ISSN 1226-0959 eISSN 2466-2089

접선 분사 연소기 내 암모니아 크래킹 혼합물/공기 비예혼합 화염의 안정화 및 NOx 배출 특성 연구

박주원****·김남수**†·곽영태**·이후경**·이민정***·임성균*

*고려대학교 기계공학과, **한국에너지기술연구원 융합시스템연구단, ***서울과학기술대학교 미래에에너지융합학과

Flame Stability and Emission Characteristics of Non-Premixed Ammonia Cracking Gas/Air Combustion in a Tangential Injection Burner

Joo-Won Park*,**, Namsu Kim**†, Young Tae Guahk**, Hookyung Lee**, Minjung Lee*** and Seong-kyun Im*

*School of Mechanical Engineering, Korea University

**Energy Convergence System Research Department, Korea Institute of Energy Research

***Department of Future Energy Convergence, Seoul National University of Science and Technology

(Received 25 November 2023, Received in revised form 27 December 2023, Accepted 27 December 2023)

ABSTRACT

Combustion characteristics of partial cracking ammonia gas were investigated using a tangential injection burner. As the cracking ratio increased, the stable operational regime expanded, leading to the blowout limit of ϕ =0.17. Higher injection velocities increased the wall peak temperature due to augmented heat transfer but lowered temperatures near the injector as the high-temperature reaction zone shifted downstream. NO exhibited peak values at 40-60% cracking ratio, attributed to enhanced radical formation with hydrogen addition. Numerical simulations, employing a perfectly stirred reactor model and a steady laminar flamelet model, demonstrated that these models, based on different assumption of flame structure, accurately reproduce NO levels in low and high cracking ratio conditions, respectively.

Key Words: Ammonia, Ammonia cracking, Tangential injection, NO emission, Damköhler number

기 호 설 명

lpha: Ammonia cracking ratio Da : Damköhler number (au_{flow}/ au_{chem})

 ϕ : Global equivalence ratio D_{tube} : Tube diameter [mm] χ_{st} : Scalar dissipation rate at stoichiometric mixture fraction U_{tube} : Tube length [mm] U_{tube} : Tube length [mm]

1. 서 론

2050 탄소중립을 실현하기 위한 방안으로 탄화수소 기반의 연료에서 무탄소 연료로의 연료전환 연구가 수행되고 있다[1-3]. 특히 저장과 운송의 측면에서 암모니아는

[†]Corresponding Author, nskim@kier.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licences/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. 신재생수소를 효과적으로 사용할 수 있는 에너지 캐리어로써 많은 관심을 받고 있다. 암모니아는 대표적인 탄회수소 연료인 메테인에 비해 약 1/7의 연소속도를 보이며 질소 원자를 포함하고 있기 때문에 연소시 다량의 NO를 배출한다. 암모니아의 가연한계는 ϕ =0.63~1.4, 최소 착화에너지는 약680 mJ로 암모니아를 직접적으로 연료를 사용하기 위해서는 탄화수소 기반의 연소기에 대한 상당한수정이 필요할 것으로 예상된다.

선회유동 및 재순환 유동에 의한 화염안정화 메커니즘 을 활용하여 Lee 등은[4] 순수한 암모니아를 상온의 공기 와 안정적으로 연소할 수 있는 고선회 접선분사 연소기를 제안하였다. 이 연소기는 관형으로 벽면을 따라 산화제와 연료가 회전하며 연소기 내부에 재순환 유동을 생성한다. 유체의 재순환은 연소기 중심축에서 음의 유속을 갖는 영역을 유도하며 벽면의 가까이에서 가연혼합물과 연소생성물이 혼합되는 영역을 생성하여 화염의 전파와 안정화에 용이한 환경을 생성한다. 이러한 선회유동에 의한 화염 안정화를 활용해서 암모니아-메테인 화염의 안정성 및 오염물질 배출 특성[5] 및 암모니아-공기 예혼합 화염의 안정성 및 다단연소를 적용한 NO_x 저감에 대한 연구가 진행된 바 있다[6].

