

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0024

정적연소실에서 메탄-공기 예혼합화염의 CO, CO₂ 및 NO_x 배출 특성

CO, CO₂ and NO_x Emission Characteristics of Methane-Air Premixed Flame in Constant Volume Combustion Chamber

김 태 권*, 김 성 훈*, 장 준 영**
Tae Kwon Kim, Sung Hoon Kim, Jun Young Jang

ABSTRACT

This paper presents the effects of initial pressure of mixture on CO, CO₂ and NO_x emissions in constant volume combustion chamber. The CO, CO₂, O₂, N₂ concentrations in the chamber are determined by thermal conductivity detection (Gas-chromatograph) while the NO_x concentration is measured by chemiluminescent detection (NO_x Analyser). Methane-air mixture is used as premixed fuel and the measurements are taken with equivalence ratios (ϕ) varying from 0.6 to 1.3, and initial pressures of methane-air mixture varying from 0.1MPa to 0.8MPa in constant volume combustion chamber. The NO_x concentration steadily increases with increasing equivalence ratio, peaks in lean flame ($\phi=0.85\sim0.9$), and then rapidly decreases. However, as the initial pressure of mixture is increased, the equivalence ratio corresponding to the point of peak [NO_x] shifts towards leaner conditions. This is caused by a similar shift in the peak[CH], which is caused by the variation with pressure and equivalence ratio of the rate of CH production from CH₂ and OH. The maximum combustion pressure peaks at $\phi=1.05$ and the CO₂ concentration peaks at $\phi=0.95\sim1.0$ while the CO concentration rises sharply at the condition of fuel-rich mixtures. This is caused by complete combustion at $\phi=0.95$.

주요기술용어: Equivalence Ratio(당량비), Initial Pressure of Mixture(혼합기의 초기압력), NO_x(질소산화물), Constant Volume Combustion Chamber(정적연소실), Premixed Flame(예혼합화염)

1. 서 론

자동차 유해 배출가스로 인한 공해문제가 사회적인 문제로 대두되면서 배출가스에 대한 규제가 강화되고 있다. 유해배출물중 일산화탄소는 인체

* 회원, 계명대학교 자동차공학부

** 회원, 계명대학교 대학원 기계공학과

에 직접적인 영향을 끼치며 이산화탄소는 최근에 지구 온난화의 주범으로 문제시 되고 있다. 또한 질소산화물(NOx)은 광화학스모그 및 산성비와 밀접하게 연관되어지고 있어 이에 대한 생성 및 저감연구는 점차 중요시되고 있으며 많은 연구가 보고되고 있다.¹⁻⁵⁾ 배출가스를 저감할 수 있는 방법으로는 연료와 공기의 혼합과정의 개선과 연소실 개선 등을 통해 연소과정에서 발생하는 생성물을 개선하는 방법이 가장 기본적인 대책이다. 배출가스에 의한 공해물질과 화염특성과의 상관 관계를 관찰하고 유해물질 발생기구의 구조적 특성을 파악함으로써 유해가스 배출을 저감할 수 있는 가능성을 제시하고자 하는 방안으로 연소실내의 연소특성에 관한 연구가 이루어 져야한다. 한편 연소현상을 모사하기 위해 정적연소실(constant volume combustion chamber)에서의 화염전파과정, 가시화 및 라디칼계측 등의 많은 연구가 수행되었으나^{6,7)} 혼합기의 연소특성을 규명하기 위한 연소배출가스에 관한 관찰은 이루어지지 못하였다. 본 연구에서는 연소실내의 연소특성을 규명하기 위해 정적연소실을 제작하고 메탄-공기 혼합기를 공급하여 혼합기의 당량비(equivalence ratio) 및 초기압력(initial pressure)에 따른 연소압력 및 질소산화물(NOx)을 비롯한 일산화탄소, 이산화탄소, 산소, 질소 등의 배기가스를 측정하여 연소특성에 관한 상관관계를 비교·검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 계통도를 나타낸 것이다. 실험장치는 정적연소실, 메탄-공기 예혼합탱크, 점화장치, 압력측정장치, 배기가스 계측장치 등으로 구성된다. 본 실험에 사용된 정적연소실(constant volume combustion chamber)의 주요 제원은 Table. 1과 같다. 연소실의 전후면에는 ICCD에 의한 가시화 및 연소라디칼의 계측을 위해 직경 99mm, 두께 20mm

