

## 온도 성층화를 이용한 DME HCCI 엔진의 운전 영역 확장에 관한 수치해석 연구

정동원\*, 권오석\*, 백영순\*\*, 임옥택†

\*울산대학교, \*\*한국가스공사

## Prediction of the Viable Operating Range of DME HCCI Engine Using Thermal Stratification Based on Numerical Analysis

DONGWON JEONG\*, OSEOK KWON\*, YOUNGSOON BACK\*\*, OCKTAECK LIM†

\*School of Mechanical & Automotive Engineering, Ulsan Univ., Mugeo-dong, Ulsan 680-749, Korea  
\*\*KOGAS, 93 Dolmaro(215, Jeongja-dong), Bundang-gu, Seongnam, Gyeonggi-do, 463-754, Korea

### ABSTRACT

A multi-zone model was used to predict the operating range of homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine, the boundaries of the operating range were determined by knock (presented by ring intensity), misfire (presented by sensitivity of indicated mean effective pressure to the initial temperature). A HCCI engine fueled with Di-Methyl Ether (DME) was simulated under different initial temperature and equivalence ratios, and the operating range was well produced by the model. Furthermore, the model was applied to develop the operating range for thermal stratification in the preceding condition of initial temperature and equivalence ratios. The computations were conducted using Senkin application of the CHEMKINII kinetics rate code.

**KEY WORDS** : HCCI(예혼합자기착화), Rate of pressure rise(압력상승률), Thermal stratification(온도성층화), DME(디메틸에테르), Multi-zone model(온도성층화모델), Single-zone model(온도균일모델), Knocking(노킹), Ringing intensity(노킹강도)

### Nomenclature

HCCI	: homogeneous charge compression ignition	HTR	: high temperature reaction
RI	: ringing intensity	IMEP	: indicated mean effective pressure
LTR	: low temperature reaction	CA50	: location of 50% burned fuel

†Corresponding author : otlim@ulsan.ac.kr



# 1. 서 론

예혼합압축자기착화(homogeneous charge compression ignition: HCCI) 엔진은 예혼합된 공기와 연료를 연소실내에 흡입한 후 피스톤의 단열 압축에 의해 착화시키는 기관이다. 예혼합된 공기와 연료가 매우 희박한 상태에서 연소되기 때문에 NOx와 PM의 생성이 적고 CI 엔진과 같이 압축비가 높으므로 열효율이 높다. 하지만 HCCI 엔진은 다중 점화에 의해 예혼합된 공기와 연료가 연소되기 때문에 과도한 열 발생률과 급격한 압력 상승률이 일어난다. 급격한 압력 상승률은 노킹(knocking)의 발생 가능성을 높이기 때문에, HCCI엔진이 고 부하영역에서 작동하기 위해서는 노킹 문제가 해결되어야 한다. 최근 논문에서는 급격한 압력 상승률 저감을 위한 방법으로 연소 위상을 지연시키는 방법<sup>1-2)</sup>, 예혼합기의 온도 또는 연료의 농도 성층화를 통해 점화시기를 시간적 공간적으로 분산시키는 방법<sup>3)</sup> 등이 제안되고 있다. Magnus는 수치 계산을 통해 예혼합기에 온도 성층화가 존재하면 실린더 내의 압력 상승률이 저감되고, 온도 성층화 폭이 클수록 압력 상승률의 저감 효과가 증대됨을 확인했다<sup>1)</sup>. 실린더 내에 국부적으로 온도가 높은 부분부터 점화가 일어나고 연소 시점이 분산됨에 따라 분산되고 압력 상승률이 저감된다. 하지만 예혼합기의 온도 성층화 폭의 크기와 압력 상승률 저감의 관계가 명확하지 않고, 온도 성층화에 따른 HCCI 엔진 성능, 배기가스 특성이 어떻게 변하는지 모른다.

DME(dimethyl ether, CH<sub>3</sub>OCH<sub>3</sub>) 세탄가가 55 정도로 높기 때문에 엔진 실린더 내에 분사하여 압축 착화 연소가 가능하여 CO<sub>2</sub>의 배출이 적다. 또한 산소 함유율이 34.8%로 높고 희박한 상태에서 압축 착화 연소가 가능하기 때문에 PM과 NOx의 생성이 적어 신에너지로써 주목받고 있다.

