

암모니아 연소 특성 및 기술개발 동향

†이민정 · 김유성* · 마채운* · 배준희* · 염찬빈*

서울과학기술대학교 미래에너지융합학과 교수,

*서울과학기술대학교 미래에너지융합학과 학부생

(2023년 9월 1일 접수, 2023년 9월 24일 수정, 2023년 9월 24일 채택)

Ammonia Combustion Characteristics and Technology Development Trend

†Min Jung Lee · Yusung Kim · Chaewoon Ma · Junhee Bae · Chanbin Yeom

Dept. of Future Energy Convergence, Seoul National University of Science and
Technology, Seoul 01811, Korea

(Received September 1, 2023; Revised September 24, 2023; Accepted September 24, 2023)

요약

본 연구에서는 최근 관심이 급격히 증대되고 있는 암모니아 연료에 대해 연소기술 중심의 기술 동향과 개발 방향에 대해 살펴보았다. 암모니아 연료의 필요성 및 수소 캐리어로서의 청정 암모니아 전주기 가치 사슬에 대해 소개하였으며, 암모니아 연소 특성에 대한 기초 개념과 화염 안정성 및 저NOx 연소기술 측면에서 암모니아 연소기술의 개발 방향을 제시하였다. 마지막으로는 암모니아 연소기술 동향에 대해 발전 및 산업 부문별로 그 특징을 살펴보고, 이에 관한 향후 연구 개발 방향을 도출하였다. 본 논문을 통해 암모니아 연료에 대한 기초적인 지식과 향후 개발 방향 및 의미에 대해 전달하고자 한다.

Abstract - This study explained the need for ammonia fuel and the value chain as a hydrogen carrier. The basic concept of ammonia combustion characteristics and the development of flame stability and low NOx combustion technology were introduced. In addition, through the trend of ammonia combustion technology, the characteristics of ammonia combustion technology in the power generation and industrial sectors were examined, and the author's opinions were included. Through this paper, the author intends to give some overview of basic knowledge about ammonia fuel and its future development direction and meaning.

Key words : ammonia fuel, ammonia combustion, ammonia demand, carbon-free fuel, low NOx

I. 서론

1.1. 무탄소 연소 기술의 필요성

2018년 기준 국내 온실가스 배출량의 92%는 에너지 부문에서 발생하였으며, 이 중 99% 이상은 연료 연소로부터 발생하였다[1]. 이에 따라 2021년 수립된 상향된 2030 국가온실가스감축목표(NDC) 및 2050 탄소 중립 달성을 위해서 기존 연소기반의 발전 및 산업 시스템을 재생에너지 기반으로 전환하기 위한 다양

한 정책 및 로드맵이 수립되었다. 특히, 제1차 및 2차 수소 경제 이행 기본 계획 수립을 통해 수소 경제로의 전환을 도모하고, 산업부문 전반의 탈탄소로의 패러다임 전환 계획을 수립하였다. 특히, 전환(발전) 부문에서는 수소와 암모니아 연료의 혼소 및 무탄소 발전을 통해 온실가스 감축 전략을 구체화하였으며, 2023년 1월 발표된 10차 전력수급기본계획을 통해 2030년 무탄소 발전량 비중을 2.1%까지 확대하는 전략을 수립하였다.

2050년을 바라보는 장기적인 관점에서 탄소 중립 달성을 위해서는 대량의 재생에너지를 통해 기존 온실가스 배출의 주원인인 연소 시스템을 전기 시스템

†Corresponding author: mj.lee@seoultech.ac.kr
Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

으로 전환하고, 이것이 불가능한 분야는 재생에너지로 생산된 그린 수소를 통해 연소 시스템을 운영해야 한다. 하지만 국내 재생에너지 자원은 여전히 부족한 실정이며, 경제성 확보 또한 쉽지 않다. 따라서 대부분 재생에너지는 해외로부터 수입해야 하며, 이에 따라 국내 재생에너지 전력의 비중이 높아질수록 해외 재생에너지 수입 의존도 역시 증가할 것이다. 재생에너지의 수입이라는 관점에서 에너지 캐리어라는 용어가 보다 보편화되고 있으며, 수소 및 암모니아는 주요 재생에너지의 캐리어로 고려되고 있다[1].

장기적인 재생에너지 수입 의존성을 차치하고, 단기적인 관점에서 기존 연소 기반 시스템을 전기 시스템으로 전환하기에는 매우 어려운 실정이다. 특히 산업부문에서의 철강, 석유 화학, 시멘트 및 용해 공정 등은 1000°C 이상의 고온 공정이며, 고온 열을 생산하기 위한 전기 시스템 구축에 막대한 비용이 소요된다. 특히 생산품의 부가가치에 따라 현재 사용되고 있는 연료 자체도 LNG에서 저급유까지 매우 다양하게 활용되고 있어, 이를 일괄적으로 전기 시스템으로 전환하기에는 기술적 한계와 경제성 확보의 어려움이 있다. 이에 따라 비교적 최근에는 이른바 연소 후에도 이산화탄소가 배출되지 않는 무탄소 연료에 관한 관심이 증대되고 있으며, 더욱 다양한 산업 분야에서 무탄소 연료전환을 고려하고 있다.