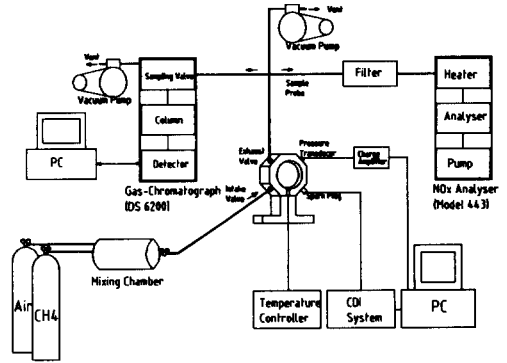


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of constant volume combustion chamber

Diameter(ID)	55mm
Width	45mm
Volume	107cm ³
Window	Fused Silica φ 99×t20 mm
Material	Duralumin

의 FS(Fused silica) 창을 설치하였고 FS창과 연소기 사이에 기밀유지를 위해 테프론을 삽입하였다. 정적연소기의 외측에는 점화플러그, 압력변환기, 흡배기 포트, 카트리지 히터, 열전대를 설치하였다. 점화플러그는 시판되는 자동차용 점화플러그를 사용하였고 연소실 압력측정을 위하여 압전형 압력변환기(6061B, Kistler)를 장착하였다. 압전형 압력변환기에서 발생한 전압은 증폭기(5051, Kistler)를 지나 DAQ보드(PCI-MIO-16E-1, National Instruments)를 통해 컴퓨터에 저장된다. 흡기포트 부분은 연소실벽에 접선방향으로 설치하여 유입시 혼합기의 스윙유동을 유도하였다. 배기포트 부분은 점화플러그의 맞은 편에 샘플링 프루브를 설치하여 질소산화물 분석기와 가스크로마토그래피와 연결하

였다. 연소기내의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 100W 용량의 카트리지 히터 3개를 연소기 외측에 설치하였고 연소기의 온도는 연소기 내벽면으로부터 5mm 떨어진 위치에 K-type 열전대($\phi=1.6\text{mm}$)를 삽입하여 자동온도조절장치를 이용하여 일정하게 유지시켰다. 점화장치는 100k Ω 의 가변저항을 통하여 4 μF 용량의 축전기에 전압을 220V로 충전하여 SCR 게이트펄스(gate pulse)가 가해지면 점화코일의 1차코일을 통해 방전이 이루어지도록 제작하였다. 연소배기가스 농도를 측정하기 위하여 배기포트에 샘플링 프로브(sampling probe)를 설치하여 NO_x분석기(NO_x analyser model443, Rotork Analysis)와 Gas-Chromatograph (DS6200, Donam)를 연결하였다.본 실험에서 질소산화물(NO_x)의 농도측정은 NO_x분석기로, 질소산화물 이외(CO, CO₂, O₂, N₂)의 배기가스 농도측정은 Gas-Chromatograph로 분석하였다. NO_x분석기는 화학발광법(chemiluminescent detector)에 의해 분석되며 zero가스로는 고순도 질소(N₂)를 span가스로는 NO를 사용하여 교정하였다. Gas-Chromatograph는 헬륨(He)을 운반기체로 기체 시료 채취밸브를 장착하여 일정량의 기체를 주입할 수 있도록 하였고, 분리관은 MS-5A와 Hayesep D를 사용하였으며 검출법은 열전도검출법(TCD)을 사용하였다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용한 연료는 메탄으로 순도 99.995%이고 산화제로는 질소 79% 산소 21%로 혼합되어진 고순도 공기를 사용하였다. 연료와 공기는 각각의 압력조정기(regulator)를 거쳐 예혼합탱크에 충전하였다. 예혼합탱크는 균질의 연료-공기에 대한 정확한 혼합비를 얻는 것이 주된 목적이며 연료와 공기의 당량비는 압력용기에 각 기체의 분압을 기초로 하여 결정되어진다. 진공펌프를 사용하여 예혼합탱크를 진공상태로 유지한 후 디지털 압력센서를 사용하여 정확한 양의

