

## 배기가스 재순환을 적용한 희박-과농 연소시스템의 공해물질 배출특성 연구

오휘성\* · 이창언\* · 유병훈\*\*

\*인하대학교 기계공학과

## The Pollutant Emission Characteristics of Lean-Rich Combustion System with Exhaust Gas Recirculation

Wheesung Oh\*, Chang-Eon Lee\* and Byeonghun Yu\*\*

\*Department of Mechanical Engineering, Inha University

(Received 9 March 2015, Received in revised form 31 May 2015, Accepted 1 June 2015)

### ABSTRACT

In this study, the CH<sub>4</sub>/air lean-rich combustion system with exhaust gas recirculation (EGR) was investigated to explore the potential for lowering pollutant emissions. To achieve this purpose, experiments of lean-rich combustion system with EGR were conducted to measure the changes in the characteristics of the pollutant emission and flame shape with various equivalence ratios and EGR rates. Here, this study was applied to the fuel distribution ratio of 3:1 for the formation of the lean and rich flames. Additionally, the results were compared with CH<sub>4</sub>/air lean premixed combustion system. The results show that flame shape of lean-rich combustion system was determined by lean and rich equivalence ratios ( $\Phi_L$  and  $\Phi_R$ ) and stratified flame was formed with increasing  $\Phi_R$ . According to the pollutant emission characteristics based on experimental results, the NO<sub>x</sub> and CO emission index (EINO<sub>x</sub> and EICO) decreased with increasing EGR rate. Especially, in the range needed to form a stable flame, the reduction rates of EINO<sub>x</sub> and EICO were approximately 47% and 48% for an EGR rate of 25%, global equivalence ratio of 0.85 and  $\Phi_L$  of 0.80 compared with lean premixed combustion system ( $\Phi = 0.78$ ).

**Key Words** : Lean-rich combustion system, Exhaust gas recirculation (EGR), Fuel-lean combustion, Fuel-rich combustion, NO<sub>x</sub> emission index (EINO<sub>x</sub>)

### 1. 서론

기존의 화석연료를 사용하는 연소시스템은 산업 분야, 수송 분야, 가정 및 상업 분야 등 다양한 방면에서 널리 이용되고 있다. 하지만, 이러한 연소시스템의 사용은 대기 오염물질을 다량으로 발생하는 문제점을 가지고 있어, 이에 대한 대책마련이 시급한 상황이다. 이에 따라 세계 각국에서는 다양한 친환경 정책을 제정하여 대기 오염 문제에 대응하기

위한 노력을 지속적으로 시행하고 있으며[1,2], 국내에서도 다양한 분야의 연소시스템에서 배출되는 오염물질의 규제치를 점차 강화하고 있는 실정이다[3]. 특히 고온의 산화과정을 통해 생성되어 호흡기 질환을 일으키고, 태양광선과 반응 시 오존을 생성시키는 질소산화물(Nitrogen oxide, 이하 NO<sub>x</sub>라 함)에 대한 규제치 강화에 힘쓰고 있다.

이렇듯 점차 강화되고 있는 환경정책에 대응하기 위해서는 연소시스템에 대한 저공해 성능 확보가 필요한 상황이며, 특히 개별 연료사용량은 소량이지만, 전체 사용량으로 보았을 때 가정 및 상업 분야 에너지 소비량의 대부분을 차지하고 있는 보일러와 같은 소용량 연소시스템에 대한 저공해 성능 확보가 우선적으로 수행되어야 한다.

일반적으로 소용량 연소시스템은 시스템의 저공해

† Corresponding Author, [byeonghun.yu@inha.ac.kr](mailto:byeonghun.yu@inha.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

성능 확보를 위해 주로 예혼합 연소 시스템(Premixed combustion system)을 사용하고 있으며, 다양한 예혼합 연소기에 대한 연구가 진행되어 왔다[4,5]. 예혼합 연소시스템은 크게 희박 예혼합 연소(Fuel-lean premixed combustion)와 과농 예혼합 연소(Fuel-rich premixed combustion)방식으로 구분 지을 수 있다. 우선 당량비를 1.0보다 작게 연소키는 희박 예혼합 연소는 낮은 화염온도로 인해 NO<sub>x</sub>와 같은 공해물질의 배출농도를 감소시킬 수 있다는 장점을 가지고 있는 반면, 희박 조건으로 갈수록 화염전파속도가 감소하여 불안정한 화염을 형성할 수 있는 단점을 가지고 있다. 또한, 당량비를 1.0보다 크게 운전하는 과농 예혼합 연소방식은 일산화탄소(Carbon monoxide, 이하 CO라 함)의 배출농도는 높아지지만, 이론 당량비 영역이 존재하기 때문에 비교적 안정한 화염을 형성할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이렇듯 예혼합 연소시스템은 당량비를 기준으로 서로 다른 특징을 가지고 있으며, 특히 보일러와 같은 소용량 연소시스템에서는 저공해 성능 확보 측면에서 유리한 희박 예혼합 연소방식을 사용하고 있다.

위에서 언급한 바와 같이 희박 예혼합 연소방식은 저공해 성능 측면에서 유리한 반면, 화염안정성 측면에서 불리하다는 특징을 가지고 있다. 이에 대한 개선방안으로 희박 예혼합 연소방식에 대한 화염안정성 분야의 연구가 많이 진행되고 있으며, 이 중에서도 성층화된 화염(Stratified flame)을 이용한 연구가 많이 이루어지고 있다. Lee 등[6]과 Ahn 등[7]은 동축류의 버너(Coaxial burner)를 이용하여 중심 노즐과 외곽노즐에서 공급되는 연료 및 공기의 혼합기 당량비와 유동 속도를 변화시켜가면서 예혼합 화염의 날림 특성을 연구하였으며, Lee 등[8]은 메탄화염을 대상으로 과농-희박 예혼합화염에 대한 안정화 특성에 대한 연구를 수행하였다.

