

## EGR 성층화급기에 의한 DME HCCI 연소시의 압력 상승률 저감에 관한 연구

임옥택\*<sup>†</sup>

\*울산대학교 기계자동차공학부

## A Study about the Effects of EGR Stratification on Reducing the Pressure Rise Rate of DME HCCI Combustion

OCKTAECK LIM\*<sup>†</sup>

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

### ABSTRACT

Stratified charge has been thought as one of the ways to avoid a sharp pressure rise on HCCI combustion. The purpose of this study is to evaluate the potential of stratified charge for reducing PRR on HCCI combustion. The pre-mixture with thermal, mixing and EGR stratifications is charged in Rapid Compression Machine. After that, the pre-mixture is compressed and in that process, in-cylinder gas pressure and temperature are analyzed. Additionally numerical calculation with multi-zones modeling is run to know the potential of stratified charge for reducing PRR.

**KEY WORDS** : Homogeneous charge compression ignition(HCCI ; 예혼합압축착화), Exhaust gas recirculation (EGR; 배기재순환), Pressure rise rate(PRR; 압력저감율), Di-methyl ether(DME; 디엠이), Stratified charge(성층예혼합기)

### Nomenclature

P : pressure, MPa  
PRR: pressure raise rate, MPa/ms  
T : temperature, K  
t : time, ms

### Subscripts

HTR : high temperature reaction  
LTR : low temperature reaction  
c : combustion  
0 : initial time

## 1. 서 론

대기오염과 에너지고갈 문제로 자동차 엔진분야에서 예혼합압축자착화(homogeneous charge compression

<sup>†</sup>Corresponding author : otlim@ulsan.ac.kr

[ 접수일 : 2011.9.30 수정일 : 2011.11.28 게재확정일 : 2011.12.27 ]

ignition ; 이하 HCCI) 엔진 연소가 고효율·저공해 내연기관으로 주목받고 있다. HCCI엔진은 실린더 내에 예혼합기를 공급하고 피스톤으로 단열 압축해서 다점 동시 자착화에 의한 벌크 연소를 시키는 기관이다. 그러나 고부하시 노킹이 발생해서 운전 영역이 한정되는 과제가 남아있다.

노킹은 연소실내 가스의 압력 상승률이 5MPa/ms를 넘으면 발생하는 것으로 알려졌다<sup>1)</sup>, 이를 회피하기 위해서 압력 상승률을 저감 시킬 필요가 있다. 압력 상승률의 저감 수법에는 연소 위상의 지연화<sup>2)</sup> 및 성층화급기<sup>3,4)</sup>가 제안되고 있다. 연소 위상의 지연화는 열발생을 팽창 행정 중에 발생시키는 것으로 발열에 의한 온도 상승에 수반하는 자기 가속적인 연소를 벽면으로의 열전달과의 상관관계를 통해서 억제 하는 수법이다. 또한 성층화급기는 온도나 당량비, 가스 조성의 분포를 불균일상태로 조성 하는 것으로 열발생을 공간적·시간적으로 분산시키는 수법이다.

본 연구에서는 성층화급기에 의한 압력 상승률 저감 효과에 관해서 온도, 당량비, EGR에 의한 가스 조성의 성층화에 주목하고 이에 대하여 조사했다. 실제의 엔진에서는 잔류 가스나 유동에 의해 온도 당량비 및 가스 조성의 영향이 복잡적이므로 이러한 영향을 최대한으로 배제할 수 있고 각종 파라미터들의 효과를 독립적으로 확인할 수 있는 RCM를 이용하고 검토를 실시했다<sup>5)</sup>. 우선 연소실내에 온도내지는 당량비의 성층화 분포를 형성해 압축 자기 착화 시켰을 때의 지압 해석으로부터 온도내지는 당량비의 성층화에 의한 압력 상승률 저감 효과를 조사했다. 또한, EGR에는 그 자체의 온도와 가스 조성의 영향이 포함되지만 본 연구에서는 EGR의 가스 조성이 HCCI 연소에 미치는 영향에 주목해, 단위반응 수치 해석 및 RCM에 의한 HCCI 연소 실험으로 검증했다. 그 위에 EGR에 의한 가스 조성을 성층화해서 온도의 성층화와 합쳐졌을 때에 압력 상승률 저감 효과가 어떻게 되는가 하는 것에 대하여 HCCI 연소 실험에 의해 검증했다.

그리고 multi-zones 모델의 단위반응 수치 해석을 이용하고, 온도, 당량비 및 EGR에 의한 가스 조

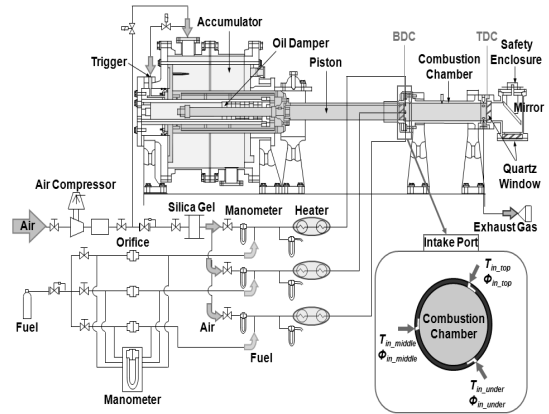


Fig. 1 Schematic of the rapid compression machine and pre-mixture supply system

성의 성층화가 가지는 압력 상승률 저감 효과의 비교를 실시했다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1에 본 실험으로 이용한 급속압축장치(rapid compression machine; 이하 RCM) 및 예혼합기 급기방법을 Table 1에 장치의 사양을 나타낸다. 연소실내의 압력은 피에조식(piezo) 압력센서, 피스톤 변위는 피스톤 동체 측면에 설치된 로터리 엔코더로 계측했다. 평균가스온도 352K의 공기를 약 185ms의 사이에 단열 압축했을 때의 가스 체적, 압력, 온도 이력을 Fig. 2에 나타냈다. 압축 종료 시의 최고 도달 압력 및 온도는 약 3.5 MPa, 약 900K가 되어,