연료와 공기를 충전하였다. 정적연소실의 잔류가스를 진공펌프로 완전히 제거한 후 초기압력과 당량비에 의해 전용압력조정기를 거쳐 흡기포트를 통해 정적연소실(constant volume combustion chamber)로 주입된다. 정적연소실에 공급되는 혼합기의 초기압력(initial pressure of mixture)은 0.1~0.8MPa 까지 0.1MPa 간격으로 변화시켰고 초기온도는 373.15K로 일정하게 하였다. 본 실험에서는 메탄 공기혼합기의 가연범위($\phi=0.46\sim 1.64$)중, 혼합기의 당량비를 $\phi=0.6\sim 1.3$ 까지 0.1 간격으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 연소 최고압력 및 배출가스인 일산화탄소, 이산화탄소, 산소, 질소, 질소산화물의 농도를 측정하였다. 각 배출가스의 농도는 측정의 실험적 오차를 줄이기 위해 각 2회의 측정값을 평균하여 대표적 값으로 나타내었다.

3. 실험결과 및 토의

메탄-공기 예혼합기의 당량비(equivalence ratio, $\phi=0.6\sim 1.3$), 초기압력(initial pressure, 0.1~0.8MPa)를 변화시키면서 연소압력과 배기가스를 측정하였다.

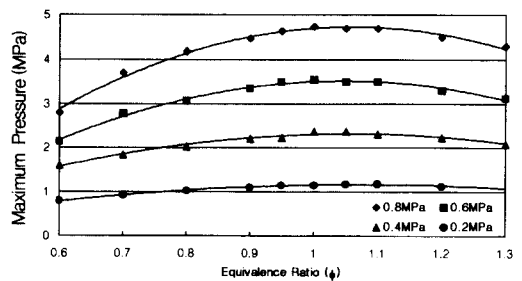


Fig. 2 Maximum combustion pressure with initial pressure of mixture

Fig. 2는 메탄-공기 혼합기의 초기압력(0.2, 0.4, 0.6, 0.8MPa)을 변수로 하여 당량비($\phi=0.6\sim 1.3$)에 대한 연소 최고압력을 나타낸 것이다. 연소 최고압력이 이혼합비 부근인 $\phi=1.05$ 부

근에서 가장 높고 희박혼합기인 $\phi = 0.6$ 에서 가장 낮게 나타내고 있다. 또한 초기혼합기의 압력이 증가할수록 연소 최고압력이 선형적으로 증가하고 있다.

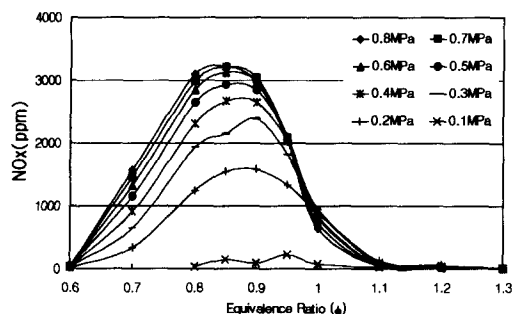


Fig. 3 NO_x concentration with initial pressure of mixture

Fig. 3은 메탄-공기 혼합기의 초기압력(0.1~0.8MPa)을 변수로 하여 당량비($\phi = 0.6 \sim 1.3$)에 대한 질소산화물(NO_x)의 발생농도를 나타낸 것이다. 질소산화물의 발생농도가 희박당량비인 $\phi = 0.6$ 에서 꾸준히 증가하여 $\phi = 0.85 \sim 0.9$ 에서 최대를 가지며 $\phi = 0.9$ 를 지나면서 급격히 감소하고 있다. 이는 NO_x발생기구의 주요한 요인이 화염 온도이지만 화염온도가 최고인 이론당량비 부근에서는 연소후에는 산소를 소비하고 거의 없으므로 NO_x 농도가 최고가 되지 못한다. 결국 NO_x 발생이 고온과 더불어 산소의 농도에도 비례하므로 약간 희박한 당량비에서 NO_x발생이 최대가 되는 것으로 생각된다.

