

압력변화에 따른 대향류 화염 연소특성 연구를 위한 가압 연소실 설계

안영종¹ · 구재원¹ · 최 선¹ · 구자예² · 권오채^{1,†}

¹성균관대학교 기계공학부, ²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Design of a Combustion Chamber for Studying the Combustion Characteristics of Counterflow Flames at Elevated Pressure

YEONG JONG AHN¹, JAE WON KU¹, SUN CHOI¹, JAYE KOO², OH CHAE KWON^{1,†}

¹School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 2066 Seobu-ro Janan-gu, Suwon, 16419, Korea

²School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, 76 Hanggongdaehak-ro, Deogyang-gu, Goyang 10540, Korea

†Corresponding author :
okwon@skku.edu

Received 8 June, 2017

Revised 16 June, 2017

Accepted 30 June, 2017

Abstract >> A combustion chamber is designed and fabricated for studying the combustion characteristics of counterflow flames at elevated pressure and establishing the fundamental combustion database of counterflow flames. The combustion chamber design aims to allow the maximum operating pressure of 11 bar and be able to conduct flame visualization and the measurements of flame extinction limits, flame temperature and combustion emissions at elevated pressure. Preliminary tests for counterflow nonpremixed CH₄-NH₃-N₂/air flames at 1-3 bar have been conducted, and the results confirm the proper operation of the designed chamber.

Key words : Counterflow flame(대향류 화염), Methane(메탄), Ammonia(암모니아), Elevated pressure(가압 조건), Combustion chamber(연소실)

1. 서론

지구온난화로 인한 기후변화에 대응하기 위해 전 세계적인 노력이 요구되고 있다. 특히 2015년에 개최된 제21차 유엔기후변화협약 당사국총회에서 협의된 ‘파리기후변화협약’에 의하면 우리나라는 2030년까지 배출전망치 대비 37% 감축을 이행해야 함에 따라 기존의 에너지산업 구조가 신재생에너지를 비롯한 저탄소 에너지로 부분적으로

대체되는 것이 불가피하다¹⁾.

수소(H₂)는 연소시 이산화탄소(CO₂)를 배출하지 않는 무탄소 친환경 연료로서 연료전지, 직접 연소 등 많은 방식으로 이용이 연구되어 왔으나 밀도가 낮고 액화에 어려움이 있어 저장 및 공급 문제를 가지고 있으며, 폭발적인 반응성으로 인한 안전성 문제로 실용화에 한계점이 지적되고 있다. 암모니아(NH₃)는 수소와 마찬가지로 연소시 탄소를 배출하지 않지만 상대적으로 저압에서

도 액화가 가능하여 수소의 저장 및 공급 문제를 해결할 수 있으며²⁾, 수소와 혼합하여 사용할 시 수소의 빠른 연소속도를 늦춰주어 안전성을 개선시킬 수 있는 장점이 있다³⁾. 따라서 본 연구실에서는 무탄소 그린연료로서 암모니아-수소 혼합연료의 실용화 가능성 확인을 위한 기초 연소 연구를 진행한 바 있다. 수소 첨가 암모니아/공기 대항류 비예혼합 화염의 연소안정한계 측정 결과, 혼합 연료 중 소량의 수소를 첨가했음에도 수소의 매우 강한 반응성으로 인해 일반적인 탄화수소 연료와 비슷한 수준의 연소안정한계가 측정되어 순수 암모니아 연료 이용 시의 연소불안정 문제를 해결할 수 있는 첨가제로서 수소의 특성을 파악하였다⁴⁾. 또한 암모니아-수소/공기 동축류 예혼합 연소특성 연구에서는 배기가스 분석 결과, 암모니아가 화염의 온도를 낮춰주어 질소산화물(NO_x)의 배출을 낮추는 thermal de NO_x 역할을 하는 것이 확인되었고, 연료 과농 조건에서는 미연 암모니아가 배기가스와 섞이면서 촉매반응이 진행되어 일반적인 탄화수소 연료 사용 시와 비슷한 수준의 NO_x 가 측정된 바 있다³⁾. 이와 같은 장점에도 불구하고 여전히 수소는 저장 및 공급 문제점과 높은 반응성으로 인한 안전성에 문제점이 제기됨에 따라 실용화에 있어 심도 있는 검증이 필요한 단계에 있다.

