

## LNG-산소부화 선회류연소특성

김경래\* · 김혁주\*\* · 류정인\*\*\*

### The combustion characteristics of LNG-Oxygen Enriched Combustion in swirl flame.

Kyung-Lae Kim\* · Hyouck-Ju Kim\*\* · Jeong-In Ruy\*\*\*

#### ABSTRACT

Oxygen has been used extensively in various industries for many years. Despite earlier successful attempts to use oxygen in industrial combustion furnaces, its full theoretical researches have only recently begun to be realized. The aim of this study is to investigate the effect of oxygen enriched combustion. This paper analyzes the characteristics of oxygen enriched combustion, and deals with the experimental investigation of the flame temperature and NOx concentration in exhaust gas. The flame temperature, concentration of exhaust gas were measured and flame configurations were photographed according to the variation of oxygen concentrations in oxidizer.

**Key Words** : combustion, Oxy-Fuel Burner, Oxygen enrichment, Firing rate, Swirl, Thermal NOx.

#### 1. 서 론

산업체 연 설비 및 동력장치는 대부분이 화석연료 인소과정을 통한 열에너지로 변환하여 사용하는 구조로 되어있으며, 화석연료의 연소는 필연적으로 온실가스인 CO<sub>2</sub>, 및 대기 오염물질인 NOx, SOx, 등을 배출한다.

1992년 환경과 개발에 관한 Rio 선언 이후 범 지구사회에서 대기오염을 줄이기 위하여 세계 각국에서는 배기 규제를 더욱 엄하게 규정하고 있다. 근래에는 대기 환경보전법에 탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 질소 산화물(NOx), 입자상 고형물질(Particulate Matter ; M) 의 항목에 구체적인 수치를 제시하였고 이후 계속 규정이 더욱 강화되어 가고 있다.

그러므로, 경제 성장을 지속하면서 그와 관련된 산업에서 대기 오염물질 배출량을 저감하기 위한 환경 친화적 공정개선 또는 열설비의 대폭적인 효율개선을 위한 기반기술, 즉 에너지 사용절감 및 생산성향상을 동시에 획득할 수 있는 열 이용 기술을 개발하여야 한다.

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.<sup>1-9)</sup>

산소부화연소(Oxygen Enriched Combustion)는 공급 공기량과 배가스량을 줄여주고 연소온도를 높임으로서 열효율이 향상되어 연료를 절약할 수 있을 뿐만 아니라, 연소속도를 빠르게 해주고 연소성을 향상시켜준다.<sup>7)</sup> 순산소연소(100% Oxygen Enriched Combustion)의 경우 매우 높은 고온의 화염을 얻을 수 있으므로 배기가스에

\* 충남대학교 기계공학과 대학원

† 연락처, madanbal@naver.com

\*\* 한국에너지 기술 연구원

\*\*\* 충남대학교 기계공학과

서 배출되는 현열량을 줄여주고 에너지 열효율을 높여 연료절감에 기여함은 물론, 공해물질의 배출이 거의 없으므로 환경보호에도 큰 효과가 있다. 산소부화 연소시에는 화염온도상승에 의한 질소산화물(NOx)의 생성량이 많아지게 되므로 질소산화물(NOx)을 줄일 수 있는 버너 및 연소 방법도 강구되어야한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1 과 같고, 산소부화농도(% Vol)에 따른 화염의 전반적인 특성, 배가스 성분 및 온도, 화염장의 온도분포 등을 측정하여 산소부화 화염의 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, 연료 공급은 25mm관에 1차압력 3000mmH<sub>2</sub>O으로 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 압력조정

기(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.

