 10년 내에 수소 전소(100%) 달성 목표	1단계 완료	미국
Mitsubishi Power	2024년까지 수소 혼소율 30%를 달성하고 전소 연구 추진	2023~2025년 온라인화 목표	미국 내 3개 지역

자료: IEA. 2021a. "The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector." p.24 표 정리

2) 수소 혼소율 제고를 위한 과제

소규모 왕복 가스터빈(reciprocating gas turbine)의 경우 수소 함량 70% 수준의 천연가스를 안정적으로 처리할 수 있다는 것이 입증되었다. 또한 실험 단계에서는 수소 전소가 가능한 터빈도 이미 존재하는 것으로 알려졌다. 소형 가스터빈의 경우 정제 및 석유화학 분야에서 90% 이상의 수소 혼소가 가능한 사례가 쉽게 발견되는데, 실제 국내 일부 정제소에서 20여 년간 수소함량이 최대 90%인 가스를 주입하여 40MW급 가스터빈을 가동해온 것으로 파악되었다.

수소 혼소율은 관련 기술, 장비 상태, 가용 인프라, 수소 혼소 적합성 등에 따라 상이하게 나타나며, 고온 상태에서 질소산화물 배출 저감을 위해 물을 사용할 경우 효율 상실 문제 등을 어떻게 극복하느냐가 혼소율 수준을 결정하게 된다. 일반적으로 수소 연소 시에 ‘비예혼합화염(non-premixed flame)⁸⁾ 방식’이 적용되는데, 이 경우 수소 연소 시 화염의 안정성(flame stability)은 확보할 수 있지만 질소산화물 등 환경오염물질이 추가로 배출된다. 질소산화물의 배출을 저감하기 위해서는 물을 주입하는 ‘습식 저(低) 배기가스(Wet Low Emissions) 기술’을 활용하지만 물 주입에 따른 연소효율 저하는 피할 수 없다. 결과적으로 연소효율의 저하 문제를 극복하려면 터빈의 종류를 다양화하거나 연소 방식을 다양화해야 하는데, ‘건식 저(低) 배기가스(Dry Low Emissions) 기술’이 적용된 가스터빈을 활용한다면 비예혼합 연소 시스템 사용을 최소화할 수 있을 것이고 연소효율 저하 문제도 일정 수준 극복이 가능할 것이다. 한편 수소 혼소용으로 가스터빈을 개조할 경우 LNG 단일연료를 사용할 때보다 연료 시스템의 부피 흐름을 최대 3배까지 허용되도록 개조가 이루어져야 한다. 부피 측면에서 LNG와 동일한 발열량을 얻으려면 부피의 흐름 확대가 필수적이기 때문이다.

수소-LNG의 안정적인 혼소 및 혼소율 제고를 위해 주로 논의되는 기술적 극복 과제는 크게 세 가지다. 첫째 과제는 자착화(autoignition)⁹⁾와 역화(flashback)¹⁰⁾ 문제의 극복이다. 앞서 살펴본 바와 같이 수소의 연소속도는 평균적으로 170~291cm/s 수준이다. 이는 LNG 연소속도의 4~5배에 달하는 속도며, 수소의 희박폭발한계 역시 낮은 수준이라 반응속도가 매우 빠르다. 이는 수소의 저장 및 연료 투입 시 폭발 위험이 높다는 것을 의미한다. 따라서 자착화와 역화문제는 발전용 수소의 안전한 혼소 및 전소를 위해 반드시 극복되어야 할 문제점이다. 두 번째 과제는 연료 혼합에 의한 희박가연(lean blow out) 범위의 변동이 유발하는 연소 불안정성을 극복하는 것이다. 수소 혼합비율에 따라 희박가연범위가 변동하고 그에 따라 연소의 안정성이 저하된다면 발전사업자 입장에서 수소를 연료로 투입하기가 쉽지는 않을 것이다. 마지막 세 번째 과제는 수소의 빠른 반응속도와 확산속도에 대응한 연소기의 적절한 개조다. 연소기를 개조할 때 ‘Wobbe Index(WI)’를 참고하게 되는데, 이 지표는 발전연료가 다변화될 때 설계된 연소기의 허용 한계

