

## 스퍼드형 가스버너의 연소특성에 관한 실험적 연구

양관모\* • 천무환\* • 선철영\* • 장인갑\* • 장길홍\*

An Experiment Study on Combustion Characteristics  
of the Spud Type Gas Burner

G. M. Yang, M. H. Chon, C. Y. Seon, I. G. Chang and G. H. Jang

**Key Words** : Spud type gas burner(스퍼드형 가스버너), NOx emission(질소산화물 배출),  
Flame temperature(화염온도), Swirl angle(선회각), Fuel injection angle(연료분사각)

## Abstract

Spud angle ( $\alpha$ ) and fuel injection angle ( $\beta$ ) have strong influence on spud type gas burner combustion. A wide range of flame stability is shown at  $\alpha=60^\circ$ , but at  $\alpha=30^\circ$  is narrow. Optimum condition of flame stability swirl angle ( $\gamma$ ) is  $40^\circ$ . At condition of  $\alpha=30^\circ$  flame shape is relatively narrow and long, on the other hand, at  $\alpha=60^\circ$  flame is wide and short. Regardless of spud angle, maximum flame temperature shows in the range of  $Z=200\text{mm}$  and  $R=0\text{mm}$ . Flame temperature, on the whole, is high at  $\alpha=45^\circ$ .

At  $\alpha=45^\circ$ , NOx emission is higher than other conditions that may be concerned with flame temperature. At  $\beta=60^\circ$  and  $\gamma=40^\circ$ , NOx emission is reduced due to fuel injection angle.

## 1. 서론

산업활동의 증가로 인하여 화석연료의 사용이 늘어남에 따라 환경문제의 심각성이 더해가고 있다. 이를 대비하기 위해 세계적으로 대기 오염물질에 대한 배출규제를 강화하고 있으며, 국내에서도 가스화력발전소에 대한 NOx 규제치가 400ppm 이하에서 2004년부터는 기존시설 150ppm(4% O<sub>2</sub>) 이하, 신규시설 50ppm(4% O<sub>2</sub>) 이하로 강화될 예정이다. 따라서 세계적으로 각 산업체에서 저공해 연소설비에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 국내에서도 저공해 연소설비를 개발하여 다가오는 환경문제에 적극 대처하고 기술경쟁력의 우위를 확보하기 위한 노력을 하고 있다.

가스버너 연소기술에 대한 연구는 주로 연소 중의 NOx 저감을 통한 대기오염 감소 방안의 연구와 함께 연소로 내의 열전달의 개선과 문제점 해소 방안 등이 연구되고 있으며 특히 NOx 저감을 위한 다양한 연소기술을 도입하여 새로운 형태의 버너 개발이 추진되고 있다.

본 연구에서는 가스화력발전에서의 가스버너 연소기술에 대한 연구의 일환으로 실 발전소에서 이용하고 있는 가스버너를 축소하여 실 발전소에 대한 공해물질의 예측과 Spud Type의 가스버너에 대한 연소현상 규명을 위한 실험을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

