

농도성층화와 Cooled EGR이 DME HCCI 엔진의 운전영역에 미치는 영향에 관한 수치해석

정동원*, 아마라**, 임옥택*[†]

*울산대학교 기계자동차공학부, **울산대학교 자동차선박기술대학원

An Investigation of Effects of Fuel Stratification and Cooled EGR on DME HCCI Engine's Operating Ranges by Numerical Analysis

DONGWON JEONG*, D. AMARBAYAR**, OCKTAECK LIM*[†]

*School of Mechanical & Automotive Engineering, Ulsan Univ., Mugeo-dong, Ulsan 680-749, Korea

**Institute of e-Vehicle Technology, Ulsan Univ., Mugeo-dong, Ulsan 680-749, Korea

ABSTRACT

Homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines have the potential to provide both diesel-like efficiency and very low emissions of nitrogen oxide (NO_x) and particulate matter(PM). However, several technical issues still must be resolved before HCCI can see application. Among these, steep pressure-rise rate which leads to narrow operating range of HCCI engine continues to be a major issue. This work investigates the combination of two methods to mitigate the excessive pressure-rise rates at high power output, namely fuel stratification and Cooled exhaust-gas recirculation (Cooled EGR), after identifying the each effects to pressure-rise rate. When applying the fuel stratification to simulation, total fuelling width of 0.15 at BDC is set as a equivalent ratio difference based on the previous research. In order to simulate the effects of cooled EGR, CO₂ mole fraction in pre-mixture is changed ranging from 0 to 30%. DME which has a characteristic of two-stage ignition is used as a fuel.

KEY WORDS : HCCI(예혼합자기착화), Fuel stratification(농도성층화), EGR(배기가스환원장치). Pressure-rise rate(압력상승률), DME(디메틸에테르)

Nomenclature

| | |
|--|---------------------------------|
| HCCI : homogeneous charge compression ignition | EGR : exhaust gas recirculation |
| | DME : di-methyl-ether |
| | LTR : low temperature reaction |
| | HTR : high temperature reaction |

[†]Corresponding author : otlim@ulsan.ac.kr

[접수일 : 2010.2.16 수정일 : 2010.4.5 게재확정일 : 2010.4.20]

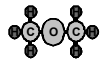
1. 서 론

고유가와 지구온난화로 인해서 고효율, 저공해 엔진이 요구되고 있다. 두 목적을 달성하기 위한 차세대 엔진으로서 균질한 예혼합기를 피스톤의 압축에 의해서 착화시키는 예혼합압축자기착화(homogeneous charge compression ignition: HCCI) 엔진이 주목을 받고 있다. 예혼합기가 매우 희박하고 균질한 상태에서 연소가 발생하기 때문에 PM과 NOx의 배출이 적으며 압축비가 높아 열효율이 높다. 하지만 균질한 예혼합기가 동시다발적으로 점화되기 때문에 압력 상승률이 급격하며, 이는 노킹(knocking)을 유도하므로 고 부하영역을 제한하는 주원인이다.

압력 상승률을 낮추는 방법으로 예혼합기의 농도성층화¹⁾, 온도성층화²⁾, 배기가스재순환(exhaust gas recirculation: EGR)³⁾ 등이 있다. 예혼합기에 농도성층화가 존재하면 연소가 국부적으로 농도가 높은 영역에서 낮은 영역으로 순차적으로 발생되기 때문에 압력 상승이 완만해진다. 배기가스재순환 중 Cooled EGR은 연소실의 온도를 낮추고 점화지연을 유도하기 때문에 고 부하에서 발생하는 노킹을 억제한다.

본 연구에서는 수치해석을 통해 농도성층화와 Cooled EGR이 압력 상승률에 미치는 영향을 각각 확인하였다. 농도성층화를 예혼합기에 적용할 경우 성층화 폭($\Delta\Phi$)은 압력 상승률에 대한 농도성층화 효과가 가장 큰 0.15로 정했으며, 수치해석에서 Cooled EGR의 효과를 모사하기 위해 예혼합기의 CO₂의 몰 분율을 0~30% 까지 조절하였다. 마지막으로 예혼합기에 농도성층화와 CO₂를 동시에 적용한 후 운전영역의 변화를 통해 효과를 확인했다. 본 연구에서 사용된 DME는 세탄가가 55정도로 높기 때문에 압축착화 연소가 가능하여 CO₂의 배출이 디젤에 비해서 적다. 또한 산소 함유율이 34.8%로 높고 희박한 상태에서 압축착화 연소가 가능하기 때문에 PM과 NOx의 생성이 적어 신 재생연료로써 주목받고 있다.