한편, 연소시스템의 저공해 성능 확보를 위한 연구는 위에서 언급한 연소방식에 대한 연구뿐만 아니라 배기가스 재순환 방식(Exhaust gas recirculation, EGR)과 같은 추가적인 기술의 도입에 대해서도 이루어지고 있다. 배기가스 재순환 방식은 연소시스템에서 필연적으로 발생하는 배기가스를 그대로 이용한다는 장점을 가지고 있으며, 원리적으로 비교적 큰 비열을 갖는 화학종으로 구성된 배기가스를 연료 및 공기의 혼합기에 공급함으로써, 화염의 온도를 낮추고, 이로 인해 NO<sub>x</sub>를 저감하는 방안이다. 배기가스 재순환 방식은 기존에 많은 연구자들에 의해 수송기계용 엔진에 적용하여 공해물질 배출 성능에 대한 연구[9,10]를 진행해 왔으나, 본 연구진에서는 선행 연구[11,12]를 통해 기존의 희박 예혼합 연소시스템에 배기가스 재순환 방식을 적용하여 NO<sub>x</sub>와 CO의

배출농도를 크게 저감시키는 결과를 보인바 있다.

따라서 이번 연구는 기존의 희박 예혼합 연소시스템이 갖고 있는 화염안정성 문제를 해결하고, 높은 저공해 성능 확보를 위해 희박-과농 연소시스템(Lean-rich combustion system)을 대상으로 배기가스 재순환 방식을 적용하고, 당량비 및 배기가스 재순환율 변화에 따른 거시적인 화염형상 및 NO<sub>x</sub> 및 CO와 같은 공해물질의 배출특성에 대한 검토를 진행하고자 한다. 또한, 도출된 결과를 이용하여 기존의 희박 예혼합 연소시스템과 배출성능을 비교하고, 배기가스 재순환 방식을 적용한 희박-과농 연소시스템의 저공해 성능을 확인하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1. 실험장치의 구성

Fig. 1은 실험에 사용된 노즐과 연소실을 도시한 것이다. 희박-과농 연소시스템의 경우 두 개의 동축 노즐을 이용하여 구성하였으며, 직경 9 mm를 가지는 첫 번째 노즐에는 희박한 예혼합기를 공급하고, 직경 16.5 mm를 가지는 두 번째 노즐에는 과농한 예혼합기를 공급하여 희박-과농 화염을 형성하였다. 또한, 첫 번째 노즐을 제거하여 기존 예혼합 연소시스템의 노즐을 구성하고 설정된 조건에 맞는 혼합기를 공급하였다. 이를 통해 기존의 예혼합 화염을 형성하고 시스템의 배출성능을 검토하였으며, 희박-과농 연소시스템과의 배출성능을 비교하였다. 노즐의 내부 유동을 완전 발달 유동(Fully developed flow)으로 형성하기 위하여 노즐의 길이를 충분히 길게 하였으며, 유속 분포를 동일하게 하고 역화를 방지하기 위하여 노즐 하단에 두 개의 메시(Mesh)를 설치하였다.

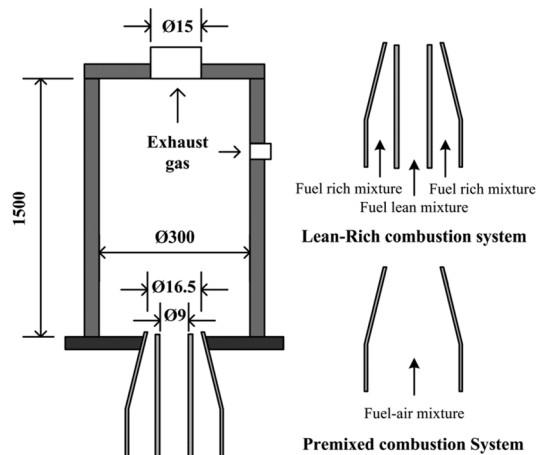


Fig. 1. Schematic diagram of lean-rich and premixed nozzle.

연소실(Chamber)은 직경 300 mm, 높이 1,500 mm의 원통형 관을 사용하였으며, 재순환용 배기가스의 흡입 위치와 공해물질의 배출농도 측정위치는 각 실험조건에서 생성된 화염의 길이가 최대 150 mm 정도임을 감안하여 안정된 배기가스의 배출농도 측정이 가능하고, 재순환용 배기가스의 흡입으로 인한 영향을 화염이 받지 않도록 연소기 노즐 출구로부터 1,200 mm 떨어진 곳(화염길이의 약 8배 위치)으로 정하였다. 또한, 형성된 화염에 의해 배출된  $\text{NO}_x$  및 CO 농도와 연소실 내부의  $\text{O}_2$  농도를 확인하기 위하여 연소가스분석기(Testo-340, TESTO)를 사용하였으며, 배기가스를 재순환시킴에 따라 화염의 불안정성에 의해 발생하는 미연탄화수소(Unburned Hydrocarbons, 이하 UHC라 함) 농도를 검토하기 위해 HC 분석기(MEXA-554JK, HORIBA)를 사용하였다.

