수소·암모니아 가스터빈 발전의 기술 동향 및 전망

이 종 민 한전 전력연구원 무탄소발전연구실장(lee.jm@kepco.co.kr)

1. 서론

최근 들어 석탄 및 LNG 등의 화석연료를 이용한 발전산업에서의 가장 큰 관심사는 지구온난화와 관련한 온실가스, 특히 이산화탄소(CO_2)의 배출 문제일 것이다. 온실가스 배출에 대응하기 위해 기존의 화석연료를 탄소(C)가 포함되어 있지 않은 수소(H2)나 암모니아(NH3)의 무탄소(Carbon-free) 연료로 단계적으로 전환하는 발전방식은 좌초될 수 있는 기존의 발전 및 계통 시스템을 유지·활용할 수 있을 뿐만 아니라, 단·중기적으로는 이산화탄소의 감축을, 그리고 장기적으로는 탄소중립을 달성하는 기술의 대안으로 기대되고 있다.

2021년 10월 정부는 2050년 탄소중립을 위한 2030년 국가온실가스 감축 목표를 전환(발전)분야에 2018년 배출량 대비 44.4%에 해당하는 약 1.2억톤의 이산화탄소를 감축하는 계획을 발표하였다. 정부의 온실가스 감축계획은 2030년까지 단기적으로 석탄에 혼소되는 암모니아로 22.1TWh의 전력을 생산하고, 장기적으로 2050년에는 무탄소(수소·암모니아) 터빈이 전원믹스의 13.8~21.5%를 담당하는 것을 포함한다. 이에 한전 및 발전그룹사에서도 2021년 11월 암모니아 및 수소발전과 관련하여 아래와 같이 중·장기적 수소선도 국가 비전을 위한 수소, 암모니아 발전 계획을 밝혔다.[1)]

그림 1 수소·암모니아를 활용한 무탄소 발전 전원화 로드랩

이에 본 고에서는 암모니아와 수소 발전, 특히 이를 이용한 가스터빈 발전에 대한 기술 동향과 전망을 통해 기술 적용 시 고려해야 할 점 및 종합적인 시사점 등에 대해 살펴보고자 한다.

2. 기술 개요 및 글로벌 동향

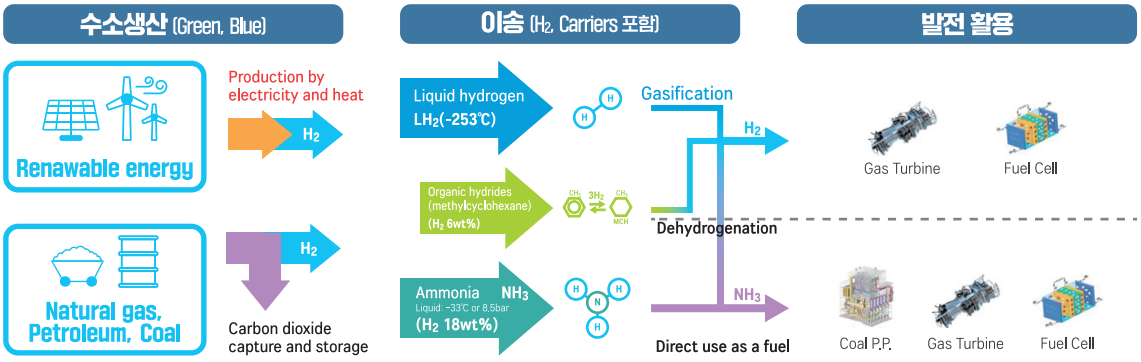
가. 수소·암모니아 발전 기술 개요

재생에너지 및 다양한 화석연료로부터 생산된 수소(그린·블루·청록수소 등)를 가스터빈 또는 연료전지의 연료로 직접 활용하면 온실가스 배출을 저감할 수 있다. 그러나 기존의 가스터빈 발전 연료인 LNG를 수소로 대

1) 산업부 수소경제 성과 및 수소선도 국가비전 민관합동 보고대회 (2021. 11) 자료 참조

체하기 위해서는 국내 수소 생산 잠재량 대비 많은 양[2]의 수소가 필요하기에 가스터빈 등의 발전시스템을 활용한 대용량 전력생산 분야에서의 수소활용은 상당부분 해외에서 도입해 이를 발전 연료로 활용하는 방안을 고려해야 한다.