천연가스는 현재 매우 활발하게 사용되고 있는 에너지원으로서 청정연료의 특성과 많은 매장량으로 인해 전 세계적으로 사용량이 계속 증가하는 추세에 있다. 이와 같은 천연가스 또는 천연가스의 주성분인 메탄(CH_4)에 암모니아를 혼합할 경우 연소시 배출되는 이산화탄소를 저감할 수 있다. 메탄에 암모니아를 혼합할 시 암모니아의 낮은 연소속도로 인해 연소 강도가 낮아질 것으로 예상되어 소량의 메탄을 암모니아로 대체하여 사용해야 할 것으로 보이나 현재 천연가스 및 메탄 사용량을 볼 때 소량의 메탄을 암모니아로 대체해도 이산화탄소 배출 저감 효과는 큰 것으로 판단된다. 또한 연료 중 암모니아로 인해 연료로부터 발생하는

NO_x 의 배출량이 크게 증가할 것으로 예상되나 선행 연구에서 확인된 암모니아의 thermal de NO_x 효과나 연료 과농 조건에서 암모니아의 촉매역할을 고려한다면 NO_x 배출량 역시 일반적인 수준으로 조절할 수 있을 것으로 보인다. 이와 같은 이산화탄소 배출을 저감할 수 있는 연료로서 메탄-암모니아 혼합연료의 효율적이고 경제적인 연구를 위해서는 기초 연구가 필요하며, 메탄-암모니아 혼합연료의 기초 연소 데이터베이스 확보를 통해 실제 연료로서의 이용 가능성에 대한 심도 있는 연구가 필요하고, 잠재력이 검증된 뒤에 실용화 연구가 진행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 실제 적용에 근접한 조건에서의 메탄-암모니아 혼합연료의 대항류 비예혼합 연소의 데이터베이스 확보를 위한 가압 대항류 연소실을 설계 및 제작하였으며, 이를 사용하여 예비실험으로서 메탄-암모니아-질소/공기 대항류 비예혼합 화염의 구조 파악을 위한 가시화 및 직접 온도 측정을 수행하여 가압 연소실의 적절한 작동 여부를 검증하였다.

2. 설 계

2.1 가압 연소실 개념 설계

Fig. 1은 메탄-암모니아 혼합연료의 대항류 비예혼합 연소특성 실험을 위한 가압 연소실의 개략도이다. 가압 연소실은 대표적으로 연소실, 배기장치, 계측제어장치로 구성되어 있다.

다양한 가압 연소 실험이 가능하도록 내부에 $\varnothing 200 \times 300$ mm의 실린더 형상의 공간을 확보하였다. 연소실 벽면에는 가시화를 통한 연소특성 파악이 가능하도록 지름 108 mm인 4개의 가시창(quartz)을 설치하였다. 가시창과 연소실 사이에는 유로(curtain flow)를 형성하여 연소 생성물이 가시창에 부착되는 것을 방지하고 액화된 물이 강제 대류에 의해 빠르게 기화되도록 하였다. 또한 친수성 폴리머로 가시창 내·외부를 코팅하여 가시창

