

부분 예혼합 화염의 NO_x 배출과 화염특성에 관한 실험적 연구

최주석* · 전철균**

A Study on NO_x Emission and the Characteristics of Partially Premixed Flame

Ju-Seok Choi, Chul-Kyun Chun

Key Words: EINO_x(NO_x emission index), Partially premixed flame, Co-flow, Swirl

Abstract

The effects of co-flow and the variation of the equivalence ratio on NO_x emission were investigated experimentally for unconfined and confined partially premixed flames. The shape, length, temperature of flames and the concentration of burnt gas were measured. Two types of co-flow (parallel and swirling co-flow) were considered. For unconfined flames, flame with parallel co-flow is the longest and the next is flame without co-flow. Flame with swirl is the shortest. The length of swirling flame increases suddenly under certain value of equivalence ratio. EINO_x is diminished by the decrease of equivalence ratio. It is found that the unconfining of flame enhances the emission of NO_x. The EINO_x of unconfined flame with parallel co-flow is less than that of flame without co-flow.

1. 서 론

NO_x등 오염물질이 발생하는 연소과정에서 이들 공해물질의 발생을 최소화하는 연소법을 개발하려는 연구노력이 계

속되고 있다. 이러한 연구로는 부가장치를 이용한 배가스 재순환법이나 다단연소법^[1]등을 이용하는 연구가 있는 반면, 연소조건 및 2차공기조절 등을 통하여 NO_x 배출량을 줄이려는 연구도^[2-6] 있는데, 이러한 연구는 현장에 쉽게 적용할 수 있다는 점에서 주요 관심대상이 아닐 수 없다. 이와 관련하여 Driscoll과 Chen^[7,8] 등은 3중 동심원형 노즐을 사용하여 동축 공기류와 선회 동반류는 화염의 길이를 줄이며 국소체류시간을 줄여 NO_x 양을 현저히 감소시킨다고 보고한

* 목포대학교 기계공학과 대학원

** 목포대학교 기계공학과

바 있고 Rokke^[9] 등은 난류 예혼합 된 프로판-공기 화염에 대하여 부분 예혼합 정도가 증가할수록 EINO_x가 서서히 증가한다고 보고하였다. 윤영빈^[10,11] 등은 동축공기류 수소화산화염에 대한 연구에서 동축공기류를 사용할 때 질소산화물이 감소함을 보고하고, 선회 동반류가 있는 경우 NO_x 저감효과를 볼 수 있다고 보고하였다. Gore^[12] 등은 수소 파일럿 화염을 이용한 메탄-공기의 난류 부분 예혼합 화염에 대한 연구에서 당량비 (ϕ) 1.5 일 때 EINO_x가 최소가 되고, $\phi = 1$ 에 접근할수록 급격히 EINO_x가 증가하는 경향이 나타남을 보고하였다.

이와 같이 연료와 공기의 혼합상태 및 2차공기 유동 조건에 따른 NO_x 배출량 변화와 특정 당량비 부근에서 NO_x 배출의 최소화 현상이 보고되고 있으나 이와 같은 혼합상태 변화에 따른 화염의 NO_x 감소현상은 화염의 구속상태 및 2차공기 공급방법 등 연소조건을 변화시켰을 때 어떤 결과를 나타낼지 자세히 연구되어 있지 않다. 따라서 본 연구는 2차공기류의 공급조건변화와 화염의 구속상태가 화염의 특성 및 질소 산화물의 배출에 미치는 영향을 검토함으로써 저공해 연소방식을 제시하는데 필요한 기초 자료를 도출하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig.1은 전체 실험장치 구성도이며, 전체 실험 장치는 버너부, 버너에 공급되어지는 공기와 연료의 유로계, 연소가스 채취부, 시료 측정부로 이루어진다. 이외에도 화염의 형상 촬영과 온도 측정을 위한 장치가 추가된다.

