

25kW급 산소부화연소기의 NOx 배출특성

김경래*, 김혁주**, 류정인***
충남대학교 기계공학과 대학원*, 한국에너지기술연구원 보일러연구팀**,
충남대학교 기계공학과***

NOx emission Characteristics of 25kW Oxygen Enriched LNG Burner

Kyung-Lae Kim* · Jeong-In Ruy** · Hyouck-Ju Kim**
Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chungnam National University*
Boiler Research Team, KIER**
Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University**

1. 서론

산업체 열 설비 및 동력장치는 대부분이 화석연료를 연소과정을 통한 열에너지로 변환하여 사용하는 구조로 되어있으며, 화석연료의 연소는 필연적으로 온실가스인 CO₂, 및 대기 오염 물질인 NO_x, SO_x, 등을 배출한다.

이에 화석연료의 연소에 의한 환경 및 인체에 미치는 오염물질의 저감과 열에너지의 손실을 줄이기 위해 활발한 연구가 수행되고있으며, 최근에는 연소용 공기 중에 산소를 첨가하여 연소하는 산소부화 연소, 순산소 만으로 연소시키는 방법에 대한 연구가 진행 중에 있다.¹⁻⁹⁾

산소부화연소(Oxygen Enriched Combustion)는 공급 공기량과 배가스량을 줄여주고 연소 온도를 높임으로서 열효율이 향상되어 연료를 절약할 수 있을 뿐만 아니라, 연소속도를 빠르게 해주고 연소성을 향상시켜준다.⁷⁾ 순산소연소(100% Oxygen Enriched Combustion)의 경우 매우 높은 고온의 화염을 얻을 수 있으므로 배기가스에서 배출되는 현열량을 줄여주고 에너지 열효율을 높여 연료절감에 기여함은 물론, 공해물질의 배출이 거의 없으므로 환경보호에도 큰 효과가 있다. 산소부화 연소시에는 화염온도상승에 의한 질소산화물(NO_x)의 생성량이 많아지게 되므로 질소산화물(NO_x)을 줄일 수 있는 버너 및 연소방법도 강구되어야한다.

2. 실험장치 및 실험 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같고, 산소부화농도(% Vol)에 따른 화염의 전반적인 특성, 배가스 성분 및 온도, 화염장의 온도분포 등을 측정하여 산소부화 화염

의 기초 자료 확보를 위한 실험을 수행하였다.

실험장치는 크게 연료와 산화제 공급부, 연소기, 측정부 3가지로 나눌 수 있으며 연료와 산화제 조절부의 경우 연료와 산화제(공기, 산소+공기, 산소)를 버너의 각각의 다른 주입구로 주입되도록 하였다. 연료로는 LNG를 사용하였으며, 연료공급은 25mm관에 1차압력 3000mmH₂O으로 공급되고, 솔레노이드밸브를 거쳐 가스유량계를 지나 실험장치에 공급되게 된다. 산소 및 공기의 공급계통에서 산소공급계통은 액체산소를 안전하게 기체산소로 만들기 위하여 기화기를 설치하였고, 그후 압력조정기(Regulator)를 거쳐서 유량조절밸브로 공급된다. 공기의 공급계통은 가압된 압축공기를 압력조정기(Regulator)를 거쳐서 유량조절밸브로 공급되며, 산소와 공기를 혼합된 기체의 계량을 위한 부유식 유량계(Float Meter)를 통해서 버너로 공급되어진다. 산소부화농도측정을 위한 산소분석기는 공기와 산소가 혼합된 산소부화공기가 버너에 공급되기 전에 검출할 수 있도록 하였다.

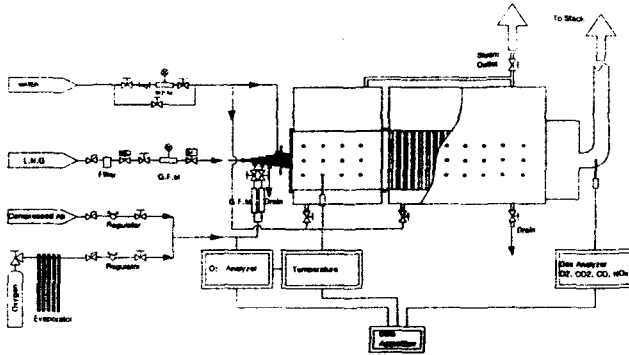


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

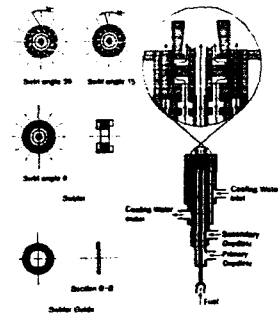


Fig. 2 Schematic of experimental burner and swirler.

