

열적성층화가 DME/n-Butane 예혼합압축자기착화연소에 미치는 영향에 관한 연구

임 옥택^{*†}

* 울산대학교 기계자동차공학부

Study on the Effect of Thermal Stratification on DME/n-Butane HCCI Combustion

Ocktaeck Lim^{*†}

* School of Mechanical and Automotive Engineering, Univ. of Ulsan

(Received February 22, 2009 ; Revised October 15, 2010 ; Accepted October 16, 2010)

Key Words : Knocking(노킹), Rapid Compression Machine(급속압축장치), Homogeneous Charge Compression Ignition(예혼합압축착화), Thermal Stratification(열적성층화), Two-Dimensional Chemiluminescence (2 차원화학발광)

초록: HCCI 엔진연소에서 열적성층화 효과는 노킹을 회피하는 수단으로서 생각되고 있다. 본 연구에서는 DME 와 n-Butane 을 연료로 하는 HCCI 엔진연소의 열적성층화 효과를 조사하였다. 예혼합기가 연소실내부에 투입되고 부력의 효과를 이용하여 연소실 내부에 열적성층화를 형성한다. 그 뒤에 피스톤의 압축에 의해서 단열압축 시킨 후 연소실압력과 2 차원화학발광법을 계측하여 해석하였다. 열적성층화가 존재하는 경우에는, 저온산화반응과 고온산화반응의 시작시기가 균질한 경우에 비해서 진각되었고 연소기간은 길어졌다. 발광의 시작은 온도가 높은 곳에서부터 시작하여 온도가 낮은 곳으로 전파 되는 것을 확인하였고 발광기간도 길어짐을 확인하였다.

Abstract: The thermal stratification effect has been thought as one of the way to avoid dramatically generating the heat from HCCI combustion. We investigate the effect of thermal stratification on HCCI combustion fueled by DME and n-Butane. The thermal stratification occurs in a combustion chamber of a rapid compression machine with premixture by buoyancy effect that is made of fuel and air. The premixture is then adiabatically compressed, and during the process, the in-cylinder gas pressure is measured and two-dimensional chemiluminescence images are prepared and analyzed. Under the thermal stratification, the LTR starting time and the HTR starting time are advanced than that of homogeneous case. Further, the LTR period and the luminosity duration under homogeneous conditions are shorter than the corresponding quantities under stratified conditions. Additionally, under stratified conditions, the brightest luminosity intensity is delayed longer than that of homogeneous condition.

- 기호설명 -

- HCCI : Homogeneous Charge Compression Ignition; 예혼합압축착화
- HTR : High Temperature Reaction; 고온산화반응
- LTR : Low Temperature Reaction; 저온산화반응
- P : Pressure; 압력 [MPa]
- PRR : Pressure Raise Rate; 압력상승률[MPa/ms]
- RCM : Rapid Compression Machine; 급속압축장치

- T : Temperature; 온도[K]
- t : time; 시간[ms]
- 0 : Initial time; 압축초기시간

1. 서 론

대기오염문제와 에너지 자원고갈 문제로 인해서 내연기관 분야에 있어서 고효율, 저공해성을 갖는 예혼합압축착화(이하 HCCI)기관이 주목 받고 있다.⁽¹⁾ HCCI 기관은 연소실내에 공급된 균질하고 희박한 예혼합기를 피스톤에 의해 단열압축하고 다

† Corresponding Author, otlim@ulsan.ac.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

점 동시적인 예혼합기의 자기착화에 의해 벌크 (bulk) 연소시켜 운전하는 기관이다. 그러나, HCCI 연소는 스파크 플러그 또는 분사시기들의 제어와 같은 착화시기를 제어하기 위한 하드웨어가 없고 피스톤이 만들어내는 압축 열에 의한 화학반응에 전적으로 의존하고 있기 때문에 연소 시기의 제어의 어려움과 운전 영역의 한정 등의 문제로 인해 실용화에는 이르기 위해서는 여러 과제들이 존재한다. 특히, 고부하에 있어서의 노킹 회피에 관한 연구에는 연소실내의 온도나 농도의 성층화를 이용하는 방법이 제안되고 있다.⁽²⁻⁵⁾ 이것들은 열 발생의 타이밍을 예혼합기의 불균질성에 의해 연소실 내부에 편차를 갖게 하여 열 발생시기를 분산시켜서 압력상승률을 완만하게 만들 수 있다. 하지만, 실제 엔진에서 연소실내의 예혼합기의 증발 잠열, 비열비, 잔류가스와 벽면과의 열전달, 경계층, 유동 등과 같은 불균질성들이 존재하고 있으며, 이것들이 서로서로 복잡하게 영향을 주고 받기 때문에 그 효과를 정량적으로 검토하기가 매우 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 잔류가스나 유동의 영향을 무시할 수 있는 급속압축장치(Rapid Compression Machine; 이하 RCM)를 사용하고, 불균질성을 주는 요인을 최대한 억제시키면서, 온도성층화가 HCCI 연소의 특성에 끼치는 영향과 그 메커니즘을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치

