

# 연소로에서 방출되는 NO를 저감시키기 위한 방법

이기용\*, 남태형\*

## The methods for reducing NO emitted from a combustor

Ki Yong Lee\* and Tae-hyoung Nam\*

**Key Words:** combustor(연소로), NO production(NO 생성), pulsation(맥동), equivalence ratio (당량비)

### Abstract

The paper describes a study of the variation of the NO production emitted from turbulent propane flames established on a practical combustor where a primary and a secondary fuel lines are installed. The flowrate of the secondary fuel is pulsated or added in addition to that of the primary fuel which constantly flows to the nozzle of the burner. Two modes depending on the positions of supplying the secondary fuel are performed; one is for its position to be placed at the center of the primary fuel tube and the other around the stabilization baffle. The mean concentrations of gas species, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO, and HC(unburnt hydrocarbones) have been measured at the exit of the combustor. As equivalence ratio( $\phi$ ) is increased the profile of the NO concentration on the latter mode rises slowly less than that on the former one. In the range of  $\phi = 0.5$  to 0.54 the NO production is reduced by about 35% more on the latter mode than on the former one. The influence of pulsating the secondary fuel on the variation of the NO concentration doesn't appear at both modes.

### 1. 서론

21세기를 앞두고 모든 산업은 눈부시게 발달하고 있다. 이와 비례하여 환경오염은 점점 심각해져 가고 있고, 또한 이에 대한 규제도 더욱 엄격해지고 있다. 환경오염 중 하나인 대기 오염의 주 발생 원인은 화석연료가 연소되면서 발생한다.

대기 오염 물질에 의한 피해를 살펴보면 황산화물(SO<sub>x</sub>: SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>의 총칭)과 질소 산화물(NO<sub>x</sub>: NO, NO<sub>2</sub>의 총칭)은 산성비와 산림 파괴, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>) 및 아산화질소(N<sub>2</sub>O)는 지구 온난화 현상의 문제를 야기시킨다. 이러한 오염 물질 중에서 SO<sub>x</sub>의 배출

은 연료 중의 유황분 제거, 배기 탈황설비 설치, 대형 청정연료의 사용 등에 의해 매년 감소되지만, NO<sub>x</sub>는 전체의 70% 이상이 화력발전소 및 산업 시설 등의 고정 배출원으로부터 배출<sup>1)</sup>되고 있고, NO<sub>x</sub>의 저감 방법은 SO<sub>x</sub>의 경우처럼 쉽지 않다. 선진국(미국, 일본, 유럽 등)에서는 NO<sub>x</sub>의 배출 규제(공장의 배출가스 및 자동차의 배기가스 규제)를 한층 강화해 나가고 있고, 현재보다도 더욱 NO<sub>x</sub>를 저감키 위한 새로운 기술을 요구하고 있다.

현재까지 연소 과정에서 NO<sub>x</sub>를 생성시키는 메카니즘은 3가지로 (1) 열적(thermal) NO<sub>x</sub> 메카니즘(공연비, 체류시간, 연소온도에 상관) (2) 연료(fuel) NO<sub>x</sub> 메카니즘(연료에 포함된 질소 화학 종으로부터 생성) (3) 급속(prompt) NO<sub>x</sub> 메카니즘(탄화수소의 크래킹시 발생)으로 알려져 있다<sup>1)-2)</sup>. 기계 연료 연소에서 열적 NO<sub>x</sub>로 인한 NO<sub>x</sub>의 생성이 총 NO<sub>x</sub> 생성량의 대부분을 차지하고 있다. NO<sub>x</sub>를 저감시키기 위한 방법은 크게 두 가지로 나누어진다. 첫 번째 방법은 화염 내에서 발생하는

\* 국립 안동대학교 기계공학부

NO<sub>x</sub>를 억제하는 것이고, 두 번째 방법은 후처리 시설(SNCR, SCR, STEAM INJECTION)을 사용하여 NO<sub>x</sub>를 저감시키는 것이다. 후자의 방법은 지속적인 설비투자자와 화학 시료의 비용 문제가 요구되고 있기 때문에 전자의 방법이 경제적인 잇점을 가지고 있다. 전자의 방법은 배기가스 재순환법, 다단계 연소법, 저과잉 공기법, 재연소 방법이 있고 현재 연소 시스템에 적용하고 있다.

