

(메탄+암모니아)/공기 예혼합 1단 연소기에서의 화염구조와 NO 배출

김주한* · 유춘상* · 정석호** · 박 정***†

*UNIST 기계공학과, **KAUST CCRC, ***부경대학교 기계공학과

Flame Structure and NO emission in A Single-stage (Methane +Ammonia)/Air Premixed Single Combustor

Juhan Kim*, Chun Sang Yoo*, Suk Ho Chung** and Jeong Park***†

*Department of Mechanical Engineering, UNIST

**CCRC, KAUST

***School of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received 14 January 2023, Received in revised form 29 January 2023, Accepted 29 January 2023)

ABSTRACT

Numerical study is conducted to clarify flame structures and NO emissions in a single-staged (ammonia + methane)/air premixed combustion, which can be presumed with a counterflow configuration. To clarify the important role of downstream interaction on flame characteristics and NO emissions, injecting (80% methane+20% ammonia)/air mixtures to the ambiances of nitrogen and air is studied. When lean blended fuel/air premixed mixtures are injected to the ambiances of nitrogen and air, there are no significant change in flame structure and NO emission. When the rich premixed mixtures are injected to air (nitrogen) ambience, an interacting flame consisting of a rich premixed flame and a diffusion flame (a single rich premixed flame) is generated. The difference in such flame configurations completely alters flame structure and NO emission behavior. The present results can be utilized as a baseline case in reducing NO emission via various combinations such as ammonia-air, methane-air, pure air, and (ammoniar+methane)/air in the secondary zone of a two-stage ammonia blended methane/air premixed combustor.

Key Words : Downstream interaction, NO emission, Ammonia combustion

1. 서 론

기후변화가 심각한 상황에서 각국은 수소경제화 사회로의 전환을 서두르고 있지만, 수소 공급망의 구축, 수송, 저장 등의 문제 해결을 전제로 각국은 2050년 정도가 되어야 진정한 의미의 수소경제화사회로 전환될 것으로 보인다[1, 2]. 이런 상황에서 대한민국 정부에서도 수소경제화 사회로의 전환을 준비 중이며 2030년까지 CO₂ 20% 감축을 목표로 연구 개발에 투자를 하고 있는 상황이다. 이러한 상황에서 암모니아를 기존 탄화수소 연료에 혼합연료로 사용하여 탄소세를 방어하면서 CO₂ 감축을 이루고자

하는 것은 세계적인 기술적 트렌트이다.

암모니아는 끓는점과 응축 압력은 거의 프로판과 유사하기 때문에 암모니아 수송선을 사용할 수 있고, 암모니아 저장을 위해서는 프로판 저장관련 기존 설비를 사용할 수 있다는 측면에서 상당한 장점을 갖는다. 반면에 연료로서 암모니아의 사용은 기존 탄화수소 계열의 연료에 비해 상당한 단점들을 갖는 것도 사실이다. 암모니아의 연소열 (heat of combustion)과 최대 층류연소속도는 탄화수소 연료와 비교하여 각각 약 40%과 20% 정도이다. 가연한계는 매우 좁고, 점화온도는 높아 암모니아는 가연성이 낮은 연료라 할 수 있다. 또한, 화염온도 및 화염으로부터의 복사 열전달이 낮아 이러한 문제들을 보일러에 적용하여 극복하는 것은 향후 도전적 과제일 것이다. 그러나, 무엇보다도 가장 심각한 문제는 연료 NO_x가 과도하게 발생할 수 있다는 점이다.

†Corresponding Author, jeongpark@pknu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이러한 상황에서 일본 토호쿠 대학의 고바야시 교수를 중심으로 암모니아 연소에 대한 연구들이 최근 몇 년 사이에 수없이 쏟아지고 있다[3]. 일본에서 공격적으로 암모니아 연소 관련 연구들을 수행하고 있는데 일본의 FREA-AIST에서는 암모니아/케로신, 암모니아/메탄, 순수 암모니아의 마이크로 가스터빈 연소기를 통한 발전에 성공했고, CRIEPI에서는 암모니아를 유동층 연소기에 투입하여 혼소율 20%까지 기존 NOx와 유사한 배출 특성을 얻을 수 있음을 보고한 바 있다[3]. 최근 한국전력에서도 유동층 연소기와 가스터빈 연소기 등에 암모니아 혼합연료 연소에 대한 연구 개발을 수행하고 있다.