Fig. 1 및 Table 1 은 본 연구에서 사용한 RCM 및 그 제원을 나타낸다. 연소실벽면에 감긴 리본 히터를 사용하여 압축 시작 직전의 실린더 내 온도를 제어하고 연소실 벽면들과 흡기관 및 배기관

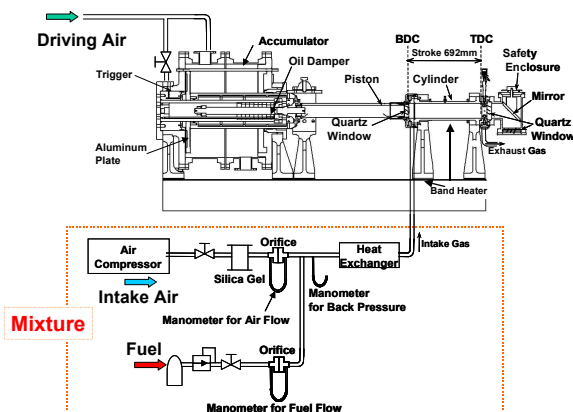


Fig. 1 Schematic of RCM

그리고 연소실 내부에 열전대를 사용해서 각 지점들의 온도를 측정했다. RCM 은 가압된 공기를 사용하여 알루미늄 판을 밀어주면, 함께 연결된 피스톤이 움직이게 되고 적절한 위치에서 멈출 수 있도록 유압을 사용하였다. 최초 피스톤의 하사점(BDC)으로부터 상사점(TDC)에 도달하는 데 걸리는 시각은 185ms 다.

발광은 실린더 헤드 부에 설치된 석영제 유리 및 안전보호장치(safety enclosure)내와 그 아래쪽으로 설치한 2 장의 평면거울에 의해 반사된다. 연소 실내의 발광은 U. V. 렌즈(Hamamatsu photonics: C4869)를 통과 후, CCD 카메라(Hamamatsu photonics: C4187)에 의해 증폭되고, 릴레이 렌즈에 의해 CCD(Hamamatsu photonics: C4880)에 결상이 된다. 프레임밍 카메라는 200nm~900nm 에 분광 감도를 가지고, 피스톤 외면에 부착되어 있는 차광판이 포토인터럽터(Omuron: EE-SX1070)를 통과한 시각으로부터 임의의 노광 시간으로 1 회의 사이클에 대해서 8 장의 발광 화상의 촬영이 가능하다. 촬영한 이차원발광 은 연소실의 내경을 전부 촬영하였고, CCD 에 기록된 화상의 단일화소는 연소실 평면의 0.67mm 에 해당한다.

2.2 실험연료

본 연구에서는, 연료로서 DME 과 n-Butane 을 사용했다. DME 는 반응시작과 함께 발광을 시작하

Table 1 Specification of RCM

Items	Value.
Bore×Stroke	145×692mm
Cylinder volume	12.2×10 ⁻³ m ³
Combustion Chamber volume	7.93×10 ⁻⁴ m ³
Compression Ratio	14.6
Combustion Chamber Thickness	48mm
Combustion Chamber type	Pancake type
Compression Duration	185ms
Maximum Endurable Pressure	5MPa

Table 2 Fuel properties

Items	DME	n-Butane
Molecular Formula	CH ₃ OCH ₃	C ₄ H ₁₀
Low Heat Value	28.8 kJ/g	48.0 kJ/g
Heat Release in LTR	10~30 %	0~5 %
Heat Release in HTR	70~90 %	95~100 %
Molecular Structure		

고, 반응을 끝내면 발광도 끝난다고 하는 특성을 가지고 있어서 발광상 해석에 적합하다. 또한 DME 은 저온산화반응(LTR)에 있어서의 발열량이 크므로 열적성층화 특성을 확인하는데 적합하다. 상대적으로 LTR 에 있어서의 발열량이 적은 n-Butane 를 사용하여 연소특성을 비교하였다. Table 2 에 그 연료특성을 정리되었다.

