

EGR 율이 DME HCCI 엔진 연소 과정에 미치는 영향에 관한 연구

임 옥 택*†

* 울산대학교 기계공학부

A Study About the Effect of EGR Ratio on DME HCCI Combustion Process

Ocktaeck LIM*†

* School of Mechanical Engineering, Univ. of Ulsan.

(Received April 23, 2012 ; Revised August 27, 2013 ; Accepted September 3, 2013)

Key Words: Internal Combustion Engine(내연기관), Numerical Analysis(수치해석), Ignition(착화), HCCI(예혼합압축자기착화), DME(디메이)

초록: 본 연구에서는 고농도 EGR 을 사용하는 DME 예혼합압축자기착화연소의 근본적인 연소 메커니즘을 이해하기 위해 수치해석 시뮬레이션을 수행하였다. EGR 과 과급의 영향을 조사하면서 동시에 산소 분압과 산소 농도 중 어느 것이 LTR 발열비율을 결정하는 핵심요소인지 확인하였다. EGR 비율과 과급압력을 매개변수 정하기 위해서 1) EGR 비율 변화에 따라 산소농도, 산소함유량을 변화시키는 조건 2) 산소농도를 거의 일정하게 유지하면서 과급을 하여 산소 분압을 변화시키는 조건, 3) EGR 과과급을 조합하면서 산소 분압을 일정하게 유지 하기 위해 산소농도를 변화시키는 조건 세가지 조건에서 화학반응 수치계산을 수행하여 검증했다. 연구결과 EGR 율이 증가하면 연소의 시작, 종료시기가 지연되고, 과급을 하게 되면 연소의 시작, 종료시기가 앞당겨지는 것을 확인했다. EGR 과 과급이 LTHR 발열비율 증가에 영향을 미치는 것도 확인하였다.

Abstract: This study aims to provide helpful suggestions for understanding the effect of high EGR on DME HCCI combustion. This study determined which between oxygen partial pressure and oxygen concentration was the main factor affecting the LTHR heating ratio. Furthermore, EGR and the supercharging effect were investigated. To define the parameters for the EGR ratio and supercharging pressure, a numerical analysis of the chemical reaction was conducted under the following conditions: (1) variation of EGR ratio, oxygen concentration, and oxygen content; (2) variation of oxygen partial pressure while the oxygen concentration was almost constant; and (3) variation of oxygen concentration while oxygen partial pressure was constant with EGR and supercharging. The results show that an increase in EGR reduces the combustion duration. On the other hand, an increase in boost pressure increases the combustion duration. Finally, the EGR and boost pressure affect the amount of increase in LTHR.

- 기호설명 -

DME : Di-Methyl Ether(디메이)
HCCI : Homogeneous Charge Compression Ignition
(예혼합압축자기착화)
HTHR : High Temperature Heat Reaction(고온산화
반응)
LTHR : Low Temperature Heat Reaction(저온산화
반응)
PRR : Pressure Rise Rate(압력상승률) (Mpa/ms)
RCM : Rapid Compression Machine(급속압축장치)

T : Temperature(연소실내 가스온도)
0 : Initial(초기값)
Φ : Equivalence Ratio(당량비)
r : EGR ratio(EGR 비율)

1. 서 론

대기 오염과 에너지 자원 고갈 문제로 예혼합압축 자기착화(Homogeneous Charge Compression Ignition; 이하 HCCI) 연소가 고효율과 깨끗한 내연 기관을 실현 하는 연소방식으로 주목 받고 있다. HCCI 기관은 예 혼합기를 실린더에 공급하고 피스톤으로 단열 압축시켜서 자기착화에 의해서 다점점화의 연소를 시킨다.

† Corresponding Author, otlim@ulsan.ac.kr

하지만, 고부하시에는 노킹이 발생되면서 운전영역이 제한되는 문제를 안고 있어서 전체 부하영역을 HCCI 연소로 운전하기 위해서는 고부하 시에 발생하는 노킹을 방지해야만 한다. 노킹은 연소 실내 가스 압력 상승률이 5MPa/ms 발생하는 것으로 알려져 있는데⁽¹⁾ 노킹을 방지하기 위해 압력 상승률을 줄일 필요가 있다. 압력 상승률 저감 방법으로 연소 위상 지연화⁽²⁾ 및 층상급기⁽³⁾가 제안되고 있다.