Table 1 Specification of the rapid compression machine

Item	Value
Bore × stroke	145 × 693.3 mm
Cylinder volume	12.2 × 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
Compression ratio	14.6
Combustion chamber thickness	49.2 mm
Combustion chamber type	Pancake type
Compression duration	About 185 ms

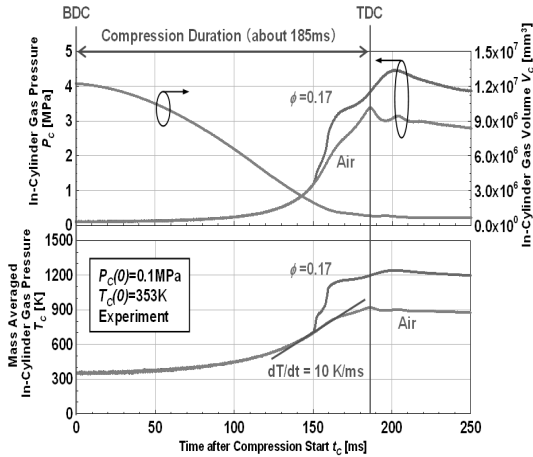


Fig. 2 Histories of in-cylinder gas volume, in-cylinder gas pressure and mass averaged temperature

연소가 개시되는 전후(약 145-175ms)에 있어서의 가스 온도의 상승률은 약 10K/ms이며, 이것은 300 rpm시의 왕복기관의 상사점전 부근(약-3deg aTDC)에 상당한다.

공급되는 예혼합기는 연소실에 3개의 급기구(위쪽, 중간쪽, 아래쪽)에서 연료, 공기, N<sub>2</sub> 및 CO<sub>2</sub>를 각각 앞의 배관 내에서 혼합 하게 하는 것으로, 급기 온도, 당량비 및 EGR율(N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>의 첨가 비율)을 독립으로 설정할 수 있다. 급기온도는 급기구 부근의 배관 및 연소실의 외벽에 비치한 리본 히터와 열전대에 의해 설정했고 공기, 연료, N<sub>2</sub> 및 CO<sub>2</sub> 유량은 질량유량계에 의해 제어했다.

## 2.2 시험연료

기체 연료인 Di-methyl ether(DME)를 이용했다.

Table 2 Fuel properties

Item	DME (CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub> )
Low Heat Value	28.8 kJ/g
Heat Release in LTR	10~30%
Heat Release in HTR	70~90%
Molecular Structure	

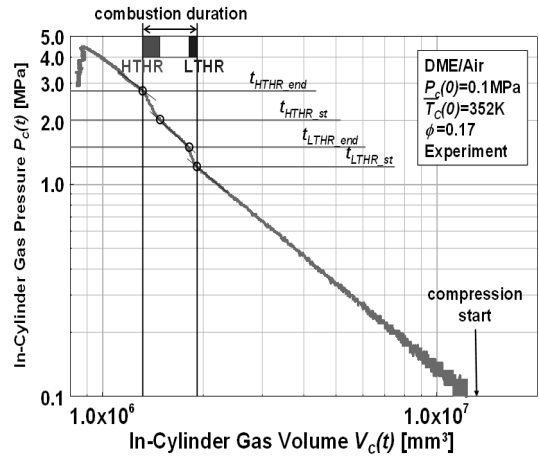


Fig. 3 Definition of combustion duration

Table 2에 연료의 물성치를 나타낸다. 저온 발열(low temperature heat release : LTHR) 및 고온 발열(high temperature heat release : HTHR)의 2단계에서 열이 발생하여 총 열발생량에 대한 LTHR의 비율이10~30%정도의 특징을 가진다.

## 2.3 HCCI 연소 실험시의 해석 방법

### 2.3.1 연소 기간의 정의

본 연구에서는 실험으로 얻을 수 있던 압력 및 체적 이력에 의해 logP-logV 선도를 그려서(Fig. 3) 선의 기울기가 변해보이는 것부터 기울기가 변화하는 시각을 압축 개시부터 순서에 LTHR 개시시기(tLTHR\_st), LTHR 종료시기(tLTHR\_end), HTHR 개시시기(tHTHR\_st), HTHR 종료시기(tHTHR\_end)로 정의했고, LTHR 개시부터 HTHR 종료까지를 연소 기간으로 정의했다<sup>5)</sup>.

