



## HCCI 기관에 있어서의 총상 흡기를 통한 압력 상승률 저감에 대한 연구

\*임옥택

울산대학교 기계자동차공학부

(2010년 10월 26일 접수, 2010년 12월 10일 수정, 2010년 12월 10일 채택)

## Potential of 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 26. October. 2010, Revised 10. October. 2010, Accepted 10. December. 2010)

### 요 약

본 연구에서는 자착화특성이 다른 DME와 n-Butane을 이용하여 다양한 흡기공급방식에 따른 HCCI 엔진연소에서 압력상승률의 저감특성에 대하여 조사하였다. 연소실내부의 가스압력측정, 광학측정용 엔진을 이용한 화학발광법의 측정 그리고 화학반응수치계산을 통하여 연소실내부에서 각 국소부분의 연소특성을 파악하였다. 최대압력상승률은 DME와 n-Butane의 혼합 상태에 의해 결정되어진다. DME가 성층화되고 n-Butane이 균일하게 분포되진 조건에서 가장 많이 감소되는데 두 연료가 균일한 경우에 비해서 최대압력상승률은 0.25MPa/ms 로 저감되었고 CA50도 5deg 지각되었다.

**Abstract** - This study investigated the effect on reducing the pressure rise rate(PRR) in HCCI Engine by the variation of mixing ratio in the pre-mixture of DME and n-Butane that has different auto-ignition characteristics. In addition to measure of gas pressure in the engine cylinder, chemiluminescence image using the optical accessible engine and numerical analysis with multi-zones model were used to assess the combustion at each local area in the combustion chamber. The maximum PRR changes depending on mixing condition of DME and n-Butane. When DME is stratified and n-Butane is distributed uniformly, maximum PRR becomes lowest which is about 0.25MPa/ms and it corresponds to 5deg. retarding of CA50.

**Key words** : combustion, knocking / chemiluminescence, DME, HCCI, n-Butane, numerical analysis, pressure rise rate, stratification

### 1. 서 론

Homogeneous Charge Compression Ignition, 예혼 합압축착화, 이하 HCCI) 기관은 고효율·저공해를 실현하는 차세대엔진기관으로서 주목받고 있다 [1]. HCCI기관은 자기착화연소이며, 연소는 화학 반응에 지배되고 있다. 그리고 반응이 시작해서 발 열반응이 시작되면 온도가 상승되고, 반응이 촉진

되어서 가일층 발열반응이 생성되어, 자기 가속적으로 연소가 진행된다. 이 때문에, 고부하시에는 연소실내의 가파르고 험준한 압력상승에 의해 노킹이 발생되어 운전 영역이 제한된다. 압력상승을 완만하게 해서 노킹을 회피하는 수법으로서는 연소실내 국소마다의 착화시기를 분산화 시키는 방법[2-3], 피스톤 운동에 의한 압력 및 온도의 상승이 마이너스가 되는 팽창행정에 연소위상을 지연화 시키는 방법[4]을 들 수 있다.

본 연구에서는, 전자의 착화시기를 분산화 시키는

\*주저자: otlim@ulsan.ac.kr

수법으로서, 자착화 특성이 다른 이종의 단체연료의 혼합비를 변화시키면 연소 위상이 변화되는 특성을 이용한다. 국소마다의 연료의 혼합비에 차이를 주고, 연소실내에 연소 위상의 다른 영역을 마련하는 것에 의한 연소실내전체로서의 압력상승율의 저감 효과를 검증하는 것을 목적으로 한다. 연료는 연소시에  $L_{THR}$ (Low Temperature Heat Release) 및  $H_{THR}$ (High Temperature Heat Release)의 2단의 열발생이 생기게 하는 DME(Di-methyl ether)와 n-Butane를 이용했다. DME은 n-Butane와 비교해서  $L_{THR}$ 의 비율이 높은 특징을 가진다. 4행정 단기통가시화 엔진을 이용한 HCCI연소시에 연소실내 가스 압력 계측과, 국소의 연소현상을 평가하기 위해서, 하이 스피드카메라를 이용한 화학발광상 계측 및 Multi-zone 모델에 의한 화학반응 수치계산을 했다.

