

동축류 메탄(CH_4), 에탄(C_2H_6), 프로판(C_3H_8) 혼합 확산화염내의 수소(H_2) 첨가가 화염 형상 및 연소 생성물에 미치는 영향

박호용* · 윤성환** · 노범석*** · 이원주**** · 최재혁**†

* 한진중공업, ** 한국해양대학교 기관시스템공학부, *** 한국해양수산연수원, **** 한국해양대학교 기관공학부

Effect of Hydrogen(H_2) Addition on Flame Shape and Combustion Products in Mixed Coflow Diffusion Flames of Methane(CH_4), Ethane(C_2H_6) and Propane(C_3H_8)

Ho-Yong Park* · Sung-Hwan Yoon** · Beom-Seok Rho*** · Won-Ju Lee**** · Jae-Hyuk Choi**†

* Design Part, Han Jin Heavy Industries and Construction Co., Ltd., Korea

** Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Korea

*** Education & Management Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 49111, Korea

**** Division of Marine Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Korea

요약 : 본 연구에서는 국내외 저탄소 녹색성장을 위한 대안으로서 수소에너지와 그 이용 기술에 대한 관심이 높아지는 추세에 발맞춰 무탄소 연료인 수소를 LNG의 주성분인 메탄, 메탄-프로판, 메탄-프로판-에탄 동축류 확산화염 내에 첨가하여 화염형상 및 연소생성물에 미치는 영향을 확인하였다. 상온상압 조건의 확산화염에 수소를 단계적으로 첨가하여 실제 생성되는 연소생성물의 변화 추이를 가스 분석기를 이용하여 실험적으로 관찰하였고 확산화염의 형상은 디지털카메라를 이용하여 단계적으로 관찰 하였다. 실험결과에서 확산화염에 수소를 첨가함에 따라 질소산화물의 생성량이 선형에 가깝게 증가하는 경향을 보였다. 이것은 수소의 상대적으로 높은 단열화염온도와 빠른 연소속도가 Thermal NO_x의 생성을 촉진했기 때문이다. 반면 이산화탄소의 생성량은 감소하는 경향이 나타났는데 수소를 첨가함에 따라 메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판의 혼합 확산화염에 포함되어있는 전체 탄소비율이 줄어들어 이산화탄소의 생성량이 감소한 것이다. 이는 선박에서 LNG-수소의 혼합 연료사용으로 인해 온실가스인 이산화탄소를 저감할 수 있는 하나의 방안으로 고려될 수 있다는 것을 의미한다.

핵심용어 : 확산화염, 수소첨가, 질소산화물, 이산화탄소, 일산화탄소

Abstract : As a carbon-free, green growth alternative, internal and external interest in hydrogen energy and technology is growing. Hydrogen was added to co-axial methane, methane-propane, and methane-propane-ethane diffusion flames, which are the main ingredients of LNG, to evaluate its effect on flame formation and combustion products. The variation in combustion products produced by adding hydrogen gradually to diffusion pyrolysis at room temperature and normal pressure conditions was observed experimentally by using a gas analyzer, and the shape of diffusion pyrolysis was observed step by step using a digital camera. The experimental results showed that the production volume of nitrogen oxides tended to increase and became close to linear as hydrogen was added to the diffusion pyrotechnic. This is because the relatively high temperature of heat insulation and fast combustion speed of hydrogen facilitated the production of thermal NO_x. On the other hand, CO₂ production tended to decrease as hydrogen was added to reduce the overall carbon ratio contained in the mixed diffusion flame of methane, methane-propane, and methane-ethane-propane. This means that the mixed fuel use of LNG-hydrogen in ships may potentially reduce emissions of CO₂, a greenhouse gas.

Key Words : Diffusion flame, Hydrogen addition, Nitrogen oxide, Carbon dioxide, Carbon monoxide

* First Author : phygigs@naver.com, 051-410-8346

† Corresponding Author : choi_jh@kmou.ac.kr, 051-410-4257

동축류 메탄(CH_4), 에탄(C_2H_6), 프로판(C_3H_8) 혼합 확산화염내의 수소(H_2) 첨가가 화염 형상 및 연소 생성물에 미치는 영향

1. 서론

국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 온실가스 저감에 관한 포괄적 전략 개발 로드맵의 첫 단계로써, 2018년 4월 13일 해양환경위원회(Marine Environment Protection Committee)는 제72차 연례회의에서 초기 IMO 전략에 관한 MEPC.304(72)를 채택하였다. 초기 IMO 전략의 비전은 국제 해상운송에서 발생하는 온실가스 배출을 저감하고 사안의 급박성을 고려하여 금세기 내에 온실가스 배출을 가급적 이른 시기에 완전히 제거함을 목표로 하고 있다(Kim, 2017).

본 연구에서는 IMO 전략상 중/장기적인 조치 방안에 해당하고 온실가스 배출 저감을 위한 기술적 조치에 해당하는 무탄소 연료 개발의 일환으로 청정 연료로 각광 받고 있는 수소(H_2)를 대상으로 연구를 진행하였다(Bazari, 2016).

