

## 예혼합 LPG/공기화염에서 연소생성물의 국소농도 및 화염온도특성

### Local Concentration and Flame Temperature Characteristics of Combustion Product in Premixed LPG/Air Flames

김 태 권\*, 장 준 영\*\*  
Tae Kwon Kim, Jun Yuong Jang

#### ABSTRACT

Measurements of local CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, NO<sub>x</sub> concentrations and flame temperature are made for partially premixed flame with and without acoustic excitation. The CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, and C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> concentrations are determined by thermal conductivity detection (Gas-chromatograph) and NO<sub>x</sub> concentrations are determined by chemiluminescent detection (NO<sub>x</sub> analyser). To measure local sample concentration, sampling probe was made by quartz with inlet diameter of 0.25mm. In the case of excitation, the visual shape of the flame is changed from laminar flame to turbulent-like flame. The flame length is also reduced, and the flame width becomes broad. In the observation of emission concentration without acoustic excitation, meanwhile, the CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> concentrations peak at flame front where the mixture meets with surrounding air, and the CO concentration is increasing at maximum position of CO<sub>2</sub> concentration and peaks at the centerline of the burner. In the case of acoustic excitation, the CO<sub>2</sub> concentration is widely occurred at nozzle of the burner and is higher relative to unexcitation. The CO concentration is much reduced, but NO<sub>x</sub> concentration is more increasing. And flame temperature is higher relative to unexcitation. These are caused by enhancing of mixing with surrounding air due to excitation. However, in the case of acoustic excitation, the total NO<sub>x</sub> concentration is reduced because of the shortened flame length which affects residence time.

주요기술용어 : Partially premixed flame(부분적 예혼합화염), Acoustic excitation(음향가진),  
Local NO<sub>x</sub> measurement(국소 질소산화물측정), Flame temperature(화염온도)

---

\* 회원, 계명대학교 기계자동차공학부

\*\* 회원, 계명대학교 대학원 기계공학과

#### 1. 서 론

산업용로 등의 가스버너에서 배출되는 유해물

질에 의한 대기오염이 심각한 문제로 대두되고 있으며 배출물에 대한 규제가 점차 강화되고 있다. 환경문제가 심각해지면서 연소과정에서 유독 가스의 발생을 억제하여 대기오염을 줄이는 청정 연소기술과 연료의 사용을 줄이기 위한 고효율 연소기법의 개발이 활발히 진행되고 있다. 실제 사용중인 연소기들은 연소상태에 따라 국소적인 연료-공기 비가 달라진다. 이러한 결과는 부분적 예혼합화염과 비슷하다. 부분적 예혼합화염은 반응대내의 연료-공기흐름이 추가적인 공기에 의해서 완전연소를 한다. 이러한 결과는 부분적 예혼합화염이 유해배출물을 줄일 수 있음을 암시한다. 최근에 부분적 예혼합화염에서 NO<sub>x</sub> 생성 및 유해배출물에 관한 실험적 연구 및 수치적 연구가 수행되었다.<sup>1-4)</sup> 한편 Kim 등<sup>5)</sup>은 주기적인 압력변동이 있는 연소실을 모사하여 관내의 연료유동에 주기적인 압력변동을 유발시켜서 이에 따른 와동과 화염특성과의 상호관계를 규명하였고 음향가진으로 인해 화염형상의 난류화와 연료와 공기의 혼합을 촉진하고 화염길이를 축소하고 있음을 보였다. 또한 부분적 예혼합화염을 제어함으로써 연소중간생성물 라디칼 계측 및 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 제시하였으나 여타 연소생성물에 관한 관찰은 이루어지지 못하였다. 특히 유해배출물의 저감을 위해서는 유해배출물의 생성특성과 주요 인자에 대한 올바른 이해가 필요하다.

본 연구에서는 유해배출물을 줄일 수 있는 부분적 예혼합화염과 음향에 의한 주기적인 압력변동이 유발되는 화염을 구성하여 음향가진이 화염에 미치는 영향을 알아보고자 한다. 특히 화염내부의 일산화탄소, 이산화탄소, 산소, 질소, 프로판, 질소산화물 농도와 화염온도를 국소적으로 측정함으로써 화염대의 공간적 분포 및 생성 특성에 관한 기초적 정보를 제공하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치구성을 Fig. 1에 나