2.3 연소기간의 정의

연소의 시작과 종료의 시기 및 연소기간의 정의를 Fig. 2 에 도시하였다. 연소실험에 의해 얻은 지압 선도와 체적이력에 의해 logP-logV 를 그리고, 그 경사가 나타내는데 polytropic 지수가 변화되는 점을 순서대로, 저온산화 반응 발생 시기(tLTRstart), 저온산화 반응 종료 시기(tLTRend), 고온산화 반응 발생 시기(tHTRstart), 고온산화 반응 종료 시기(tHTRend)로 하고, 저온산화 반응 발생으로부터 고온산화 반응 종료까지를 연소 기간으로 했다. 또한, 저온 산화반응의 종료시기부터 고온 산화반응의 시작시기까지를 축퇴기간(Degeneration)으로

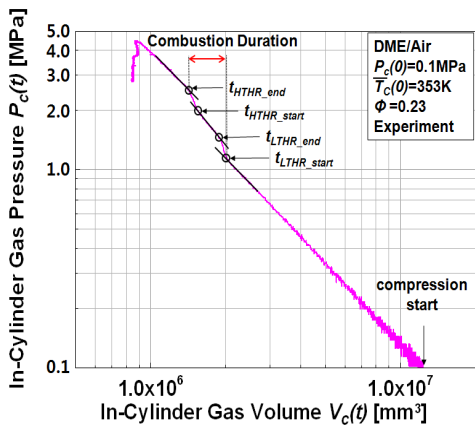


Fig. 2 Definition of combustion duration

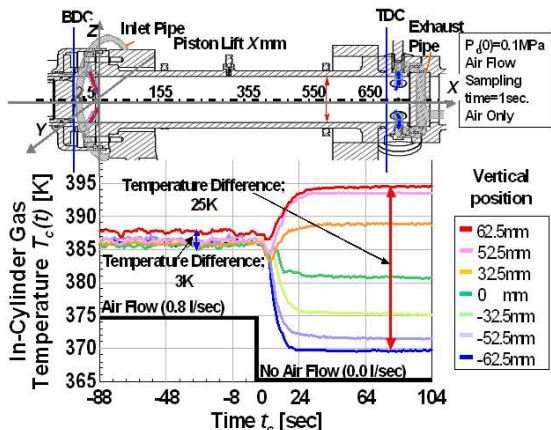


Fig. 3 In-cylinder gas temperature distribution

정의하였다. 또한 연소기간의 해석에 대한 신뢰성을 높이기 위해서 P-V 그래프, P-t 그래프, 압력상승률 등을 참조하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연소실내의 온도분포 작성

연소실내의 온도성층화의 영향을 정량적으로 확인 하기 위해서 연소실내부의 예혼합기의 온도를 측정하였다. 수평으로 설치된 연소실 안에 온도가 균일한 조건을 만들기 위해서 0.8l/sec 예혼합기를 공급하고, 온도성층화 효과를 작성하기 위해서는 예혼합기의 공급을 정지시켜서 부력 효과(Buoyancy Effect)를 발생시키고 온도의 성층화를 작성했다 (Fig. 3). 자체 제작한 7 개의 열전대 (K 형, 지름 0.2mm) 가 달려있는 온도분포 측정 장치를 사용해서 각각의 위치 별로 측정 하였고, 계산을 통하여 각각의 온도에 따른 예혼합기의 부피에 대한 히스토그램으로 나타내었다. Fig. 4 는 온도가 균일한 경우의 연소실 내부의 온도분포를 보여주고 있

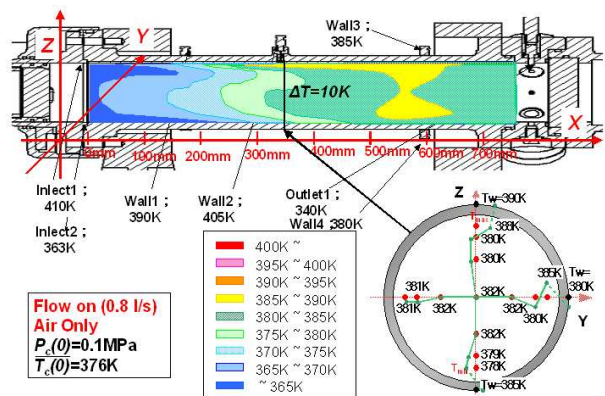


Fig. 4 The isothermal line under thermal stratified condition with temperature measurement (No Air Flow)