## 2.1 실험장치

Fig.1은 1MW<sub>th</sub> 실험연소로의 계통도를 나타낸것

\* 한국중공업 기술연구원

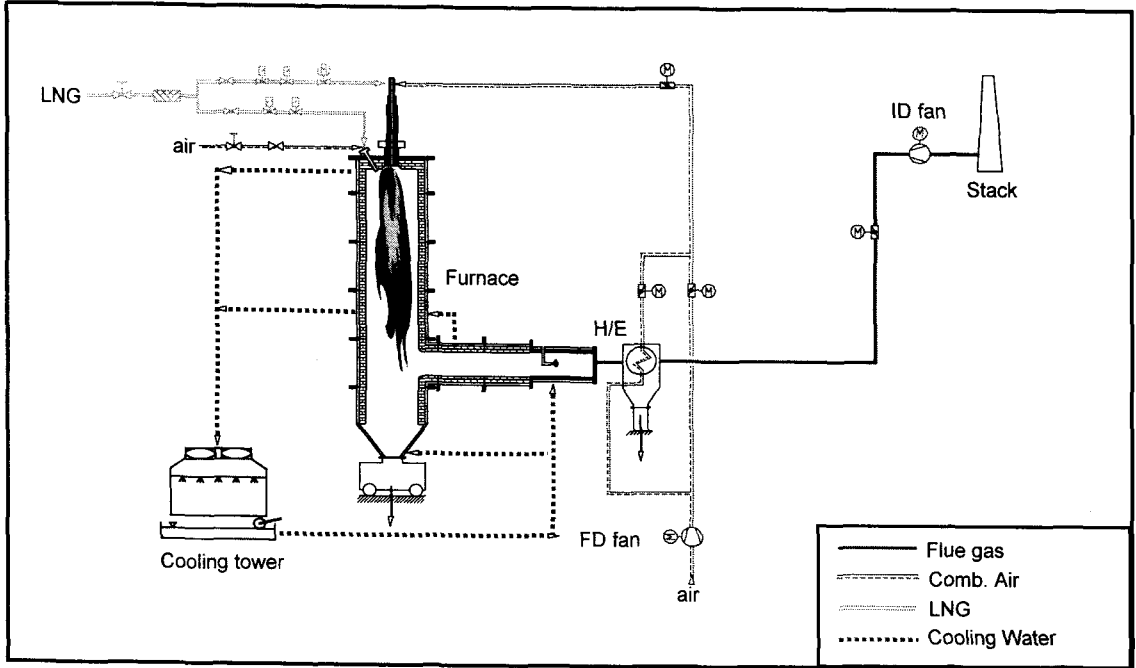


Fig. 1 Schematic diagram of 1MW<sub>th</sub> combustion test facility in HANJUNG

이다[13]. 실험연소로는 크게 연소공기 공급장치, 연소배기가스 처리장치, 냉각수 공급장치, LNG 공급장치로 구분된다.

연소용 공기는 열 교환기에서 250°C로 예열 되고, 운전조건에 따라 1 차공기 및 2 차공기로 배분 되어 버너로 공급된다.

Spud type 가스버너(1.2MW<sub>th</sub>)의 설계는 가스유속, 버너목의 유속, 2 차공기 유속 및 공기비를 고정 한 후 그외 대표적인 치수들을 결정하였다. Fig. 2 는 1.2MW<sub>th</sub>의 열용량을 갖는 Spud type 가스버너의 개략도이며, Table 1 에 버너의 사양을 나타내었다.

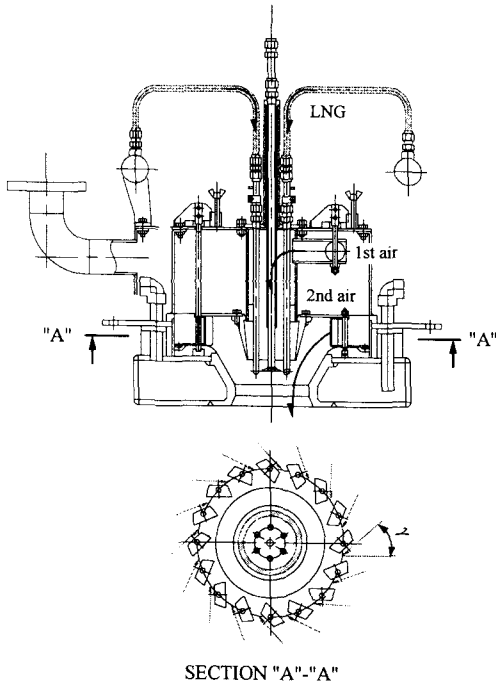


Fig. 2 Configuration of spud type gas burner(1.2MW<sub>th</sub>)

Table 1 Gas burner Specifications

ITEM	UNIT	SPEC.
Burner Type		Multi Spud
No. of Gas Spud		6
Fuel		LNG
HHV	Kcal/Nm <sup>3</sup>	10500
Burner Capacity	MW	1.2
Fuel Consumption	Nm <sup>3</sup> /h	98.3
Fuel/Air Ratio		1:11.572
Air Requirement	Nm <sup>3</sup> /h	1138
Excess Air	%	10

버너 몸체는 연소공기 유로를 형성하는 동심원 상에 설치된 2 개의 환형 덕트, 버너목, Windbox 등으로 구성되며, 그 외에 화염감지기, 점화기 등이

각각 설치된다. 2 개의 공기 덕트중 버너 중심축으로는 1차 연소공기가, 외측으로는 2차 연소공기가 공급된다. 2차공기는 Windbox로부터 공급되며, 원주상에 설치된 베인 댐퍼에 의해 선회각도( $\gamma$ )가 조절될 수 있도록 설계되었다. 베인 댐퍼는 수동으로 작동 가능하며 외부에서 개도를 확인할 수 있도록 하였다. 또한 Windbox로 공급되는 공기는 제어댐퍼에 의하여 유량이 조절되도록 하였다.

