

유증기 연소처리를 위한 난류 부분에혼합화염의 활용 및 유동장 가시화

안태국* · 남연우** · 박선호†

Utilization and Visualization of Turbulent Partially-premixed Flame for Combustion of Inert-gas-diluted VOC

Taekook Ahn*, Younwoo Nam**, Sunho Park*†

ABSTRACT

Combustion of low concentration VOC in inert gas around the flammability limit has been experimentally studied. Streams of nitrogen and propane mixture with various compositions and flow conditions were treated by a turbulent partially-premixed pilot flame. HC and CO contents in exhaust gas measured and the flow patterns were visualized. The results suggested that there exists an optimal mixture velocity range for efficient combustion treatment for each flow condition and composition of the mixture.

Key Words : Volatile organic compounds, Turbulent partially-premixed flame, Pilot flame, Flammability limit, Inert gas dilution

선박 유증기 회수설비에 대한 연구는 유류탱크에서 대기로 방출되는 유증기(Volatile Organic Compounds, VOC)를 회수하여 저장하고 필요시 연료로 사용할 수 있도록 하는 방안을 중심으로 진행되고 있다. 그러나 실제 유증기는 다양한 탄화수소 연료와 다량의 불활성기체와 혼합된 상태이므로 완벽한 회수에는 한계가 있기 때문에 회수되지 않은 유증기를 연소처리하여 대기로의 배출을 저감하는 방안이 필요하다.

탄화수소 연료에 불활성기체가 첨가될 경우 화염전파속도가 감소하는 등의 이유로 화염의 안정적인 유지가 어려워진다.[1] Figure 1은 질소 또는 이산화탄소와 혼합된 프로판이 공기와 예혼합될 때의 가연범위를 나타낸다.[2] 그래프의 수직축은 전체 혼합물 중 프로판의 몰분율을, 수평축은 공기와 불활성기체 중 불활성기체의 몰분율을 나타낸다. 몰분율 계산법은 선행연구에 자세히 기술되어 있다.[3] 그래프 상의 직선은 당량비 1인 조건이며, 이의 가연한계인 수평축의 질소 몰분율 37 %는 일반적인 버너를 이용한 연소에서

도달하기 어려운 조건이다. 더욱이 유류탱크에서 배출되는 유증기의 조성은 시간에 따른 변화가 매우 심하며, 연소를 위해 공기와 혼합되었을 때의 질소 몰분율은 수시로 가연범위를 벗어나게 된다. 이러한 유증기를 화염을 유지하며 직접적으로 연소시키기에는 많은 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 별도의 난류 부분에혼합화염을 파일럿 화염으로 이용하고, 이에 유증기를 분사, 연소시키는 버너를 제작하여 유증기의 연소처리 가능성에 대한 실험을 수행하였다.

Figure 2a는 유증기 연소 실험을 위하여 제작된 버너의 개념도를 나타낸다. 1번 노즐에 공기제트를, 2번 노즐에 연료를 공급하여 Fig. 2b와 같은 파일럿 화염을 형성한다. 3번 노즐에 산화제 역할의 공기를 공급한다. 파일럿 화염의 상단은 난류 부분에혼합화염의 형태이고, 하단은 확산화염으로서 전체 화염을 안정화시킨다. 4번 노즐을 이용하여 불활성기체와 유증기의 혼합기를 파일럿 화염을 향해 분사하여 연소처리 되도록 한다. 실험에 사용된 실제 버너(Fig. 3)는 원주 방향을 따른 slot 형태의 4번 노즐에서 45도의 각도로 파일럿 화염을 향해 혼합기를 분사할 수 있으며, 동일한 혼합기 유량에 대해 slot의 폭을 조절하여 유속을 변화시킬 수 있도록 설계하였다.