Fig. 2는 배기가스 재순환 방식을 적용한 희박-과농 연소시스템의 구성을 보여주는 개략도이다. 화염은 메탄(Methane,  $\text{CH}_4$ )을 연료로 사용하여 형성하였으며, 스크류 형식을 사용하는 압축기(Screw type compressor, NAWOOTEK)를 이용하여 연소용 공기를 공급하였다. 메탄은 감압기를 통해 적정 압력으로 감압되어 질량유량계에 공급되었으며, 연소용 공기는 드라이어(Dryer)와 필터(Filter)를 거쳐 수분과 불순물을 제거한 후에 질량유량계에 공급하였다. 희박한 예혼합기와 과농한 예혼합기의 형성을 위해 연료와 공기는 총 4개의 질량유량계(TN Series, SMTEK)를 이용하여 제어하였으며, 균일한 혼합기의 형성을 위해 믹서(Noritake Static Mixer T-type series, Noritake)를 이용하여 연소기에 공급하였다. 마지막으로 연소 후 발생하는 배기가스 중 일부는 배기가스 재순환 장치에 의해 믹서로 재순환되었으며, 여기서 재순환되는 배기가스는 열교환기를 거쳐 혼합기의 공급온도와 동일한 상온으로 공급하였다.

## 2.2. 실험조건 결정

실험 조건의 결정을 위해 우선 희박-과농 연소시스템의 총괄당량비( $\Phi_G$ , 이하  $\Phi_G$ 로 함)는 0.85, 0.90, 0.95로 하고, 희박 연소 측에 공급되는 유량( $Q_{FL}$ , 이하  $Q_{FL}$ 로 함)과 과농 연소 측에 공급되는 연료 유량( $Q_{FR}$ , 이하  $Q_{FR}$ 로 함)의 비는 1:1, 2:1, 3:1로 선정된 상태에서 희박 연소 측의 당량비( $\Phi_L$ , 이하  $\Phi_L$ 로 함)를 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90으로 변경시키면서, 이에 따라 결정되는 과농 연소 측의 당량비( $\Phi_R$ , 이하  $\Phi_R$ 로 함)를 확인하였다. 이 때 생성되는 조건은 모두 45가지이나, 희박 및 과농 연소 측의 당량비가 연료인 메탄의 이론적인 가연한계( $0.46 < \Phi_{L,R} < 1.64$ )를 벗어나지 않는 범위[13] 내에서 실험 가능 범위를 선정하여 1차적으로  $Q_{FL}$ 과  $Q_{FR}$ 의 비에 따른 18개의 조건을 도출하였다. 하지만 도출된 18개의 조건 중  $Q_{FL} : Q_{FR}$ 이 1:1인 경우에 해당하는 4개의 조건은  $\Phi_G$ 가 0.85인 경우 성립하는 조건이 없어  $\Phi_G$ 에 따른 비교를 할 수 없기 때문에 실험에서 제외하였다. 또한,  $Q_{FL} : Q_{FR}$ 이 2:1인 조건(8개의 실험조건)과 3:1인 조건(6개의 실험조건)은 당량비 및 배기가스 재순환을 변화에 따른 공해물질의 배출농도 변화 경향이 유사하고,  $Q_{FL} : Q_{FR}$ 이 3:1인 조건이 2:1 조건에 비해 희박-과농 연소시스템의 저공해 성능을 좀 더 만족하는 결과를 보였기에, 이번 연구에서는  $Q_{FL} : Q_{FR}$ 이 3:1인 조건에 한하여 그 결과를 논하고자 한다. 이러한 배경 하에 선정된 이번 연구의 실험조건은 Table 1과 같다. 실험에서  $\Phi_G$ 가 0.85인 경우는 Group A, 0.90인 경우는 Group B, 0.95인 경우는 Group C로 구분하였으며, 각 Group 당  $\Phi_L$ 의 변화에 따른 2개의 Case가 존재한다.

Table 2는 연소시스템 내로 공급되는 연료-공기의 공급 유량을 나타낸다. 시스템 전체에 공급되는

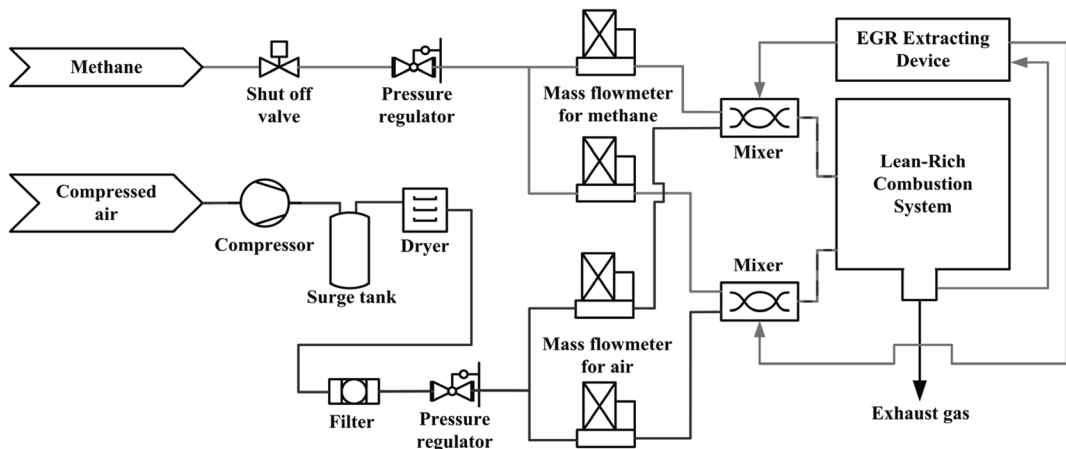


Fig. 2. Schematic diagram of lean-rich combustion system with EGR.