### 2.3.2 연소실내 가스 질량 평균 온도의 산출

실험시의 연소실내 가스의 질량 평균 온도는 초기 온도, 압력 및 체적의 이력으로부터 산출했다. 벽면의 온도 경계층을 제외한 연소실부의 가스는 압축 개시부터 LTHR 개시까지를 밀폐계의 단열변화라고 생각해 가역 단열의 식 (1)을 이용해 온도를

산출했다. 하지만, LTHR 개시부터 HTHR 종료까지는 열발생에 의한 단열변화가 아니기 때문에 이상기체상태방정식의 식 (2)를 적용해 산출했다. 다만 반응중의 가스 mol수는 중간 생성물에 의해 정확하게 추측하는 것은 곤란하기 때문에 LTHR 개시시의 mol수 $n_C(t_{LTHR\_st})$ 를 기준으로 한 일정하게 계산했다. 그리고 HTHR 종료 후는 다시 단열변화라고 생각해 식 (1)을 적용했다.

$$T_C(t_i) = T_C(t_{i-1}) \left( \frac{P_C(t_i)}{P_C(t_{i-1})} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (1)$$

$$T_C(t_i) = \frac{P_C(t_i) \cdot V_C(t_i)}{n_C(t_{LTHR\_st}) \cdot R} \quad (2)$$

$t$  : 압축 개시부터의 시간 [ms]

$\kappa$  : 비열비

$P_C(t_i)$  :  $t_i$ 시에 있어서의 연소실내 가스 압력 [MPa]

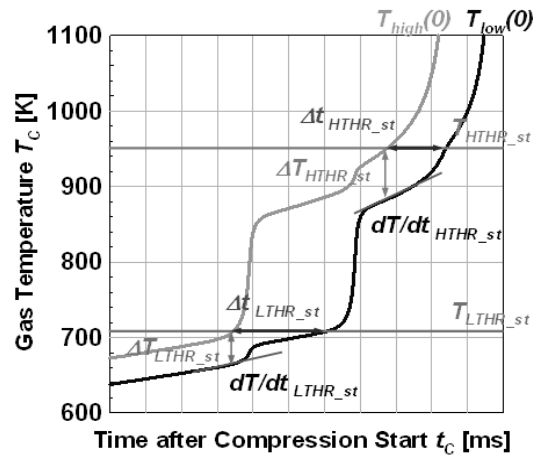
$T_C(t_i)$  :  $t_i$ 시에 있어서의 연소실내 가스 온도 [K]

$V_C(t_i)$  :  $t_i$ 시에 있어서의 연소실내 가스 체적 [mm<sup>3</sup>]

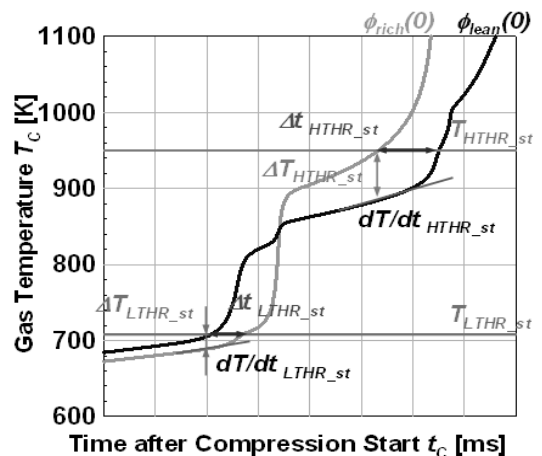
$R$  : 기체 정수 [J/(mol·K)]

## 2.4 단위반응 수치계산 수법

HCCI 연소를 시뮬레이션 하기 위해 단위반응을 고려한 계산을 실시했다. 계산에는 CHEMKIN<sup>6)</sup> 및 SENKIN<sup>7)</sup>를 이용해 DME의 반응 스킴에는 Curran's Model 2000<sup>8)</sup>을 이용했다. 계산시의 가정으로서 모든 화학종의 기체는 이상기체로 보고 에너지 보존 및 질량 보존이 성립한다고 가정했다. 체적이력은 RCM의 가스 체적 변화이고 열손실은 고려하고 있지 않다. 또한, EGR 영향을 조사할 때 시시각각과 변화하는 온도에서 어느 단위반응이 열발생에 기여하고 있는지를 평가하기 위해서 기여도 행렬<sup>9)</sup>에 의해 주요한 단위반응을 추출해 고찰했다. 온도, 당량비, EGR에 의한 가스 조성을 성층화 때의 HCCI 연소를 시뮬레이션 하기 위해서 multi-zones 모델의 단위반응 수치 해석을 수행했다. 본 연구에서는 5 존에서 계산을 실시해서 각 존들 간에 물질이나 열



(a)



(b)

Fig. 4 Histories of in-cylinder gas temperature (a: thermal stratification, b: mixing stratification)

의 이동은 없고 압력은 일정하다고 가정 했다.

## 3. 온도 및 당량비의 성층화에 의한 압력 상승을 저감 효과

### 3.1 반응 개시시기의 차이가 생기는 메카니즘

Fig. 4(a)는 온도 성층화로 가정하고 압축 개시시의 온도가 다른 2 종류의 가스를 단열 압축했을 때의 가스 온도 이력의 모식도이다. 압축 도중에 초기

온도차와 비열비의 차이로부터 온도차는 한층 더 확대된다. 고온도의 가스가 먼저 TLTHR<sub>st</sub> 및 THTHR<sub>st</sub>에 이르렀지만, 저온도의 가스는 아직 반응 개시 온도에 이르지 않았다. 이와 같이 LTHR 및 HTHR 개시 전에 온도차가 형성되는 것으로 반응 개시시기의 차이가 발생된다. Fig. 4(b)는 당량비 성층화로 가정하고 압축 개시시의 당량비가 다른 2 종류의 가스를 단일 압축했을 때의 가스 온도 이력의 모식도이다. 압축 개시시의 온도는 동일하지만 압축 도중에 비열비의 차이로부터 가스 온도차가 발생된다. 그 때문에 저당량비의 가스가 먼저 TLTHR<sub>st</sub>에 이른다. 하지만, 고당량비의 가스는 TLTHR<sub>st</sub>에 늦게 도달하지만 DME와 같이 LTHR의 양이 당량비에 크게 의존되는 연료에서는 고당량비의 가스가 LTHR 종료 후의 온도가 저당량비의 가스에 비해 높아지므로 인해 HTHR 개시전의 온도차가 생겨 HTHR 개시시기의 차이가 발생된다.