연료 노즐은 보য়기를 중심으로 그 둘레에 설치되는 6개의 Spud로 구성되며, LNG는 버너 외부에 설치된 가스헤드를 거친 후 Spud로 각각 공급된다. 연료 노즐의 구멍, 직경, 개수 등은 열용량에 맞게 설계하였다. Spud와 연료 분사각은 Fig.3에 자세히 나타내었다.

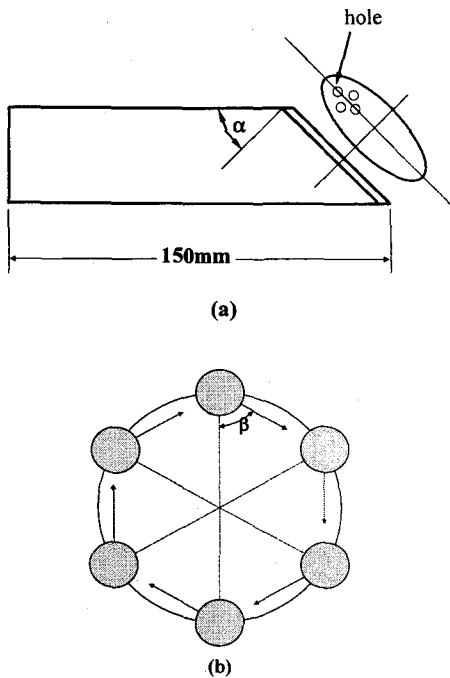


Fig. 3 Gas spud (a), Fuel injection angle(b)

Spud는 내부 유속을 기준으로 설계되었으며 연료 노즐은 회전이 가능하도록 하여 다양한 각도( $\beta$ )로 연료가 분사될 수 있도록 하였고 설치된 가스 Spud의 회전각도를 버너 외부에서 관측할 수 있도록 하였다.

1차공기와 2차공기로 분배된 연소공기와 Spud를 통해 분사되는 가스가 혼합되면서 연소가 이루어진다.

## 2.2 실험방법

연료는  $CH_4$ 가 88.8%,  $C_2H_6$ 이 8.92%, 이론공기량이 10.520인 천연가스이며, 그 성상은 Table 2에 나타내었다. 실험은 크게 화염안정성과 화염온도 측정, 예열공기온도에 따른  $NO_x$  측정으로 나누어 수행하였다.

화염안정성 실험은 Spud 각  $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  연료 분사각  $\beta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  및 1,2차공기 선회각  $\gamma=0^\circ-90^\circ$ 를 변화시키며 수행하였으며 공기예열은 하지 않았다. 화염온도는 버너 입구에서 측방향으로 200, 350, 500mm 떨어진 지점에서 반경방향으로 이동하며 온도를 측정하였다. 화염온도 측정은 2차공기 선회각  $\gamma=40^\circ$ , 1차공기 선회각  $0^\circ$ , 연소공기 유량 900~950  $Nm^3/h$ , 노내온도 900~950 $^\circ C$ , 연소공기 온도 230~260 $^\circ C$  조건에서 수행 하였다.