* Dankook University Mechanical Engineering

** Hankyong University

† Corresponding author: sunhopark@dankook.ac.kr

Tel : (031)8005-3527 Fax : (031)8021-7215

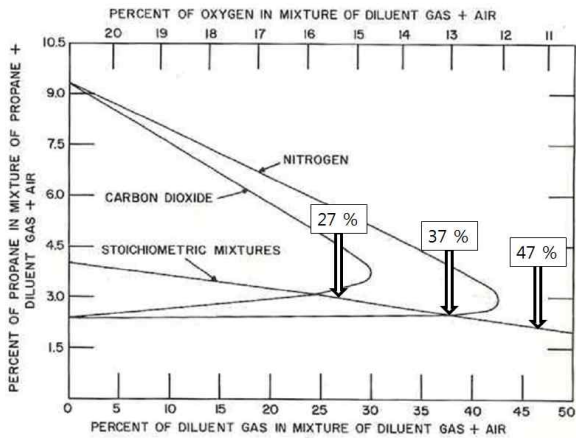


Fig. 1 Flammability limit of the mixture of propane, air and diluting nitrogen or carbon dioxide.[2]

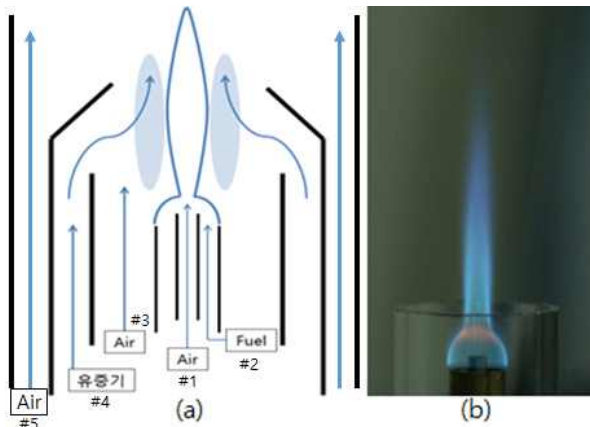


Fig. 2 a) The schematic of the burner. b) Turbulent partially-premixed flame as a pilot flame.

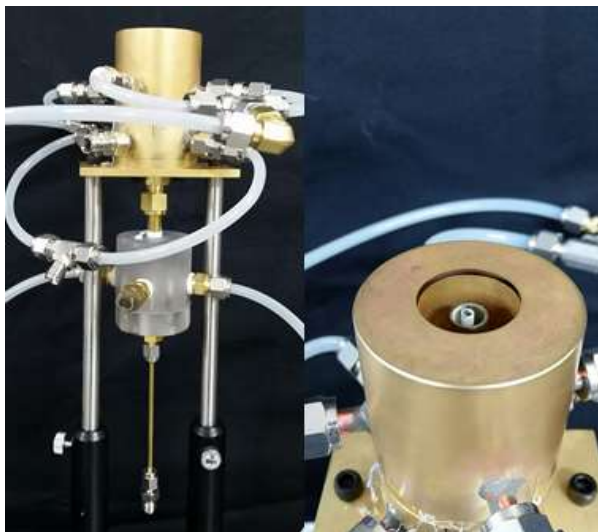


Fig. 3 Photo-image of the burner.

Table 1은 실험에 대한 유량 조건을 나타낸다. 1, 2, 3번 노즐로 공급되는 공기 및 연료의 유량은 일정하고, 4번 노즐로 공급되는 프로판의 양과 질소의 양을 조절하여 실험을 수행하였다. 버너 외부의 5번 노즐에는 60,000 sccm(standard cubic centimeter per minute)의 차단공기를 공급하였다. 각각의 프로판 유량에 대해 Fig. 1 그래프 상에서 수평축에 나타난 질소 몰분율이 27, 37, 47 %가 되도록 하는 조건으로 질소 유량을 설정하고, 각각의 혼합기 유량 조건에 대해 4번 노즐에서 분사되는 혼합기의 속도를 변화시키며 연소 과정을 관찰하였다. 배기가스분석기(Vario plus, MRU)를 사용하여 배출되는 배기가스 내 hydro-carbon(HC)와 CO의 농도를 측정하였다.

Figure 4는 4번 노즐로 공급되는 프로판(HC) 중 소모되는 프로판(HC)의 비율을 나타낸다. 혼합기의 각 유량 조건에 대해 HC의 소모가 최대가 되는 혼합기의 분사속도 영역이 존재함을 확인할 수 있다. 질소의 농도가 높아질수록 프로판이 소모되는 비율이 전체적으로 낮아지며, 프로판 소모가 최대가 되는 속도 범위가 오른쪽(고속 영역)으로 이동하는 것을 알 수 있다.