## II. 실험 및 계산방법

### 2.1. 실험장치

Fig.1에는, 본 연구에서 이용한 실험장치인 4행정 단기통가시화 엔진의 제원을 보인다. 가시화 엔진은 피스톤 헤드에 석영 유리가 부착되어 있어서 거울을 통해 bottom view의 화학발광 상계측이 가능하다. 계측 영역은 연소실의 중심에서  $\phi 60\text{mm}$ 의 범위이며, 전체의 53.5%에 상당한다. 연소실에는 Piezo형 압력센서(AVL제:QH32D)을 이용하여 연소실내 가스 압력을 계측하였다. 흡기밸브의 상류 약185mm 및 배기 밸브의 하류 약70mm의 위치에 1.0mm의 K형 열전대를 설치되고, 측정된 온도를 각각 흡기온도  $T_{in}$ , 배기 온도  $T_{ex}$ 로 했다.  $T_{in}$ 에 대해서는 흡기 밸브 상류 약1000mm의 위치에 설치한 4kw 히터에 의해서

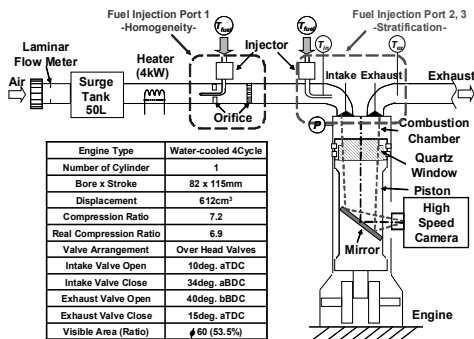


Fig. 1. Schematic of the experiment system and specifications of the optically accessible engine.

입의 온도로 제어할 수 있다. 또, 공기유량은 종류식 유량계(LFE-10B)로 계측되고, 연료에 대해서는 질량유량계로 유량을 제어되고, 입의 시기 및 기간으로 분사할 수 있는 가스인젝터에 의해 흡기 매니폴드 내에 공급된다. 그리고 균질한 예혼합기를 공급하기 위한 Fuel Injection Port1 및 연료를 층상급기 하기 위한 Port2 및 Port3을 마련되고, 이것들을 조합시켜서 연료의 혼합 상태를 변화시켰다.

Fig.2에는 Fuel Injection Port1~3의 상세를 보인다. Fuel Injection Port1의 경우, 연료는 흡기 밸브의 상류 약800mm의 위치에 있어서 구리 파이프 측면에 뚫은  $\phi 1.5$ 의 100개의 구멍으로부터 방사상에 분사된다. 분사 위치로부터 하류에는  $\phi 35$  및  $\phi 5 \times 19$ 의 orifice판을 마련되고, 각각 공기와의 큰 스케일 및 작은 스케일에서의 혼합을 도모했다.

Fig.3에는, 연료분사 시기 · 분사 기간을 흡기 · 배기 밸브 리프트 량 및 motoring 때의 연소실내 가스 압력이력과 함께 나타낸다. 연료분사 기간은 흡기 밸브가 열리고 나서 닫을 때 까지 204deg. 로 설정

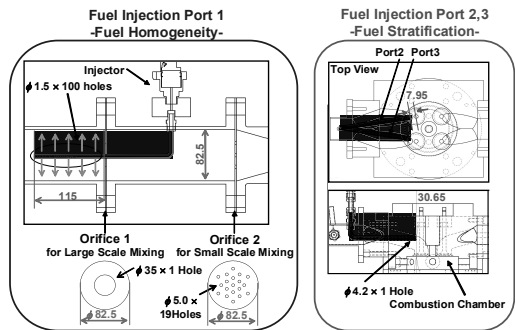


Fig. 2. Details of fuel injection ports.

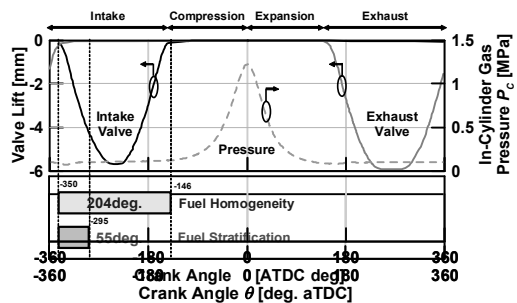

















Fig. 3. Timing and duration of fuel injection with histories of intake and exhaust valve lift and in-cylinder gas pressure.

**Table 1.** Fueling methods and fuels distribution models.

Case Fuel	1	2	3	4	5
DME	 Homogeneity	 Homogeneity	 Stratification	 Stratification	 Stratification
n-Butane	 Homogeneity	 Stratification	 Homogeneity	 Stratification	 Stratification
Correlation	 $\phi_{n-Butane}$ $\phi_{DME}$	 $\phi_{n-Butane}$ $\phi_{DME}$	 $\phi_{n-Butane}$ $\phi_{DME}$	 $\phi_{n-Butane}$ $\phi_{DME}$	 $\phi_{n-Butane}$ $\phi_{DME}$

했다. 한편, Fuel Injection Port2 및 3을 이용할 경우, 연료는 한 쪽의 흡기 밸브 직전 약30mm의 위치에 있어서 구리 파이프 침단(φ4.2)로부터 분사된다. 또, 연료를 흡기 밸브가 열리고 나서 55deg.의 짧은 시간으로 분사하는 것에 의해 층상화를 촉진되고 있다. 또한, 화학발광상계측에는 하이스피드카메라(MEMRECAM GX-1 Plus)을 사용했다. HCCI연소에 따르는 화학발광은 미약한 발광이기 때문에, 하이스피드카메라에는 빛 증폭 광학장치(UVi Model 1850-10)을 부착하여 계측을 했다.