이러한 상황에서 기존 가스터빈 연소기의 구조 변경을 최소화하여 CO₂ 배출을 저감하려면 메탄/암모니아 혼합연료를 사용하는 것이 유리하다. 일반적으로 메탄/공기 화염에서는 희박 예혼합 화염의 상황에서 당량비를 감소시키면 NO가 급격히 감소하는 반면 암모니아/공기 화염에서는 당량비가 1.2 이상되면 급격히 NOx가 감소하는 반대 경향을 갖는다[3]. 결국 메탄/암모니아 혼합연료를 사용하는 경우에 있어서 NOx 저동에 대한 연구들이 최근 보고되고 있지만, 당량비에 따라 실제 화염 들이 단일 화염 혹은 상호작용하는 화염인지에 따라 상황은 매우 다를 수 있음에도 불구하고 이러한 것을 반영하여 연구를 수행한 것은 문헌상에 보고되어 있지 않다.

본 연구에서는 일단(single-stage) 메탄/암모니아 연소기에서 당량비에 따른 화염 구조와 NO 배출 특성에 관한 연구를 수행하였다. 먼저 당량비에 따른 화염 안정화 선도를 제공하고, 1단 연소기에서조차도 공기중에 연료를 분사하는 경우 희박 연소와 과농 연소에서 화염구조와 NO 배출 특성에 있어서 상이점을 화염 상호작용 유무에 따라 촛점을 맞추어 제시하고자 한다.

2. 수치해석

수치해석은 일단 연소기의 부피에 있어서 80% CH₄와 20% NH₃를 갖는 혼합연료를 질소 분위기와 공기 분위기로 분사하는 1단 연소기를 묘사하였고, Fig. 1에 보여진 바와 같이 대향류 화염에 대해 수치 해석을 수행하였다. 여기서 LPF(RPF)와 DF는 희박(과농) 예혼합화염과 확산화염을 의미한다. Fig. 1에 보여진 바와 같이 희박 연소 조건에서는 질소 분위기이든 공기 분위기 이든 관계없이(80% CH₄+20% NH₃) 혼합 연료에서 희박화염만 생성된다. 과농 조건에서는 질소 분위기에서 과농 화염만이 생성되나, 공기 분위기에서는 과농 화염과 확산화염이 상호작용하는 이중 화염의 구조를 갖게된다. 지배 방정식은 참고문헌

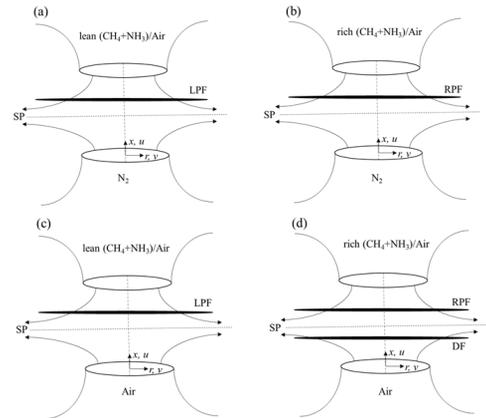


Fig. 1. Schematic diagram of premixed counterflow flames with single-stage configurations.

[4]에 상세히 나와 있으므로 여기서는 생략한다. 이러한 지배방정식은 CHEMKIN과 TRANSPORT 소프트웨어 라이브러리[5, 6]와 함께 OPPDIF 코드를 사용하여 해가 얻어진다.