그림 2 해외로부터의 수소 및 수소캐리어의 생산 및 이송 그리고 발전활용[3]



[그림 2]의 수소의 생산 및 이송, 저장 그리고 활용의 전체 흐름 개략도에서 보는 바와 같이, 해외에서 생산된 수소(그린 및 블루 수소 등)를 국내로 이송 및 활용 시에는 액화를 통해 최소한의 부피로, 즉, 최대한의 에너지밀도를 갖도록 하여 해상 운송하는 것이 기술, 경제적으로 허용 가능한 시나리오가 될 수 있다. 암모니아(-33℃)는 수소(-253℃)에 비해 액화온도가 높아 이송 및 저장 시 에너지 손실이 적으며, 해외로부터 도입, 활용도 이미 수십 년간 상업화되어 운용된 만큼 수소캐리어로서의 기술·경제적 실현성이 단기적으로는 높게 평가된다. 더불어, 장거리 운송을 통해 도입된 암모니아를 직접 연료로 활용하거나 또는 수소를 추출해 활용하는 방법 등 다양한 기술적 옵션은 각 활용 기술의 성숙도 및 실현성 그리고 경제성 등을 고려하여 실현함이 바람직할 것이다.

나. 수소·암모니아 글로벌 동향

현수소 생산 및 이송 비용은 수소 및 암모니아의 발전 연료 활용에 매우 중요한 인자이다. 그린 및 블루수소의 생산비용은 2021년 기준으로 1.7~10$/kg 내외가 되는 것으로 보고 되고 있으며, 그린수소의 가격이 블루수소에 비해 3~5배 정도 높은 것으로 보고되고 있다. 그러나, 2030년 이후에는 재생에너지 발전단가의 하락으로 그린수소 생산 가격은 블루수소에 비해 더 낮아질 것으로 예측되며, 2050년에는 1$/kg 내외가 될 것으로 전망되고 있다.[4] 수소로부터 생산되는 암모니아 또한 수소의 생산 가격에 비례적으로 연동되어 있어, 수소의 생산가격은 무탄소 연료의 실제적인 발전연료로의 활용에 큰 영향을 미칠것으로 전망된다. 한편, 국내에 있어 수소의 생산, 특히 재생에너지를 이용한 그린수소 및 CO_2 포집, 처리를 통한 블루수소의 생산은 매우 제약적이다. 그러므로 대부분의 발전 연료용 수소 및 암모니아의 해외도입은 필수적이다. 이때 수소 및 암모니아의 해

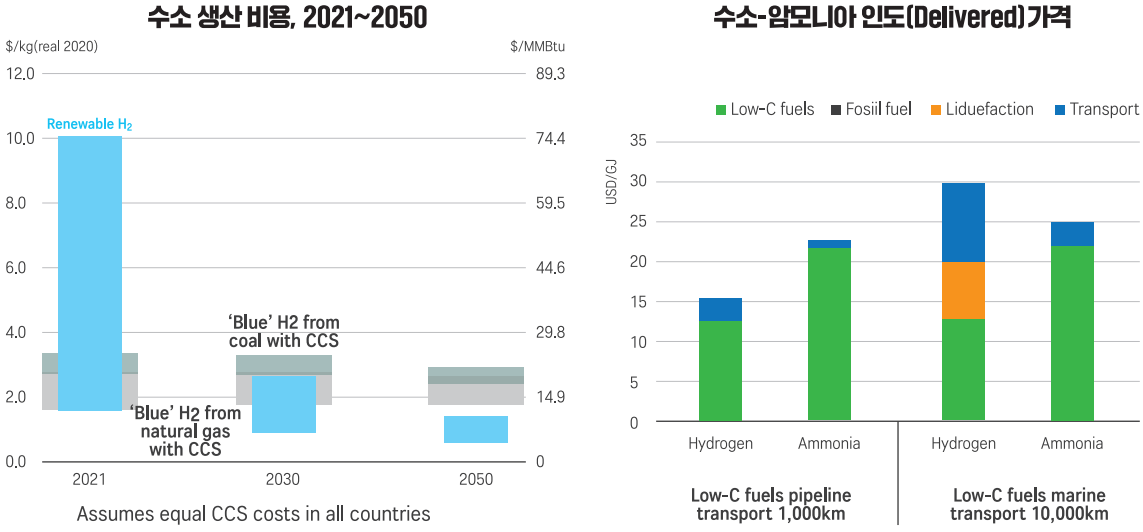
2) 가스터빈의 수소 연료 사용량은 전력생산량 1.0GWh당 약 50톤 내외의 수소가 필요 (효율 60% 가정)

3) Kobayashi et al., Proceedings of the Combustion Institute (2019)

4) Hydrogen Economic Outlook, 2021(BNEF).