**2.2.연료의 공급 방법 및 혼합 상태**

본 연구에서는, DME 및 n-Butane에 대해서 5종류(Case1~Case5)의 혼합 상태를 형성했다. Table. 1에 Case1~Case5의 연료공급 방법 및 각각의 Case에서 상정되는 예혼합기 중의 연료분포 상태를 보인다.

- Case1: DME과 n-Butane를 상류에서 혼합되고, 함께 Fuel Injection Port1로부터 공급한다. 예혼합기중의 DME 및 n-Butane의 당량비는 어느 위치에 있어서도 일정하다.
- Case2: DME은 Fuel Injection Port1로부터 공급되고, n-Butane는 Fuel Injection Port2로부터 층상급기 한다.
- Case3: n-Butane는 Fuel Injection Port1로부터 공급되고, DME은 Fuel Injection Port2로부터 층상급기 한다.
- Case4: DME과 n-Butane를 상류에서 혼합되고, 함께 Fuel Injection Port2로부터 층상급기 한다. 예혼합기 중의 양자의 당량비에는 정의 상관이 있다.
- Case5: DME은 Fuel Injection Port2로부터, n-Butane는 Fuel Injection Port3로부터 각각 층

상급기 한다. 예혼합기 중에 있어서의 양자의 당량비에 상관은 없다.

**2.3. 화학반응 수치계산 방법**

화학반응 수치계산의 계산 코드에는 SENKIN[5] 및 CHEMKIN-II [6]을 일부 개량하여 사용되고, 0차원 모델을 기본으로 한 Multi-zone모델에 의한 계산을 했다. 각각의 zone는 압력·온도·화학종의 조성이 균일한 0차원 모델이며, zone간의 질량과 열의 이동은 고려하지 않고, 모든 zone의 압력이 같아지게 해서 체적을 단일 변화시켰다. 모든 화학종은 이상 기체로 가정되고, 에너지 보존·질량 보존식을 이용해서 계산을 했다. 또한, 잔류 가스 및 벽면에서의 열손실은 고려하지 않고 있다.

DME과 n-Butane를 연료로 한 HCCI연소의 화학반응 수치계산을 하기 위해서, Curran들에 의한 DME의 모델(화학종수:80, 화학반응수:351)[7]과 Kojima에 의한 n-Butane의 스킴(scheme)(화학종수:141, 화학반응수:468)[8]을 조합시킨 모델(화학종수:185, 화학반응수:730)을 작성해서 계산에 이용했다. 실험으로 사용한 엔진과 같은 제원의 엔진을 상정되고 흡기 밸브가 닫히고 나서 배기 밸브가 열릴때까지의 1회의 압축 및 팽창 일정중이 닫은 계의 가스를 계산 대상으로 삼았다.

**III. 결과 및 고찰**

**3.1. 혼합비의 변화가 HCCI연소에 주는 영향**

우선, DME과 n-Butane의 혼합비를 변화시켰을 때에 연소 위상이 어떻게 변화되는 것일지를 밝히기 위해서, 양자의 혼합비를 변화시켜서 HCCI연소 실험을 했다. 혼합비의 지표에는 식. 1과 같이 정의한 DME의 혼합비  $X_{DME}$ 를 사용했다. DME과 n-Butane를 함께 균질하게 공급하는 Case1에 있어서, 흡기압력  $P_0=0.1MPa$ , 기관회전속도 $N_e=600rpm$ , 흡기온도 $T_{in}=493K$ 의 조건 아래, 투입 열량 $Q_{in}$ 을 일정(588J/cycle)로 실험을 했다.

$$X_{DME} = \frac{N_{DME}}{N_{DME} + N_{n-Butane}} \tag{1}$$

$N_{DME}$  : 1cycle에 공급하는 DME의 몰수 [mol/cycle]  
 $N_{n-Butane}$  : 1cycle에 투입하는 n-Butane의 몰수 [mol/cycle]

Fig.4에는,  $X_{DME}$ 를 변화시켰을 때의 연소실내 가스 압력, 연소실내 가스 질량평균 온도 및 열발생율의

이력을 가리킨다.  $X_{DME} \leq 0.6$ 의 조건에서는 실화해 버렸기 때문,  $X_{DME}=1.0 \sim 0.7$ 에 관한 결과를 내보이고 있다. 또한, 온도 및 열발생율 이력에 대해서  $-40 \sim 0$ deg. aTDC의 범위를 확대한 것을 Fig.5에 보인다.