상부 및 하부 노즐의 출구 속도는 같게 하였고, 노즐 간의 거리는 20 mm로 고정하였다. 분위기 압력과 온도는 0.1 MPa와 298 K로 하였다. 노즐 출구에서는 플러그 유동 경계 조건을 사용하였다. 온도와 화학종들에 대해서는 Dirichlet 경계조건을 사용하였다. 그리드 수는 적응 메쉬 기법(adaptive mesh technique)을 사용하여 400-700의 범위에서 변화시켰다. 전체 화염 신장율(global strain rate)은 $a_g = (V_U + V_L)/2L$ 로 정의하였다. 여기서 V 는 노즐 출구 속도이고 하첨자 U 와 L 은 상부와 하부 노즐을 나타낸다.

최근 상당한 실험적 연구들이 암모니아 및 암모니아 혼합연료에 대한 반응 기구를 최적화하기 위해 수행되었다 [7-15]. 점화지연시간은 Mathieu 반응 모델[7]의 정확도가 높으나, Okafor 반응 모델[15]이 층류 화염속도와 NOx 배출 특성을 비교적 잘 묘사하고 있기 때문에 현재의 연구에서는 Okafor 모델을 사용하였다. CO, CO₂, H₂O, CH₄로부터의 복사연손실에 대해서는 광학박모델[16]을 사용하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 화염 안정성

Fig. 2는 (80% CH₄+20% NH₃) 혼합연료를 공기 분위기와 질소 분위기로 분사했을 때 당량비에 따른 화염 소화스트레인을 비교하고 있다. 질소 분위기로 분사했을 때 화

염소화 스트레인율은 스트레인율은 당량비 증가에 따라 증가한 후 당량비 1에서 최대를 나타내고 다시 감소한다는 것을 알 수 있다. 그러나 공기 분위기로 혼합 연료가 분사한 경우에는 당량비에 따라 소화 스트레인율이 당량비 1.2까지 당량비가 1보다 큰 경우에도 계속 증가한다는 것을 알 수 있다. 과농 예혼합기의 경우 질소 분위기에서는 과농 예혼합 화염에서 혼합 연료를 소모하고 화염대를 투과한 연료가 질소 분위기로 인해 더 이상 반응이 일어나지 않은 반면 공기 분위기에서는 화염대를 투과한 연료가 공기와 만나 확산화염을 생성하게 된다. 이러한 점은 실제 연소기가 일단 분사(single-stage) 방식이라는 점을 고려할 때 주의 깊게 생각할 문제이다.

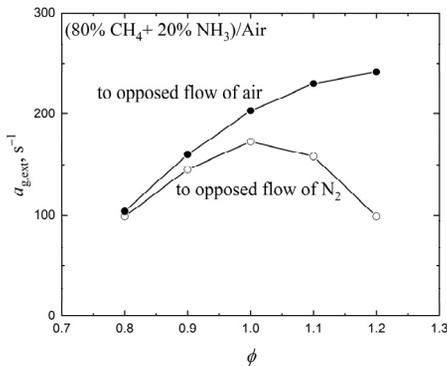


Fig. 2. Extinction strain rate against equivalence ratio in (80% CH₄+20% NH₃)/air counterflow premixed flame.

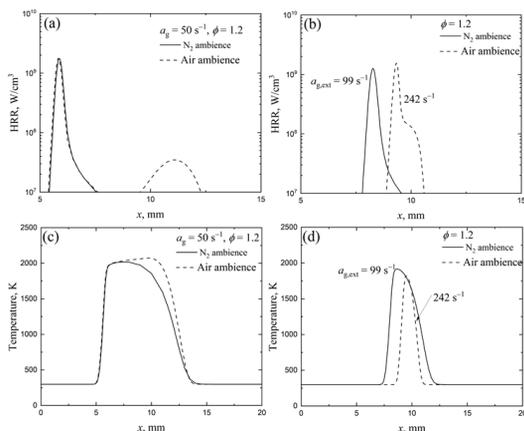


Fig. 3. Spatial distributions of heat release rate and temperature for fuel injection to N₂ and air ambiances at $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ (a,b) and $a_{g,ext}$ (c,d) in (80% CH₄+ 20% NH₃)/Air premixed counterflow flame.