타내었다. 실험장치는 연료공급시스템, 가진시스템, 농도측정시스템, 온도측정시스템으로 구성된다. 연료로 프로판을 사용하고 산화제로는 질소 79%, 산소 21%로 혼합되어진 고순도 공기를 사용하였다. 각 기체는 봄베에서 나와 일정한 압력 조건으로 유입되도록 전용 압력조정기(regulator)를 사용하며 버블메타로 측정되어 고정된 유량계(Matheson E-300, E-500)를 거친다. 유량계를 통과한 프로판과 공기는 T-fitting을 통하여 혼합되어 가진실에 공급된다. 가진실(exciting chamber)로 들어온 예혼합된 연료와 공기는 스피커에서 나오는 주기적인 압력변동을 받아 연료분출노즐로 공급된다. 연료분출노즐은 3개의 동심 스테인레스관으로 구성되어 있으며 내경 4.5mm의 가운데관에서 예혼합된 공기와 연료가 관을 통해 나가면서 화염이 형성된다. 가운데관의 주위는 외경이 1인치(inch)의 관으로 싸여 전체적 당량비를 유지하기 위하여 공기가 나오게 된다. 가진실(exciting chamber, 부피 1.1 l)은 투명 아크릴로 제작되었으며 내경 14cm, 높이 15cm의 중간부분에 5인치 스피커(LG, 100Watt)를 부착시켰다. 스피커를 가진시키기 위해 신호발생기(function generator, MS-9160)에서 정현파를 발생시키며 앰프(amplifier, CTM-80)를 통해 출력전압을 증폭시킨다. 앰프에서의 출력전압을 오실로스코프로 모니터링하면서 조절하였다. 연소장의 화학종의 국소가스농도를 측정을 위하여 가스 크로마토그래피(gas chromatography, Donam 6200)와 NO<sub>x</sub>분석기(Rotork Analysis, model 443)를 사용하였다. 가스 크로마토그래피와 NO<sub>x</sub>분석기는 석영으로 만들어진 샘플링 프로브(sampling probe)를 사용하였고 공간분해능을 높이기 위하여 샘플링 프로브의 입구 직경을 0.25mm로 만들었다. 연소 가스중에는 반응성이 강한 라디칼들이 많으며 이런 생성물들이 온도가 높아진 샘플링 프로브로 뺏으면 화염속의 반응이 지속되기에 샘플링 순간의 상태를 그대로 유지할 수 있도록 직경 5mm로 점차 확대하여 공기역학적으로 연

소반응이 동결되는 형태로 만들었다. 또한 샘플링 프로브는 화염의 왜곡을 줄이기 위해 화염면에 직각으로 설치하여 실험을 수행하였다. 가스 크로마토그래피는 열전도검출법(TCD)에 의해 분석되고 NOx 분석기는 화학발광법(chemiluminescent detector)에 의해 분석된다. 화염면의 온도측정을 위해 직경이 125 $\mu$ m인 R형의 열전대 wire를 사용하였다. R형의 열전대를 (+)극에 Pt/Rh13%를 (-)극에 Pt를 연결하여 접합한 후 보상도선과 연결하였다. 열전대의 출력값이 작기 때문에 이 신호를 100배 증폭하여 A/D변환기(NI, PCI-MIO-16E1)를 통해 신호를 얻은 후 LabVIEW 프로그램을 사용하여 R형 열전대 전압-온도관계를 분석 처리하였다.

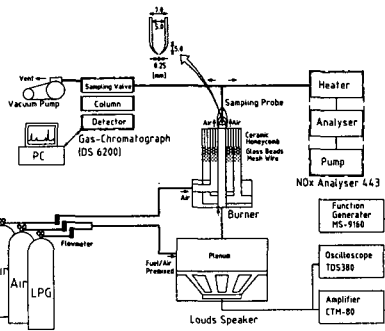


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

## 2.2 실험방법

가운데 관에서 연료와 공기를 혼합하여 예혼합 화염을 형성하여 가운데관 당량비(center tube equivalence ratio,  $\phi_c$ )와 주위관에 공기를 흘려주어 전체적 당량비(overall equivalence ratio,  $\phi_o$ )를 조절하고 있다. 본 실험에서는  $\phi_o$ 를 0.5로 고정하고 일정한 연료량에 대하여 공기량의 증감에 따라  $\phi_c$ 를 변화시켜 실험을 수행하였다. 가진조건은 신호발생기에서의 정현파신호를 입력시켰을 때 가진실 및 연료분출노즐의 공명주파수 294Hz를 가진주파수로 고정하였으며, 앰프의 출력을 증가시켰을 때 화염날림

(blowout)이 없는 조건으로,  $\phi_c=1.1$ 에서는 4Volt,  $\phi_c=2$ 에서는 8Volt로 고정시켰다. 연소 생성물의 국소 가스농도 및 온도측정은 독취현미경을 사용하여 샘플링 프로브 및 열전대를 연료 분출노즐출구 중심에서 반경방향으로  $r=0.5$ mm 간격으로 이송하며 측정하였고 축방향으로는  $x=4.5$ mm간격으로 이송하며 측정하여 연료분출노즐의 직경  $D=4.5$ mm를 사용하여 무차원화하여 나타내었다. 열전대 wire의 직경이 25.4 $\mu$ m인 경우 추적가능한 주파수는 최대 25Hz 정도로 알려져 있다. 화염의 온도는 항상 일정한 것이 아니라 작게는 5K, 크게는 50K으로 변동하므로 각 온도 측정위치에서 샘플링속도를 10Hz로 5초간 측정하여 평균하였다. 화염온도 계측시 복사열은 보정하지 않았다.

