



## HCCI 기관에 있어서의 총상 흡기를 통한 압력 상승률 저감에 대한 단위반응 수치 해석

임옥택\*

\*울산대학교 기계자동차공학부

(2009년 5월 6일 접수, 2009년 12월 24일 수정, 2009년 12월 28일 채택)

### Potential of Thermal Stratification and Partial Fuel Stratification for Reducing Pressure Rise Rate in HCCI Engines

\*Ock Taeck LIM

*\*School of Mechanical and Automotive Engineering, University of Ulsan, Mugeo2-dong, Nam-gu,  
Ulsan 680-749, Korea*

*(Received 6. May. 2009, Revised 24. December. 2009, Accepted 28. December. 2009)*

#### 요 약

본 연구의 목적은 온도 성층화와 농도 성층화의 효과가 HCCI 연소에서 압력상승률 저감과 배기가스에 어떤 영향을 미치는지 알아보는 것이다. 2단계 열발생이 생기는 디메틸에테르(Di-Methyl Ether, DME) 연료를 사용하였다. 수치계산은 멀티 존 모델과 상세 화학 반응 스킴을 이용하였다. 수치계산 결과, 온도 성층화와 농도 성층화는 연소기간을 길게 하여 압력상승률을 저감시키는 것을 확인하였다. 그러나 농도 성층화의 폭이 너무 커지면 오히려 일산화탄소와 질소산화물이 증가하였으며, 연소 효율은 감소하였다.

**Abstract** - The purpose of this study is to gain a better understanding of the effects of thermal stratification and partial fuel stratification on reducing the pressure-rise rate and emission in HCCI combustion. The engine is fueled with Di-Methyl Ether(DME) which has unique 2-stage heat release. Computational work is conducted with multi-zones model and detailed chemical reaction scheme. Calculation result shows that wider thermal stratification and partial fuel stratification prolong combustion duration and reduce pressure rise rate. But too wide partial fuel stratification increases CO and NOx concentration in exhaust gas, and decreases combustion efficiency.

**Key words** : engine performance, combustion, emission, numerical analysis, Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI), DME, pressure rise rate, CO, NOx

#### 1. 서 론

에너지 자원고갈 문제, 환경 문제 때문에 고효율, 저공해인 연소 기관으로서 예혼합 압축 자기 착화(Homogeneous Charge Compression Ignition:HCCI) 기관이 주목받고 있다. 기존의 Spark Ignition(이하, SI) 엔진이나, Compression Ignition(이하, CI) 엔진과는 달리 공기와 연료의 희박한 예혼합기를 연소실내에

투입하여 피스톤 압축에 의해 발화 온도까지 온도를 상승시켜, 연소실내의 여러 지점에서 동시에 자기 착화를 시키는 것이다. 희박하고 균질한 연소이기 때문에 NOx의 배출은 적다. 또 여러 지점에서 점화가 일어나면 연소기간이 짧아져 고효율이 된다. 그러나 연소의 가속화로 인해 급격한 열발생 및 실린더 내 가스 압력 상승에 의해 노킹이 발생하므로 출력이 제한되며 연소 위상의 제어, 연소 완결성의 확보가 문제로 남아있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 연소실내의 온도의

\*주저자:otlim@ulsan.ac.kr

성층화[1,2], 연료 농도의 성층화, 팽창 행정중의 온도 저하 효과를 이용한 압력 상승률을 감소시키는 방법, 혼합 연료 또는 내부 및 외부 Exhaust Gas Recirculation(이하, EGR)을 도입하여 연소 위상을 팽창 행정에서 제어하는 방법이 제안되고 있다.

본 연구에 사용된 연료는 2단의 열발생을 가지는 디메틸 에테르(Di-Methylether:DME)를 이용하고, 자세한 단위반응을 고려할 수 있는 멀티 존 모델을 구축하여 층상 흡기에 의해 생기는 연소실내 온도의 층상화와 연료 농도 층상화가 실린더 내 가스 압력 상승률 및 배기에 미치는 영향을 단위반응으로 수치 해석 하였다.

## II. 노킹과 연소실내 가스 압력 상승률의 관계

Fig. 1은 DME/공기 예혼합기를 이용해 당량비를 변화시켰을 때 HCCI 연소에서 실린더 내 가스 압력을 나타낸다. 당량비 0.355 때 노킹에 의한 압력 파형이 관측되었다. 이 때 실린더 내 가스 압력 상승률을

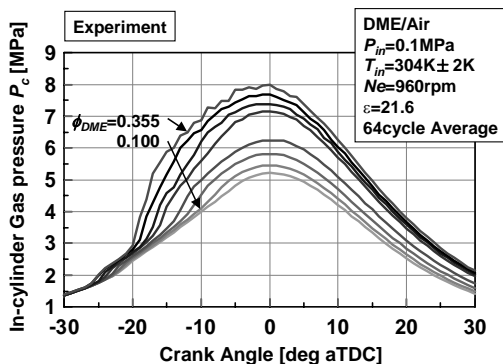


Fig. 1. The histories of in-cylinder gas pressure for various DME/air equivalence ratio.