수소(H_2)는 물질을 구성하는 모든 원소 중 가장 가볍고, 물과 탄화수소의 주성분의 형태로 주위에 존재한다. 단위 질량당 발열량이 크고, 연소 후 생성물이 수증기가 대부분인 청정연료이며, 가연한계가 넓고, 최소 점화에너지가 낮아 순수 수소(H_2)를 LNG 연료와 혼합하여 연소하면 연소속도가 빨라지고 연소 및 배기 특성이 향상된다. 또한 수소(H_2)의 빠른 연소속도와 넓은 가연 범위 특성으로 인해 안정적인 희박연소가 가능하여 이산화탄소 배출량 저감을 기대할 수 있다(Talibi et al., 2010). 따라서 수소(H_2)는 이산화탄소의 증가로 인한 지구온난화를 방지할 수 있는 석유 대체 에너지원으로 단기적으로는 EEDI 규제를 만족시킬 수 있는 내연기관의 에너지원으로 전망되며 향후 장기적인 환경 및 배기 규제에 대응 가능한 석유에너지의 대체 에너지원으로 각광 받을 것이다(Boo, 2015).

본 연구는 대체에너지로 주목받는 수소(H_2)를 연소생성물 저감을 위한 첨가 또는 대체 연료로 활용하기 위한 기초적인 자료로 LNG연료의 주성분인 메탄, 에탄, 프로판 혼합 확산화염에 수소(H_2)를 첨가하여 생성되는 연소 생성물과 화염 형상을 실험적으로 관찰하여 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 배기가스 규제

선박 배출가스에 대한 규제는 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 이산화탄소(CO_2)로 크게 나눌 수 있다. 황산화물(SO_x)에 대한 배출 규제는 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 국제해양오염방지협약(MARPOL 73/78) 부속서 VI 규약(Regulation 14)에 따라 배출통제구역(ECAs, Emission Control Areas)에서는 2015.1.1. 이후 0.1% 이하, 그

외 모든 해역은 2020.1.1. 이후 0.5%로 기존 대비 90% 수준으로 감축 시행 예정이다(Lee, 2013).

질소산화물(NO_x)의 규제 대상선박은 출력이 130 kW를 초과하는 선박용 디젤기관 및 2000.1.1. 이후 주요 개조를 하는 출력이 130 kW 초과 선박용 디젤기관이다. 2000년부터 2011년 이전에 건조된 선박은 Tier 1 허용기준을 따라야 하고 2011년 이후에 건조된 선박은 강화된 Tier 2 허용기준을 따라야 한다. 또한 2016년 이후 건조된 선박은 배출통제구역(ECAs)을 항해 시 Tier 3기준을 만족해야하며, 배출통제구역(ECAs)을 제외한 구역에서는 Tier 2 기준까지 만족하면 된다(Park, 2014). 이산화탄소(CO_2) 배출 규제는 에너지 효율 설계 지수(EEDI, Energy Efficiency Design Index)를 적용하여 선종 및 선박의 크기별로 이산화탄소(CO_2) 배출 특성을 비교하고 단계별로 감축계수를 부여하여 2015년 기준으로 2020년까지 10%, 2025년까지 30%의 감축을 목표로 하고 있다. 황산화물(SO_x)과 질소산화물(NO_x)에 대한 배기가스 규제에 대한 상세내용은 아래 Fig. 1과 같다(Shim, 2018).

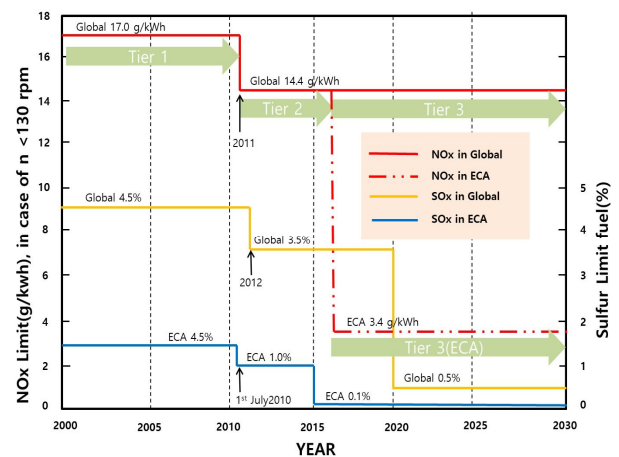


Fig. 1. NO_x , SO_x emission reduction measures of IMO.

3. 실험 조건 및 방법

모든 확산화염 실험은 주위온도 288 ± 3 K, 대기압인 상온 상압(Temperature and pressure, NTP) 조건에서 진행하였다. 질소산화물(NO_x), 이산화탄소(CO_2), 일산화탄소(CO) 배출량 측정 범위를 선택하기 위해 필요한 확산화염의 연소한정한계는 고정된 연료(메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판)에 첨가되는 수소(H_2) 혼합 유속(V_{fuel})조건하에 노즐 출구에서 산화제 동향류 분사속도($V_{oxidizer}$)를 조절하여 소염(blow out)이 발생하는 조건에서 결정되었다. 산화제 및 연료의 유속과 유량 데이터는 Table 1과 같다.

