

공기 및 연료에 대한 배기가스 희석 방법에 의한 저 NO_x 연소특성에 관한 실험

조은성[†] · 정석호^{*}

Experiment on Low NO_x Combustion Characteristics by Flue Gas Dilution in Air and Fuel Sides

Eun-Seong Cho and Suk Ho Chung

Key Words: Flue Gas Recirculation (FGR, 배기가스재순환), Fuel Induced Recirculation (FIR, 연료유도 재순환), NO_x (질소산화물), Dilution (희석)

Abstract

Flue gas recirculation (FGR) is a method used to control oxides of nitrogen (NO_x) in combustion system. The recirculated flue gases resulted in slow reaction and low flame temperatures, which in turn resulted in decreased thermal NO production. Recently, it has been demonstrated that introducing the recirculated flue gas in the fuel stream, that is, the fuel induced recirculation (FIR), resulted in a much greater reduction in NO_x per unit mass of recirculated gas, as compared to introducing the flue gases in air. In the present study, the effect on NO_x reduction in turbulent swirl flame in laboratory scale using FGR/FIR methods through the dilution using N₂ and CO₂. Results show that CO₂ dilution is more effective NO_x reduction methods because of large temperature drop due to the larger specific heat of CO₂ compared to N₂. FIR is more effective to reduce NO_x emission than FGR when the same recirculation ratio of dilution gas.

1. 서론

산업발전에 따라 에너지 소비가 증대되고 공해 물질 배출이 증가하고 있다. 따라서, 연소효율 향상과 저공해 연소의 실현을 위한 연소기술 개발에 대한 관심이 높아지고 있다.

질소산화물(NO_x)을 저감하는 여러 방법 중 특히, 배기가스재순환 (Flue Gas Recirculation, FGR) 방법은 잘 알려진 방법중의 하나이다 [1-3]. FGR 방법은 배기가스의 일부를 연소영역에 공급하여 불활성가스 첨가에 의한 최고화염온도의 저하 및

연소영역에서의 상대적으로 희박한 산소농도로부터 NO_x를 억제하는 것으로, 대형보일러에서 증기 온도를 조절하는 방법으로 사용되어져 왔다. 이 경우 산소농도의 희석효과 보다는 화염온도 저하의 효과가 크므로 fuel NO_x 보다는 thermal NO_x의 감소효과가 크다. 또한 저감효과를 최대로 얻기 위해서는 재순환 되는 배기가스를 가급적 고온의 연소영역으로 분사시켜야 한다. 또한 이 배기가스재순환법은 thermal NO_x가 지배적인 가스, 경유 등의 NO_x 배출 억제법으로 매우 효과적이다. 자동차의 경우 이러한 방법을 EGR (Exhaust Gas Recirculation)로 표현하고 있다. 그러나 이 방법의 경우 많은 양의 배기가스를 재순환시키기 위하여 대용량의 팬을 사용하여야 하는 등 장치보완에 대한 비용이 많이 발생하며, 화염불안정성을 나타낼 수 있다. 이러한 방법을 보완하기 위하여 적은 양의 배기가스를 재순환시켜도 NO_x 저감을

[†] 서울대학교 기계항공공학부 대학원

E-mail : teodoro7@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7120 FAX : (02)889-1842

^{*} 서울대학교 기계항공공학부

더욱 높이는 방법인 연료유도재순환 (Fuel Induced Recirculation, FIR) 방법이 도입되었다 [4, 5]. 이 방법은 기존의 FGR 방법이 산화제에 배기가스를 재순환시키는 것과는 달리 연료로 배기가스를 재순환시키는 방법이다. FIR 방법에 의하면 적은 배기가스 재순환율로 높은 재순환율의 FGR 방법과 같은 NO_x 저감효과를 얻을 수 있다고 알려져 있다. 또한, 희석연소에 대한 연구는 최근 고온공기연소방법 [6, 7]에서 널리 연구되고 있다.