Figure 5는 각 조건에서 배출되는 CO의 농도를 나타낸다. 소모된 프로판의 일부가 완전히 연소되지 못하고 CO 형태로 전환된 것을 알 수 있다. 질소 몰분율 27 %는 Fig. 1의 그래프 상에서 가연범위에 포함되나, 실험실 내 동축류버너를 이용하여 프로판에 질소가 첨가된 혼합기를 확산 화염 형태로 연소시킨 자체 실험에서는 질소 몰분율 21 %에서 화염탈림이 발생하였다.

Table 1 Fuel, air and nitrogen flow rates.

Nozzle (sccm)					
1	2	3	4		5
air	propane	air	propane	nitrogen	air
5170 (18.073 m/s)	218.7 (0.084 m/s)	21150 (0.840 m/s)	100	900	60000
				1400	
				2200	
			200	1800	
				2800	
				4200	
			300	2700	
				4200	
				6400	
			500	4400	
				7000	

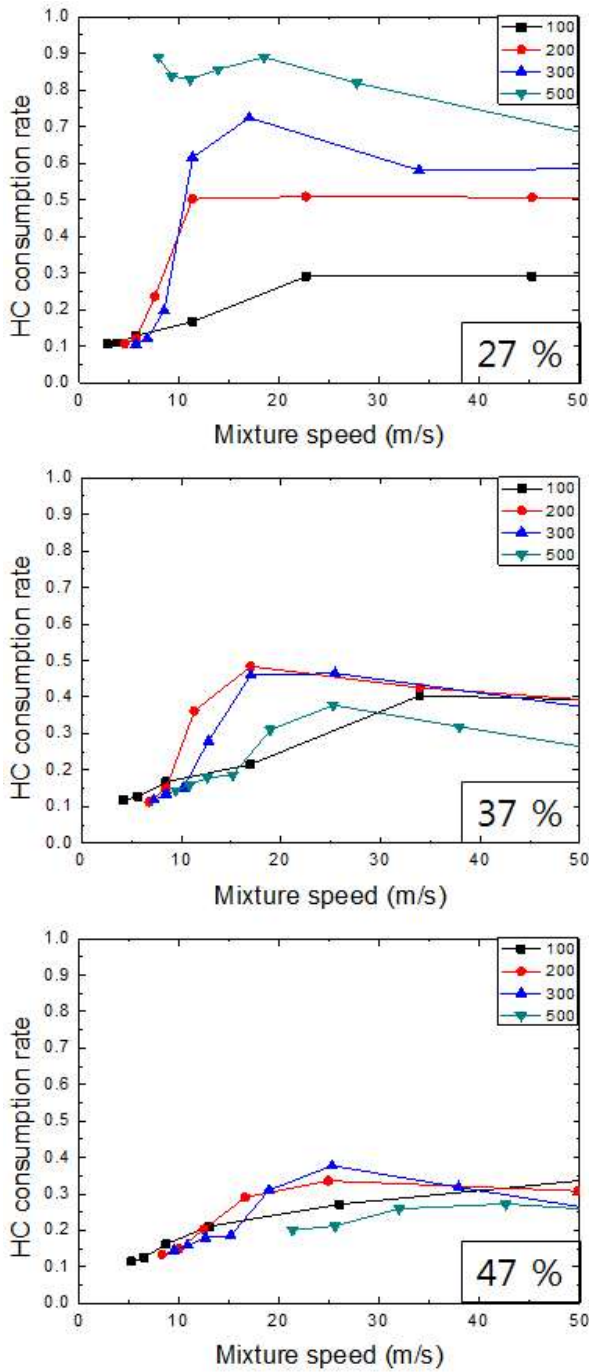


Fig. 4 HC consumption ratio at N₂ concentration of 27, 37 and 47 %.

연료 혼합물의 가연한계는 버너의 구조, 화염의 형태 등 여러 요인에 의존하며, 가연범위 그래프에 주어진 가연한계 값에서 화염을 유지하기 어려운 경우가 많다. 본 연구에서 사용된 모든 질소 물분율 값(27-47 %)들은 혼합기를 충분히 연소시키기에 가혹한 조건들이며, 그럼에도 불구하고 본 연구에서 제작된 버너를 통해 유증기를 부분적으로 연소처리 할 수 있음을 보이고 있다.