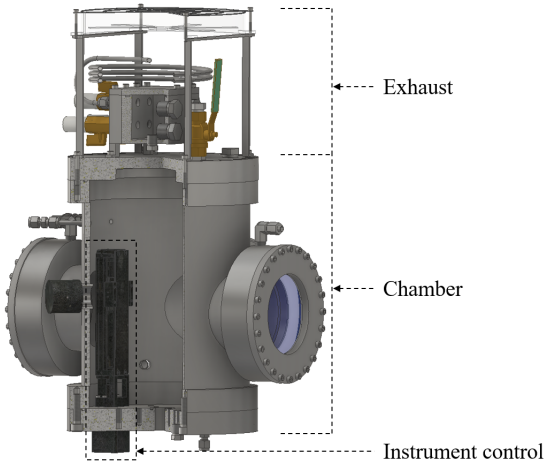


Fig. 1. Configuration of combustion chamber

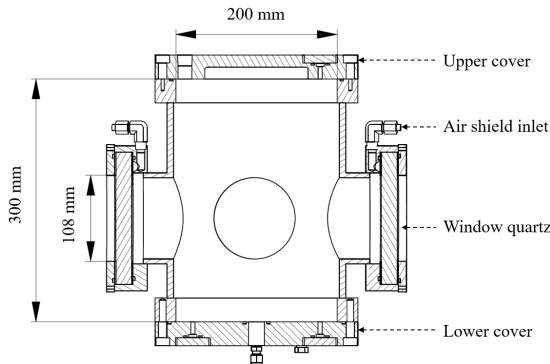


Fig. 2. Major dimensions of combustion chamber

의 가시성을 확보하였다. 연소실 및 가시창에 대한 대표적인 치수 및 구성을 Fig. 2에 나타내었다.

가압 연소실 내부에서 발생된 연소 생성물은 배기가스 분석을 위하여 코일형 냉각기, 배기 분배박스, 릴리프 밸브(PRV)를 거쳐 배출된다. 코일형 냉각기는 배기가스의 온도를 낮추기 위해 1/4 in. 스테인리스 스틸(STS) 튜브를 굽힘 가공하여 제작하였으며, 과열 시에는 250 mm 직류 팬(DC fan)을 이용해 강제대류냉각이 이루어지도록 제작되었다. 배기 경로를 다양화하기 위해 구성된 배기 분배 박스는 1/4 in. 테이퍼 암나사(FNPT) 6개 및 1/2 in. FNPT 4개를 한 공간에 연결하여 여러 밸브들과 연결될 수 있도록 구성되었다. 이중 3개의 1/4 in. FNPT에 각각 3 bar, 6 bar, 11 bar의 배출 압력을 갖

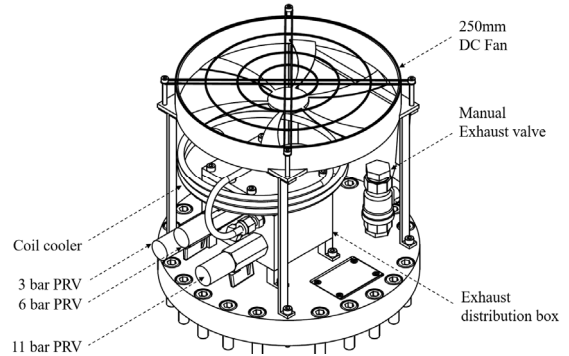


Fig. 3. Exhaust system

는 릴리프 밸브를 연결하여 대향류 연소 실험시 목표 주위 압력 조건을 형성할 수 있도록 하였다. 배기 시스템의 전체적인 구성은 Fig. 3과 같다.

가압 연소 실험 중 화염을 직접 측정하기 위하여 계측제어장치를 연소실 내부에 설치할 수 있도록 하였다. 계측제어장치는 리니어 액추에이터 (THK KR2006, 200L), 스텝 모터(Shinano Kenshi STP-42D1112, 2 Phase, 1.8°), 체결용 커플링 및 오링(o-ring)으로 구성되어 있다. 리니어 액추에이터는 다양한 계측장치를 설치한 상태에서 상하 운동이 가능하도록 설계되었다. 연소실 내부에는 고온에서의 성능을 보장하기 위하여 금속 재질의 장치만을 설치하도록 설계되었다. 이에 따라 열에 민감한 모터는 연소실의 하단부 바깥쪽에 설치하였다. 연소실 외부에 설치된 모터와 내부에 설치된 액추에이터는 연소실 벽을 관통하여 축으로 연결한다. 축은 고압에서의 가스 누설을 방지함과 동시에 회전에 의한 마찰을 최소화하기 위하여 테플론 (teflon) 재질의 오링을 이용해 기밀하였다. 이렇게 구성된 계측제어장치에 온도 측정용 열전대 받침대(thermocouple support)를 설치한 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 열전대가 설치된 계측제어장치는 스텝 모터의 회전에 따라 상하로 움직이게 되는데, 측정되는 온도 분포의 해상도 증가 및 열전대 이동에 따른 유동 방해 최소화를 위하여 미세한 위치 이동(30 μm)이 가능하도록 DAQ 시스템 중 디지털 릴레이 모듈(NI 9482)을 사용하여 스텝 모터