Table 1 Test fuel

| Name | Di-Methyl Ether |
|----------------------------------|---|
| Molecular structure |  |
| Self-Ignition temperature [K] | 623 |
| Molecular mass [g/mol] | 46.069 |
| Lower heating value [MJ/kg] | 28.8 |
| Low temperature reaction | O |
| Ratio of Heat Release in LTR [%] | 25-40 |

2. 시뮬레이션

2.1 수치해석 연료

수치해석에 사용된 연료는 DME(di-methyle ether)이며 특성은 Table 1과 같다. DME는 저온 산화 반응(low temperature reaction: LTR)과 고온 산화 반응(high temperature reaction: HTR)의 2 단계 열 발생이 있으며, LTR 기간에서 발생하는 열의 비율이 비교적 높다(25~40%). LTR기간에서 발생한 열은 HTR 발생 시점을 앞당기며, 발생한 열이 클수록 HTR이 빨리 발생된다. 실린더 내에 농도성층화가 존재할 경우 LTR 기간에서 발생한 열에 의해 온도의 폭이 증가되면서 HTR 발생 시점이 분산됨에 따라 연소가 순차적으로 일어나므로 압력 상승률이 저감될 것이라고 예상 된다.

2.2 수치해석

Table 2는 수치해석에 사용된 Yammar 단기통 엔진의 제원이다.

수치해석에 사용된 프로그램은 sandia national laboratory에서 개발된 CHEKINII와 SENKIN를 일

Table 2 Engine specification

| Process | Only 1 Compression & Expansion |
|--------------------|--------------------------------|
| Bore × Stroke | 112mm × 115mm |
| Displacement | 1132cc |
| Intake Valve Close | ATDC -132° |
| Exhaust Valve Open | ATDC 132° |
| Compression ratio | 8 |

부 개량한 것이다⁴⁵⁾. Curran의 스킴(화학종수: 79, 단위반응수: 336)을 DME의 반응 스킴으로 정하고⁶⁾, NOx의 반응 스킴으로는 확대 Zeldvich 기구를 고려한 모델을 사용했다. 수치해석의 범위는 흡입밸브가 닫힌 직후부터 배기 밸브가 열리기 직전까지이며 이하의 가정을 기초로 1회의 압축, 팽창 행정 중에 닫혀 있는 가스의 열역학적 특성을 계산했다.

- 모든 기체는 이상기체
- 모든 에너지는 보존
- 모든 질량은 보존
- 열 전달과 질량 전달은 없음

수치해석에서 Cooled EGR의 효과를 모사하기 위해 사용된 CO₂의 온도는 초기 예혼합기 온도와 동일하다고 가정한다.

2.3 Zone 모델링

위의 해석 프로그램을 통해 예혼합기의 조건을 임의로 나누어 지정할 수 있으며 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다. Single-zone model은 예혼합기의 온도가 동일하고 화학조성이 균질한 0차원 모델이다. 2-zone model은 N-zone model의 한 예로, 두 zone간의 조건은 다르지만, 각 zone은 single-zone model과 마찬가지로 모든 조건이 균질하다. 각 zone 간에는 열량 및 화학종의 이동은 없고 압력이 동일하며 실린더 내의 가스 평균온도, T₀는 총 에너지 보존식 (4)를 이용하여 계산한다.

$$Pv = nRT \quad (1)$$

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

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (3)$$

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

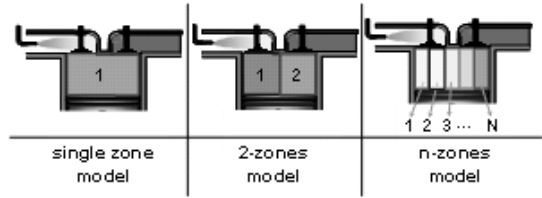


Fig. 1 Schematic of N-zone model.