이를 명확하게 하기 위해 열방출율(heat release rate, HRR)과 온도 분포를 당량비 1.2인 경우에 스트레인율을 50 s^{-1} 로 고정한 경우 (a,c)와 당량비 1.2인 경우에 화염 소화 조건인 경우 (c,d)에 대해 Fig. 3에 나타내었다. 스트레인율 50 s^{-1} 에서 열방출율의 공간 상의 분포로부터 알 수 있듯이 질소 분위기에서는 과농 화염만이 존재하는 반면 공기 분위기에서는 과농 화염을 통과한 잉여 연료가 공기와 만나 확산화염을 추가로 생성되는 것을 알 수 있다. 또한 (c)의 온도 분포에서 보듯이 공기 분위기에서 과농 예혼합 화염 근처의 온도가 확산화염 근처 온도보다 더 높아 확산화염으로부터 전달된 열을 받고 있다는 것을 알 수 있다. 한편 메탄과 암모니아는 공기보다 가볍기 때문에 루이스 수(Lewis number)는 과농 조건에서 1보다 크게 된다. 루이스 수가 1보다 큰 경우 자유전파화염에서는 스트레인율의 증가에 의해 화염전파속도 혹은 화염온도는 감소하게 되고 확산화염의 경우는 스트레인율 증가에 의해 화염온도가 감소하는 일반적인 특성을 갖게 된다. 따라서 질소 분위기에서 단일 과농 화염은 스트레인율이 소화 스트레인율(99 s^{-1})까지 증가하면 화염온도가 감소하게 된다. 한편 공기 분위기에서는 과농 화염과 확산화염은 각각 스트레인율 증가에 의해 화염온도가 감소하려는 고유한 특성을 갖는다. 그러나 (c)에 나타난 바와 같이 확산화염으로부터 열전달을 받아 과농 화염이 화염 강도를 유지하려는 경향을 가지며, 또한 스트레인율 증가로 인해 화염 간의 거리가 감소하면서 H, O, OH 같은 chain carrier radical을 공유하면서 화학적 상호작용을 하면서 화염을 유지하려는 특성을 갖는다. 이러한 화염 간의 후류 상호 작용이 화염 강도를 보강하는 결과들에 대해서는 이전 연구들로부터 이미 보고된 바 있다[17-19]. 결과적으로 이러한 과농 화염과 확산화염이 열적/화학적 상호작용을 통하여 염소화 스트레인율은 242 s^{-1} 까지 증가한 것을 알 수 있다. 결과적으로 Fig. 2에 보여진 바와 같이 공기 분위기에서 당량비가 증가하여 1보다 큰 경우에 있어서 화염 소화 스트레인율은 단조 증가를 하게 되고, 질소 분위기에서는 염소화 스트레인율이 당량비 1까지 증가한 후 다시 감소한다는 것을 알 수 있다. 질소 및 공기 분위기에서 나타나는 이러한 상이한 특성의 화염 구조와 NO 배출 특성에 대해서는 3.1절과 3.2절에서 논의할 것이다.

3.2 화염 구조 비교

Fig. 4는 질소와 공기 분위기에 대해 (80% CH₄+ 20% NH₃)/공기 예혼합기가 $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ 에서 당량비 0.8 (a,b) 그리고 1.2 (c,d)로 분사된 경우 대한 화염 구조를 나타낸

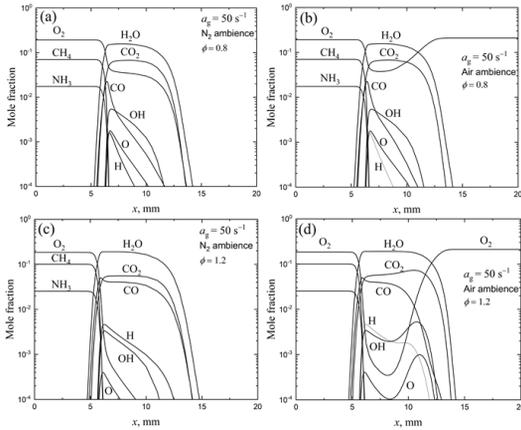


Fig. 4. Flame structures at $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ for $\phi = 0.8$ and 1.2 under N_2 and air ambiances.