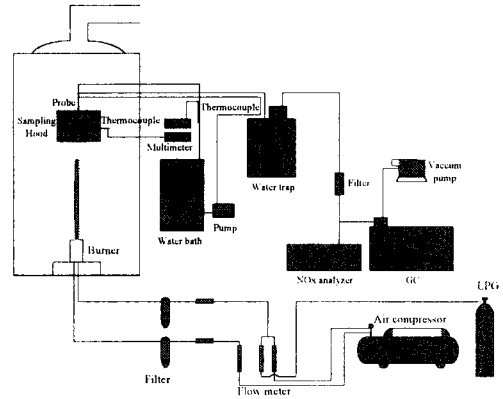


Fig.1 Experimental system

본 연구에서는 불구속 및 구속 상태의 무동반류 화염과 평행 동반류 화염, 선회 동반류 화염 각각에 대하여 연료로 상용 LPG를 사용하고, 연료유량은 3 l/min에 고정한 상태에서 혼합공기유량을 변화시켜가며 당량비 $\phi = 10$ 에서부터 화염이 부상되기 전까지 단계적으로 혼합공기유량을 늘려서 당량비를 낮추어가며 측정하였다. 동반류 공기 유량은 90 l/min로 고정하였다.

연료 노즐은 내경 11.2mm 외경 12.7mm이며 노즐 전체의 길이는 230mm로서 연료와 공기가 혼합되어 공급되어지며 노즐 주변으로 2차 동반류 공기가 공급된다. 선회익은 선회각 45°의 것을 사용하였고, 구속 화염에 대한 측정시에는 버너 외부에 버너 외경과 같은 내경을 가진 길이 1m의 원통형 연소실을 결합시켰다. 유량측정은 로타형 유량계 및 습식가스미터를 사용하였고, 화염에 공급되어지는 연료와 공기는 여과기를 설치하여 먼지나 수분을 제거하였다.

연소가스 채취는 화염의 상단에 채집 후드를 설치하고 내부에 채집 봉을 설치하였다. 채집 봉 전체 외경은 6.5mm이며 선단 채집 봉 직경은 1.25mm이다. 연소

가스를 채취할 때 봉 내에서 가스의 조성이 변하지 않도록 하기 위해 60℃ 물로 수분 제거기 이전까지 채집 봉 및 채집라인에 대해 온수-냉각을 시켰다. 연소가스가 NOx 분석기와 CO₂분석기에 유입되기 전에 수분을 제거하였으며, 여과기를 설치하여 매연 및 이물질의 분석기로 유입을 방지하였다.

화학발광법을 이용한 질소산화물 분석기(Thermo Environmental Ins. Model 42)를 이용하여 NO와 NOx를 측정하였으며, CO₂ 농도는 가스 크로마토그래프(영린기기, M600D)를 이용하여 측정하였다. 화염의 형상은 Digital camera를 통하여 촬영하였고, 화염의 높이는 비디오 촬영을 통하여 30frame/sec로 600회 관측된 값들을 평균하였다. 화염의 온도 측정은 불구속 상태에서 $\Phi=3.5$ 인 경우에 한하여 R-형 열전대를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염의 특성

Photo.1~3은 당량비 변화에 따른 무동반류 화염, 평행 동반류 화염, 선회 동반류 화염에 대한 사진 촬영 결과이다.

무 동반류 화염을 살펴보면 당량비가 높은 경우 노즐부근에서 짧게 층류형 화염이 형성된다. 당량비가 낮아짐에 따라 층류형 화염 영역이 길어지고 화염의 폭이 넓어지는 경향을 보이지만, 당량비가 더 낮아지면 층류형 화염 영역은 계속 길어지고, 후류 화염의 폭은 다시 감소하는 경향을 나타낸다.

평행 동반류 화염의 경우 당량비가 높을 때 무 동반류 화염에 비해 층류형 영역이 상당히 길어지고, 당량비가 변해도

층류형 화염 영역의 길이가 크게 변하지 않는 것이 나타난다. 무 동반류에 비해서 층류형 화염영역이 길어지고 화염폭이 작은 것은 평행 동반류가 주변공기와 혼합을 억제하며 안정적 공기층을 화염 주변에 형성시켜서 나타나는 현상으로 분석된다.