또한 Fig. 3에서 보면 질소산화물의 최대값을 가지는 영역이 초기압력이 0.1MPa에서는 $\phi = 0.95$ 이며 초기압력이 0.2~0.4MPa에서는 $\phi = 0.9$ 근방이다. 이보다 높은 초기압력에서는 $\phi = 0.85$ 근방에서 가장 높게 나타나고 있어, 혼합기의 초기압력이 증가할수록 NO_x 발생의 최고점이 연료희박영역으로 점차 이동되어 짐을 볼 수 있다. 이는 post-flame NO 농도를 잘 예측하고 있는 GMK-DB^{8,9)}의 계산에서 예측되어진 바 있

다. 이것은 최대[CH]농도가 희박영역으로 이동되어지는데 기인한다. 당량비와 초기압력의 변화에 따라 CH₂와 OH로부터 CH생성율이 변화하게 되는 것이다.¹⁰⁾ 이것은 주로 CH₂+OH \leftrightarrow CH+H₂O 반응에 의해서이다. 이 반응은 초기압력이 증가함에 따라 희박영역에서 CH생성을 촉진한다. 즉 최대 CH생성영역에서 CH₂+OH \rightarrow CH+H₂O(forward)이 지배적이다. 일반적으로 CH는 CH₂와 OH, O, H등과 반응하여 발생한다(CH₂+H \leftrightarrow CH+H₂, CH₂+O \leftrightarrow CH+OH, CH₂+OH \leftrightarrow CH+H₂O). 압력이 증가함에 따라 희박당량비 조건에서 CH₂로부터 CH의 생성이 더욱 효율적이 되는 것이다. 이것은 주로 CH₂+OH \leftrightarrow CH+H₂O반응의 증가에 기인하는 것이다. 또한 압력이 증가함에 따라 농후화염에서 [OH]가 감소하는 것처럼 [O]와 [H]도 일정하게 감소한다. 그러나 [OH]는 연료의 종류에 따라 이론당량비 부근 혹은 약간 희박영역에서 압력의 증가에 따라 급격히 감소하지는 않는다. 결국 압력이 증가함에 따라 최대 NO_x농도는 희박영역으로 이동하게 되고, 이것은 고압조건하의 탄화수소계 연소로부터 발생하는 NO_x의 기초적 생성기구로 생각되어진다. 한편 본 논문은 CH와 OH라디칼 등과 같은 연소중간생성물의 계측에 의해 보충토의가 가능하게 될 것이다.

NO_x발생기구가 화염온도와 풍부한 질소, 산소량이며¹¹⁾ 혼합기의 증가된 압력으로 인해 화염 온도의 상승을 일으켜 화학반응속도가 증가하고 있어 분자운동이 활발하고 질소, 산소량이 풍부한 희박혼합기 영역에서 NO_x 발생이 증가하는 것으로 생각된다. Kim⁵⁾의 연구에서 보았듯이 부분적 예혼합화염의 연소에서의 NO_x emission index가 $\phi_c = 1.0$ 에서 1.3으로 감에 따라 급격히 증가한 후 다시 급격히 감소하여 $\phi_c = 2.2$ 에서 최소값을 가짐을 나타내고 있다. $\phi_c = 1.3$ 에서의 NO_x emission index는 높은 온도로 인해 thermal NO가 촉진되고 있으며 $\phi_c > 2.2$ 에서는 residence time 증가로 인해 prompt NO가 진되고 있음을 보이고 있다. 버너연소의 결과를

압력이 높은 정적연소실과 비교하면 메탄-공기 혼합기에서는 압력특성과 연소온도로 인해 약간 희박혼합비 부근에서 NO_x생성이 촉진되고 있지만 NO_x 생성 특성이 버너의 Thermal NO_x 생성특성과 정성적으로 유사한 것으로 생각된다.