Table 2 LNG Gas Composition

Composition	Mol fraction(%)	Air inventory		
		O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	AIR
CH <sub>4</sub>	88.8	1.7760		
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	8.92	0.3122		
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.72	0.0860		
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.31	0.0202		
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> -iso	0.25	0.0150		
Total	100.00	2.2094	8.3114	10.520
Excess Air	10%	0.2209	0.8311	1.0521
Total Air Req.				11.572
Density of Gas (kg/Nm <sup>3</sup> )		0.795		
Density of Flue Gas (kg/Nm <sup>3</sup> )		1.242		

예열공기에 따른  $NO_x$  실험은 예열 연소공기 온도 100 $^\circ C$  부터 250 $^\circ C$  까지 변화시키며 측정하였고  $NO_x$  측정위치는 로하부의 수평관 입구로 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 화염안정성

Spud 각과 연료 분사각에 따른 화염의 안정성은 선회의 조건변화에 따라 결정된다. Fig. 4에서 선회의 변화에 따른 화염안정 범위를 나타내었다. 1차공기의 영향은 거의 없는 것으로 보이며 2차공기의 선회 영향을 많이 받는다. 부하에 따라 다소

안정성에는 차이가 있으나 많은 차이는 보이지 않고 있다. 부하 100%일때 50%보다 안정성의 범위가 좁게 나타났다. Spud 각에 따라서는  $\alpha=30^\circ$ 일때 가장 안정 범위가 좁게 나타났고  $\alpha=60^\circ$ 일때 안정 범위가 비교적 넓게 나타났다. 화염 안정성 실험 결과 2차공기 선회각  $\gamma=40^\circ$  부근에서 화염이 안정하였다.

른 화염의 온도를 나타내었다.

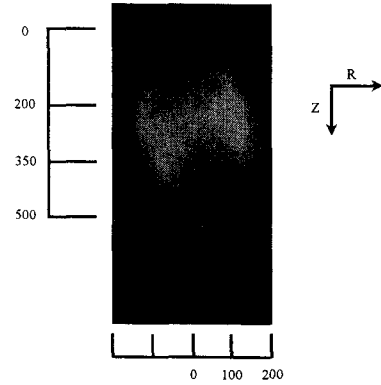


Fig. 5 Flame shape at  $\alpha=45^\circ, \beta=45^\circ, \gamma=40^\circ$

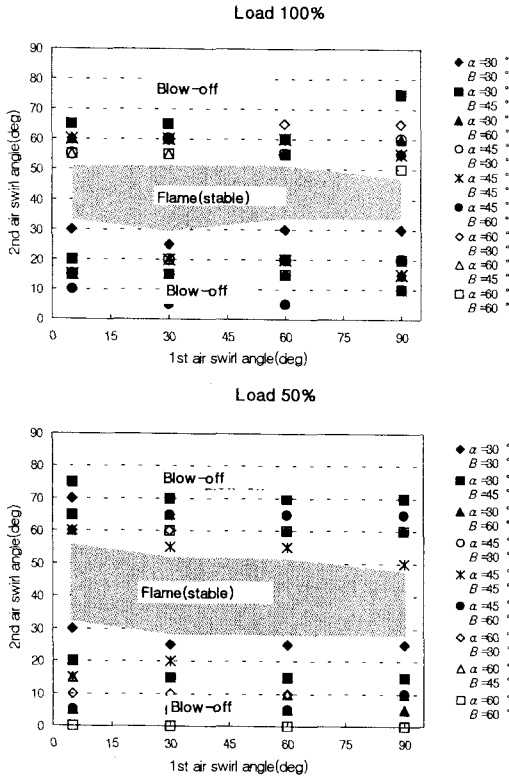


Fig. 4 Flame stability at load 50% and 100%

### 3.2 화염형상 및 온도분포

화염의 형상은 Spud 각( $\alpha$ )에 따라 2차공기의 영향을 받으나 일반적인 경향은 비슷한 것으로 나타났다. Fig.5는 선회각  $\gamma=40^\circ$ , Spud 각  $\alpha=45^\circ$ 에서 화염형상을 나타내고 있다.

Spud 각  $\alpha=30^\circ$ 일 때는 화염이 길게 늘어져 중심부분의 형상은 가늘게 나타나고 Spud 각  $\alpha=60^\circ$ 일 때는  $Z=0$  지점에서부터 옆으로 퍼져 화염이 짧게 형성되는 것을 관찰하였다. 또 선회의 강도에 따라 화염은 폭이 좁아지거나 넓게 퍼지는데, 선회 강도를 높이면 화염은 짧아지고 좌우로 퍼지며 선회 강도를 낮추면 화염은 길어지며 버너 입구에서 부상하는 형상을 보였다. Fig. 6에서 Spud 각에 따