Table 1. Experiment data of Fuel and Oxidizer

Gas	Nozzle area (cm ²)	Flow rate (cm ³ /min)	Flow velocity (cm/min)
Fuel	0.785	400	509.6
Oxidizer	78.5	3333	42.5

동축류 확산화염을 활용한 실험은 총 3가지 CASE로 나누어 진행하였다. 각 CASE는 연료의 구성 성분을 메탄(100%), 메탄(90%)-프로판(10%), 메탄(90%)-에탄(6%)-프로판(4%)로 나누어 첨가되는 수소(H₂)의 체적비율을 0%에서 40%까지 5%씩 증가하여 수행하였다. 이때 산화제는 질소(76%), 산소(24%)비율로 고정하여 모든 실험에 동일하게 적용하였다. CASE 1의 수소(H₂)첨가에 따른 상세 실험 데이터와 실험장비 구성은 각각 Table 2와 Fig. 2와 같다.

Table 2. Experiment data of Methane with hydrogen (CASE 1)

No.	H ₂ (%)	Fuel (cm ³ /min)		Oxidizer (cm ³ /min)	
		CH ₄	H ₂	O ₂ (24%)	N ₂ (76%)
1	0	400	0	800	2533
2	5	380	20		
3	10	360	40		
4	15	340	60		
5	20	320	80		
6	25	300	100		
7	30	280	120		
8	35	260	140		
9	40	240	160		

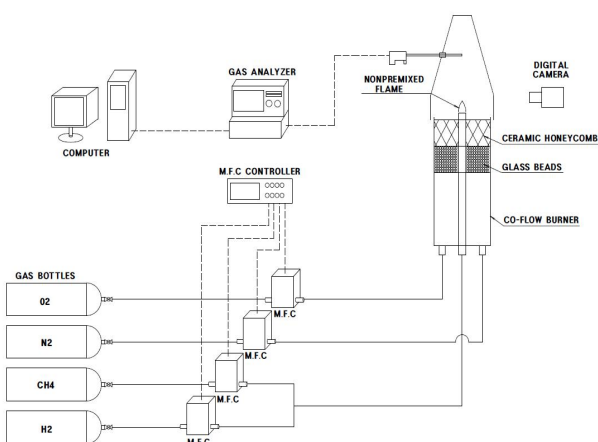


Fig. 2. Schematic diagram of CASE 1.

CASE 2의 실험은 메탄(90%)-프로판(10%)에 첨가되는 수소(H₂)의 체적비율을 0%에서 40%까지 5%씩 증가하여 수행하였다. 상세 실험 데이터와 실험장비 구성은 아래 Table 3과 Fig. 3과 같다.

Table 3. Experiment data of Methane-Propane with hydrogen (CASE 2)

No.	H ₂ (%)	Fuel (cm ³ /min)			Oxidizer (cm ³ /min)	
		CH ₄	C ₃ H ₈	H ₂	O ₂ (24%)	N ₂ (76%)
1	0	360	40	0	800	2533
2	5	342	38	20		
3	10	324	36	40		
4	15	306	34	60		
5	20	288	32	80		
6	25	270	30	100		
7	30	252	28	120		
8	35	234	26	140		
9	40	216	24	160		

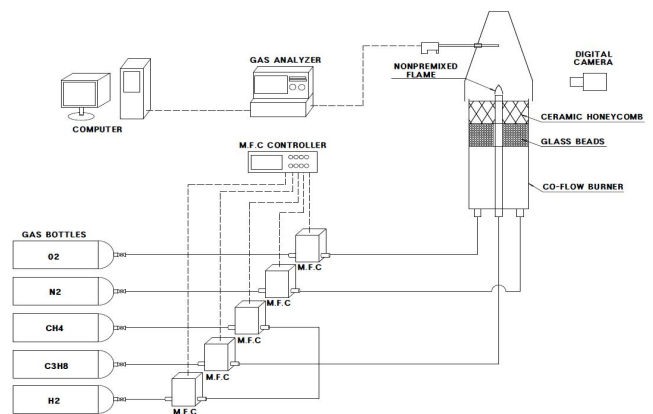


Fig. 3. Schematic diagram of CASE 2.

CASE 3의 실험은 메탄(90%)-에탄(6%)-프로판(4%)에 첨가되는 수소(H₂)의 체적비율을 0%에서 40%까지 5%씩 증가하여 수행하였다. 상세 실험 데이터와 실험장비 구성은 아래 Table 4와 Fig. 4와 같다. 연소생성물 측정은 각각의 실험 CASE마다 환경이 일정하게 유지되도록 공기를 충분한 시간 동안 연소실 내부에 분사하여 동일한 최초 실험 환경에서 수행되었다. 또한 화염과 연소생성물의 배출량이 충분히 안정화되는 5분 이상의 시간이 지난 후 측정되었다.