본 연구에서는 수치 해석을 통해 먼저 예혼합기의 온도 성층화가 압력 상승률에 미치는 메커니즘을 설명했다. 설명된 메커니즘을 바탕으로 온도 성층화 폭의 크기와 압력 상승률 저감의 관계를 제시하였다. 위의 조건에서 당량비와 초기 온도를 변화시켜 HCCI 엔진이 운전되는 영역을 확인한 후 온도

Table 1 Test fuels

Name	Normal Butane	Di-Methyl Ether
Molecular Structure		
Self Ignition Temperature[K]	678	623
Molecular mass[g/mol]	58.123	46.069
Lower heating value[MJ/kg]	45.6	28.8
LTR	O	O
Ratio of Heat Release in LTR[%]	4-12	25-40

성층화 조건에서 나타나는 운전 영역과 비교하였다.

## 2. 시뮬레이션

### 2.1 실험연료

수치 계산에 사용된 연료는 DME(di-methyle ether)이다. DME는 2 단계 열 발생을 가지며 저온 산화 반응(low temperature reaction: LTR)과 고온 산화 반응(high temperature reaction: HTR)이 있다. Table 1은 DME와 n-Butane의 물성치를 나타냈다. DME와 n-Butane은 LTR이 존재하는 연료이며, DME는 n-Butane보다 총 열 발생 중 LTR 기간에서 발생하는 열의 비율이 높다. LTR기간에서 발생한 열은 HTR 발생 시점을 앞당기며, 발생한 열이 클수록 HTR이 빨리 일어난다. 실린더 내에 온도 성층화가 존재할 경우 LTR 기간에서 발생한 열에 의해 성층화 폭이 증가되면서 HTR 발생 시점이 분산됨에 따라 연소가 순차적으로 일어나므로 압력 상승률이 저감될 것이라고 예상 된다.

### 2.2 계산방법

수치 계산에 사용된 프로그램은 sandia national laboratory에서 개발된 CHEKINI와 일부 개량된 SENKIN이며, DME의 반응 스킴으로 curran의 스킴(화학종수: 78, 단위반응수: 336)을 사용하고, NOx의 반응 스킴으로 확대 Zeldvich 기구를 고려한 모델을 사용했다<sup>6)</sup>. Table 2는 수치 계산에 사용된 yanmar 단기통 엔진의 제원이다. Fig. 1은 실

Table 2 Engine Specification

Process	Only 1 Compression & Expansion
Bore × Stroke	112mm × 115mm
Displacement	1132cc
Length of Control	205mm
Crank Radius	57.5mm
Intake Valve Close	ATDC-132°
Exhaust Valve Open	ATDC-132°
Compression	8.0

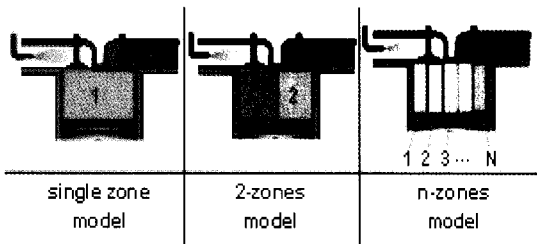


Fig. 1 Schematic of N-zone model.

린더의 온도 성층화 조건에 대한 모델을 나타내며 single-zone model은 실린더내의 조건(당량비, 초기 온도 등)이 동일함을 타나 내며 2-zone model은 N-zone 모델의 하나로 두 zone간의 조건은 다르지만 각 zone에서 가스 온도가 균일하고 화학 조성이 균질 한 0차원 모델이다.

수치 계산의 범위는 흡입밸브가 닫힌 직후부터 배기 밸브가 열리기 직전까지이며 이하의 가정을 기초로 1회의 압축, 팽창 행정 중에 닫혀 있는 가스의 열역학적 특성을 계산했다<sup>7,8)</sup>.

- 모든 기체는 이상기체 (1)
- 모든 에너지는 보존 (2)
- 모든 질량은 보존 (3)
- 열 전달과 질량 전달은 없음 (4)

N-zone model은 각 zone에서 가스 온도가 균일하고 화학 조성이 균질한 0차원 모델이다. 각 zone간의 열량 및 화학 종의 이동은 없고 압력이 동일 하도록 변화시켰으며 실린더 내의 가스 평균온도,

$T_0$ 는 총 에너지 보존식 (4)를 이용하여 계산 했다.