연료로서의 암모니아의 효과적인 사용을 위해서 암모니아와 반응성이 높은 연료인 메테인과 수소와 혼입하는 연구 또한 보고되고 있다[7,8]. 특히 암모니아의 크래킹 반응(2NH₃→N₂+3H₂, ΔH⁰₂‱=46.22 kJ/molNH₃)을 통해서 암모니아를 일부분 수소와 질소로 전환하는 경우 LNG와 유사한 반응성을 가지는 연료로 사용할 수 있다. 암모니아크래킹 혼합물의 경우 반응성 및 확산성이 뛰어난 수소에의해서 점화 및 화염전파가 주도될 것으로 사료되며 연료내에 질소 함량의 증가로 인한 제3체 반응의 증대 및 이로 인한 오염물질의 배출특성의 변화가 예상된다.

본 연구에서는 접선 분사 연소기를 사용하여 암모니아의 크래킹 비율에 따른 화염의 안정성 및 오염물질 배출 특성을 연구하고자 한다. 선행연구에서 다단분사에 의한 질소산화물 저감에 중점을 두었던 것과 달리, 암모니아의 크래킹 비율이 전반적인 연소특징에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 또한 암모니아 희박 연소에서 적용가능한 질소산화물 저감 방법인 연료 다단분사[4]의 적용 가능성을 염두에 두고 전역당량비가 연료 희박인 영역에서 실험을 수행하였다. 다양한 당량비, 유속, 연료조성 조건에서 화염형상의 변화를 파악하였으며 연소기 벽면 온도 계측을 통해서 화염의 위치 변화를 유추하였다. 끝으로 출구단에서 NO 농도 계측 및 수치모델링을 통해서 연료 성분의 변화가 오염물질 배출 특성에 미치는 영향을 논의하였다.

2. 실험방법

2.1 암모니아 크래킹 모사

암모니아 크래킹은 높은 온도와 낮은 압력에서 일어날수 있는 흡열반응(H^0_{298K} =46.22 kJ/mol_{NH3}) 으로, 크래킹이 진행됨에 따라 암모니아 2몰이 수소 3몰, 질소 1몰로 분해되고 전체적인 몰-수가 증가하게 된다. 암모니아 분해반응이 진행되는 정도를 변수 α 로 정의하면, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{X_{H_2} + X_{N_2}}{X_{NH_2} + X_{H_2} + X_{N_2}} \tag{1}$$

본 연구에서는 암모니아, 수소, 질소를 크래킹 비율에 따라 각각 $1-\alpha$, 0.75α , 그리고 0.25α 로 혼합한 혼합가스를 사용하여 암모니아 크래킹의 효과를 모사하였다.

2.2 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험 장치를 개략적으로 나 타낸 것이다. 접선 분사 버너는 석영관(D=20 mm, L=400 mm)과 접선 분사기로 구성되어 있으며, 접선 분사기 의 기하학적 스월수 $S_a=\pi D_{sw}R_0/4A_t\approx 3.3$ 으로 계산 되며 [9] 이는 상용 예혼합 가스터빈 연소기의 스월수 보 다 높은 값으로 연소기 내에 강한 선회유동이 생성되는 것 을 의미한다. 분사기는 두 개의 1/4인치 인젝터를 통해서 연료와 공기를 각각 공급한다. 연소기 출구에는 캡 $(D_{con} =$ 10 mm)을 통해 대기가 개입되는 영향을 최소화하였다. 연 소 배가스 내의 화학종 농도를 측정하기 위해서 후단에 습 식가스분석기(ECOMMK9000)와FTIR(MIDAC I4001-E) 가스 분석기에 연결된 프로브를 삽입하여 NO, O2, 그리고 미연 NH3을 측정하였다. 오염물질의 농도는 배출량의 값 이 안정된 후 5분 이상의 계측을 통해 안정된 영역에서의 평균값으로 결과를 도출하였다. NO, O2, NH3의 계측 오차 는 각각 1%, 1%, 5%내로 확인하였다.