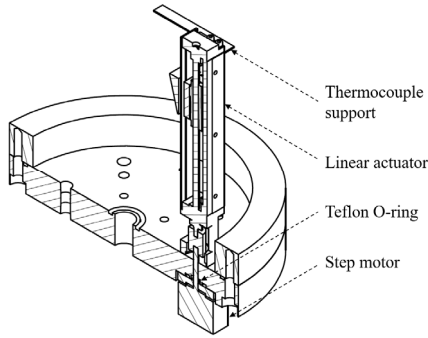


Fig. 4. Installation of instruments

를 가동하게 된다.

2.2 가압 연소실 내압 설계

메탄-암모니아 등 다양한 혼합연료의 대항류 비예혼합 연소특성 실험이 진행될 가압 연소실은 최대 11 bar의 실험이 가능하면서 여러 상황에 대응이 가능하도록 Sch 40S 이상의 두께를 갖는 8 in. 및 4 in. 배관을 이용해 본체를 제작하였다. 본체에 연결되는 체결 부품은 3,000 lb급 이상의 부품을 이용하여 연결하였다. 배관을 용접하면서 생기는 열 영향부가 존재하고, 특히 암모니아가 사용될 경우 부식성이 높은 환경이기 때문에 충분한 내식성을 확보하기 위하여 전체 시스템의 재질을 STS 316L로 선정하였다. 또한 바이톤(viton) 오링의 경우 암모니아로 인해 경화되는 현상이 발생할 수 있어 가능한 연소실 내부의 배기가스가 닿지 않는 곳에 바이톤 오링을 배치하였고, 불가피한 곳에는 테플론 오링을 배치하였다. 제작된 연소 실험 장치의 총 중량은 66.6 kg이다. 가압 연소실은 16 bar의 압력에서 내압 시험을 수행하여 안전에 대한 검사를 수행하였다. 이외의 설계 조건들이 Table 1에 제시되어 있다.

3. 예비실험 방법 및 결과

3.1 예비실험 방법

Fig. 5는 가압 연소실내 메탄-암모니아 혼합연

Table 1. Design parameters of combustion chamber

Parameters	Values
Maximum pressure	11 bar
Test pressure	150%
Safety factor	6
Pipe pressure rating	> Sch 40S
Fittings pressure rating	> 3000 lb
Material	STS 316L
Combustion room	∅200×300 mm
Visualization window	∅108×20 mm
Chamber fastener	M10×20EA
Window fastener	M5×24EA
Chamber weld neck thickness	> 7 mm
Window weld neck thickness	> 5 mm
Net weight	66.6 kg