또한 최근에는 열효율 향상과 질소 산화물 및 입자상 물질의 배출을 감소시키기를 위하여 높은 과급과 고 EGR 적용시키면서 열손실을 줄이기 위해 저온 연소의 도입도 검토되고 있다. 이바라키 대학의 Kanehara⁽⁹⁾는 DME 를 연료로 했을 때 EGR 비율 증가에 따라 산소 농도 [mol/mol]가 감소하는 것 때문에 LTR 발열 비율이 감소되는 것을 확인하였다. 이에 대해 Nagae⁽¹⁰⁾는 물분율을 일정하게 유지시키면서 전체 압력을 증가 시키면 산소 농도는 일정하지만, 산소 분압 [mol/m³]은 증가하고 LTR 발열 비율이 증가한다는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 고농도 EGR 을 사용하는 예혼합압축 자기착화연소의 근본적인 연소메커니즘을 이해하기 위해 수치해석을 수행하였다. EGR 과 과급의 영향을 조사하면서 동시에 산소 분압과 산소 농도중 어느 것이 LTHR 발열 비율을 결정하는 핵심인지 확인하였다. EGR 비율과 과급압력을 매개변수 정하기 위해서 1) EGR 비율을 변화에 따라 산소 농도, 산소 함유량을 변화시키는 조건 2) 산소 농도를 거의 일정하게 유지 하면서 과급을 하여 산소 분압을 변화시키는 조건, 3) EGR 과 과급을 조합하면서 산소 분압을 일정하게 유지 하기 위해 산소 농도를 변화시키는 조건 세 가지 조건에서 화학반응 수치계산을 수행하여 검증했다.

2. 연구방법

2.1 연료

이번 연구에는 디젤의 대체연료로 각광받는 DME 를 사용하였다. DME 가 디젤의 대체연료로 각광받는 이유는 세탄가가 높아 자착화 연소가 가능하기 때문이다. Table 1 에는 DME 연료의 물성치를 보이고 있다. DME 는 soot 가 거의 발생하지 않는데 이는 35%의 함산소비와 C-C 의 분자결합이 없기 때문이다. 저온 발열 (LTHR) 및 고온 발열 (HTHR)의 2 단계에서 열을 발생하고 총 열 발생량에 대한 LTHR 비율이 10~30%라는 특징을 가진다.

2.2 화학반응 수치 계산

화학반응 수치계산에서는 CHEMKIN II⁽⁴⁾ 및

SENKIN⁽⁵⁾를 이용하였다. DME 화학반응모델은 Curran 's Model 2000⁽⁷⁾를 이용했다. 계산할 때 가정으로 모든 화학종의 기체는 이상기체로 에너지보존법칙과 질량보존법칙이 성립한다고 가정하였다. Fig. 1 은 급속압축 장치의 가스체적 변화 및 온도, 압력이력을 보이고 있다.

2.3 계산조건

본 연구에서 실험조건으로 상정한 RCM 의 제원을 Table 2 에 나타낸다. 계산을 위한 파라메타는 EGR 율 및 과급압력으로 하였고 정해진 표준수 R10 를 참고로 결정했다. 또한 EGR 를 실시했을 때의 조성(물분율)에 대해서는 신기(Fresh gas)에 해당하는 공기와 EGR 가스의 온도는 300 K 로 일정하게 가정했고, EGR 가스의 압력은 0.101MPa 로 했다. 또한 신기분의 공기의 압력은 0.101MPa 또는 0.202MPa 로 했다.

Table 1 DME Fuel properties

Property	Diesel	DME	Features of DME
Oxygen content [wt%]	0	34.8	Oxygenated fuel
Boiling Point [°C, 1atm]	180-370	-25.1	Gaseous fuel
Liquid density [kg/m ³ , 20°C, 2MPa]	824	668	80% of diesel
Vapor pressure [MPa, 20°C]	-	0.51	Easy to become liquid by compression
Cetane number	40-55	55-60	A little higher than diesel
Lower calorific value [MJ/Kg]	42.5	28.4	70% of diesel

Table 2 Specification of the rapid compression machine

Items	Value
Bore x Stroke	145 x 693.3 mm
Cylinder volume	12.2 x 10 ⁻³ m ³
Compression Ratio	14.6
Combustion Chamber Thickness	49.2 mm
Compression Duration	about 185 ms

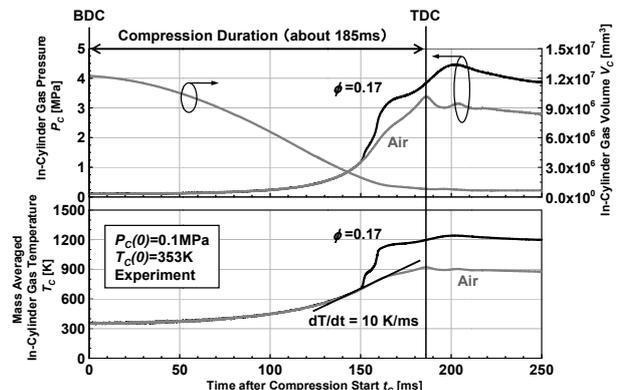


Fig. 1 Histories of in-cylinder gas volume, in-cylinder gas pressure and mass averaged temperature