2.2 버너

본 실험에 사용한 연소기는 실험용으로 자체 제작한 버너로서 Fig. 2는 실험용 버너의 외형이며 수냉시스템과 연소용노즐을 나타내며 고온의 화염에 대비하여 버너를 수냉자켓으로 감싼 수냉식이고, 저NO_x를 위한 산화제 2단연소를 채택하였다. 2단 연소는 주연소영역 후류에 2차 산화제를 공급함으로써 연소의 진행이 주연소영역에서 2차 산화제의 냉각작용에 의한 고온 영역 감소하여 NO_x 생성을 억제 할 수 있다.¹⁰⁾

노즐은 화염의 안정화를 위하여 선회각을 각각 0°, 15°, 30°,로 주었으며, 보염기를 설치하였다.

2.3 보일러

본 연구에서 사용된 보일러는 자체제작한 조립식보일러이며, 보일러 전반부에 사각형물집의 수냉자켓을 갖는 화염공간을 조립식으로 설치할 수 있도록 설계하여 여기에 버너를 부착할 수 있게 하였으며, 측벽에는 가시창을 두어 화염형상을 관찰할 수 있도록 하였으며, 화염온도측정을 위한 측정기도 설치하였다. 그리고 연소열에 의해 발생하는 증기는 증기 배출구를 통해서 배출되게 하였고, 굴뚝에서 최종배기가스의 배가스 조성과 온도를 측정할 수 있도록 측정구를 설치하였다.

2.4 실험방법

본 실험의 실험조건은 산소부화농도 35~100%(% Vol)에 대하여, 선회각 화염과 배가스성분 및 화염안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Swirl angle 0°, 15°, 30°에 대하여 실험

하였으며, 연소량 15, 20, 25kW에 대하여 각각 배가스 O₂농도 3, 5, 7, 9%(Vol)로 실험하였다. 그리고 실험 데이터 취득시, 배가스 농도측정은 안정화상태에서 10분 경과 후 측정하였으며, 화염온도는 측방향 5지점과 반경방향 8지점에서 5회 측정된 값의 평균값으로 하였으며, 배가스 온도는 굴뚝으로 배출되는 배가스의 온도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염의 안정성

제작된 3가지 형태의 선회기에서 선회각도에 따른 화염의 안정성 실험을 산소부화 농도, 연소량, 배가스 O₂농도(% Vol)변화에 대하여 수행한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 선회각도가 0°인 일 경우 연소량 변화에 따라 산소부화농도가 30~50%(% Vol)범위에서 Blow-off 현상이 발생하였으며, 선회각도가 15°, 30° 일 경우 연소량 변화에 따라 20~40%(% Vol)범위에서 Blow-off 현상이 발생하였다. 이것으로서 선회각도, 산소부화농도 그리고 연소량이 공기비보다 연소 안정성에 미치는 영향이 지배적이라는 것을 알 수 있었으며, 이로부터 실험은 선회각도 30°, 연소량 25kW, 산소부화농도 35%이상의 조건에서 실험을 중점적으로 수행하였다.

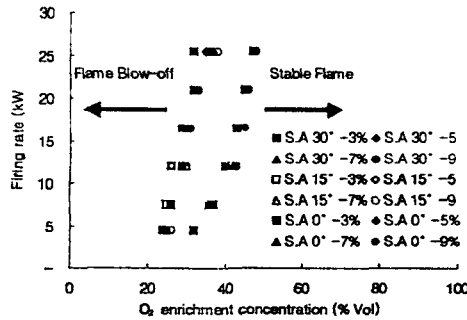


Fig. 3 Burner operation region.