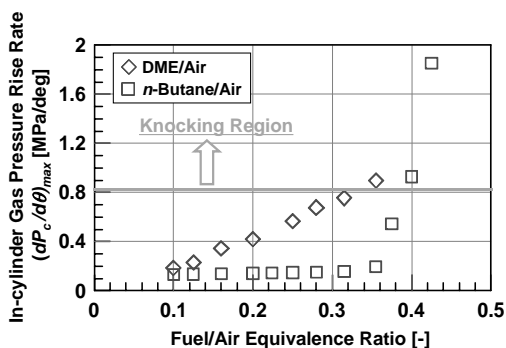


Fig. 2. In-cylinder gas pressure rise rate as a function of equivalence ratio.

n-Butane/공기 예혼합기를 이용했을 경우와 같이 Fig. 2에 나타낸다. X축은 당량비이다. Fig. 2에 나타내듯이, 연료의 종류에 관계없이 당량비를 증가시키에 따라 실린더 내 가스 압력 상승률은 증가하고 약 0.85 MPa/deg 넘으면 노킹이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 실린더 내 가스 압력 상승률을 저감시켜 노킹을 회피하는 방법으로 당량비를 증가시키는 방법이 있으며 보다 높은 출력을 얻을 수 있는 가능성이 있다.

실제의 연소실내에는 연료와 공기의 혼합, 연소실 벽면에서의 열손실, 고온의 잔류 가스, 피스톤에 의한 혼합기의 교반에 의해, 불균일한 온도분포, 불균일한 연료농도, 조성분포가 생긴다. 불균일한 온도 분포가 미치는 영향에 대해서 수치계산을 통해 연소실내의 온도가 균일하고 연료 농도가 균일한 조건과 온도의 분포를 갖게 한 조건을 비교했다. 그 결과 온도 범위를 설정함으로써 급격한 압력 상승을 피할 수 있음을 확인했다. 보다 큰 온도 범위를 설정하는 것이 연소 시간을 장기화하기 때문에 실린더 내 가스 압력 상승률이 저감되는 것을 수치계산을 통해 나타내 보였다.

## III. 실험연료

본 연구에서는 DME를 이용했다[3]. Table 1에 Methane, n-Butane 및 DME의 물성치를 나타냈다. 또

Table 1. Test fuels.

| Name                             | Methane        | Normal Butane     | Di-Methyl Ether    |
|----------------------------------|----------------|-------------------|--------------------|
| Molecular Structure              | <chem>C</chem> | <chem>CCCC</chem> | <chem>COCOC</chem> |
| Self Ignition Temperature [K]    | 905            | 678               | 623                |
| Molecular mass [g/mol]           | 16.049         | 58.123            | 46.069             |
| Lower heating value [MJ/kg]      | 48.3           | 45.6              | 28.8               |
| LTR                              | X              | O                 | O                  |
| Ratio of Heat Release in LTR [%] | 0              | 4-12              | 25-40              |

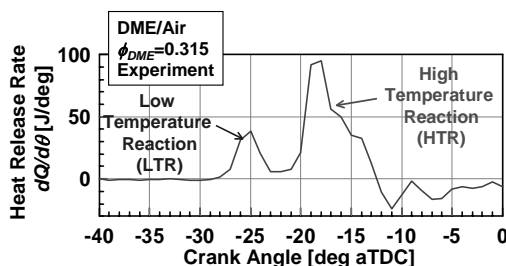


Fig. 3. Low temperature reaction and high temperature reaction in HCCI combustion using DME/Air mixture.

DME/공기 예혼합기를 HCCI 연소를 하였을 때에 얻을 수 있는 열발생을 그래프를 Fig. 3에 나타냈다. DME는 저온 산화 반응(Low Temperature Reaction : 이하 LTR) 및 고온산화반응(High Temperature Reaction : 이하 HTR)으로 불리는 2단의 열발생을 가지며 같은 LTR를 가지는 n-Butane과 비교해서 전체의 열발생에 있어 LTR 기간의 열발생의 비율이 큰 것으로 알려져 있다. DME 농도가 높은 만큼, LTR 기간의 열발생은 증가하는 것을 알 수 있다. 그 때문에 연소실 내에 DME 농도의 분포가 존재하면 국소에서의 LTR 기간의 발열량의 차이에 의해 HTR 발현 전에 온도 분포가 생긴다고 생각할 수 있다. 즉 DME를 사용하여 HCCI 연소를 실시했을 경우, 연소실내의 DME 농도 분포가 실린더 내 가스 압력 상승률의 저감에 기여하는 것으로 예상된다. 이것이 DME를 연료로서 선택한 이유이다.