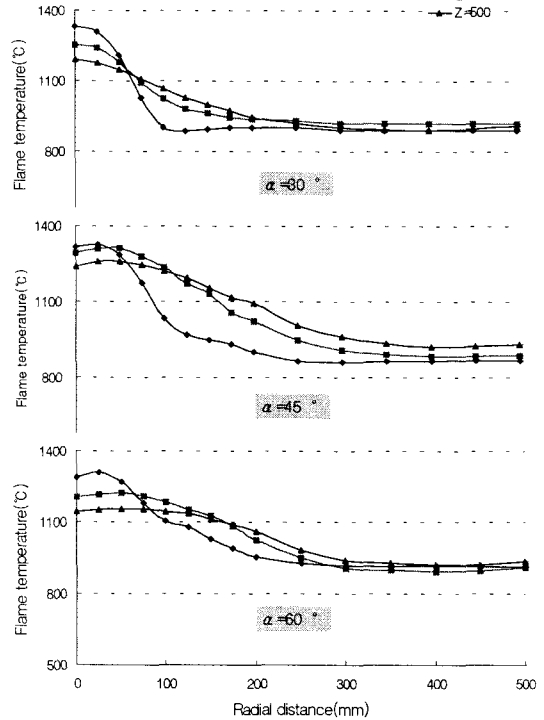


Fig. 6 Effect of spud angle on flame temperature

온도분포는 연료 분사각  $\beta=45^\circ$ , 2차공기 선회각  $\gamma=40^\circ$ 로 고정시키고 Spud 각  $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 변경시키면서 축(Z)과 반경(R) 방향으로 측정하였다. Fig. 6에서와 같이  $\alpha=30^\circ$ 의 화염은 상대적으로 폭이 좁고, 길이가 긴 반면  $\alpha=60^\circ$  화염은 폭이 넓고 짧은 화염형상이며, 이것은 화염온도와  $\text{NO}_x$  배출 특성과의 상관성이 있을 것으로 기대된다. 축 부근

의 화염 온도는 Spud 각  $\alpha=45^\circ$ 에서 높게 나타났으며 고온분포가 넓어 NOx 배출이 많을 것으로 판단된다. 화염의 최고 온도는 Spud 각에 관계없이  $Z=200\text{mm}$ ,  $R=0\text{mm}$  근처에서 가장 높게 나타났다. 화염 후단으로 갈수록 Spud 각  $\alpha=45^\circ$ 에서의 화염 온도는 다른 Spud 각 조건에 비해 높은 온도분포를 나타내었다. Fig. 7에서 축 방향 측정 위치에 따른 화염의 온도를 나타내었다.

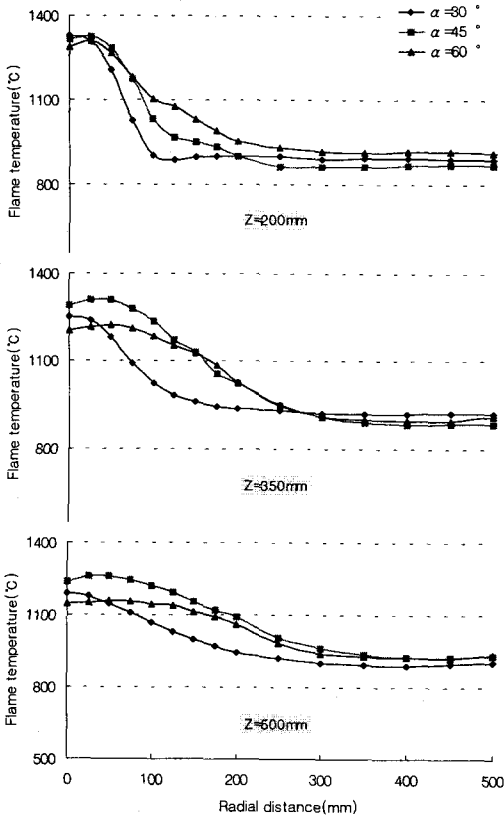


Fig. 7 Effect of spud angle on Flame temperature at axial distance

Spud 각  $\alpha=45^\circ$ 는  $\alpha=30^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ 에 비해 화염 후단으로 갈수록 고온의 온도분포를 갖는 것으로 보아 화염이 길며 반경방향의 온도가  $\alpha=30^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ 에 비해 높게 나타나 안정적인 화염을 형성하는 것으로 판단된다.