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

$$Cv \frac{dT}{dt} + P \frac{dv}{dt} + q_{REAC} = 0 \tag{2}$$

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

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^N (n_i \cdot c_{p,i} \cdot T_{c,i})}{\sum_{i=1}^N (n_i \cdot c_{p,i})} \tag{4}$$

- N : Number of zones
- $n_i$  : Number of moles
- $C_{p,i}$  : Specific heat at constant pressure of  $i$ th zone

초기 온도의 증가에 따른 단위 사이클당 투입열량,  $Q_{in}$ 을 계산한 식 (5)은 다음과 같다.

$$Q_{in} = \sum_{i=1}^N n_i \cdot \left( Q_{LHV} \cdot \frac{FA_i}{1 + FA_i} \right) \tag{5}$$

- $Q_{LHV}$  : Low heat value of DME
- $FA_i$  : Volume ratio of fuel to air of  $i_{th}$  zone

실제 엔진의 경우, 실린더 내부의 유동 및 벽면으로 열전달 등과 같은 요인들이 있다. 하지만 수치계산을 하는 동안, 초기 온도 및 농도의 불균질 정도가 엔진 연소에 미치는 영향을 알아보기 위해서 열전달, 열손실, 블로우 오프와 잔류 가스는 고려하지 않았다<sup>7,8)</sup>.

### 2.3 LTR 과 HTR의 시작시점 및 종료시점, 50% 열 발생 시점에 대한 정의

Fig. 2는 온도 균일 조건(single zone model, homogeneous)에서 나타나는 열 발생률(J/deg)과 특정 크랭크 각도까지 발생한 총 열 발생의 합( $\sum dQ/d$

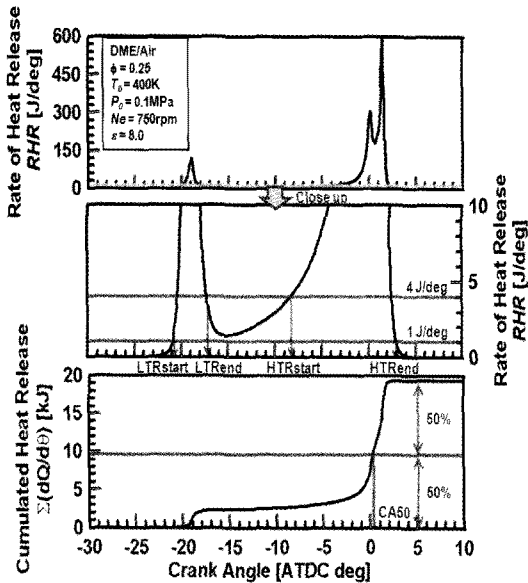


Fig. 2 Definition of start timing and end timing of LTR, HTR and 50% heat release timing.

θ))을 보여준다. 열 발생률을 통해 저온산화반응(low temperature reaction, LTR)의 시작 시점(LTRstart)과 종료 시점(LTRend) 및 고온산화반응(high temperature reaction, HTR)의 시작 시점(HTRstart)과 종료 시점(HTRend)을 정의하였으며, 총 열 발생의 합을 근거로 총 50% 열 발생 지점(CA50)을 찾았다. 본 연구에서 정의한 LTRstart는 압축행정이 시작된 후 처음으로 열 발생률이 1J/deg에 도달하는 시점이고 LTRend는 LTR기간 중에서 최고 열 발생률이 지난 이후에 열 발생률이 4J/deg에 도달하는 지점으로 정의했다. HTRstart는 LTR기간 중에서 최고 열 발생률이 지난 이후에 열 발생률이 4J/deg에 도달하는 지점으로 정의했다. HTRstart는 LTR기간이 종료된 이후에 처음으로 열 발생률이 4J/deg에 도달하는 지점이고, HTR기간 중에서 최고 열 발생률이 지난 후에 열 발생률이 1J/deg인 지점을 HTRend로 정의했다. 여기서 LTRend는 LTR과 HTR 사이의 기간 중에서 열 발생률이 최소가 되는 값으로 정의하고자 하였지만 LTR과 HTR 사이의 기간에 대한 정의가

분명하지 않아 LTR기간에서 열 발생률이 최소가 되는 지점을 알 수 없기 때문에 열 발생률이 4J/deg인 지점으로 정하였다.