#### IV. 단위반응 수치계산

##### 4.1. 계산방법

본 연구에 사용한 엔진 사양을 Table 2에 나타냈다. 계산 대상은 “흡입밸브가 닫힌 직후부터 배기 밸브가 열리기 직전까지의 1회의 압축, 팽창 행정 중에 닫힌 계의 가스”로 설정했다. 계산 코드로서 미국의 Sandia National Laboratory에서 개발된 CHEMKIN II[4] 및 SENKIN[5]를 일부 개량한 것을 사용하고 또 DME 단위반응 스킴으로서 Curran의 스킴(화학종수:79, 단위 반응수:336)[6]을, 또 NOx 스킴으로서 확대 체르드비치 기구를 고려한 모델을 이용했다. 열손실, 잔류 가스, 블로우바이(blowby)는 고려하고 있지 않다. 이하의 가정을 기초로 계산을 실시했다.

모든 가스는 이상기체(1)이고, 열전달과 질량전달은 고려하지 않았다. 에너지 보존법칙(2)과 질량 보존법칙(3)을 사용하였다. 또한 각 영역의 가스 압력, 온도 및 화학조성은 완전하게 균일하다고 가정하였고, 실린더 내 가스 평균온도,  $\bar{T}_c$ 는 총 에너지 보존식(4)를 이용하여 계산하였다.

Table 2. Assumed engine specifications.

| Process                   | Only 1 Compression & Expansion |
|---------------------------|--------------------------------|
| Bore × Stroke             | 112mm × 115mm                  |
| Displacement              | 1132cc                         |
| Length of Conrod          | 205mm                          |
| Crank Radius              | 57.5mm                         |
| Intake Valve Close Timing | aBDC 47°                       |
| Exhaust Valve Open Timing | bBDC 47°                       |
| Compression Ratio         | 10.0                           |

$$pv = nRT \tag{1}$$

$$C_v \frac{dT}{dt} + P \frac{dV}{dt} + q_{REAC} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{dm}{dt} = 0 \tag{3}$$

$$\bar{T}_c = \frac{\sum_{i=1}^N (n_i \cdot C_{p,i} \cdot T_{c,i})}{\sum_{i=1}^N (n_i \cdot C_{p,i})} \tag{4}$$

N: number of zones

ni: number of moles

Cp,i: Specific heat at constant pressure of ith zone

구축한 멀티 존 모델은 각 존의 압축 시작시의 가스 온도, DME/공기 당량비를 변화시키는 것으로써 연소실내의 온도의 불균일, DME 농도의 불균일을 재현할 수 있다. Fig. 4에 나타내듯이 각 존에 있어 가스 온도가 균일하고 화학종의 조성은 균질인 0 차원 모델이며, 상 경계 내에서는 열량, 화학종의 이동은 없지만, 압력은 일정하게 단열변화 하였다.

##### 4.2. LTR 및 HTR 발현 시기, 종료시기, 50% 열발생 시기의 정의

Fig. 5에 LTR 및 HTR 발현 시기, 종료시기, 50% 열 발생 시기의 정의를 나타낸다. 열발생율  $dQ/dt$ (J/ms)를 1 사이클 근처의 투입 열량  $Q_{in}$ (J)로 나눈 값을 연소 반응속도( $dQ/dt$ )/ $Q_{in}$ (1/s)로서 정의하고 그 변화를 Fig. 5(a)에, 그 확대도를 Fig. 5(a)\*에 나타냈다.

LTR 발현시기(이하, LTRstart) 및 HTR 종료시기(이하, HTRend)는 연소반응속도( $dQ/dt$ )/ $Q_{in}$ (1/s)가 0.35(1/s) 일 때, 그리고 LTR 종료시기(이하, LTRend)

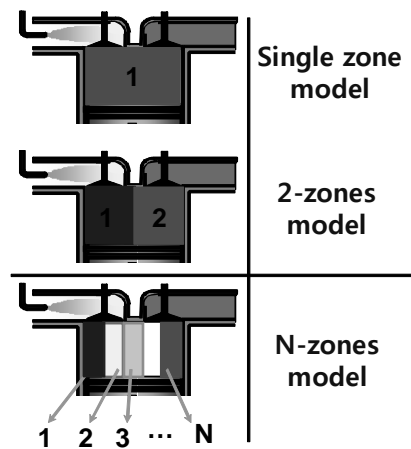


Fig. 4. Concept of multi-zone model.