Fig.4 및 Fig.5을 보면, DME의 혼합 비율을 감소시키면 연소 위상이 지연화되고 있는 것을 안다.  $X_{DME}=1.0$  (DME=0.44, n-Butane=0; 당량비)에서는  $L_{THR}$  시작시기;  $L_{THR\_start} = -35$ deg. aTDC,  $H_{THR}$  시작시기;  $H_{THR\_start} = -25$ deg. aTDC인 것에 대해,  $X_{DME}=0.7$  (DME=0.24, n-Butane=0.22)에서는  $L_{THR\_start} = -23$ deg. aTDC,  $H_{THR\_start} = -3$ deg. aTDC이다. 또, 그 시작 온도에 대해서는,  $X_{DME}=0.7$ 의 경우,  $X_{DME}=1.0$ 의 경우와

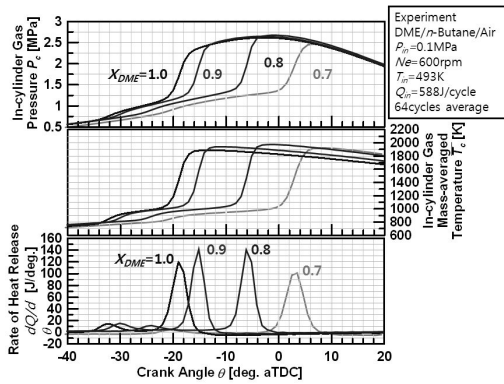


Fig. 4. Effects of DME mixing ratio on histories of pressure, temperature and RHR.

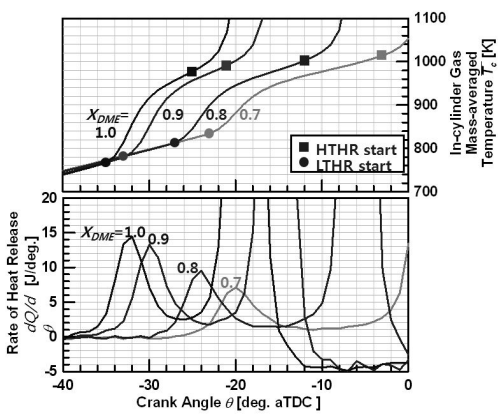


Fig. 5. Effects of DME mixing ratio on LTHR and HTHR start timing and RHR (close-up of Fig.4).

비교해서  $L_{THR}$  시작 온도는 67K,  $H_{THR}$  시작 온도는 37K 높아지고 있다. 열발생율에 착안하면, DME의 혼합 비율을 감소시키는 것에 따라서  $L_{THR}$ 의 발열량이 감소되고 있는 것으로 보인다.  $L_{THR}$ 에 있어서의 열발생율의 최대값을 비교하면,  $X_{DME}=0.7$ 의 경우,  $X_{DME} = 1.0$ 의 경우의 거의 절반이 되고 있다.  $L_{THR}$  및  $H_{THR}$ 의 시작 온도의 상승,  $L_{THR}$ 의 발열량의 감소가 연소 위상의 지연화의 요인이 되고 있다.

이렇게, DME과 n-Butane의 혼합비를 변화시키는 것에 의해 연소 위상을 변화시킬 수 있다. 따라서 연소실내국소마다의 혼합비에 차이를 주면 국소의 연소 위상을 분산화 시키고 연소실내전체로의 급격한 발열반응을 억제할 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.2. 층상급기에 의한 압력상승율의 저감 효과

DME과 n-Butane의 혼합 상태를 변화시켰을 때의 압력상승율 저감 효과를 밝히기 위해서, Table 1에서 보인 Case1~Case5에 대해서 HCCI연소 실험을 했다. 각각의 Case에 있어서, 흡기압력  $P_0=0.1$ MPa, 기관회전속도  $N_e = 600$ rpm, DME 및 n-Butane의 투입 열량을 각각  $Q_{in,DME}=306$ J/cycle,  $Q_{in,n-Butane}=254$ J/cycle ( $X_{DME}=0.68$ )과 일정으로 한 조건 아래, 흡기온도  $T_{in}$ 을 변화시키는 것에 의해 연소 위상을 변화시켜서 실험을 했다.