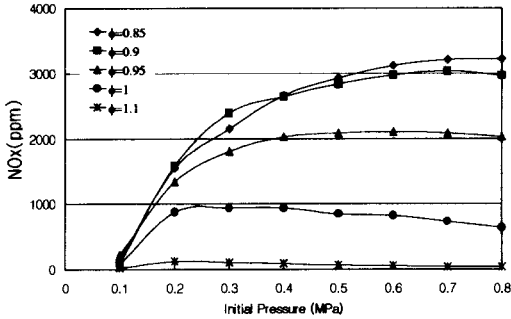


Fig. 4 NO_x concentration with initial pressure of mixture

Fig. 4는 Fig. 3에서 측정된 메탄-공기 혼합기의 당량비($\phi=0.85\sim 1.1$)를 변수로 하여 초기압력(0.1~0.8MPa)에 대한 질소산화물의 발생농도를 나타낸 것이다. 초기압력에 따라 NO_x발생이 당량비 $\phi=0.85\sim 0.9$ 에서 높게 나타나고 있다. 희박당량비 영역($\phi=0.85, 0.9, 0.95$)에서는 혼합기의 초기압력 0.4MPa근방까지는 NO_x발생이 급격히 증가하고 있으며 그 이후는 서서히 증가하고 있다. 이는 희박당량비 영역에서는 초기압력의 증가가 혼합기의 온도증가를 일으키고 이에 따른 연소온도의 증가로 인해 질소산화물의 증가를 야기시키는 것으로 생각된다. 그러나 $\phi=1.0$ 및 $\phi=1.1$ 영역에서는 혼합기의 초기압력 0.2MPa까지만 NO_x 발생이 증가하고 초기압력이 더 증가할수록 오히려 NO_x발생 농도가 감소하고 있다. 비록 이론당량비 및 농후당량비 영역에서는 초기압력에 의해 화염온도의 상승을 가져오지만 압력상승으로 인해 정적연소실내의 기연 부분에서 미연부분으로 급속한 열전달이 일어나 기연부분의 온도를 감소시킴으로써¹²⁾ 연소온도의 저감을 가져와 질소산화물의 감소를 가져오는 것

으로 생각된다. 한편 Fig. 7에서 보는 바와 같이 $\phi=1.0\sim 1.2$ 영역에서는 산소가 거의 존재하고 있지 않는 영향도 NO_x발생과 연관되어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 메탄-공기 혼합기의 초기압력(0.2, 0.4, 0.6, 0.8MPa)을 변수로 하여 당량비($\phi=0.6\sim 1.3$)에 대한 이산화탄소의 발생농도를 나타낸

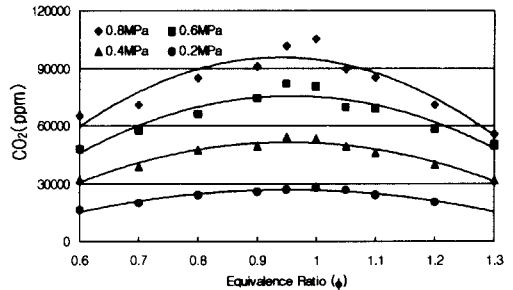


Fig. 5 CO₂ concentration with initial pressure of mixture

것이다. CO₂의 발생농도가 희박당량비인 $\phi=0.6$ 에서 서서히 증가하여 $\phi=0.95\sim 1.0$ 에서 최대를 가지며 농후당량비에서 서서히 감소하고 있다. 이는 $\phi\approx 0.95$ 부근에서 완전연소가 일어나고 있음을 보여주고 있다. 한편 초기압력에 따른 CO₂의 발생농도는 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

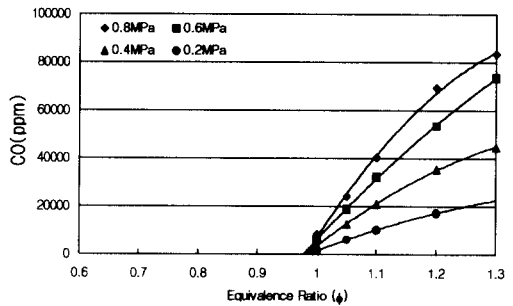


Fig. 6 CO concentration with initial pressure of mixture

Fig. 6은 메탄-공기 혼합기의 초기압력(0.2,

0.4, 0.6, 0.8MPa)을 변수로 하여 당량비($\phi=0.6 \sim 1.3$)에 대한 일산화탄소의 발생농도를 나타낸 것이다. CO의 발생농도는 희박당량비 영역에서는 거의 생성이 이루어지지 않고 있으며 이론당량비인 $\phi=1.0$ 에서부터 급격히 증가하고 있다. $\phi=1.0$ 에서는 발생농도가 몇 ppm 수준이지만 $\phi=1.3$ 에서는 %수준으로 높게 나타나고 있다. 이는 희박혼합기에서는 충분한 산소가 포함되어 있지만 농후혼합기는 연료의 모든 탄소를 CO₂로 완전히 연소시키는 데 요하는 충분한 산소가 부족하여 불완전연소로 되어 CO의 발생농도가 증가하는 것으로 생각된다.