선회 동반류 화염에서는 당량비가 높은 경우 선회 동반류의 영향이 확연히 나타난다. 즉, 노즐부근의 화염에 선회 방향으로 주름이 생기면서 회전 상승하는 것이 보인다. 또한 무 동반류 화염이나 평행 동반류 화염에 비하여 화염의 길이는 현저히 감소함을 볼 수 있다.

당량비가 낮아질수록 무 동반류 화염이나, 평행 동반류 화염에 비하여 선회 동반류 화염은 후류 화염의 폭이 커짐을 볼 수 있는데 이는 선회 동반류가 화염의 폭 증가에 영향을 주고 있는 것으로 해석된다.

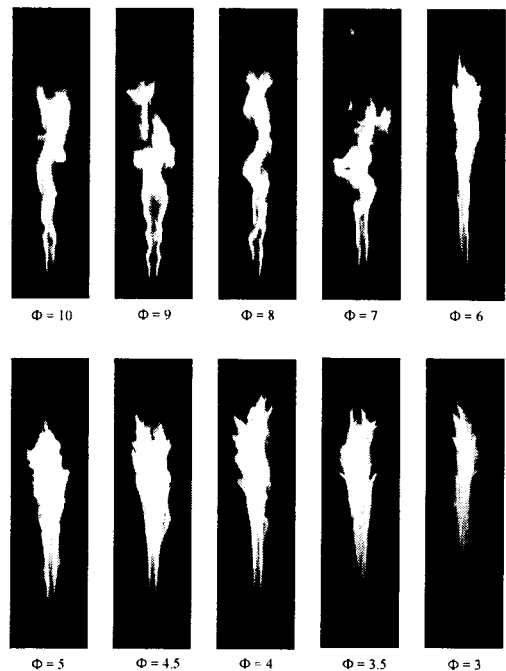


Photo.1 Photos of flame without co-flow

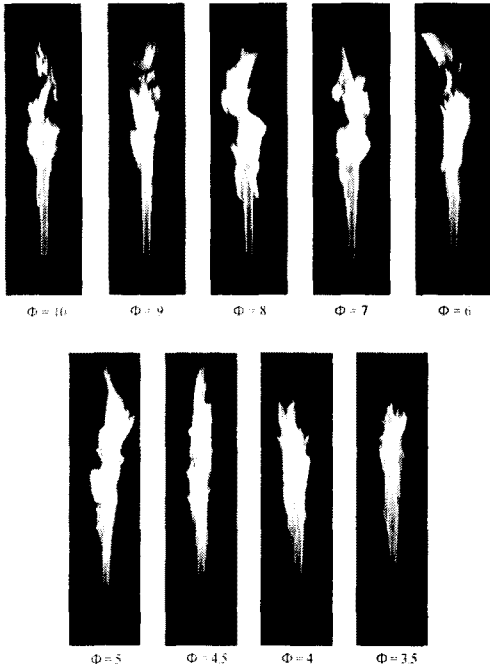


Photo.2 Photos of flame with parallel co-flow

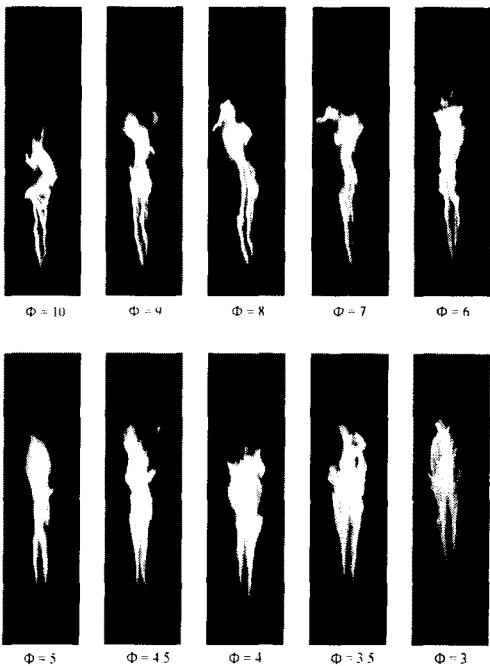


Photo.3 Photos of flame with swirl co-flow

3.2 화염의 온도 분포

Fig.3~5는 불구속 상태에서 무 동반류 화염, 평행 동반류 화염, 선회 동반류 화염에 대한 온도 분포도이며, 화염의 온도는 $\Phi=3.5$ 인 경우에 대하여 노즐상부 5cm, 10cm, 15cm, 25cm, 35cm 지점에서 화염 중심으로부터 반경방향으로 측정하였다.

무 동반류 화염의 온도 분포(Fig.3)는 화염하부에서 고온 영역이 매우 좁음을 보여 주며, 화염의 후류쪽으로 갈수록 최고온도는 감소하지만 전반적으로 온도가 상승함을 보여 주고 있다. 이는 화염의 후류부분에서 고온의 넓은 화염대가 형성되고 있음을 보여주는 결과이다.