### 3. 수치 계산 결과

#### 3.1 온도 성층화가 HCCI 엔진의 압력 상승률 저감에 미치는 영향에 관한 수치 해석

##### 3.1.1 온도 성층화가 존재하는 2-zones model을 통한 압력 상승률 저감에 관한 메커니즘 연구

온도 성층화가 존재하는 2-zone model의 수치 해석을 통해, 온도 성층화에 따른 실린더 내의 가스 압력, 실린더 내의 가스 온도, 열 발생률에 대한 변화를 확인하고, 압력 상승률 저감에 관한 메커니즘을 확인했다. 엔진 회전 속도 750rpm, DME/Air의 당량비는 0.25, 압축 시작시의 초기 평균 온도,  $T_{avg}$ 는 400K, 압축비는 8, 각 zone의 압축 시작시의 초기 압력,  $P_0$ 는 0.1MPa이다. Fig. 3은 온도 성층화가 존재하는 실린더를 초기 조건과 함께 도식적으로 나타낸 것이며 초기 온도,  $T_0$ 는 380K(zone1), 420K(zone2)로 설정했다. 오직 실린더 내의 온도 성층화와 압력 상승률간의 메커니즘을 확인하기 위해 두 zone의 체적비를 변화시켜 각 zone에 한 사이클당 투입되는 열량이 400.2J/cycle로 동일하게 맞추었다. Fig. 4는 흡기 밸브가 닫히고 난 직후, 압축 행정이 진행되면서 일어나는 실린더 내의 가스 압력과 실린더 내의 가스 온도의 변화를 나타낸다. CHEMKINII 프로그램에서 N-zone 모델의 실린더 내 압력 변화는 각 zone의 압력 값을 평균하여 나타내므로 zone의 조건에 상관없이 동일하다<sup>6)</sup>. 실린더내의 가스 온도는 초기 온도,  $T_0$ 가 높은 zone이 크지만 곡선 형태는 유사하다. zone1의 최고 온도,  $T_{zone1,max}$ 는 1658k이고 zone2의 최고 온도,  $T_{zone2,max}$ 는 1790K이다. Fig. 5는 Fig. 4에서 나타낸 압력 그래프와 온도 그래프를 확대하고 그때의 열 발생률을 보여준다. LTRstart온도는 744°

3K이고 HTRstart온도는  $1007 \pm 5K$ 으로 두 zone에서 일정하다. 압축 행정이 진행됨에 따라 실린더 내의 가스 온도가 증가하면서 각 zone간의 초기 온도 차, 40K은 LTRstart 직전에는 65.7K으로 25.7K 증가했으며 HTRstart 직전에는 80.6K으로 40.6K 증가했다. zone2에서는 zone1보다 LTRstart는 9.3deg 먼저 발생하고, HTRstart는 4.3deg 먼저 발생했다. 압축 행정이 진행되면서 각 zone 간의 온도 성층화 폭이 점점 커지면서 초기 가스 온도가 높았던 zone에서 LTRstart이 먼저 발생한다. LTR기간에서 발생된 열에 의해 온도 성층화 폭이 더욱 커지고 온도가 높은 zone에서부터 HTRstart이 먼저 발생하면서 각 zone 간의 점화 시기가 분산됨에 따라 연소가 순차적으로 일어나므로 실린더 내의 압력 상승률이 저감 된다.