Putnam<sup>[3]</sup> 등은 펄스 연소기(pulse combustor)를 이용하여 NO<sub>x</sub>를 저감할 수 있는 이론적인 조건을 제시하였고, 이러한 결과는 연료와 공기의 높은 혼합률에 의하여 매우 빠르게 연소되기 때문에 가능하다. Charon<sup>[4]</sup> 등은 천연가스/순수 산소 화염에서 펄스 연소에 의한 NO<sub>x</sub> 배출량의 저감에 대한 효과를 연구하였다. 이 연구에서는 펄스 주파수와 C/P(constant to pulsating fractions) 비가 중요한 매개 변수로 지적되었다. 실험 결과 1MW 노에서 특수하게 설계된 rotary 밸브를 사용하여 NO<sub>x</sub> 발생량을 저감(90%)시키는 것은 물론 열 전달도 향상시켰다.

본 연구에서는 수치해석을 통해 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/Air 화염에서 생성되는 NO의 양을 계산하였고, 연소로에서 형성된 난류화염에 공급하는 2차 연료의 양을 주기적으로 다르게 공급하고, 공급하는 위치에 변화를 주어 실험하여 이에 따른 NO의 생성량 변화를 조사하였다.

## 2. 실험 및 수치해석 방법

### 2.1 실험장치의 구성

실험실용 연소로(P.A Hilton Ltd, 모델: C492)를 사용하여 본 실험을 수행했으며, 실험 장치와 측정 장치에 대한 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다.

연소로에 장착된 버너는 LPG용 버너이고, 연료는 LPG(프로판계, 약 97% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)가스를 사용했다. 연료 탱크로부터 일정한 압력(0.2 kgf/cm<sup>2</sup>)을 갖고 방출된 LPG 가스를 연소로에 장착된 유량계를 거쳐 버너 내의 주 연료 라인(LPG #1)으로 공급하였다. 추가적으로 연료를 공급하기 위하여 2차 연료 라인(LPG #2)을 설치하였다.

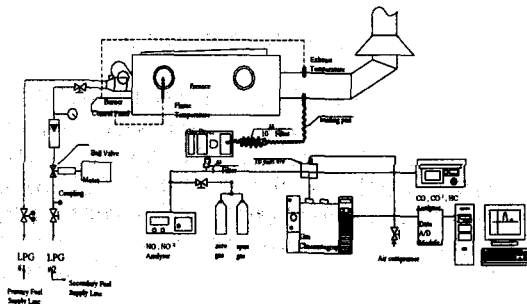


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up system.

이 연료 라인은 직류 모터(회전수 조절기를 장착하여 회전수 변화가 가능)에 연결된 볼 밸브, 유량계에 부착된 입구 밸브와 압력계, 유량계(Cole-Parmer, 모델명 N102-05) 및 출구 밸브로 구성되었다. 입구와 출구 밸브를 조정하여 LPG #1 라인으로 공급되는 연료량의 약 10% 정도를 2차 연료로 공급하였다.

버너로 공급되는 공기의 양을 조절하는 공기량 조절기가 버너의 측면에 부착되어 있다. 공기의 유로 면적을 변화시킬 수 있는 이 조절기는 버너로 공급하는 공기의 양을 조절할 수 있다. 그러나 버너 안쪽의 압력에 따라 공급되는 공기와 연료(주 연료 공급 라인)의 양이 변동되기 때문에 일정한 공기와 연료의 양을 유지하면서 실험을 수행하기는 어려웠다.