본 연구에서는 저공해 연소방법의 연구를 위하여 선화난류연소화염에 대해 질소 (N_2) 및 이산화탄소 (CO_2)를 배기가스로 모사하여, 산화제측에 공급하여 산화제의 산소농도를 희석시키는 배기가스재순환 (FGR)법과 연료측에 공급하여 연료농도를 희석시키는 연료유도재순환 (FIR)법을 적용하여 질소산화물 (NO_x)의 저감특성을 유동변화에 의한 영향과 산화제 및 연료 농도변화에 의한 특성으로 확인하여 보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치 개략도는 Fig. 1과 같은데 연료와 산화제는 각각 LPG와 공기를 사용하였다. 배기가스 성분으로 N_2 와 CO_2 를 각각 산화제 (FGR)와 연료 (FIR)측에 공급하였다. 실험용 연소실은 가로, 세로 각각 250 mm, 높이 600 mm의 사각형 덕트를 이용하였으며, R-type 열전대를 이용하여 연소실 중심축을 따라 화염온도 및 배출가스 온도를 측정하였다. 가스분석기를 이용하여 배기가스중의 O_2 , NO , CO 등을 측정하였다.

2.2 실험방법

실험은 4가지 방법에 의해 수행하였다. FGR 방법의 경우 연료량을 5 lpm 으로 고정하고 산화제에 희석가스 N_2 또는 CO_2 를 각각 공급하였으며 두 가지 방법으로 실험하였다. Fixed Air FGR (FAFGR) 방법의 경우 산화제의 유량은 공기 110 lpm 과 희석가스량의 합이 되며, 첨가되는 희석가스량의 증가에 따라 O_2 농도가 낮아지고 유속이 증가된다. 또한, Fixed Velocity FGR (FVFG) 방법은 산화제의 총 유량을 150 lpm 으로 고정시

켜놓고 희석가스의 비율에 의해 O_2 농도를 변화시키는 방법이다. 이는 산화제의 산소 농도 저감에 의한 영향과 유속증가에 의한 유동특성변화에 따른 NO_x 발생특성을 특성을 분리하여 확인하여 보기 위한 것이다.

FIR 방법의 경우 산화제는 공기량을 110 lpm 으로 고정시키고, 연료에 희석가스를 첨가함에 따라 연료분사속도가 증가하는 Fixed Air FIR (FAFIR) 방법과 노즐 출구면적이 다른 연료노즐을 바꿔가면서 동일 연료유속에서 연료희석율이 바뀌는 Fixed Velocity FIR (FVFIR) 방법을 사용하였다. 사용된 연료 노즐은 90° 의 분사각을 가지며 총 12개의 홀을 가진 다공 노즐이다. 각 연료노즐의 직경은 FGR, FAFIR의 경우 1.0 mm 이고 FVFIR의 경우 1.1, 1.3, 1.5, 2.0 mm의 노즐을 사용하였다. 각각의 조건에서 희석가스 양을 변화시키면서 연소특성을 확인하여 보았으며, 실험 조건은 Table 1에 정리하였다.

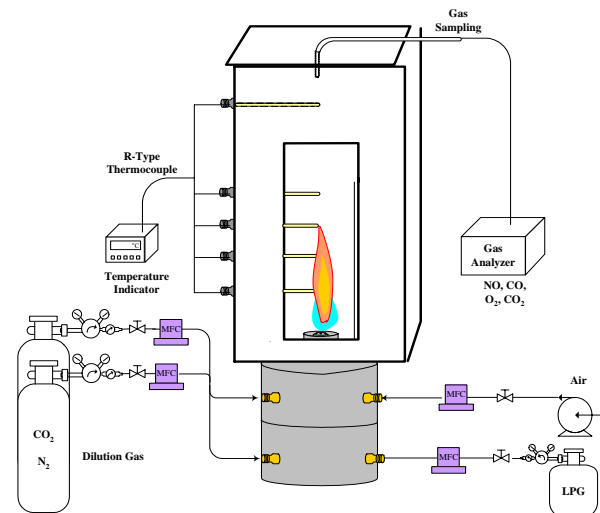


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1 Experimental conditions.