이처럼 수소와 암모니아는 재생에너지 캐리어와 무탄소 연료의 역할을 동시에 수행하는 탄소 중립 및 수소 경제의 주요한 에너지원에 해당한다. 하지만 수소의 경우 수전해 및 수소 연료전지와 같이 생산과 활용 관점에서 더욱 친숙한 에너지원으로 자리 잡고 있지만, 상대적으로 암모니아의 경우 관심이 적었으며, 특히 연소의 관점에서 수소와 비교하면 지난 50년간 거의 개발이 이루어지지 않았다. 그러나 비교적 최

근 암모니아 연소 기술의 개발 및 실증이 일본과 유럽을 중심으로 이루어지고 있으며, 최근 3년간 암모니아에 관한 연구는 급격히 증가하고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 암모니아를 중심으로 한 수소 캐리어와 무탄소 연소기술에 대해 살펴보고, 향후 정책 및 기술 개발의 자료로 활용할 수 있는 기초자료를 제공하고 자 한다.

1.2. 수소 캐리어와 무탄소 연료 암모니아

청정 암모니아의 생산에서 활용까지의 전주기 가치 사슬을 Fig. 1에 나타내었다. 해외의 재생에너지 또는 화석연료가 풍부한 국가에서 그린 수소 및 블루 수소를 생산하고, 이를 질소와 합성하여 암모니아를 생산하게 된다. 생산된 암모니아는 선박을 통해 국내로 이송하게 되며, 국내 저장된 암모니아는 직접 연료로 활용하거나 암모니아 분해(cracking) 기술을 통해 수소를 생산하여, 기존 수소 중심의 가치 사슬과 연계할 수 있다. 암모니아(NH₃)는 32°C 10기압에서 액체상태로 존재하며, Fig. 2와 같이 -253°C 1기압의 액화 수소보다 단위 부피당 수소 함량이 1.7배 높아 원거리 이송의 가장 경제적인 수소 캐리어로 고려되고 있다[1]. 이에 주요국들은 관련 시장을 선점하기 위한 정책 수립 및 기술개발을 적극적으로 추진하고 있으며 특히, 호주, 칠레 등 재생에너지 자원이 풍부한 국가들과 UAE, 사우디아라비아 등 석유와 천연가스 자원이 풍부한 국가들은 보유 천연자원을 기반으로 생산한 그린 또는 블루 수소를 수출하기 위한 수소 캐리어로 청정 암모니아를 고려하고 있다. 2022년 국제재생에너지기구(IRENA)에서는 Fig. 3과 같이 다양한 수소 캐리어에 대한 경제성 평가를 수행하였으며, 이에 따라 수소의 연간 운송량(MtH₂/yr)과 운송 거리(1,000km)에 따른 도표를 작성하였다. 결과적으로 우리나라와

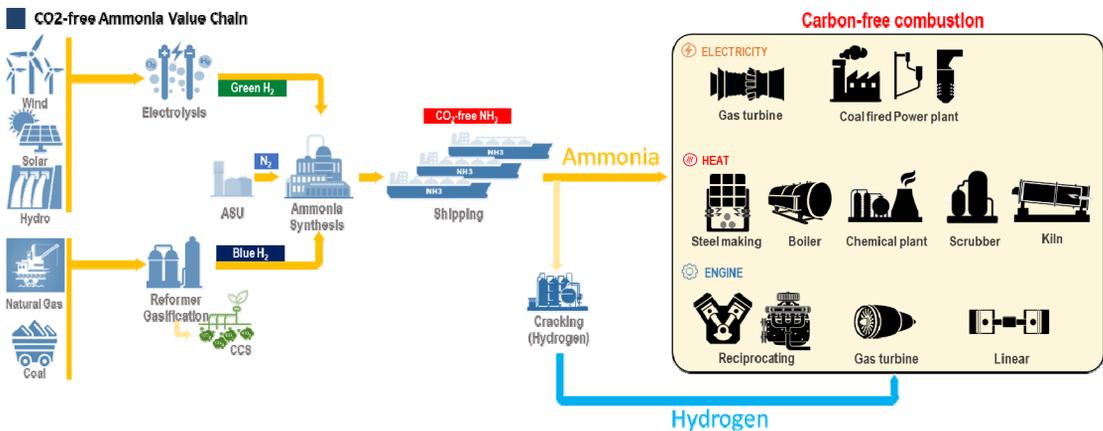


Fig. 1. The value chain of CO2-free ammonia fuel.

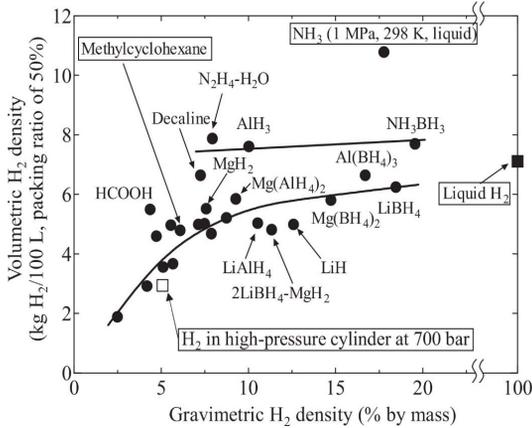


Fig. 2. Gravimetric and volumetric H₂ density of hydrogen carriers[2].