버너 내의 주 연료 라인에 추가로 공급된 연료 라인을 각각 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 설치하여 2가지 방식으로 실험을 수행하였다. 첫 번째 방식은 Fig. 2에서 보는 것처럼 버너 내의 주 연료 라인에 튜브( $\phi = 6.35$  mm, 0.D.)를 삽입하여 2차 연료를 공급하였다. 두 번째 방식은 Fig. 3에서 보는 것처럼 4개의 튜브( $\phi = 3.175$  mm, 0.D.)를 버너 내의 보염관 주위에 일정한 간격으로 설치하여 2차 연료가 화염에 직접 분출되도록 하였다. 이론에 근거하여 버너에 공급한 주 연료와 2차 연료의 시간당 유량 변화를 Fig. 4에 나타냈다.

주 연료 공급 라인의 끝 부분에 부착된 노즐을 살펴보면 일정한 간격으로 8개의 구멍이 노즐의 원주에 존재하고(Figs. 2 - 3 참조), 이 구멍들을 통해 연료는 반지름 방향으로 분출한다. 공기는 노즐의 축 방향으로 흐른다. 공기 중 연료의 질량분율은 노즐 분출구 근처에서 높으며, 노즐 분출구로부터 멀리 떨어질수록 낮아진다. 다른 공기/연료비를 갖는 혼합기는 보염기로 이동하며 난류화염을 형성한다.

시료 탐침기(sample probe)를 사용하여 배기 가스를 연소로 출구로부터 추출하였다(Fig. 5 참조). 흡입된 배기 가스는 수증기를 포함하고 있고, 이 수증기가 물로 응축될 때 NO를 용해시킨다.

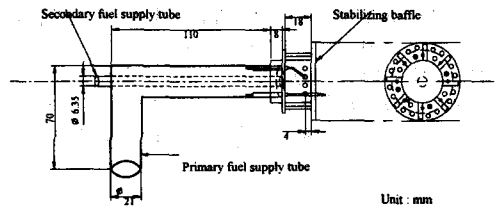


Fig. 2 Schematic diagram of the primary fuel supply tube including the secondary fuel supply tube installed at its center.

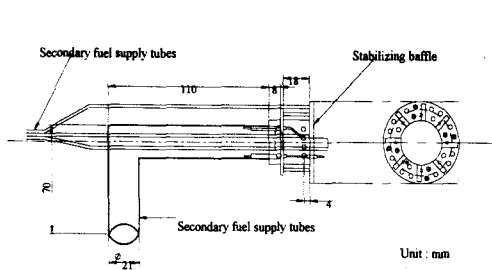


Fig. 3 Schematic diagram of the primary fuel supply tube including four secondary fuel supply tubes installed around the stabilizing baffle.

이러한 현상을 방지하기 위해 시료 탐침기와 가스 건조기를 연결하고 있는 튜브에 열 선(Heating Pad)을 감아주었고, 시료 탐침기 출구의 온도를 약 140°C로 유지했다. 따라서 배기가스는 물의 포화온도 이상의 온도를 유지한 채로 가스 건조기(Gas Dryer, 모델명 GD-10, Madur Electronics) 입구로 들어간다. 가스 건조기 내에서 배기가스의 온도는 4 °C까지 강하되기 때문에 수증기는 물로 응축되고, 응축된 물은 건조기 밖으로 배출된다. 수증기가 제거된 배기가스는 건조기에 장착된 필터들(10 $\mu$ m와 5 $\mu$ m)을 통과한 후 가스 분석기(Gas Chromatography, 모델명 600D, 영린 기기)와 NO<sub>x</sub> 분석기로 공급된다.

가스 분석기를 사용하여 연소로의 출구에서 추출한 연소 생성물(CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>)의 농도를 측정하였다. 이동가스(carrier gas)는 헬륨(helium)가스를 사용하였고, 약 20ml/min의 유량을 가스 분석기 내로 공급하였다. 배기가스를 분리시키기 위해 컬럼(Column)으로서 Carbonsphere(80/100, 10' x 1/8" SS, Alltech)를 사용하였고, 표준시료 가스(모델명 Soccty II Mix 218, Alltech)를 주입하여 보정(calibration)하였다. 오븐 내에서 컬럼의 온도는 70°C를 유지시켜 주었다. 10 포트 단일 슬롯 밸브에 장착된 샘플 루프(Sample Loop, 1.0 ml)를 사용하여 일정한 양의 배기가스가 컬럼과 TCD(Thermal Conductivity Detector) 검출기로 흐르도록 하였다. 배기 가스 검출기(모델명 MEXA-654JK, Horiba Ltd)는 10 포트 단일 슬롯 밸브를 통해 나온 배기 가스를 분석하여 HC(미연탄소) CO<sub>2</sub>, CO의 농도를 측정하였다.