평행 동반류 화염의 전체적인 온도 경향(Fig.4)을 보게 되면 무 동반류 화염과 비슷하나 온도 곡선의 폭이 미세하게 무 동반류 화염보다 작고 최고 온도는 약간 높다.

선회 동반류 화염은 Fig.5에서 볼 수 있듯이 전체적으로 고온영역이 다른 화염들보다 가장 넓게 분포함을 보여주고 있다.

3.3 화염의 길이

Fig.6은 불구속 화염에 대한 화염길이의 측정 결과로서 당량비가 작아지면 공급 공기량이 많아져서 분출 속도가 커짐에 따라 화염의 길이는 전체적으로 신장됨을 볼 수 있다. 또한 전체적으로 평행 동반류 화염의 길이가 가장 길고 다음 무 동반류, 선회 동반류 화염 순으로 길이가 짧아진다. 이는 무 동반류 화염에 비하여 평행 동반류 화염은 축방향 관성력이 커서 연료가 하류까지 전달되어 연소되는 것을 의미하고 선회 동반류의 경우는 연료의 반경방향 전달이 커지면서 연소가 촉진되어 축방향으로 화염이 신

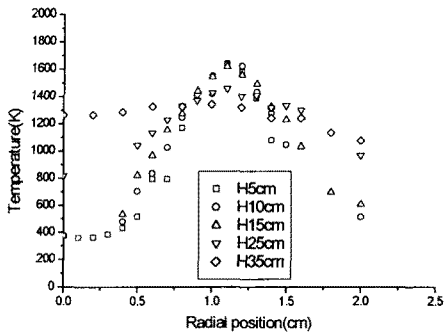


Fig.3 Temperature distribution of flame without co-flow ($\Phi=3.5$)

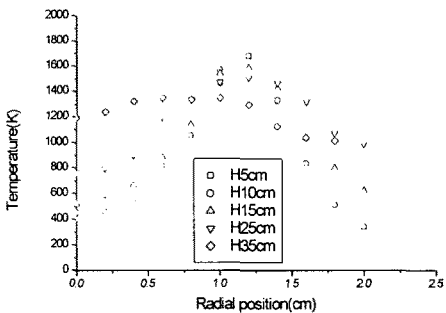


Fig.4 Temperature distribution of flame with parallel co-flow ($\Phi=3.5$)

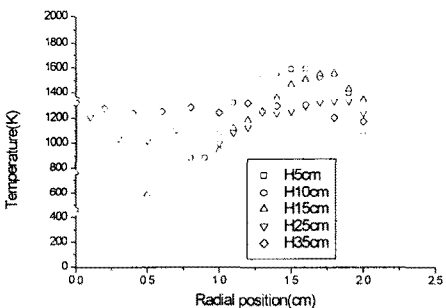


Fig.5 Temperature distribution of flame with swirl co-flow ($\Phi=3.5$)

장되지 않고 연소가 종결됨을 의미하는 것으로 분석된다.