동족류 메탄(CH_4), 에탄(C_2H_6), 프로판(C_3H_8) 혼합 확산화염내의 수소(H_2) 첨가가 화염 형상 및 연소 생성물에 미치는 영향

Table 4. Experiment data of Methane-Ethane-Propane with hydrogen (CASE 3)

No.	H_2 (%)	Fuel (cm^3/min)				Oxidizer (cm^3/min)	
		CH_4	C_2H_6	C_3H_8	H_2	O_2 (24%)	N_2 (76%)
1	0	360	24	16	0	800	2533
2	5	342	22.8	15.2	20		
3	10	324	21.6	14.4	40		
4	15	306	20.4	13.6	60		
5	20	288	19.2	12.8	80		
6	25	270	18	12	100		
7	30	252	16.8	11.2	120		
8	35	234	15.6	10.4	140		
9	40	216	14.4	9.6	160		

배출 경향을 나타낸다.

전체적으로 모든 실험에서 수소(H_2)의 첨가에 따라 질소산화물(NO_x)의 생성이 Fig. 5와 같이 증가하는 경향을 보인다. 수소(H_2)의 첨가가 연소실의 내부 온도를 상승시켜 Thermal NO_x 의 발생량을 증가한 것으로 보인다. 메탄 확산화염에서 수소(H_2) 첨가량 30%에서부터 Thermal NO_x 의 생성량이 가파르게 증가하는 경향을 보였다. 그리고 메탄보다 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판 혼합 확산화염 순서대로 Thermal NO_x 배출량이 적게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 연료 혼합에 따른 불완전 연소율이 높아져 메탄-에탄-프로판에서 가장 적은 Thermal NO_x 가 생성된 것으로 보인다.

실제로 불완전 연소율을 보여주는 일산화탄소(CO)의 생성량 추이가 수소(H_2) 첨가량 30%에서부터 메탄-에탄-프로판, 메탄-프로판, 메탄 순으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 7 참조).

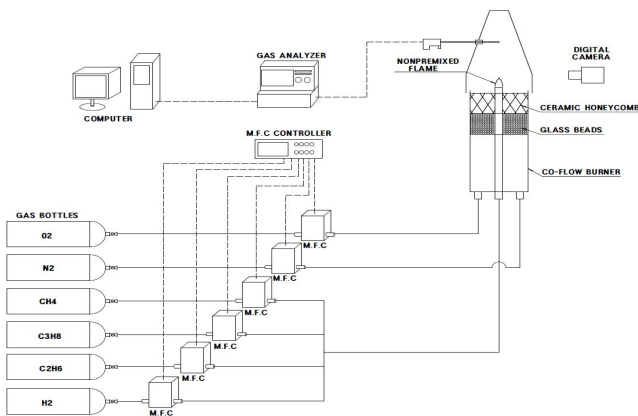


Fig. 4. Schematic diagram of CASE 3.

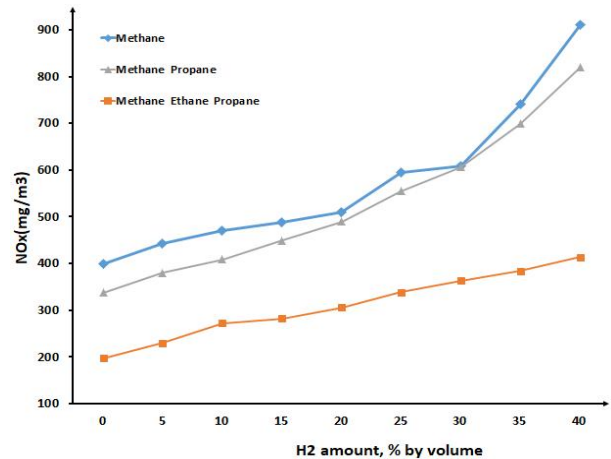


Fig. 5. Concentration of nitrogen oxide for hydrogen addition rates.

4. 실험 및 수치해석 결과

4.1 실험 결과

메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판의 동족류 확산화염내에서 수소(H_2)를 첨가하였을 때 연소생성물 배출량을 실험적으로 측정하여 각각의 배출 특성 경향을 확인 하였다.

4.1.1 질소산화물

연료의 속도는 $V_{fuel} = 509.6 \text{ cm}^3/\text{min}$ 로 하고 산화제의 속도는 $V_{oxidizer} = 42.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ 로 고정하여 수소(H_2)의 비율을 0%에서부터 40%까지 5%씩 증가하였을 때 질소산화물(NO_x)의

4.1.2 이산화탄소

전체적으로 모든 실험에서 수소(H_2)의 첨가에 따라 이산화탄소(CO_2)의 생성이 Fig. 6과 같이 감소하는 경향을 보인다. 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판, 메탄 순으로 이산화탄소(CO_2) 배출량이 적게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 혼합연료의 탄소비율에 따라 탄소비율이 높은 메탄-프로판에서 가장 많은 이산화탄소(CO_2)를 배출하고 탄소비율이 적은 메탄에서 가장 적은양의 이산화탄소(CO_2)가 발생된 것으로 보인다.