8) 비예혼합화염(non-premixed flame) 방식은 연료(fuel)와 산화제(oxidizer)를 반응 전에 미리 혼합해두지 않는 연소방식이다. 이와 반대되는 개념이 예혼합화염(premixed flame) 방식인데, 이때 미리 혼합된 연료와 산화제가 균일하게 혼합되지 않을 경우 화염의 안정성이 떨어지는 문제가 있다. 따라서 비예혼합화염 방식에서는 화염 및 연소의 안정성 제고 등을 목적으로 연료와 산화제를 미리 혼합해두지 않는다.

9) 자착화(autoignition)는 특정 압력과 열상태에서 단독으로 발화하는 현상을 의미한다. 수소는 자착화가 우려될 정도로 착화성이 우수하지만 이것이 지나칠 경우 역화(flashback) 현상이 발생하며, 이를 제어하기 위해 엔진의 출력을 제한하기도 한다.

10) 내연기관에서 실린더로부터 흡기관이나 기화기 방향으로 불꽃이 거꾸로 흐르는 현상을 의미한다. 수소에 산소나 공기가 역류되어 포함된다면 역화(flashback)의 위험이 있다.

를 판단하는 기준이며, WI의 변화폭을 감안하여 연소기의 개조가 적절히 병행될 때 수소 혼합비율을 높은 연료를 터빈에 안정적으로 주입할 수 있다.