Methods	Fuel		Oxidizer	
	lpm	m/s	lpm	m/s
FAFGR	5	8.8	110+Dilut.	2.8-3.9
FVFG			150	3.9
FAFIR	5+Dilut.	8.8-35	110	2.8
FVFIR		8.8		

3. 실험결과 및 고찰

3.1 배기가스 재순환 (FGR)

산화제에 배기가스를 재순환 시키는 FGR 방법에 대하여 실험하였다. 희석가스로는 배기가스 성분중 수증기를 제외한 N_2 와 CO_2 를 각각의 특성을 확인하기 위해 분리하여 실험하였다. Figure 2는 FAFGR 조건에서 희석량의 증가에 의한 산화제 산소농도 (X_0) 변화에 따른 화염사진을 나타내고 있다. $X_0=0.21$ 의 공기만으로 연소시켰을 경우 노즐 선단부에는 청염이 나타나고 후단에는 황염이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 희석가스의 증가에 따라 황염이 사라지고 청염만 존재하며 점점 화염강도가 낮아졌다. 또한, CO_2 희석의 경우 N_2 희석에 비하여 동일 희석율에서 화염의 강도가 낮아지는 것으로부터 희석효과가 큰 것을 알 수 있다.

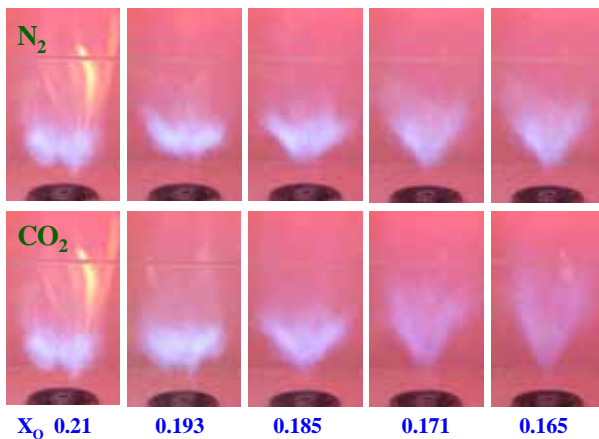


Fig. 2 Flame shape for X_0 in FAFGR condition with N_2 and CO_2 dilution.

Figure 3은 FAFGR 조건에서 X_0 의 변화에 따른 연소실 중심축에서의 온도분포를 N_2 와 CO_2 희석에 따라 각각 나타내었다. 온도는 노즐선단에서 후류로 갈수록 낮아지는 경향을 보이고 있으며, X_0 가 감소함에 따라 화염온도는 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, CO_2 희석의 경우 N_2 희석에 비하여 온도저감효과가 큰 것을 알 수 있는데, 이것으로 CO_2 희석이 NO 저감에 더욱 효과적인 것을 예상할 수 있다.

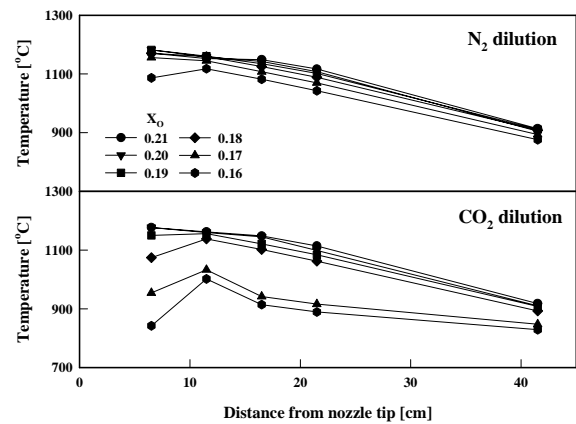


Fig. 3 Flame temperature for X_0 in FAFGR condition with N_2 and CO_2 dilution.

