

## DME와 LPG 연료의 정적 예혼합 연소특성

김 태 권<sup>\*1)</sup> · 임 문 혁<sup>1)</sup> · 장 준 영<sup>2)</sup>

계명대학교 기계자동차공학부<sup>1)</sup> · 계명대학교 대학원 기계공학과<sup>2)</sup>

### Constant Volume Premixed Combustion Characteristics of Dimethyl Ether and LPG Fuel

Tae Kwon Kim<sup>\*1)</sup> · Moon Hyuk Im<sup>1)</sup> · Jun Young Jang<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Faculty of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

(Received 4 April 2003 / Accepted 31 July 2003)

**Abstract** : Measurements on the combustion characteristics of dimethyl ether(DME:CH<sub>3</sub>OCH<sub>3</sub>) as compared with LPG in constant volume combustion chamber have been conducted. The DME is a good alternative fuel having oxygen component in fuel. To elucidate the combustion characteristics of dimethyl ether as a fuel, the combustion pressures, combustion durations, and pollutants(NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CO) are measured with equivalence ratios( $\phi$ ), and initial pressures of fuel-air mixture. In the case of DME, the NO<sub>x</sub> concentration peaks in lean flame  $\phi = 0.85 \sim 0.9$ , and CO<sub>2</sub> concentration peaks at  $\phi = 1.1$ , while the CO concentration abruptly rises at the condition of fuel-rich mixtures.

**Key words** : Constant volume combustion chamber(정적연소실), Dimethyl ether(DME), Initial pressure of mixture(혼합기의 초기압력), Equivalence ratio(당량비)

### 1. 서론

자동차 배출가스로 인한 공해문제와 한정된 화석 연료 고갈로 인한 에너지문제에 대한 관심이 증대됨에 따라 저공해, 고효율, 대체연료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구로서 엔진내부의 연소실 형상 및 연소시스템의 최적화와 더불어 기존 석유계 연료를 대신할 새로운 연료에 대한 연구가 필수적이다. 특히 새로운 연료에 대한 연구는 대부분의 에너지를 수입하고 있는 우리나라로서는 화석연료의 소비량을 억제할 수 있고 매연, 이산화탄소, 미연탄화수소 등의 오염물질의 배출량을 현저하게 저감할 수 있는 친환경적인 관점에서 접근

되어야 한다. 최근 저공해연료로서의 가능성을 보여주는 연료로는 천연가스, LPG, 합산소연료, 바이오메스 연료 등이 있다. 이들 중 연료성분내 산소성분을 함유하고 있는 합산소연료는 연료와 공기의 산화과정을 촉진시켜줌으로써 연소개선에 도움을 주고 있으며 높은 열효율과 연비성능 향상을 위해 많은 연구들이 진행중이다. 이들로는 dimethyl ether(DME), dimethoxy methane(DMN), diethylene glycol, methyl tertiary butyl ether(MTBE) 등이 있다. 합산소연료 중 DME는 천연가스나 석탄으로부터의 생산이 가능해 국내 제조 및 생산비용이 비교적 저렴하고 세탄가가 디젤보다 높으며 입자상물질을 저감시킬 수 있어 차세대 대체연료로 각광받을 것으로 기대된다. 하지만 대체연료로서 DME 연료를 사용하

<sup>\*</sup>To whom correspondence should be addressed.  
tkkim@kmu.ac.kr

기 위해서는 현재 연소특성에 관한 연구가 많이 이루어지고 있지만<sup>1~3)</sup> 아직 충분하지 않으며 실용화 단계에 적용하기까지 해결해야 할 문제점이 있다. 우선 DME의 연소속도, 연소기간, 유해생성물, 희박 연소한계 등 연소특성에 대한 파악이 필수적이다. 연료공기 혼합특성, 화염특성, 유해배출물 발생기구 등의 연소상황에 맞는 현상의 검증을 통해 실제 엔진에서의 사용이 필요하다. 특히, DME의 사용으로 입자상물질은 저감되지만, 증대될 수 있는 질소산화물의 저감을 위해 질소산화물의 생성과정과 배출실태를 정확히 측정하고 근본적인 저감법에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 합산소연료인 DME의 연소특성을 규명하기 위하여 DME연료와 LPG연료를 각각 이용하여 연소실과 변수를 단순화시킨 정적연소실에서 혼합기의 당량비 및 초기압력에 따라 연소압력, 연소기간, 유해배출물을 측정하여 비교 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치는 정적연소실, 연료-공기 예혼합탱크, 점화장치, 압력측정장치, 배기가스 계측장치 등으로 구성된다.