3.2 열효율의 증가

Fig 4는 LNG를 이용하여 Stoichiometric 상태에서 산소부화연소했을 경우 산소부화농도에 따른 배가스량과 연료량의 비를 나타낸 그래프로서 그래프에서 볼수있듯이 공기연소시 배가스량이 순산소시의 배가스량보다 약 3.5배정도 많으며 산소부화 농도 40%(Vol)의 배가스량보다 2배 정도 많이 발생한다. 하지만 배가스 온도 차는 거의 나지 않으므로 상대적으로 열회수율이 증가함하는 것으로 판단된다.

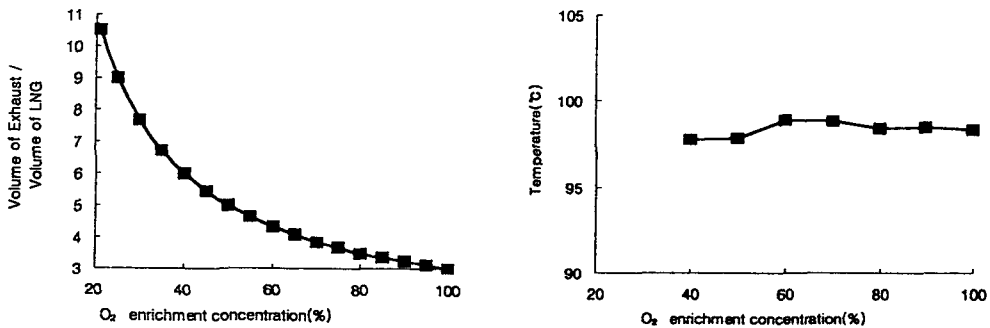


Fig.4 Exhaust gas volume and Exhaust gas temperature by O₂ enrichment concentration.

3.3 NOx 발생특성

Fig. 5는 산소부화 농도의 변화에 따른 공기비에 대하여서 생성되는 NOx 농도를 측정하여 O2 4%로 환산하여 나타낸 것이다. 일반적으로 배가스 중의 NOx농도는 산소부화농도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며, NOx 발생량의 최대치가 산소부화농도 50~60%(%Vol)에서 발생하는 기존의 연구와는 다르게⁵⁾ 산소부화농도가 75%(Vol)일 때 NOx 발생량이 최대가 되며, 80%이후부터 감소하는 경향을 나타냈으며, NOx가 증가하는 이유는 산소부화 농도가 증가함에 따라 NOx 생성의 공급원이 되는 질소의 양은 비록 감소하기는 하지만, 산소원자와 반응하여 NOx를 생성시킬 수 있는 충분한 양(vol)의 질소가 존재하고 Fig 6와 같이 화염온도의 상승과 고온영역의 증가로 인하여 공급된 과잉산소원자와의 반응이 촉진되기 때문이다. 그러나 산소부화농도가 80%이후부터는 NOx 농도가 감소하게 되는 데 이는 산소부화농도의 증가로 높은 화염온도와 고농도의 산소로 인한 과잉산소원자가 대량으로 발생한다 하더라도, 이것들과 반응할 수 있는 질소의 양이 줄어들었기 때문에 반응하여 생성되는 NOx의 양은 감소하게 된다. Fig. 6는 산소부화 농도가 80%와 40%일 때 화염장의 온도분포를 나타낸 것으로 산소부화 농도가 80%일 경우 축방향으로 길게 고온영역이 형성됨을 알 수 있으며 산소부화농도 40%일 경우는 버너의 선단부분에서 고온부분이 형성되며 축방향으로 멀어질수록 화염의 온도가 하강함을 알 수 있다.

Fig. 7은 배가스 O₂ 농도변화에 따른 배가스 중의 NOx 농도를 나타낸 것으로 배가스O₂ 농도가 커질수록 NOx 발생량도 증가함을 알 수 있고, 산소부화농도가 75%일 경우 NOx 발생량이 최대가 되며, 40% 일 때 최소를 나타낸다. NOx가 증가하는 이유는 Fig. 8과 같이 온도분포는 배가스 산소 농도가 증가함에 고온영역이 넓어지며, 배가스 산소농도가 증가함에 따라 NOx 생성의 공급원이 되는 질소 양이 증가하기 때문에 NOx 발생량이 증가하는 것이다. Fig. 8 산소부화 농도 80%이고 배가스 산소농도가 3, 9%(Vol)일 때 화염장의 온도분포를 나타낸 그래프로 배가스 산소농도가 3%일 경우 보다 9%일 경우 고온영역이 넓어짐을 알 수 있다.