연료와 공기의 유량은 MFC(최대 오차 \pm 5%, 를 통해 제어하였으며 Labview 프로그램을 작성하여 ϕ (당량비), V_{c} (공기의 접선방향 분사속도), α 등의 주요 변수를 통해 MFC가 유량의 변화를 반영할 수 있도록 하였다. 실험에서 고려한 변수영역은 $0.75 \le \phi \le 0.85$, $8 \le V_{c} \le 12$ m/s, $0 \le \phi \le 0.85$

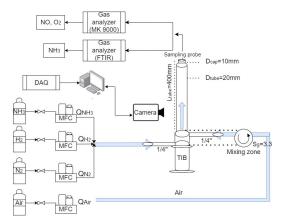


Fig. 1. Schematic of a tangential injection burner with an emission measurement system.

α≤0.75이다. 여기서 당량비는 전역 당량비이며 연료와 산화제는 각각의 노즐로부터 연소기 내부로 분사된다. 연 료와 산화제가 혼합되는 경계면에서 비예혼합화염이 형 성된다.

2.3 수치해석

연소 배가스 내의 NO 농도의 수치모사는 화염 구조에 대한 두 가지 다른 가정에 기반한 두 모델을 사용하여 오염 물질 농도의 변화를 계산하였다. 화염이 난류의 특성 길이 보다 크게 형성되어 반응대가 넓게 분포하는 경우 연소기 를 0차원 완전혼합반응기로 가정하는 Perfectly Stirred Reactor(PSR) 모델을 사용할 수 있다. 이 모델은 Da가 작 은 조건에서 높은 정확도를 보이며 [10] 특히 Moderate and Intense Low-oxygen Dilution(MILD) 연소와 같이 연 소기 전체에 고르게 반응영역이 존재하는 화염에 적합하 다[11]. Steady Laminar Flamelet(SLF) 모델은 난류화역 을 정상상태 층류 화염의 앙상블 평균으로 가정하며 Da가 증가할수록 보다 정확한 예측을 하는 것으로 알려져 있 다[12]. 수치해석은 다음 두 가지를 가정하고 수행하였다. (1) 연소기 내에서 완전 혼합이 이루어져 배가스의 당량비 가단일한값을 가진다. (2) PSR과 SLF의 모델 파라미터 au_{nsr} 과 $\tau_{SIF} = \chi_{st}$ 의 역수는 V_t 에 선형적으로 비례한다. 이 두 파 라미터들은 반응기 내부에서 혼합의 정도를 나타낸다.

3. 결과 및 논의

3.1 안정화 선도

Fig. 2는 접선 분사 연소기 내에서 암모니아 크래킹이 진행됨에 따라 크래킹 모사가스의 안정적인 연소 영역 변화를 나타낸 것이다. α =0(NH $_{*}$ /air 화염)에서는 V/에 따라 안정적인 운전의 한계 조건은 ϕ =0.61-0.65로 0.04의 차이가 났으며 크래킹 비율이 증가함에 따라 화염이 안정되는 영역이 급격히 확대되었다. α =0.75일 경우 ϕ =0.17에서도 안정적인 화염을 유지하였으며 V/에 의한 한계 당량비의 값의 변화는 0.01 미만으로 확인되었다. 이때 작동영역의 경계값은 수소의 가연한계인 ϕ =0.14에 가까워졌다.

3.2 화염 형상

Fig. 3은 접선 분사 연소기 내의 암모니아 크래킹 모사가 스/공기 비예혼합 화염의 직접 촬영 사진 (a)와 열화상 카메라를 통해서 촬영한 석영관의 온도 (b)를 크래킹 비율에따라 나타낸 것이다. 실험조건은 ϕ =0.8, V=10 m/s, α =0-0.75이다. 크래킹 비율이 증가할수록 화염의 길이가

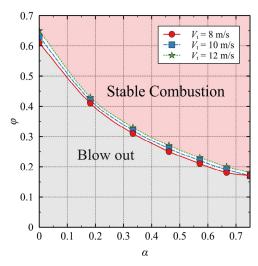
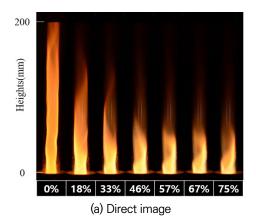
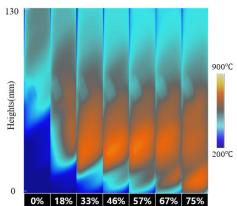


Fig. 2. Operational stability map as function of α for the tangential injection burner with NH₃/H₂/N₂/Air non–premixed flame.