및 HTR 발현시기(이하, HTRstart)는 0.2(1/s) 일 때, 반응을 일으키는 최소의 물리량으로 정의했다. Fig. 5(b)는 열발생율에 대한 적산이력을 나타낸 것이다. LTR 발현 시기부터 HTR 종료시기까지의 열발생율의 누적율 100%로 해, 50%의 열발생이 완료된 시기를 50% 열발생 시기 50으로 정의했다.

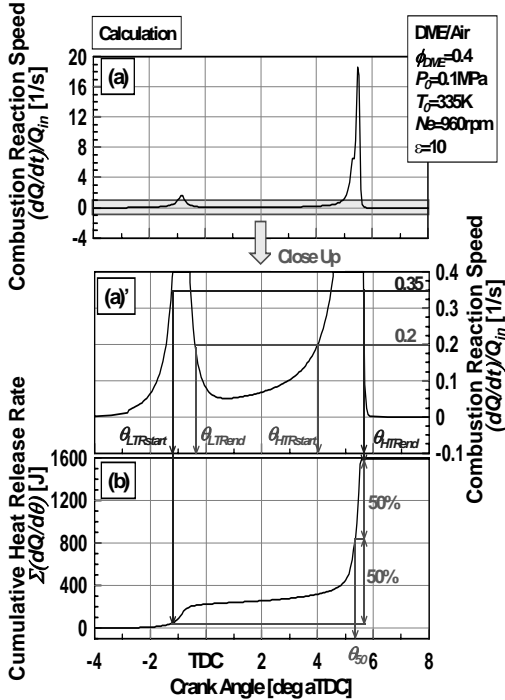


Fig. 5. The definitions of LTR start, LTR end, HTR start, HTR end and 50% heat release timing.

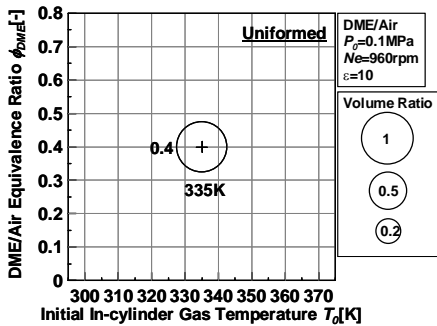


Fig. 6. Calculation condition(Uniformed).

## V. 단위반응 수치계산 결과

### 5.1. 예혼합기의 DME 농도 성층화가 HTR 기간에 미치는 영향

실험 초에 싱글 존 모델을 이용하여 온도가 균일하고 연료 농도가 균질인 조건으로 단위반응 수치계산을 실시했다. Fig. 6은 계산 조건을 나타낸다. 세로축에 DME/공기 당량비, 가로축에 압축 시작시의 실린더 내 가스 온도로 설정하였으며 등근 원의 개수는 존의 수, 등근 원의 크기는 그 존이 압축 시작 때 차지하는 체적 비율을 나타내고 있다. 압축 시작시 가스 온도를 335 K, DME/공기 당량비를 0.4로 설정하고, 압축비 10, 기관 회전 속도 960 rpm의 조건에서 아래 계산을 실시했다. Fig. 7은 실린더 내 가스 압력 이력, 실린더 내 가스 온도 이력, LTR 및 HTR 기간, 열발생율에

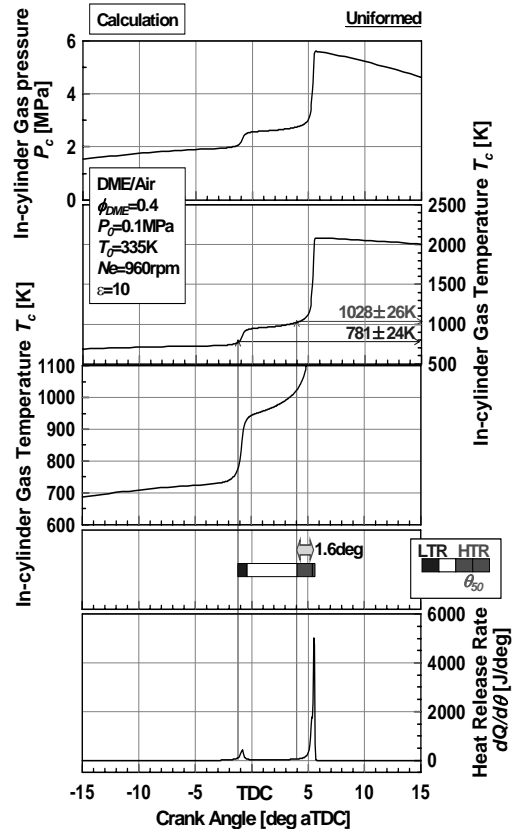


Fig. 7. The histories of in-cylinder gas pressure, in-cylinder gas temperature and heat release rate and the combustion duration(Uniformed).