료의 대항류 비예혼합 연소특성 연구를 위한 개략도이다. 실험 장치는 본 연구를 통해 설계된 가압 연소실 및 대항류 연소기, 연료 및 산화제 공급시스템, 화염직접사진 촬영을 위한 DSLR (Sony A65; resolution: 3,376×6,000 pixels), OH* 자발광 측정을 위한 band pass 필터 및 ICCD (PI-max 4; resolution: 1,024×1,024 pixels), 데이터 수집 및 시퀀스 제어를 위한 DAQ 시스템(NI 9188, NI 9269, NI 9239, NI 9211, NI 9482) 등으로 구성되어 있다. 대항류 연소기의 하단 노즐에서는 연료 및 질소(N₂)가 공급되고, 상단 노즐에서는 공기가 공급되며, 각 노즐 사이의 간격(separation distance, L)은 15 mm이다. 또한 각각의 연료 및 공기 노즐 주위로 질소 동향류를 분사해 주어 연소실 내 주위 기체로 인한 2차 연소 및 간섭을 방지해주었다. 연료 및 공기는 각각의 노즐에서 분사되는 반응물의 모멘텀 플럭스 비가 일정하도록($\rho_F u_F^2 = \rho_O u_O^2$; ρ : 밀도, u : 유속, 하첨자 F: 연료, O: 산화제) 공급해주었고, 대항류 화염의 일정한 연소 조건 유지를 위해 일정한 스트레인율(global strain rate, a_g) 및 stoichiometric mixture fraction (Z_{st})을 고려해주었다. 스트레인율과 Z_{st} 의 정의는 다음과 같다⁵⁾.

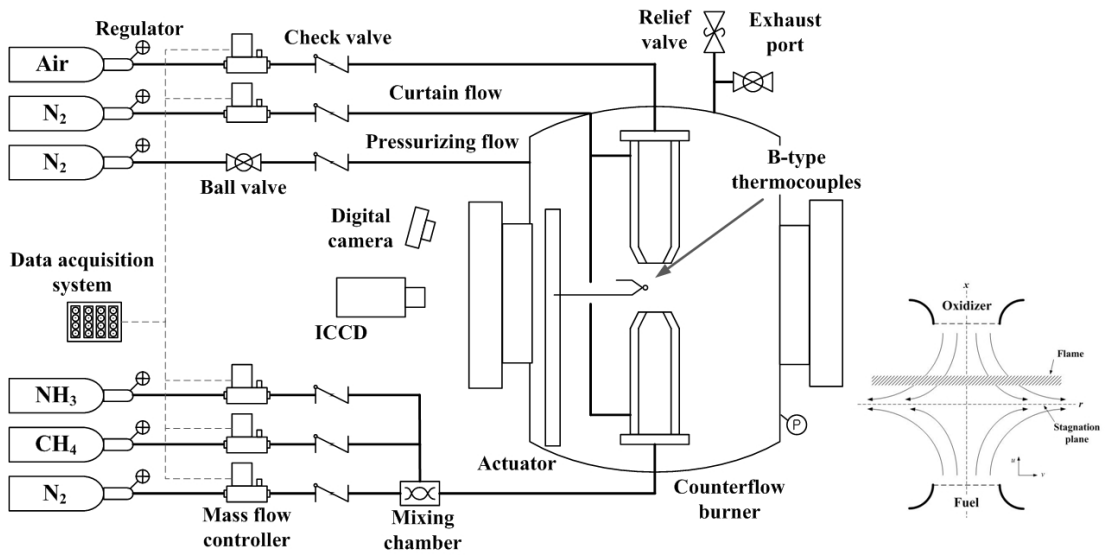


Fig. 5. Schematic diagram of experimental apparatus

$$a_y = \frac{2|u_{O_2}|}{L} \left[1 + \frac{|u_F|}{|u_{O_2}|} \frac{\sqrt{\rho_F}}{\sqrt{\rho_O}} \right] \quad (1)$$