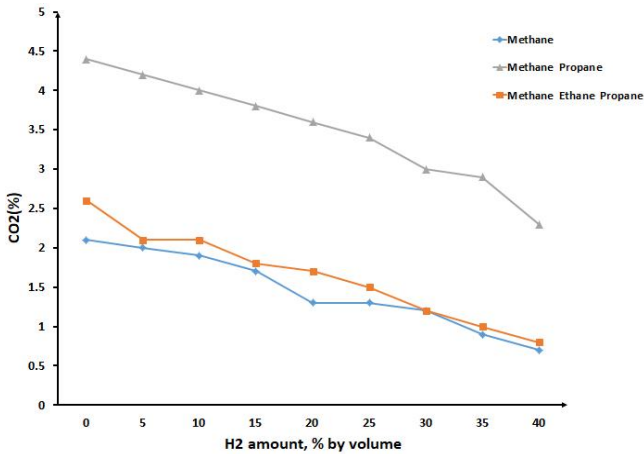


Fig. 6. Concentration of carbon dioxide for hydrogen addition rates.

4.1.3 일산화탄소

Fig. 7은 연료 속도 $V_{fuel} = 509.6 \text{ cm/min}$ 로 하고 산화제의 속도는 $V_{oxidizer} = 42.5 \text{ cm/min}$ 로 고정하여 수소(H_2)의 비율을 0%에서부터 40%까지 5%씩 증가하였을 때 일산화탄소(CO)의 배출 경향을 나타낸다. 수소(H_2) 첨가량이 0%에서 10%까지는 메탄-에탄-프로판, 메탄-프로판, 메탄 모두 감소하는 경향을 보이다가 30%에서 급격하게 일산화탄소(CO)의 생성량이 증가하여 40%에서는 메탄-에탄-프로판, 메탄-프로판, 메탄 순으로 처음과 비교하여 일산화탄소(CO)의 생성량 추이가 단일 연료보다 혼합연료에서 많이 생성되는 것을 확인할 수 있었다.

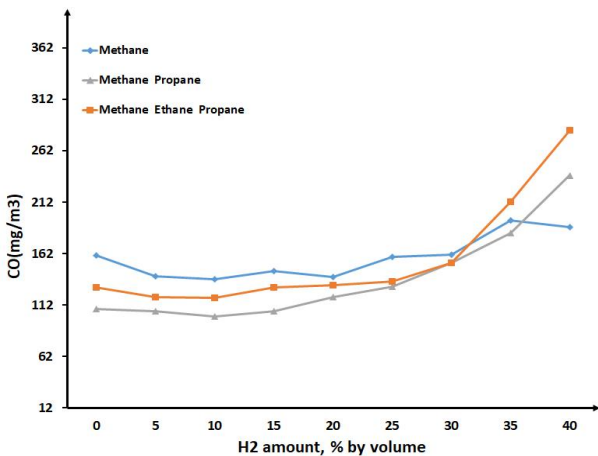


Fig. 7. Concentration of Carbon monoxide for hydrogen addition rates.

4.1.4 화염특성

메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판 동족류 확산화염 내부에 수소(H_2) 첨가비율을 0%에서 40%까지 5%씩 단계적으로 혼합시키면서 화염의 특성을 단계적으로 관찰하였다.

화염의 형상은 디지털카메라로 촬영하였으며 이들의 결과를 Fig. 8, 9, 10에 나타내었다. Fig. 8, 9, 10을 살펴보면, 각 CASE에서 No. 1에서 No. 9로 갈수록 대체적으로 광도는 큰 차이를 보이지 않는 반면, 화염의 길이가 감소하는데, 이는 수소(H_2) 첨가량이 증가하면서 전체혼합가스의 밀도가 감소하고 이에 따른 질량유량이 감소하기 때문이다. 또한 화염의 상부 적노색부의 범위가 점차 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 전체 혼합 가스 내 수소(H_2)의 비율 증가로 인해 카본(C)의 비율이 낮아져 매연 생성을 위한 메틸(CH_3), 아세틸렌(C_2H_2), 프로필렌(C_3H_3)등의 라디칼 생성이 적어져 매연 생성이 감소하기 때문이다.



Gas	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6	NO.7	NO.8	NO.9
Fuel	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%
H_2	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%

Fig. 8. Methane Flame Photographs by No. 1 ~ 9.



Gas	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6	NO.7	NO.8	NO.9
Fuel	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%
H_2	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%

Fig. 9. Methane-Propane Flame Photographs by No. 1 ~ 9.



Gas	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6	NO.7	NO.8	NO.9
Fuel	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%
H_2	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%

Fig. 10. Methane-Ethane-Propane Flame Photographs by No. 1 ~ 9.