### 3.1.2 온도 성층화가 존재하는 Multi-zones model을 통한 최대 압력 상승률 저감에 관한 연구

Multi-zone model의 하나인 5-zone model를 이용하여 온도 성층화 폭의 크기에 따른 최대 압력 상승률의 변화를 알아보기 위한 수치 해석을 실시하였다. 본 연구에서 고려한 세가지 온도 성층화 조건은 ① 각 zone 간의 온도가 균일한 경우( $\Delta T=0K$ , homogeneous), ② 초기 평균 온도를 중심으로 최대 온도를 나타내는 zone과 최소 온도를 나타내는 zone 간의 온도 차이가 20K 인 경우( $\Delta T=20K$ )와 ③ 40K( $\Delta T=40K$ )인 경우이며, Fig. 6에 각 조건을 도식적으로 나타내었다. 압축 시작시의 초기평균 온도,  $T_0$ 는 303K 과 503K 사이에서 변화시켰다. 실화(misfire)가 발생하지 않는 최소 초기 평균 온도를 확인하기 위해 낮은 온도 영역인 303K과 353K 사이에서는 10K 간격으로 수치 해석했다. 다섯개 zone의 체적비를 변화시켜 한 사이클 당 각 zone에 투입되는 열량을 동일하게 맞추었으며, 투입 열량은 온도 성층화 폭의 크기에 관계 없이 초기 평균 온도,  $T_0$ 에 의해 결정된다. Table 3은 각 zone 간의 온도가 균일한 조건( $\Delta T=0K$ )일

Table 3 Input calorie value and state of combustion at homogeneous by initial temperature

Initial Temperature, $T_0(K)$	Inputcalorie, $Q_{in}$ (J/cycle)	State of Combustion
303	211.344	Misfire
313	204.591	Misfire
323	198.257	Misfire
333	192.304	Misfire
343	186.697	Partial Burn
353	181.408	Partial Burn
383	167.199	Operation
403	158.901	Operation
423	151.388	Knock
453	141.362	Knock
483	132.582	Knock
503	127.310	Knock

때 수치 계산을 위해 고려한 압축 시작시의 초기 평균 온도,  $T_0$ 와 평균 온도에 의해 각 zone에 투입되는 열량,  $Q_{in}$ 이며 각 조건 나타나는 실린더 내의 연소 상태를 나타낸다. 온도 성층화가 존재하는 조건에서 고려한 초기 평균 온도,  $T_0$ 와 초기 온도에 의해 각 zone에 투입되는 열량,  $Q_{in}$  또한 Table 3과 동일하다. 303K과 333K 사이에서 일어난 실화(misfire)의 발생은 해당 온도 조건에서 모터링하여 얻은 최대 압력 값과 온도 성층화 조건에서 얻은 최대 압력 값 사이의 변동 계수가 5% 이내인 경우이며, 343K, 353K에서 나타난 부분 연소(partial burn)는 연소 효율이 100% 미만인 경우다. 노킹(knocking)의 발생은 ringing intensity(RI) 값을 통해 판단했다. RI는 Eng가 제안한 값으로, HCCI 연소에서 노킹의 발생은  $5MW/m^2$  이상인 경우이며 아래의 식 (6)을 만족한다<sup>9)</sup>.

$$RI = \frac{1}{2\gamma} \times \frac{\left(0.05 \times \left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}\right)^2}{P_{\max}} \times (\gamma RT_{\max})^{0.5} \quad (6)$$

$(dP/dt)_{\max}$  = maximum pressure rise rate

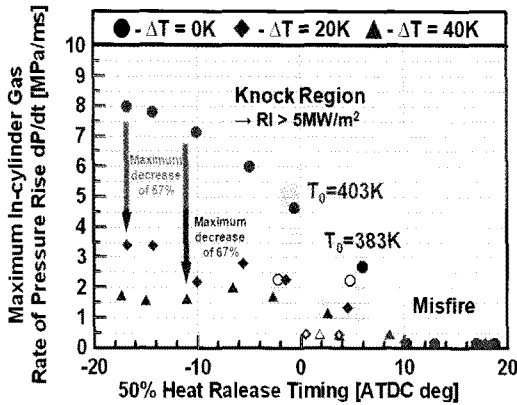


Fig. 7 Maximum in-cylinder gas rate of pressure rise as a function of 50% heat release timing in thermal stratified 5-zone model.

