

난류 부분에혼합 화염을 이용한 난연성 유증기 처리에 관한 연구

안태국* · 박선호* · 남연우** · 이원남**

Combustion of Low Concentration VOC on a Turbulent Partially Premixed Flame

Taekook Ahn*, Sunho Park*, Younwoo Nam**, Wonnam Lee**

ABSTRACT

The potential of combustion treatment of low concentration VOC on a turbulent partially premixed flame has been studied experimentally. The significant decrease in hydrocarbon concentration from the low concentration VOC was observed with a turbulent partially premixed flame. The VOC/inert gas mixture whose fuel concentration is beyond the flammability limit could be treated in this method.

Key Words : VOC, Flammability limit, Turbulent partially premixed flame.

불활성 기체가 다량 함유된 유증기의 연소처리를 위하여 예혼합 또는 확산화염이 이용되고 있다.

유증기를 효과적으로 처리하기 위해서는 안정적인 화염의 형성과 빠른 연소반응이 요구된다. 예혼합 화염은 연소반응속도가 빠르며 따라서 다량의 연료를 연소시키기에 적합하지만 포함되는 불활성 기체의 정도에 따라 안정된 화염의 유지에 어려움이 있을 수 있다. 반면에 확산화염은 가연한계 내에서는 안정적인 화염의 형성이 가능하지만 한정된 체적 내에서 다량의 연료를 연소하기에 적절하지 않을 수 있다.

선박용 VOC 회수장치(SVRU)로 회수된 기체에는 N_2 , CO_2 와 같은 불활성 기체가 다량 포함되어 있다. Fig. 1은 연료에 첨가되는 불활성 기체에 따른 화염 가연한계를 보여준다.⁽¹⁾ 불활성기체가 첨가된 연료는 불활성기체로 인하여 화염의 온도가 낮아지고 화염전파속도가 감소하여 화염은 불안정하게 된다.⁽²⁾

본 연구는 화염의 가연한계를 넘어 다량의 불활성기체가 함유된 탄화수소를 연소시킬 수 있는 방법을 목적으로 수행되었다. Fig. 2는 삼중 동축류 버너를 이용하여 내부의 과일릿화염인 확산화염을 이용한 불활성기체가 첨가된 연료의 화염형성을 보여준다.⁽³⁾ 이때 내부의 확산화염이 외부에서 공급되는 혼합기의 연소과정에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 하지만 이 방법은 화

염의 안정성에 떨어지는 문제가 있고 다량의 난연성 혼합기를 연소시킬 수 없는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 난류 부분 예혼합 화염을 과일릿 화염으로 사용하여 다량의 난연성 기체를 연소시키기 위한 실험적 연구를 수행하였다.

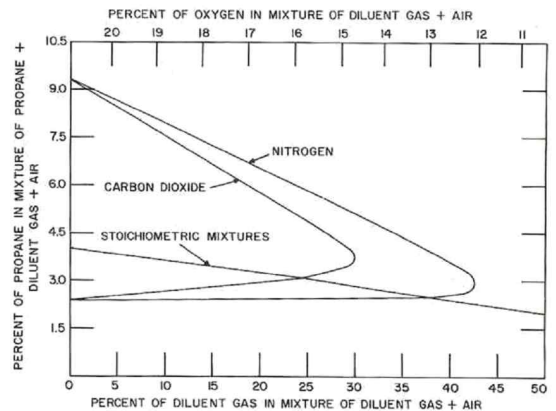


Fig. 1 Flammability limit of propane and air with an inert gas mixture.⁽¹⁾

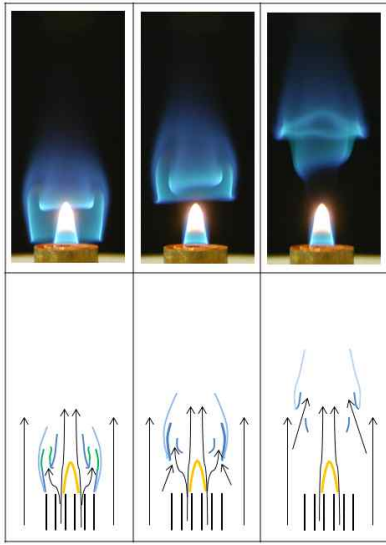


Fig. 2 Structures of flames with a pilot flame and various amount of nitrogen dilution.