## 3. 실험결과 및 토의

### 3.1 국소농도

연소장에서 각종 화학종들의 분포를 구하고 연소장의 특성을 정량적으로 분석하기 위하여 화염의 단면에서 국소적으로 농도를 측정하였다. Fig. 2는  $\phi_c=1.1$ ,  $x/D=1$ 과  $x/D=2$ 에서의 비가진과 가진시의 CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, NOx 농도를 나타낸 그림이다. 그림은 연료분출노즐 중심으로부터 축방향 거리( $r/R$ )에 따라 나타내었으며 왼쪽은 비가진(unexcited)의 경우이고 오른쪽은 가진(excited)의 경우이다. 비가진의 경우 국소적 농도분포를 살펴보면 CO<sub>2</sub>의 농도는 화염대 근방( $r/R=-1.55\sim-1.33$ )에서 최대값을 가지며 산화제측과 예혼합된 연료측으로 갈수록 줄어드는 경향을 보이고 있다. CO의 농도는  $r/R=-1.33$ 인 곳에서 연료분출노즐의 중심으로 갈수록 급격히 증가되고 있다. O<sub>2</sub>의 농도는 연료분출노즐 중심에서 화염대까지는 연소반응으로 소멸되어 아주 미세하게 나타나며 화염대를 벗어나면서 급격히 증가함을 볼 수 있다. N<sub>2</sub>의 농도는 반경방향에 따라 거의 일정하게 나타나고 있다. 연료인 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 농도는 측정위치에서 검출되지 않았다. NOx의

농도는 화염대 근방( $r/R=-1.11$ )에서 최대값을 가지며 산화제측과 예혼합 연료측으로 갈수록 줄어드는 경향을 보이고 있다.  $\phi_c=1.1$  비가진 화염은 연료와 공기가 예혼합되어 있기는 하지만 산화제측의 풍부한 산소로 인해 화염대 근방에서  $\text{CO}_2$ 의 농도가 높으며 화염중심으로 갈수록  $\text{O}_2$ 의 부족으로 불완전연소가 일어나  $\text{CO}_2$ 의 농도는 감소하고  $\text{CO}$ 의 농도가 증가한다고 생각된다.  $\text{NO}_x$ 의 경우는 Zeldovich 메카니즘에 의해 화염대 근방에서의 충분한 산소와 높은 온도로 인해 주된 연소반응이 일어나는 지역에서 증가하는 것으로 생각된다.  $r/R=-1.55 \sim -1.33$  근방에서 연소생성물인  $\text{CO}_2$ 의 농도가 최고점이 존재하고  $\text{CO}$ 가 발생되는 것으로부터 이 영역이 주위 산화제와 연료의 주된 연소반응이 일어나는 것으로 생각된다. 가진의 경우에는 화염날림이 없는 조건인 가진전압 4Volt에서 실험이 수행되었다. 가진전압이 미세하여 화염구조가 비가진에 비해 크게 변하지 않으며 비가진의 농도분포와 약간의 변화를 보일 뿐 전반적으로 유사한 모습을 보여준다.  $x/D=1$ 와  $x/D=2$ 를 비교하면 상류지역에서 하류지역으로 갈수록  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ 의 농도는 증가하는 반면  $\text{O}_2$ 의 농도는 감소되고 있다. 이는 화염 하류지역으로 가면서 연소반응이 계속 진행되고 있으며 상류지역에서 생성된 연소생성물이 누적된 것으로 생각된다.