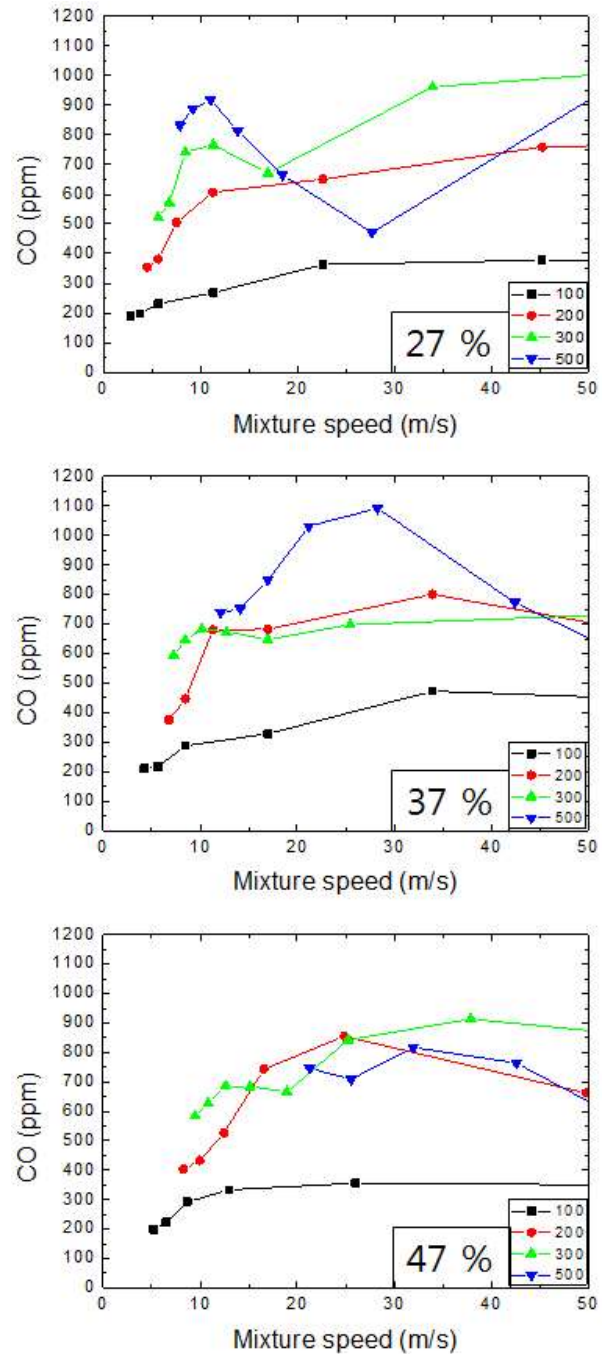


Fig. 5 CO concentration(ppm) in exhaust gas at N₂ concentration of 27, 37 and 47 %.

질소 물분율이 47 %일 때 4번 노즐의 속도가 50 m/s 이상인 일부 조건에서 4번 노즐을 통해 공급된 HC보다 더 많은 HC가 배기가스로 배출되는 현상이 관찰되었다. 이 조건에서는 혼합기의 강한 유동에 의해 파일릿 화염의 유동이 교란되어 2번 노즐로 공급된 연료의 일부가 연소되지 못하고 혼합기 내 HC와 함께 배출되기 때문으로 판단된다.

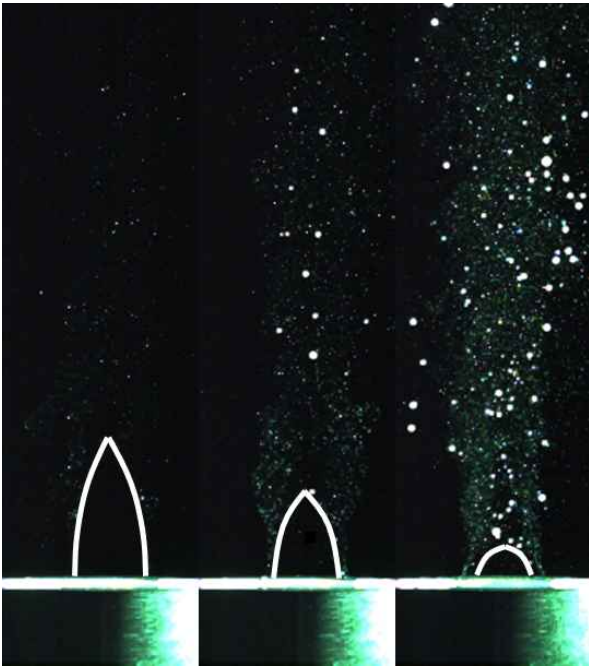


Fig. 6 Visualization of the flow above the burner at varying speed conditions of nitrogen and fuel mixture at nozzle #4.