N : Number of zones
 n_i : Number of moles
 C_{p,i} : Specific heat at constant pressure of ith 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.

3. 수치해석 결과

3.1 농도 성층화의 압력 상승률에 미치는 영향

Fig. 2는 2-zone 모델을 통한 농도 성층화가 압

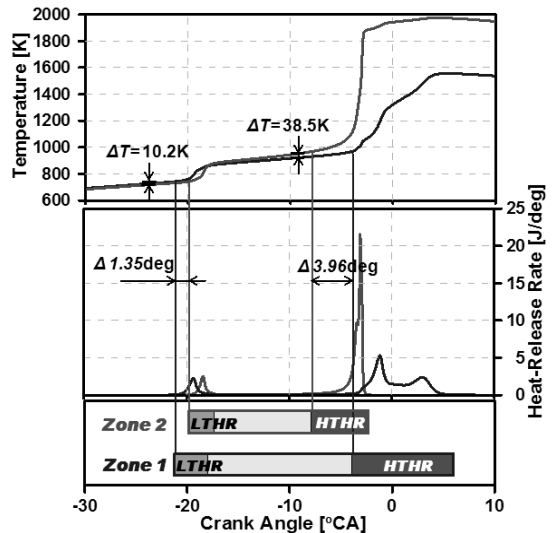


Fig. 2 Mechanism of fuel stratification.

력 상승률에 미치는 영향을 보여준다. 농도 성층화가 존재하는 2-zone model의 수치해석을 통해, 농도 성층화에 따른 예혼합기의 온도, 압력 상승률, 열 발생률의 시점 및 기간에 대한 변화를 나타내고, 이를 통해 압력 상승률의 저감에 관한 메커니즘을 확인했다. 여기서 엔진회전속도 750rpm, DME/Air의 당량비는 $\Phi=0.25$, 압축 시작시의 초기 평균 온도, $T_0=400K$, 압축비는 8, 각 zone의 압축 시작시의 초기 압력, P_0 는 0.1MPa 이다. Zone 1의 당량비는 0.195, zone 2의 당량비는 0.245로써 각 zone간의 농도 성층화 폭은 0.15이다. 나머지 초기 조건은 동일하며 각 zone의 체적비를 조절하여 투입열량을 맞추었다.

Zone 1은 zone 2보다 희박하기 때문에 초기 열 발생에 요구되는 열용량이 작으므로 LTR의 발생 시점이 빠르다. Zone 1의 LTR 발생 직전에는 zone 1의 온도가 zone 2의 온도보다 10.2K 크고 열 발생이 1.35deg 먼저 일어난다. 하지만 LTR에서 발생한 열이 HTR의 발생을 촉진시킴에 따라 농후한 zone 2의 온도가 빠르게 올라간다. Zone 2의 HTR 발생 직전에는 zone 1의 온도보다 38.5K 커지고 HTR이 3.96deg 먼저 발생한다. 즉 실린더 내의 예혼합기에 농도 성층화가 존재할 경우 LTR 기간에서 발생된 열에 의해 온도의 폭이 증가되면서 HTR 발생 시점이 분산됨에 따라 연소가 순차적으로 일어나므로 압력 상승률이 저감된다.

3.2 Cooled EGR이 압력 상승률에 미치는 영향

Fig. 3은 EGR내의 CO₂ 몰 분율에 따른 최대 압력 상승률의 변화를 나타낸 것이다. CO₂ 몰 분율이 클수록 압력 상승률 저감에 미치는 효과는 크다. 특히 초기 5% 내에서는 그 효과가 두드러졌다. 실제 배기가스에는 다량의 CO₂ 기체가 포함되어 있으며, CO₂는 비활성 기체로 혼합기 중 연료와 산소가 반응 하는 지점을 감소시켜 점화 지연을 유도하게 된다²⁾. 또한 CO₂의 몰 분율이 증가할 수록 단위 사이클당 투입되는 열량이 줄어들면서 압력 상승률이 저감될 뿐만 아니라 예혼합기의 온도를 낮추어 노