Fig.6에는, 횡축을 연소 위상의 지표인 CA50로 했을 때의 Case1~5의 최대 압력상승율의 그래프를

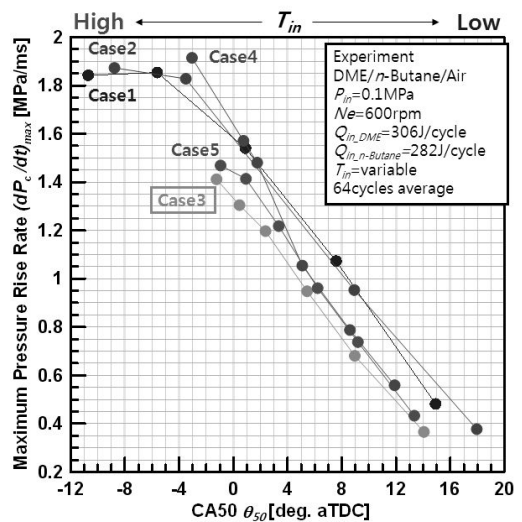


Fig. 6. Maximum pressure rise rate as a function of CA50 for Case 1~Case 5.

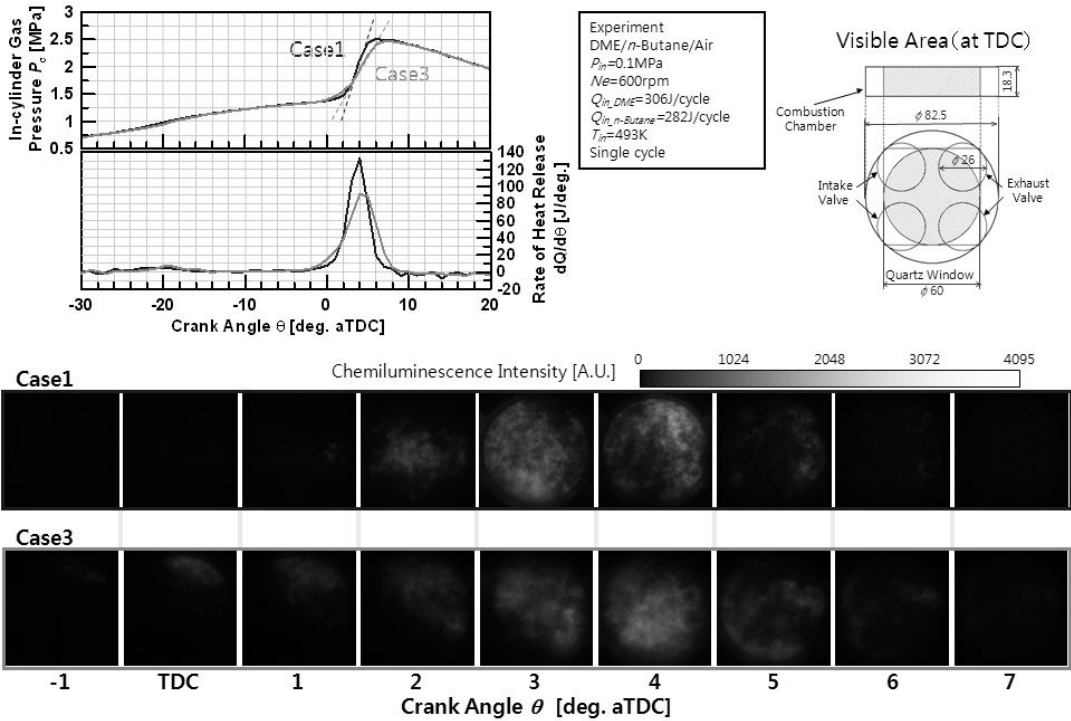


Fig. 7. Histories of pressure, RHR and chemiluminescence images (comparison of Case1 and Case3)

보인다. 모든 Case에 있어서 연소 위상의 지연화에 따라 최대 압력상승률은 감소되고 있어, 그 경사도 모든 Case에서 거의 같이, CA50이 1deg. 지연화하면 최대 압력상승률은 약0.05MPa/ms저감된다. 같은 연소 위상에서의 최대압력상승률을 비교하면, Case2은 Case1과 거의 같은 값이지만, Case3~Case5은 Case1보다도 낮은 값이 되고 있다. 특히 Case3의 저감 폭이 가장 크다. Case1에 대한 Case3의 압력상승률의 저감 폭은 연소 위상이 변화되어도 거의 일정(약0.25MPa/ms)이며, 5deg. 의CA50의 지연화에 해당한다. Fig.6보다 Case3의 연료공급 방법이 Case1에 대하여 가장 큰 압력상승률의 저감 효과를 얻을 수 있는 것을 알 수 있다. Case1과 Case3에 대해서 하이스피드카메라를 이용해서 촬영한 HCCI연소시의 화학발광 상 이력 및 연소실내 가스 압력과 열발생율의 이력을 Fig.7에 나타낸다. 결과는 흡기 온도 $T_{in}=493K$ 의 때의 이력이다.