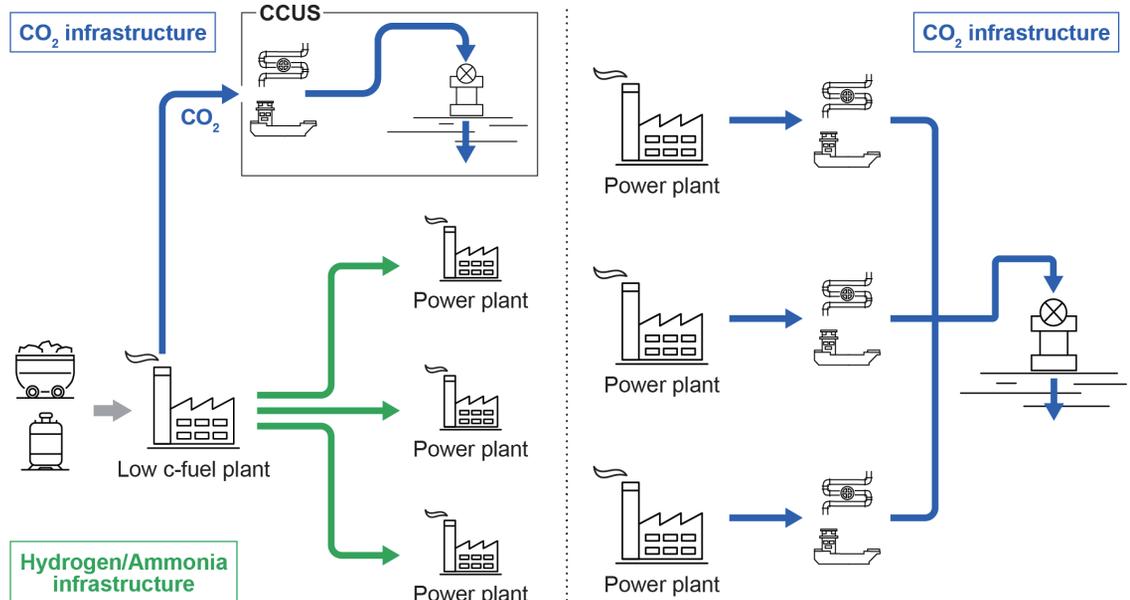
다. CCUS의 활용

기존 화력발전설비에 CCUS(Carbon Capture Utilisation and Storage) 장치를 부가할 경우 저탄소 에너지시스템에서도 기존의 화력발전소를 지속적으로 이용하면서 전력계통의 안정성도 제고할 수 있다. 이 경우 화력발전설비의 퇴출 시점을 탄력적으로 조정할 수 있으므로 발전부문에서의 저탄소 이행 비용을 절감할 수 있을 것이다. IEA에서는 CCUS 기술을 적용한 화력발전설비의 온실가스 배출량은 해당 기술을 적용하지 않은 발전설비 대비 85~98%가량 저감된다고 보고 있다. 이러한 측면에서 CCUS가 2050 탄소중립 달성 과정에서 중요한 역할을 하리라는 것을 어렵지 않게 예측할 수 있다. 탈탄소 이행 과정에서 중단기적으로 수소와 암모니아의 혼소가 널리 활용될 경우¹¹⁾ CCUS까지 추가적으로 활용한다면 연료부문에서의 저탄소화와 발전과정에서의 온실가스 추가 감축 효과를 기대해 볼 수 있을 것이다. 따라서 2050 탄소중립 시대에 무탄소 신전원의 보급을 촉진하는 도구로 CCUS의 적극적인 활용을 검토할 가치가 있어 보인다. CCUS 장치를 활용하는 방식은 크게 두 가지로 분류된다. 첫 번째 방식은 이산화탄소가 대기로 방출되기 전 배연가스(flue gas) 단계에서 이산화탄소를 분리·포집하는 방식이다(연소 후 포집(post-combustion capture) 방식). 배연가스를 탈황 후 아민(amine) 기반의 용제로 이산화탄소를 흡수하게 된다. 두 번째 방식은 순산소 연소(oxy-fuel) 보일러로 설비를 교체한 후 이산화탄소를 분리하는 방식이다. 순산소 연소 보일러와 연계한 CCUS는 보일러 외에도 발전설비 전반에 걸친 설비 업그레이드가 필요할 수 있으므로 연소 후 포집 방식보다 소요되는 비용이 클 가능성이 높다. 그럼에도 순산소 연소 보일러를 활용할 경우 배연가스 스트림이 거의 100% 이산화탄소로 구성되므로 추후 이산화탄소를 분리하는 데 소요되는 비용은 줄어들 것이다.

한편 CCUS를 화력발전소에 도입한다면 크게 두 가지 경로로 탄소배출을 저감할 수 있다. 하나는 개별 화력발전소 설비 자체를 개조하여 발전 단계에서부터 CCUS를 활용하는 경로며, 다른 하나는 연료변환 발전소에서 혼소용 저탄소 수소 내지 암모니아를 생산할 때 CCUS를 활용함으로써 이산화탄소를 포집하는 경로다. CCUS를 저탄소 수소 및 암모니아 생산 단계에 적용하는 경로는 개별 화력발전소에서 CCUS 활용을 위해 설비를 직접개조하는 방식보다 이산화탄소 포집 관련 비용이 상대적으로 적다. 저탄소 연료생산 단계에서부터 이산화탄소를 포집하므로 수소 및 암모니아 내의 이산화탄소 함량이 배연가스 내의 이산화탄소 함량보다 높기 때문이다.

11) 장기적으로 수소와 암모니아를 전소하는 이상적인 기술력을 달성한다면 CCUS의 활용은 축소될 수 있다. 즉 CCUS는 화석연료(석탄 및 LNG 등)에 수소와 암모니아를 혼소발전하는 '중단기 시점에서의 탄소배출 저감'에 기여하는 바가 더 크다고 이해할 수 있겠다.

그림 1 CCUS의 탄소배출 감축 경로 도식화



주: (좌) 연료변환 발전소의 농축공정 가스(concentrated process gases)에서 CCUS로 이산화탄소를 포집하여 탈탄소화된 연료를 만들고, 이를 개별 발전소로 수송하는 경로, (우) 개별 발전소의 배연가스에서 CCUS로 이산화탄소를 포집하여 수송 및 저장하는 경로
 자료: IEA. 2021a. “The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector.” p.36 그림 재인용

4. 일본의 무탄소 신전원 활용

가. 제6차 에너지기본계획

지난 10월 22일, 일본 정부는 2050 탄소중립을 목표로 2030년에 2013년도 온실가스 배출량(14.08억CO₂톤) 대비 46%의 감축하는 등 향후 에너지정책 추진 방향을 제시하는 ‘제6차 에너지기본계획’을 공식 발표하였다. 일본의 제6차 에너지기본계획에서 2030년 전원믹스를 살펴보면 재생에너지 발전비중은 2030년 총 발전량의 36~38%, 원자력은 20~22%, 화력은 41%를 차지하고 있으며, 수소 및 암모니아 발전비중이 약 1% 추가된 점이 특징적이다.