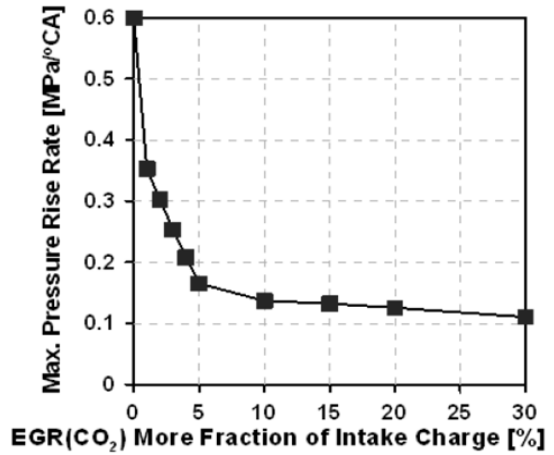


Fig. 3 Relationship between maximum pressure rise rate and the more fraction of EGR.

킹 발생을 억제한다.

3.3 농도 성층화와 Cooled EGR의 동시 적용시 압력 상승률에 미치는 영향

Fig. 4는 농도 성층화와 EGR이 존재하지 않는 경우(NoFuel+EGR0), 농도 성층화만 존재하는 경하는 경우(Fuel+EGR1~10%), 모터링인 경우(motored)에 나타내는 압력 선도이다. 5-zone 모델에서 예혼합기의 농도 성층화를 설정했으며, 성층화 폭은 0.15

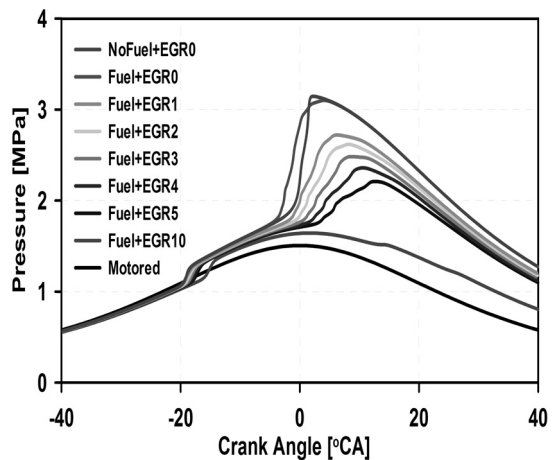


Fig. 4 Pressure traces for EGR more fractions with fuel stratification. $\phi=0.25$, 750 rpm, $T_0=400K$, $CR=8$.

이다. 나머지는 초기실험조건 3.1과 동일하며 5개 zone의 체적비를 조절하여 투입열량을 맞추었다. 농도 성층화가 존재하면 농도 성층화가 존재하지 않는 경우 보다 압력 상승이 완만하다. 예혼합기에서 농도 성층화가 존재하는 상태에서 EGR 비율이 커질 수록 압력곡선은 더욱 완만해진다. 하지만 과도한 EGR의 투입은 실화(fuel+EGR10)를 발생시키므로 EGR비율을 적절히 조절해야 한다.

3.4 DME HCCI 엔진의 운전영역 비교

3.4.1 농도 성층화와 Cooled EGR이 각각 존재하는 경우의 운전영역

Fig. 5는 DME/Air의 당량비와 흡기온도 변화에 따른 DME HCCI 엔진의 운전영역 변화에 대한 수치해석 결과다. 초기실험조건은 3.1과 동일하다. 검은색 점은 운전 가능한 조건을 나타내며 파란색 점은 실화가 발생한 조건으로써 최고연소온도가 1000K 이하이면 HTR이 발생하지 않기 때문에 실화가 발생했다고 판단했다. 붉은색 점은 노킹이 발생한 조건으로써 ringing intensity(RI) 값이 5MW/m² 이상이면 노킹이 발생했다고 판단했다. RI는 Eng가 HCCI 연소에서 발생하는 노킹을 판단하기 위해 제안한 값으로 아래의 식 (6)을 만족한다⁷⁾.