FAFGR의 경우 희석가스의 증가에 따라 산화제의 유속이 변하기 때문에 유속변화에 따른 영향을 배제하기 위하여, 같은 유량의 동일유속에서 공기와 희석가스의 조성비를 변화시키며 따라 X_0 를 바꿔가며 FVFGR 실험을 수행하였으나, 화염모양이나 온도분포는 FAFGR 결과와 크게 차이하지 않았다. 이러한 결과는 FAFGR의 경우 희석제 첨가에 따른 산화제의 유속변동이 2.8~3.9로 산화제의 유속레벨이 전반적으로 낮아 유동의 변동이 작아서 큰 변화가 없는 것으로 판단된다.

Figure 4는 FGR 조건에서 NO 저감율을 X_0 의 변화에 따라 나타내었다. 저감율은 초기 값을 기준으로 각각의 비로 나타내었고, 실제 발생량은 초기 $X_0=0.21$ 에서 130 ppm 정도 발생한다. FAFGR과 FVFGR의 차이는 크게 나타나지 않았으며 N_2 에 비하여 CO_2 의 저감율이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 CO_2 의 열용량이 커서 화염온도의 저감효과가 크기 때문이다. CO_2 희석의 경우 $X_0=0.16$ 에서 초기 $X_0=0.21$ 에 비해 80% 이상의 NO 저감율을 나타냄을 알 수 있다.

Figure 5는 CO 저감율을 나타내고 있는데 보통의 경우 CO는 NO와 상이한 특성을 가지고 있어 NO가 감소할 경우 CO가 증가하는 경향을 보인다. 그러나, 본 연구에서는 CO_2 희석의 경우 FAFGR과 FVFGR이 다소 차이가 있지만 X_0 가 작아짐에 따라 NO와 유사하게 CO가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 희석가스의 증가에 의한 혼합특성 증가 및 화학반응시간의 증대로 불완전반응이 적어지는 것에 기인하는 것으로 보인다.

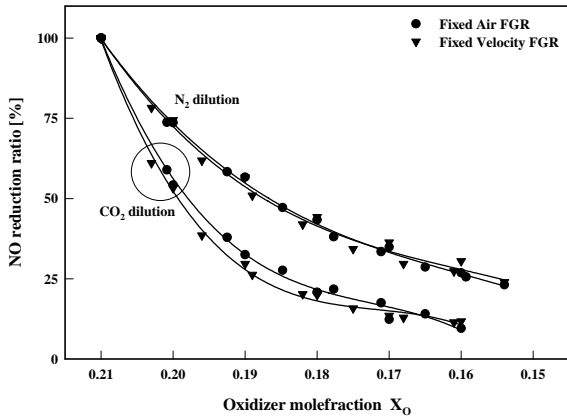


Fig. 4 NO reduction ratio for X_o in FGR with N₂ and CO₂ dilution.

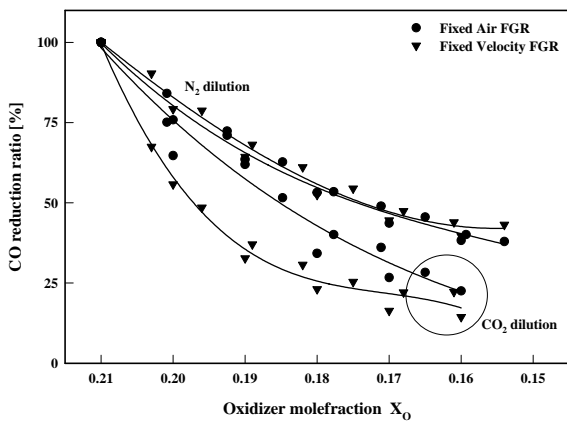


Fig. 5 CO reduction ratio for X_o in FGR with N₂ and CO₂ dilution.