### 3.3 예열공기온도에 따른 NOx 배출

화염의 온도가 높은 실험조건 ( $\alpha=45^\circ$ ,  $\beta=45^\circ$ )에서 NOx의 배출이 가장 많은 것으로 나타났으며, 연료 분사각  $\beta=60^\circ$ 에서 비교적 적은 양의 NOx가

발생되었다. Fig. 8은 Spud 각 ( $\alpha=30^\circ, 60^\circ$ )과 연료 분사각 ( $\beta$ )의 변화에 따른 NOx의 배출치를 나타내고 있다. 연료 분사각  $\beta=60^\circ$ 인 조건에서 NOx 배출량이 적게 나타나는 것은 연료가 분사되면서 선화를 많이 형성하므로 화염의 고온영역의 분포가 작아져 NOx가 감소되는 것으로 사료된다.

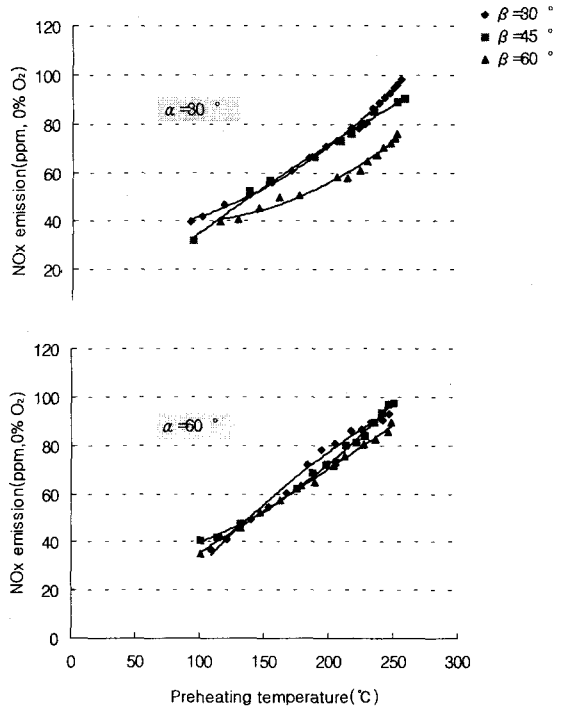


Fig. 8 Effect of spud angle and fuel injection angle on NOx emission

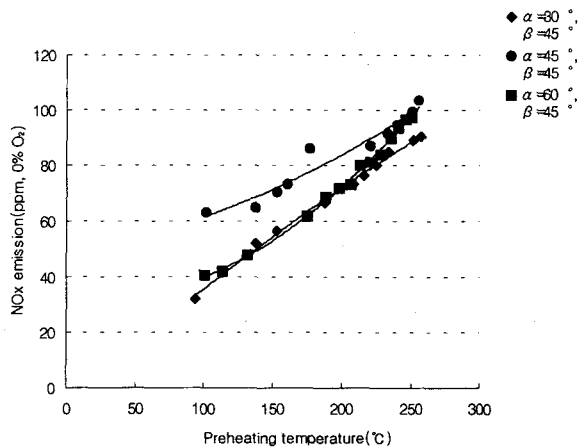


Fig. 9 Effect of spud angle on NOx emission

Spud 각  $\alpha=60^\circ$ 에서 연료 분사각의 변화와 예열 공기온도에 따른 NOx 배출치는 Spud 각  $\alpha=30^\circ$ 일 때와는 달리 연료 분사각과는 상관없이 비슷한 NOx 배출치를 나타낸다. Fig. 9는 Spud 각의 변화와 예열공기온도에 따라 NOx의 배출특성을 나타내고있다. Spud 각의 변화와 연료 분사각  $\beta=45^\circ$ , 2차공기 선회각  $\gamma=40^\circ$ 에 대한 NOx 배출은 Spud 각  $\alpha=45^\circ$ 일 때 가장 NOx의 배출이 많았고 Spud 각  $\alpha=30^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ 일 때는 거의 차이가 없었다. 이는 Fig.5의 화염온도와 상관 관계가 있는 것으로 생각되며 화염온도가 높으면 NOx의 발생도 증가하게 됨을 의미하는 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

Spud type 가스버너(1.2MWth)를 설계/제작하여 Spud 각( $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ )과 연료 분사각( $\beta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ), 2차공기 선회각( $\gamma$ )에 따라 화염안정성과 화염온도, 예열공기 온도에 따른 NOx 배출특성을 고찰하였다.