Fig. 3은  $\phi_c=1.1$ ,  $r/R=0$ 에서 축방향위치( $x/D$ )에 따른  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{NO}_x$  농도를 나타낸 그림이다. 가진전압이 미세하여 가진과 비가진의 연소생성물의 농도차이의 변화가 크지 않다.  $\text{CO}_2$ 의 농도는  $x/D \approx 4$ 까지 증가하고 있으며 하류로 갈수록 감소되며  $\text{CO}$ 의 농도는  $x/D \approx 2$ 까지 증가하다가 하류로 갈수록 감소된다.  $\text{O}_2$ 의 농도는  $x/D=4$ 이상에서 증가하고 있으며  $\text{C}_3\text{H}_8$ 의 농도는 이론당량비로 인해 검출되지 않고 있다.  $\text{NO}_x$ 의 농도는 연료분출노즐 중심에서  $x/D \approx 4$ 까지 나타나고 있다. 참고문헌<sup>6)</sup>에서  $\phi_c=1.1$  비가진화염은 연료분출노즐 중심에서  $x/D=2$  영역까지 청염으로 된 예혼합화염구조인 원뿔형 모습을

을 띠고 있으며 그 이상은 휘염(luminosity)이 나타나고 있다.

Fig. 4는  $\phi_c=2$ ,  $x/D=1 \sim 4$ 에서 비가진과 가진의  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{NO}_x$  농도를 나타낸 그림이다. 비가진의 경우에는  $\text{CO}_2$ 의 농도가 최고로 되는 화염대 근방( $r/R=-1.77 \sim -1.55$ )에서  $\text{CO}$ 의 농도가 최소를 나타내며 연료분출노즐 중심으로 갈수록 증가하고 있다. 산화제인  $\text{O}_2$ 의 농도는 연료분출노즐 부근에서 조금씩 나타나며 화염대를 벗어나며 증가하고 있다. 연료인  $\text{C}_3\text{H}_8$ 의 농도는 연료분출노즐 부근에서 나타나고 있다.  $\phi_c=2$ 는  $\phi_c=1.1$ 에 비해 연료가 농후하여 불완전연소반응이 일어나, 미연의 연료와 산화제가 존재하는 것으로 생각된다.  $\text{NO}_x$ 의 농도는 연료분출노즐 중심부근에서 증가하여 화염대 근방에서 최고점을 가지며 감소하고 있다.  $x/D=1$ 에서는  $r/R=1.33$ 에서 최고점을 가지며 점차 후류로 갈수록 최고점 위치( $r/R$ )가 커지고 있다.  $r/R=-1.77 \sim -1.55$  근처에서  $\text{CO}_2$ 의 농도 최고점이 존재하고  $\text{CO}$ 가 발생되는 것으로부터 이 근방이 주위 산화제와 연료의 주된 연소반응이 일어나는 영역으로 생각된다.  $\phi_c=2$ 인 경우가  $\phi_c=1.1$ 인 경우보다 주된 연소반응이 일어나는 영역이 증가하고 있어 화염의 반응영역이 커졌음을 나타낸다. 상류지역에서 하류지역으로 갈수록  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}_x$ 의 농도는 증가하는 반면  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ 의 농도는 감소되고 있다. 이로부터 화염 하류지역으로 가면서 연소반응이 계속 진행되고 있으며 미연의 연료와 산화제는 줄어들며 상류지역에서 생성된 연소생성물이 누적된 것으로 생각된다. 가진전압 8Volt의 화염은 비가진의 경우와는 전혀 다른 모습을 보이고 있으며 화염이 연료분출노즐 중심에서 부상하여 매우 난류화된 모습을 가지고 있다. 또한 화염대의 폭이 넓어지고 화염 길이의 축소를 가져온다.<sup>6)</sup> 가진의 경우에는  $\text{CO}_2$ 의 농도가 연료분출노즐 중심부터 넓게 분포되고 있으며 비가진에 비해 많이 생성되고 있다. 또한  $\text{CO}$ 의 농도는 비가진에 비해 저감되고 있다.  $\text{O}_2$ 의 농도는 연료분출노즐 부근에서는 거의 나타