Figure 3은 질소가 첨가된 혼합기 중간에 공기 제트를 공급한 실험 결과를 나타내고 있다. 외경이 3.175 mm(1/8 inch)인 내부노즐로 공기를 분출하고 외부의 외경 9.525 mm(3/8 inch) 노즐로 프로판 또는 프로판/질소 혼합기를 공급하였다. 내부 노즐의 위치에 따라 생성되는 화염의 형상과 안정성이 변하며, 이때 형성되는 화염은 난류 부분예혼합 화염이라는 것을 알 수 있었다. 따라서 순수 연료와 내부 공기 제트를 이용하여 난류 부분예혼합 화염을 형성하고 이를 이용한 다량의 난연성 유증기를 연소처리하기 위한 방법에 대한 연구를 수행하였다.

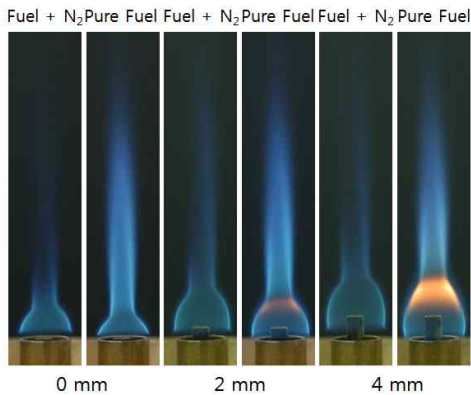


Fig. 3 Flame formation with an air jet through the inner nozzle.

Figure. 4는 난류 부분예혼합 화염과 실험을 수행한 개념 및 실제 화염을 형성하는 버너의 개략도를 나타낸다. 기본적으로 중심부에 형성된 난류 부분예혼합 화염에 외부에서 불활성 기체가 포함된 유증기를 공급하는 방법을 사용하였다. 실제 버너에서는 내부에 두 개의 노즐을 사용하여 부분예혼합 화염을 형성하였다. 외부노즐에는 연료, 외부노즐에 비해 높이가 높은 내부노즐에는 빠른 속도의 공기를 공급하여 화염 하단에는 확산화염, 상단에는 예혼합화염이 나타나는 난류 부분예혼합 화염을 형성하고 이를 파일럿 화염으로 이용하였다. Fig. 5는 내부노즐과 외부노즐의 높이 차이에 따른 화염 형상을 보여준다. 내, 외부 노즐의 높이 차이가 2, 3, 5, 10 mm인 조건에 화염을 형성시켰다. 내부 노즐의 높이가 높아질수록 확산 화염의 크기가 커지며 화염은 점점 불안정해지는 경향을 나타냈다. 따라서 본 실험에서는 내, 외부 노즐의 높이 차를 가장 안정적인 조건인 2 mm로 고정하고 실험을 수행하였다. 이 조건은 내부 화염이 완전 연소되는 조건이기도 하다.

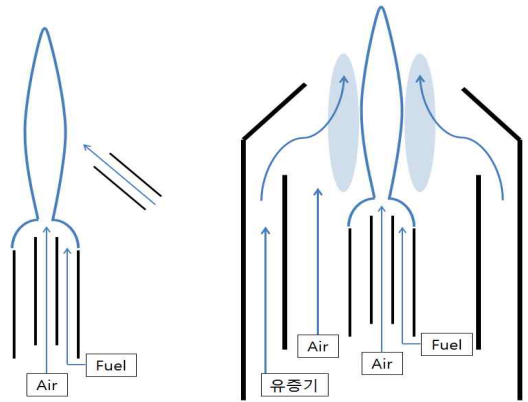


Fig. 4 The concept of combustion of low concentration VOC on a turbulent partially premixed flame.



Fig. 5 Flame shape changes as the inner nozzle position increases.