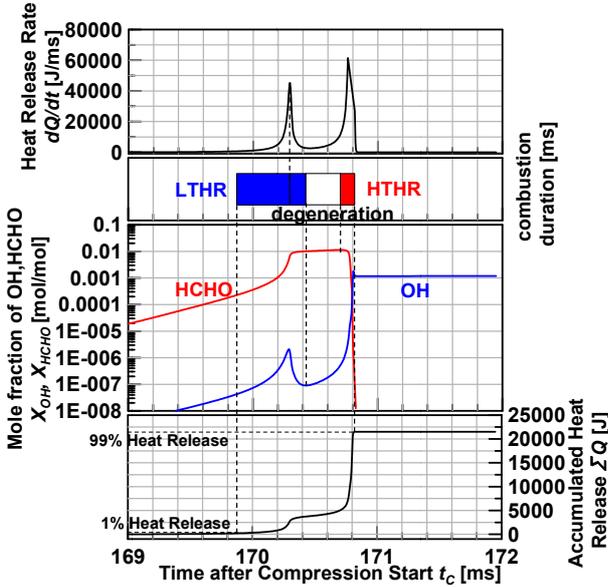


Fig. 2 Definition of combustion duration

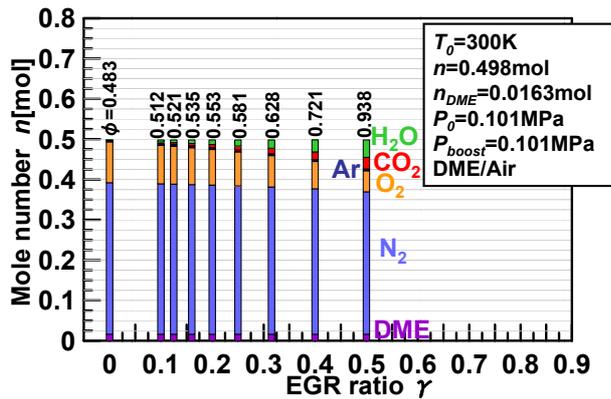


Fig. 3 Gas composition (mole number) of initial gas mixture when EGR ratio is changed

2.4 EGR 비율 정의

본 연구의 EGR 율을 식 (1)과 같이 정의했다.

$$\gamma = \frac{F_0 - F}{F_0} \quad (1)$$

r : EGR 비율 [-]

F₀ : EGR 이 없는 경우 공기 유량 [m³/s]

F : EGR 이 있는 공기 유량 [m³s]

2.5 연소 기간의 정의

Fig. 2 는 연소기간의 정의를 보여준다. LTHR 시작 시기를 열 발생량이 전체 열 발생량의 1%를 처음 넘어선 시간으로 정의하였고, LTHR 종료 시간을 OH 물분율의 첫 번째 피크와 두 번째 피크 사이의 OH 물분율 최소점, HTHR 시작시간을 HCHO 물분율의 최대점, HTHR 종료 시간을 열 발

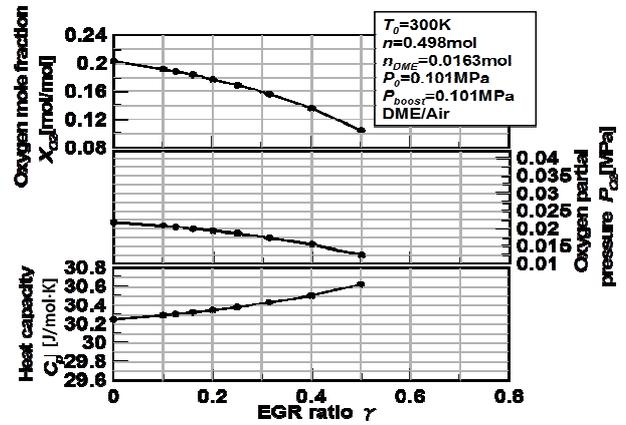


Fig. 4 Oxygen mole fraction and partial pressure and Heat capacity

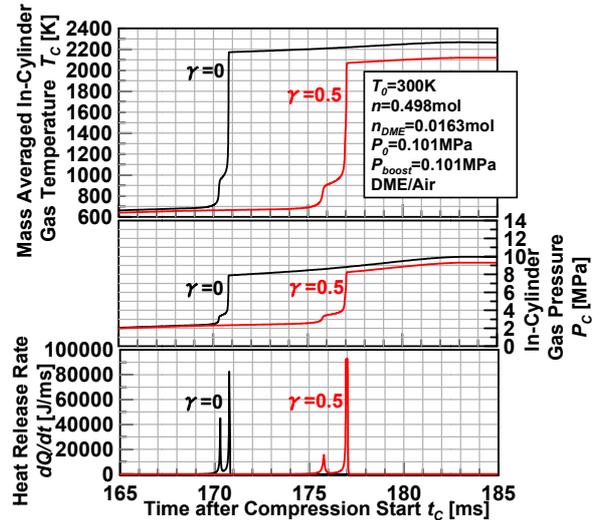


Fig. 5 Histories of in-cylinder gas temperature, pressure and HRR

생량이 전체 열 발생량의 99%를 처음으로 넘어서는 점으로 결정했다.⁽⁸⁾

3. 결과 및 고찰

3.1 EGR 비율 변화가 HCCI 연소 과정에 미치는 영향

Fig. 3 은 투입 열량 21610J, 당량비 0.48 에서 EGR 율을 0 에서 0.5 까지 변화 시켰을 때의 충분한 사이클 후의 조성(몰분율)이 정상 상태에 도달했을 때 가스의 조성(몰분율)과 당량비를 나타냈다. 본 연구에서는 완전연소를 가정하였고 완전연소 후 생성물은 N₂, CO₂, H₂O, Ar 만 생성된다고 가정하였다. EGR 이 공기를 대신해서 들어가게 되면 신선한 공기의 양은 줄어들게 되고 이 때문에 같

은 양의 연료를 투입하더라도 당량비가 증가하게 된다. 초기 체적은 급속 압축 장치를 상정했다.