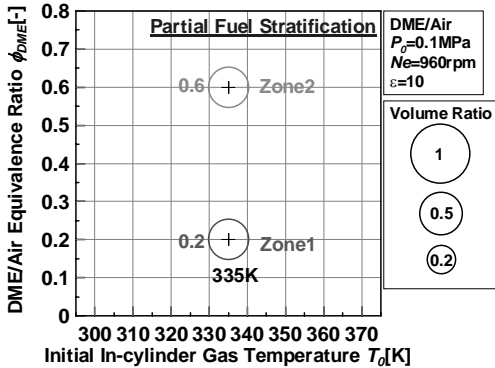


Fig. 8. Calculation condition (Partial fuel stratification).

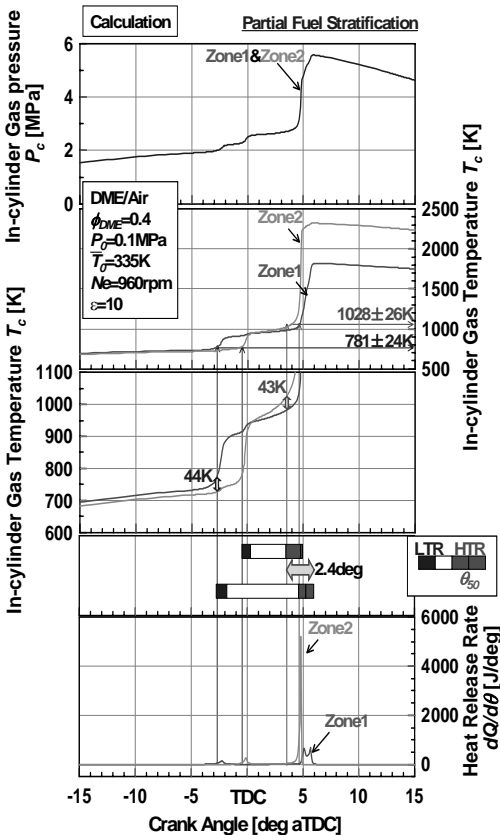


Fig. 9. The histories of in-cylinder gas pressure, in-cylinder gas temperature and heat release rate and the combustion duration (Partial fuel stratification).

대한 이력을 나타낸다. Fig. 7에 나타나듯이 피스톤에 의한 압축에 의해 실린더 내 가스 온도는 상승하여 대략 781 K에 이르렀을 때 LTR이 발생하고 대략 1028 K에 이르렀을 때 HTR가 발생하여 급격한 열발생 및 압력 상승을 확인할 수 있었다. 이때의 HTR 기간은 대략 1.6 deg였다. 그 다음으로 실린더 내 가스 온도를 균일하게 한 상태에서 DME 농도의 불균질성에 대한 효과를 조사했다. Fig. 8의 계산 조건에서 보여 지듯이, 2-zone 모델을 이용해 압축 시작시의 온도는 335 K로 일정하지만 DME/공기 당량비가 0.2 와 0.6으로 다르게 설정한 상태에서 계산을 실시했다. 1 사이클 당 투입 열량은 Fig. 8의 조건과 같다. 계산 결과를 Fig. 9에 나타낸다.

실린더 내 각 존에서의 가스 온도 이력과 열발생율 이력을 나타냈다. 실린더 내 가스 압력 이력에 대하여 그래프가 한 개인 것은, 존 1 및 2의 압력이 동일하기 때문이다. 피스톤에 의한 단열 압축에 의해 각 존의 실린더 내 가스 온도는 상승하지만 존 1은 존 2와 비교하고, 온도 상승률이 크고, 존 1의 LTR 발현 시기에 대해 약 44 K의 온도차가 생기고 있다. 이것은 DME/공기의 당량비가 낮은 존 1이 비열비가 크기 때문이다. 가스 온도가 약 781 K에서 존 1의 LTR이 발생하고 그 발열에 의해 존 1 자신의 가스 온도가 상승하며 존 2는 단열 압축에 의해 존 2의 온도가 상승하고 있다. 존 2에서도 LTR가 발생해, 그 발열에 의해 존 1의 가스 온도를 상승시킨다. DME/공기 당량비가 높은 존 2에서는 LTR 기간의 발열량이 크고 LTR 종료 후에는 존 1의 가스 온도보다 높다. 그 후 존 2에서는 LTR 발현 온도가 약 1028 K에 이르러 HTR가 시작한다. 이때의 온도차는 대략 43 K로 증가했다. 존 2의 HTR 기간 중의 발열에 의해 존 1의 가스 온도는 상승하고 HTR 개시 온도에 이른다. 이와 같이 존 사이에서의 HTR 발현 시기 차이로 인해 HTR 기간이 2.4 deg가 됨으로써 온도 및 DME 농도가 완전하게 균질인 조건과 비교해서 장기간화 되었다