NO/NO<sub>x</sub> 분석기(모델명 300-CLD, California Analytical Instruments)를 사용해 NO/NO<sub>x</sub>의 농도를 측정하였다. 표준 시료로서 NO(100ppm)가스를 사용해 NO/NO<sub>x</sub> 분석기를 보정하였다. 연료를 펄스인 조건에서 연소로에 공급한 경우, 배출가스의 농도는 NO/NO<sub>x</sub> 분석기와 배기 가스 검출기에서 최대값과 최소값을 나타낸다. 이러한 경우 배기 가스의 농도는 산술 평균을 취하였다.

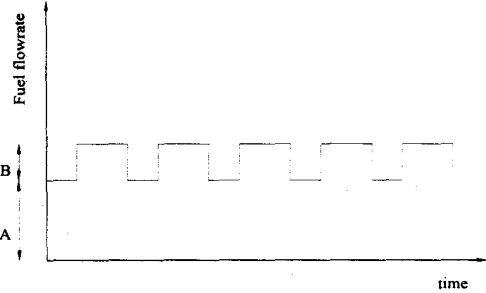


Fig.4 Schematic diagram of the fuel flowrate in case of pulsating fuel. A : The flowrate of fuel supplied to the primary fuel supply line. B : The flowrate of fuel supplied to the secondary fuel supply line. The drawing is not to scale.

모든 측정 데이터는 버너에서 점화된 후 5분이 경과했을 때 분석기들과 연소로에 장착된 컨트롤 패널(control panel)의 지시계에 나타난 최대값과 최소값을 기록하였다. 이러한 이유는 모든 데이터들이 안정화되는 시간이 5분 정도 소요되었기 때문이다. 또한 노즐 분출구를 통한 연료 공급의 주기적 특성은 연소로 출구에서 측정된 NO 농도 값에도 나타난다. 단지 여기서는 NO 농도의 평균값을 취하였다.

## 2.2 수치해법

자유롭게 전파하는 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/Air 화염에 대한 수치해석을 수행하기 위해 이미 개발된 수치해석 코드(RUN-IDL<sup>[5-6]</sup>)를 사용했다. 이 코드를 운영하기 위해서는 상세한 화학반응 메카니즘(detailed chemical kinetic mechanism), 사용된 화학종들의 열역학적 물성치와 전달 물성치가 필요하다. 주어진 계산 구간 안에서 온도 및 화학종의 농도 분포가 급격히 변하므로 이들의 정확한 분포를 얻기 위해서 구간을 조밀히 세분할 필요가 있고, 이를 위해 약 160 정도의 격자수를 사용하여 결과들을 얻었다.

## 2.3 상세한 화학반응 메카니즘

희박 연소(당량비가 1보다 작음) 조건에서 프로판 화염으로부터 NO<sub>x</sub> 생성과 관련된 다단계의 상세한 화학반응 메카니즘을 사용하였다. 이 반응 메카니즘은 Dagat 등이 프로판 연소를 위해 만든 화학반응 메카니즘<sup>[7]</sup>과 GRI 반응 메카니즘<sup>[8]</sup>을 근간으로 구성되었다.

언급된 화학반응 메카니즘에는 탄소원자를 4개 이상 갖고 있는 화학종들이 존재하지만 희박 연소 조건에서는 이러한 화학종의 농도는 다른 화학종(C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> 및 C<sub>3</sub>를 포함)의 농도와 비교하여 매우 낮기 때문에<sup>[7]</sup> 화학반응 메카니즘에서는 이러한 화학종을 제외시켰다. 또한 NO<sub>x</sub> 생성 화학 반응 메카니즘에 존재하는 화학종 C

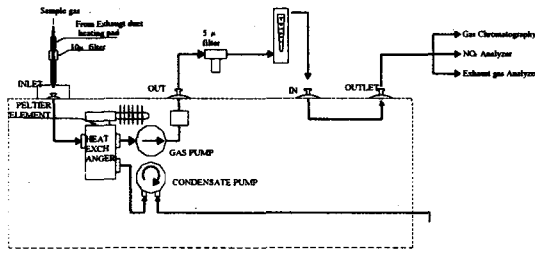


Fig. 5 Schematic diagram of the flow of the sample gas from the sampling probe to gas analyzers.