Fig. 9는 산소부화농도 80%일 때 2단 연소에 의한 NOx의 배출특성을 나타낸 그래프로 2차 산화제비가 15%(Vol)까지 증가할 때 NOx도 증가하지만 15%이상 일 경우에는 감소하는 특성을 나타내고다. 이는 주연소영역에서 산화제의 공급속도 감소에 의한 고온 영역에서의 체류시간이 길어져 NOx발생이 촉진되기 때문이며, 2차 산화제의 비율이 15%이상인 경우 1차 산화제가 연료와 섞이게 되면 연료 과잉 현상에 의한 연소지연에 의해서 Fig. 10에서 보는 바와 같이 고온영역이 감소하여 thermal NOx 생성이 억제되기 때문에 NOx 발생량이 감소하게 된다. Fig. 10는 2단연소에 의한 화염장의 온도분포를 나타낸 그래프로서 2단 연소 하지 않았을 때와 1차 산화제와 2차 산화제양의 비가 50% : 50%이때 화염장의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 1차 연소영역의 산화제 부족현상에 의해서 반경방향의 고온영역의 폭이 좁아지게 된다. 이와 같은 결과를 미루어서 산화제의 다단 공급에 의한 추가적인 NOx 저감을 기대 할 수 있으며 보다 체계적인 추가 연구가 필요하다.

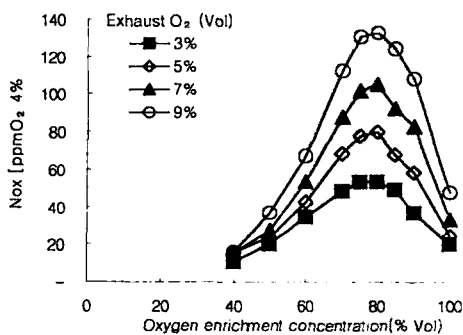


Fig. 5 Variation of NO_x and with oxygen enrichment concentration for Exhaust O₂

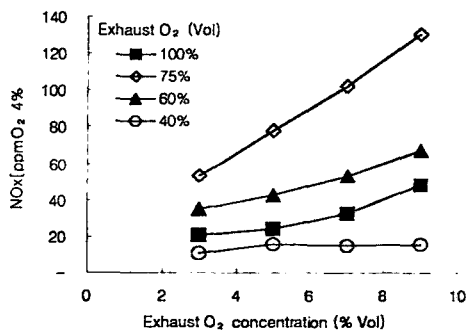


Fig. 7 Variation of NO_x with exhaust O₂ for oxygen enrichment concentration.

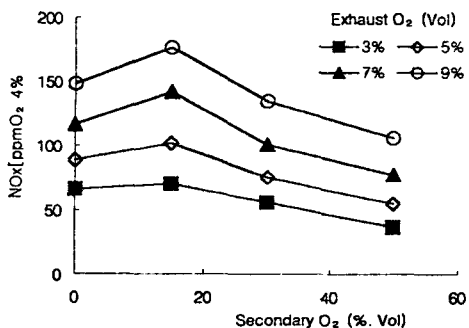


Fig. 9 Variation of NO_x with staged combustion for exhaust O₂ (Oxidizer O₂ 80%)

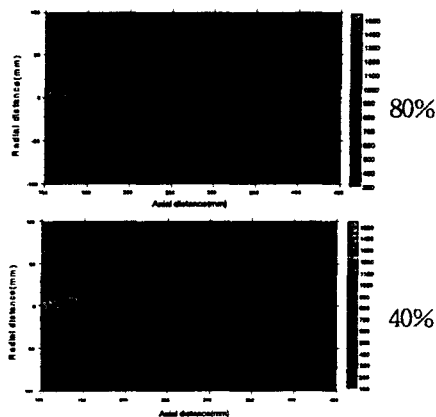


Fig. 6 Distribution of temperature with Oxidizer O₂.