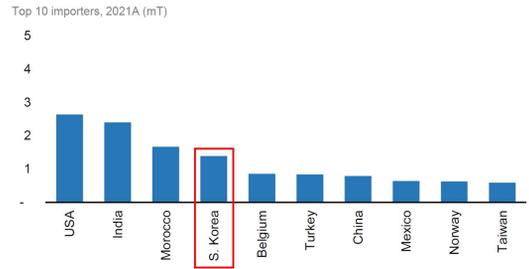


Fig. 4. Top 10 importers of ammonia in 2021[4].

1.3. 암모니아 시장 현황 및 국내 수요량

2021년 기준으로 전세계 암모니아 생산량은 연간 1.85억 톤 수준이며, 암모니아 생산에 필요한 수소는 현재 대부분 화석연료를 통해 생산하고 있다. 생산량은 중국(29%), 러시아(10%), 미국(9%), 중동(9%), 인도(8%) 순서[3]이며, 한국은 현재 암모니아를 직접 생산하지 않고 전량 수입하고 있다. 하지만 암모니아는 대부분 자국 소비되며, 교역량은 전체 생산량의 약 10% 정도인 1천8백만 톤에 불과한 실정이다. 이러한 상황에서 국가별 암모니아 수입량으로는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 한국이 세계 4위를 차지하고 있으며, 수입량은 연간 140만 톤 정도이다. 이것이 시사하는 바는 한국은 지난 30여 년간 암모니아를 직접 교역하거나 수입하는 등의 암모니아 관련 경험이 풍부하다는 것이다. 이에 따라 한국의 암모니아에 대한 관심은 현재보다 급속하게 증가할 것으로 보인다.

암모니아의 국제 시장 전망을 Fig. 5에 나타내었다. 현재 90조 원 규모의 암모니아 시장은 2050년 300조 원의 규모로 성장할 것으로 전망하고 있다. 또한, 생산량 측면에서 앞서 언급한 현재의 1.85억 톤 규모에서 신규 연료 시장 및 인구 증가에 따른 기존 시장 확대를 포함한 4.7억 톤으로 성장한다고 전망하고 있다. 동시에 현재의 화석연료 기반의 암모니아 생산에서 블루 및 그린 수소를 활용한 청정 암모니아 시장으로의 전환이 급속하게 진행될 것으로 예상된다.

국내의 경우 2030년 암모니아 수요에 대한 수급 정책이 발표되지는 않았지만, 이미 발표된 10차 전력수급계획과 제1차 수소경제이행기본계획을 통해 직간접적으로 암모니아 국내 수요량을 예측해 볼 수 있으며, 이를 Table 1에 나타내었다. 우선 무탄소 연료 측면에서 10차 전력수급 계획에서는 2030년까지 석탄 화력발전소의 혼소를 통해 6.9TWh의 암모니아 기반 전력생산을 계획하고 있으며 이를 환산할 경우 연간 296만 톤의 암모니아가 요구된다고 명시하고 있다. 여기에, 수소 경제 구현을 위한 수소공급 측면에서 정부에서 제시한 2030년 수소 수요는 390만 톤이며, 이

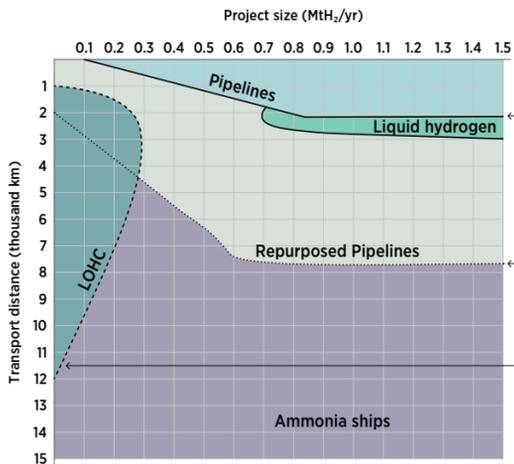


Fig. 3. The hydrogen transport pathway in 2050 as a function of project size and distance[3].

같이 주요 수소 수입국의 거리가 8,000km 이상 및 대용량의 수소 수요가 필요한 경우, 암모니아로 운송하는 것이 가장 경제적인 것을 알 수 있으며, 운송 거리가 3,000km 이내이면서 대용량의 수소 운송의 경우 액화 수소, 비교적 장거리이지만 운송량이 30만 톤 이내의 경우 LOHC가 경제성을 확보할 수 있다는 점을 알 수 있다. 따라서 이들에 대한 불필요한 경쟁보다는 각 수요에 맞는 경제성 있는 수소 수입 방안을 모색하는 것이 적절하다고 판단된다.