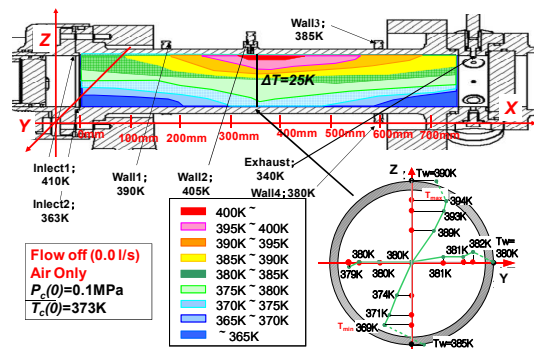


Fig. 5 The isothermal line under homogeneous condition with temperature measurement (Air Flow)

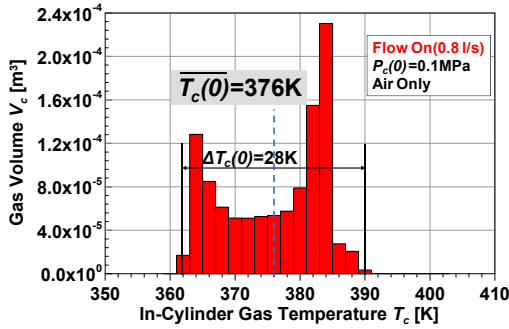


Fig. 6 In-cylinder gas temperature histogram of temperature of homogeneous condition at BTDC

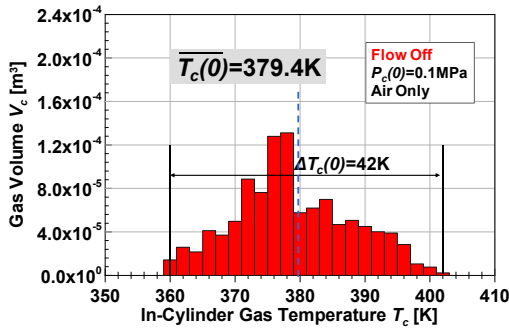


Fig. 7 In-cylinder gas temperature histogram of temperature of thermal stratification condition at BTDC

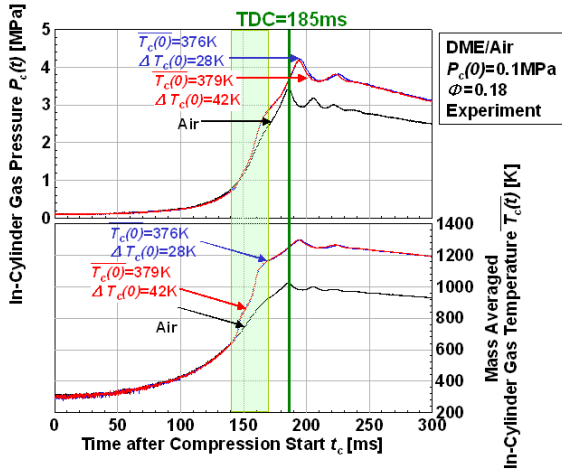


Fig. 8 Histories of in-cylinder gas pressure and mass averaged temperature fueled with DME

다. 연소실 전체적으로 온도분포가 크지 않고 수직방향으로 10K의 온도차가 발생되었다. Fig. 6의 히스토그램에서 저온부분과 고온부분에 차지하는 예혼합기의 부피가 크고, 다른 온도에 대한 부피는 거의 일정하고, 전체의 온도차는 28K가 되었다. Fig. 5는 온도성층화조건인 연소실 내부의 온