와  $\text{CH}_2(\text{S})$ 는 프로판의 연소 반응 메커니즘에 포함되어 있지 않아 제외시켰다. 이렇게 얻어진 화학반응 메커니즘은 59개의 화학종과 664개의 순방향 및 역방향 기초반응식으로 구성되어 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수치해석 결과

화염 속도에 대한 수치해석과 실험<sup>[9]</sup>에서 얻어진 결과를 비교함으로써 제안된 상세한 화학반응 메커니즘을 검증하였다. Fig. 6은 당량비 변화에 따른 프로판 화염의 화염속도를 보여준다. 그림에서의 실험값은 Ref. 9에서 얻어진 값을 인용하였다. 당량비가 0.7과 0.8을 갖는 화염에 대하여 계산된 화염속도는 실험값과 비교적 잘 일치한다.

Fig. 7은 당량비가 0.6인 화염의 온도 분포를 나타낸다. 초기 온도 300K로 유입된 혼합기는 연소열 생성이 존재하는 화염 구간 내에서 온도가 급격히 상승하고, 연소를 완료한 후에는 거의 일정한 온도(약 1700K)를 유지한다.

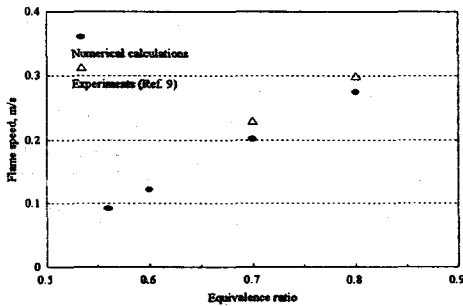


Fig. 6 A comparison of flame speeds with respect to equivalence ratio.

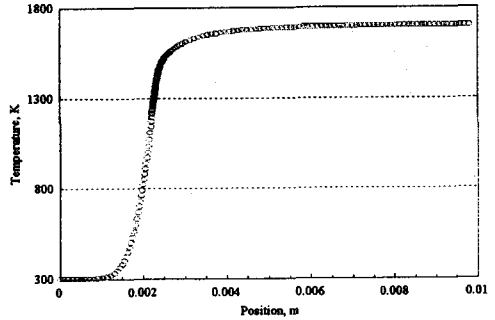


Fig. 7 The temperature profile with respect to position at  $\phi = 0.6$ .

Figs. 8-9는 당량비가 0.6인 화염에서 중요한 화학종 및  $\text{NO}_x$  관련 화학 종의 농도 분포를 나타낸다. 연료 ( $\text{C}_3\text{H}_8$ )와 산화제 ( $\text{O}_2$ )는 화염 구간 내에서 소비되어 급격히 농도가 감소한다. 연료는 화염 내에서 거의 완전히 수소되지만, 산화제는 연료 연소에 필요한 양을 제외한 나머지 양은 화염을 통과하여 생성물과 같이 존재한다. 중요한 생성물인  $\text{H}_2\text{O}$ 와  $\text{CO}_2$ 는 화염 구간 내에서 생성되고, 그 후의 공간에서 일정한 농도값을 갖는다. 또한  $\text{NO}$ 와  $\text{N}_2\text{O}$ 도 같은 경향을 나타낸다.  $\text{NO}_2$ 의 농도는 화염 구간 내에서 상승하여 최대값을 갖고 감소하다가, 연소 후 공간에서 증가되며 일정한 값을 갖는다.