### 3.2 HCCI 연소 실험에 의한 검토

온도와 농도의 성층화에 의한 HCCI 연소에의 영향을 보기 위해서 RCM를 이용한 HCCI 연소 실험을 실시했다. 모든 실험 조건에 대해 예혼합기의 급기류량  $F_{in}=0.24$  l/s 및 압축 개시시의 가스 질량 평균 온도  $T_c(0)=352\pm 1$  K, 평균 당량비  $\phi=0.17$ 은 일정으로 하고 모든 급기구로부터 같은 온도 및 당량비로 급기 한 조건(case-1), 위로부터 고온으로 급기하고 모든 급기구로부터 같은 당량비로 급기 한 조건(case-2), 고온도 가스의 당량비가 높아지도록 한 조건(case-3), 저온도 가스의 당량비가 높아지도록 한 조건(case-4)으로 했다. 다만, 압축 개시시의 온도차  $\Delta T_c(t=0)$ 는, K형 열전대( $\phi=0.1$ mm)에 의해 압축 개시전의 연소실내 가스 온도를 다수로 측정해 도출한 온도 분포의 최고 온도와 최저 온도의 차이이며 당량비차  $\Delta\phi(t=0)$ 는 급기시의 당량비차를 나타낸다.

각 조건에 있어서의 압력 상승률과 연소 기간의 관계를 Fig. 5에 나타냈다. 온도의 성층화에 의한 효과를 확인했다. 당량비가 균일한 case-1으로 case-2를 비교하면 예혼합기의 온도차  $\Delta T_c(0)$ 가 26 K에서

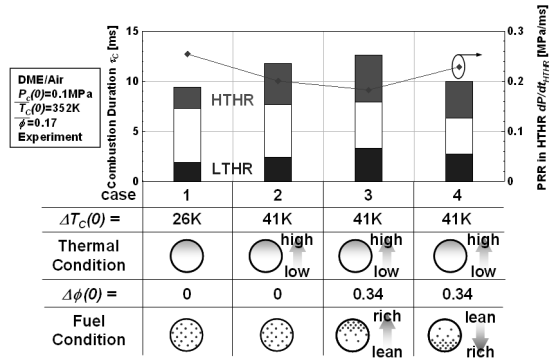


Fig. 5 Effect of thermal and mixing stratifications on PRR and combustion duration

41 K가 되는 것으로 약 21%의 압력 상승률의 저감과 동시에 LTHR 및 HTHR 기간이 장기화되었다. 또한, 온도성층화와 농도성층화를 조합했을 경우, 온도성층화만의 case-2에 대해서 고온도 가스의 당량비가 높은 case-3에서는 한층 더 압력 상승률은 저감되었다. 하지만, 저온도 가스의 당량비가 높은 case-4에서는 증가되었다. 이것은 DME의 LTHR 량이 당량비에 의존하기 때문에 고온도 가스의 당량비가 높으면 LTHR 량이 큰 것으로부터 LTHR 종료시에 의해 큰 온도차가 생기고, HTHR 개시시기가 펼쳐졌기 때문에 라고 생각된다.

## 4. EGR의 성층화에 의한 압력 상승률 저감 효과

### 4.1 화학반응 수치해석

EGR의 가스 조성이 HCCI 연소에 미치는 영향에 대해서 단위반응에 주목해 보기 위해서, 연소실내 가스중의 EGR율을 파라메타로서 HCCI 연소의 단위반응 수치 해석을 실시했다. 전계산 조건에 대하고, 연료는 DME, 투입 열량  $Q_{in}=5800$  J, 압축 개시시 가스 질량 평균 온도  $T_c(0)=403$  K, 압력  $P_c(0)=0.1$ MPa를 일정으로 했다. 가정한 EGR는 =1.0(DME)의 완전 연소시의 것이며 가스 조성의 몰비는  $N_2 : Ar : CO_2 : H_2O = 78 : 1 : 14 : 21$  이다. EGR율은 연소실내 가스 체적에 차지하는 EGR 체적 비율이라고 정

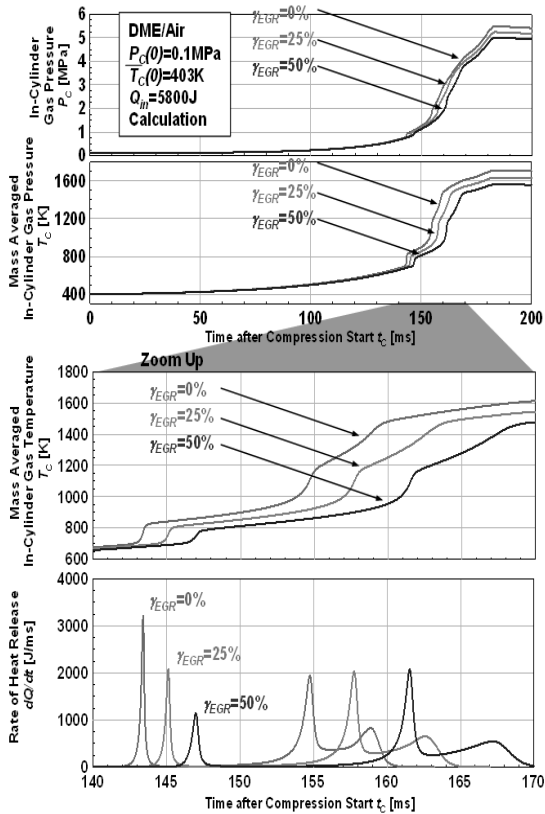


Fig. 6 Effects of EGR ratio on histories of in-cylinder gas pressure, temperature and RHR

의한다. Fig. 6에 EGR율이 0%, 25%, 50%인 HCCI 연소시의 압력·온도·열발생 등의 이력을 나타낸다.