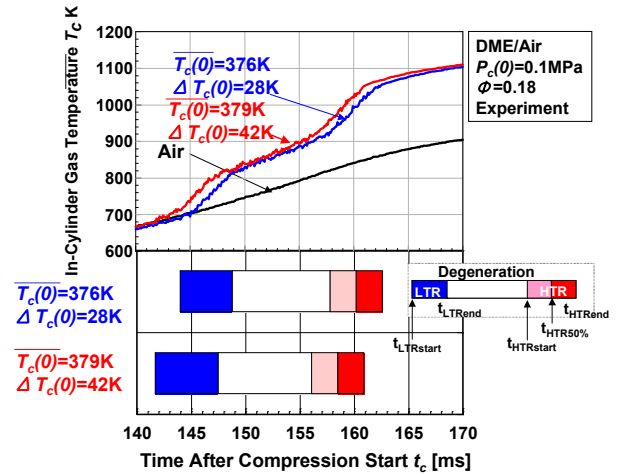


Fig. 9 Extended figure of temperature histories and combustion duration fueled with DME

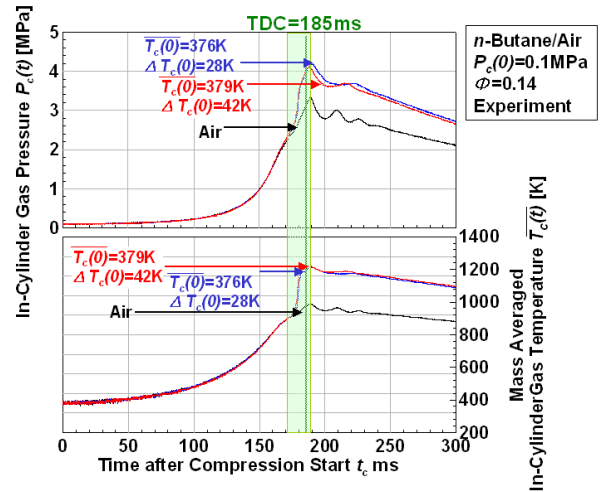


Fig. 10 Histories of in-cylinder gas pressure and mass averaged temperature fueled with n-Butane

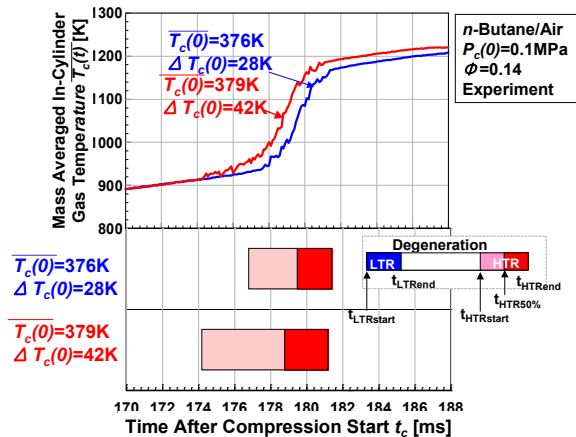


Fig. 11 Extended figure of temperature histories and combustion duration fueled with n-Butane