4.2 수치해석 결과

USC Mech ver. 2.0을 기반인 ANSYS Chemkin 17.0 을 이용하여 연료에 수소(H_2)를 단계적으로 증가시킬 때 매연의 생

동족류 메탄(CH_4), 에탄(C_2H_6), 프로판(C_3H_8) 혼합 확산화염내의 수소(H_2) 첨가가 화염 형상 및 연소 생성물에 미치는 영향

성과 산화에 어떤 영향을 미치는지 알아보았다. 수치해석 입력 조건은 가스의 압력 1.0 atm, 온도 288.0 K로 일정하게 하였고 화염의 높이는 실제 동족류 에틸렌 확산화염에서 발생된 화염의 높이와 비슷하게 10 cm로 결정하였다. Table 1에서 볼 수 있듯이 동족류 확산화염을 실험했던 조건과 동일하게 대항류 확산화염의 연료(Fuel)에 수소(H_2)를 5%씩 단계적 증가시켰으며 산화제(Oxidizer)에는 질소(N_2)와 산소(O_2)를 76%, 24%로 혼합하여 분사하였다.

Fig. 11~13은 수소의 첨가량을 단계적으로 증가시켰을 때의 시뮬레이션 한 결과를 보여준다. Fig. 11은 확산화염에 수소 첨가량이 증가함에 따라 계산된 이산화탄소(CO_2)의 몰분율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 수소 첨가량이 증가할수록 이산화탄소(CO_2)의 몰분율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 추이는 실험과 같은 경향을 보이고 있고 탄소(C)의 비율이 상대적으로 많은 연료가 이산화탄소(CO_2) 몰분율 생성이 증가되는 것을 확인 하였다.

Fig. 12는 확산화염에 수소첨가량이 증가함에 따라 계산된 산소(O_2)의 몰분율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 산소(O_2)의 생성량은 이산화탄소(CO_2)의 생성량과 반대로 수소의 첨가에 따라 증가하는 것을 Fig. 12에서 확인 할 수 있으며 탄소(C)의 비율이 상대적으로 많은 연료에서 적은 산소(O_2) 몰분율이 생성되는 것을 확인하였고 이러한 경향은 이산화탄소(CO_2) 몰분율 생성추이와 정확히 반대되고 실험과 동일한 결과 값을 나타내는 것을 확인하였다.

Fig. 13은 확산화염에 수소첨가량이 증가함에 따라 계산된 일산화탄소(CO)의 몰분율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 일산화탄소(CO)의 생성량은 5%씩 0-40%까지 단계적 증가시켰을 때 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판, 메탄 순으로 Fig. 13과 같이 일산화탄소(CO)가 많이 생성되어 점진적으로 감소하는 추이를 나타내었다. 해석결과는 실험과 비교하여 0-10%까지의 실험 결과 추이와 동일하게 나타나는 것을 확인 하였다. 10-40% 수소첨가 실험에서는 일산화탄소가 증가함에 반해 해석 값은 감소하였는데 이상적인 실험 환경 및 화학 반응식에서는 감소하지만 그렇지 못한 실제 실험에서는 혼합된 연료의 후류 상호작용에 의하여 환경 변위가 달라져 일산화탄소(CO)의 생성량이 증가하는 것을 알 수 있다.

4.2.1 이산화탄소

Fig. 11~13은 수소(H_2)의 첨가량을 단계적으로 증가시켰을 때의 시뮬레이션 한 결과를 보여준다. Fig. 11은 확산화염에 수소(H_2) 첨가량이 증가함에 따라 계산된 이산화탄소(CO_2)의 몰분율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 수소(H_2) 첨가량이 증가할수록 이산화탄소(CO_2)의 몰분율이 감

소하는 것을 알 수 있다. 이러한 추이는 실험과 같은 경향을 보이고 있고 탄소(C)의 비율이 상대적으로 많은 연료가 이산화탄소(CO_2) 몰분율 생성이 증가되는 것을 확인하였다.

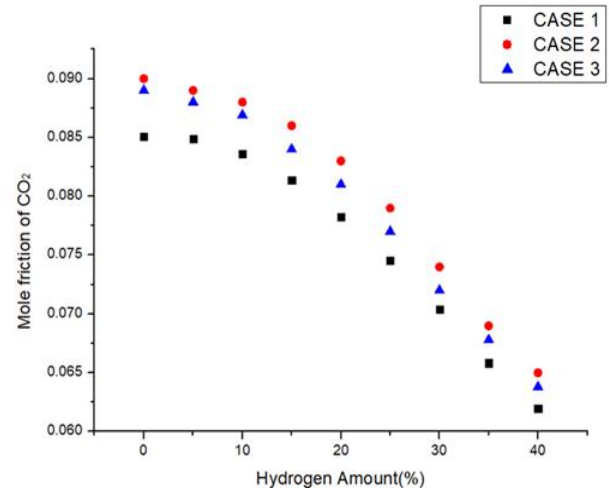


Fig. 11. Calculated CO_2 distributions with increasing the hydrogen addition.