3.2 연료유도 재순환 (FIR)

희석가스를 연료쪽으로 공급하는 FIR 방법을 적용하여 실험하였다. Figure 6은 희석가스 증가에 따라 노즐 유속이 증가하는 FAFIR 조건과 희석가스 증가에 따라 노즐 출구 단면적을 증가시켜 노즐 유속을 고정시킨 FVFIR 조건에서의 화염모양을 나타낸 것이다. 희석가스는 N₂를 사용하였다. FAFIR의 경우 노즐 유속 증가에 따라 화염이 점차 부상되고 화염색도 황염이 점점 약화되며 연료 농도 (X_F) 0.25의 경우 거의 화염이 보이지 않았다. FVFIR의 경우 노즐 유속이 일정하므로 희석율에 따라 화염형태의 변화는 거의 보이지 않으며 X_F 가 감소함에 따라 황염은 점차 감소하였다.

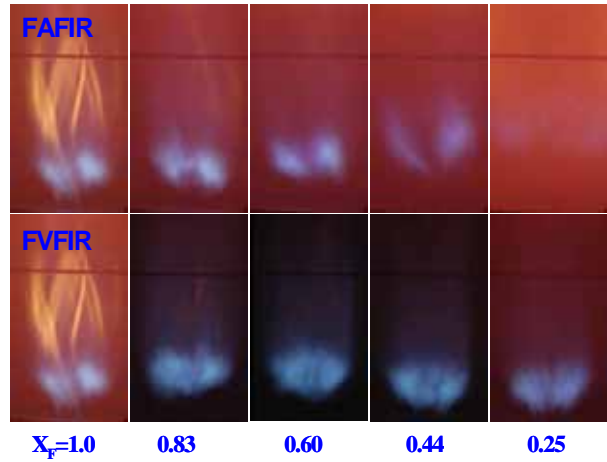


Fig. 6 Flame shape for X_F in FIR condition with N₂ dilution.

Figure 7은 각 조건에서 화염온도를 연소실 중심축을 따라 측정한 결과이다. FAFIR의 경우 X_F 가 감소함에 따라 화염 온도가 감소되는 것을 알 수 있으나 FVFIR의 경우 화염온도의 변화는 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

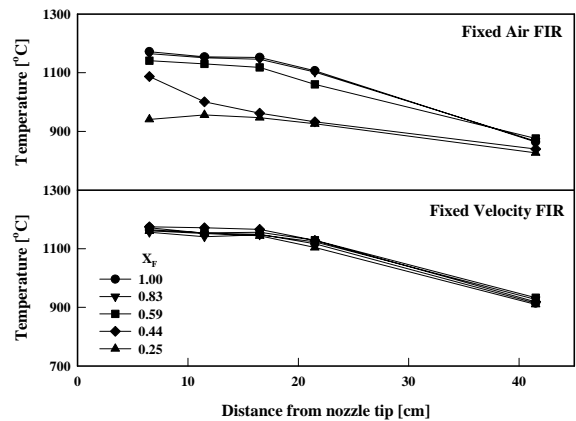


Fig. 7 Flame temperature for X_F in FIR condition with N₂ dilution.

각 FIR 조건에서의 NO 저감특성을 Fig. 8에 나타내었다. 두 조건 모두 X_F 의 감소에 따라 NO가 저감되는 것을 알 수 있으며 CO₂의 희석이 더 큰 NO 저감효과를 가지고 온다는 것을 알 수 있다. 특히, FAFIR 조건이 NO 저감효율이 크며, 이것은 노즐 유속의 증가에 의한 연료의 운동량 증가로 인해 공기와의 희석효과가 더 커지고, 이로 인해 화염온도 저감율이 커지게 되어 NO 발생이 적어짐을 알 수 있다.