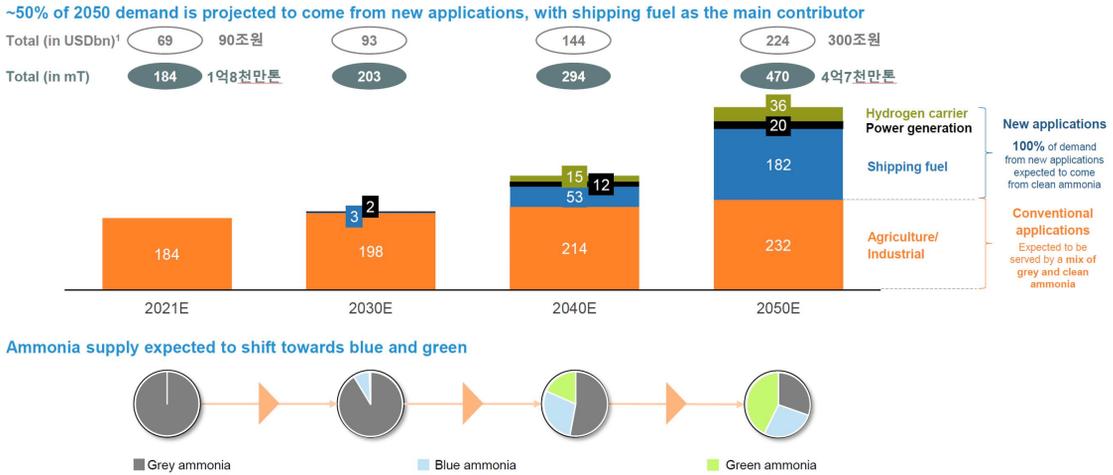


Fig. 5. The ammonia demands and its market trend from 2021 to 2050[5].

Table 1. The domestic ammonia demands in 2030.

부문	수요량 (만 톤)	근거
무탄소 연료 (발전용)	296	6.9TWh 기준 (10차 전력수급기본계획)
수소 캐리어	1,113	해외수입수소 196만톤 기준 (제1차수소경제이행기본계획)
합계	1,409	

중 약 50%에 해당하는 196만 톤을 해외에서 도입한다고 밝혔다. 여기서 2030년까지 액화 수송 또는 LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) 기반의 인프라 구축은 어렵다고 가정하고, 전량 암모니아를 통해 수소가 수입될 경우, 암모니아의 수소 함유량 17.6% 기준으로 1,113만 톤의 암모니아가 요구된다. 따라서 이를 정리하면, 국내 2030년 암모니아 수입량은 1,400만 톤 규모가 된다는 것을 알 수 있다. 해당 규모는 앞서 언급한 현재 전 세계 암모니아 교역량의 약 80% 규모로 이에 대한 체계적인 정책 수립이 요구되며, 수소 수급 계획과 동등하게 현실적인 암모니아 수급계획을 동시에 마련할 필요가 있다.

1.4. 암모니아 경제

2020년 호주의 Monash 대학은 논문을 통해 ‘암모니아 경제(Ammonia Economy)’의 개념을 Fig. 6과 같이 제시하였다. 암모니아 경제의 구체적인 내용은 그린 수소와 재순환된 질소를 이용해 3세대의 암모니아

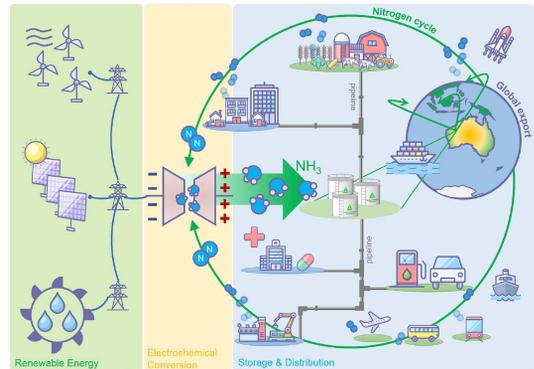


Fig. 6. The ammonia economy[7].

합성기술인 전기화학 합성법을 적용하여 그린 암모니아를 생산하고, 이를 에너지시스템 전반에 활용하는 순환 경제를 의미한다. 해당 논문에서 그린 암모니아는 연료로 활용될 경우 현재 액체 화석연료 소비의 상당 부분을 대체할 것으로 기대되며, 여러 세대의 기술개발 및 규모 확장을 통해 구현할 수 있다고 전망하고 있다. 특히 3세대 암모니아 합성기술은 기존 하버-보슈 공정과 다르게 전기화학을 통해 질소와 수소를 합성하는 것으로 현재 한국에너지기술연구원 등에서 활발히 연구 개발을 수행 중이다[6].