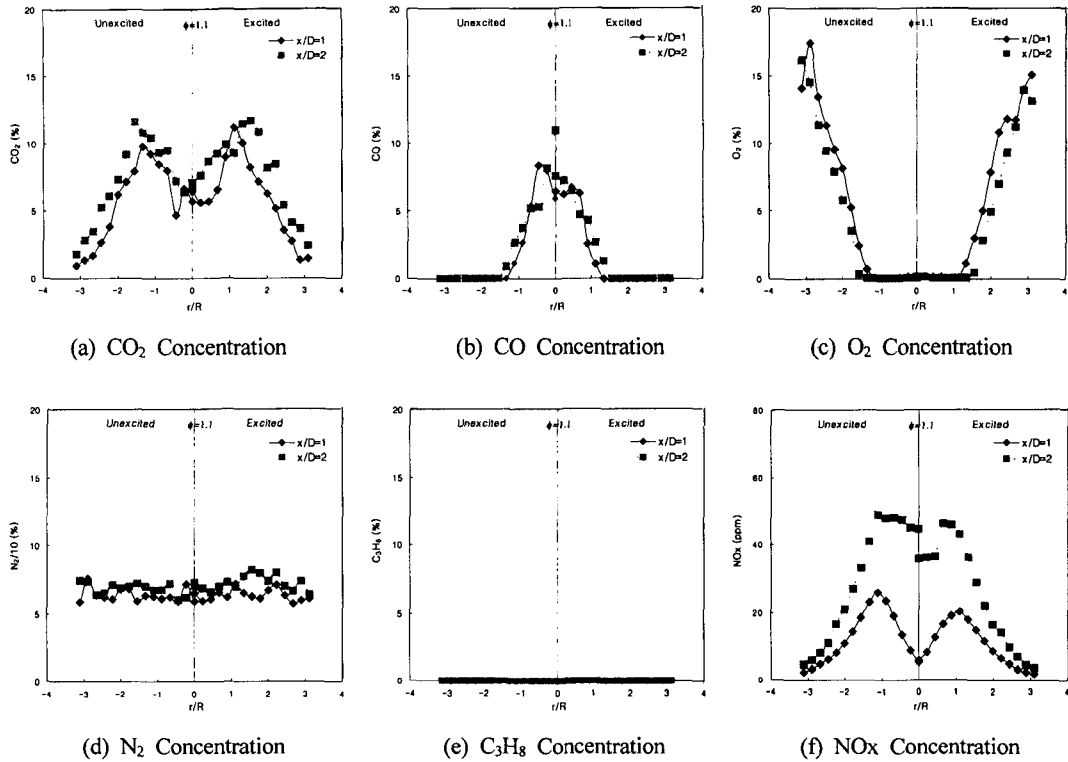


Fig. 2 Local concentrations as a function of  $r/R$  ( $\phi_c=1.1$ )

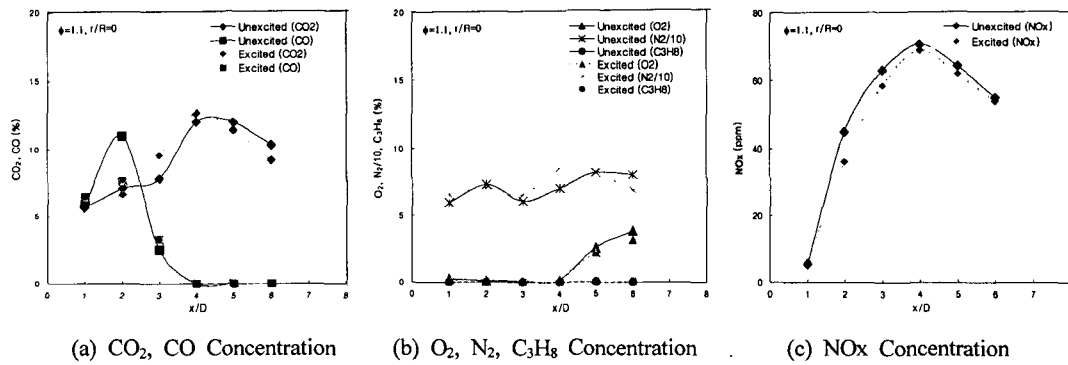


Fig. 3 Local concentrations as a function of  $x/D$  ( $\phi_c=1.1$ )

나지 않으며  $C_3H_8$ 의 농도는 완전히 나타나지 않는다. 이는 음향가진에 의해 화염이 난류화된 유동을 가지며 주위 공기와의 접촉 및 혼합으로 인해 연소반응이 증가하는 것으로 생각된다. 가진의 경우  $NO_x$ 농도는 화염형상의 영향을 받아서

반응분포가 넓어진다.  $x/D=1$ 에서는 화염이 부상하여 거의  $NO_x$ 가 나타나지 않고 있다.  $x/D=2$ 상에서는  $NO_x$ 농도가 더 높게 나타나고 있다. 특히 연료분출노즐 중심에서의  $NO_x$  발생이 괄목하게 증가하고 있다. 이는 음향가진에 의해 화염