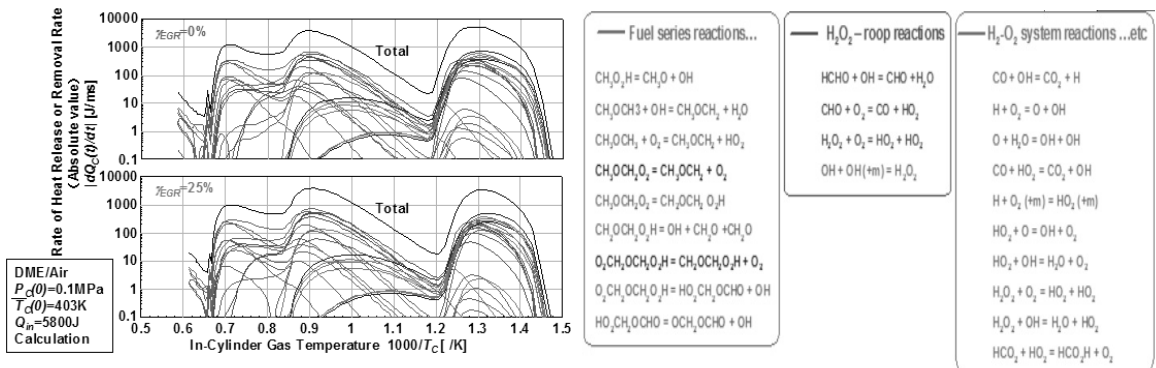


Fig. 7 Effects of EGR ratio on RHR of elementary reactions

EGR의 증가에 의해서 연소 반응 개시시기의 지연화 및 최고 도달 압력·온도의 저하를 확인할 수 있다. 이것은 EGR중의 CO<sub>2</sub>나 H<sub>2</sub>O의 비열비가 공기에 대해서 낮기때문에 온도 상승이 완만하게 된 것으로 생각된다. 각 물질의 비열비(403 K시)는 κ(N<sub>2</sub>)=1.396, κ(O<sub>2</sub>)=1.379, κ(Ar)=1.667, κ(DME)=1.114, κ(CO<sub>2</sub>)=1.251, κ(H<sub>2</sub>O)=1.318이다. 또한 LTHR에 의한 열발생량이 저하되고 HTHR의 개시시기가 한층 더 지연화 되었지만, O<sub>2</sub>농도가 저하한 것에 의하는 것이라고 생각할 수 있다.

아울러, EGR로 인하여 반응경로에 미치는 영향에 대해서도 조사했다. 주요한 단위반응의 열발생률과 전체의 열발생률과의 관계를 Fig. 7에 나타냈다. 주요한 단위반응이란 총열발생량에 대해서 5% 이상의 기여도를 한 번이라도 가지는 반응으로 정의했다. Fig. 7에서 우측의 산을 LTHR시의 열발생으로 좌측의 2단의 산을 HTHR시의 열발생을 나타낸다. EGR율이 변화해도 각 단위반응에 의한 열발생의 기여도는 그만큼 영향을 받지 않았고 LTHR시의 발열량이 전체적으로 줄어 들었다. 다시말해서, EGR율이 증가하면 비열비의 영향으로부터 연소 개시시기가 지연화되는 것과 O<sub>2</sub>농도의 저하로 말미암아 수반되는 LTHR시의 열발생량의 저하로부터 HTHR 개시시기가 지연되는 것이 열발생에 기여하는 주요한 반응 경로에 큰 차이는 볼 수 없는 것이 확인되었다.

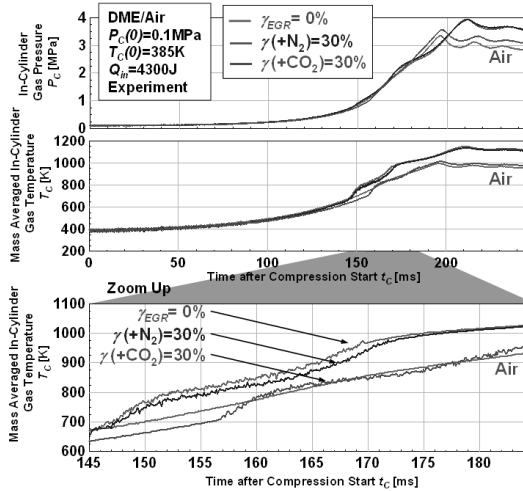


Fig. 8 Effects of N2 and CO2 on histories of gas temperature

## 4.2 실험에 의한 해석

4.1에서 나타낸 것을 실험으로 확인하기 위해 연료와 공기의 예혼합기의 조건 EGR의 대부분(약 68%)을 차지하는 N<sub>2</sub>와 비열비를 저하시키는 효과를 가지는 CO<sub>2</sub>를 각각 단독으로 30%첨가한 조건으로 연소 실험을 실시했다. HCCI 연소 실험 결과의 가스 압력·온도 이력을 Fig. 8에 나타낸다. N<sub>2</sub>를 전체의 30% 더 추가한 조건에서는 추가하지 않는 조건에 비해서 비열비는 거의 같지만 O<sub>2</sub>농도가 저하되었다. 그 때문에 LTHR 개시시기는 거의 같지만 LTHR 시의 온도상승량이 달라서 HTHR 개시시기가 더 지연화 되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 공기이외에 CO<sub>2</sub>를 전체에 30% 추가한 조건에서는 비열비가 낮아진 것에 의해 온도 상승이 완만하게 되어 LTHR 개시시기가 지연화되는 것을 확인할 수 있다.