- 1차공기와 2차공기의 분배(1:10)를 일정하게 한 선회 실험결과 화염의 안정성에는 1차공기의 영향이 거의 없었다. 부하에 따라서는 100%일 때 보다 50%에서 안정범위가 넓게 나타났다으며 Spud 각  $\alpha=60^\circ$  일 때 화염의 안정범위가 넓게 나타났다.
- 화염의 온도는 Spud 각에 상관없이 Z=200mm, R=0mm 근처에서 가장 높게 나타났으며, Spud 각  $\alpha=45^\circ$ 에서 비교적 화염의 온도가 높게 나타났다.
- Spud 각  $\alpha=30^\circ$ , 연료 분사각  $\beta=60^\circ$ 에서 NOx 배출량이 가장 적게 나타났으며 Spud 각에 따라 연료 분사각  $\beta=60^\circ$ 에서 대체적으로 낮은 NOx 값을 나타내었다. 이는 연료분사각이 커짐에 따라 공기와 연료의 혼합이 잘 일어나 화염의 국부적인 고온영역이 감소하므로 NOx의 값이 줄어드는 것으로 생각된다.
- $\alpha=45^\circ$ ,  $\beta=45^\circ$ 조건에서 NOx 배출이 가장 많았고,  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=60^\circ$ 에서 가장 적었으며 약 26% 저감효과가 있었다.

#### 참고문헌

- (1) Frederic Bury et al., "Gas burner with very small nitrogen oxide emission", Appl. No.:407286, United States Patent, 1995.
- (2) Marco Alberti, Roberto Rizzli, Marcello Martano et al., "Three-stage low NOx burner for burning solid, liquid and gaseous fuels", Appl. No.:891800, United States Partent, 1997.
- (3) Landy Chung, "Boiler furnace air register", Appl. No.:221134, United States Patent. 1988.
- (4) Hamid Sarv, "Air premixed natural gas burner", Appl. No.:908550 United States Patent, 1997.
- (5) Geroge Weidman. "Low NOx burner", Appl. No.:973701, United States Patent, 1992.
- (6) Steven J. Bortz, "Apparatus and method for reducing NOx, CO and Hydrocarbon emissions when burning gaseous fuels", Appl. NO.:188586, United States Patent, 1994.
- (7) Steven J. Bortz, "Apparatus and method for reducing NOx, CO and Hydrocarbon emissions when burning gaseous fuels", Appl. NO.:233358, United States Patent, 1994.
- (8) T.C. Adrina Hsieh, Werner J. A. Dahm, and James F. Driscoll, "Scaling Laws for NOx Emission Performance of Burners and Furnaces from 30kw to 12MW", *Combustion and Flame*, 1998.
- (9) Javier M. Ballester, Cesar Dopazo, Norberto Fueyo, Manuel Hernandez and Pedro J. Vidal, "Investigation of low-NOx strategies for natural gas combustion", Fuel Vol. 76 No. 5. pp 435~446, 1997.
- (10) S. Hoffmann, B. Lenze and H. Eickhoff, "Result of Experiments and Models for Predicting Stability Limits of Turbulent Swirling Flames", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 120/311, 1998.
- (11) Andrzej Sobiesiak, Shahrzad Rahbar and Henry A. Becker, "Performance Characteristics of the Novel Low-NOx CGRI Burner For Use with High Air Preheat", *Combustion and Flame*, 1998.
- (12) Koji Hase and Yasumichi Kori, "Effect of premixing of fuel gas and air on NOx formation", Fuel Vol. 75. No. 13. pp. 1509~1514, 1996.
- (13) 장길홍, 장인갑, 정석용, "1MW<sub>th</sub> 실험연소로를 이용한 석탄의 연소특성 연구", 대한기계학회 논문집(B) Vol. 23-11, pp. 1464~1472, 1999.