### 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, 저NOx를 위한 산화제 2단연소를 채택하였다. 2단 연소는 주연소영역 후류에 2차 산화제를 공급함으로써 연소의 진행이 주연소영역에서 2차 산화제의 냉각작용에 의한 고온 영역의 축소하여 NOx 생성을 억제 할 수 있다.<sup>10)</sup>

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

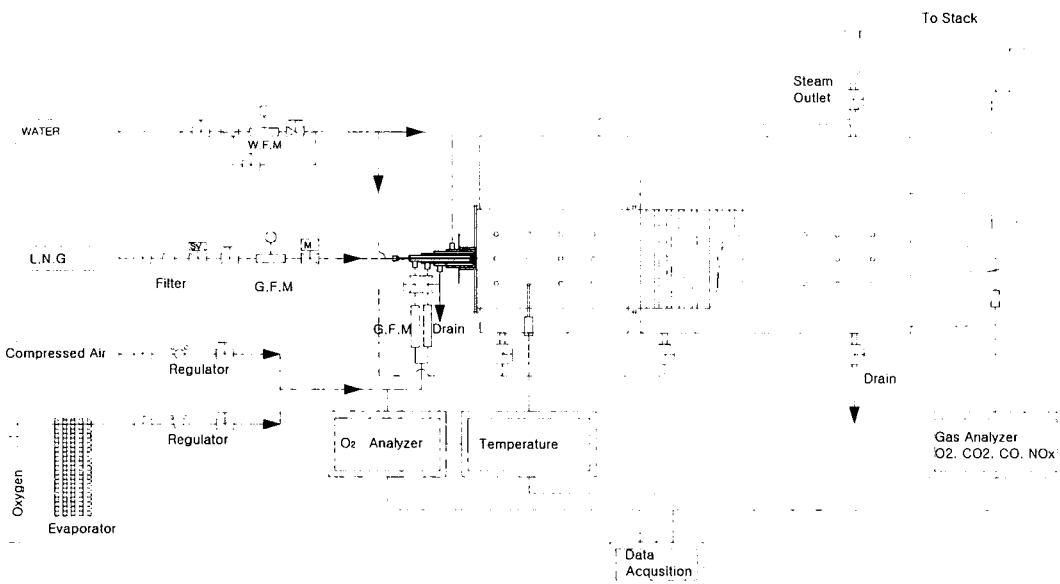


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

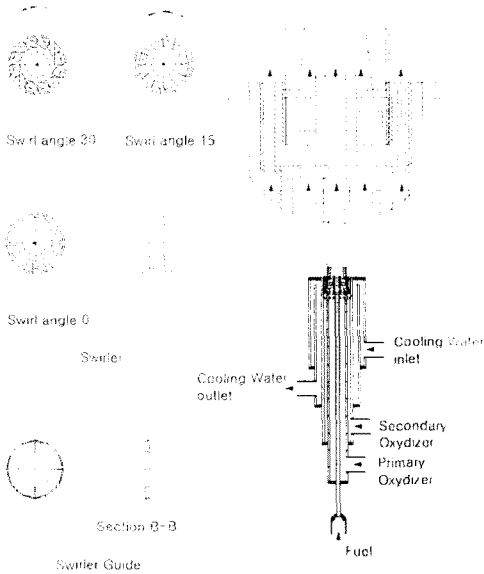


Fig. 2 Schematic of experimental burner and swirler.

2.3 보일러

본 연구에서 사용된 보일러는 자체제작한 조립식 보일러이며, 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 측정구도 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 Table. 1과 같고 산소부화농도 35~100%(Vol)에 대하여, 선회각 화염과 배가스성분에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Swirl angle 0°, 15°, 30°에 대하여 실험하였으며, 연소량 15, 20, 25kW에 대하여 각각 배가스 O<sub>2</sub>농도 3, 5, 7, 9%(Vol)로 실험하였다. 그리고 실험 데이터 취득시, 배가스 농도측정은 안정화 상태에서 10분 경과 후 측정하였으며, 화염온도는 측방향 5지점과 반경방향 8지점에서 5회 측정 한 값의 평균값으로 하였으며, 배가스 온도는 굴뚝으로 배출되는 배가스의 온도를 측정하였다.