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 계통도를 나타낸 것이다. 연소실의 전후면에는 ICCD 카메라에 의한 가시화 및 연소 라디칼의 계측을 위해 FS창(Fused silica, 직경 99mm, 유효직경 55mm, 두께 20mm)을 설치하였고 FS창과 연소기 사이에 기밀유지를 위해 테프론을 삽입하였다. 정적연소실의 외측에는 점화플러그, 압력변환기, 흡배기 포트, 카트리지 히터, 열전대를 설치하였다. 점화플러그는 시판되는 자동차용 점화플러그를 사용하였고 점화장치는 100k $\Omega$ 의 가변저항을 통하여 4 $\mu$ f 용량의 축전기에 전압을 220V로 충전하여 SCR 게이트펄스(gate-pulse)가 가해지면 점화코일의 1차코일을 통해 방전이 이루어지도록 제작하였다. 연소실 압력측정을 위하여 압전형 압력변환기(6061B, Kistler)를 장착하였으며 압전형 압력변환기에서 발생한 전압은 증폭기(5051, Kistler)를 지나 DAQ보드(PCI-MIO-16E-1,

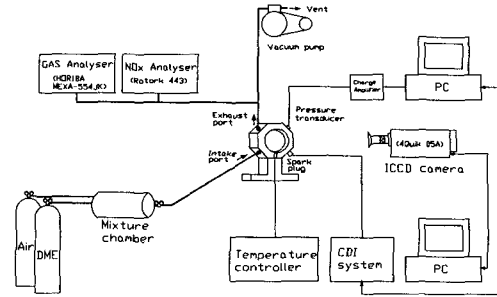


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

National Instruments)를 통해 컴퓨터에 저장된다. 흡기포트는 연소실벽에 접선방향으로 설치하여 유입시 혼합기의 스윙유동을 유도하였다. 배기포트는 점화플러그의 맞은 편에 샘플링 프로브(sampling probe)를 설치하여 질소산화물 분석기(Rotork, model443)와 가스분석기(Horiba, MEXA-554JK)와 연결하였다. 연소기내의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 100W 용량의 카트리지 히터 3개를 연소기 외측에 설치하였고 연소기의 온도는 연소기 내벽면으로부터 5mm 떨어진 위치에 K-type 열전대( $\phi=1.6$ mm)를 삽입하여 자동온도조절장치를 이용하여 373K로 일정하게 유지시켰다.

### 2.2 실험방법

본 실험에 사용한 연료로는 DME( $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ )와 상용 LPG이며, 산화제로는 질소 79% 산소 21%로 혼합되어진 고순도 공기(순도 99.99%)를 사용하였다. 연료와 공기는 각각의 압력조정기(regulator)를 거쳐 각 기체의 분압을 기초로 하여 결정되어진 당량비( $\phi$ )로 예혼합탱크에 충전하였다. 정적연소실의 잔류가스를 진공펌프로 완전히 제거한 후 초기압력(initial pressure of mixture)과 당량비(equivalence ratio)에 의해 전용압력조정기를 거쳐 흡기포트를 통해 정적연소실로 주입된다. 정적연소실에 공급되는 혼합기의 초기압력은 0.1~0.8MPa 까지 0.1MPa 간격으로 변화시켰고 본 실험에서는 연료 공기혼합기의 당량비를  $\phi=0.6\sim 1.4$ 까지 0.1 간격으로 변화시키면서 실험을 수행하였으나 당량비  $\phi = 0.6$ 에서는 점화에 의한 연소가 일어나지 않았다. 농도 및 압력 측정은 동일조건에서 5회 이상 실험을 행하고 평균치를 나타내었다. 유해배출가스인 NOx 농도는 화

학발광법에 의해, CO, CO<sub>2</sub> 농도는 비분산적외선법에 의해 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 토의

정적연소실에 공급되는 예혼합기(DME-Air, LPG-Air)의 당량비(equivalence ratio,  $\phi = 0.6 \sim 1.4$ ), 초기압력(0.1~0.8MPa)을 변화시키면서 연소압력과 유해배출물을 측정하였다.