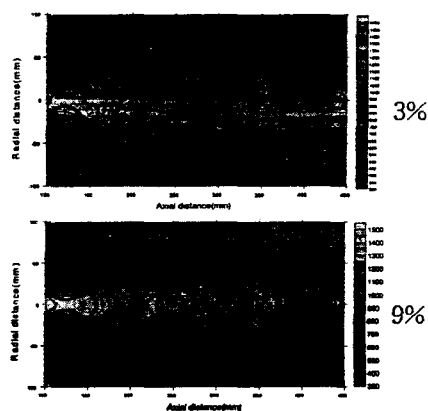


Fig. 8 Distribution of temperature with Exhaust O₂.

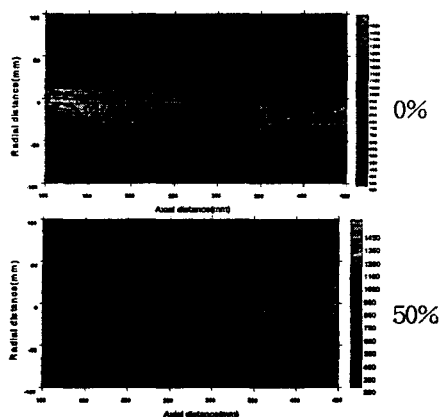


Fig. 10 Distribution of temperature with 2-staged combustion (Oxidizer O₂ 80%)

4. 결 론

본 연구는 LNG의 산소부화농도에 따른 NO_x발생, 화염장의 온도분포등의 연소특성을 알아 보았는데 측정된 결과는 다음과 같다.

1. 화염의 안정성 범위는 Swirl angle 각도가 0°보다는 30°에서 넓다는 것을 알 수 있으며, 선회각 30° 보다 0°의 경우 NO_x의 발생량이 많다.
2. 순산소와 산소부화농도 40%의 경우 배가스 온도차는 약1℃이고, 부피비는 2배이므로 순 산소연소가 산소부화연소보다 열효율이 높다.
3. 산소의부화농도 증가에 의한 고온영역은 축방향으로 길어지며, 반경방향의 폭은 짧게 나타난다.
4. NO_x의 농도는 산소부화농도를 증가시킴에 따라 산소농도가 75%까지 증가하여 NO_x 농도가 최대치가 되며 이후 감소한다.
5. 2단 연소시 2차산화제의 양이(% Vol) 15%까지는 NO_x발생이 증가함을 보이다 2차 산화제의 양이(% Vol) 15%이상인 경우 NO_x발생은 감소하게 된다.

참고문헌

1. DOE/ID/12579-1 ; "Oxygen Enriched Combustion System performance Study Phase I", 1987.
2. DOE/ID/12597-2 ; "Oxygen Enriched Combustion System performance Study Phase I", 1988.
3. Gas Research Institute ; "Application of oxygen Enrich Combustion Air in radiant Tube : Feasibility Study", 1984~1985.
4. CHARLES E et. al ; "Oxygen-Enhanced/natural gas flame radiation." International Communications in Heat and Mass Transfer. Vol. 40. no. 11. pp 2539 2547, 1997
5. N. Lallemand et. al ; "Flame structure, heat transfer and pollutant emission characteristics of oxy-fuel gas flames in 0.7~1.0MW Thermal input range." Journal of the Institute of Energy, 73, pp 169~182. September 2000,
6. M. Ditaranto et. al ; "Structural aspect of coaxial oxy-fuel flames". Experiments in fluids, v. 30 no. 3, pp 253-261, 2001.
7. 과학기술처 ; "고온 산소부화연소기술개발" 1986, 1987, 1988.
8. Jae-Hyun Ahn et al ; "EXPERIMENTAL STUDY ON COMBUSTION CHARACTERISTICS OF OXY-FUEL GLASS MELTING FURNACE" The Third Asia-Pacific Conference on Combustion, pp 469~472, 2001
9. Ji-hyun Kwark et al ; "An experimental study on the combustion characteristics using pure oxygen in a turbulent diffusion flame" 제 22 회KOSCO SYPOSIUM, pp 60~66, 2001
10. CHARLES E Baukal ; "Oxygen-Enhanced Combustion" CRC Press, Chapter 1~2, 1998