상 운송 비용은, 수소(14~19$/GJ)에 비해 암모니아(2~3&/GJ) 운송 비용이 6~7배 정도 낮고, 장거리 수소 또는 암모니아 인도(delivered) 가격이 암모니아가 약 20%정도 낮은 것으로 예측되어 암모니아의 도입이 보다 경제적인 것으로 보고되고 있다.[5]

그림 3 수소 생산 비용 (2021~2050) 및 해상 운송 비용 추정, (BNEF & IEA 2021)



한편, 가스복합발전 및 석탄보일러에서의 수소 및 암모니아 연료를 통한 발전 시, 손익분기 가격은 혼소율에 따라 가스터빈 수소혼소의 경우 0.8~1.25$/kg-H2 내외에서, 석탄보일러에서 암모니아 혼소 시, 175~225$/t-NH3에서 손익분기 가격이 형성되는 것으로 보고되고 있다(80$/t-$CO_2$ 거래 기준)[6]. 더불어, CO_2 배출거래가격에 대한 각 연료의 손익분기 가격은 CO_2 배출이 더 많은 석탄보일러에서 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

다. 수소·암모니아 가스터빈 기술 동향 및 전망

수소 및 암모니아를 가스터빈에 연료로 활용하는 방식은 기존의 LNG 연료 일부를 수소 또는 암모니아로 대체하여 혼소하는 방식과, 수소 또는 암모니아로만 발전하는 전소 방식이 있다. [표 1]에 나타낸 바와 같이 LNG의 주성분인 메탄과 수소 및 암모니아의 특성을 고찰해 보면, 수소는 메탄에 비해 화염온도가 높고 연소 속도(flame speed)가 매우 빨라 폭발적 반응을 일으키는 반면, 암모니아는 반대로 화염온도가 낮고 연소속도가 느려 상대적으로 잘 타지 않는 특성을 나타낸다. 또한 암모니아는 연료 내 질소(N) 성분을 포함하고 있어 연소 시 다량의 Fuel-NOx(질소산화물)를 발생시킬 수 있다. 그러므로 LNG를 사용하는 가스터빈에 이들 연료를 혼소할 경우, 연소 특성이 크게 변하여 기존 LNG 연소 시에 비해 너무 빨리 타거나 느리게 타 화염의 안정성을 깨뜨린다든지 혹은 역화(flash-back)가 발생한다든지 그리고 NOx 발생을 높여 환경성에 영향을 주는지 등이 주요 기술 개발을 통한 문제해결의 주안점이 될 것이다. 특히, 저농도 혼소에서는 기존 가스터빈의 개

5) IEA, The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector, 2021

6) IEA, Global Hydrogen Review, 2021

조없이 운전 및 제어를 통한 혼소가 가능할 것으로 보이나, 고농도 혼소율에 있어서는 가스터빈 연소기의 개조를 통한 안정적 운전구현이 이루어져야 할 것이다. 더불어, 수소 및 암모니아의 적절한 혼합 연소는 메탄의 특성을 띨 수 있어 연소기 개조 없이 고농도 혼소율을 달성할 수도 있을 것이다.[7]

표 1 다양한 기체 연료의 물성 및 연소 특성[8]

Properties		Methane	Hydrogen	Ammonia
Formula		CH_4	H_2	NH_3
Lower Heating Value	MJ/kg	50.044	119.83	18.6
	MJ/Nm³	35.90	10.77	14.1
Adiabatic Flame Temperature [℃]		1950	2110	1800
Lean Flammability Limit	Vol.%	5	4	15
	Equivalence ratio	0.5	0.1	0.63
Rich Flammability Limit	Vol.%	14.9	75	28
	Equivalence ratio	1.7	7.1	1.4
Wobbe Index (LHV, MJ/Nm³)		43.8	37.6	18.3
Minimum Ignition Energy (10^{-5}J)		33	2	6.8
Flame Speed (m/sec)		0.37	2.91	0.07

수소 가스터빈 분야는 미국 및 유럽 그리고 일본 등에서 Major 제작사(GE, Siemens, Mitsubishi Power 등)를 중심으로 활발하게 연구개발 및 실증 사업화가 진행되고 있다. 효율이 낮고 NOx 발생이 큰 1세대 확산 화염 방식에서 고효율의 Low-NOx 방식인 2세대 예혼합 방식의 가스터빈에 수소를 혼소하여 발전하는 방식에 관한 연구 및 실증 사업화가, 그리고 고농도 수소 혼소 또는 수소 전소를 위한 3세대 다공형 가스터빈 연소기 기술이 개발되고 있다.