이러한 조건에서 수치해석을 수행하여 EGR 비율을 변화 시켰을 때의 HCCI 연소에 어떠한 영향을 미치는지 조사했다. 초기압력과 온도는 각각 0.101MPa, 300K 로 동일하다. Fig. 4 는 각 조건에서의 산소농도, 산소분압, 열용량을 보이고 있다. EGR 율이 증가함에 따라 산소 농도, 산소분압은 모두 감소하고 CO₂ 와 H₂O 가 증가함에 따라서 열용량이 증가되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5 에서는 EGR 율이 0, 0.5 일때 압력, 온도, 열발생률을 각각 보이고 있다. 온도이력에서

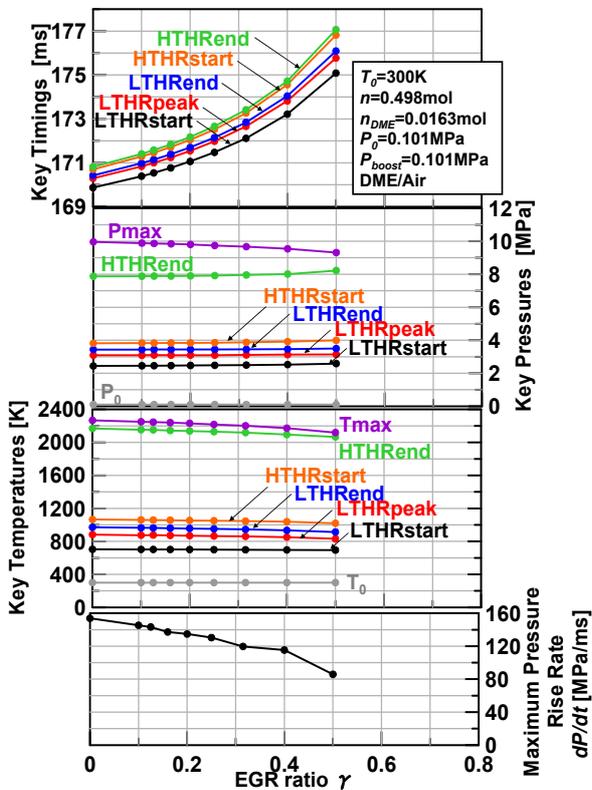


Fig. 6 Key timings, pressures and temperatures and maximum PRR

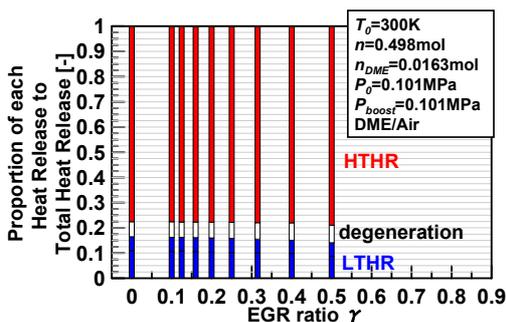


Fig. 7 Proportion of each Heat Release to Total Heat Release

LTHR 발현 온도 700K 까지 피스톤에 의한 단열 압축에 의해 온도가 상승된다. 열용량의 차이 (30.3J/mol/K 하면 30.6J/mol/K)에 의해서 열용량이 큰 $r = 0.5$ 조건에서 LTHR 개시 온도 (약 700K)까지 도달되는 시간인 LTHR 개시시간이 5.22ms 지연되었다. 이 온도에 도달되면 두 조건 모두 LTHR 의한 발열이 발생된다. 그리고 LTHR 에서 열발생률이 최고조에 달한 시간도 5.48ms 지연되고 있다. LTHR 의 발열에 의해 온도 점프 업이 일어날 $r = 0.5$ 경우가 온도 점프 업 양이 약 47.5K 정도로 작다. 이것은 Fig. 7 과 같이 주로 LTHR 발열 비율의 차이 (16.5 %에서 14.1 %로 감소)에 의한 것이라고 생각된다. EGR 비율 증가에 의한 산소 농도의 감소로 LTHR 발열 비율이 감소했다고 생각된다.⁽⁹⁾ LTHR 발열 비율의 차이에 따라 LTHR 종료 후에는 57.1K 의 온도차가 발생된다. 지연된 시간을 거쳐 HTHR 개시 온도에 도달하면은 6.12ms 의 시간 차이가 생긴다. 그리고 HTHR 의 온도 점프 업 후 피스톤에 의한 단열 압축 상사점까지 온도가 상승한다. 그리고 주로 열용량의 차이에 따라 최고 도달 온도 147K 의 차이가 난다. Fig. 6 에서는 EGR 비율을 변화 시켰을 때 각 이벤트까지의 도달시간, 온도, 압력, 압력 상승률을 보이고, Fig. 7 은 열발생 비율을 보인다. Fig. 6 으로부터, 각 이벤트 도달 시각 즉, LTHR 개시, 최대, 종료, HTHR 개시, 종료 압력까지 도달하는 시간은 EGR 율이 증가함에 따라 지연된다. 또한 최고 압력, 각 이벤트 도달 온도, 압력 상승률에 대해서는 EGR 율이 증가함에 따라 감소 한다. Fig. 7 에서 EGR 율이 증가하면 LTHR 발열 비율이 감소되는 것을 알 수 있다.