Case3에서는 -1deg. aTDC에 있어서 계측 영역의 오른쪽상의 부분으로부터 발광이 시작되고, 이 시각은  $H_{THR}$ 의 열발생율이 일어서는 시각과 일치한다. 이 때, Case1에서는 아직 발광은 보이지 않는다. Case1은 1deg. aTDC으로부터 발광이 시작되고,

2deg. 뒤(후)의 3deg. aTDC에는 발광이 계측 영역의 전체적으로 뻗어 있다. 또한 이 시각은 열발생율이 최대가 되는 시각과 거의 일치되고 있다. 한편, Case3은 오른쪽 상에서 좌측 밑에 발광이 변이되고 있어, 가장 강한 발광이 보이며, 열발생율이 최대가 되는 시각이기도 하는 4deg. aTDC에서는 오른쪽 상의 부분의 발광은 이미 사라지고 있는 것으로 보인다. 게다가, Case3에서는, Case1에서는 이미 발광이 종료되고 있는 6deg. aTDC에 있어서도 조금 발광이 계속되고 있다.

계측 영역전체에서의 발광 기간을 비교하면, Case1은 1~5deg. aTDC의 5deg. 에서 있는 것에 대해 Case3은 -1~6deg. aTDC의 8deg. 에서 있어, 3deg. 장기화되고 있다. 동일하게 열발생율에 대해서도, Case3은 Case1과 비교해서  $H_{THR}$ 의 기간이 장기화되고 있어, 그것에 따라 열발생율의 최대치  $(dQ/d)_{max}$ 가 저하되고 있다. Case1은  $(dQ/d)_{max}=133J/deg.$  에서 있는 것에 대해, Case3은  $(dQ/d)_{max}=91J/deg.$  에서 있다. 그리고 CA50 및 연소 효율  $\eta$  이 거의 마찬가지인 것에도 관계없이, Case3은 Case1과 비교해서 압력상승의 경사가 완만해지고 있는 것을 안다.

### 3.3. Multi-zone모델을 사용한 화학반응 수치 해석

3.2절에서 말한 것 같이, Case3은 Case1과 비교해서 곡소마다의 발광 시작 시간( $\approx H_{THR}$ 의 시작 시간)이 크게 다르다. 이런 시간차이를 낳는 요인을 밝히기 위해서 Multi-zone모델을 사용한 화학반응 수치계산으로 했다. Fig.8에는, 계산의 초기 조건인 각zone의 DME 및 n-Butane의 당량비를 보인다. 여기서 Table. 1에 내보인 예혼합기 중에 상정되는 연료분포와 대응되고 있다. Case1을 상정한 조건에서는, 모든 zone에 있어서 DME = 0.20, n-Butane = 0.19로 했다. DME 및 n-Butane의 당량비는 투입 열량이 실험의 경우와 동일하게 설정했다. 한편, Case3을 상정한 조건에서는, 모든 zone에 있어서 n-Butane는 일정(n-Butane = 0.19)이지만, DME에 대해서는, zone1을 DME=0.07, zone2을 DME=0.14,

zone3을 DME=0.20, zone4을 DME=0.27, zone5을 DME=0.34로 되고, 최대 0.27의 차이를 설정했다. 또, 다른 조건에 대해서는 실험시의 조건에 맞춰서 초기 압력 $P_0=0.1MPa$ , 기관회전속도 $N_e=600rpm$ , 초기 온도 $T_0=493K$ 로 했다. Fig. 9에서 Case1 및 Case3을 상정한 조건에 대해 연소실내 가스 압력 및 각zone의 연소실내 가스 온도의 이력을 보인다. 계산에서도 실험과 동일하게 Case3은 Case1과 비교해서 압력 상승의 경사가 완만해지고 있다. 온도이력에 대해서는 Case1에서는 모든 zone가 동일한 이력선으로 보이지만, Case3은 zone마다에 다른 이력으로 움직

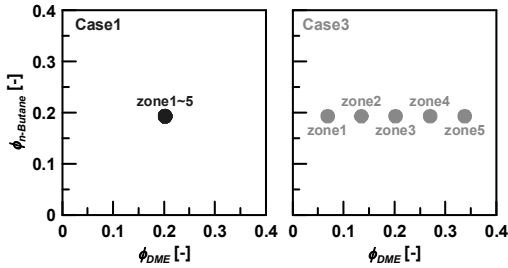


Fig. 8. Calculation condition of Case1 and Case3 ( $\phi_{DME}$  and  $\phi_{n-Butane}$  in each zone).