(b) Infrared image

Fig. 3. Flame images (a) and wall temperature distributions (b) versus α for the NH₃/H₂/N₂/Air flames at ϕ =0.8 and V=10 m/s.

짧아지는데, 이는 연료 중 수소의 비율이 증가하면서 반응성을 향상되기 때문이다. 실험에서 고려된 크래킹 비율 내에서 화염의 색깔은 오렌지 빛을 띄며 선회유동을 따라서화염이 나선형으로 전파되었다. 석영관의 표면온도를 통해서 고온의 반응대가 크래킹 비율의 증가와 함께 상류로이동하는 것으로 관찰되었다.

Fig. 4는 Fig. 3(b)의 계측값을 반경방향으로 평균화하여 길이방향으로 나타낸 것이다. $V_r = 8 \text{ m/s}$ 와 12 m/s에서의 계측결과는 암모니아 크래킹 비율이 증가함에 따라고 온의 반응대가 상류로 이동하는 특징을 보였으나 유속이빠른 경우 고온 반응대가 보다 하류에 생성되었다. 이는 분사속도가 증가하는 경우 상류에서 화염 신장율(strain rate)이 증가하여 화염의 국소적인 소화를 야기하고 유동의 정체점(stagnation point)이 하류로 이동하는 관형 연소기의 특징 때문으로 사료된다. V_r 가증가할수록 대류에의한 벽면 열전달이 강화되어 상대적으로 벽면의 최대 온도가 높은 값으로 계측되다.

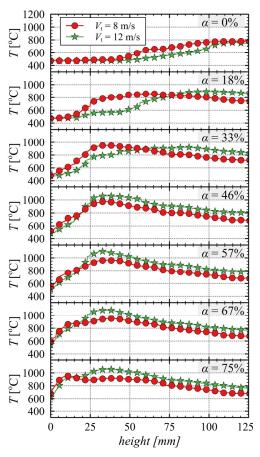


Fig. 4. Wall temperature distributions for the flames at ϕ =0.8.

크래킹에 의한 반응성 향상을 정량적으로 확인하기 위해서 층류화염전파속도와 착화지연시간 계산 결과를 Figs. 5, 6에 나타내었다. 계산에는 Stagni의 상세 화학반응 메커니즘[13]과 Cantera [14]를 사용하였다. $1000~\rm K$, $1~\rm atm$ 에서 ϕ =0.8의 암모니아/공기 혼합물의 착화지연 시간은 $10~\rm ms$ 이지만 암모니아 크래킹이 20% 진행된 경우착화 지연시간이 $0.01~\rm ms$ 로 $1/1000~\rm ds$ 도 줄어들었다. Figs. 3, 4에서 α =18%에서 화염위치 및 벽면 온도 분포의 극적인 변화는 수소 첨가에 의한 연소성능 향상으로 설명할수있다.

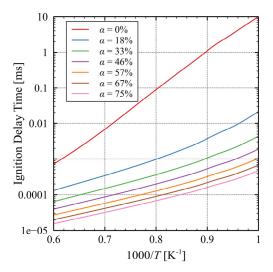


Fig. 5. Ignition delay time of NH₃/H₂/N₂/air mixture at ϕ =0.8

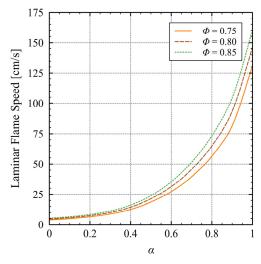


Fig. 6. Laminar flame speed versus α for NH₃/H₂/N₂/Air mixture.