3.2 과급했을 때의 HCCI 연소 과정

과급했을 때의 HCCI 연소 과정에 대해 조사했다. 과급압 0.101MPa(3.1 절의 EGR 율 0 으로 같은 조건의 예혼합기), 0.202 MPa 의 두가지의 조건에 대해 비교했다. 두 조건의 조성(몰분율)을 Fig. 8 에 나타내었고, 압력, 온도, 열발생률 이력, 연소 기간을 Fig. 9 에, 열발생 비율을 Fig. 10 에 나타냈다. Fig. 8 을 보면, 과급했을 때는 산소 농도는 거의 일정 (0.203 mol/mol 와 0.207mol/mol)하고, 산소 분압이 0.0206 MPa 에서 2 배의 0.0412 MPa 에 증가된다. 이 두 가지의 조건에서 LTHR 발열 비율을 비교하면, 어느 조건이 키 팩터가 되는지를 파악할 수 있다고 생각할 수 있다. 또한, Fig. 8 의 온도 이력, 연소 기간을 보면, 열용량이 작은 것이 과급압 0.202 MPa 의 조건에서 먼저 LTHR 발현 온도에

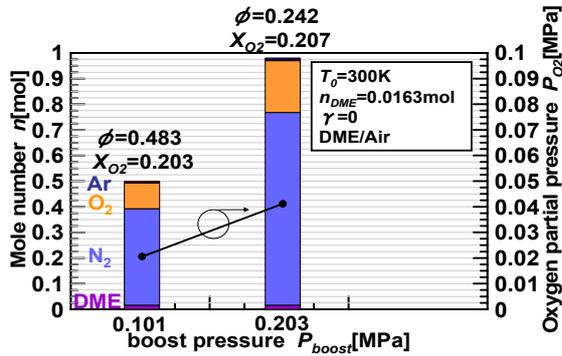


Fig. 8 Gas composition (mole number) of initial gas mixture in each boost pressure

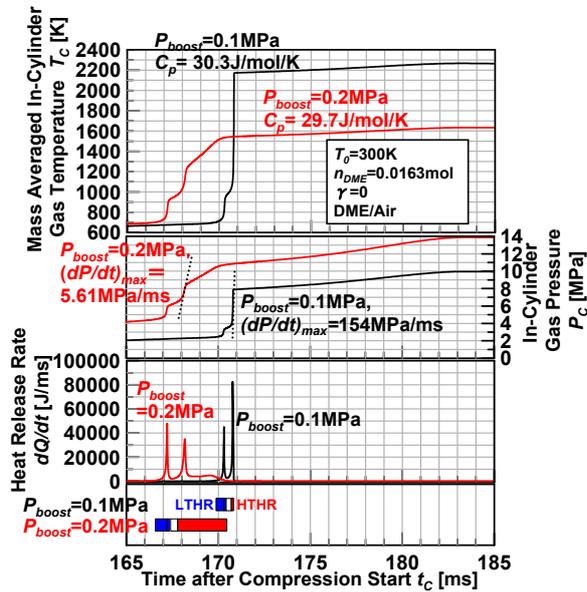


Fig. 9 Histories of in-cylinder gas temperature, pressure and HRR and combustion duration in each boost pressure

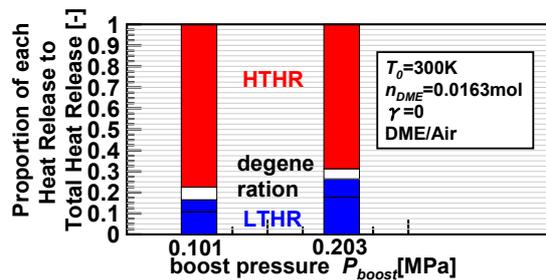


Fig. 10 Proportion of each heat release to total heat release

도달한다. 이것은 열용량의 큰 연료의 비율이 줄어 든 것에 의한다. 그 후에도 과급압 0.202 MPa의 조건 쪽이 먼저 각 key timing 에 이른다. 최고 도달 온도가 과급압 0.202 MPa의 조건 쪽이 열용량이 작음에도 불구하고 633 K 정도 낮은 1634 K였다. 이는 과급에 의해 공기량이 증가하고 이 때문에 온도 상승이 더딘 CO₂와 H₂O 같은 다분자의 수(몰수)가