화력발전의 경우 재생에너지의 변동성을 보완하여 전력공급의 안정성을 확보하는 차원에서 일정 비중을 유지하되 장기적으로는 점진적으로 폐쇄해나가는 방침을 밝혔는데, 그 과정에서 수소와 암모니아를 화력 발전에 혼소하여 탄소배출을 저감하는 방안을 구체화하였다. 2030년 일본 발전부문의 수소 및 암모니아 보급 및 활용목표에 따르면 중단기적으로 가스복합화력에 대해 수소 30% 혼소를 추진하고 장기적으로는 100% 전소를 달성할 계획이다. 한편 일본 정부는 제6차 에너지기본계획을 통해 석탄화력에 암모니아 혼소를 20%를 목표로 실증을 추진하고 비화석가치 평가시스템을 마련할 계획을 밝혔다. 아울러 제6차 에너지기본계획 수립단계부터 수소사회의 실현을 위해 수소 공급비용을 화석연료와 동등한 수준까지 낮추고 수요측의 이용을 확대하고자 하였는데, 이번 제6차 에너지기본계획 확정안에서 안정적인 수소 공급을 위한 해외 저렴한 수소의 확보 및 일본 내 수소생산 기반의 확립 방침을 명시하였다.

표 5 일본 제6차 에너지기본계획 - 2030년 전원믹스

2030년	원자력	석탄	석유	LNG	재생E	수소 및 암모니아	합계
발전량(TWh)	187~205	177	19	187	336~355	9	934
전원구성(%)	20~22	19	2	20	36~38	1	100