본 실험에서 사용된 버너(Figs. 2와 3 참조)의 노즐에서 상 방향으로 분출된 연료는 주변의 공기와 혼합되고, 연소실 내에 형성된 난류 화염에서 소비된다. 이러한 화염의 구조에서  $\text{NO}$ 의 생성은 매우 복잡한 메커니즘을 갖고 있다. 또한 여러 인자들(당량비, 복사열, 화염 온도, 산소 농도, 연소기 내의 체재시간 등)에 의하여 영향을 받기 때문에 수치해석 방법을 이용하여  $\text{NO}$ 의 평균 생성 농도를 계산하는 것은 어렵다.

따라서 연소로 출구에서  $\text{NO}$ 의 평균 방출 농도를 계산하기 위해 연소로에서 발생하는 연소 과정을 단순화시켰다. 즉 공급된 연료와 공기는 완전 혼합하여 연소한다. 이 때 생성된 화합물의 농도 및 온도는 연소로 입구의 초기조건으로 하고, 생성물은 연소로의 입구에서 출구로 유동하면서 연소로 주위로 열을 손실하고, 생성물 간의 화학 반응을 일으킨다.

이러한 가정을 근거로 자유롭게 전파하는  $\text{C}_3\text{H}_8/\text{Air}$ 에 혼합 화염에서 방출되는  $\text{NO}$ 의 생성량, 다른 화학종들의 농도 및 최고 온도를 계산(RUN-1DL<sup>[5-6]</sup> 코드 사용)하였다. 이렇게 얻어진 수치해석 결과와 실험에서 얻어진 값(체적, 열 손실, 질량 유량 등)을 PSR(Perfectly Stirred Reactor, Chemkin II<sup>[10]</sup>) 코드에서 필요한 입력값으로 사용하였다.

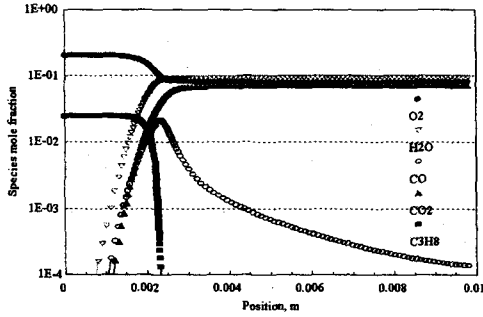


Fig. 8 Species (i.e.,  $C_3H_8$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$ , and  $CO_2$ ) concentration profiles with respect to position.

이와 같은 과정을 통해 연소로 출구에서 계산된 NO의 평균 방출 농도를 Fig 10에 나타냈다. 당량비가 증가함에 따라 계산된 NO의 농도도 급격히 증가함을 알 수 있다. 실험에서 얻어진 NO의 농도는 낮은 당량비에서 나타냈는데, 이 당량비는 연소로 출구에서 측정된 생성물의 농도에 근거하여 계산한 것이다. 또한 2차 연료의 펄스 또는 추가적 첨가를 고려하지 않은 방식에서 얻어진 실험 결과를 그림에 나타냈다. 실험 조건에서 생성된 NO의 평균 농도는 당량비 범위가 약 0.55 - 0.6 사이에서 얻어진 수치해석의 결과와 비슷한 값을 갖는다.

### 3.2 실험 결과

2차 연료를 주 연료 공급 라인에 공급하는 방식(Fig. 2 참조)으로 실험을 수행하여 얻어진 결과를 Fig. 11에 나타냈다.

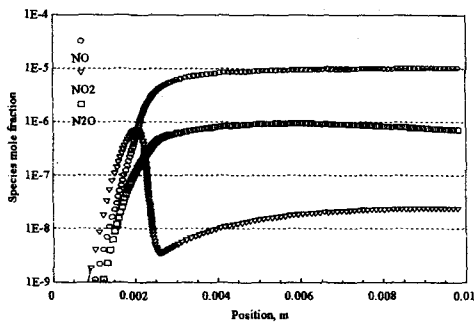


Fig. 9 The concentration profiles of species related to  $NO_x$  (i.e.,  $NO$ ,  $NO_2$ , and  $N_2O$ ) with respect to position.