II. 암모니아 연소 특성

2.1. 확산화염과 예혼합화염

연소 공학 측면에서 화염은 연료와 산화제의 공급

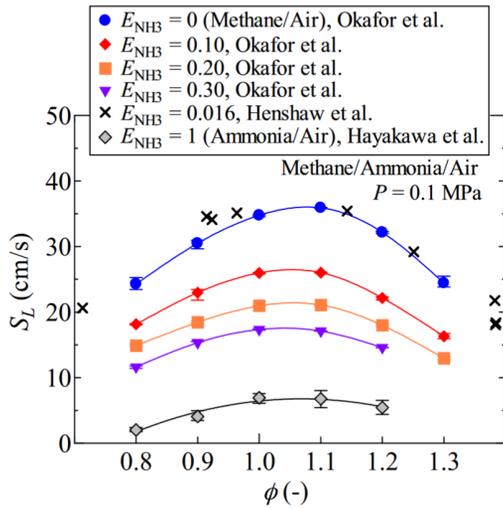


Fig. 7. Laminar burning velocity of NH₃-air flame[2].

방식에 따라 확산화염(또는 비예혼합화염)과 예혼합화염으로 구분될 수 있으며, 확산화염의 구조와 예혼합화염의 경계에 부분예혼합화염이 존재한다. 확산화염은 연료 및 산화제의 상호 확산에 의해 연소기 외부에서 최초 화염이 형성되어 역화의 우려가 없다. 이에 따라 현재의 대부분 산업용 연소기 혹은 버너 시스템은 안전한 연소 시스템 운영을 위해 이러한 방식을 채택하고 있다. 하지만 환경 규제 강화에 따라 저 NO_x 연소기술에 대한 수요가 증가하였고, 이를 위해 부분 예혼합 및 예혼합 연소기를 적용하게 된다. 이러한 방식은 연료와 산화제의 혼합 제어를 통해 고온의 화염 영역을 완화하여 Thermal-NO_x를 제어하는 방식으로 최근의 가스터빈 및 가정용 보일러에서 주로 채택하고 있다. 하지만 연료와 산화제가 혼합되어 동일한 연소노즐을 통해 투입될 경우 조건에 따라 화염 역화의 우려가 있어 예혼합화염을 적용하기 위해서는 상당한 기술력이 요구된다. 정리하면, 화염의 안정성 및 안전을 위해서는 확산화염 방식이 유리하지만, 저 NO_x 달성을 위해서는 예혼합 방식이 유리하다. 따라서 적용하고자 하는 연소 시스템에 따라 적용 가능한 화염 구조가 다를 수 있고, 동일한 연소기라도 설치되는 시스템의 운전 조건에 따라 전혀 다른 연소 특성을 나타낼 수 있으므로 연소 공학적 지식을 기반으로 기술개발을 진행할 필요가 있다.

2.2. 암모니아 증류화염 연소속도

최근 수소와 암모니아 연소 관련 연구가 활발하게

진행되면서, 연소속도라는 용어가 자주 등장한다. 연소속도는 단위 시간당 소모되는 연료의 질량과 비례하며, 공급되는 혼합기의 유속을 기준으로 측정되거나 정지된 혼합기 내에서의 실제 화염 전파속도를 측정하여 연소속도를 도출하게 된다. 특히 연소속도는 정확하게는 증류예혼합화염의 연소속도를 의미하게 되며, 연료의 반응성을 상대적으로 비교할 수 있는 지표에 해당한다. 하지만 실제 연소 시스템은 대부분 난류 조건에서 운전되게 되며, 난류예혼합화염의 연소속도는 증류에 비해 동일한 연료일 경우에도 난류 강도에 따라 10배에서 100배까지 증가할 수 있다. 이러한 상황에서 암모니아의 증류예혼합화염의 연소속도를 살펴보면, 당량비 혹은 과잉공기비에 따라 다르지만, 최대 7cm/s의 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이는 기존 탄화수소계열 연료의 연소속도가 35~60cm/s인 점을 고려하면 매우 낮은 수치이며, 순수 암모니아 화염은 스스로 안정성을 확보하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 이에 따라 최근의 연구는 수소 및 기존 연료와의 혼합을 통해 낮은 연소속도를 극복하고자 노력하고 있다. 하지만 이것은 암모니아 연료로서의 한계를 보여주는 것으로 암모니아 연료가 보다 다양한 산업분야에 활용되고, 보편적인 연료로 자리 잡기 위해서 암모니아의 낮은 연소속도는 최적화된 연소기 설계를 통해 반드시 극복해야 하는 과제이다.

최근 Lee[7] 등은 연소기 내부에 강한 선화를 형성하여, 암모니아의 낮은 연소속도를 보완할 수 있는 연소기 설계를 제안한 바 있다. 이는 강한 선화류에 의한 재순환 영역을 확장해 화염 전파 방향으로 음의 유동속도장을 형성시켜 화염의 전파 및 안정성을 강화하는 구조이다. 이를 통해 상온 상태의 순수 암모니아-공기 화염 점화가 가능하였으며, 강한 선화류로 인한 가연한계 영역도 기존 연구에 비해 넓게 관찰되었다. 최근에는 이러한 연소기를 가스터빈으로 확장하기 위한 연구가 수행되었으며, 가압 조건에서 안정적으로 암모니아 연소를 달성할 수 있었다.