## 4.3 EGR의 성층화에 의한 압력 상승을 저감 효과의 해석

4.1 및 4.2절에서 EGR가 많은 영역에서는 가스 조성의 영향으로 LTHR 및 HTHR 개시시기가 지연화되는 것을 확인되었다. 여기에 EGR에 의한 가스 조성을 성층화로 하면 국소에 있어서의 열발

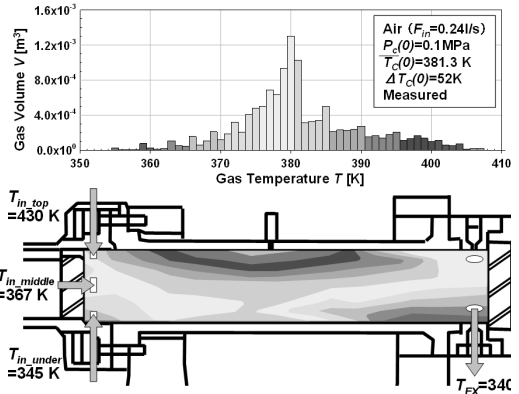


Fig. 9 Gas temperature histogram (upper figure) and Thermal distribution (lower figure)

생 시기를 분산할 수 있다고 생각할 수 있어서 한층 더 온도 성층화와 조합하면 보다 더 큰 효과를 기대할 수 있다고 생각할 수 있다. 연소실내에 가스 온도의 성층화 분포를 형성해서 HCCI 연소 실험을 실시했다. 가스 온도 분포를 Fig. 9에 나타낸다. 가스질량평균온도  $T_c(0)=381.3$  K, 온도차  $T_c(0)=52$  K이며 연소실 상부측의 가스 온도가 높은 온도 분포이다. EGR로서 공급한 가스는 실제의 EGR율시와 같은 비열비 및 O<sub>2</sub>농도가 되도록 N<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>의 첨가 비율을 조정했다. EGR중의 CO<sub>2</sub> 몰분율은 20.7%로 조정했다.

모든 조건에서 투입열량  $Q_{in}=4077$  J로 해서 1) EGR율을 EGR=0%로 한 조건, 2) EGR율을 EGR=33%로 EGR를 균일급기 한 조건, 3) EGR율 EGR=33%로 고온가스중의 EGR량을 많이 한 조건, 4) EGR율 EGR=33%로 저온가스중의 EGR량을 많이 한 조건으로 실험을 실시했다. Fig. 10은 실험시의 가스압력·온도이력을 나타낸다. EGR의 증가에 의해서 LTHR 개시시기가 지연화 되었고 동시에 LTHR 시의 온도상승폭이 감소된 것을 알 수 있다. EGR성층화효과에서 고온가스중에 EGR이 많은 경우에는 EGR 균일급기시보다 압력상승이 매우 급한 연소가 되지만 저온가스중의 EGR가 많은 경우에는 연소가 완만하게 되었다. 이것은 저온도 가스의 비열비가 낮고 O<sub>2</sub>농도도 낮은 것으로부터 온도성층화만 HTHR

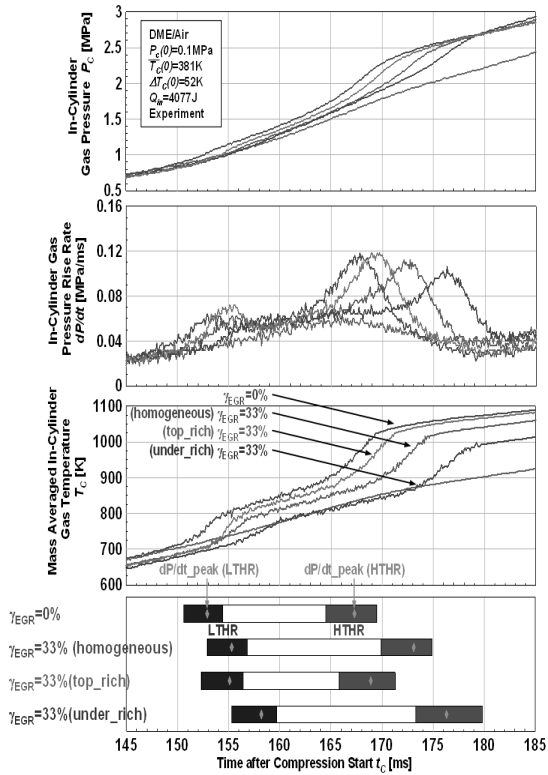


Fig. 10 Effects of EGR stratification on histories of in-cylinder gas pressure, temperature, PRR, combustion duration

개시시기가 한층 더 늦기 위해서 생겼다고 생각할 수 있다. 이로부터 저온 가스층의 EGR를 증가시켜서 한층 더 압력 상승률을 저감할 수 있다.