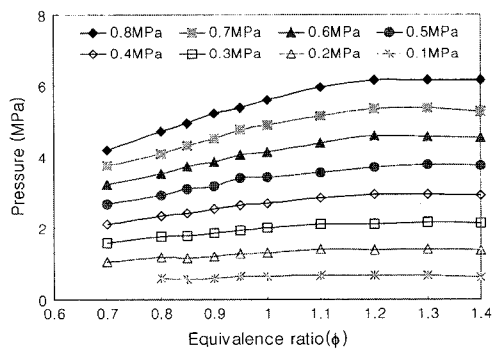
Fig. 2는 예혼합기의 초기압력을 변수로 하여 당량비에 대한 연소최고압력을 나타낸 것이다.

Fig. 2(a)의 DME의 경우 연소최고압력이 희박당량비에서 증가하여 이론당량비를 약간 지나 당량비  $\phi = 1.2, 1.3$ 부근에서 가장 높게 나타나고 있고 Fig. 2(b)의 LPG의 경우 연소최고압력이 희박당량비에서 증가하여 당량비  $\phi = 1.1, 1.2$  부근에서 가장 높게 나타나고 있다. 두 연료 모두 혼합기의 초기압력이 증가하면서 연소최고압력이 선형적으로 증가하고

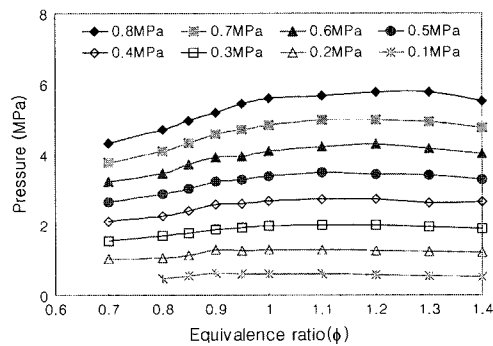
있으며 연소최고압력은 DME가 LPG보다 약간 높게 나타나고 있다.

Fig. 3은 예혼합기의 초기압력(0.1~0.8MPa)을 변수로 하여 당량비( $\phi = 0.6 \sim 1.4$ )에 대한 연소압력의 변화에 따른 최고압력 도달시간을 나타낸 것이다. 최고연소압력이 도달한 때를 100% 연소한 것으로 보았다. 각각의 연료의 경우에서 보면, 연소최고압력이 최대인 당량비에서 최고압력에 도달되는 시간이 가장 짧으며 희박당량비와 농후당량비 측으로 갈수록 길어지고 있다. 희박당량비에서는 혼합기의 초기압력에 따른 최고압력 도달시간이 선형적으로 증가하고 있으며 농후당량비에서는 거의 비슷하게 나타나고 있다. 또한 DME가 LPG보다 최고압력 도달시간이 희박당량비영역에서는 길지만 농후당량비에서는 짧아지고 있다.