대형 가스터빈 분야에서는 GE에서는 50%[9] 수소 혼소가 가능한 연소기(2.6e 모델) 개발을, Siemens는 30% 수소 혼소가 가능한 연소기(ULN 3.0 모델)를, 그리고 Mitsubishi Power사도 최신 J급 가스터빈 기종에 30% 수소 혼소가 가능한 연소기를 개발한 것으로 보고되고 있다. 이의 실증을 위해서 GE 가스터빈 대상으로 오하이오주에 2021년 말부터 15%의 수소 혼소를 시작으로 점차 고농도 수소 혼소를 통해 2030년 이후에는 수소 전소를 목표로 하는 사업이 진행되고 있으며, Mitsubishi Power에서는 2025년부터 미국 유타주에서 그린수소를 활용한 수소 혼소 실증을, 그리고 전소를 위한 연소기(Multi cluser형) 또한 2025년까지 개발하고 향후 실증을 추진할 계획이다.[10]

중소형 가스터빈 분야에서 미국 Baker Hughes사는 수소 전소가 가능한 5/12/16MW 용량의 NovalLT 모델을 개발하였으며, Siemens사의 소·중형(5~62MW) 가스터빈 기종의 수소 혼소율은 최대 60% 수준에 달하는 것으로 보고되고 있다. 특히 EU의 그린수소 활용을 위한 수소전소 가스터빈 프로젝트에서는 Siemens의 SGT-400 기종을 대상으로 진행 중에 있다.[11]

---

7) EPRI(LCRI) Technology Insights, Ammonia and Hydrogen Fuel Blends for Today's Gas Turbines (2021)

8) 이후경 외, 탄소중립을 위한 암모니아 연소기술의 연구개발 필요성, 2021

9) 본 고에서 가스터빈 대상의 수소 및 암모니아 혼소율은 부피 기준임.

10) Mitsubishi Power, Advanced Technology (Virtual) Conference (2021)

11) GE 및 Siemens, Baker Huges 각 사의 인터넷 홈페이지

국내[12]에서는 두산에너빌리티가 자체 개발한 대형 가스터빈 S1(270MW), S2(380MW)를 대상으로 수소 혼소 50%를 목표로 기술개발을 통해 2027년까지 실증 추진 예정이며, 2030년 이후에는 수소 전소가 가능할 수 있도록 연구개발 및 실증을 추진할 예정이다. 중소형 가스터빈(5~90MW) 대상으로는 수소 전소를 목표로 2030년 이전 실증을 추진할 예정이며, 운영 중인 대형 가스터빈의 Retrofit를 통한 수소 혼소(~30%)를 위해 연소기 개발 및 실증 사업도 추진할 것으로 알려져 있다.

한편, 한화임팩트는 수소 혼소용 연소기 기술을 보유한 PSM을 인수하여 관련 사업을 추진 중에 있다. 한화임팩트는 FlameSheetTM 연소기를 통해 네덜란드와 미국에서 수소 혼소 35%까지 실증한 것으로 보고하고 있으며, 현재 수소 40% 혼소 사업을 미국에서 수주하여 진행 중에 있으며, 그리고 50% 수소혼소 실증을 국내 서부발전과 함께 진행 중인 것으로 보고되고 있다.

암모니아 가스터빈 분야는 수소 가스터빈에 비해 상대적으로 그 진행 및 적용, 사업화가 아직은 미비한 단계다. 이는 암모니아의 연소 속도가 LNG에 비해 상대적으로 느려 화염의 불안정을 일으키며, 더불어 NOx의 배출이 크게 증가하기 때문이다. 이러한 암모니아 가스터빈의 기술적 난제를 극복하는 연구개발과 더불어 암모니아를 직접 활용하는 방식과 암모니아로부터 수소를 추출하여 활용하는 방식, 그리고 암모니아와 수소를 혼합하여 활용하는 방식 등에 대한 기술적 검토와 관련 기술의 개발이 함께 진행되고 있다.

암모니아 가스터빈은 일본(IHI 및 Mitsubishi Power)이 대표적으로 연구개발을 진행하고 있으며, IHI에서는 2MW 가스터빈(IM270 기종)에 20% 혼소를 성공한 것으로 보고하고 있으며, Mitsubishi Power에서도 2025년까지 암모니아 가스터빈 기술개발을 통해 상업화 실증을 계획하고 있는 것으로 알려져 있다.