$$Z_{st} = \left[1 + \frac{\nu Y_{F,1}}{Y_{O,2}} \right]^{-1} \quad (2)$$

여기서 ν 는 산화제와 연료의 이론당량비 조건에서의 질량비이고, $Y_{F,1}$ 은 연료 노즐 유량 중 연료의 질량분율, $Y_{O,2}$ 는 산화제 노즐 유량 중 공기의 질량분율이며 실험에서 고정된 스트레인율과 Z_{st} 의 값은 각각 100 s^{-1} 과 0.1이다. 메탄-암모니아 혼합연료 중 암모니아의 몰분율($x_{a,f}$)은 0.0-0.6 조건에서 실험을 진행하였으며, 질소 동향류는 각각의 연료 노즐과 산화제 노즐 유속과 동일한 유속으로 분사해주었다. 각각의 연료 및 산화제, 연료 노즐내 질소, 질소 동향류는 질량 유량조절기 (Aera FC-PA7810c, accuracy $\pm 1.0\%$; 한국계기티엔에스 VIC-D240, accuracy $\pm 1.0\%$; 한국계기티엔에스 TSC-D220, accuracy $\pm 1.0\%$; Teledyne HFC-202, accuracy $\pm 1.0\%$)를 사용하여 조절해주었다. 예비 실험에서는 메탄-암모니아-질소/공기 대향류 비예혼합 화염의 구조 파악을 위해서 $200 \mu\text{m}$ 의

B-type 열전대를 사용하였고, 열전대를 통해 측정된 온도값은 열전대 표면의 복사 열손실을 고려하여 보정되었다(Accuracy $\pm 1.52\%$)⁶⁾.

3.2 예비 실험결과

3.2.1 화염 직접사진

Fig. 6은 가압 연소실내 메탄-암모니아-질소/공기 대향류 비예혼합 화염의 직접사진으로 연소실 압력 1 bar, 3 bar 조건과 $x_{a,f}=0.0-0.6$ 조건에서 촬영되었다. 대기압에서의 예비 실험결과 안정적인 화염이 형성되었으며, 연소실에 가압을 하였을 때도 안정된 화염이 유지되는 것이 확인되었다. 대기압인 1 bar 조건에서 연료에 암모니아가 첨가되지 않았을 때에는 푸른색 화염이 관찰되었다. $x_{a,f}$ 이 증가할수록 화염은 점차 밝아지며 붉은색 화염으로 변하는 것이 확인된다. 연소실 압력 3 bar 조건에서는 암모니아가 첨가되지 않았음에도 붉은 화염이 매우 밝게 나타났는데, 이는 연소실내의 압력이 증가하면서 메탄으로 인한 soot 발생 증가의 영향으로 보인다⁷⁾. 연소실 압력 3 bar의 $x_{a,f}=0.0-0.4$ 조건에서는 화염이 점차 희미해지다

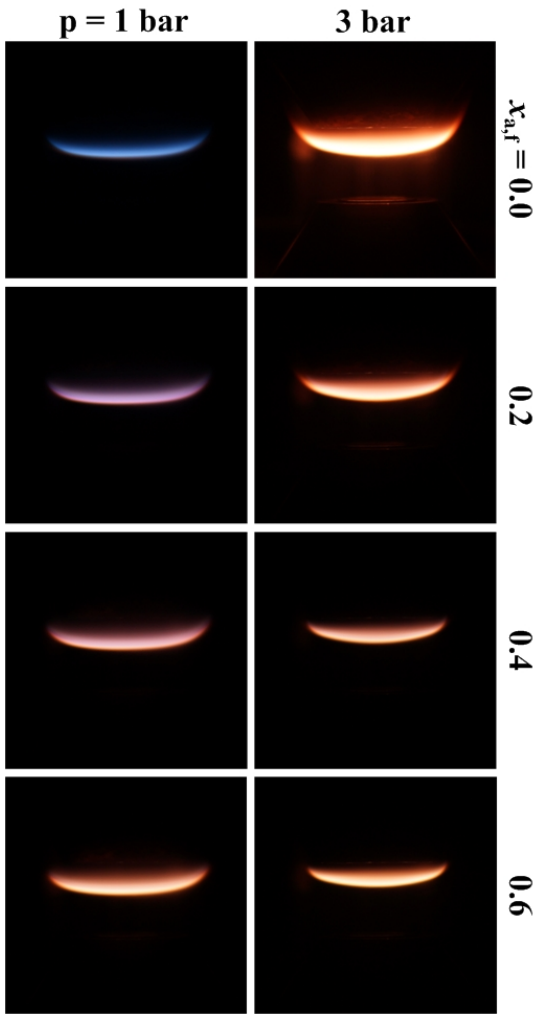


Fig. 6. Direct images of counterflow nonpremixed CH₄-NH₃-N₂/air flames at $a_g = 100 \text{ s}^{-1}$, $Z_{st} = 0.1$, $p = 1\text{-}3 \text{ bar}$, and $x_{a,f} = 0.0\text{-}0.6$