**Table 1.** Experimental conditions

Group A ( $\Phi_G = 0.85$ )		
	Case 1	Case 2
$\Phi_L$	0.75	0.80
$\Phi_R$	1.42	1.05
Group B ( $\Phi_G = 0.90$ )		
	Case 3	Case 4
$\Phi_L$	0.80	0.85
$\Phi_R$	1.44	1.09
Group C ( $\Phi_G = 0.95$ )		
	Case 5	Case 6
$\Phi_L$	0.85	0.90
$\Phi_R$	1.47	1.14

**Table 2.** Fuel and air supply conditions

Global equivalence ratio	Fuel [L/min]	Air [L/min]
0.85	0.85	9.52
0.90		8.99
0.95		8.52

연료는 0.85 L/min으로 일정하게 유지하면서 공기량을 제어하여 총괄당량비를 변경하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 첫 번째 노즐을 제거한 후에 예혼합기를 공급하여 기존 예혼합 화염을 형성하였으며, 첫 번째 노즐과 두 번째 노즐에 희박한 조건의 예혼합기와 과농한 조건의 예혼합기를 공급하여 희박-과농 화염을 형성하였다.

### 2.3. 실험방법

실험은 결정된 조건에 따라 화염을 형성시키고 모든 농도가 일정한 값을 가지는 정상상태에서 연소가스분석기와 HC 분석기를 이용하여 NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>2</sub>, UHC 농도를 측정하였다. 측정된 NO<sub>x</sub> 와 CO 값은 연소 과정의 효율과 배기의 희석 등의 효과와 관계없이, 연소된 연료의 질량에 대한 배출물의 질량을 나타내는 배출지수(Emission index, EI)를 사용하여 도시하였다[13]. CO 및 NO와 NO<sub>2</sub>의 배출지수인 EI<sub>CO</sub>, EI<sub>NO</sub>, EI<sub>NO2</sub>는 식 (1)에 의해 계산되며, EI<sub>NOx</sub>의 경우 화염의 하류 및 대기 중에서 NO가 NO<sub>2</sub>로 변환되는 점을 고려하여 식 (2)를 사용하여 계산하였다.

$$EI_i [g/kg] = \left( \frac{\chi_i}{\chi_{O_2} + \chi_{O_2}} \right) \left( \frac{x MW_i}{MW_f} \right) \times 1000 \quad (1)$$

$$EI_{NO_2} [g/kg] = EI_{NO} \frac{MW_{NO_2}}{MW_{NO}} + EI_{NO_2} \quad (2)$$

여기서,  $\chi_i$ 는  $i$  화학종의 몰분율,  $x$ 는 연료의 단위 몰당 탄소 입자의 몰 수, 그리고  $MW_i$ 와  $MW_f$ 는 각각 화학종  $i$ 와 연료의 분자량이다.

배기가스 재순환 시스템은 배기가스 재순환 장치를 작동시켜 연료 및 공기를 혼합시키는 믹서로 배기가스를 재순환하여 혼합함으로써 적용되었다. 배기가스의 유량은 식 (3), (4)에 의해 각각의 믹서로 공급되는 연료-공기 혼합기량을 기준으로 5%씩 증가시켰으며, 연소가스분석기와 디지털카메라를 사용하여 배기가스 재순환 방식이 적용됨에 따라 변화하는 배출특성과 화염형상을 관찰하였다.

$$Q_{L-EGR} = Q_L \times \Omega_{EGR} (\%) \quad (3)$$

$$Q_{R-EGR} = Q_R \times \Omega_{EGR} (\%) \quad (4)$$

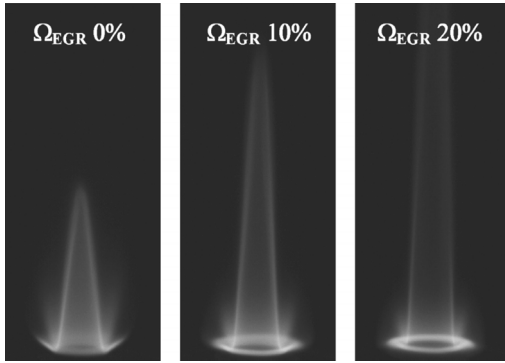
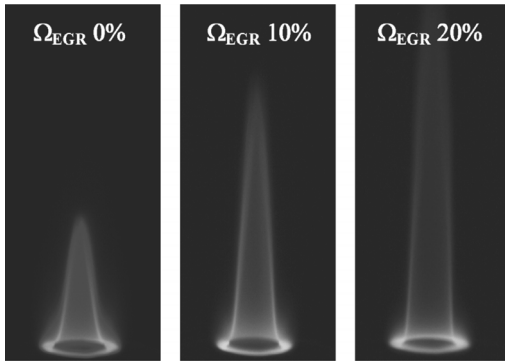
$$\Omega_{EGR} (\%) = 5, 10, 15, 20, \dots$$

여기서,  $Q_{L-EGR}$ 은 희박 연소 측에 재순환되는 배기가스 유량이며,  $Q_{R-EGR}$ 은 과농 연소 측에 재순환되는 배기가스 유량이다. 또한,  $Q_L$ 은 희박 연소 측의 혼합기 유량이며  $Q_R$ 은 과농 연소 측의 혼합기 유량을 의미한다. 배기가스는 공급되는 유량 비율과 동일하게 공급되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 희박-과농 연소시스템의 거시적인 화염형상 검토