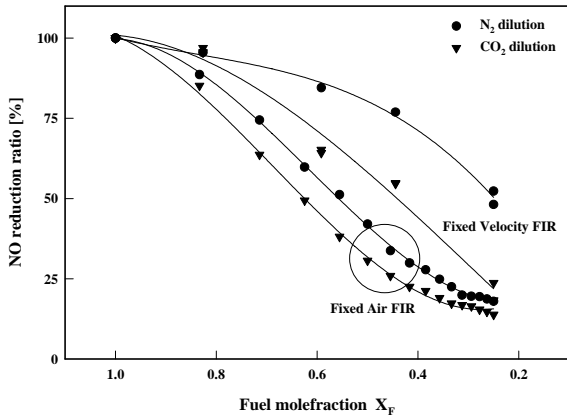


Fig. 8 NO reduction ratio for X_F in FIR condition with N_2 and CO_2 dilution.

3.3 배기가스재순환/연료유도재순환 비교

FGR과 FIR 방법에 대하여 NO 저감율을 비교하기 위하여 Fig. 9에 fixed air 조건에서의 저감율을 나타내었다. 여기서 재순환율은 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{재순환율}(\%) = \frac{\text{회석가스량}(N_2, CO_2)}{\text{연료량} + \text{공기량}} \quad (1)$$

그림에서 보는 바와 같이 FIR 조건의 경우 동일 재순환율에서 FGR에 비하여 큰 저감효과를 보이는 것을 알 수 있다. N_2 회석의 경우 재순환율 30%인 FGR의 경우 NO 저감율 70%로 재순환율 8%의 FIR 조건과 동일한 저감효과를 갖는 것을 알 수 있다. 즉, FIR 조건의 경우 적은 량의 재순환으로 높은 NO 저감율을 얻을 수 있다. Figure 10은 fixed velocity 조건에서의 NO 저감율을 나타내고 있다. 이 경우 재순환율에 따른 FGR과 FIR 두 조건의 NO 저감율이 거의 같음을 알 수 있는데 이것은 연료노즐의 유속변동이 없는 경우 회석효과가 연료쪽 회석이나 산화제쪽 회석이 큰 차이가 없는 것을 알 수 있으며, 보다 큰 NO 저감효과를 얻기 위해서는 연료분사속도의 증가 등에 의해 난류강도를 높여 산화제와의 혼합특성을 향상시켜 회석연소효과를 높이는 것이 중요함을 알 수 있다. 최근 많이 연구되고 있는 무염연소 (flameless combustion)도 동일한 것으로, 이 경우 산화제는 과다한 배기가스 공급 등에 의해 1300K 이상의 고온으로 공급되며, 고온

으로 인한 부피증가로 매우 큰 유속으로 공급되어 연소실내에 난류강도를 높이고 배기가스에 의한 회석율이 증가되어 화염온도를 낮추고, 더불어 NO 발생을 줄이는 것이다.

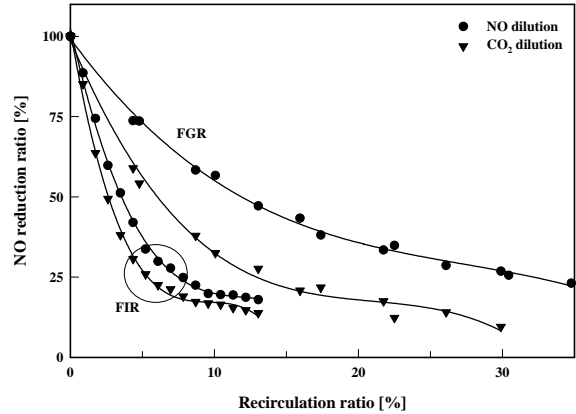


Fig. 9 NO reduction ratio for recirculation ratio in fixed air FGR/FIR conditions with N_2 and CO_2 dilution.