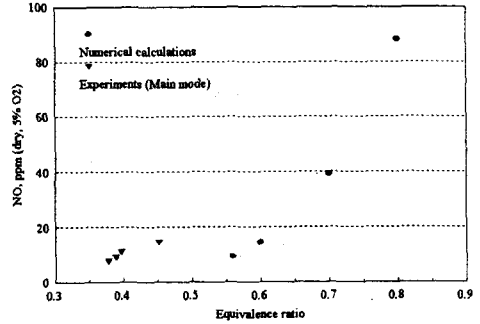


Fig. 10 A comparison of the concentration of NO species with respect to equivalence ratio.

기본(Main)은 2차 연료의 공급이 없는 경우, 첨가(Addition)는 2차 연료의 양을 일정하게 계속 공급하는 경우, 펄스(Pulse)는 2차 연료의 양을 Fig. 2와 같이 공급하는 경우를 나타낸다. 펄스의 팔호에 있는 숫자는 직류 모터의 회전수를 나타낸다. 측정된 NO의 농도를 5% 산소 농도에 대한 NO의 농도로 환산하였고, 기본에서 측정된 NO의 농도를 기준으로 하여 다른 경우에 측정된 NO의 농도를 나눔으로 환산된 NO의 농도를 규준화(normalization)하였다. 공기 조절기가 놓인 위치에 따라 공급된 공기의 양이 변동되고, 연소실 내의 미세한 압력 변화에 따라 주 연료 공급량이 변동되기 때문에 같은 기본, 첨가 및 펄스인 조건에서도 당량비는 서로 다르다.

당량비가 증가함에 따라 연소로 출구에서의 NO 생성도 증가함을 보여준다. 그러나 2차 연료의 펄스 공급과 NO의 생성 변화에는 상관관계를 찾아보기 어렵다.

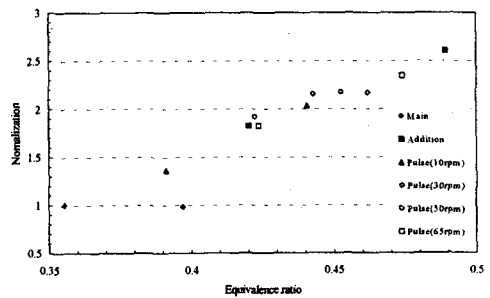


Fig. 11 The NO concentration, normalized by a value at the lowest equivalence ratio, with respect to equivalence ratio in cases of pulsating(Pulse), adding(Addition), and no adding(Main) the secondary fuel supplied to the center of the primary fuel tube.

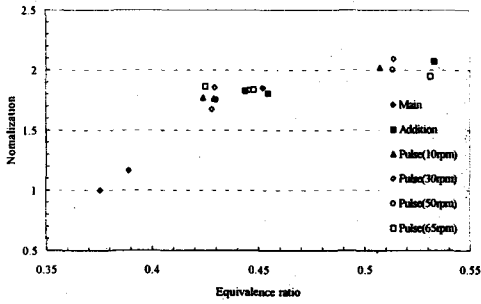


Fig. 12 The NO concentration, normalized by a value at the lowest equivalence ratio, with respect to equivalence ration in cases of pulsating(Pulse), adding(Addition), and no adding(Main) the secondary fuel supplied to the stabilization baffle.

첨가한 조건인 경우는 펄스 조건인 경우보다 더 많은 연료가 공급되어 당량비가 증가할 것으로 예상되나 공급된 공기/연료의 질량비가 커서 연료 증가분이 당량비 변화에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 사료된다. 당량비가  $0.44 < \phi < 0.45$  범위인 경우, 펄스 조건에서 회전수의 증가에 따라 당량비는 증가하고 NO의 생성 농도도 증가함을 알 수 있다. 이것은 2차 연료의 유량 변화가 사각형 톱니 모양 (Fig. 4 참조)처럼 발생하지 못하고, 대략적으로 마름모 꼴 톱니 모양<sup>14)</sup>처럼 발생되어 실제적으로 회전수 증가에 따른 2차 연료의 유량 증가가 원인으로 사료된다.