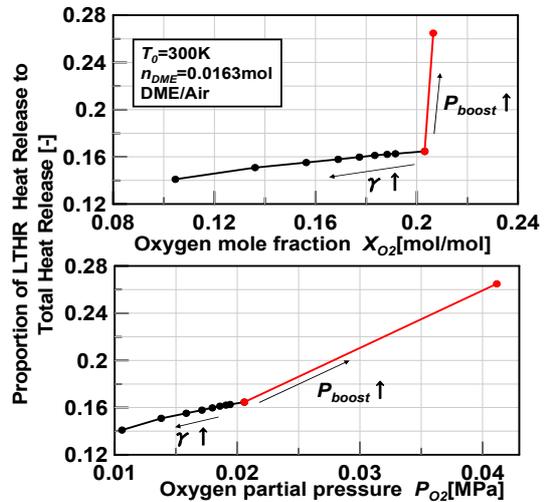


Fig. 11 Proportion of LTHR heat release to total heat release

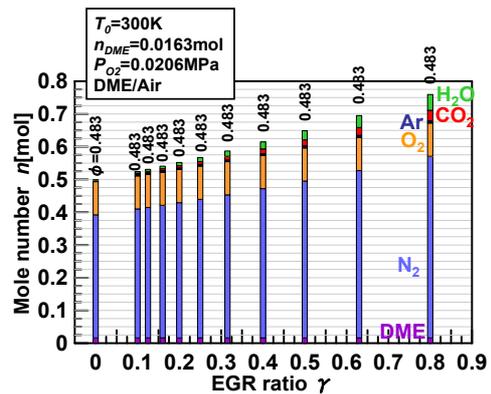


Fig. 12 Gas composition (mole number) of initial gas mixture when O₂ partial pressure is constant

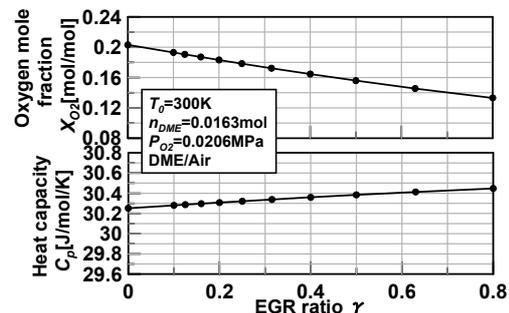


Fig. 13 Oxygen mole fraction and partial pressure and Heat capacity when O₂ partial pressure is constant

0.482 mol 증가되었기 때문이라고 생각된다. 압력 상승률은 저하되고 있지만 이것은 최고 도달 온도의 저하에 의해서 반응속도가 저하되었기 때문이라고 생각할 수 있다. 또한, Fig. 10에서 LTHR 발열 비율을 보면 과급압 0.202 MPa의 조건 쪽이 10% 많다. 산소 농도는 일정하지만 산소 분압은 2 배가 되므로

산소 농도보다는 산소 분압이 LTHR 발열 비율의 키 팩터로 생각된다. Fig. 11 에서 3.1 절의 결과와 조합해서 산소농도, 산소분압과 LTHR 발열비율의 관계를 도식화 했다. 이 그림으로부터도 산소 분압이 키 팩터라고 예측할 수 있다.

3.3 산소 분압을 일정하게 했을 때의 HCCI 연소 과정
이전의 각 절에서 산소 분압이 LTHR 발열 비율

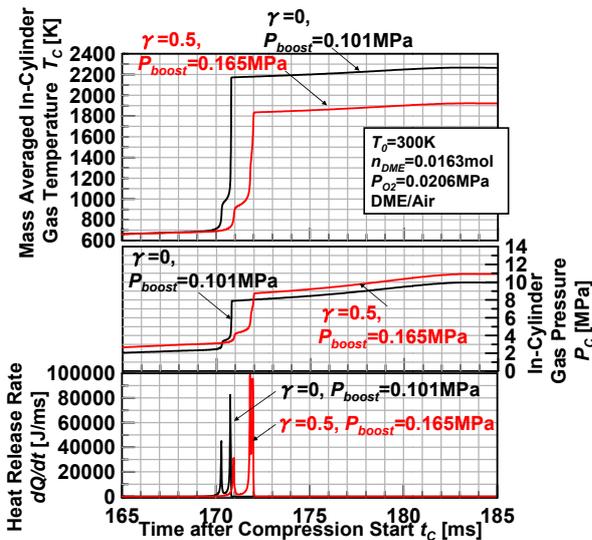


Fig. 14 Histories of in-cylinder gas temperature, pressure and HRR when O2 partial pressure is constant