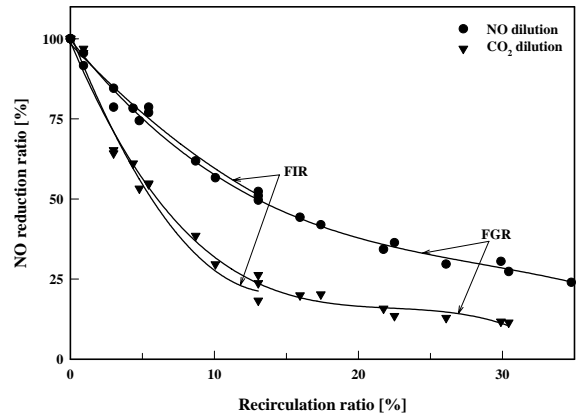


Fig. 10 NO reduction ratio for recirculation ratio in fixed velocity FGR/FIR conditions with N_2 and CO_2 dilution.

4. 결 론

배기가스 공기 (FGR) 및 연료 (FIR) 회석법을 이용하여 NO 저감효과를 검토하였다.

1. FGR 조건에서 X_0 가 작아짐에 따라 NO 발생이 감소하는 것을 알 수 있다. CO_2 회석의 경우 N_2 에 비해 NO 저감이 큰 것을 알 수 있는데

이것은 CO₂ 가스의 열용량이 커서 화염온도저감에 효과가 크기 때문이다.

2. FAFGR과 FVFGR의 경우 본 연구에서는 산화제의 속도 레벨이 낮아 유동의 변동이 작아서 큰 차이는 나타나지 않았다.

3. FIR 조건에서 X_F가 작아짐에 따라 NO 발생이 감소하는 것을 알 수 있었으며 FAFIR의 경우 FVFIR에 비하여 큰 NO 저감율을 나타내고 있다. 이것은 FAFIR의 경우 연료출구 속도의 증가로 인해 산화제와의 회석율이 증가하여 상대적으로 낮은 O₂ 조건에서 연소가 발생하기 때문이다.

4. FGR과 FIR 방법을 비교하면 fixed air 조건에서 재순환율 30%의 FGR 조건과 8%의 FIR 조건이 같은 NO 저감율을 나타내고 있다. 이는 FIR 조건을 이용할 경우 적은 량의 회석가스 재순환으로 큰 NO 저감율을 얻을 수 있음을 알 수 있다. Fixed velocity 조건의 경우 FGR과 FIR의 NO 저감효과가 거의 동일한데, 이것은 유동조건이 동일할 경우 회석가스가 연료나 산화제로 공급되는 차이가 거의 없다는 것을 알려준다.

후 기

본 연구는 생산기술연구원 및 에너지관리공단의 지원으로 수행되었으며 조연을 주신 한국기계연구원의 안국영, 김한석 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Beer, J. M., 1996, "Low NO_x Burners for Boilers, Furnaces, and Gas Turbines; Drive Towards the Low Bounds of NO_x Emissions," *Combust Sci. and Tech.*, Vol. 121, pp. 169~191.
- (2) Baltasar, J., Garvalho, M. G., Coelho, P., and Costa, M., 1997, "Flue Gas Recirculation in a Gas-fired Laboratory Furnace: Measurements and Modeling," *Fuel*, Vol.76, No. 10, pp. 919~929.
- (3) Arai, M., 2000, "Flue Gas Recirculation for Low NO_x Combustion System," *Proceeding of International Joint Power Generation Conference, IJPGC2000-15073*, pp. 1~10.
- (4) Feese, J. J. and Turns, S. R., 1998, "Nitrogen Oxide Emission from Laminar Diffusion Flames: Effects of Air-Side versus Fuel-Side Dilution Addition," *Combust. Flame*, Vol. 113, pp. 66~78.
- (5) Lang, J., 1994, "Low NO_x Burner Design Achieves Near SCR Levels," *Industrial Power Conference, ASME, PWR-Vol. 24*, pp. 127~131.
- (6) Wunning, J. A. and Wunning, J. G., 1997, "Flamless Oxidation to Reduce Thermal NO-Formation," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 23, pp. 81~94.
- (7) Niioka, T., 1999, "Fundamentals and Applications of High-Temperature Air Combustion," *Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference*, pp. 1~6.