2차 연료를 화염에 직접 분사하는 방식(Fig. 3 참조)으로 실험을 수행하여 얻어진 결과를 Fig. 12에 나타냈다. 기본 조건에서 생성된 NO 농도는 당량비의 증가와 더불어 증가한다. 그러나 2차 연료가 공급된 조건(첨가와 펄스)에서는 당량비가 증가함에 따라 기본 조건보다 완만하게 NO 발생량이 증가한다.

2차 연료가 공급된 조건에서 얻어진 결과들은 당량비 변화( $0.42 < \phi < 0.46$ 과  $0.50 < \phi < 0.54$ )에 상관없이 거의 일정한 값을 가지므로 연료의 펄스 공급과 NO의 생성 변화 사이에서 상관관계를 찾아보기 어렵다. 2차 연료를 주 연료 공급라인에 공급하는 방식과 비교하면, 높은 당량비( $0.50 < \phi < 0.54$ )에서 NO 발생량이 현저히 감소함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

$C_3H_8$  가스 버너가 장착된 연소로에서 2차 연료를 공급하는 방식과 2차 연료 공급의 주기적 변화에 따른 연소로 출구에서 NO의 생성량 변화를 조사하였다. 또한  $C_3H_8/Air$  화학 반응 메커니즘을 이용하여 수치해석 방법으로 당량비 변화에 따른 NO의 농도를 계산하였다.

1. 2차 연료를 공급하는 방식에 따라 NO의 생성량은 큰 차이를 나타냈다. 높은 당량비 범위( $0.5 < \phi < 0.54$ )에서 2차 연료를 화염에 직접 분출하는 방식

이 주 연료 공급 라인에 공급하는 방식보다 약 35% 까지 NO 생성의 저감을 가져왔다.

2. 앞에서 언급한 2가지 방식에서 2차 연료 공급의 주기적 변화와 NO 생성의 변화에 대한 상관관계를 찾을 수는 없었다. 그러나 버너 노즐 구멍을 통한 연료 공급의 주기적 특성은 연소로 출구에서 측정된 NO 농도 값에 반영됨을 알 수 있었다.
3. 수치해석을 통해 계산된 NO 농도를 근거로 본 실험에서 형성된 난류화염의 평균 당량비는 약 0.56 - 0.6 범위에 속한다.

#### 참고문헌

1. 김영호, "질소산화물( $NO_x$ ) 배출 저감기술", 산업 기술정보원, 1972.
2. Meunier, Ph., Costa, M. and Carvalho, M.G., 1998, "Fuel", vol.77(15), p.1705.
3. Putnam, A.A., Belles, F.E. and Kentfield, J.A.C., 1986, "Prog". *Energy Combust. Sci.*, vol.12, p.43.
4. Charon, O., Jouvaud, D. and Genies, B., 1993, *Combust. Sci and Tech.*, vol.93, p. 211.
5. Rogg, B., 1993, "RUN-1DL: The Cambridge Universal Laminar Flamelet Computer Code", in: *Reduced Kinetic Mechanism for Applications in Combustion Systems*, Appendix C, N. Peters and B. Rogg (Eds.), Springer-Verlag.
6. Rogg, B., 1994, "RUN-1DL: The Universal Laminar Flame and Flamelet Computer Code", User Manual.
7. Dagaut, P., Cathonnet, M., Boettner, J.C., and Gaillard, F., 1987, *Combust. Sci and Tech.*, vol. 56, p. 22.
8. Bowman, C.T., Hanson, R.K., Gardiner, W.C., Lissianski, Jr.V., Smith, G.P., Golden, D.M., Frenklach, M. and Goldenberg, M., 1995, "GRI-Mech V. 2.11", [http://www.berkeley.edu/gri\\_meth/](http://www.berkeley.edu/gri_meth/).
9. Glassman, I, 1996, "Combustion", 3rd Ed., Academic Press.
10. Glarborg, P., Kee, R.J., Grcar, J.F., and Miller, J.A., 1992, "PSR: A Fortran Program for Modeling Well-Stirred Reactors", SAND86-8209 • UC-4.