무 동반류 화염과 평행 동반류 화염에서는 당량비가 작아짐에 따라 화염의 길이가 거의 선형적으로 증가함을 볼 수

있는데, 선회 동반류의 경우에는 $\Phi < 5$ 인 영역에서는 화염길이가 빠른 증가를 나타낸다. 이는 고당량비 영역에서 선회 동반류의 영향이 분출 관성력에 비하여 강하기 때문에 화염길이가 신장되지 못하다가 $\Phi < 5$ 인 저당량비 영역에서는 분출 관성력이 상대적으로 커짐으로서 화염길이가 신장되는 것으로 분석된다. 즉, 선회 동반류의 경우, 분출 속도가 작은 고당량비 화염에서는 선회 동반류가 강하게 작용해서 화염대를 넓히고 혼합을 촉진해서 화염이 짧은 길이로 종결되나 분출속도가 커지면 상대적으로 선회 동반류의 강도보다 분출 관성력의 강도가 커져서 선회 동반류의 영향이 적은 영역까지 미연 가스가 전달됨으로써 화염 길이가 길어지는 것으로 해석된다.

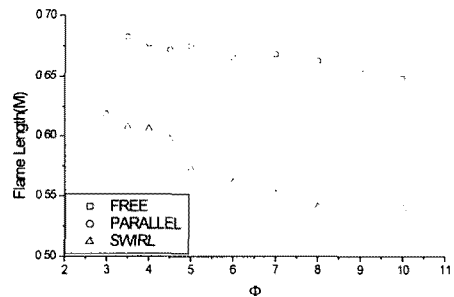


Fig.6 Flame length variation for flames with different co-flows

3.4 불구속 화염과 구속 화염의 EINOx 변화 비교

Fig.7는 불구속 화염과 구속 화염과의 EINOx를 비교한 그림으로서 구속 화염의 경우 기존의 연구 결과들과 동일하게 선회류 화염이 평행 동반류 화염에 비하여 단위 연소 연료당 NOx 배출량이 작음을 보여 주고 있다. 또한 구속 화염의 경우 당량비가 낮아져도 EINOx 값에

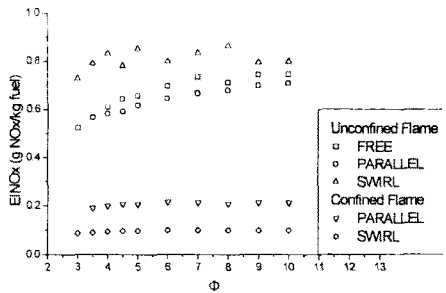


Fig.7 Comparison of EINOx (unconfined flame with confined flame) 큰 변화가 없다가 $\phi=5$ 이하로 가면서 서서히 감소함을 보여주고 있다.

전반적으로 불구속 화염의 EINOx 값은 구속화염의 값보다 큰 것으로 나타났다. 이것은 구속상태의 동반류 화염에서 공급 산소 이외의 새로운 산소 유입이 불가능하여 연소진행에 따라 산소농도가 감소하는 반면, 불구속 상태에서는 동반류 이외의 공기가 화염내로 유입이 자유로워 NOx 생성이 증가된 것으로 분석된다.

불구속 실험에 있어서는 무동반류 화염에 비해 전반적으로 평행 동반류 화염의 EINOx가 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 당량비 감소에 따른 EINOx 감소 경향은 구속 화염보다 불구속 화염에서 감소율이 큰 것으로 나타났다. 불구속 평행 동반류 화염이 무 동반류 화염보다 EINOx 값이 적은 것은 Fig.3,4에서 나타났듯이 고온 영역이 좁아지는 현상과 관련 있는 것으로 생각된다. 불구속 화염에서는 선회 동반류 화염의 EINOx 값이 평행 동반류 화염보다 높게 나타나는 반면 구속 화염에서는 평행 동반류 화염보다 선회 동반류 화염의 EINOx가 적게 나타난다. 선회 화염의 경우 선회 원심력의 영향으로 생성연소가스의 반경방향전달이 활발하므로 생성

연소가스 중 후드안에 채집되는 것은 주로 최고온도대인 화염 중심부를 통과한 연소가스가 됨으로서 상대적으로 높은 EINOx 값을 나타내는 것으로 분석된다.