다. 당량비가 0.8인 희박 조건으로 분사된 경우는 (a,b)에 보인 바와 같이 하나의 희박 예혼합 화염만이 생성되고 화염 구조도 거의 차이가 없을 것을 알 수 있다. 당량비가 1.2에 대해 질소 분위기에서는 과농 조건 (c)에서는 여전히 과농 화염 하나만 생성되지만 공기 분위기에서는 과농 화염 후류에 연소하고 남은 연료가 공기와 만나 후류에 확산화염이 생성되어 과농 화염과 확산화염이 후류 상호 작용을 하는 것을 알 수 있다. (d)에 보인 바와 같이 H는 과농 화염 측이 더 몰분율이 크지만, OH와 O는 더블 피크가 나타나고 확산 화염 측이 몰분율이 더 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 질소와 공기 분위기에 대해 (80% $\text{CH}_4 + 20\% \text{NH}_3$)/공기 예혼합기가 소화 스트레인을 $a_{g,ext}$ 에서 당량비 0.8 (a,b) 그리고 1.2 (c,d)로 분사된 경우 대한 화염 구조를 나타낸다. Fig. 4와 마찬가지로 당량비가 0.8인 경우는 공기 분위기와 질소 분위기는 화염 구조가 거의 유사하고 화염소화 스트레인을 질소 분위기에서는 99 s^{-1} , 공기 분위기에서는 104 s^{-1} 로 거의 유사하다. 당량비가 1.2인 경우 화염소화 스트레인은 질소 분위기에서는 99 s^{-1} 이지만 공기 분위기에서는 242 s^{-1} 로 공기 분위기에서 화염 강도가 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 또한 당량비 1.2인 경우 화염 구조는 질소 분위기에서는 과농화염만 생성되는 반면 공기 분위기에서는 과농화염과 확산화염이 상호작용하여 Fig. 4에서와는 달리 OH와 O에서 더블 피크는 사라지고 하나의 피크만이 나타난다. Fig. 6은 공기 분위기에서 당량비 1.2인 스트레인이 50 s^{-1} 인 경우와 소화 스트레인이 242 s^{-1} 인 경우 열방출을 나타내고 있다. 스트레인이 50 s^{-1} 인 경우 두 개의 명확한 피크가 떨어져 있지만 소화 스트레인에서는 확산 화염의 열방출이 과농 화

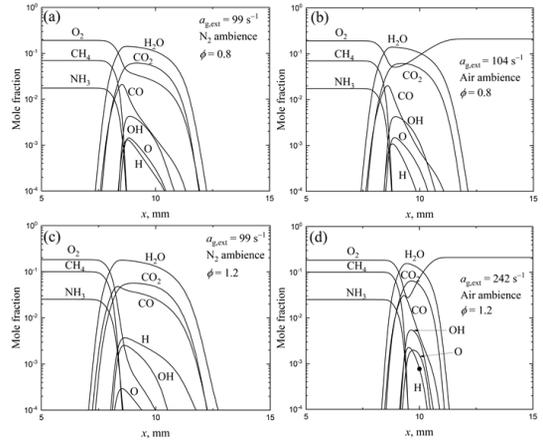


Fig. 5. Flame structures at $a_{g,ext}$ for $\phi = 0.8$ and 1.2 under N_2 and air ambiances.

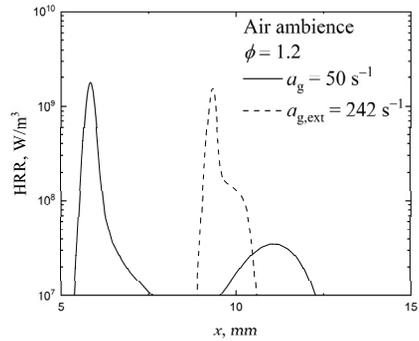


Fig. 6. Spatial distributions of Heat release rate at $a_g = 50 \text{ s}^{-1}$ and $a_{g,ext}$ for $\phi = 1.2$ under air ambience.