### 5. 성층화급기에 의한 압력 상승률 저감 효과

온도, 당량비, EGR에 의한 가스 조성 단독으로의 성층화에 의한 압력 상승률 저감 효과를 비교하기 위해서 5 존의 단위반응 수치계산을 실시했다. 압축 개시시 가스 압력  $P_c(0)=0.1$  MPa, 질량 평균 온도  $T_c(0)=353$  K, 투입 열량  $Q_{in}=6621$  J로 했다. 또한 온도 및 농도성층화의 경우에는 EGR을 EGR = 0%, EGR 성층화의 경우에는 EGR을 EGR = 30%로 했다.

Fig. 11은 초기 가스 온도·당량비·EGR율의 차이와 반응 개시시기의 차이의 관계 및 HTHR중의 압력 상승률과의 관계를 나타낸다. LTHR 및 HTHR의 개시시기는 각각의 개시 온도를 넘었을 때로 했다. LTHR 개시시기의 차이는 단일 압축시의 비열비의 차이로부터 발생하는 것이다. 그 때문에 농도성층화 및 EGR에 의한 가스 조성의 성층화에서는 LTHR 개시시기의 차이가 1ms미만 밖에 얻지 못하고 온도 성층화의 효과보다 작은 것이 확인

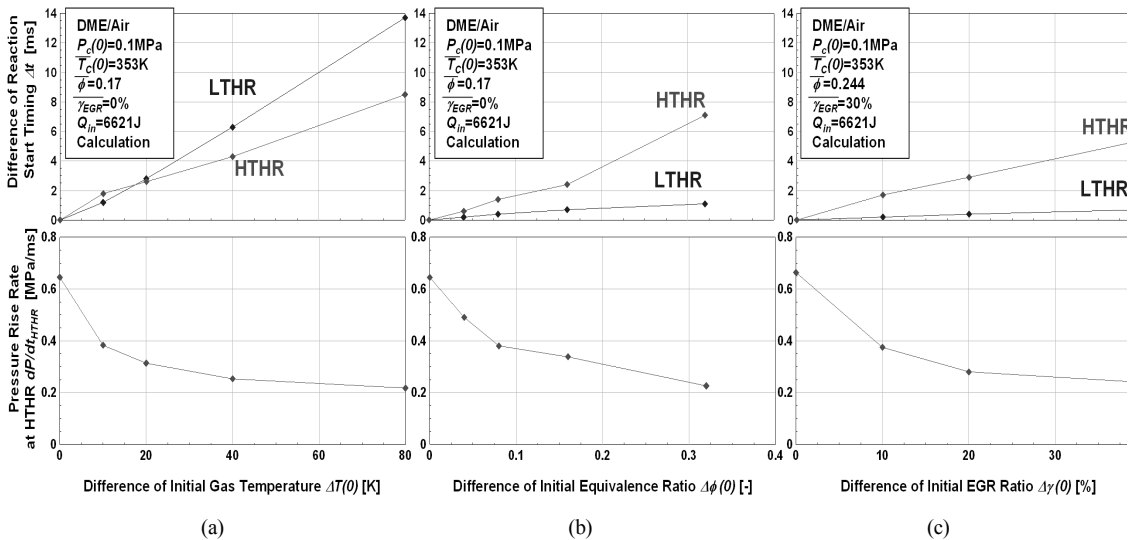
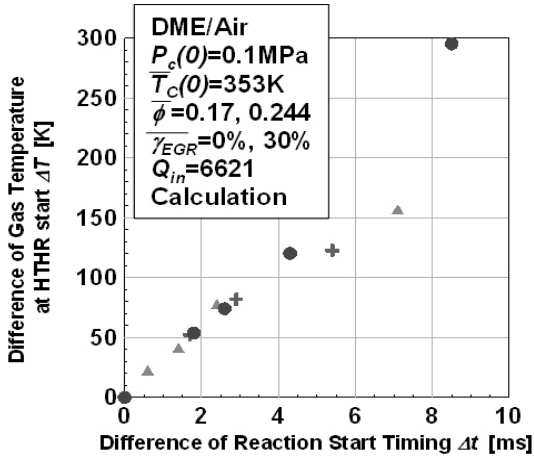
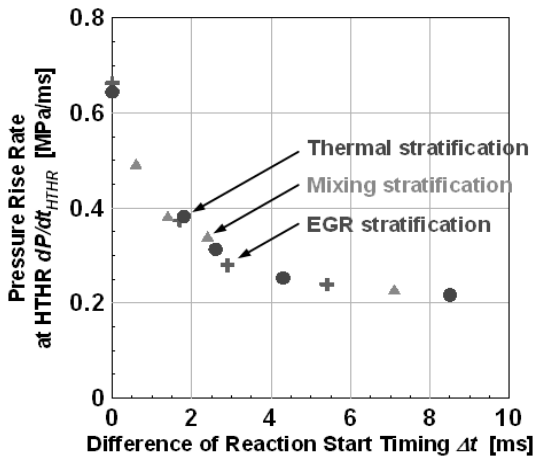


Fig. 11 Effects of thermal, mixing and EGR stratifications on reaction start timing and PRR (a: thermal stratification, b: mixing stratification, c: EGR stratification)





(a)



(b)

Fig. 12 Relationship of difference of HTHR start timing and temperature difference, PRR at HTHR

된다. HTHR의 개시시기의 차이에 대해서는 어느 성층화에서도 거의 선형적으로 확대되고 있다. HTHR 시의 압력 상승률은 약 0.25MPa/ms까지 저감 되면 거의 수렴되는 한계와 같이 보인다. 성층화에 의해서 반응 개시시기의 차이를 펼쳤다고 해도 압력 상승률의 저감 효과에서 한계값이 존재해서 수렴된다는 것을 시사하고 있다. 이것은 장치에 의한 가스 압축의 압력 상승률이 연소하지 않는 경우에서도 약 0.08MPa/ms인 것부터 연소할 때의 최저의 압력

상승률에 가까워졌기 때문이라고 생각할 수 있다. 이 결과로부터 연소 반응의 개시시기의 차이는 비열비의 차이에 의한 영향보다는 온도 성층화시의 초기의 온도차 당량비나 EGR에 의한 가스 조성의 성층화에 의한 LTHR 종료후의 온도차에 의한 영향을 강하게 받고 있다.