Table. 1 Experimental Parameter

Parameter	Condition
Swirl Angle	0°, 15°, 30°
Firing rate	15, 20, 25kW
Oxygen Concentration	35~100%(Vol)
Exhaust O <sub>2</sub>	3, 5, 7, 9% (Vol)

3. 결과 및 고찰

3.1 화염의 안정성

제작된 3가지 형태의 선회각에서 선회각도에 따른 화염의 안정성 실험을 산소부화 농도, 연소량, 배가스 O<sub>2</sub>농도(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 연소에 미치는 영향이 지배적이라는 것을 알 수 있었으며, 이로부터 실험은 선회각도 30°, 연소량 25kW, 산소부화농도 35%이상의 조건에서 실험을 중점적으로 수행하였다.

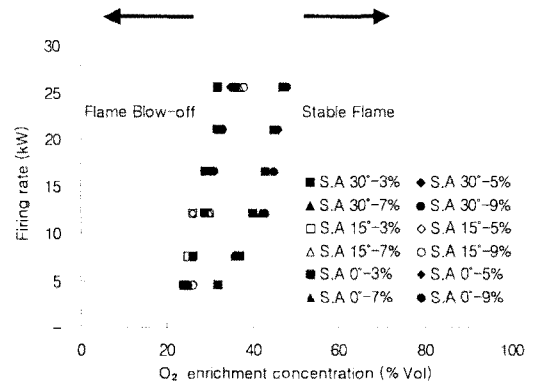


Fig. 3 Burner operation region.

3.2 선회각에 의한 NOx 발생특성

Fig. 4는 선회 각도에 따른 산소부화농도별 NOx의 발생특성을 나타내 그래프로서 산소부화농도가 증가함에 따라 지속적으로 증가하여 80% 영역에서 최고가 되며 그 후 감소하게 된

다. NO<sub>x</sub>의 발생량은 선회각도 0°일 때 배출이 15° 30°에 비하여 거의 2배가량 많이 발생하였는데 이는 화염폭이 좁아져 고온집중현상에 의한 Thermal NO<sub>x</sub> 발생이 증가하기 때문인 것으로 사료되어진다. 그리고 선회각 15°, 30°에서는 NO<sub>x</sub> 발생이 거의 같은 양으로 배출되었다. 그러므로 선회는 NO<sub>x</sub>배출 저감적이라고 할 수 있다. 추후 선회각 15°, 0°에서 화염장의 온도분포를 측정하여 이에 대한 해석이 필요하다.

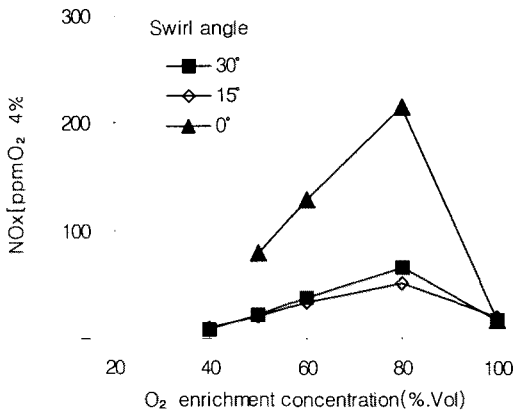


Fig. 4 Variation of NO<sub>x</sub> with oxygen enrichment concentration for Swirl angle (Exhaust O<sub>2</sub> 3%, Firing rate 25kW)