염의 열방출에 합쳐진 모습을 보인다. 결국 이러한 과농 화염과 확산화염의 후류 상호작용으로 H, O, OH 라디칼들을 두 화염이 공유하면서 화염 강도를 증가시키므로써 당량비 1.2에서 질소 분위기에서는 소화 스트레인이 99 s^{-1} 이지만 공기 분위기에서 242 s^{-1} 로 증가되었다는 것을 알 수 있다.

3.3 NO 배출 특성

탄화수소 가스 연료들에 있어서 NO 생성의 주 생성은 크게 Zeldovich NO와 Fenimore NO에 의해 주로 나타나며, Fenimore NO의 주요한 소스는 HNO 관련 반응들이 가장 큰 것으로 알려진다[20]. 또한, 암모니아 연료에 대해서도 Zeldovich NO 이외에 HNO 를 통한 NO 생성이 주 생성 루트이고 NNH 를 통해서 NO가 환원되는 것으로 알

려진다[3]. 따라서 물분율 자체는 지배방정식 상에서 대류와 확산에 의해서도 영향을 받기 때문에 엄밀한 의미에서 NO 배출 특성을 파악하려면 emission index로 그 특성을 파악하는 것이 타당하다. 그러나, 본 연구에서는 공기 분위기에서 대부분의 연소가 기준에는 희박 연소 조건에서 이루어졌기 때문에 암모니아 혼소 연소에서 과농 조건에서 연소를 시켜야 하는 경우 예상치 못한 NO 배출이 과다해질 수 있다는 결과들을 제시하는 것이 목적이므로 본 논문에서는 NO 최대 물분율로 단순히 나타내었다.

Fig. 7은 (80% CH₄+ 20% NH₃)/공기 예혼합화염에서 당량비 0.8-1.2 사이의 조건에서 스트레인을 따른 HNO와 NO 최대 물분율을 나타내었다. 질소 분위기에서는 모든 당량비 조건에서 HNO와 NO는 스트레인의 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 스트레인이 작은 경우(예를 들어 50 s⁻¹) HNO는 당량비가 증가할수록 단조 감소하고 NO는 당량비가 0.8에서 0.9까지 증가하면 NO가 증가한 후 당량비 0.9 이상에서는 NO가 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 공기 분위기에서는 과농 화염과 확산 화염의 후류 상호작용으로 상이해진다. HNO는 당량비 희박 조건에서는 스트레인에 따라 단조 감소하지만, 당량비 1에서는 스트레인을 증가에 따라 감소하다가 화염 소화 근처에서 증가한다. 그러나 과농조건인 경우에서는 (당량비 1.1과 1.2) 스트레인의 증가에 따라 HNO는 감

소하다가 급격히 증가한다. NO 배출은 당량비 0.8-1.0까지는 스트레인을 증가에 따라 단조 감소하는 특성을 나타낸다. 이것은 스트레인을 증가에 의해 유동 체제 시간의 감소로 NO 생성을 위한 화학반응시간을 제약하기 때문이다. 그러나 과농 조건 (당량비 1.1과 1.2)에서 스트레인의 증가로 과농 화염과 확산화염의 후류 상호작용이 강해지면서 전체 화염 강도가 강해져 특히 당량비 1.2에서 스트레인을 증가에 의해 NO 배출이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 상세한 해석은 2단 연소기로의 확장과 더불어 비교 분석을 미래에 진행할 예정이다.