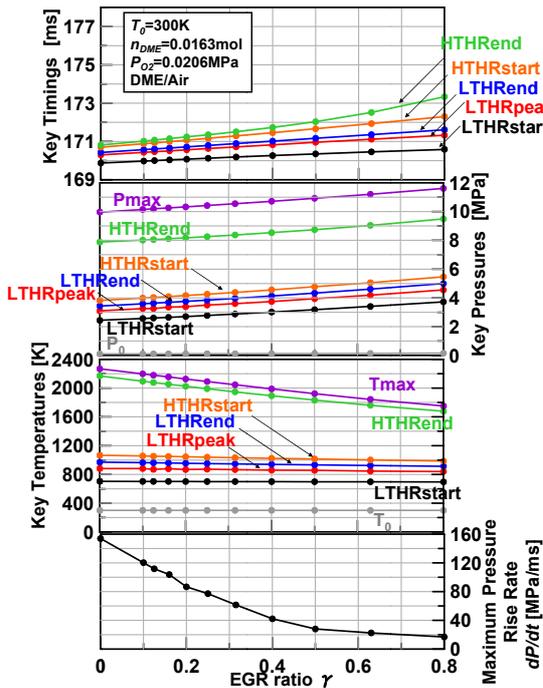


Fig. 15 Key timings, pressures and temperatures and maximum PRR when O2 partial pressure is constant

을 결정하는 키 팩터가 된다고 제안하였다. 본 절에서는 EGR 율과 과급을 조합하여서 산소 분압을 일정하게 했을 때의 HCCI 연소 과정에 대해 조사 했다. Fig. 12 에서는 각 조건의 조성(몰분율)을 나타냈다. 또한, 각 조건의 당량비도 아울러 나타냈다. 투입 열량을 일정하게 유지하면서 산소 분압, 즉 산소의 분자수가 일정한 조건이므로 트랩 되는 모든 산소와 연료의 질량으로부터 계산되는 당량비는 일정하게 유지된다. Fig. 13 은 각 조건의 산소농도, 열용량을 보이고 있다. Fig. 14 는 EGR 율이 각각 0, 0.5 로 다른 조건일때 압력, 온도, 발열 생율 이력을 보이고 있다. Fig. 15 는 각 이벤트 도달시기, 온도, 압력, 압력 상승률을 나타내고 있다. Fig. 16 에서는 열발생 비율을 나타냈다. Fig. 13 으로부터 EGR 율이 증가함에 따라 산소 농도는 감소되고 열용량은 증가된다. Fig. 14, 15 로부터 EGR 율만을 증가시켰을 경우에는 각 이벤트 도달시각은 지연되지만, 이 경우도 열용량의 증가에 의하는 것이라고 생각할 수 있다. 최고 도달 온도가 감소되고 있는 것은 열용량의 증가에 영향을 받기

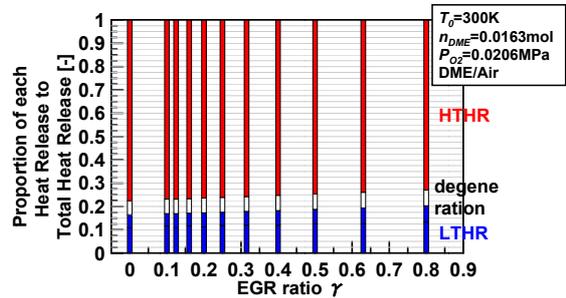


Fig. 16 Proportion of each heat release to total heat release

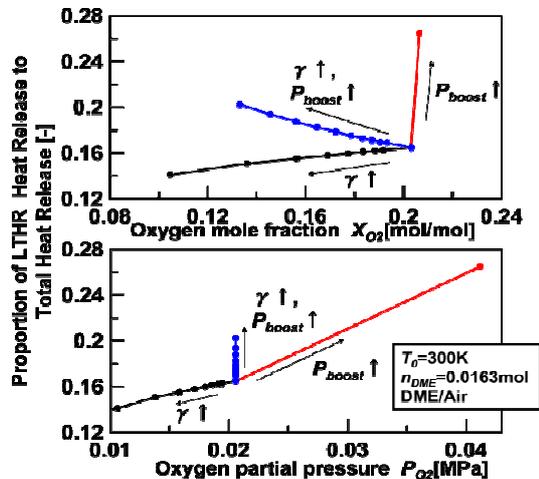


Fig. 17 Proportion of LTHR heat release to total heat release

때문이고 이는 비열이 큰 분자의 수가 증가(Fig. 12)되었기 때문이라고 생각할 수 있다. 각 이벤트 도달 온도, 압력 상승률에 대해서는 EGR 율만을 증가했을 경우와 같이 감소되지만 최고 도달 압력은 증가했다. 이것은 초기 압력의 증가로 인한 최고 압력을 증대시키는 효과가 열용량의 증가에 의한 최고압력을 저하시키는 효과를 웃돌았기 때문에 이라고 생각할 수 있다. Fig. 16 으로부터 산소 분압이 일정한 조건에서 EGR 율을 증가시키면 LTHR 발열 비율도 증가되는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 13 에서 산소농도는 감소되고 있는 것을 알 수 있는데 이는 산소 농도가 증가하면 LTHR 발열 비율이 증가한다고 하는 종래의 인식과 다른 결과를 보이고 있다. Fig. 17 에서는 지금까지의 결과를 모두 조합해 산소농도, 산소 분압과 LTHR 발열 비율과의 관계를 도식화 했다. 이 그림으로부터 산소 농도보다 산소 분압 쪽이 LTHR 발열 비율에 대한 기여도가 크고, 키-팩터가 되고 있다고 생각할 수 있다. 산소 분압 일정한 조건하에서 발열 비율이 변화된 것으로부터 산소 분압만으로는 LTHR 발열 비율을 결정할 수 없다고 하는 것을 알았다.