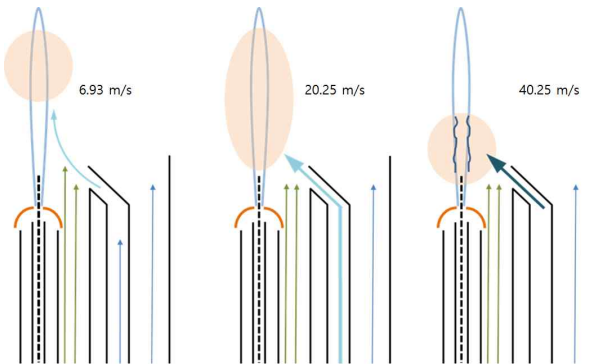


Fig. 7 Schematics of flow patterns around the burner at varying speed conditions of nitrogen and fuel mixture at nozzle #4.

Figure 6은 버너 주위의 가시화된 유동장을 보여준다. 4번 노즐로 공급되는 유량 5000, 15000, 3000 sccm의 질소에 Al_2O_3 입자(10 nm, 석경에 이티)를 첨가하였다. 분사 속도(6.93, 20.25, 40.25 m/s)를 달리하며 Nd-YAG 레이저(NANO L PIV, LITRON LASERS)와 초고속 카메라(FASTCAM SA3, PHOTRON)를 이용하여 유동에 대한 이미지를 획득하고, 입자가 존재하지 않은 영역의 경계를 흰색 선으로 나타내었다. 4번 노즐에서 공급되는 혼합기의 속도가 빨라질수록 입자가 존재하지 않은 영역이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Figure 6의 유동 형상을 Fig. 7에 도식적으로 나타내었다. 실험에 사용된 버너는 내부 난류 부분에 혼합화염의 하단부에 위치한 확산화염을 안정시키기 위하여 3번 노즐로 다량의 공기를 공급한다. 4번 노즐에서 분사되는 혼합기의 속도가 낮은 경우에는 3번 노즐에 의한 공기 유동층에 의해 혼합기가 파일럿 화염과 충분히 접촉하지 못하며, 속도가 지나치게 높을 경우에는 파일럿 화염을 교란하여 파일럿 화염 내 연료 일부가 연소되지 못하고 배기가스로 배출된다고 판단된다.

질소와 프로판의 난연성 혼합기를 난류 부분에 혼합 파일럿 화염을 이용하여 연소 처리하는 실험을 수행하였다. 파일럿 화염은 하단부에 존재하는 확산화염 영역으로 인해 안정성이 큰 장점을 가지고 있다. 이 화염에 질소와 프로판의 혼합기를 다양한 유량과 속도로 분사하고, 배기가스 내 HC 및 CO의 농도를 측정하여 혼합기의 연소 여부를 정량적으로 판단하였다. 또한 버너 주위의 유동장에 대한 가시화를 통해 혼합기의 분사 속도에 따라 혼합기 및 파일럿 화염의 유동장의 형태가 변화함을 확인하였다. 공급되는 혼합기의 속도에 따라 동일한 혼합기의 질소 물분율에서도 연소 가능성이 달라지며, 혼합기를 연소시키는 최적의 속도 영역이 존재함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양안전 및 해양교통시설기술개발사업의 “선박배출 대기오염원(P, BC) 기후변화 영향평가 및 저감기술 개발” 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] C. Prathap, Anjan Ray, M.R. Ravi, “Investigation of nitrogen dilution effects on the laminar burning velocity and flame stability of syngas fuel at atmospheric condition”, *Combustion and Flame.*, Vol. 155, 2008, pp. 145-160.
- [2] B. Lewis and G. von Elbe, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, 3rd ed., Academic Press, 1987.
- [3] 안태국, 박선호, 남연우, 이원남, “난류 부분에 혼합화염을 이용한 난연성 유증기 처리에 관한 연구”, 제 49회 KOSCO SYMPOSIUM 초록집, 2014, pp. 207 - 210.