2.3. 암모니아 저NO_x 연소기술

암모니아 연료는 질소 원자 1개와 수소 원자 3개로 구성된 물질이다. 연료 자체에 탄소 원자가 없어 산화반응 혹은 연소 반응 후에도 이산화탄소가 발생하지 않는 무탄소 연료이다. 하지만 연료에 포함된 질소 원자는 고온의 화염대에서 비교적 쉽게 해리되어 주변의 산화제와 결합하고, Fig. 8과 같이 급속하게 질소산화물(NO_x)을 형성하는 특성이 있다. 따라서 암모니아를 연료로 활용할 경우 심각한 NO_x 발생을 초래하게 되며, 수천 ppm의 NO_x가 발생할 수 있다. 이러한 질소산화물은 연료에 포함된 질소에 의해 형성되므로 이

를 Fuel-NOx라고 명명한다. 앞서 언급한 Thermal-NOx의 경우 질소 원자의 근원은 산화제에 포함된 공기 중의 질소이며, 삼중결합 구조의 질소 분자를 분해하기 위해서는 고온이 필요하게 되어 이를 Thermal-NOx라 명명한다. Fuel-NOx의 경우 화염대에서 생성된 NOx는 오히려 체류 시간이 증가할수록 환원되어 그 농도가 점차 감소하지만, Thermal-NOx는 상대적으로 느린 반응이므로 체류 시간이 증가할수록 농도는 점차 증가하는 완전히 다른 특징이 있다. 따라서 주의할 것은 기존의 저NOx 연소기를 암모니아 연료에 적용할 경우 NOx 측면에서 효과가 없거나 오히려 증가할 수 있다는 점이다.

암모니아 연소에서 발생한 NOx를 억제하는 방법에 대한 해답은 위에서 언급한 생성 메커니즘에 있다. 첫 번째로 산화제가 풍부한 조건에서 연료에서 해리된 질소 원자는 산소 원자와 결합하게 되므로 산화제를 부족하게 공급하는 것이다. 이를 이용하는 방법이 공기 다단 연소 기법이고 최근 대부분의 암모니아 연소기술에 적용하고 있다. 구체적으로는 연소 단계를 1차와 2차로 구분하고, 1차 연소 단계에서 연료 과잉 상태로 연소시켜 NOx 생성 자체를 억제 시키고, 미연소된 일부 암모니아 및 수소를 2차 공기 투입을 통해 연소시키는 방식이다. 이를 가스터빈 분야에서는 RQL (Rich-burn Quick-quenching Lean-burn)으로 명명하며, 산업 연소 분야에서는 공기 다단 방식으로 알려져 있다. 이러한 공기다단 연소 방식 자체는 고전적인 접근 방법이지만, 암모니아 연소에 최초로 적용하여 그 효과를 입증했다는 점에서 최근 3년 이내 가장 이슈화된 기술이라 할 수 있다.

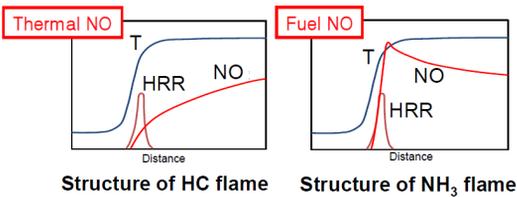


Fig. 8. The Comparison between thermal NOx and fuel NOx.

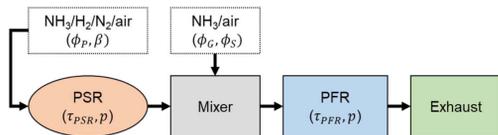


Fig. 9. The schematic of fuel-staged combustion [9].

앞에서 언급한 Fuel-NOx 생성 메커니즘에 있어 두 번째로 언급한 것이 생성된 NOx의 환원 과정이다. 급격하게 형성된 NOx는 주변의 높은 반응성을 가진 NNH, NH₂, OH-radical 등에 의해 다시 질소로 환원된다. 따라서 암모니아를 2차로 분기하여 공급할 경우 암모니아 자체로 NOx의 환원을 촉진 시켜 NOx 발생을 억제할 수 있다. 이를 연료 다단 기법이라 명명할 수 있으며, 최근 발표된 논문에 의하면, NOx 저감 효과는 80% 이상을 나타내었다[7]. 이 기술 역시 고전적인 기술로 SNCR 또는 Thermal-DeNOx 기술과 원리는 유사하다. 하지만 기존의 기술은 단순히 NOx 저감에 목표를 두었지만, 암모니아 연소 시스템에서는 1차 연료와 2차 연료의 분할 비율에 따라 2차 연소 영역에서 연료의 산화 반응과 NOx의 환원 반응이 동시에 발생한다는 점에서 차이가 있으며, 1차 및 2차 분사 연료의 조건에 따라 연소 특성 및 NOx저감 특성이 상호연동되어 있어 기술적으로는 차별성이 있다. 하지만 이러한 연료 다단 기법의 한계는 바로 SNCR 반응이 발생하는 온도 대역이 900~1100°C 내외로 한정되어 있어, 고온의 연소 환경에서는 적용하기 어렵다. 하지만 앞선 공기 다단 기법과 혼용하여 적용할 경우, 높은 NOx 저감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