본 연구에서 가장 중요한 결과는 공기 분위기에서 암모니아/메탄 혼합 연료를 단일 분사 연소기에 분사하는 경우와 2단 분사 연소기 연소에 있어서 2단에 공기만을 분사하는 기존 방식을 암모니아/메탄 혼합 연료에 대해 적용하는 경우에는 예상치 못한 과다한 NO 배출을 얻을 수 있음을 제시하기 위한 기초 연구이다. 본 결과들은 2단 연소기에서 2차 연소 영역에 공기, 메탄, 암모니아, 혹은 암모니아 혼합연료로 분사하여 NO 배출을 억제하고자 하는 연구의 기준 결과로 활용될 수 있을 것이며 후자의 연구들은 현재 연구 진행 중이며 미래에 보고될 예정이다. 여기서 중요하게 지적해야 할 점은 대향류 구조로부터 얻어진 결과들은 실제 2단 연소기에서 주연소영역(primary zone)과 2차 연소 영역(secondary zone) 사이의 거리가 가까운 경우에 해당하며 실제 연소기에서는 또 다른 경우들로서 주연소 영역과 2차 연소 영역 사이의 거리를 변수로 극단적으로는 주연소 영역과 2차 연소 영역의 화염들 간의 상호작용이 없는 결과들도 얻어지게 되므로 NO 배출을 최소화하기 위해서는 주연소 영역과 2차 연소 영역의 거리에 따라 확장된 연구가 필요하다.

4. 결론

(80% 메탄+20% 암모니아)/공기 예혼합 화염의 단일 연소 및 NO 배출 특성에 관한 수치 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 질소 분위기로 암모니아/메탄 혼합 연료가 분사되는 경우 당량비 증가에 따라 화염 소화 스트레인은 증가하고 당량비 1에서 최대를 보인 후 감소한다. 공기 분위기로 분사하는 경우 화염소화 스트레인은 당량비 0.8-1.2 사이 범위에서 단조 증가한다. 과농 조건으로 공기 분위기에서 암모니아 혼합 연료를 분사하는 경우 과농화염과 확산화염의 후류 상호작용으로 스트레인을 증가에 따라 오히려 화염 강도가 증가

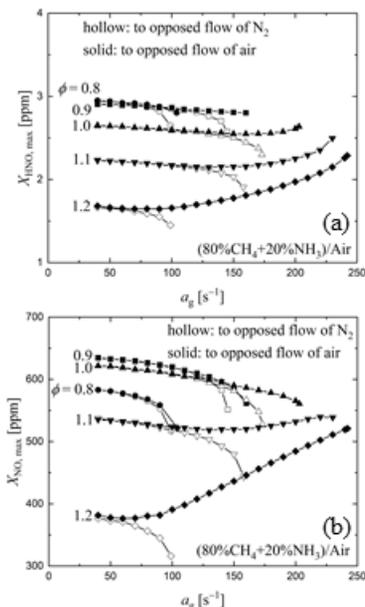


Fig. 7. Maximum mole fractions of HNO and NO against strain rate in single-stage (80% CH₄+ 20% NH₃)/air combustion under ambiances of nitrogen and air.

하여 화염 안정화에 기여하기 때문이다.

- 2) 과농 조건으로 암모니아/메탄 혼합 연료를 공기 분위기에 분사하는 경우 과농화염과 확산화염의 후류 상호작용으로 화염 안정성이 훨씬 커지며 이로 인해 NO 배출은 스트레인을 증가에 의해 급격히 증가하게 된다.

후 기

본 연구는 한국전력 대학협력 지원사업 프로그램(R22 XO02-05)에 의해 지원을 받았고 이에 감사를 드립니다.