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

(dP/dt)max = maximum pressure rise rate

Pmax : maximum pressure

Tmax : maximum temperature: Cp/Cv

R : gas constant of air

예혼합기가 균질한 조건(회색영역)은 single-zone model을 통해 나타난 운전영역이다. 농도 성층화 조건(파란영역)은 5-zone model을 통해 나타난 운전영역으로써 농도 성층화폭 0.15 다. 예혼합기에 농도 성층화가 존재하면 압력 상승률이 저감됨에 따라 노킹 발생 가능성이 줄어들면서, 예혼합기가 균질한 조건에서 노킹이 발생했던 고 부하영역 쪽으로

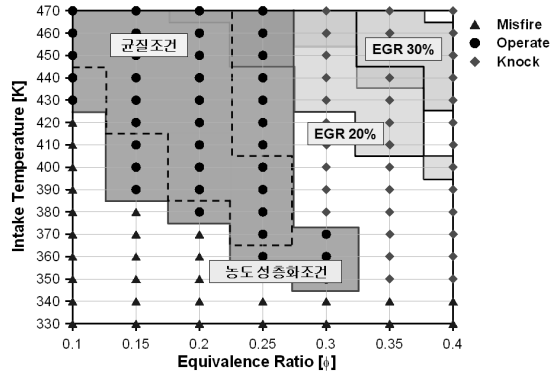


Fig. 5 Operating ranges of homogeneous, fuel stratification, EGR20% and EGR30%.

로 운전영역이 확장되었다. 동시에 예혼합기가 균질한 조건에서 실화가 발생한 저 부하영역 쪽으로 운전영역이 확장되었다. 5-zone model의 평균 당량비는 예혼합기가 균일한 조건에서 실화가 발생했던 조건에서의 평균 당량비와 동일하지만 두 zone의 당량비는 평균 당량비보다 높다. 압축이 시작되면서 농도가 높은 zone들은 점화를 일으키고 충분한 출력을 내므로 운전이 가능해진다. Cooled EGR20% (초록영역), 30%(붉은영역)는 예혼합기의 CO₂의 몰 분율이 각각 20%, 30%인 경우의 운전영역이며 single-zone model통해 수치해석 했다. CO₂의 몰 분율이 증가할수록 단위 사이클당 투입되는 열량이 줄어들면서 압력 상승률이 저감될 뿐만 아니라 예혼합기의 온도를 낮추어 노킹 발생을 억제한다. 이를 통해 고 부하영역 쪽으로 운전영역을 확장 할 수 있지만 동시에 실화를 유도하기 때문에 운전 가능한 영역은 줄었다.

3.4.2 농도 성층화와 Cooled EGR이 동시에 존재하는 경우의 운전영역

Fig. 6은 예혼합기에 농도 성층화와 Cooled EGR이 동시에 존재하는 경우에 나타난 운전영역이다. 첫 번째 그래프는 예혼합기에 농도 성층화와 CO₂의 몰 분율이 5%가 존재하는 조건에서 나타난 운전영역을 농도 성층화만 조건에서 나타난 운전영역과 비교하였다. Cooled EGR은 연소온도를 낮추기

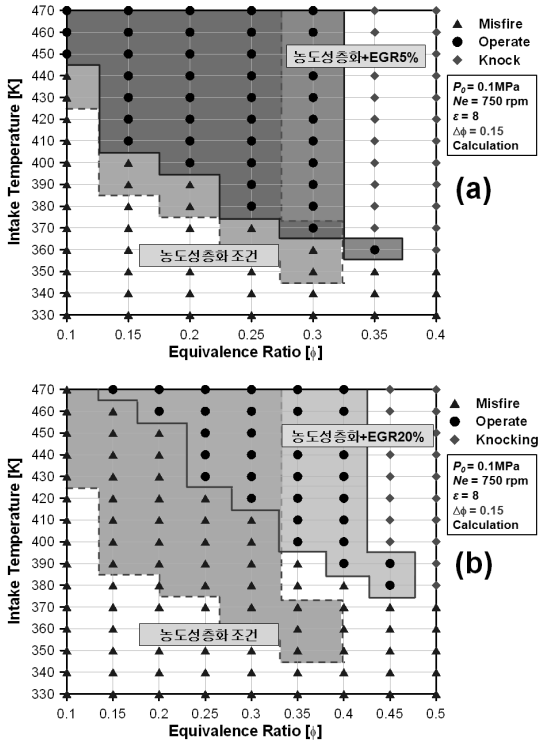


Fig. 6 Operating ranges of fuel stratification with (a) EGR5% and (b) EGR20%.