2.4. 암모니아 화염의 안정성

일반적으로 화염 안정성(Flame stability)은 연료의 양과 당량비 조건에 따라 안정적인 화염을 유지하는 영역을 의미하며, 실험을 통해 측정된다. 화염 안정성

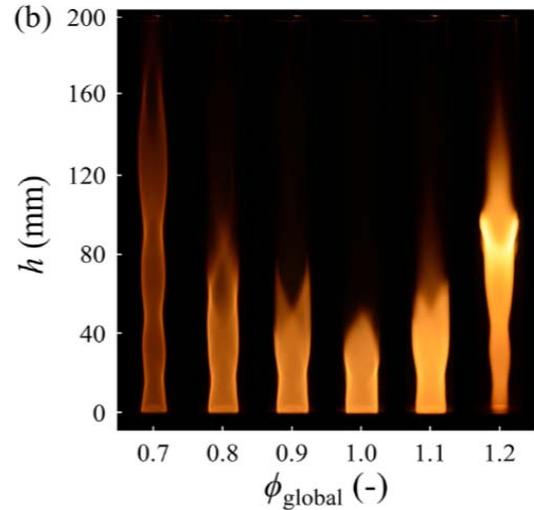


Fig. 10. Stable ammonia-air flame of high swirl combustor[8].

은 연료의 가연 한계와 다르게 연소기에 따라 달라질 수 있으며, 앞서 언급한 증류화염 연소속도와 유사하게 암모니아 화염의 안정성은 기존 연료에 비해 매우 좁다는 특징이 있다. 동일한 연소 시스템을 기준으로 기존 연료인 메탄에 암모니아를 혼소 및 전소할 경우 화염 안정화 영역은 급격하게 감소한다. 이러한 화염 안정화 영역의 감소는 연료 및 산화제 공급의 불안정성 등에 따라 매우 민감하게 화염이 소화될 수 있다는 것을 의미하게 되므로 연소기 설계의 핵심 평가 인자로 고려되어야 한다. 현재의 대부분의 암모니아 연소 관련 연구는 대부분 기존 연료와의 혼소, 예열 및 수소 첨가 등의 방법으로 화염 안정성을 확보하는데 집중하고 있는데 이는 이러한 암모니아 연료의 낮은 화염 안정성을 보여주는 사례라고 할 수 있다.

하지만 Fig. 10과 같이 Lee[8] 등이 제안한 고선회도를 가지는 연소기 설계를 적용할 경우 낮은 유속의 초기 점화에서부터 높은 유속까지 안정적으로 암모니아 화염을 유지 시킬 수 있다. 기존 연료의 연소기 설계방식에서 벗어나 암모니아 연소 특성을 이해하고, 순수 암모니아 연소기 개발에 더욱 집중한다면, 더욱 넓은 조건의 안정적인 연소기 개발이 가능할 것이다.

III. 암모니아 연소기술 개발 동향

암모니아 연소기술은 탄소 중립 선언과 함께 무탄소 연료전환이라는 키워드로 발전 및 산업 분야에 빠르게 확산되고 있다. 특징적으로는 기술 개발과 동시에 기업 단위의 상업화 기술이 함께 진행되고 있다. 이에 본 장에서는 발전과 산업부문의 암모니아 연소기술에 대한 단편적인 소개보다는 향후 개발 방향에 관한 생각을 전달하고자 한다.

3.1. 발전

암모니아 연소기술 개발 측면에서 가장 선도적으로 연구 및 실증이 진행되는 분야는 발전 분야이다. 특히 석탄 화력 발전 보일러의 암모니아 연료 적용은 한국과 일본을 중심으로 구체적인 발전량이 확정되어 보다 친숙한 기술로 여겨지고 있다. 반면, 암모니아 가스터빈 기술은 일본을 제외하고 구체적인 개발 사례가 없다. 세계적으로 수소 가스터빈에 비해 암모니아 가스터빈 기술은 암모니아 연소기술 자체가 개발 초기 단계이고, 실제 암모니아 공급과 관련된 정책 지원이 부족한 실정이므로 현재보다는 미래 기술에 해당한다. 하지만 기술개발 측면에서는 GE, SIEMENS, MHPS, IHI 등에서 상용화를 목표로 기술개발을 수행 중이며, 국내에서는 두산에너지리티와 포스코 등이 기술개발을 진행하고 있다.

구체적인 기술 사례는 기존 논문을 통해 살펴볼 수 있다[1]. 중요한 것은 암모니아 연료 적용을 위해 신규로 가스터빈을 개발하는 것이 아닌 연소기 개조를 통해 접근하고 있으며, 이러한 방식이 가장 경제적인 수단이라 판단된다. 암모니아 전소 기술은 수소 전소 기술과 유사하게 기술적 성숙도와 연료 공급의 정책적 지원이 함께 성장해야 적용이 가능한 분야이다. 향후 2050년 에너지 믹스를 기준으로 가스터빈은 20% 이상의 전력생산을 담당하면서 유연 발전원으로 운전될 것으로 예정되어 있다. 따라서 수소와 더불어 암모니아 가스터빈 연소기술 개발 및 정부 지원이 필요하다고 할 수 있다.