Fig. 4는 예혼합기의 초기압력(0.1~0.8MPa)을 변수로 하여 당량비( $\phi = 0.6 \sim 1.4$ )에 대한 질소산화물

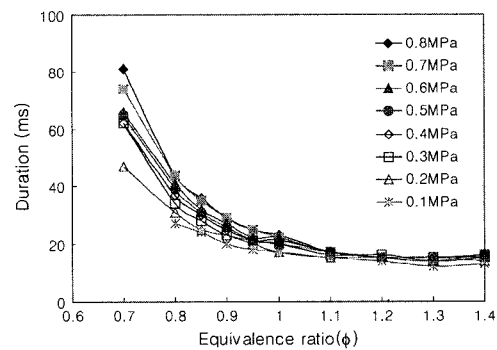


(a) DME

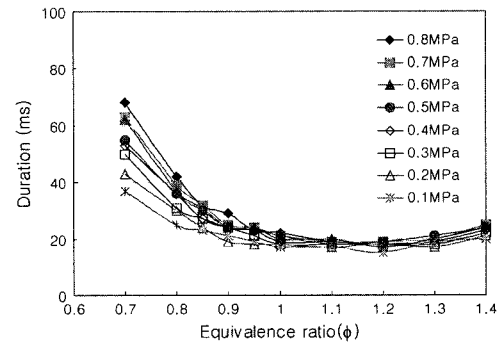


(b) LPG

Fig. 2 Maximum combustion pressure with initial pressure of mixture

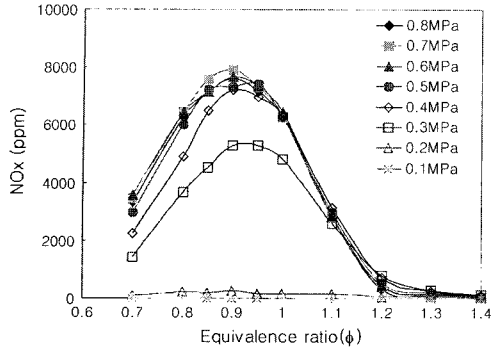


(a) DME

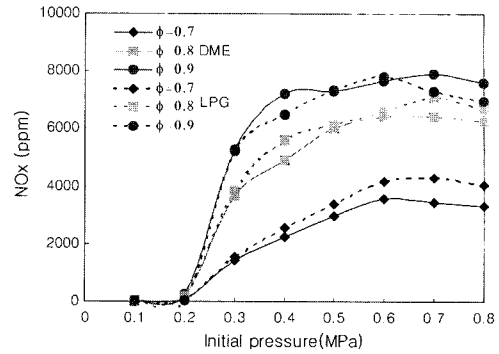


(b) LPG

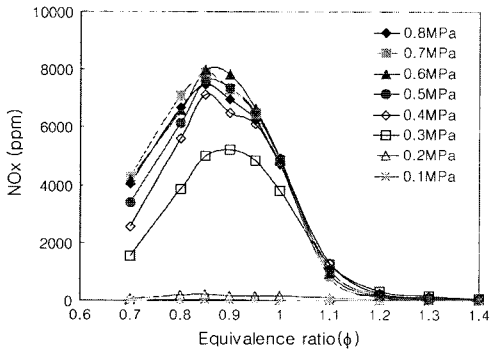
Fig. 3 Combustion duration with initial pressure of mixture



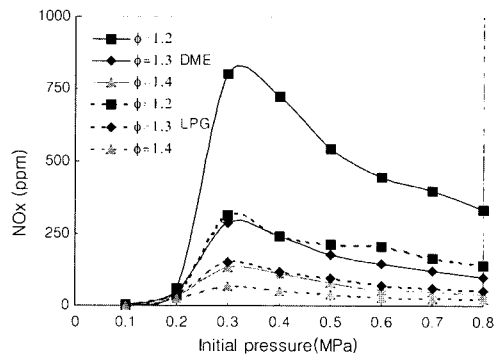
(a) DME



(a) Lean premixture



(b) LPG



(b) Rich premixture

Fig. 4 NOx concentration with initial pressure of mixture

Fig. 5 NOx concentration with equivalence ratio

(NOx)의 발생농도를 나타낸 것이다. Fig. 4(a) DME의 경우 NOx 발생농도가 희박당량비  $\phi = 0.7$ 에서 꾸준히 증가하여  $\phi = 0.9$ 에서 최대를 가지며 이론당량비를 지나면서 급격히 감소하고 있다. Fig. 4(b) LPG의 경우 NOx 발생농도는  $\phi = 0.85$ 에서 최대를 가진 후 감소하고 있다. 이는 NOx 발생기구의 주요한 요인이 화염온도와 산소이며 화염온도가 최고인 이론당량비 부근에서는 연소과정에 산소를 소비하고 거의 없으므로 NOx 농도가 최고가 되지 못한다. 결국 NOx 발생이 고온과 더불어 산소의 농도에도 비례하므로 약간 희박한 당량비에서 NOx 발생이 최대가 되는 것으로 생각된다. 그림에서 보면 혼합기의 초기압력이 증가할수록 최대 NOx 발생의 최고점이 점차 연료희박영역으로 점차 이동되어짐을 볼 수 있다. 이는 앞선 선행연구<sup>6)</sup>에서 예측되어진 것으로 최대[CH]농도가 희박영역으로 이동되어지는 것으로 생각된다.<sup>4,5)</sup> 초기압력이 증가함에 따라 희박영역에서 CH생성을 촉진시킴으로서 이와 밀

접한 관계가 있는 NOx의 생성을 증가시키는 것으로 생각된다. DME가 함산소연료이기에 NOx 발생이 증가할 것으로 예상되었으나 발열량이 낮아서 LPG의 NOx 발생농도와 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 생각된다.