유증기의 연소처리 실험을 위하여 Fig. 4의 버너 개념을 바탕으로 화염 외부로는 확산 화염을 안정시킬 수 있는 공기를 공급하였다. 공기 외부에는 불활성 기체가 첨가된 난연성 기체를 공급해줄 수 있도록 버너를 설계하였다. 불활성 기체가 첨가된 혼합기를 분사하는 노즐은 직경 2 mm의 홀을 8개를 가지고 있으며 45도 각도를 가지고 내부 파일릿 화염에 분사될 수 있도록 설계되었다. 또한 배기가스 분석기를 이용하여 배기가스의 조성을 분석하기 위해서 배기가스의 온도를 감소시킬 수 있도록 외부에 공기를 공급하였다. 파일릿 화염인 난류 부분 예혼합 화염은 하단의 확산 화염이 안정된 조건에서는 전체 화염의 안정성이 굉장히 높다는 특징이 있다. 따라서 공급되는 불활성 기체가 첨가된 기체상의 연료를 하단의 확산화염의 안정성에 영향을 받지 않는 화염의 상단, 난류 예혼합 화염에 혼합기를 공급하여 난연성 기체의 연소 가능성에 대한 실험을 수행하였다.

Table. 1은 실험 조건은 나타낸다. 실험은 6개의 변수 중 4번 노즐로 공급되는 연료와 질소의 양을 변화시키며 수행하였으며 4번 노즐에서 분사되는 홀의 개수를 4, 8개의 조건에서 실시하여 분사되는 속도에 대한 영향에 대해서도 실험하였다. 배기가스는 MRU사의 vario plus를 사용하여 조성을 분석하였다. 이 장치는 가스중의 hydro carbon(HC)와 O₂, CO₂, NO, SO₂ 등 성분의 농도를 측정할 수 있다. 본 실험에서는 이 장치를 이용하여 배기가스 내의 HC, CO, CO₂의 농도를 분석하여 난연성 기체의 연소처리 가능성에 대하여 알아보았다.

Table. 1 Conditions of experiment.

| | 1A | 2F | 3A | 4F | 4N | 5A |
|--------|------|-------------------------------|-------|-------------------------------|----------------|-------|
| | Air | C ₃ H ₈ | Air | C ₃ H ₈ | N ₂ | Air |
| Case 1 | 5170 | 218.7 | 21150 | 222 | 1000 | 60900 |
| Case 2 | 5170 | 218.7 | 21150 | 222 | 2000 | 60900 |
| Case 3 | 5170 | 218.7 | 21150 | 222 | 4000 | 60900 |
| Case 4 | 5170 | 218.7 | 21150 | 222 | 6000 | 60900 |
| Case 5 | 5170 | 218.7 | 21150 | 103.2 | 2000 | 60900 |

Figure. 6은 4번 노즐의 혼합기가 4, 8개의 홀을 통하여 공급된 조건의 배기가스를 분석한 값을 나타낸다. 같은 조건의 혼합기를 공급하였을 때 홀 개수에 따른 HC 분석 결과는 다르게 나타났다. 첨가되는 질소의 증가시키며 실험한 case 1 - 4에서 4개의 홀로 공급되는 조건에서는 HC가 증가하였지만 8개의 홀로 공급되는 조건에서

는 감소하는 경향이 나타났다. 혼합기가 4개의 홀로 공급되는 조건에서는 질소가 증가하면 화염이 연소되기 가혹한 조건으로 되며 연료는 연소되지 못하고 배기가스에서 측정되는 HC의 농도가 점점 증가하는 것을 알 수 있었다. 반면에 혼합기가 8개의 홀로 공급되는 조건에서는 질소의 양이 증가할수록 검출되는 HC 성분의 값이 점점 줄어드는 경향을 나타냈다. 이는 질소가 첨가될수록 많은 연료가 연소되는 것을 나타낸다. 이와 같은 결과는 4번 노즐에서 분사되는 홀의 개수에 따른 속도 차이에 의한 것으로 해석된다. 파일릿 화염에 공기를 공급하는 3번 노즐에는 공기가 90.7 cm/s 로 공급된다. 8개의 홀이 있는 4번 노즐을 사용할 경우 case 1과 case 2는 각각 36.0 cm/s, 65.4 cm/s로 분사되며 3번 노즐에서 공급되는 상대적으로 빠른 공기의 영향으로 파일릿 화염 상단을 지나 하단 지역에서 반응을 하여 적은 양의 연료만 연소하는 것으로 분석된다. 하지만 case 3과 4는 첨가되는 질소의 양이 증가하면서 분사되는 속도가 증가되어 분사되는 혼합기가 내부의 파일릿 화염에 침투하기 용이하게 되어 첨가되는 질소의 양이 증가함에도 더 많은 양의 연료가 연소한다는 것을 알 수 있었다. 속도에 따른 영향은 4개의 홀로 공급되는 조건에서도 나타난다.