동일한 당량비에서 크래킹 비율이 증가할 때 층류화염 전파속도는 지수적으로 증가하는 경향을 보였다. ϕ =0.8 에서 크래킹 비율이 55%인 경우 층류화염전파속도는 25 cm/s로 같은 당량비의 메테인/공기 혼합물의 층류화염전 파속도와 유사하였다. 계측된 화염의 형상 및 벽면 온도 분포를 고려해 볼 때, 연료의 크래킹이 46% 이상 진행된 경우 연료의 반응성이 충분히 높기 때문에 연소 특성은 연료의 특성이 아닌 난류 혼합에 의해서 지배될 것으로 사료된다.

3.3 NO 배출 특성

Fig. 7은 ϕ = 0.75-0.85, V_r = 8-12 m/s 조건에서 NO 계측 값과 시뮬레이션 예측값을 비교한 것이다. 계측된 NO의 경우 α =0.4-0.6에서 최댓값을 가지며 V_r 와 ϕ 가 증가함에 따라 최댓값이 증가하는 경향을 보였다. 암모니아의 크래 킹 비율에 따라서 NO가 증가하는 경향은 연료내 수소의 비율이 증가함에 따라서 H, O, 및 OH 라디칼이 증가하여 NH_i로부터 NO로 전환되는 반응들(NH+OH \leftrightarrow HNO+H, NO+H \leftrightarrow NH+O, NH₂+O \leftrightarrow HNO+H, NH2+O \leftrightarrow NO+H₂) 이 활성화되기 때문이다 [15]. 암모니아 크래킹 비율이 일

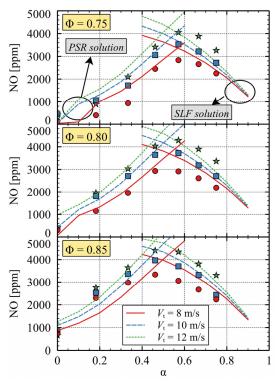


Fig. 7. Comparison between measured NO and predictions.

정 값 이상이 되면 연료 내의 암모니아의 비율이 감소하여 NO의 대부분을 차지하는 fuel NO가 줄어들게 된다.

PSR과 SLF 두 모델을 사용하여 접선 분사 연소기의 NO 배출을 모델링 하였다. PSR 모델은 $\alpha \le 0.5$ 영역에서 SLF 모델은 $\alpha \ge 0.5$ 인 영역에서 실험결과를 정량적으로 예측하였다. 두 모델이 교차하는 지점을 모델이 예측하는 NO의 최댓값으로 정의하면 최댓값에서의 α 값은 당량비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 잘 예측하였다. 단일한모델로는 α 에 따라서 NO가 변하는 경향을 정량적으로 예측할 수 없었으며 특히 최댓값을 가지는 α 값이 실험과 상이하게 예측되었다.

수치해석 결과는 α 가 증가함에 따라서 화염을 보다 정확하게 예측할 수 있는 반응기 모델이 바뀌는 것을 의미한다. 선행 연구결과에 따르면, PSR 모델은 Da값이 작은 화염에서 높은 정확도를 보이는 것으로 알려져 있으며[10] SLF 모델은 Da값이 높을수록 정확한 예측을 보이는 것으로 알려져있다[11]. 화학반응 시간 스케일을 다음과 같이 비예혼합화염의 소화가 일어나는 스칼라 소산율 $\tau_{chem}=1/\chi_{st,q}$ [16]로 정의하면 대향류 확산화염 계산을 통해서 Fig. 8과같은 그래프를 얻을 수 있다. 이 계산에는 Stagni의 메커니즘[13]과 Cantera[14]가 사용되었다. 유체의 시간스케일 τ_{flow} 가 V에 의해서 결정된다고 가정하면 α 가 증가할수록 Da가 증가한다고 볼 수 있다. 이러한 경향은 각 모델의 예측값과 계측값의 오차로부터 유추한 Da 경향과 일치한다.