4.2.2 산소

Fig. 12는 확산화염에 수소(H_2) 첨가량이 증가함에 따라 계산된 산소(O_2)의 몰분율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 산소(O_2)의 생성량은 이산화탄소(CO_2)의 생성량과 반대로 수소의 첨가에 따라 증가하는 것을 Fig. 12에서 확인 할 수 있으며 탄소(C)의 비율이 상대적으로 많은 연료에서 적은 산소(O_2) 몰분율이 생성되는 것을 확인하였고 이러한 경향은 이산화탄소(CO_2) 몰분율 생성추이와 정확히 반대되고 실험과 동일한 결과 값을 나타내는 것을 확인하였다.

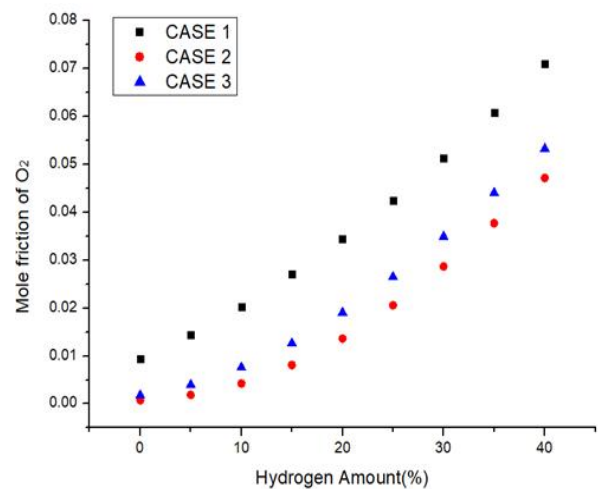


Fig. 12. Calculated O_2 distributions with increasing the hydrogen addition.

4.2.3 일산화탄소

Fig. 13은 확산화염에 수소(H_2) 첨가량이 증가함에 따라 계산된 일산화탄소(CO)의 몰분율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 일산화탄소(CO)의 생성량은 5%씩 0-40% 까지 단계적 증가시켰을 때 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판, 메탄 순으로 Fig. 13과 같이 일산화탄소(CO)가 많이 생성되어 점진적으로 감소하는 추이를 나타내었다.

해석결과는 실험과 비교하여 0-10%까지의 실험 결과 추이와 동일하게 나타나는 것을 확인 하였다. 10-40% 수소(H_2) 첨가 실험에서는 일산화탄소(CO)가 증가함에 반해 해석 값은 감소하였는데 이상적인 실험 환경 및 화학반응식에서는 감소하지만 그렇지 못한 실제 실험에서는 혼합된 연료의 후류 상호작용에 의하여 환경 변위가 달라져 일산화탄소(CO)의 생성량이 증가하는 것을 알 수 있다.

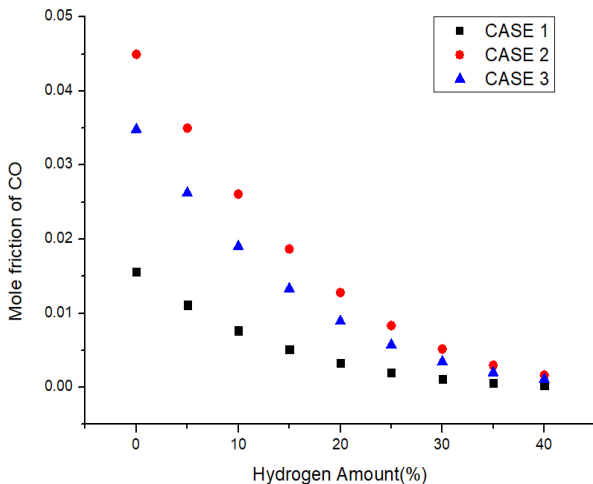


Fig. 13. Calculated CO distributions with increasing the hydrogen addition.

4.2.4 화염온도

Fig. 14는 수소(H_2)의 첨가에 따른 화염의 불꽃 온도를 해석한 결과 값이다. 그림에서 알 수 있듯이, 수소(H_2) 0%-40% 까지 수소(H_2)의 첨가량이 많아질수록 메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판 순으로 화염의 온도가 점진적으로 높아지는 것을 수치적으로 확인 할 수 있다. Fig. 5의 실제 실험에서도 같은 순서로 Thermal NOx의 생성량이 많은 것을 미루어 보아 화염온도가 높을수록 Thermal NOx의 생성량이 많아지는 상관관계를 실험 및 수치해석으로 검증하였다.

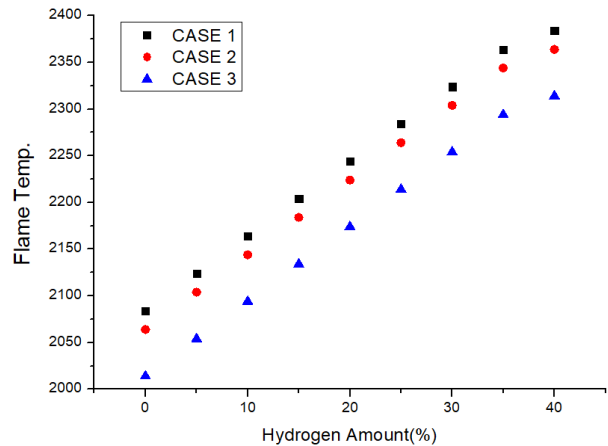


Fig. 14. Calculated Flame Temp. with increasing the hydrogen addition.