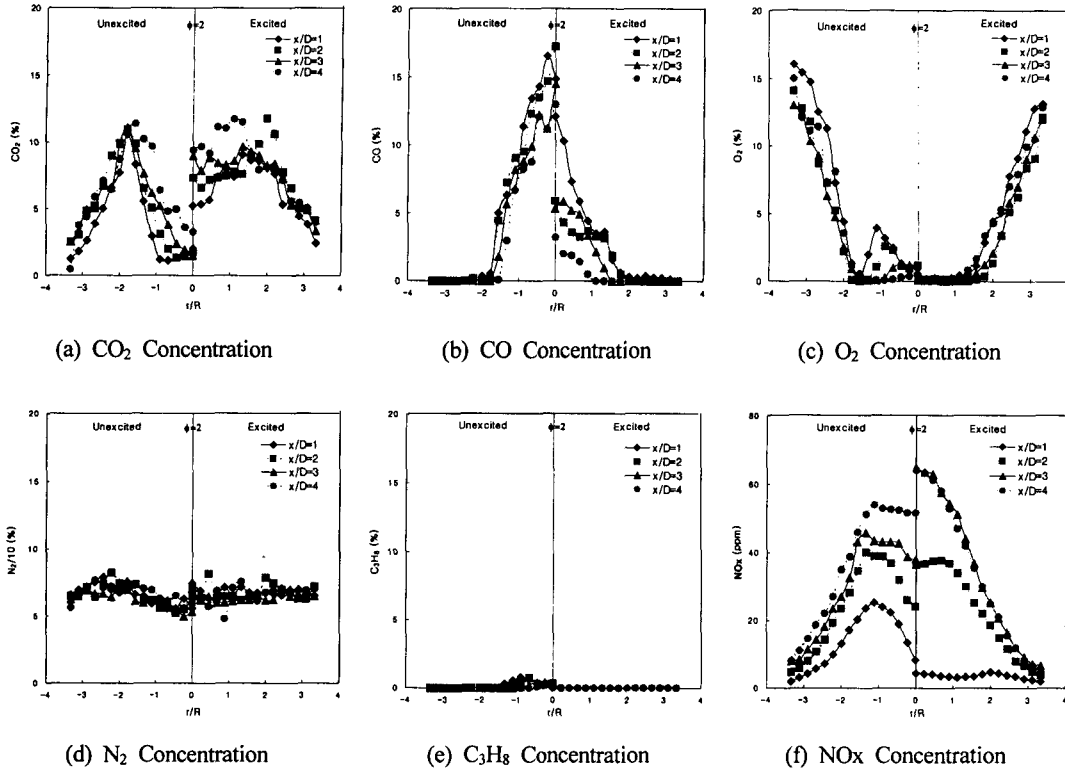


Fig. 4 Local concentrations a function of  $r/R$  ( $\phi_c=2$ )

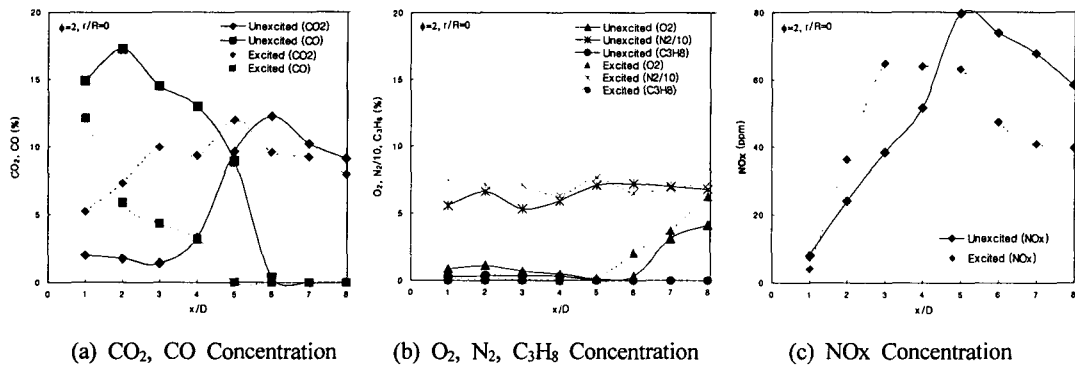


Fig. 5 Local concentrations as a function of  $x/D$  ( $\phi_c=2$ )

모습이 난류화된 유동을 가지며 주위 공기와의 접촉 및 혼합으로 인해 연소반응이 증가하여 Zeldovich 메카니즘에 의한 NO<sub>x</sub>가 증가하는 것으로 생각된다. 이는 화염온도 계측결과로부터 보완설명이 될 것이다.