가 $x_{a,f} = 0.6$ 조건에서는 다시 밝아지는 것이 관찰되었는데, 이는 $x_{a,f}$ 이 증가함(혼합연료 중 메탄의 물분율 감소)에 따라 메탄으로 인한 soot 발생량이 감소하면서 화염이 열리는 경향과 $x_{a,f}$ 증가에 따른 화염의 밝아지는 경향이 엇갈리면서 나타나는 현상으로 보인다.

3.2.2 OH* 자발광 분포

Fig. 7은 ICCD를 사용하여 측정된 가압 연소실 내 메탄-암모니아-질소/공기 대향류 비예혼합 화염의 OH* 자발광 가시화 결과로서 연소실 압력 1

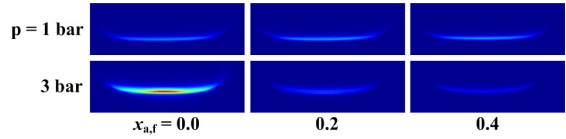


Fig. 7. Distribution of OH* for counterflow nonpremixed CH₄-NH₃-N₂/air flames at $a_g = 100 \text{ s}^{-1}$, $Z_{st} = 0.1$, $p = 1\text{-}3 \text{ bar}$, and $x_{a,f} = 0.0\text{-}0.4$

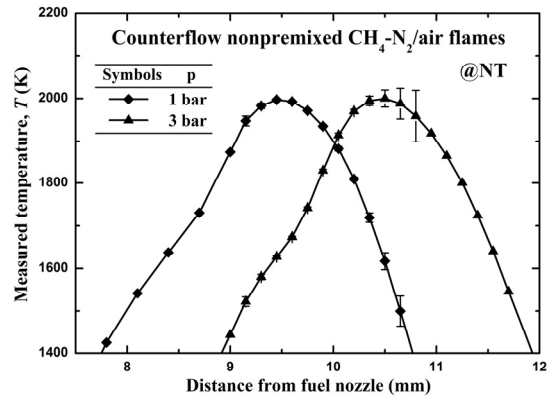


Fig. 8. Distribution of measured temperature for counterflow nonpremixed CH₄-N₂/air flames at $a_g = 100 \text{ s}^{-1}$, $Z_{st} = 0.1$ and $p = 1\text{-}3 \text{ bar}$

bar, 3 bar 조건과 $x_{a,f} = 0.0\text{-}0.4$ 조건에서 촬영되었다. 모든 조건에서 OH* 자발광 역시 성공적으로 획득할 수 있었는데, 상압에서는 $x_{a,f}$ 이 증가함에 따라 암모니아의 낮은 반응성으로 인해 OH* 자발광 강도는 감소하나 큰 폭의 변화를 보이지 않는 결과를 보여주고 있다. 압력이 3 bar로 증가할 경우, $x_{a,f} = 0.0$ 조건에서는 OH* 강도가 매우 크게 증가하였으며 OH* 영역 역시 확장된 결과를 보였다. 반면, 3 bar 조건에서 $x_{a,f}$ 이 증가할 때에는 OH*의 강도가 매우 큰 폭으로 감소하였고, OH* 영역 역시 매우 큰 폭으로 감소하는 결과를 보였다.