자료: 일본 경제산업성 “제6차 에너지기본계획” 초안 및 확정안을 참고하여 직접 작성

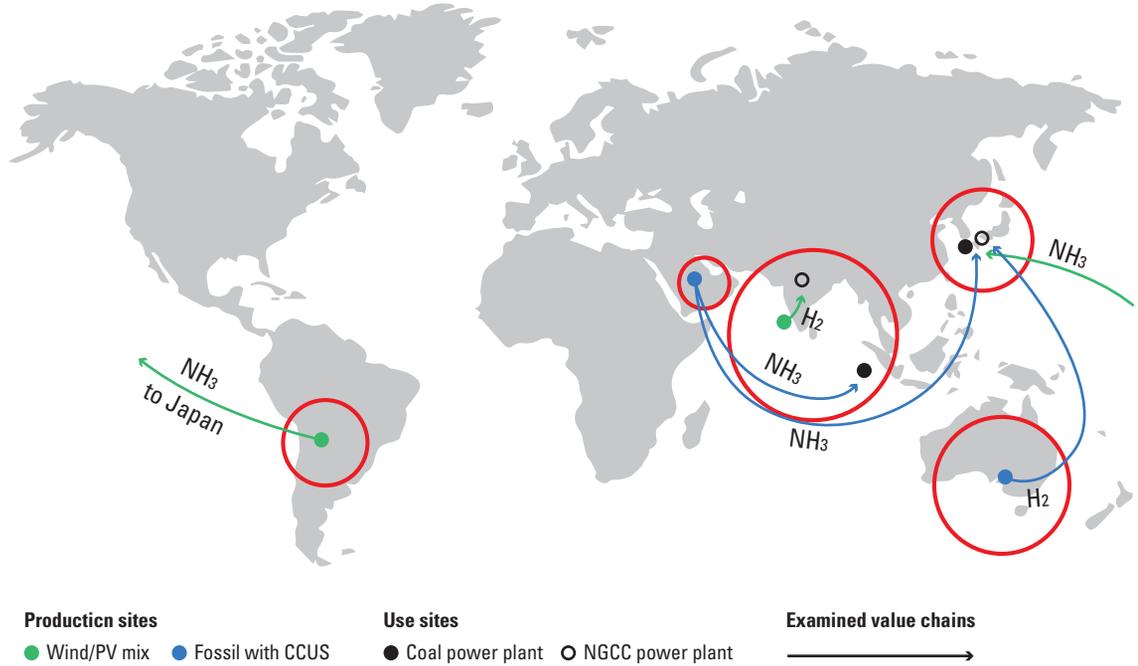
나. 일본의 발전부문 수소 및 암모니아 활용 현황

지난 8월 일본에서는 도쿄전력과 주부 전력의 합작법인 ‘JERA’에서 수소 혼소 프로젝트에 대한 일본 정부의 승인을 획득하였다. 이에 따라 2025년 3월 말까지 기운영 중인 대형 LNG 복합화력 발전소에 대해 30%의 수소 혼소발전을 시행하게 되는데, 이는 일본 내에서 상업용 LNG 복합화력 발전설비에 수소를 연료로 투입하는 최초의 프로젝트에 해당한다. 일본 ‘신에너지·산업기술 종합개발기구(New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)’로부터 5년간 프로젝트 수행에 대한 재정적 지원을 받게 되었다.

당초 일본 정부는 2050 탄소제로 달성을 위해 2030년까지 약 2.2GW의 초임계(supercritical) 석탄설비의 폐지를 발표하였다(2020년 10월). 그리고 잔여 초초임계(ultra supercritical) 석탄화력 발전소에 대해 암모니아 혼소율을 높여 2040년 경에는 암모니아 전소를 달성할 계획을 수립하였다. 아울러 일본 정부는 안전한 수소저장 및 운송매체(암모니아, 액화수소, 메틸사이클로hex산)를 활용하여 수소발전의 확대를 공표하였고 2030년까지 일본 내 전체 화력발전소에 대해 수소연료를 전면 적용할 방침을 밝혔다. 이렇듯 일본은 국가 차원에서 수소 전략을 수립한 최초의 국가이자 발전연료로서의 수소의 개념을 정립하고 활용하는 수소 선도국이다. 이러한 배경에서 일본의 대표 발전사의 합작법인인 JERA가 상업용 LNG 복합화력 발전소에 수소를 혼소하는 프로젝트를 추진하게 된 것이며, 해당 프로젝트는 2030년까지 수소 기반 발전설비를 1GW까지 확충하고 장기적으로 15~30GW까지 확대하기 위한 마일스톤(milestone)이 될 것으로 전망된다.

JERA의 수소혼소 프로젝트 외에도 일본 IHI 社에서는 혼소와 관련된 ‘전략적 혁신창조 프로그램(Strategic Innovation Program, SIP) 프로젝트를 주관하고 있으며, 이를 통해 암모니아 혼소 과정에서 발생하는 질소산화물을 억제하고 혼소설비를 개량하는 연구를 진행 중이다. 현재 일본의 석탄-암모니아 혼소 기술은 실증 경험이 광범위하게 축적된 것으로 평가되며 상용화 직전 단계인 것으로 보인다. 한편 수소와 암모니아의 혼소발전을 주도하고 있는 일본은 향후 발전용 수소 및 암모니아의 소비량이 크게 증가할 경우를 대비하여 사우디아라비아, 호주, 칠레 등으로부터 저렴한 수소와 암모니아 확보 경로를 구축하고 있다. 사우디아라비아로부터는 천연가스 기반의 암모니아를, 호주로부터는 석탄 기반의 수소를 수입하며 칠레 등 남미국가들로부터는 재생에너지(풍력 및 태양광) 기반의 암모니아와 수소를 수입하는 것으로 알려졌다.