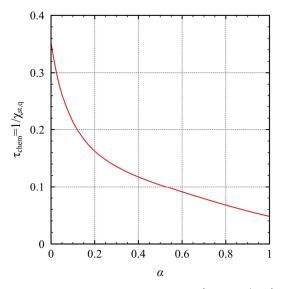


Fig. 8. Characteristic chemical time scale $(\tau_{chem}=1/\chi_{st,q})$ of the partially cracked ammonia/air counterflow flame.

4. 결 론

본 연구는 접선 분사 연소기에서 암모니아 크래킹 가스/공기 난류 비예혼합 화염의 작동조건에 따른 화염 안정성, 화염 형상, 오염물질 배출특성의 변화를 실험적으로 확인하였다. 해당 연소기는 강한 선회유동을 통해서 연소가스 재순환과 유속 감속을 유도하며 이는 순수 암모니아의 안정적인 연소를 가능하게 하였다. 또한 수소가 연료에 다량함유되어있더라도 연료와 공기를 분리하여 분사함으로써 역화를 방지할 수 있었다. 본 실험 결과는 향후 암모니아 크래킹 가스를 사용하는 연소시스템의 설계를 위한 기초자료로 활용될 것이며 주요 결론은 아래와 같다.

- 화염 안정화 선도의 경우 유속에 따른 가연한계 차이가 있지만, 암모니아-공기 화염일 경우 가장 차이가 크며 크래킹이 진행됨에 따라 화염안정화 영역이 급격하게 확대되고 유속에 의한 영향은 미미하였다.
- 2) 암모니아의 크래킹 비율이 증가함에 따라 화염길이는 감소하였으며 화염의 반응대가 상류로 이동하였다. 이 는 암모니아의 크래킹이 진행되며 연료 내의 수소 비율 이 증가할 때 연소 특성이 극적으로 향상되기 때문이 다. 암모니아 분해율이 약 50%이상이 되는 경우 화염 대의 위치는 크게 변하지 않았는데 이는 화염의 특성이 연료의 특성이 아닌 난류 혼합에 의해서 결정지어짐을 의미한다.
- 3) NO의 경우 α =0.4-0.6에서 최댓값을 가지며 V와 ϕ 가 증가함에 따라 최댓값이 증가하는 경향을 보였다. 연료의 수소함량이 증가함에 따라 NO 생성 반응에 참여하는 라디칼들이 급격하게 생성되기 때문이며 α 가 0.6이상 증가할 경우 fuel NO의 감소로 NO 생성량은 감소하였다.
- 4) $\alpha \le 0.5$ 에서는 PSR 모델을 $\alpha \ge 0.5$ 인 영역에서는 SLF 모델을 사용하여 α 에 따른 NO 배출량을 정량적으로 예측할 수 있었다. α 가 증가할수록 Da는 증가하는데, 이러한 경향은 각 모델의 예측값과 계측값의 오차로부터 유추한 Da 경향과 일치한다.
- 5) 본 연구의 실험 조건에서 배가스 내의 NO 농도는 1000 ppm 이상으로 암모니아 분해가스의 연료 희박 화염은 실용적으로 활용하기 어려울 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 암모니아 분해가스의 화염에 연료 다단분 사 또는 공기 다단분사를 적용하여 오염물질 저감 효과를 연구할 계획이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국 산업기술기획평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(NO. 2022-00155547).