5. 결론

(1) 실험결과 및 해석결과에서 확산화염에 수소(H_2) 첨가량이 증가함에 따라 질소산화물(NO_x)의 생성량이 선형에 가깝게 증가하는 경향을 보였다. 이것은 수소(H_2)의 상대적으로 높은 단열화염온도와 빠른 연소속도가 Thermal NOx의 생성을 촉진시켰다고 보여진다. Thermal NOx의 생성량이 많은 순서는 화염온도가 높은 순서와 동일하게 메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판으로 나타났다. 이는 수소(H_2)를 혼합연소하는 내연기관에 적용할 경우 희박한 AFR 또는 배기가스 재순환장치(EGR), 선택적 촉매 환원법(SCR)을 이용하여 Thermal NOx의 생성량을 감소하여야 한다는 것을 의미한다.

(2) 이산화탄소(CO_2)의 생성량의 경우 확산화염에 수소(H_2)를 첨가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이것은 수소(H_2)를 첨가함에 따라 혼합 확산화염에 포함되어있는 전체 탄소비율이 줄어들고 수소(H_2)첨가가 이산화탄소(CO_2)의 생성을 감소시키는데 영향을 준 것으로 볼 수 있다. 이는 선박에서 LNG-수소(H_2)의 혼합 연료사용으로 인해 온실가스인 이산화탄소(CO_2)를 저감할 수 있는 하나의 방안으로 고려될 수 있다는 것을 의미한다.

(3) 확산화염에 수소(H_2)를 첨가함에 따라 일산화탄소(CO)의 생성량이 증가하는 경향을 보였다. 실험에서 일산화탄소(CO)의 생성량의 순서가 수소(H_2) 40%에서 메탄-에탄-프로판, 메탄-프로판, 메탄으로 연료가 많이 혼합될수록 일산화탄소(CO)의 생성량이 많아지는 것을 확인할 수 있었다.

동축류 메탄(CH_4), 에탄(C_2H_6), 프로판(C_3H_8) 혼합 확산화염내의 수소(H_2) 첨가가 화염 형상 및 연소 생성물에 미치는 영향

이것은 수소(H_2)를 첨가함에 따라 전체적인 이론 공연비가 높아짐에 따라 불안전 연소 확률이 높아진 영향과 혼합되는 연료의 수가 많을수록 확산화염에서의 서로 다른 연료의 후류 상호작용이 활발하게 일어났기 때문이다.

(4) 수소(H_2) 첨가량에 따른 화염형상을 비교 분석한 결과, 모든 실험에서 수소(H_2) 첨가량을 증가시키면 화염상부에 적노색부분이 줄어들고 화염의 하부의 과란색 부분이 선명해지는 것을 확인할 수 있었다. 더불어 전체적인 화염의 길이를 비교하여 볼 때 수소(H_2) 함유량이 증가할수록 길이가 감소하는 것을 발견할 수 있었다. 이는 연료의 수소(H_2) 비율을 증가시키면 상대적으로 밀도가 작은 수소(H_2)의 영향 때문에 전체 혼합연료의 밀도와 질량유량이 감소하기 때문이다.

Received : 2019. 09. 26.

Revised : 2019. 10. 26.

Accepted : 2019. 10. 28.

References

- [1] Bazari, Z.(2016), IMO Train the Trainer Course on Energy Efficient Ship Operation, Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines, Module 2, p. 12.
- [2] Boo, W. C.(2015), A Study on Korean Countermeasures for Controls on Greenhouse Gas Emissions from Ships, Master's Thesis, Inha University.
- [3] Kim, D. J.(2017), Methods and Suggestions for Countermeasures of Environmental Regulations in Shipping Industry, Korea Development Bank Survey, No. 740, pp. 59-60.
- [4] Lee, B. R.(2013), A Study on the Application of Emission Trading System to reduce Greenhouse Gas from Ships, Korea Maritime and Ocean University.
- [5] Park, H. S.(2014), A Study on the State's Responsibility and Implementation on Emission Control of Greenhouse Gas related to Ships, Master's Thesis, Korea Maritime and Ocean University.
- [6] Shim, S. M.(2018), Implementation of Greenhouse Gas Reduction Measures by the International Maritime Organization (IMO) and Implications for Korea, IFANS Analysis of Major International Issues, No. 49, p. 12.
- [7] Talibi, M., R. Balachandran, and N. Ladommatos(2010), Influence of combusting methane-hydrogen mixtures on compression-ignition engine exhaust emissions and in-cylinder gas composition, University College London.