Fig. 5는 Fig.4의 예혼합기의 초기압력(0.1~0.8 MPa)대한 질소산화물의 발생농도를 나타낸 것으로 Fig. 5(a)의 희박당량비영역에서는 초기압력증가에 따라 NOx 발생농도가 증가하지만 Fig. 5(b)의 농후당량비영역에서는 초기압력증가에 따라 감소되어지고 있다. 이는 산소가 풍부한 영역인 희박당량비에서는 초기압력증가에 따른 화염온도의 증가로 NOx 발생농도가 증가하며, 농후당량비에서는 화염온도에 민감하지 않으며 초기압력증가에 따라 분해속도에 영향을 미쳐 NOx 발생이 감소되는 것으로 생각된다.<sup>7)</sup>

Fig. 6은 예혼합기의 초기압력(0.1~0.8MPa)을 변수로 하여 당량비( $\phi = 0.6 \sim 1.4$ )에 대한 일산화탄소

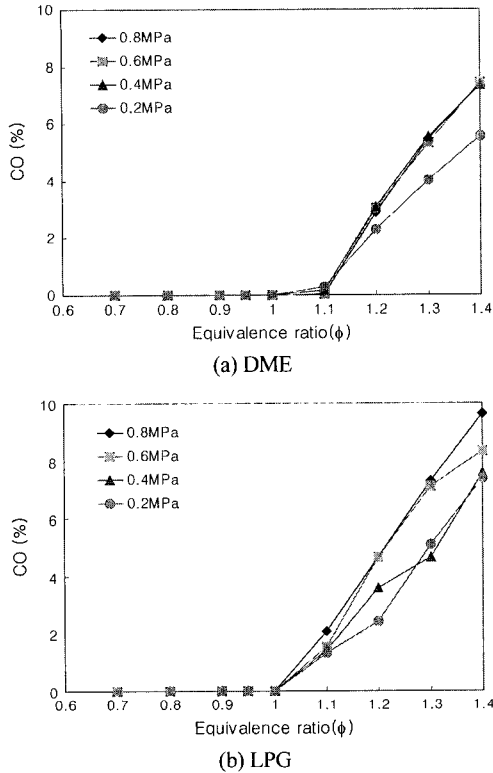


Fig. 6 CO concentration with initial pressure of mixture

(CO)의 발생농도를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)의 DME의 경우 CO의 발생농도는 희박당량비 영역에서는 거의 생성이 이루어지지 않고 있으며  $\phi = 1.1$ 에서부터 급격히 증가하고 있다. Fig. 6(b)의 LPG의 경우  $\phi = 1.0$ 에서부터 급격히 증가하고 있다. 희박당량비에서는 충분한 산소가 포함되어 있지만 농후당량비는 연료의 모든 탄소를  $\text{CO}_2$ 로 완전히 연소시키는 데 필요한 충분한 산소가 부족하여 불완전연소로 되어 CO의 발생농도가 증가하는 것으로 생각된다. 두 연료를 CO의 발생농도에 따라 비교해 보면 농후당량비에서 LPG의 경우가 더 높게 나타나고 있다.

Fig. 7은 예혼합기의 초기압력(0.1~0.8MPa)을 변수로 하여 당량비( $\phi = 0.6 \sim 1.4$ )에 대한 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )의 발생농도를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)의 DME의 경우  $\text{CO}_2$ 의 발생농도가 희박당량비인  $\phi = 0.7$ 에서 서서히 증가하여  $\phi = 1.1$ 에서 최대를 가지며 농후당량비에서 서서히 감소하고 있다. Fig 7(b)의 LPG의 경우  $\phi \approx 1.0$ 부근에서 최대가 나타나고 있