Fig. 3은 Group B 조건( $\Phi_G=0.90$ )에서 희박 연소 측의 당량비와 배기가스 재순환율에 변화에 따른 거시적인 화염 형상을 도시한 것이다. 화염의 형상은  $\Phi_L$ 와  $\Phi_R$ 에 의해 결정되는 것을 확인 할 수 있었다. 조건 변화에 따라  $\Phi_L$ 이 감소하는 경우(Case 4 → Case 3), 공급되는 유량이 증가하면서 화염의 길이가 신장 되는 것을 확인 할 수 있었으며, 이와 함께  $\Phi_R$ 이 증가함에 따라 희박 연소 측의 화염면과 과농 연소 측의 화염면 사이에 성층화된 화염이 형성되는 것을 관찰할 수 있었다. 또한, Case 3에서 배기가스 재순환 방식이 적용되지 않은 과농 화염의 기저 일부는 노즐 림으로부터 떨어져있는 것을 확인할 수 있다. 이는 첫 번째 노즐에서 형성되는 희박 화염에 의해 과농 화염 기저의 일부는 노즐 림에 붙

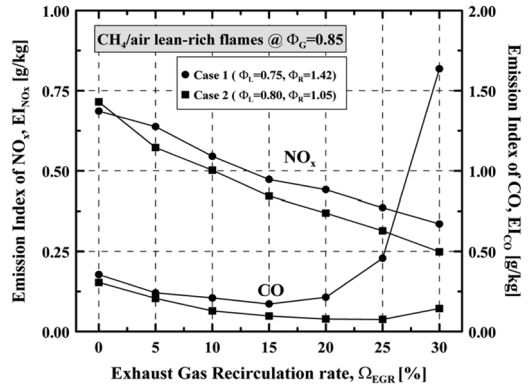
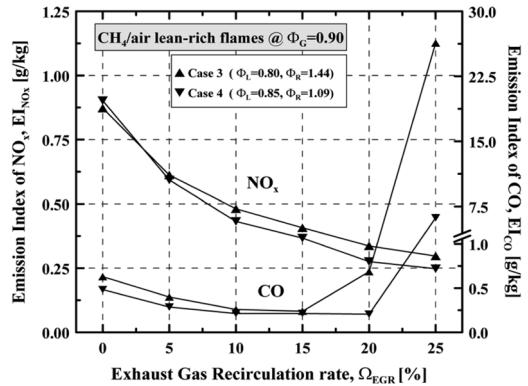
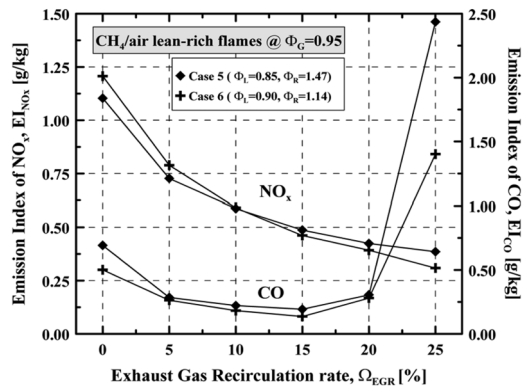
(a) Case 3 ( $\phi_G=0.90$ ,  $\phi_L=0.80$ ,  $\phi_R=1.44$ )(b) Case 4 ( $\phi_G=0.90$ ,  $\phi_L=0.85$ ,  $\phi_R=1.09$ )

**Fig. 3.** Typical Shapes of the lean-rich flame with various EGR rate. These are at Group B ( $\phi_G=0.90$ ,  $Q_{FL} : Q_{FR} = 3:1$ ).

어 있지만, 두 번째 노즐에서 공급되는 과농 혼합기의 유속이 화염 전파속도에 비해 크기 때문에 화염의 일부분이 노즐 림으로부터 부상하여 나타나는 현상이다. 다음으로 배기가스 재순환율이 증가할수록 과농 화염의 기저가 노즐 림 근처로 접근하게 된다. 이는 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 희박 혼합기의 유속과 과농 혼합기의 유속 차가 점차 증가하게 되고, 이로 인해 희박 화염과 과농 화염 사이에 존재하는 재순환 영역이 증가하면서 나타나는 현상으로 사료된다. 마지막으로 Case 3과 4의 전체적이 화염 길이는 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 혼합기의 유량 증가로 인해 신장되었으며, 배기가스 재순환에 의해 연료와 산화제의 반응성을 감소시키고, 이로 인해 연소영역이 확장되어 화염의 경계면이 존재하지 않게 되는 체적연소(Volume combustion)를 수행함으로써 일부 무화염(Flameless) 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다[14,15]. 참고사항으로 Group A 및 Group C의 화염 형상 역시 유사한 경향으로 관찰되었다.

### 3.2. 배기가스 재순환 방식이 적용된 희박-과농 연소시스템의 공해물질 배출특성

Fig. 4는 Group A ( $\phi_G=0.85$ ), Group B ( $\phi_G=0.90$ ) 및 Group C ( $\phi_G=0.95$ ) 조건에서 배기가스 재순환율 변화에 따른 희박-과농 연소시스템의  $\text{NO}_x$  및 CO의 배출 특성을 나타내고 있다. x-축은 배기가스 재순환율을 의미하고 있으며, y-축은 각각  $\text{NO}_x$  및 CO의

(a) Group A ( $\phi_G = 0.85$ )(b) Group B ( $\phi_G = 0.90$ )(c) Group C ( $\phi_G = 0.95$ )

**Fig. 4.** Measured  $\text{EI}_{\text{NO}_x}$  and  $\text{EI}_{\text{CO}}$  in lean combustion system with various EGR rate at Group A, B and C

배출지수를 의미한다. 또한, 각 심볼(Symbol)은 희박 연소 측의 당량비에 따라 결정된 조건들을 의미한다. 배기가스를 재순환하지 않은 조건에서 나타나는 NO<sub>x</sub> 및 CO의 배출지수 크기는 과농 연소 측과 희박 연소 측의 당량비 조건에 지배적인 영향을 받는다.