4. 결 론

배기재순환(EGR) 와 과급이 HCCI 연소 과정에 미치는 영향을 해명하기 위해서 DME 공기예혼합기를 대상으로 하고 화학반응 수치계산을 실시해 검증했다. 또 EGR 율을 감소, 혹은 과급압을 증가했을 때에 관측되는 저온 산화 반응 과정(LTHR)에서 생기는 열발생이 증가하는 현상에 대해 고찰해서 이하의 지견을 얻었다.

(1) EGR 율이 증가되면 LTHR 개시, 피크, 종료, HTHR 개시, 종료 타이밍은 지연되고 최고압력, 온도, 압력 상승률은 저하된다. 또한 LTHR 발열 비율은 저하된다. 타이밍의 지연과 최고 온도, 압력의 저하는 EGR 가스중의 불활성 가스의 영향으로 열용량이 증가했기 때문이라고 생각할 수 있다. 압력 상승률의 저하는 최고 온도의 저하에 의해서 반응속도가 저하했기 때문이라고 생각된다. LTHR 발열 비율의 저하는 산소 농도, 산소 분압이 감소했기 때문이라고 생각할 수 있다.

(2) 과급압이 증가되면 LTHR 개시, 피크, 종료, HTHR 개시, 종료 타이밍은 조기화, 최고 도달 온도, 최대압력 상승률은 저하된다. 타이밍의 지연은 열용량이 큰 연료의 비율이 작아져, 가스 전체의 열용량이 작아졌기 때문이라고 생각할 수 있다.

최고 도달 온도의 저하는 과급에 의해 투입되는 공기량이 증가하고 이 때문에 비열이 큰 분자의 수가 증가했기 때문이라고 생각할 수 있다. 최대 압력 상승률의 저하는 최고 온도의 저하에 의해서 반응속도가 저하했기 때문이라고 생각할 수 있다.

(3) 압력이 일정할 때 EGR 율을 감소시킨 경우 예혼합기의 산소 농도가 증가해서 LTHR 발열 비율이 증가된다. 또한 산소 농도를 일정하게 해서 과급을 했을 경우에도 LTHR 발열 비율은 증가한다. 이러한 효과는 일반적으로는 예혼합기의 산소 분압의 증가의 수반으로 인해서 LTHR 발열 비율이 증가된다고 할 수 있다. 단지 산소 분압을 일정하게 해 산소 농도를 변화시켰을 경우는 LTHR 발열 비율이 변화한 것으로부터 산소 분압만이 LTHR 발열 비율을 결정하고 있는 것이 아니라는 결론을 얻었다.

후 기

본 연구는 이 논문은 2012 년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (2012R1A1A1044855) 과 2013 년도 지역혁신인력양성사업, 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 산업기술혁신사업인 ‘친환경 DME 연료 실증보급을 위한 기술개발’의 일환으로 수행하였음.

참고문헌

- (1) Andreae, M. M., Cheng, W. K., Kenney, T. and Yang, J., 2007, "On HCCI Engine Knock," SAE 2007-01-1858.
- (2) Yamashita, D., Soonpyo, K., Sato, S. and Iida, N., 2005, "The Study on Auto-ignition and Combustion Process of the Fuel Blended with Methane and DME in HCCI Engine," *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.36 No.6 pp.85~90.
- (3) Sjöberg, M., Dec, J. E. and Cernansky, N. P., 2005, "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.
- (4) Luz A.E., Rupley, F. and Miller, J.A., 1998, Sandia National Laboratories Report, SAND87-8248B.
- (5) Luz, A.E., Rupley F. and Miller, J.A., 1989, Sandia National Laboratories Report, SAND89-8009B.
- (6) Kanehara, M. and Iida, N., 2011, "Influence of Compression Speed on HCCI Ignition and Combustion," *The 22th Internal Combustion Engine Symposium*.

- (7) Curran, H. J., Pitz, W. J., Westbrook, C. K., Dagaut, P., Boettner, J.-C. and Cathonnet, M., 1998, "A Wide Range Modeling Study of Dimethyl Ether Oxidation," *International Journal Chemical Kinetics*, 30-3, pp. 229~241,
- (8) Kwon, O. S., Jeong, D. W., Lim, O. T. and Iida, N., 2009, "Effect of the Boost Pressure on Thermal Stratification in an HCCI Engine Using Multi-Zone Model," SAE Paper 20097141.
- (9) Kanehara, D. and Mitsuru, K., 2008, "Characteristics of Low Temperature Reaction in DME/Air HCCI Process," JSME Conference, Ibaraki.
- (10) Nagae, M., Iida, N., 2007, "Effect of Intake gas Pressure and Temperature on HCCI Combustion Process by Using Numerical Analysis," *Proceedings of the 45th Symposium on Combustion*, Sendai International center.