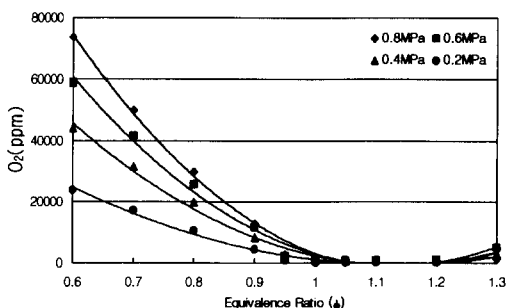
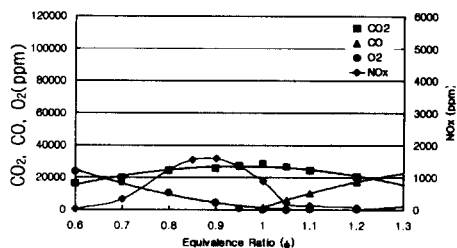


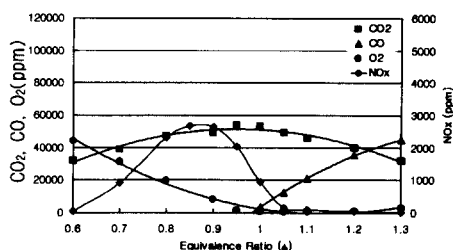
Fig. 7 O₂ concentration with initial pressure of mixture

Fig. 7은 메탄-공기 혼합기의 초기압력(0.2, 0.4, 0.6, 0.8MPa)을 변수로 하여 당량비($\phi=0.6 \sim 1.3$)에 대한 산소의 발생농도를 나타낸 것이다. O₂의 발생농도가 희박당량비인 $\phi=0.6$ 에서 최대를 가지며 서서히 감소하여 이론당량비인 $\phi=1.0$ 을 지나면서 최소를 가진 후 농후당량비 $\phi > 1.2$ 에서 서서히 증가하고 있다. 희박당량비에서는 충분한 산소량으로 인해 연소반응후의 잔존 산소 발생농도가 크며, 농후당량비에서는 불완전 연소로 인해 이산화탄소의 열해리가 발생하여 일산화탄소의 농도뿐만 아니라 산소농도의 증가를 가져오는 것으로 생각된다.

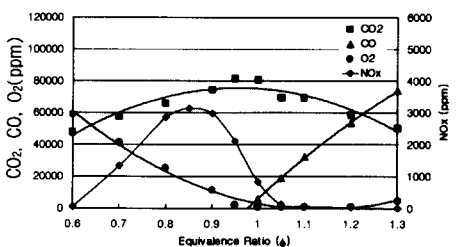
Fig. 8은 메탄-공기 혼합기의 초기압력(0.2,



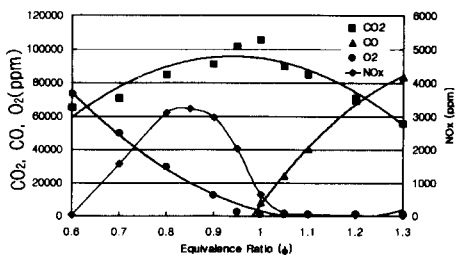
(a) 0.2MPa



(b) 0.4MPa



(c) 0.6MPa



(d) 0.8MPa

Fig. 8 NO_x, CO₂, CO, O₂ concentration with initial pressure of mixture

0.4, 0.6, 0.8MPa)일 때 당량비($\phi=0.6\sim 1.3$)에 대한 질소산화물, 이산화탄소, 일산화탄소, 산소의 발생농도를 나타낸 것이다. 초기압력변화에 따른 배출가스의 농도변화는 비슷한 유형을 보이고 있다. 희박당량비에서는 산소의 농도가 높으며 농후당량비에서는 일산화탄소의 농도가 높고 이산화탄소는 이론당량비에서 높음을 볼 수 있다. 질소산화물은 이론당량비보다 조금 희박한 영역에서는 증가되고 농후당량비에서는 감소되고 있다. 질소산화물과 일산화탄소의 상관관계에서는 초희박당량비($\phi < 0.6$)의 경우가 두 물질을 최소로 발생시키는 범위이지만 불완전연소로 인해 HC의 증가가 예상된다.