먼저, 배기가스 재순환 방식을 적용하지 않은 조건인 경우, NO<sub>x</sub> 배출지수는 그래프에서 확인할 수 있듯이,  $\Phi_L$ 가 1.0에 근접(Case 1 → Case 2, Case 3 → Case 4, Case 5 → Case 6)할수록 증가하고 있다. 이는  $\Phi_L$ 가 1.0에 근접할수록  $\Phi_R$ 도 역시 1.0에 근접해 오기 때문에 높은 NO<sub>x</sub> 배출지수가 측정된 것이다. 일반적으로 NO<sub>x</sub> 배출 농도는 연료와 공기가 이론적으로 모두 반응하여 가장 높은 온도를 발생시키는 당량비 1.0 근처에서, 열적(Thermal) NO<sub>x</sub>의 배출이 증가하여 높게 나타난다. 반대로 당량비가 1.0에서 멀어질수록, 과잉 공급된 공기와 반응에 제대로 참여하지 못한 연료의 증가로 화염의 온도가 감소하게 되고, 이로 인해 NO<sub>x</sub> 배출 농도는 낮아지게 된다. CO는 당량비 1.0 이상인 과농 연소 조건에서 주 화학종(Major species)으로 생성되기 때문에 과농 연소 측의 연료비율과 당량비의 크기가 지배적인 영향을 미친다. 이러한 경향은 그래프를 통해 확인할 수 있다. 그래프를 살펴보면,  $\Phi_L$ 가 증가할수록 CO의 배출지수가 감소하고 있다. 이는  $\Phi_L$ 가 증가하더라도, CO 배출지수에 지배적인 영향을 미치는  $\Phi_R$ 가 큰 폭으로 감소하고 있기 때문이다.

마지막으로 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 NO<sub>x</sub> 및 CO의 배출지수 변화를 살펴보면, NO<sub>x</sub> 배출지수는 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 비교적 큰 비열을 갖는 배기가스가 혼합기와 함께 화염에 유입되고, 이로 인해 화염의 최고 온도가 감소하기 때문에 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, CO 배출지수도 NO<sub>x</sub> 배출지수와 마찬가지로 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 일반적으로 CO의 배출특성은 NO<sub>x</sub>의 배출특성과 상이한 특성을 보이는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 혼합기에 유입되는 배기가스의 유량 증가로 인해 혼합 특성이 좋아지고, 화학반응시간이 증가하게 되면서 불완전 반응이 적어져 CO의 배출지수도 감소하는 것으로 사료된다[16]. 단, 배기가스 재순환율이 일정 수준 이상으로 적용된다면, CO의 배출지수는 크게 증가하기 시작하는데, 이는 재순환율이 증가하면서 노즐에 공급되는 혼합기의 유량 증가로 화염이 불안정해지면서 나타나는 결과로 판단된다.

앞서 언급한 바와 같이 Fig. 4를 살펴보면, 배기가스 재순환 방식을 적용하지 않은 조건에서는  $\Phi_L$ 가 1.0에 근접할수록  $\Phi_R$ 도 1.0에 근접하기 때문에 높은

NO<sub>x</sub> 배출지수를 보인다. 즉 각 Group에서 배기가스 재순환 방식을 적용하지 않은 Case 2, 4, 6의 NO<sub>x</sub> 배출지수가 동일한 조건에서의 Case 1, 3, 5에 비해 높은 수치를 보이게 된다. 하지만, 배기가스 재순환 방식이 적용되는 경우, 재순환율이 증가함에 따라  $\Phi_L$ 가 1.0에 좀 더 근접한 Case 2, 4, 6의 NO<sub>x</sub> 배출지수가 Case 1, 3, 5에 비해 적은 값을 갖게 된다. 이러한 결과는 본 연구에서 이용한 희박-과농 연소시스템의 배기가스 재순환 방법을 이용하여 설명할 수 있다. 본 연구에서 배기가스 재순환율은 희박-과농 연소시스템에서 배출되는 총 배기가스 유량 중 재순환되는 배기가스 유량의 비를 나타낸다. 이 때 과농 연소 측과 희박 연소 측에 공급되는 재순환용 배기가스 유량은 2.3절의 식 (3)과 (4)에 언급한 바와 같이 희박 및 과농 연소 측의 혼합기 유량에 의해 결정된다. 이와 같은 배기가스 재순환 방법을 고려한다면,  $\Phi_G$ 가 같은 경우, 같은 배기가스 재순환율을 적용하더라도 좀 더 1.0에 근접한  $\Phi_R$ 를 갖는 Case 2, 4, 6의 과농 연소 측에 재순환되는 배기가스 유량이 Case 1, 3, 5에 비해 큰 값을 갖게 된다. 반면에 희박 연소 측에 재순환되는 배기가스 유량은 과농 연소 측에 공급되는 배기가스 유량이 커지는 만큼 줄어들게 된다. 즉,  $\Phi_G$ 와 배기가스 재순환율이 동일한 경우,  $\Phi_L$ 와  $\Phi_R$ 이 1.0에 근접할수록 희박 연소 측에 재순환되는 배기가스 유량은 감소하게 되고, 과농 연소 측의 배기가스 유량은 증가하게 되는 것을 알 수 있으며, 이때의 NO<sub>x</sub> 저감율도 커지는 것으로 보았을 때, 희박-과농 연소시스템에서 과농 연소 측에 배기가스를 재순환하는 것이 희박 연소 측에 배기가스를 재순환하는 것보다 NO<sub>x</sub> 저감 측면에서 더 효과적임을 유추할 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 조건에서 실험한 결과로,

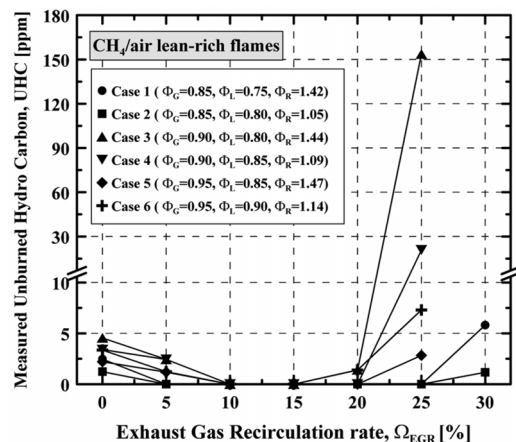


Fig. 5. Measured concentration of UHC in lean-rich combustion system with various EGR rate at Group A, B and C.