## 5.2. 예혼합기종의 온도의 불균일도 및 DME 농도의 불균일도의 변화가 연소실 내 가스 압력 상승률에 미치는 영향

온도의 불균일 또는 DME 농도의 불균질이 실린더 내 가스 압력 상승률에 미치는 영향에 대해 5-zone 모델을 이용하여 조사를 실시했다. Fig. 10은 연료 농도는 균질하고 40 K의 온도 분포를 설정했을 때의 계산 조건을 예로써 보여준다. 각 존에서의 DME/공기 당량비를 0.4로 일정하게 한 상태에서 압축 시작시의 가스 온도에 차이를 주었다. 이때의 최고 가스 온도와 최저 가스 온도의 차이를 온도의 불균일도  $T_0$ 라고 정

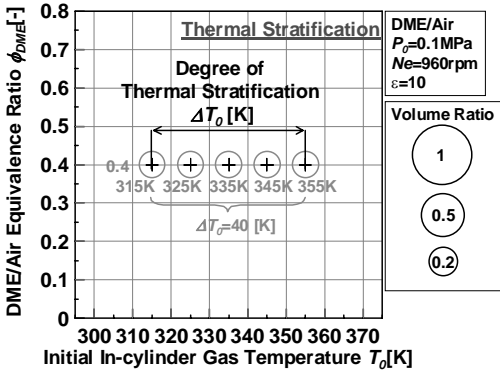


Fig. 10. Calculation condition (Thermal stratification).

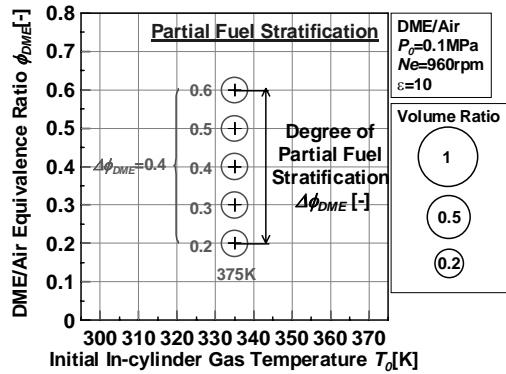


Fig. 13. Calculation condition (Partial fuel stratification).

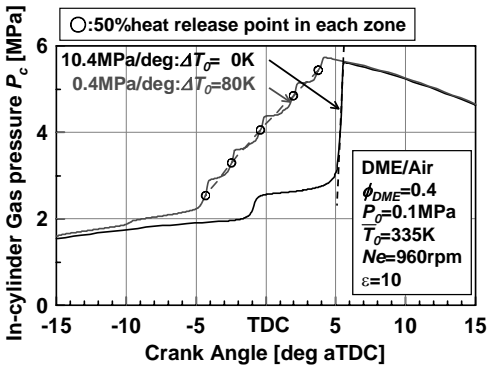


Fig. 11. Influence of degree of thermal stratification on the pressure rise rate (Thermal stratification).

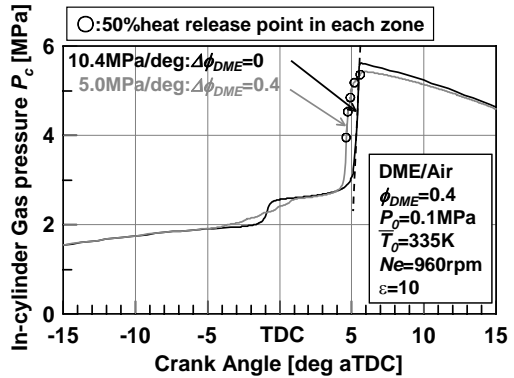


Fig. 14. Influence of degree of thermal stratification on the pressure rise rate (Partial fuel stratification).

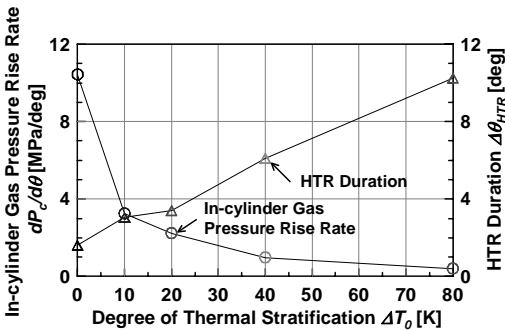


Fig. 12. In-cylinder gas pressure rise rate and HTR duration as a function of degree of thermal stratification.