- $P_{max}$  : maximum pressure
- $T_{max}$  : maximum temperature:  $C_p/C_v$
- $R$  : gas constant of air

Fig. 7은 세가지 온도 성층화 조건( $\Delta T=0K, 20K, 40K$ )에서 압축 시작시의 초기 평균 온도,  $T_0(303K \sim 503K)$ 를 변화시켜가며 수치 해석 하였을 때, 50% 열 발생률 시점에 대한 실린더 내의 최대 압력 상승률의 결과이다. 파란색 점은  $\Delta T=0K$ , 붉은색 점은  $\Delta T=20K$ , 보라색 점은  $\Delta T=40K$  인 온도 성층화 조건을 나타낸다. 303K 과 333K 사이에서는 모든 온도 성층화 조건에서 실화가 발생했으며 최대 압력 상승률은 1MPa/ms 이하이다. Fig. 6의 점들 중에서 가운데 부분이 회색 나타난 점은 연소 효율이 100% 미만인 부분 연소를 의미한다. 각 zone 간의 온도가 균일한 조건( $\Delta T=0K$ )에서는 압축 초기 온도,  $T_0$ 가 403K 이상이면 노킹이 발생하지만 온도 성층화 조건( $\Delta T=20K, 40K$ )에서는 초기 평균 온도에 상관없이 노킹이 발생하지 않았다. 각 zone 간의 온도가 균일한 조건에서 나타나는 최대 압력 상승률에 비해 온도 성층화 폭,  $\Delta T$ 가 20K 일 경우, 최대 압력 상승률은 최대 57% 감소했고, 40K 일 경우, 최대 압력 상승률은 최대 67% 감소했다. 실린더 내에 온도 성층화가 존재하면 최대 압력 상승률은 감소하며, 온도 성층화 폭이 클수록 최대 압

력 상승률의 저감 효과는 크다.

초기 평균 온도,  $T_0$ 가 383K 과 403K 인 경우 연소 시점의 차이만 있을 뿐 각 zone 간의 온도가 균일한 조건에서도 노킹과 실화 없이 정상 연소가 일어났다. 초기 온도,  $T_0$ 가 383K 일 경우 50% 열 발생률 시점이 ATDC 영역에서 일어났고 403K 일 경우 BTDC 영역에서 일어났다. 50% 열 발생률의 시점이 ATDC 영역에 존재하면 피스톤의 팽창 행정 시 체적 팽창에 의한 냉각 효과를 이용하여 최대 압력 상승률의 저감 효과를 높일 수 있으며 그 시점이 TDC에 가까울수록 엔진 효율이 증가하고 배출 가스도 저감되리라 예상된다.

피스톤의 팽창 행정 시 체적 팽창에 의한 냉각 효과를 이용하여 초기 압력 증가에 따른 노킹 발생 가능성을 최소화시킨 상태에서 부스터 효과에 따른 HCCI엔진의 연소 특성 변화를 알아보기 위해, 모든 온도 성층화 조건에서 정상 연소가 일어났던 초기 평균 온도 403K 과 383K 중, ATDC 영역에 존재하며 그 시점이 TDC에 가깝다고 판단되는 400K을 다음 연구의 초기 평균 온도,  $T_0$ 로 정했다.

### 3.2 DME HCCI 엔진의 운전 영역 확장에 관한 수치해석

#### 3.2.1 온도 성층화가 존재하는 경우 DME HCCI 엔진의 운전 영역 확장에 관한 수치해석

실린더내의 가스 온도가 균일한 조건( $\Delta T=0$ , homogeneous), 온도 성층화 폭이 존재하는 조건 ( $\Delta T=40$ )의 5-zone model에 대해 DME/Air 당량비와 초기 흡기 온도를 변화시켜 가며 DME HCCI 엔진의 운전 영역 변화에 관한 수치 해석을 실시했다. Fig. 8은 실린더내의 온도가 균일할 경우(회색 부분)와 온도 성층화 폭이 존재하는 경우(회색 부분+붉은 부분 중 검은 점)에 나타나는 운전 영역이다. 검은 점은 운전 가능한 조건, 붉은 점은 knocking(노킹)이 발생한 조건, 파란색 점은 misfire(실화)가 일어난 조건을 나타낸다. 본 연구에서는 RI 값이  $5MW/m^2$  이상이면 노킹이 발생했다고 판단했

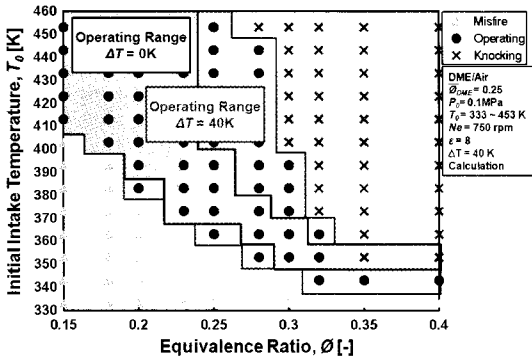


Fig. 8 Operating range for various initial intake temperature at constant intake pressure with thermal stratification.