때문에 저 부하영역에서 실화를 유도했지만, 농도성층화 조건에서 노킹이 발생했던 고 부하영역 쪽 ($\phi=0.3$)으로 운전영역이 확장되었다. 예혼합기에 농도성층화와 CO₂의 몰 분율이 5%가 존재하는 조건에서 나타난 운전 가능한 영역이 농도성층화만 존재하는 조건보다 넓었다. 두 번째 그래프는 예혼합기에 농도성층화와 CO₂의 몰 분율이 20%가 존재하는 경우에 나타난 운전영역을 농도성층화만 존재할 경우에 나타난 운전영역과 비교하였다. EGR 비율이 높을수록 고 부하영역으로 크게 확장시킬 수 있지만 대부분 조건에서 실화가 발생하여 운전 가능한 영역은 농도성층화 조건에서 나타난 운전영역보다 좁았다. 농도성층화가 존재하는 예혼합기에 EGR의 비율을 적절히 조절하면 고 부하 영역에서 노킹발생을 줄이고 운전 가능한 영역이 확장될 수 있음을 확인했다.

4. 결 론

본 연구에서는 수치해석을 통해 예혼합기의 농도성층화와 Cooled EGR이 DME HCCI 엔진연소에 미치는 영향에 대하여 확인하였다.

- 1) 농도성층화만 존재하는 경우; 예혼합기에 농도성층화가 존재하면 압력 상승률이 저감됨에 따라 노킹 발생 가능성이 줄어들면서, 예혼합기가 균질한 조건에서 노킹이 발생했던 고 부하영역 쪽으로 운전영역이 확장되었다. 동시에 국부적으로 농후한 Zone에서 연소가 발생되어 출력을 발생시킴으로 예혼합기가 균질한 조건에서 실화가 발생한 저 부하영역 쪽으로도 운전영역이 확장되었다.
- 2) Cooled EGR만 존재하는 경우; CO₂의 몰 분율이 증가할수록 단위 사이클당 투입되는 열량이 줄어들어 압력 상승률이 저감될 뿐만 아니라 예혼합기의 연소 온도를 낮춘다. 이를 통해 고 부하영역에서 발생한 노킹을 억제시켜 운전영역을 고 부하영역 쪽으로 확장할 수 있지만 동시에 실화를 유도하기 때문에 운전 가능한 영역은 크게 줄었다.
- 3) 농도성층화와 Cooled EGR이 동시에 존재하는 경우; 농도성층화가 존재하는 예혼합기에 Cooled EGR의 비율을 높이면 실린더 내의 연소온도가 낮아져 고 부하영역에서 발생하는 노킹발생을 억제시키고 운전 가능한 영역을 확대시킬 수 있다. 하지만 과도한 Cooled EGR의 비율은 실화를 유도하여 운전 가능한 영역이 좁아졌다.

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, "Isolating the Effects of Fuel

- Chemistry on Combustion Phasing in an HCCI Engine and the Potential of Fuel Stratification for Ignition Control”, SAE, 2004, 2004-01-0557.
- 2) D.W.Jeong, O.S.Kwon, Y.S.Back, O.T.Lim, “Prediction of the Viable Operating Range of DME HCCI Engine Using Thermal Stratification Based on Numerical Analysis”, Transactions of the KHNES, Vol. 20, No. 4, 2009, pp. 344-351.
 - 3) S.W.Kim, M.Y.Ki, Y.Lee and K.D.Min, “An Experimental Study of EGR Effect on Reducing the Noise of CAI Engine”, Transactions of KSAE, Vol. 1, No. KSAE08-S0006, 2008, pp. 37-42.
 - 4) 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.
 - 5) 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.
 - 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”, Vol. 30-3, 1998, pp. 229-241.
 - 7) J.A.Eng “Characterization of Pressure Waves in HCCI Combustion”, SAE, 2002, 2002-01-2859.