4. 결론

본 연구는 정적연소실에서 혼합기의 압력을 0.1~0.8MPa로 변화하면서 메탄-공기 예혼합기의 당량비 $\phi=0.6\sim 1.3$ 범위내에서 NO_x 및 CO, CO₂를 계측하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 질소산화물의 발생농도가 희박당량비인 $\phi=0.6$ 에서 꾸준히 증가하여 $\phi=0.85\sim 0.9$ 에서 최대를 가지며 $\phi=0.9$ 를 지나면서 급격히 감소하고 있다. NO_x발생이 고온과 더불어 산소의 농도에 비례하므로 약간 희박한 당량비에서 NO_x발생이 최대가 되는 것으로 생각된다. 최대 NO농도가 발생하는 당량비는 초기압력이 증가함에 따라 희박영역으로 이동되어지고 있다. 이는 희박영역에서의 압력증가에 따른 CH₂와 OH로 부터의 CH생성이 촉진되어 최대 NO_x의 농도가 희박영역으로 이동되어지고 있다.

2) 연소최고압력이 $\phi=1.0$ 부근에서 가장 높게 나타났으며 CO₂의 발생농도가 희박당량비인 $\phi=0.6$ 에서 서서히 증가하여 $\phi=0.95\sim 1.0$ 에서 최대를 나타내며 CO의 발생농도는 희박당량비 영역에서는 거의 생성이 이루어지지 않고 있으며 이론당량비인 $\phi=1.0$ 에서부터 급격히 증가하여

있다. 이는 $\phi \approx 0.95$ 부근에서 완전연소가 일어나고 있음을 보여주고 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다. 한편 정적연소실 제작을 도와주신 한국기계연구원의 오승묵 선임연구원께 감사드리며, GC를 사용한 배기가스 측정을 위해 협조해 주신 (주)도남인스트루먼트와 (주)나이스의 관계자분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) J. P. Gore and N. J. Zhan, "NO_x Emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-Flow Jet Flames," *Combust. Flame*, Vol. 105, pp.414-427, 1996.
- 2) J. F. Driscoll, R. H. Chen, and Y. Yoon, "Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames : Effects of Residence Time and Damkohler Number," *Combust. Flame*, Vol. 88, pp.37, 1992.
- 3) S. R. Turns, F. H. Myhr, R. V. Bandaru, and E. R. Maund, "Oxide of Nitrogen Emission from Turbulent Jet Flames : Part II - Fuel Dilution and Partial Premixing Effects," *Combust. Flame*, Vol. 95, pp. 255, 1993.
- 4) Nishioka, M., Nakagawa, S., Ishikawa, Y., and Takino, T., "NO Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame," *Combust. Flame*, Vol. 98, pp. 127, 1994.
- 5) Kim, T. K., Alder, B. J., Laurendeau, N. M., and Gore, J. P., "Exhaust and In-Situ Measurements of Nitric Oxide for Laminar Partially Premixed C₂H₆-Air Flames : Effect of Premixing Level at

- Constant Fuel Flowrate," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 110-111, pp. 361-378, 1995.
- 6) 전충환, 원통형 정적연소실내의 화염전파와 연소 라디칼 특성에 관한 연구, 부산대학교 박사학위논문, 1994.
 - 7) 김봉석, 이영재, "메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성(II)," 한국자동차공학회 논문집, 제4권, 제3호, pp. 156~167, 1996.
 - 8) Glarborg, P., Miller, J.A, and Kee, R.J., "Kinetic Modeling and Sensitivity Analysis of Nitrogen Oxide Formation in Well-Stirred Reactors," *Combust. Flame*, Vol. 65, pp. 177, 1986.
 - 9) Drake, M.C. and Blint, R.J., "Calculations of NOx Formation Path. Ways in Propagating Laminar, High Pressure Premixed CH₄/Air Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 75, pp. 261, 1991.
 - 10) Reisel, J.R., Laser-induced Fluorescence Measurements and Modeling of Nitric Oxide in High-Pressure Premixed Flames, Ph. D. Thesis, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, 1994.
 - 11) 이성렬, 내연기관, 보성각, pp. 247~262, 1994.
 - 12) 이호근, 정인석, "대향 분출염 연소방식의 NOx 저감기구에 관한 실험적 연구," 한국자동차공학회 춘계학술대회, pp. 146~151, 1996.