### 3.3 NO<sub>x</sub> 발생특성

Fig. 5은 산소부화 농도의 변화에 따른 공기비에 대하여서 생성되는 NO<sub>x</sub> 농도를 측정하여 O<sub>2</sub> 4%로 환산하여 나타낸 것이다. 배가스 중의 NO<sub>x</sub>농도는 산소부화농도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이다, 기존의 연구와는 다르게<sup>5)</sup> 산소부화농도가 75%(Vol)일 때 NO<sub>x</sub> 발생량이 최대가 되며, 80%이후부터 감소하는 경향을 나타냈으며, NO<sub>x</sub>가 증가하는 이유는 산소부화 농도가 증가함에 따라 NO<sub>x</sub> 생성의 공급원이 되는 질소의 양은 비록 감소하기는 하지만, 산소원자와 반응하여 NO<sub>x</sub>를 생성시킬 수 있는 충분한량(vol)의 질소가 존재하고 Fig 6와 같이 화염온도의 상승과 고온영역의 증가로 인하여 공급된 과잉산소원자와의 반응이 촉진되기 때문이다. 그러나 산소부화농도가 80%이후부터는 NO<sub>x</sub> 농도가 감소하게 되는데 이는 산소부화농도의 증가로 높은 화염온도와 고농도의 산소로 인한 과잉산소원자가 대량으로 발생한다 하더라도, 이것들과 반응할 수 있는 질소의 양이 줄어들었기 때문에

반응하여 생성되는 NO<sub>x</sub>의 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. 7는 배가스 O<sub>2</sub> 농도변화에 따른 배가스 중의 NO<sub>x</sub> 농도를 나타낸 것으로 배가스 O<sub>2</sub> 농도가 커질수록 NO<sub>x</sub> 발생량도 증가함을 알 수 있고, 산소부화농도가 75%일 경우 NO<sub>x</sub> 발생량이 최대가 되며, 40% 일 때 최소를 나타낸다. NO<sub>x</sub>가 증가하는 이유는 Fig. 8과 같이 온도분포는 배가스 산소 농도가 증가함에 고온영역이 넓어지며, 배가스 산소농도가 증가함에 따라 NO<sub>x</sub> 생성의 공급원이 되는 질소의 양이 증가하기 때문에 NO<sub>x</sub> 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 NO<sub>x</sub>의 배출특성을 나타낸 그래프로 2차 산화제비가 15%(Vol)까지 증가할 때 NO<sub>x</sub>도 증가하지만 15%이상 일 경우에는 감소하는 특성을 나타내고다. 이는 주연소영역에서 산화제의 공급속도 감소에 의한 고온 영역에서의 체류시간이 길어져 NO<sub>x</sub>발생이 촉진되기 때문이며, 2차 산화제의 비율이 15%이 상인 경우 2차 산화제 유속 증가에 의한 냉각작용으로 Fig. 10에서 보는 바와 같이 고온영역이 감소하여 thermal NO<sub>x</sub> 생성이 억제되기 때문에 NO<sub>x</sub> 발생량이 감소하게 된다. Fig. 10는 2단연소에 의한 화염장의 온도분포를 나타낸 그래프로서 2단 연소하지 않았을 때와 1차 산화제와 2차 산화제양의 비가 50% : 50%일 때 화염장의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 2차 산화제양의 비가 50%일 때 화염장의 온도분포는 2차 산화제양 증가에 의한 냉각작용으로 반경방향의 고온영역의 폭이 좁아지게 된다.

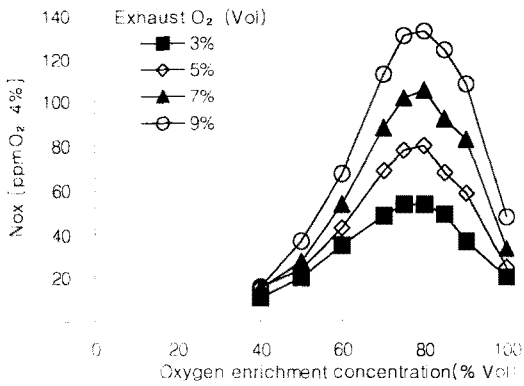


Fig. 5 Variation of NOx with oxygen enrichment concentration for Exhaust O<sub>2</sub> (Swirl 30°, Firing rate 25kW)