References

- [1] 이후경, 우영민, 이민정, 탄소중립을 위한 암모니아 연소기술의 연구 개발 필요성- Part I 연료 암모니아의 보급확대 배경과 경제성, 한국연소학회지, 26(1) 59-83.
- [2] 이후경, 우영민, 이민정, 탄소중립을 위한 암모니아 연소기술의 연구 개발 필요성- Part II 연구개발 동향과 기술적 타당성 분석.
- [3] H. Kobayashi, A. Hayakawa, K.D. Kunkuma, A. Somarathne, E.C. Okafor, Science and technology of ammonia combustion, Proc. Combust. Inst. 37 (2019) 109-133.
- [4] A.E. Lutz, R.J. Kee, J.F. Grcar, F.M. Rupley, A fortran program for computing opposed-flow diffusion flames, Sandia National Laboratories Report, SAND 96-8243; 1997.
- [5] R.J. Kee, F.M. Rupley, J.A. Miller, Chemkin II: a fortran chemical kinetics package for analysis of gas phase chemical kinetics, Sandia National Laboratories Report, SAND 89-8009B; 1989.
- [6] R.J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M.E. Coltrin, J.A. Miller, A fortran computer code package for the evaluation of gas-phase multi-component transport, Sandia National Laboratories Report, SAND86-8246; 1996.
- [7] O. Mathieu, E.L. Petersen, Experimental and modeling study on the high-temperature oxidation of Ammonia and related NOx chemistry, Combust. Flame 162(3) (2015) 554-570.
- [8] J.A. Miller, C.T. Bowman, Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion, Prog. Energy Combust. Sci. 15(4) (1989) 287-338.
- [9] A.A. Konnov, J. De Ruyck, A possible new route for NO formation via N_2H_3 , Combust. Sci. Technol. 168 (2001) 1-46.
- [10] C. Duynslaegher, F. Contino, J. Vandooren, H. Jeanmart, Modeling of ammonia combustion at low pressure, Combust. Flame 159(9) 2799-2805.
- [11] P. Dagaut, P. Glarborg, M.U. Alzueta, The oxidation of hydrogen cyanide and related chemistry, 34(1) (2008) 1-46.
- [12] S.J. Klippenstein, L.B. Harding, P. Glarborg, J.A. Miller, The role of NNH in NO formation and control, Combust. Flame 159 (2011) 774-789.
- [13] M.A. Meuller, R.A. Yetter, F.L. Dryer, Kinetic modeling of the CO/H₂O/O₂/NO/SO₂ system: Implication for high-pressure fall-off in the SO₂+O (+M) =SO₃(+M) reaction, Int. J. Chem. Kinet. 32 (2000) 317-339.
- [14] P. Dagaut, A. Nicolle, Experimental and kinetic modeling study of the effect of SO₂ on the reduction of NO by ammonia, Proc. Combust. Inst. 30 (2005) 1211-1218.
- [15] E.C. Okafor, Y. Naito, S. Colson, A. Ichikawa, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi, Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of CH₄-NH₃-air premixed flames, Combust. Flame 187 (2018) 185-198.
- [16] Y. Ju, H. Guo, K. Maruta, F. Liu, On the extinction limit and flammability of non-adiabatic stretched methane-air premixed flames, J. Fluid Mech. 342 (1997) 315-334.
- [17] Y.S. Kang, K.M. Lee, J. Park, Mutually interacting SNG-air premixed flames, Fuel 285 (2021) 119065.
- [18] K.S. Sim, K.M. Lee, S.I. Keel, J. Park, A study on flame extinction behavior in downstream interaction between SNG-air premixed flames, Fuel 210 (2017) 545-556.
- [19] T.H. Kim, J. Park, O. Fujita, O.B. Kwon, J.H. Park, Downstream interaction between stretched premixed syngas-air flames, Fuel 105 (2013) 739-748.
- [20] J. Park, S.I. Keel, J.H. Yun, Addition effects of H₂ and H₂O on flame structure and pollutant emissions in methane-air diffusion flame, Energy & Fuels 21 (2007) 3216-3224.

저자정보



김주한

김주한은 UNIST 기계공학과 박사과정이며, 관심분야는 층류 화염 구조 해석, 플라즈마가 인가된 화염 특성 해석이다.



유춘상

유춘상은 UNIST 기계공학과 교수이며, 관심분야는 층류 및 난류 화염 구조 해석, 전선화염, 전기장 및 플라즈마 인가 연소, 그리고 연소 모델 개발이다.



정석호

정석호는 KAUST CCRC 명예교수이며, 관심분야는 층류 및 난류 화염 구조 해석, 전선화염, 전기장 및 플라즈마 인가 연소, 매연 및 가스 연료의 화학반응 기구 개발이다.



박 정

박 정은 부경대학교 기계공학과 교수이며, 관심분야는 층류 연소, 전선화염, 전기장 및 플라즈마 인가 연소 해석이다.