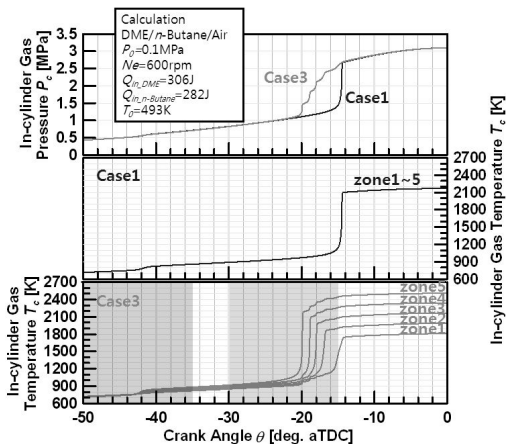


Fig. 9. Histories of pressure and temperature in each zone(comparison of Case1 and Case3).

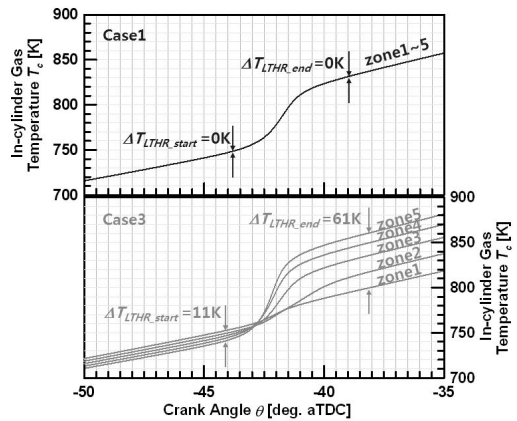


Fig. 10. Histories temperature in each zone of Case1 and Case3(close-up of area A of Fig.9).

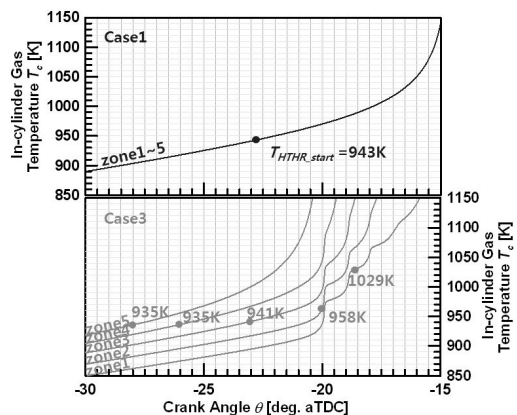


Fig. 11. Histories temperature in each zone of Case1 and Case3(close-up of area B of Fig.9).

이고, 도달 온도도 각각 다르다. 도달 온도는 DME 농도가 가장 큰 zone5가 가장 높고 DME농도가 작은 zone1이 가장 낮다.

Fig. 9는 영역A(-50~-35deg. aTDC)의 압력이력, 온도이력을 보이고 있다. Fig.10은  $L_{THR}$ 과  $H_{THR}$ 이 발생을 확대한 것을 보인다. Case3에 착안하면, 초기 온도는 모든 zone에서 같이 설정한 것에 관계없이,  $L_{THR}$ 시작까지 11K의 온도차이가 생기고 있다. 이것은 각zone의 당량비의 차이(가스 조성의 차이)에 의한 비열비의 차이에 의한 것이라고 생각된다.  $L_{THR}$  시작 시에 있어서는 DME농도가 가장 작은 zone1의 온도가 가장 높고, DME농도가 가장 큰 zone5의 온도가 가장 낮다. 그 후,  $L_{THR}$ 의 종료시에는 zone간의 온도차이가 61K로 발생되고,  $L_{THR}$ 시작시에는 가장 온도가 낮았던 zone5의 온도가 가장 높아지고 있다. 이 온도 차이에는  $L_{THR}$ 의 발열량이 기여되고 있다고 생각된다. DME의 당량비가 높은 zone 정도로  $L_{THR}$ 중의 온도상승 폭이 크고, zone마다의 상승 폭의 차이가  $L_{THR}$  종료시의 61K의 온도 차이를 만들어 내고 있다. 또한, Fig.9의 영역B(-30~-15deg. aTDC)의 온도이력의 확대한 것을 Fig.11에 보인다. 비열비의 차이 및  $L_{THR}$ 의 발열량의 차이에 의해 생기게 한 온도 차이에 의해 zone마다의  $H_{THR}$  시작시기에 시간차이가 생기게 되었다. zone5에서는 가장 빠르는데, -28.0deg. aTDC에서  $H_{THR}$ 가 시작하는 것에 대해, zone1에서는 가장 늦는데, -18.6deg. aTDC에서 시작되고, 그 시간차이는 9.4deg. 이다. 더욱이,  $H_{THR}$ 의 시작 온도  $T_{H_{THR},star}$ 에 착안하면, zone마다 시작온도는 각각 다르고, zone5에서는  $T_{H_{THR},star}=935K$ 인 것에 대해, zone1에서는  $T_{H_{THR},star}=1029K$  이다. Fig.5와 같이 DME과 n-Butane의 혼합비에 의해  $T_{H_{THR},star}$ 는 변화되고, DME의 혼합 비율이 많을 만큼  $T_{H_{THR},star}$ 는 낮아진다. 이것이 DME의 비율이 가장 많은 zone5의  $T_{H_{THR},star}$ 가 가장 낮게, DME의 비율이 가장 낮은 zone1의  $T_{H_{THR},star}$ 가 가장 높아지고 있는 것의 요인으로서 생각된다. 그리고 가장 빨리  $H_{THR}$ 가 시작하는 zone의 시작 온도가 가장 낮게, 가장 늦게 시작하는 zone의 시작 온도가 가장 높아지고 있는 것이 보다 큰  $H_{THR}$  시작의 시간차이를 낳는 결과가 되고 있다.