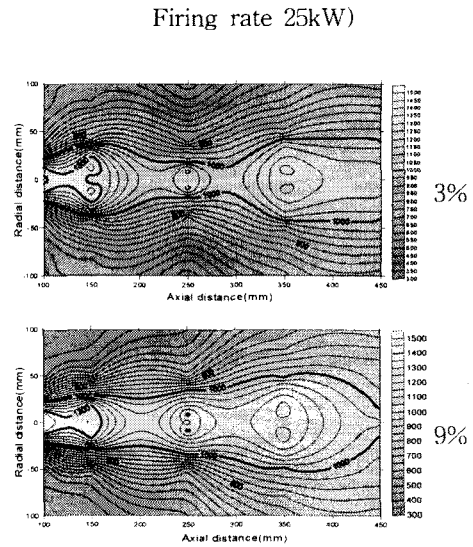


Fig. 8 Distribution of temperature with Exhaust O<sub>2</sub> concentration. (Swirl angle 30°, Firing rate 25kW)

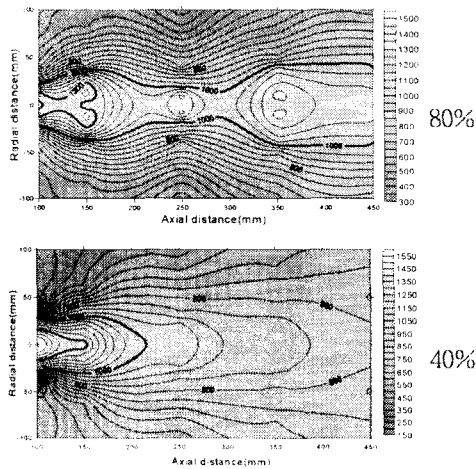


Fig. 6 Distribution of temperature with O<sub>2</sub> enrichment concentration. (Swirl angle 30°, Firing rate 25kW)

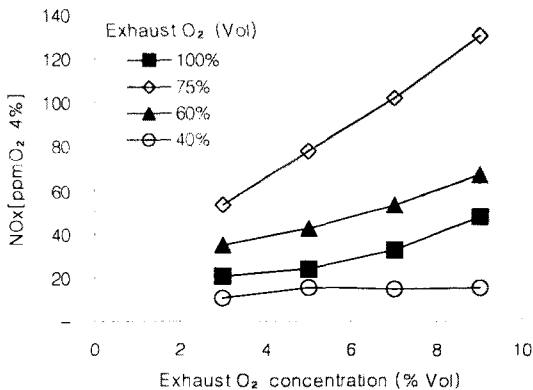


Fig. 7 Variation of NOx with exhaust O<sub>2</sub> for oxygen enrichment concentration. (Swirl 30°,

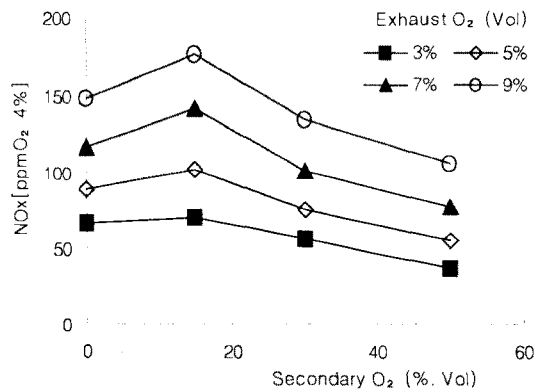


Fig. 9 Variation of NOx with staged combustion for exhaust O<sub>2</sub> (O<sub>2</sub> enrichment concentration 80%, Swirl 30°, Firing rate 25kW)

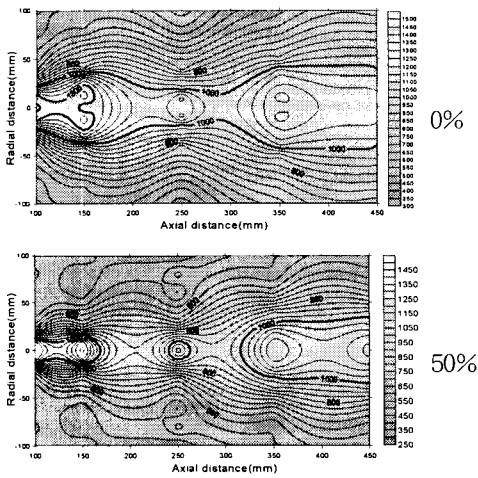


Fig. 10 Distribution of temperature with 2-staged combustion.