그림 2 일본 화력발전 부문 수소 및 암모니아 유통 흐름



자료: IEA. 2021a. “The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector.” p.61 그림 편집 및 재인용

5. 결론

무탄소 혹은 저탄소 연료인 수소와 암모니아를 화력발전에 혼소하는 방안은 2050 탄소중립 이행 과정에서 경제수명에 도달하지 않은 화력발전설비를 조기폐쇄하는 급진적 방안의 대안으로 평가받는 탈탄소 전략이다. 기후변화 대응과 탄소중립을 이행하는 과정에서 변동성 재생에너지 자원의 보급 및 활용 확대는 탄소중립 시대 전력정책의 중심이 될 수밖에 없다. 그러나 전력시스템의 운영 측면에서 보았을 때 재생에너지 보급 확대에 따른 적절한 망 설비투자 등이 이루어지지 못한다면 지금과 같은 변동성 재생에너지 보급 중심의 정책은 결국 한계에 봉착하게 될 것이다.

탄소중립이라는 명목하에 화력발전설비를 일방적으로 조기 퇴출시킨다면 산업의 급격한 전환에 따른 사회적·경제적 혼란이 적지 않을 것이다. 특히 ‘정의로운 전환(Just Transition)’ 관점에서 화력발전의 질서 있는 퇴출과 적절한 보상이 병행되지 않을 경우 사회적 갈등 비용과 화력발전설비의 좌초자산화에 따른 발전산업계의 경제적 손실이 크게 증가할 것이며, 결국 에너지전환 비용부담의 형태로 전기요금에 고스란히 전가될 우려가 있다.

이러한 측면에서 일본은 2050 탄소중립 이행 과정에서 저탄소 전력시스템의 방향성 정립에 중요한 시사점을 제공한다. 일본은 발전연료에 대한 높은 수입의존도, 전력수급에서 화력발전의 기여도, 고립계통의 특성, 중앙 집중형 에너지정책 수립 및 운영체계 등 우리나라 전력산업 거버넌스와 물리적 구조가 유사한 부분이 많다. 그러한 일본이 2050 탄소중립의 이행 전략으로 ‘수소·암모니아의 혼소 및 전소를 활용한 잔존

화력발전설비의 활용'을 공식화한 것은 에너지전환의 사회적·경제적 충격을 최소화하면서 탈탄소를 이행할 수 있는 길을 제시한 효과가 있다. 특히 일본 정부는 수소·암모니아 혼소 및 전소발전의 보급 활성화를 위해 저렴한 수소 및 암모니아 확보방안도 구체화하고 있는데, 향후 우리 정부가 발전부문에 수소와 암모니아 활용을 활성화하려면 일본 탈탄소 정책의 주안점을 심도 있게 고찰할 필요가 있다.

수소 및 암모니아의 혼소를 통해 화력발전소의 탄소배출량을 저감하면서 CCUS까지 병행하여 활용한다면 변동성 재생에너지 자원 확대에 대비한 유연성 자원으로 기존 화력발전소를 활용함과 동시에 탄소중립에도 일정 수준 기여하는 효과를 거둘 수 있다. 또한 화력발전소의 퇴출 시기도 탄력적으로 조정이 가능하게 되므로 정부 입장에서도 탈탄소 정책에 따른 산업 충격과 국민의 정책저항을 어느 정도 완화하는 효과를 기대해 볼 수 있다. 기후변화 대응 및 2050 탄소중립 이행을 시대흐름에 부응한 불가역적(irreversible) 정책목표로 본다면 이를 달성하는 과정에서 발생할 사회적·경제적 비용을 최소화하는 액션플랜(action plan) 구축이 중요할 것이다. 수소와 암모니아로 대표되는 무탄소 신전원의 적극적인 활용은 그에 대한 하나의 대안으로 평가할 수 있을 것이다.

참고문헌

국내 문헌

- 관계부처합동. 2021.10. 『2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안』
- 관계부처합동. 2021.10. 『2050 탄소중립 시나리오안』
- 김재엽·이태의. 2021. 『무탄소 신전원 해외사례 및 정책방향 연구』. 에너지경제연구원 수시연구보고서. 에너지경제연구원
- 전력연구원 발전기술연구소. 2021.11. 『Carbon-free 암모니아 발전기술』. 에경연-전력연구원 세미나 발표자료

외국 문헌

- IEA. 2021a. “The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector.”
- IEA. 2021b. “World Energy Outlook 2021.”
- 経済産業省. 2021.10. “第6次エネルギー基本計画.”