의하고, 10, 20, 40, 80 K로 변화시켜 계산을 실시했다. 질량 평균 온도는 335 K로 일정하다. Fig. 11은  $T_0=0$  (완전 균질) 및 80 K일 때 실린더 내 가스 압력에 대한 이력을 예로서 보여준다. 여기서 나타내 보이고 있는 실린더 내 가스 압력 상승률은 각 존에서의 50% 열발생 시기를 이은 선의 기울기가 최대일 때로 정했다. 또  $T_0$ 의 변화가 HTR 기간과 실린더 내 가스 압력 상승률에 미치는 영향을 Fig. 12에 나타냈다.  $T_0$ 의 증가함으로써 HTR 기간이 장기화 되 실린더 내 가스 압력 상승률이 저하되고 있는 것을 알 수 있다.

다음에 Fig. 13는 DME/공기 당량비를 0.4의 DME 농도 분포로 작성했을 때의 계산 조건을 예로서 보여준다. 각 존의 압축 시작시의 가스 온도를 335 K로 일정하게 해, DME/공기 당량비에 대한 차이를 설정했다. 이때의 최고 당량비와 최저 당량비의 차이를 연료

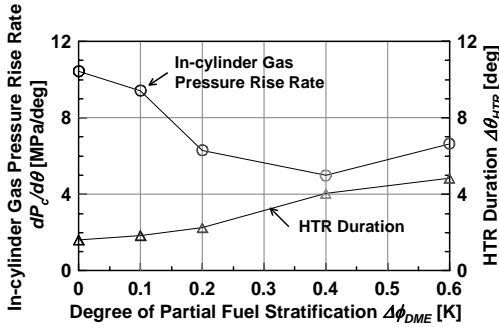


Fig. 15. In-cylinder gas pressure rise rate and HTR duration as a function of degree of partial fuel stratification.

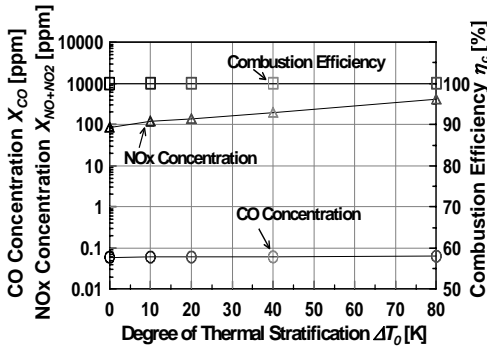


Fig. 16. CO and NOx mole fraction in exhaust gas and combustion efficiency as a function of degree of thermal stratification.

농도의 불균질도 DME라고 정의하고 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 으로 변화시켜 가며 계산을 실시했다.

Fig. 14는 DME=0(완전 균질) 및 0.4로 했을 경우의 실린더 내 가스 압력 이력률 예로서 나타내 보인다. 또 DME의 변화가 HTR 기간과 실린더 내 가스 압력 상승률에 미치는 영향을 Fig. 15에 나타냈다. DME의 증가함으로써 HTR 기간도 늘어난다. 그러나 실린더 내 가스 압력 상승률은 DME=0.4까지는 저하하지만, DME=0.6에서는 반대로 증가한다.

### 5.3. 예혼합기중의 온도의 불균일성 및 DME의 농도 불균질성이 배기중의 CO 및 NOx에 미치는 영향

Fig. 16, 17에 T0 또는 DME의 변화가 배기중의 CO, NOx 농도 및 연소 효율에 미치는 영향을 나타낸다. Fig. 16에서 T0의 증가와 더불어 NOx 농도는 상승하고 CO는 거의 배출되지 않으며 연소 효율은 거의 100%

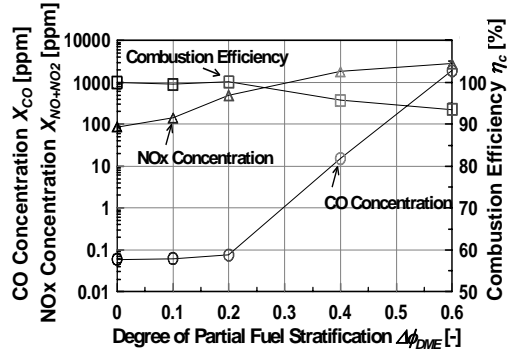


Fig. 17. CO and NOx mole fraction in exhaust gas and combustion efficiency as a function of degree of partial fuel stratification.