3.2. 산업

발전 분야와 다르게 산업 부분은 철강, 석유 화학, 시멘트, 유리, 비철금속 등 매우 다양한 업종이 관여되어 있다. 또한, 연소기술이라는 큰 분야는 같지만, 세부적인 운전 조건이 다르거나 공정 일부로 연소기술이 적용되고 있어 연소기 또는 버너 설비 단위로 구별하여 단독 개발하거나 적용하기 어렵다. 즉 최종 제품 생산이 다양한 만큼 해당 공정에 최적화된 연소기술 개발이 필요하다. 일부는 발전 분야에서 암모니아 및 수소 연소기가 개발되면, 이를 전체 영역을 확장할 수 있을 것으로 생각할 수 있지만, 이는 완전히 잘못된 시각이다. 산업의 공정별로 원천 라이선스를 보유한 기업에 따라 공정 온도 및 연소 조건이 다르며, 개별 설치된 연소기의 종류 및 형태도 매우 상이하므로 공정에 맞는 연소기술 개발이 필요하다. 물론 원론적인 접근으로 석탄 및 가스터빈 연소기술의 스핀오프로 핵심 기술은 적용할 수 있겠지만 직접 적용하기에는 한계가 있다. 또한, 동일한 철강 공정이라도 공정 온도, 연소 분위기, 배기가스의 농도, 환경 규제가 다양하게 존재하므로 공정에 최적화된 연소기술 개발이 필요하다.

IV. 결론 및 제언

본 논문에서는 암모니아 연료에 대한 개요와 기초 연소 특성 및 연소기술 개발 현황에 대해 살펴보았다. 단편적인 기술 소개보다는 현재 이슈화되고 있는 여러 개념과 기술개발 방향에 대한 저자의 생각을 정리하였다. 연소기술 중심으로 탄소 중립과 수소 경제를 바라보면, 경제적인 수소에너지를 확보는 매우 중요하다. 수소 경제의 활성화와 탄소 중립 선언의 초기 단계에서는 수소 활용 분야에 있어 연료전지 및 모빌리티 분야에 집중되었다. 이러한 기술들이 수소 사회로의 진입에 대한 초석을 다졌다면, 앞으로는 더욱 포괄

적인 의미에서의 연료로서 수소에너지 및 암모니아에 관심이 증가할 것이다. 또한, 경제적인 수소 도입의 수단으로 암모니아는 더 이상 비료의 원료가 아닌 재생에너지의 주요 에너지 캐리어로 자리 잡을 것이다. 장기적인 관점에서의 재생에너지 확대 및 다양한 에너지시스템의 전기화를 위해서는 관련 기술개발이 필요하다. 하지만 현재의 연소 시스템을 전부 전기화하는 것은 불가능하다. 더욱 단기적인 관점에서 고온열을 생산할 수 있는 연소기술을 유지하면서 무탄소 연료인 수소 및 암모니아 연료 대체를 통해 지속 가능한 산업구조로의 전환은 현재와 미래에도 탄소 중립의 주요 수단으로 자리 잡을 것이다.

감사의 글

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (20023380)

REFERENCES

- [1] Lee, H., Woo, Y. & Lee, M. J., "The Needs for R&D of Ammonia Combustion Technology for Carbon Neutrality - Part I Background and Economic Feasibility of Expanding the Supply of Fuel Ammonia", *J. Korean Soc. Combust.* **26**, 59-83 (2021)
- [2] Kobayashi, H., Hayakawa, A., Somarathne, K. D. K. A. and Okafor, E. C., "Science and technology of ammonia combustion". *Proc. Combust. Inst.* **37**, 109-133 (2019).
- [3] Rouwenhorst, K. H. R. and Castellanos, G., "Innovation Outlook: Renewable Ammonia", IRENA, (2022).
- [4] Nutrien., "Import Volume of Ammonia Worldwide in 2021, by Country (in 1,000 Metric Tons)", Statista, Statista Inc., (2022)
- [5] Yara International., "Forecast Demand for Ammonia Worldwide from 2021 to 2050, by Application (in Million Metric Tons)", Statista, Statista Inc., (2022)
- [6] Kim, K., Lee, "Electrochemical Synthesis of Ammonia from Water and Nitrogen: A Lithium-Mediated Approach Using Lithium-Ion Conducting Glass Ceramic". *ChemSuschem*, **11** (1), 120-124 (2018)
- [7] MacFarlane, D. R. *et al.*, "A Roadmap to the Ammonia Economy", *Joule* **4**, 1186-1205 (2020)
- [8] Lee, T., Guahk, Y. T., Kim, N., Lee, H. and Lee, M. J., "Stability and emission characteristics of ammonia-air flames in a lean-lean fuel staging tangential injection combustor", *Combust. Flame* **248**, 112593 (2023)
- [9] Kim, N., Lee, M., Park, J., Park, J. and Lee, T., "A Comparative Study of NOx Emission Characteristics in a Fuel Staging and Air Staging Combustor Fueled with Partially Cracked Ammonia", *Energies* **15**, 9617 (2022)