#### IV. 결론

본 연구에서는, 자착화 특성의 다른 DME 및 n-Butane를 연료로서 사용해서 국소마다의 혼합비에 차이를 주는 것에 의한 압력상승률의 저감 효과를 검증하기위해서 4행정 단기통가시화 엔진을 이용한 연소실내 가스 압력계측, 화학발광상계측 및

Multi-zone모형을 이용한 화학반응 수치계산을 했다. 그 결과 이하의 결론을 얻었다.

1. DME과 n-Butane의 혼합비를 변화시키면, DME의 혼합 비율을 감소시키는 것에 따라서 연소 위상은 지연화 된다. DME의 혼합 비율을 감소시키면  $L_{THR}$  및  $H_{THR}$ 의 시작 온도는 높아져,  $L_{THR}$ 의 발열량은 감소 되고, 이것들이 지연화의 요인이 되고 있으면 생각된다.
2. 연소실내 국소마다의 연료의 혼합비에 차이를 주면 국소의 연소 위상을 분산화 시킬 수 있고 연소실내전체로서의 급격한 발열생을 억제할 수 있다.
- 3.연소위상의 지연화에 따라 최대 압력상승율은 감소되고, CA50이 1deg. 지연화하면 최대 압력상승율은 약0.05MPa/ms저감한다.
4. DME과 n-Butane의 혼합 상태를 변화시켰을 때, 같은 연소 위상에서의 최대 압력상승율을 비교하면 Case2에서는 Case1과 거의 같은 값이지만, Case3~Case5에서는 Case1보다도 낮은 값이 된다. 가장 큰 압력상승율의 저감 효과를 얻을 수 있는 것은 Case3이며, Case1에 대한 저감 폭은 약0.25MPa/ms가 되고, 이것은 5deg. 의CA50의 지연화에 상당한다.
5. 화학발광의 시작시각은  $H_{THR}$ 의 열발생율이 일어나는 시각과 일치되고, 발광이 가장 강해지는 시각은 열발생율이 최대가 되는 시각과 일치한다.
6. Case3에서는 가장 강한 발광이 보이는 시각에 있어서, 처음에 발광이 시작한 영역의 발광은 이미 사라지고 있다. 또, Case1에 대하여 Case3은 발광기간이 장기화되고 있고 동일하게  $H_{THR}$ 의 기간도 장기화한다.
7. Multi-zone모형을 사용한 화학반응 수치계산으로 결과, Case3에서는, zone마다의 비열비의 차이 및  $L_{THR}$ 의 발열량의 차이에 의해  $L_{THR}$ 종료시에 zone간의 온도차이가 형성된다. 이 온도차이 및 연료혼합비의 차이에 의한 zone마다의  $H_{THR}$ 시작 온도의 차이에 의해 zone마다의  $H_{THR}$ 시작시기에 시간차이가 생긴다.

#### 후 기

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

지식경제부 기술혁신사업 인 ‘클린 신연료 동력시스템 개발’에서 수행된 연구입니다. 관계자들의 지원에 심심한 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- [1] R. H. Thring : Homogeneous-Charge Compression-Ignition (HCCI) Engines, SAE Paper 892068 (1989)
- [2] 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)
- [3] Kengo Kumano and Norimasa Iida:Analysis of the Effect of Charge Inhomogeneity on HCCI Combustion by Chemiluminescence Measurement, SAE Paper 2004-01-1902(2004)
- [4] 山下大輔, 權淳杓, 佐藤進, 飯田訓正 : HCCI機関におけるメタン/DME混合燃料の自着火と燃焼機構に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.36, No.6, p.85-90 (2005)
- [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] 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)
- [7] H. J. Curran, W. J. Pitz, C. K. Westbrook, P. Dagaut, J-C Boettner and M. Cathonnet:A Wide Range Modeling Study of Dimethyl Ether Oxidation, International Journal Chemical Kinetics, Vol.30-3, p.229-241 (1998)
- [8] S. Kojima:Detailed Modeling of *n*-ButaneAutoignition Chemistry,CombustionandFlame,No.99,p.87-136 (1994)