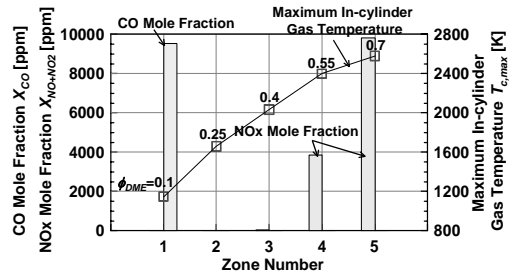


Fig. 18. CO and NOx mole fraction in exhaust gas and maximum in-cylinder gas temperature in each zone( $\Delta$ DME=0.6).

였다. 압축 시작 시에 가스 온도가 가장 높은 존에서의 실린더 내 최고 가스 온도가 증가하면서 그 존에 대한 NOx의 배출은 증가했다. 그 때문에 T0의 증가와 더불어 NOx 농도는 증가한다. Fig. 17에서는 DME의 증가와 더불어 CO 및 NOx 농도는 상승하고 연소 효율은 저하했다. Fig. 18에 DME=0.6의 조건에서 각 존의 배기중의 CO, NOx 농도 및 실린더 내 최고 도달 가스 온도를 나타낸다. 이것보다 당량비의 낮은 존에서는 CO 산화에 필요한 온도가 1500 K까지 도달하지 않고 다량의 CO가 배출되며 당량비가 높은 존에서는 도달 온도가 1800 K 이상으로 높기 때문에 Thermal NOx가 다량으로 배출되는 것을 알 수 있다.

## VI. 결론

본 연구에서는, 층상 흡기에 의해 생기는 연소실내의 온도의 불균일성 및 연료 농도의 불균질성이 실린더 내 가스 압력 상승률에 미치는 영향에 대해 알아보

기 위해 2단의 열발생을 가지는 DME를 연료를 사용하여 멀티 존 모델을 이용한 단위반응 수치계산 해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. DME를 연료로서 이용했을 경우, 예혼합기 중의 연료 농도의 불균질성에 의해, LTR 기간에 대한 발열량의 차이에 의해 HTR 발현 전에 온도 분포가 생김으로써 국소마다 HTR 발현 시기가 달라짐에 따라 HTR 기간이 증가됨을 보였다.

2. 예혼합기 중의 온도 분포가 증가함으로써 HTR 기간은 늘어나고 실린더 내 가스 압력 상승률은 저감했다. 또 배기중의 CO농도 및 연소 효율에 변화는 없지만, NOx 농도는 상승하는 것을 확인했다.

3. 예혼합기 중의 DME 농도 분포가 증가함으로써 HTR 기간은 늘어나고 실린더 내 가스 압력 상승률은 저감했다. 그러나 과도한 DME 농도 분포를 준 조건에서는 실린더 내 가스 압력 상승률 저감에 의한 효과는 작고, 배기중의 CO농도 및 NOx 농도를 증가 시켜 연소 효율의 저하를 가져왔다. 이것은 실린더 내 최고 도달 가스 온도가 1500 K이하의 저 당량비 부분일 때 CO가 다량으로 발생하고, 실린더 내 최고 도달 가스 온도가 1800 K이상인 고 당량비 부분일 때 NOx가 다량으로 발생한다는 것을 보였다.

## 후 기

이 논문이 있도록 물심양면으로 지원해 주신 일본 게이오 대학(KEIO University)의 이이다 노리마사(Norimasa Iida) 선생님께 감사를 드립니다.

이 연구는 2009' 울산과학연구원지 위탁공동연구 개발사업에 의해서 수행이되었습니다. 지원에 심심한 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- [1] Magnus Sjöberg, John E. Dec, Nicholas P. Cernansky: Potential of Thermal Stratification and Combustion Retard for Reducing Pressure-Rise Rates in HCCI Engines, Based on Multi-Zone Modeling and Experiments, *SAE Paper* 2005-01-0113 (2005)
- [2] Toshiji Amano, Satoshi Morimoto and Yasuharu Kawabata: Modeling of the Effect of Air/Fuel Ratio and Temperature Distribution on HCCI Engines, *SAE Paper* 2001-02-1024, (2001)
- [3] DME Handbook, JAPAN DME Forum, 2007
- [4] Luz A.E., Rupley F. and Miller J.A.: CHEMKIN-II: A FORTRAN Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics, *Sandia National Laboratories Report*, SAND89-8009B (1989)
- [5] Luz A.E., Kee R.J. and Miller J.A.: SENKIN: A FORTRAN Program for Predicting Homogeneous Gas Phase Chemical Kinetics With Sensitivity Analysis, *Sandia National Laboratories Report*, SAND87-8248 (1988)
- [6] H.J.Curran, W.J.Pitz, C.K.Westbrook, P.B.Dagaut, J-C Boettner and M.Cathonnet: A Wide Range Modeling Study of Dimethyl Ether Oxidation, *International Journal Chemical Kinetics*, 30-3, 229-241 (1998)