한편, 한전 전력연구원에서는 수소와 암모니아의 가스터빈 연료 활용을 위해 국내에 가장 많이 보급된 F급 가스터빈(150MW급)에 연소기 개조 없이 수소 및 암모니아를 혼소하는 운영 기술을 개발 중에 있다. 특히, 운영 중인 F급 가스터빈에 대해 수소의 혼소 한계 평가를 거쳐 최대 혼소율을 도출하고 암모니아 혼합 시 수소의 혼소율 증대에 초점을 두고 연구 개발 중에 있다. 2024년까지 연구 개발 완료 이후, 저농도(15%내외) 수소(암모니아) 혼소 실증을 시행하고, 2027년 중반까지 고농도 혼소 실증을 통한 상업화를 진행할 예정이다.[13]

3. 시사점 및 고려사항

온실가스 저감을 위한, 궁극에는 탄소중립을 위한 수소 및 암모니아 가스터빈 발전은 타 국가에 비해 에너지 자원이 부족하고 전력망이 고립된 우리나라에서는 필히 고려해야 하고 또 실현해야 하는 기술 분야이다. 그럼에도 불구하고 다음의 사항은 본 기술의 국내 실현 및 상업화 시기에 있어 다시 한번 점검해야 할 부분이라 생각한다. 첫째는 본 발전 기술의 실현성에 가장 큰 영향을 미칠 연료, 특히 수소의 수급 및 경제성이다. 수소의 이송, 저장에 있어 기술성숙도는 어떻게 진행될 것이며, 이로 인한 가격 경쟁력은 어디까지 낮출 수 있느냐가 큰 관건이 될 것이다. 아마도 선진국에서의 수소 활용 또한 이러한 제약으로 인해 현재의 기술 수준(가능 혼소율)보다 낮은 기술 수준(혼소율)에서의 상업화가 이제 막 추진되고 있는 것으로 판단된다. 현재로서는 수소는 타 연료에 비해 매우 높은 가격과 이송 및 저장에 대한 낮은 기술성숙도로 인해 당장 혼소율을 높여 상업화하

12) 산업부, 수소, 암모니아 발전 실증 로드맵 수립 TF 2차 세미나 자료 (2022)

13) 전력연구원, 2050 탄소중립 전략기술-연료전환, KEPRI News, 2022

기에는 타 기술대비 온실가스 저감의 이익보다는 발전원가의 상승에 더 큰 원인을 줄 것으로 판단되기 때문이다. 더불어, 이의 시나리오에 따라 암모니아의 직접 활용성 또는 암모니아로부터의 수소 추출을 통한 활용 경제성 등이 판단되기 때문에, 다양한 시나리오를 기반으로 한 수소, 암모니아 가스터빈의 기술실현 및 상업화에 대한 계획이 이루어져야 할 것이다.

둘째는 무탄소 연료에 대한 주민 수용성 부분이다. 수소의 폭발성 및 암모니아의 유독성은 또 하나의 사회적 위기감을 느끼게 할 수 있는 부분으로, 관련 기술의 실현에 앞서 안전한 취급 및 활용, 그리고 문제 발생 시 처리방안까지 주변 주민의 공감을 얻을 수 있는 대책이 강구되고 수용되어야 할 것이다.

끝으로 상기의 제약 및 약점을 가지고 있음에도 불구하고 탄소중립을 위한 궁극적 기술 대안이 될 수 있는 수소, 암모니아 가스터빈 발전은, 지속성장 가능한 발전분야의 새로운 기술적 시발점이 될 수 있기에 정부 정책의 선도와 국가적 원팀을 통한 기술실현이 이루어지길 기대한다.

참고문헌

국내 문헌

- 산업부, 수소경제 성과 및 수소선도 국가비전 민관합동 보고대회 발표자료, 2021
- 산업부, 수소·암모니아 발전 로드맵 TF 2차 회의 세미나 자료, 2022
- 이후경 외, 탄소중립을 위한 암모니아 연소기술의 연구개발 필요성, J. Korean Soc. Combust. 26(1), 59~83, 2021
- 전력연구원, 2050 탄소중립 전략기술-연료전환, KEPRI News, vol. 302, 2022

외국 문헌

- BNEF, Hydrogen Economic Outlook, 2021
- EPRI(LCRI), Technology Insights, Ammonia and Hydrogen Fuel Blends for Today's Gas Turbines, 2021
- IEA, Global Hydrogen Review, 2021
- Kobayashi et al., Proceedings of the Combustion Institute, 2019
- M. Uchida et al., Performance of ammonia/Natural Gas Co-Fired Gas Turbine with Two-Stage Combustor, AICHE conference, 2019
- Mitsubishi Power, Advanced Technology (Virtual) Conference Presentation Material - Carbon Neutral Technology, 2022

웹사이트

- http://www.bakerhughes.com/gas-turbines/novalt-technology
- http://www.ge.com/gas-power/future-of-energy/hydrogen-fueled-gas-turbine
- http://www.siemens-energy.com