Fig. 5는  $\phi_c=2$ ,  $r/R=0$ 에서 축방향위치( $x/D$ )에 따른 CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, NO<sub>x</sub> 농도를 나타낸 그림이다. 비가진 경우에는 CO<sub>2</sub>의 농도는  $x/D=3$ 인 영역까지는 일정하게 나타나다가 급격히 증가하여  $x/D=6$ 에서 최고값을 나타낸 후 서

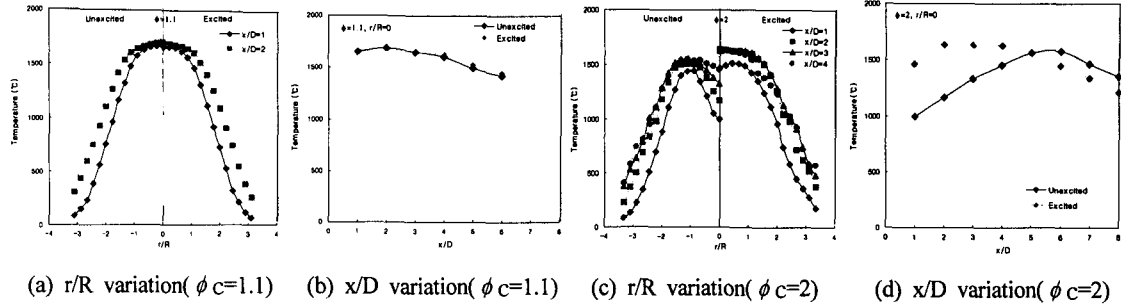


Fig. 6 Flame temperature

서히 감소되고 있다. CO의 농도는  $x/D=2$ 에서 최고값을 나타내며 서서히 감소되어  $x/D=6$ 이후 나타나지 않으며  $O_2$ 의 농도는 반응대를 벗어난  $x/D=6$ 에서 서서히 증가하고 있다. 가진의 경우에는  $CO_2$ 의 농도가 비가진에 비해 상당히 높으며 연료분출노즐 중심에서부터 증가하여  $x/D=5$ 에서 최고값을 나타낸 후 서서히 감소된다. CO의 농도는 비가진에 비해 상당히 낮으며 연료분출노즐에서 하류로 갈수록 계속되는 연소반응에 의하여 감소하다가  $x/D=5$ 이후에는 전혀 나타나지 않았다. 또한  $O_2$ 의 농도는 가진의 경우가 비가진보다 연료분출노즐 부근에서 낮게 나타나고 있으며  $x/D=5$ 에서 서서히 증가하고 있다.  $C_3H_8$ 의 농도는 비가진시에는 연료분출노즐 중심에서  $x/D=4$ 까지 나타나지만 가진시에는 전혀 나타나지 않고 있다. 이는 연료분출노즐 주위유동의 난류화로 인해 주위공기와 혼합이 활발해져 연소반응이 증가하고 화염폭이 넓어지고 화염길이의 감소로 화염이 존재하는 영역이 감소되기 때문이라고 생각된다. 비가진의 경우에는  $NO_x$ 의 농도는 일정하게 증가하여  $x/D=5$ 에서 최고점을 가진 후 서서히 감소되고 있다. 가진의 경우에는  $x/D=3$ 에서 최대를 가진 후 감소되어 있다. 이는 가진으로 인해 화염길이가 축소되었음을 나타낸다.

### 3.2 화염온도

Fig. 6은  $\phi_c=1.1$ ,  $\phi_c=2$ 인 경우의 비가진과 가진시의 화염온도이다. Fig. 6(a)의  $\phi_c=1.1$  비가진과 가진의 경우에는 화염온도가 연료분출노즐 중심부근에서 최대이며 반경방향으로 벗어날수록 감소하고 있다. Fig. 6(b)축방향에서는 비가진과 가진의 경우에 화염온도가  $x/D=2$ 에서 최고를 가진 후 감소되고 있으나 가진과 비가진의 경우 모두 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 6(c)  $\phi_c=2$  비가진 화염온도는 연료분출노즐 중심부근에서 증가하여 화염대 근방에서 최대이다. 화염대 근방에서  $NO_x$  및  $CO_2$ 의 발생이 최대임을 볼 때 주위의 충분한 공기로 인해 주된 연소반응으로 화염온도가 최대라고 생각된다. 가진의 경우에는 연료분출노즐 중심에서 부상하여 매우 난류화된 모습을 가지고 있어 온도분포 또한 반경방향으로 넓게 퍼짐을 볼 수 있다.  $NO_x$ 농도가 연료분출노즐 중심부근에서 높게 나타났듯이 온도분포도 연료분출노즐 중심에서 높게 나타나고 있다. 이는 음파가진에 의해 화염모습이 난류화된 유동을 가지며 주위 공기와 접촉 및 혼합으로 인해 연료분출노즐 중심에서의 연소반응이 증가하는 것으로 생각된다. Fig. 6(d)축방향에서는 비가진의 경우에 화염온도가  $x/D=6$ 에서 최고점을 가진 후 서서히 감소되고 있으나 가진의 경우에는 화염길이의 축소로 인해  $x/D=2$ 에서 최대를 가진 후 감소되어 있다. 참고문헌<sup>6)</sup>에서 밀폐챔버내에서의  $NO_x$ 측정결과와 비교하면 가진의 경우가 비가진에 비해  $NO_x$ 가 감소되어지고 있다. 본 연구에서