각 조건별로 배기가스 재순환율 변화에 따라 측정된 UHC 농도 변화를 도시한 것이다. 그래프를 살펴보면, UHC 농도는 각 조건에서 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 배기가스 재순환율을 일정 수준 이상으로 적용하는 경우에는 급격하게 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 경향은 Fig. 4에서 보이고 있는 배기가스 재순환율 변화에 따른 CO 배출지수의 변화 경향과 동일한 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 UHC 농도 변화를 살펴봤을 때, 시스템에 적용되는 배기가스 재순환율이 증가하더라도 안정된 화염을 형성하면서 NO<sub>x</sub> 및 CO의 배출농도를 감소시킬 수 있는 영역이 존재함을 확인하였으며, 배기가스 재순환율 증가에 따라 감소하는 NO<sub>x</sub>의 배출농도 변화가 배기가스의 공급에 따른 화염 온도 감소로 인한 결과이지, 화염의 불안정성 증가에 따른 결과가 아니라는 것을 알 수 있다.

### 3.3. 기존 희박 예혼합 연소시스템과의 배출성능 비교를 통한 희박-과농 연소시스템의 저공해 가능성 검토

Fig. 6은 CO 및 UHC가 증가하지 않고 화염의 상태가 안정적인 조건에서 측정된 NO<sub>x</sub> 및 CO의 배출지수를 도시한 분포도로써, Group A, Group B 및 Group C에서 측정된 배출지수와 실용 예혼합 연소시스템의 운전조건인 당량비 0.78 조건에서 측정된 배출지수를 도시한 것이다. 그래프에서 x-축은 NO<sub>x</sub> 배출지수를 의미하며, y-축은 CO 배출지수를 의미한다. NO<sub>x</sub> 및 CO의 배출지수가 높을 경우 그래프의 오른쪽 상단에 분포하게 되고, 배출지수가 낮을 경우 왼쪽 하단에 분포하게 된다. 실험 결과에 따르면, 배기가스 재순환 방식을 적용하지 않았을 때, Group A, Group B 및 Group C의 배출성능은 당량비 0.78

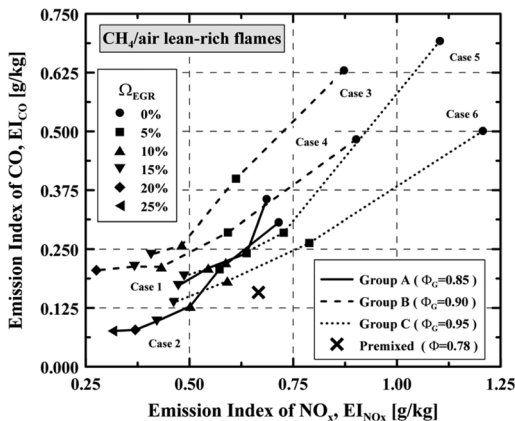


Fig. 6. NO<sub>x</sub> and CO distribution map of lean-rich combustion system with various EGR rate at Group A, B and Group C.

의 조건을 가지는 예혼합 연소시스템의 배출성능 보다 좋지 못하였다. 하지만 배기가스 재순환 방식이 도입됨에 따라 NO<sub>x</sub> 및 CO의 배출성능이 개선되어 일부 조건에서 기존 예혼합 연소시스템의 배출성능 보다 우수한 배출지수가 측정되었다. 특히, 재순환율이 25%까지 적용된 Group A의 Case 2에서 재순환율이 0%일 때의 배출지수인 EI<sub>NOx</sub> 0.71 g/kg, EI<sub>CO</sub> 0.31 g/kg 대비 56% 낮은 NO<sub>x</sub> 배출지수(0.31 g/kg)와 75% 낮은 CO 배출지수(0.08 g/kg)가 측정되었다. 또한, 이 수치는 기존 예혼합 연소시스템의 배출지수인 EI<sub>NOx</sub> 0.61 g/kg, EI<sub>CO</sub> 0.16 g/kg 대비 NO<sub>x</sub>의 경우 47%, CO의 경우 48%에 해당하는 것으로 절반에 해당하는 수치이다. 결과적으로, 기존에 많이 사용되고 있는 희박 예혼합 연소시스템의 화염 안정성 문제를 해결하기 위한 방안으로 과농-희박 예혼합 연소시스템을 적용하는 경우, 시스템에 적용되는 총괄당량비, 희박 및 과농 연소 측의 당량비, 배기가스 재순환율을 적절하게 조절한다면, 기존의 예혼합 연소시스템에 비해 높은 저공해 성능확보가 가능함을 알 수 있다.