HTHR 개시시기의 차이와 개시 직전의 온도차와 압력 상승률의 관계를 Fig. 12에 나타낸다. Fig. 12로부터 온도, 당량비 및 EGR에 의한 가스 조성의 성층화에 대해서도 HTHR 개시 직전의 온도차와 HTHR 개시시기의 차이에 상관성이 있고 HTHR시의 압력 상승률을 결정하고 있다고 말할 수 있다.

각각의 성층화가 가지는 압력 상승률 저감 효과를 비교하기 위해서 가스 조성이 균일한 HCCI 연소시의 압력 상승률을 50%저감 시키는 경우에 대해 검토하면 Fig. 11으로부터 온도차에서는 약 -20 K, 연료 농도차이에서는 약  $\Delta\phi=0.16$ , EGR율의 차이에서는 EGR=15%의 성층화가 필요하다고 할 수 있다.

## 6. 결 론

HCCI 연소에 있어서의 성층화급기에 의한 압력 상승률 저감 효과를 조사해서 이하의 지견을 얻었다.

- 1) EGR중의 조성( $\phi=1$ 의 완전 연소로 가정했을 경우)이 HCCI 연소에 미치는 영향에 관해서 주요한 반응 경로에는 큰 영향이 없고 EGR의 증가에 수반하는 ‘O<sub>2</sub>농도의 저하’ 및 ‘비열비의 저하’에 의한 LTHR 개시시기의 지연 및 LTHR량의 감소, HTHR 개시시기의 지연이 주로 생긴다.
- 2) 성층화급기는 초기 가스의 온도·당량비·EGR율 차이에 의해 LTHR, HTHR 개시 시에 연소실의 가스온도차를 형성한다. 이는 연소실 국소 가스의 열발생시기를 분산시키고 연소 기간을 증가시켜 압력 상승률을 저감시킨다.
- 3) 5준 모델에 의한 단위반응 수치 해석에 의하면 예혼합기 온도, 당량비 및 가스 조성이 균일한 HCCI 연소시의 압력 상승률을 50%저감 시키는

경우, 온도차에서는 약  $\Delta T=20$  K, 당량비차에서는 약  $\Delta \Phi=0.16$ , EGR율의 차이에서는 EGR =15%의 성층화가 필요하다.

- 4) 실제 엔진에서 성층화급기를 실시했을 경우 온도, 당량비 그리고 가스 조성의 영향이 각각 간섭하게 된다. 이러한 상호작용을 조사한 결과 각각 ‘고온 가스의 당량비가 높고, 저온 가스의 당량비가 낮은 경우’, ‘고온 가스의 EGR율이 낮고 저온 가스의 EGR율이 높은 경우’에 긍정적인 효과를 미치는 것을 알 수 있었다. 이 조건에서 HTHR 개시 시기를 보다 분산할 수 있기 때문에 압력 상승률 저감효과가 크다고 볼 수 있다.

## 후 기

본 과제는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업과 울산과학연구단지육성사업의 연구비 지원 그리고 지식경제부의 산업원천사업인 클린신연료 동력시스템개발에 관한 연구에 의해 수행되었으며 지원에 관한 관계자 여러분께 심심한 감사의 말씀드립니다.

## 참 고 문 헌

1) Morgan M. Andreae, Wai K. Cheng, Thomas Kenney, Jialin Yang, On HCCI Engine Knock, SAE 2007-01-1858, 2007.  
 2) Dongwon Jeong, D. Amarabayar, Ocktaeck Lim, An Investigation of Effects of Fuel Stratification and Cooled EGR on DME HCCI Engine's Operating Ranges by Numerical

Analysis, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 21, No. 2, pp.1-7, 2010

3) 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.  
 4) Ocktaeck Lim and Kyueol Park, “An Investigation on the Effect of Fuel Stratification of DME/n-Butane mixture on Reduction of Pressure Rise-Rate in HCCI Combustion”, KIGAS Vol. 15, No. 3, pp. 8-15, 2011.  
 5) Luz A.E., Rupley F. And Miller J.A., Sandia National Laboratories Report, SAND87-8248B, 1988.  
 6) Luz A.E., Rupley F. And Miller J.A., Sandia National Laboratories Report, SAND89-8009B, 1989.  
 7) H.J.Curran, W.J.Pitz, C.K.Westbrook, P.B. Dagaunt, J-C Boettner and M.Cathonnet, 30-3, 2000, pp. 229-241.  
 8) K.Kuwahara and H.Ando :Role of Heat Accumulation by Reaction Loop Initiated by H2O2 Decomposition for Thermal Ignition, SAE technical Paper No. 2007-01-0908, 2007.  
 9) Ocktaeck LIM, “An Investigation of a Stratified Charge Mixture's HCCI Combustion Processes Using a Rapid Compression Machine”, KSAE paper Vol. 18, No. 6, 2010, pp. 1-8.