가진시에 국소적 NO<sub>x</sub>농도가 비가진에 비해 오히려 증가하고 있다. 이는 Fig. 4, 5에서 보는 바와같이 연료분출노즐 부근에서 활발한 혼합에 의해 완전연소가 이루어진 것으로 생각된다. 즉 x/D가 커짐에 따라 가진의 경우는 온도가 하강하고 있는 것이다. x/D=5를 경계로 하여 가진의 경우가 비가진에 비해 화염온도가 격감하고 있으며 결국 NO<sub>x</sub>의 저감을 초래하게 되는 것이다. 결국 국소적 NO<sub>x</sub>농도는 화염온도에 연관이 있고 스택(stack)에서의 NO<sub>x</sub>농도는 화염길이의 감소로 인한 잔류시간(residence time)과 연계된 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

유해배출물을 줄일 수 있는 부분적 예혼합화염과 음향에 의해 주기적인 압력변동이 유발되는 화염을 구성하여 음향가진이 화염에 미치는 영향을 알아보기 위해서 일산화탄소, 이산화탄소, 산소, 질소, 프로판, 질소산화물 농도와 화염온도를 국소적으로 측정하여 화염대의 공간적 분포 및 생성 특성에 관한 정보를 제공하고자 한다.

- 1) 비가진 화염은 산화제측의 풍부한 산소로 인해 화염대 근방에서 CO<sub>2</sub>의 농도가 높으며 화염 중심으로 갈수록 O<sub>2</sub>의 부족으로 불완전연소가 일어나 CO<sub>2</sub>의 농도는 감소하고 CO의 농도가 증가하고 있다. NO<sub>x</sub>의 경우는 Zeldovich메카니즘에 의해 화염대근처에서의 충분한 산소와 높은 온도로 인해 화염대 근방(r/R=-1.33~-1.11)에서 최대값을 가진다고 생각된다. 연료와 산화제인 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>와 O<sub>2</sub>의 농도는  $\phi_c=1.1$ 에서는 존재하지 않다가  $\phi_c=2$ 에서 나타나고 있다.  $\phi_c=2$ 가 연료가 농후하여 불완전연소반응이 일어나, 미연의 연료와 산화제가 존재하는 것으로 생각된다.
- 2) 가진화염은 CO<sub>2</sub>의 농도가 연료분출노즐 중심부터 넓게 분포되고 있으며 비가진에 비해 많이 생성되고 있다. 또한 CO의 농도는 비가진에 비해 저감되고 있다. O<sub>2</sub>의 농도는 연료분출노즐 부근에서는 거의 나타나지 않으며 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 농도

는 완전히 나타나지 않는다. NO<sub>x</sub>농도는 연료분출노즐 중심에서 팔목하게 증가하고 있다. 이는 음향가진에 의해 화염모습이 난류화된 유동을 가지며 주위 공기와의 접촉 및 혼합으로 인해 연소반응이 증가하여 Zeldovich메카니즘에 의한 NO<sub>x</sub>가 증가하는 것으로 생각된다.

- 3) 온도분포에서는 가진의 경우 x/D가 커짐에 따라 온도가 하강하고 있다. x/D=5를 경계로 하여 가진의 경우가 비가진에 비해 화염온도가 격감하고 있으며 결국 NO<sub>x</sub>의 저감을 초래하게 되는 것이다. 결국 국소적 NO<sub>x</sub>농도는 화염온도에 연관이 있고 stack에서의 NO<sub>x</sub>농도는 화염길이의 감소로 인한 잔류시간(residence time)과 연계된 것으로 생각된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) S. R. Turns, F. H. Myhr, R. V. Bandaru, and E. R. Maund, Combustion and Flame, Vol. 95, p.255, 1993.
- 2) J. P. Gore and N. J. Zhan, Combustion and Flame, Vol.105, pp.414-427, 1996.
- 3) T. K. Kim, B. J. Alder, N. M. Laurendeau, and J. P. Gore, Combustion Science and Technology, Vol.110-111, pp.361-378, 1995.
- 4) T. W. LEE, A. MITROVIC, and T. WANG, Combustion and Flame, Vol. 121, pp.378-385, 2000.
- 5) T. K. Kim, J. Park, and H. D. Shin, Combustion Science and Technology, Vol. 89, pp.83-100, 1993.
- 6) 장준영, 정주영, 최경호, 김경찬, 김태권, 한국자동차공학회 1998년도 추계학술대회논문집, pp.363-368, 1998.