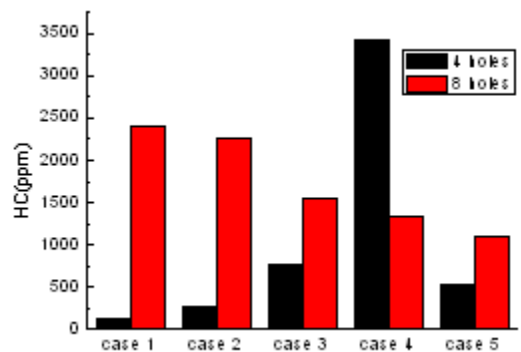


Fig. 6 HC concentration from the exhaust gas.

Figure 7은 외부에서 공급되는 연료의 양에서 연소된 연료의 양의 비를 나타낸 그래프이다. 특히 case 4의 경우는 4번 노즐에서 공급되는 연료의 양보다 많은 양의 HC 성분이 검출되었는데 이는 빠른 속도로 분사되는 많은 양의 질소가 중심에 위치한 파일릿 화염의 연소과정에 영향을 주어 내부에 공급되는 연료도 완전한 연소를 하지 못하는 것으로 분석된다. Fig. 8은 4개의 홀로 공급되는 조건에서 검출되는 CO, CO₂농도를 나타낸다. CO₂농도는 검출되는 HC농도와 반대 경향을 나타내며 이는 CO농도는 질소가 증가할수

폭 증가하는 경향을 나타낸다.

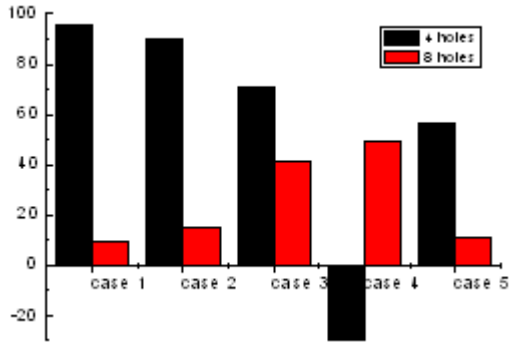


Fig. 7 Percent decrease of hydrocarbon concentration with a pilot flame.

참고 문헌

[1] B. Lewis and G. von Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases, 3rd ed., Academic Press, 1987.

[2] 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.

[3] 안태국, 이원남, "과일릿 화염을 이용한 희석제 첨가 화염의 안정화", 제 47회 KOSCO SYMPOSIUM 초록집, 2013, pp. 47 -

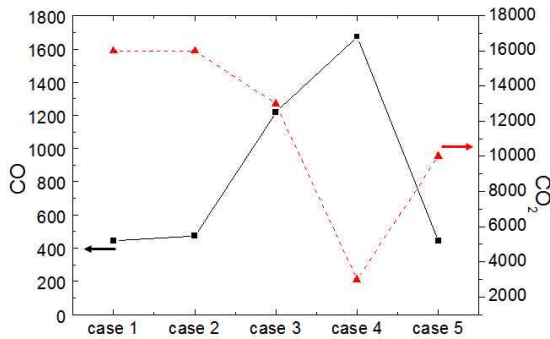


Fig.8 CO, CO₂ concentration from the exhaust gas.

난류 부분 예혼합 화염을 파일릿 화염으로 이용하여 난연성 기체의 연소 가능성에 대한 실험을 수행하였다. 실험을 위하여 내부에는 난류 부분 예혼합 화염, 그 외부에서 내부로 불활성기체가 첨가된 혼합기를 분사할 수 있는 버너를 설계, 조립하여 실험을 수행하였다. 난류 부분 예혼합 화염은 큰 안정성을 가지고 있어 파일릿 화염으로 이용하는데 큰 장점을 가지고 있었으며 많은 양의 난연성 기체를 연소시키는데 큰 효과가 있는 것으로 나타났다. 실험 결과 버너의 형상에 따른 영향으로 주위에서 공급되는 난연성기체의 속도에 따라 같은 조건에서도 화염의 연소 가능성이 크게 달라지는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 연구장비 개발 및 인프라구축사업의 "선박 유증기 회수설비(SVRU) 개발 및 회수제품 연료화 사업"지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.