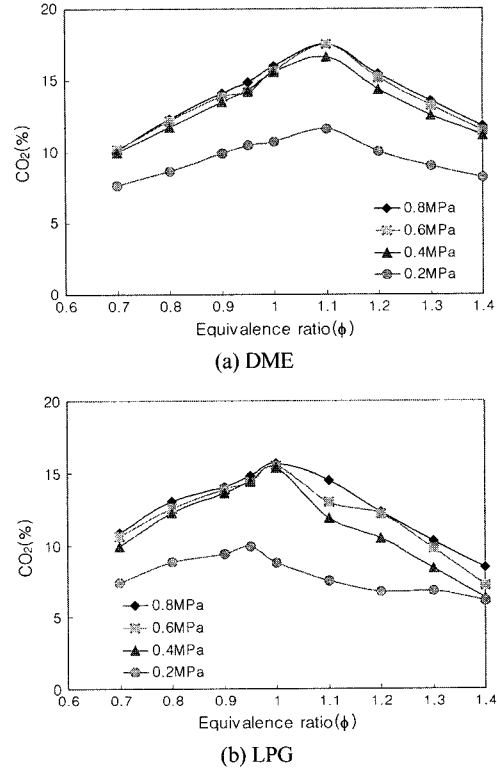


Fig. 7  $\text{CO}_2$  concentration with initial pressure of mixture

다. 두 연료를 비교해보면 이론당량비부근에서 최대  $\text{CO}_2$ 발생농도가 DME가 높게 나타나고 있다. 또한 농후당량비부근에서도  $\text{CO}_2$ 의 농도를 비교해 보면 DME의 경우가 높게 나타나고 있다. 이는 CO의 발생농도와 비교할 때 서로 상관성을 보여주고 있다. 이는 DME연료에 포함된 산소성분으로 인해 CO의 농도를 감소시키는 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구는 합산소연료인 DME의 연소특성을 규명하기 위하여 DME연료와 LPG연료를 각각 이용하여 정적연소실 내에서 혼합기의 당량비 및 초기압력에 따라 연소압력, 연소기간, 유해배출물을 측정하였으며 결론은 다음과 같다.

1) DME연료의 경우 연소최고압력이 희박당량비에서 증가하여 당량비  $\phi = 1.2, 1.3$  부근에서 가장 높게 나타나고 있으며 LPG보다 약간 높게 나타나고 있다.

2) DME 연료의 경우 질소산화물의 발생농도가 희박당량비인  $\phi = 0.7$ 에서 꾸준히 증가하여  $\phi = 0.8$  ~  $0.9$ 에서 최대를 가지며 이론당량비를 지나면서 감소하고 있다. 또한 DME가 합산소연료이기에 NOx 발생이 증가할 것으로 예상되었으나 발열량이 낮아서 LPG의 NOx 발생농도와 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 생각된다.

3) DME 연료의 경우 CO<sub>2</sub>의 발생농도가  $\phi = 1.1$ 에서 최대를 나타내며 CO의 발생농도는  $\phi = 1.1$ 에서부터 급격히 증가하고 있다. CO의 발생농도는 LPG의 경우가 더 높게 나타났으며 CO<sub>2</sub>의 발생농도는 DME의 경우가 더 높게 나타났다. 이는 DME연료에 포함된 산소성분으로 인해 CO의 농도를 감소시키는 것으로 생각된다.

## 후 기

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

## References

- 1) Z. Chen, Shuichi, "Engine Performance and Exhaust Gas Characteristics of a Compression Ignition Engine Operated with DME Blended Gas Oil Fuel," SAE 982538, 1998.
- 2) S. Kajitani, Z. L. Chen, M. Konno, K. T. Rhee, "Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct-Injection Diesel Engine Operated with DME," SAE 972973, 1997.
- 3) Y. D. Pyo, G. C. Kim, Y. J. Lee, M. H. Kim, "A Study on Performance and Exhaust Emissions of DI Diesel Engine Operated with Neat DME and DME Blended Fuels," Transactions of KSAE, Vol.11, No.2, pp.75-82, 2003.
- 4) P. Glarborg, J. A. Miller, R. J. Kee, "Kinetic Modeling and Sensitivity Analysis of Nitrogen Oxide Formation in Well-Stirred Reactors," Combust. Flame, Vol.65, p.177, 1986.
- 5) M. C. Drake, R. J. Blint, "Calculations of NOx Formation Path Ways in Propagating Laminar, High Pressure Premixed CH<sub>4</sub>/Air Flames," Combust. Sci. and Tech., Vol.75, p.261, 1991.
- 6) T. K. Kim, S. H. Kim, J. Y. Jang, "CO, CO<sub>2</sub>, and NOx Emission Characteristics of Methane-Air Premixed Flame in Constant Volume Combustion Chamber," Transactions of KSAE, Vol.8, No.2, pp.19-26, 2000.
- 7) B. S. Kim, C. H. Kwon, "Combustion Characteristics of Methane-Air Pre-mixtures in a Closed Vessel ( I )," Energy Engg. J., Vol.3, No.2, pp.193-200, 1994.