References

- [1] A.M. Elbaz, S. Wang, T.F. Guiberti, W.L. Roberts, Review on the recent advances on ammonia combustion from the fundamentals to the applications, Fuel Commun. 10 (2022) 100053.
- [2] H. Lee, M.-J. Lee, Recent Advances in Ammonia Combustion Technology in Thermal Power Generation System for Carbon Emission Reduction, Energies 14 (2021) 5604.
- [3] A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W.I.F. David, P.J. Bowen, Ammonia for power, Prog. Energy Combust. Sci. 69 (2018) 63-102.
- [4] T. Lee, Y.T. Guahk, N. Kim, H. Lee, M.J. Lee, Stability and emission characteristics of ammonia-air flames in a lean-lean fuel staging tangential injection combustor, Combust. Flame 248 (2023) 112593.
- [5] A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W.I.F. David, P.J. Bowen, Ammonia-methane combustion in tangential swirl burners for gas turbine power generation, Appl. Energy 185 (2017) 1362-1371.
- [6] E.C. Okafor, M. Tsukamoto, A. Hayakawa, K.D. K.A. Somarathne, T. Kudo, T. Tsujimura, H. Kobayashi, Influence of wall heat loss on the emission characteristics of premixed ammonia-air swirling flames interacting with the combustor wall, Proc. Combust. Inst. 38 (2021) 5139-5146.
- [7] A.A. Khateeb, T.F. Guiberti, X. Zhu, M. Younes, A. Jamal, W.L. Roberts, Stability limits and exhaust NO performances of ammonia-methane-air swirl flames, Exp. Therm. Fluid Sci., 114 (2020) 110058.
- [8] K. Bioche, L. Bricteux, A. Bertolino, A. Parente, J. Blondeau, Large Eddy Simulation of rich ammonia/ hydrogen/air combustion in a gas turbine burner, Int. J. Hydrogen Energy 46 (2021) 39548–39562.
- [9] G. Vignat, D. Durox, S. Candel, The suitability of different swirl number definitions for describing swirl flows: Accurate, common and (over-) simplified formulations, Prog. Energy Combust. Sci. 89 (2022) 100969.
- [10] I. Hu, S.M. Correa, Calculations of turbulent flames using a PSR microstructural library, Symp. (Int.) on Combust. 26 (1996) 307–313.

- [11] Z. Chen, V.M. Reddy, S. Ruan, N.A.K. Doan, W.L. Roberts, N. Swaminathan, Simulation of MILD combustion using Perfectly Stirred Reactor model, Proc. Combust. Inst. 36 (2017) 4279–4286.
- [12] J.P.H. Sanders, J.-Y. Chen, I. Gökalp, Flamelet-based modeling of NO formation in turbulent hydrogen jet diffusion flames, Combust. Flame 111 (1997) 1-15.
- [13] A. Stagni, C. Cavallotti, S. Arunthanayothin, Y. Song, O. Herbinet, F. Battin-Leclerc, T. Faravelli, An experimental, theoretical and kinetic-modeling study of the gas-phase oxidation of ammonia, React. Chem. Eng. 5 (2020) 696-711.
- [14] Cantera 2.6.0, an open-source suite of tools for problems involving chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. Available: https:// cantera.org/
- [15] B. Mei, J. Zhang, X. Shi, Z. Xi, Y. Li, Enhancement of ammonia combustion with partial fuel cracking strategy: Laminar flame propagation and kinetic modeling investigation of NH₃/H₂/N₂/air mixtures up to 10 atm, Combust. Flame 231 (2021) 111472.
- [16] E.R. Hawkes, R. Sankaran, J.C. Sutherland, J.H. Chen, Scalar mixing in direct numerical simulations of temporally evolving plane jet flames with skeletal CO/H₂ kinetics, Proc. Combust. Inst. 31 (2007) 1633–1640.

저자정보



박주원

고려대학교 기계공학과 석사과 정 및 한국에너지기술연구원 학 생연구원이며, 관심분야는 암모 니아 크래킹 및 암모니아 혼소 이다.



김남수

한국에너지기술연구원 선임연 구원이며, 관심분야는 난류유 동,다상유동,반응유동이다.



이후경

한국에너지기술연구원선임연구 원이며, 관심분야는 연소, 열공 학, 발전시스템엔지니어링이다.



곽영태

한국에너지기술연구원 책임연 구원이며, 관심분야는 연소공 학, VOC 처리, 연료개질이다.



이민정

서울과학기술대학교 미래에에 너지융합학과 조교수이며, 관심 분야는 수소 연소, 암모니아 연 소이다.



임성균

고려대학교 기계공학과 부교수 이며, 관심분야는 기체역학 및 반응성유동이다.