## 4. 결론

이번 연구는 기존의 희박 예혼합 연소시스템이 갖고 있는 화염안정성 문제를 해결하고, 높은 저공해 성능 확보를 위해 희박 연소 측과 과농 연소 측의 연료비를 3:1로 고정된 희박-과농 연소시스템을 대상으로 배기가스 재순환 방식을 적용하고, 당량비 및 배기가스 재순환율 변화에 따른 거시적인 화염형상 및 NO<sub>x</sub> 및 CO와 같은 공해물질의 배출특성에 대한 검토를 진행하였다. 또한, 도출된 결과를 이용하여 기존의 희박 예혼합 연소시스템과 배출성능을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 희박-과농 연소시스템의 거시적인 화염의 형상은  $\Phi_L$ 과  $\Phi_R$ 에 의해 결정되며,  $\Phi_L$ 가 감소하면, 전체적인 화염의 길이는 길어지고,  $\Phi_R$ 가 증가하면, 희박 연소 화염과 과농 연소 화염 사이에 성층화된 화염이 형성되는 것을 확인하였다.

2) 배기가스 재순환 방식이 적용된 희박-과농 연소시스템의 공해물질 배출성능을 검토한 결과, 배기가스 재순환율이 증가함에 따라 NO<sub>x</sub> 및 CO 배출지수도 감소하는 것을 확인하였다. 특히 동일한  $\Phi_G$ 와 배기가스 재순환율이 적용된 시스템에서 NO<sub>x</sub> 배출지수의 저감율은  $\Phi_L$ 와  $\Phi_R$ 가 1.0에 근접한 경우일수록 높게 나타났다.

3) 배기가스 재순환 방식을 적용하지 않은 희박-과농 연소시스템의 NO<sub>x</sub> 및 CO 배출지수는 기존의 희박 예혼합 연소시스템에 비해 높은 것으로 나타났지만, 배기가스 재순환 방식을 적용한다면, 기존의

희박 예혼합 연소시스템에 비해 우수한 배출성능 확보가 가능하였다.

4) 희박 연소 측과 과농 연소 측의 연료비를 3:1로 고정된 상태에서  $\phi_G$ 와  $\phi_L$ 를 각각 0.85와 0.80으로 적용하고, 배기가스 재순환율을 25% 적용한다면, 각각 0.31 g/kg과 0.08 g/kg의 NO<sub>x</sub> 및 CO 배출지수를 확보할 수 있어 기존의 희박 예혼합 연소시스템에서 배출되는 배출지수에 비해 각각 47%, 48% 저감되는 것을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2012R1A2A2A01013884)이며, 일부 인하대학교 자동차동력계부품 지역혁신센터의 지원에 의해 수행된 연구임.

## 참고문헌

- [1] Aurélien G, Elena RV and Oliver W, Development of European Ecolabel Criteria for Hydronic Heaters, European commission: Institute for Prospective technological studies, 2013.
- [2] SCAQMD, Rule 1146.2, Emissions of oxides of nitrogen from large water heaters and small boilers and process heaters.
- [3] Korea Environment Corporation, Low NO<sub>x</sub> burner approval test and performance verification test, available from: [http://www.keco.or.kr/en/core/prevention\\_vapor/contentsid/2020/index.do](http://www.keco.or.kr/en/core/prevention_vapor/contentsid/2020/index.do)
- [4] B. Yu, S.M. Kim, C.E. Lee and S. Lee, Combustion characteristics and thermal efficiency for premixed porous-media types of burners, *Energy*, 53 (2013) 343-350.
- [5] S.A. Leonardi, R. Viskanta and J.P. Groe, Analytical and Experimental Study of Combustion and Heat transfer in Submerged Flame Metal Fiber Burners/Heaters, *J. Heat Transfer*, 125(1) (2003) 118-125.
- [6] W. Lee, T. Ahn and Y. Nam, Control the Blow-off Characteristics of Lean Premixed Flames Utilizing a Stratified Flame Concept, *J. Korean Soc. Combust.*, 17(4) (2012) 11-20.
- [7] T. Ahn, Y. Nam and W. Lee, Flow Stratification and Flame Blow-Off Characteristics of Co-Flow Lean Premixed Flames, *The 43th KOSCO Symposium*, 2011, 347-352.
- [8] W. Lee and D. Seo, A Study on the Stability of Rich/Lean Methane Premixed Flame, *Trans. KSAE*, 13(2) (2005) 170-177.
- [9] V.S. Yadav, S.L. Soni and D. Sharma, Performance and emission studies of direct injection C.K. engine in dual fuel mode (hydrogen-diesel) with EGR, *Int. J. Hydrog. Energy*, 37 (2012) 3807-3817.
- [10] T. Lakshmanan and G. Nagarajan, Study on using acetylene in dual fuel mode with exhaust gas recirculation, *Energy*, 36 (2011) 3547-3553.
- [11] B. Yu, S.M. Kum, C.E. Lee, S. Lee, Study on the combustion characteristics of a premixed combustion system with exhaust gas recirculation, *Energy*, 61 (2013) 345-353.
- [12] B. Yu, S.M. Kum, C.E. Lee, S. Lee, Effects of exhaust gas recirculation on the thermal efficiency and combustion characteristics for premixed combustion system, *Energy*, 49 (2013) 375-383.
- [13] S.R. Turns, *An Introduction to Combustion*, McGraw-Hill, Singapore, 2000.
- [14] C.L. Cha, H.Y. Lee and S.S. Hwang, Visualization of Oxygen Flameless Combustion, *The 49th KOSCO Symposium*, 2014, 403-404.
- [15] C.H. Hwang, S.W. Baek and H.Y. Kim, Numerical Investigation on the Thermal Characteristics of Mild Combustion According to Co-axial Air, *J. Korean Soc. Combust.*, 15(4) (2010) 1-8.
- [16] E.S. Cho and S.H. Chung, Experiment on Low NO<sub>x</sub> Combustion Characteristics by Flue Gas Dilution in Air and Fuel Sides, *Proceeding of the KSME 2004 Spring Annual Meeting*, 1499-1504.