으며, IMEP 값이 모터링 상태에서 구한 IMEP 값의 5% 이내이면 실화가 발생하였다고 정하였다.

예혼합기에 온도 성층화가 존재하면 각 존 간의 점화 시기 분산으로 인해 실린더 내의 압력 상승률이 저감되고 노킹 발생의 가능성이 줄어든다. 노킹 발생의 가능성이 줄어들면 온도가 균일한 조건에서 노킹이 발생했던 고 부하 조건에서 정상적인 연소가 일어나면서 운전영역이 확장되었다(오른쪽 윗부분). 또한 처음 예상과는 달리 온도가 균일한 조건에서 실화가 발생한 저 부하 조건에서도 영역이 확장 되었다. 온도의 성층화가 존재하는 경우와 온도가 균일한 조건인 경우 모두 실린더 내의 평균 온도는 동일하지만, 5-zone model에서, 온도가 가장 높은 존은 평균 온도 보다 20K 높다. 압축이 시작 되면 온도가 가장 높은 존의 온도는 더욱 증가하여 자발화 온도까지 증가함으로써 정상적으로 연소가 일어난다. 온도가 가장 높은 존에서 일어난 연소로 인해 발생된 열은, 자발화 온도 이하에 있는 존의 온도를 증가시킴에 따라 점화를 촉진시키고, 저 부하 영역에서도 정상적인 연소가 일어나게 한다.

### 3.2.2 DME HCCI 엔진의 운전 영역에서 IMEP에 관한 수치해석

Fig. 9와 Fig. 10은 실린더내의 가스 온도가 균일한 조건과 온도 성층화가 존재하는 조건에서 운전 영역 부분에 나타나는 IMEP(kPa) 값이다. 등고

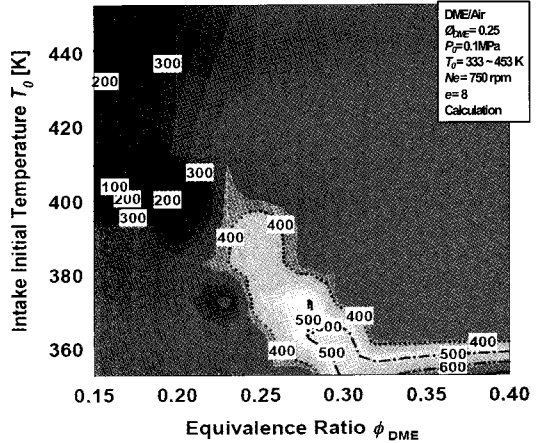


Fig. 9 Indicated mean effective pressure (imep) values (kPa) in the HCCI operational range at  $\Delta T = 0K$ .

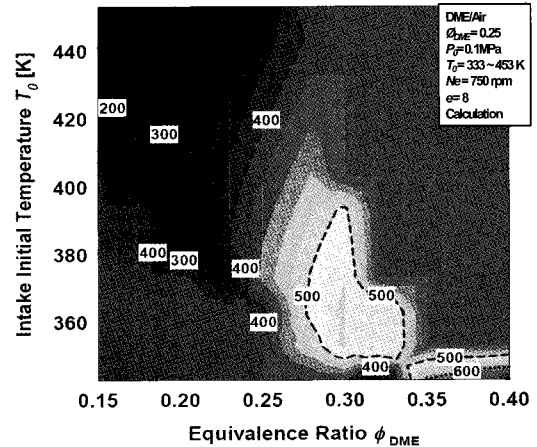


Fig. 10 Indicated mean effective pressure (IMEP) values (kPa) in the HCCI operational range at  $\Delta T = 40K$ .