(O<sub>2</sub> enrichment concentration 80%, Swirl angle 30°, Firing rate 25kW)

### 3.4 화염의 형상특성

Photo. 1은 화염의 형상을 Color 사진으로 직접 촬영함으로써 연소량 25kW, 배가스 산소농도 7%일 때 산소부화농도와 선회각이 화염형상에 미치는 영향을 조사하였다.

Photo. 1에서 보는 바와 같이 선회각도 15°, 30°이고 산소부화농도가 40%일 때 약한 청색을 띠며 35%이하에서는 Blow-off 현상이 발생하였고, 선회각 0°인 경우 산소부화농도가 47% 일 때 Blow-off 현상이 발생하였다. 산소부화 농도가 증가할수록 화염의 밝기는 밝은 적염을 발생하는데 이는 산소양의 증가를 가져옴으로써 질소농도의 감소를 가져오고, 질소에 의한 희석효과 감소와 유속감소에 의한 연료의 혼합특성이 감소되기 때문에 화염의 길이가 증가되고, soot발생량이 증가되어 결국 가시광선영역에서 발광복사(Luminous flame radiation)를 발하는 soot에 의한 흑체복사(Blackbody Radiation)를 증가시키는 결과를 가져오며, 산소부화농도가 감소함에 따라 산화제의 유속이 증대되어 선회각에 의한 선회효과가 증대됨으로서 산화제와 연료의 혼합특성이 상승되어 화염길이가 감소되고 soot의 발생량도 감소되며, 비발광복사(Non-luminous radiation)가 증가되어 어두워짐을 알 수 있다.

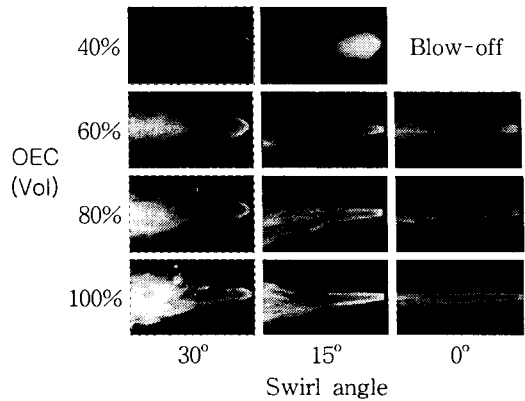


Photo. 1 The photographs of flame

### 4. 결론

본 연구는 LNG 확산화염에서 산소부화농도에 따른 NO<sub>x</sub>, 화염형상, 및 온도분포 등의 연소특성을 알아보았는데 측정된 결과는 다음과 같다.

1. 화염의 안정성 범위는 Swirl angle 각도가 0° 보다는 30°에서 넓다는 것을 알 수 있으며, 선회각 0°의 경우 30° 보다 NO<sub>x</sub>의 발생량이 많다.
2. 산소부화농도의 증가에 의한 고온영역은 축방향으로 길어지며, 반경방향의 폭은 짧게 나타난다.
3. NO<sub>x</sub>의 농도는 산소부화농도를 증가시키에 따라 산소농도가 75%까지 증가하여 NO<sub>x</sub> 농도가 최대치가 되며 이후 감소한다.
4. 2단 연소시 2차산화제의 양이(% Vol) 15%까지는 NO<sub>x</sub>발생이 증가함을 보이다 2차 산화제의 양이(% Vol) 15%이상인 경우 NO<sub>x</sub>발생은 감소하게 된다.
5. 산소부화율을 증가시키면 화염의 길이가 길어지고 적색의 화염이 생성되며, 청염 화염폭은 좁아진다.

### 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 회 KOSCO SYMPOSIUM, pp 60~66, 2001
- [10] CHARLES E. Baukal ; "Oxygen-Enhanced Combustion" CRC Press, Chapter 1~2, 1998