4. 결론

상용 프로판을 연료로 사용하여 부분 예혼합 상태로 무 동반류 화염, 평행 동반류 화염, 선회 동반류 화염을 형성시키고 각 화염에 대해 당량비의 변화에 대한 화염의 형상, 길이, 온도 분포 등을 측정하고 배출가스의 농도 측정을 통해 EINOx를 산출하였다. 측정범위의 화염에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

불구속 상태에서 화염의 길이는 평행 동반류, 무 동반류, 선회 동반류 화염순으로 짧아지며, 선회 동반류 화염의 길이는 특정 당량비 이하에서 급격히 증가되는 경향을 나타낸다. 평행 동반류는 층류형 화염대의 길이를 신장시키는 효과가 있다. 불구속 화염의 EINOx 값은 구속 화염보다 크며 당량비 감소에 따른 EINOx 감소 또한 빠르다. 불구속 상태에서 선회 동반류는 동반류가 없는 화염에 비해 EINOx를 감소시키는 경향이 있다.

참고문헌

- (1) 이진홍, 목영일, 천연가스 다단연소 기술 연구, 한국에너지공학회지, 제4권 1호, pp. 115-125, 1995
- (2) Turns, S. R., and Myhr, F. H., Oxides of Nitrogen Emissions from Turbulent Jet Flames : Part I-Fuel Effects and Flame Radiation, Combustion and Flame, vol. 87 pp.

- 319-335, 1991
- (3) 김호영, 민성기, 동축분류 층류제트 확산화염의 구조에 미치는 선회의 영향, 대한기계학회논문집, 제16호 제3권, pp. 578-588, 1992
- (4) Turns, S. R. and Myhr, F. H., Bandaru, R. V. and Maund, E. R., Oxides of Nitrogen Emissions from Turbulent Jet Flames :Part II-Fuel Dilution and Partial Premixing Effects, Combustion and Flame, vol. 93 pp. 255-269, 1993
- (5) 심순용, 손강호, 이창식, 선회분류 연소기의 연소특성에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 제2권 제18호, pp. 492-501, 1994
- (6) 한정옥 외, 천연가스 선회 예혼합 화염의 NO_x 생성 및 배출 특성, 대한기계학회논문집, B 권 제23권 제6호, pp. 788-794, 1999
- (7) Driscoll, J. F., Chen, R. H., Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames : effects of coaxial air and other mixing parameters, 23th Symposium international combustion, pp. 281-293, 1990
- (8) Driscoll, J. F., Chen, R. H., and Youngbin, Y., Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames: Effects of Residence Times and Damkohler Number, Combustion and Flame, vol. 88 pp. 37-49, 1992
- (9) Rokke, N. A. and Hustad, J. E. and Sonju, O. K., A Study of Partially Premixed Unconfined Propane Flames, Combustion and Flame, vol. 97, pp. 88-106, 1994
- (10) 윤영빈 외, 동축류 수소-공기 확산화염에서의 NO_x 생성특성에 대한 실험적 연구, 대한항공우주학회집, pp. 90-98, 1999
- (11) 김성룡, 심현석, 정인석, 윤영빈, 동축류 수소-공기 화염의 질소산화물 생성의 수치적 연구, 대한항공우주학회집, 제28호 제1권, pp. 133-141, 2000
- (12) Lyle, K. H., Tseng, L. K., Gore, J. P., and Laurendeau, N. M., A Study of Pollutant Emission Characteristics of Partially Premixed Turbulent Jet Flames, Combustion and Flame, vol. 116, pp. 627-639, 1999