선이 없는 녹색 부분 중 오른쪽 위는 노킹을 의미 하며왼쪽 아래는 실화를 의미한다. IMEP의 크기는 실린더 내의 온도 성층화 조건에 상관없이 비슷 하지만 유효 IMEP 영역이 크게 증가하였다. 온도 성층화가 존재하는 조건인 경우 IMEP 500kPa 영역이 당량비 0.25에서 0.35 사이에서 초기 흡기 온도 증가와 함께 넓어 졌으며, 당량비 0.15에서 0.25 사이에서는 온도 균일 조건에서 보이지 않았던 IMEP 400kPa 영역이 나타나면서 그 영역이 확장 되고 값이 증가했다.

## 4. 결 론

DME를 연료로 사용하는 HCCI엔진의 예혼합기를 수치 해석하여 예혼합기의 온도 성층화가 실린더 내의 가스 압력 상승률 저감에 미치는 메커니즘을 확인하고, 예혼합기의 온도 성층화 폭의 변화가 압력 상승률 저감에 미치는 효과를 확인했다. 동시에 온도 성층화를 통한 운전 영역 확대 가능성을 확인하고 운전 가능한 영역에서 IMEP 값을 정량적으로 확인했다.

- 1) 예혼합기에 온도 성층화가 존재하면 실린더내의 가스 온도차가 피스톤 압축에 의해 더욱 커지고, 온도가 더 높은 zone에서 저온반응과 고온반응이 먼저 발생했다.
- 2) 2 단계 열 발생을 가지는 DME를 연료로 사용하면 저온반응기간에서 열 발생이 크기 때문에 고온반응 발현 전에 더욱 큰 온도 분포가 생성되고, 열 발생에 의해 증가된 온도 분포는 점화시기를 분산시켜 연소기간을 장기화시켰다.
- 3) 온도 균일 조건에서는 압축 초기 온도가 403K 이상이면 노킹이 발생하지만 온도 성층화 조건에서는 모든 초기 온도 조건에서 노킹이 발생하지 않았으며 온도 균일 조건에서 나타나는 최대 압력 상승률에 비해 온도 성층화 폭,  $\Delta T$ 가 20K 일 경우는 압력 상승률이 최대 57% 감소하고 40K 일 경우는 압력 상승률이 최대 67% 감소했다.
- 4) 실린더 내에 온도 성층화가 존재하는 경우 온도가 균일한 조건에 비해 IMEP 크기는 비슷하지만 운전 영역의 확장과 함께 유효 IMEP 존재하는 영역도 넓어 졌다.

## 후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부 기술혁신사업인 '클린 신연료 동력시스템 개발'에서 수행된 연구입니다. 관계자들의 지원에 깊이 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) M. Sjoberg, J.E. Dec, N.P. Cernansky, "Po-

- tential of Thermal Stratification and Combustion Retard for Reducing Pressure-Rise Rates in HCCI Engines, Based on Multi-Zone Modeling and Experiments", SAE (2005) 2005-01-0113.
- 2) T. Lim, "Research about Thermal Stratification Effect on HCCI Combustion Fueled with Primary Reference Fuel", KSAE, Vol. 16, No. 5, pp. 157-163, 2008.
- 3) Junpei Ozaki, Norimasa IIDA, "Effect of Degree of Unmixedness on HCCI Combustion Based on Experiment and Numerial Compression Analysis", SAE (2006) 2006-32-0046.
- 4) M. Christensen, B. Johansson, P. Amneus, F. Mauss, "Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition", SAE (1998) 980787.
- 5) E. J. Silke, W. J. Pitz and C. K. Westbrook, "Understanding the Chemical Effects of Increased Boost Pressure under HCCI Conditions", SAE (2008) 2008-01-0019.
- 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", (1998) Vol. 30-3, pp. 229-241.
- 7) A.E. Luz, F. Rupley and J.A Miller, "CHEMKIN-II: A FORTRAN Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics", Sandia National Laboratories Report, SAND (1989) 89-8009B
- 8) A.E. Luz, R.J. Kee and J.A. Miller, "SENKIN: A FORTRAN Program for Predicting Homogeneous Gas Phase Chemical Kinetics With Sensitivity Analysis", Sandia National Laboratories Report, SAND (1988) 87-8248.
- 9) Eng, J.A., "Characterization of Pressure Waves in HCCI Combustion", SAE (2002) 2002-01-2859.