3.2.3 화염온도

Fig. 8은 가압 연소실 내 메탄-질소/공기 대향류 비예혼합 화염의 압력에 따른 최대온도 위치 부근 온도 분포를 측정된 결과로 연소실 압력 1 bar, 3 bar 조건에서 측정하였다. 가압된 연소실 내에서 계측제어장치 및 열전대를 사용하여 성공적으로 높이에 따른 화염의 온도를 측정할 수 있었다. 연

소실의 압력이 3 bar로 증가할 경우 화염이 산화제 노즐 쪽으로 이동하는 결과를 보인다. 또한 탄화수소 계열 연료의 대향류 비예혼합 화염에서 일반적으로 연료의 열분해로 인해 나타나는 온도 분포의 변곡점(dent)⁸⁾이 두 압력 조건에서 관찰되었다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 적용에 근접한 조건에서의 메탄-암모니아 혼합연료의 대향류 비예혼합 연소의 데이터베이스 확보를 위한 가압 대향류 연소실을 설계 및 제작하였으며, 이를 사용하여 예비 실험으로서 메탄-암모니아-질소/공기 대향류 비예혼합 화염의 구조 파악을 위한 가시화 및 직접온도 측정을 수행하여 가압 연소실의 적절한 작동 여부를 검증하였다. 가압 연소실은 내부 압력 최대 11 bar를 견디면서 여러 가지 조건 및 상황에서 실험이 가능하도록 설계가 되었으며, 연소안정한계 측정, 화염 가시화 및 직접온도 측정을 통한 화염구조 파악, 배기가스 특성 분석이 가능하도록 설계 제작되었다. 예비 실험결과, $x_{a,f}$ 이 증가함에 따라 화염의 연소 강도(OH^* 강도)는 감소하였고, 압력이 증가할 경우에는 메탄으로 인해 soot 발생이 증가함과 동시에 연소 강도가 증가하는 것이 관찰되었다. 또한 가압된 조건에서도 $x_{a,f}$ 증가에 따라 감소하는 연소 강도의 경향은 여전히 관찰되었다. 설계 제작된 가압 대향류 연소실은 메탄-암모니아 혼합연료의 기초 연소 실험 데이터베이스 확보에 활용될 예정이며, 동일한 조건에서의 수치해석 연구를 통해 메탄-암모니아-질소/공기 대향류 비예혼합 화염의 연소특성에 대한 심도 있는 연구가 진행될 예정이다. 또한 이를 통해 메탄-암모니아 혼합연료의 실제 연료로서의 이용 가능성에 대한 검

증이 진행될 예정이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(No. 2013073861)의 연구 결과이다.

References

1. E. Lee, "KCRC issue report vol. 14: The results of the 2015 United Nations Climate Changes Conference and CCS," Korea Carbon Capture and Sequestration R&D Center, Korea, 2015, pp. 1-46.
2. R. Metkemeijer and P. Achard, "Comparison of ammonia and methanol applied indirectly in a hydrogen fuel cell," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 19, 1994, pp. 535-542.
3. J. M. Joo, S. Lee, and O. C. Kwon, "Effects of ammonia substitution on combustion stability limits and NOx emissions of premixed hydrogen-air flames," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 37, 2012, pp. 6933-6941.
4. S. Choi, S. Lee, and O. C. Kwon, "Extinction limits and structure of counterflow nonpremixed hydrogen-doped ammonia/air flames at elevated temperatures," *Energy*, Vol. 85, 2015, pp. 503-510.
5. U. Niemann, K. Seshadri, and F. A. Williams, "Effect of pressure on structure and extinction of near-limit hydrogen counterflow diffusion flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 34, 2013, pp. 881-886.
6. R. Seiser, L. Truett, D. Trees, and K. Seshadri, "Structure and extinction of non-premixed n-heptane flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 27, 1998, pp. 649-657.
7. K. A. Thomson, Ö. L. Gülder, E. J. Weckman, R. A. Fraser, G. J. Smallwood, and D. R. Snelling, "Soot concentration and temperature measurements in co-annular, non-premixed CH₄/air laminar flames at pressures up to 4 MPa," *Combust. Flame*, Vol. 140, 2005, pp. 222-232.
8. H. Tsuji, "Counterflow diffusion flames," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 9, 1982, pp. 93-119.