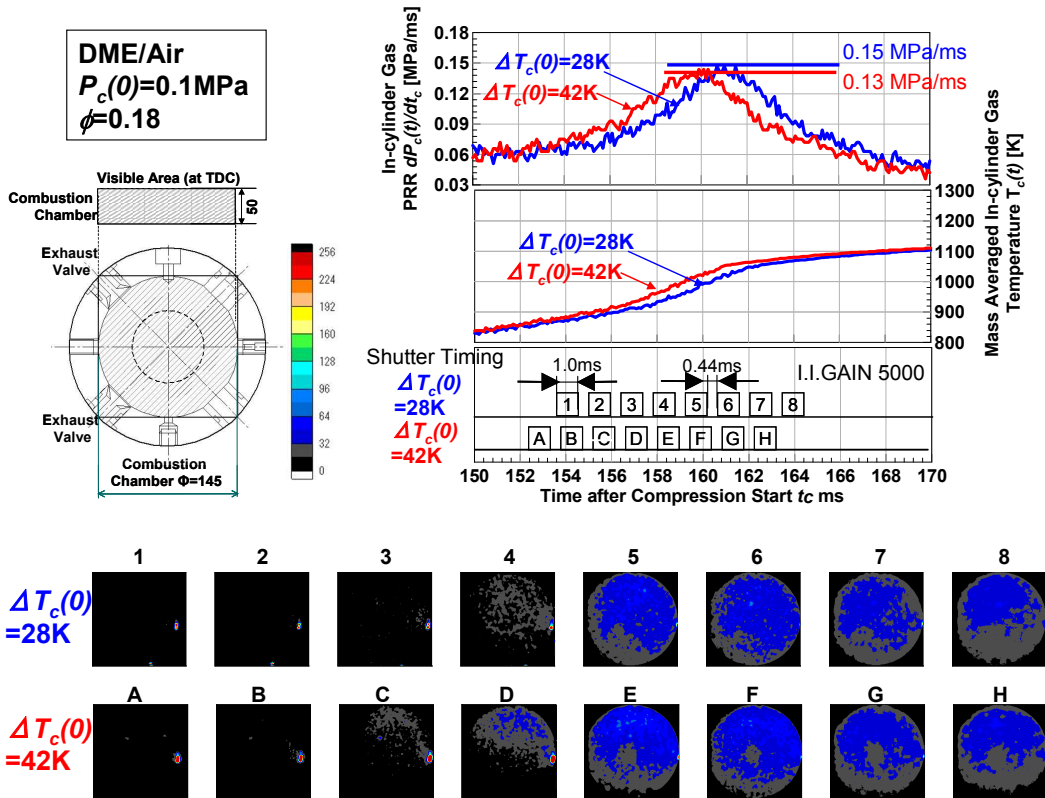


Fig. 12 Chemiluminescence images, histories of PRR and Temperature fueled with DME

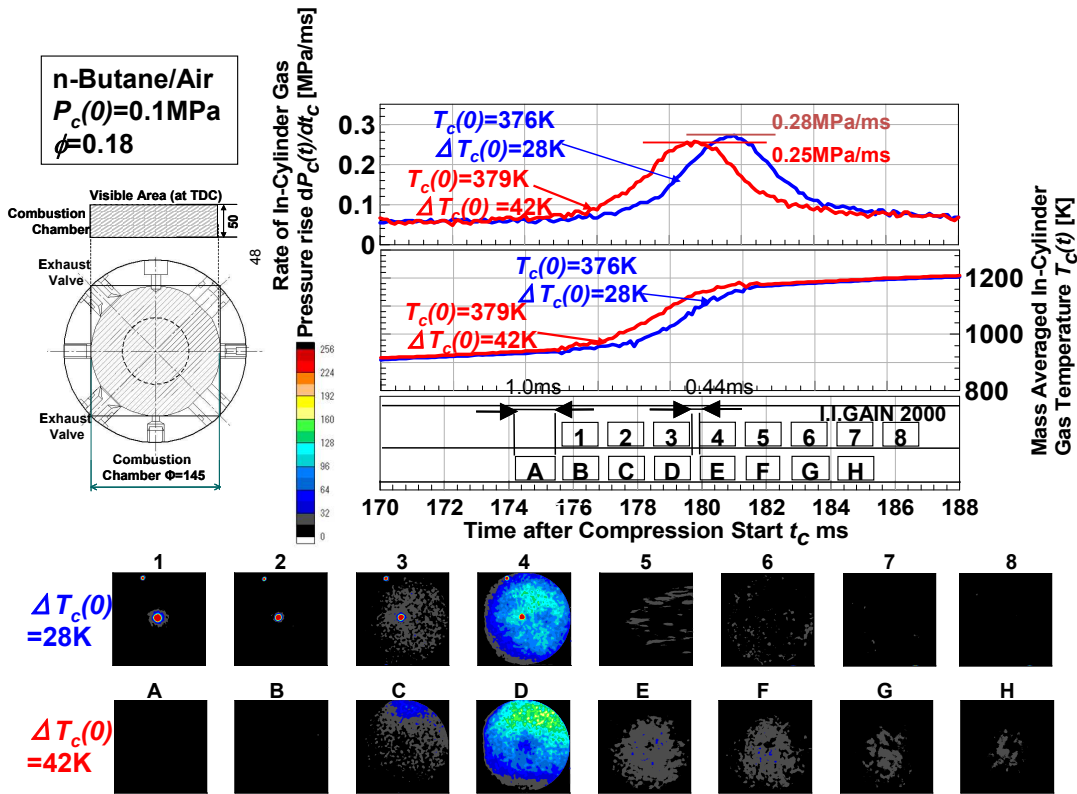


Fig. 13 Chemiluminescence images, histories of PRR and Temperature fueled with n-Butane

도분포를 보여주고 있다. 연소실 전체적으로 온도 차이가 발생되고, 수직방향으로 25K 온도차가 발생되었다. Fig. 7의 히스토그램의 결과에서는, 평균온도에 근접하는 예혼합기의 부피가 가장 많았고, 전체의 온도차는 42K로 확대되었다. 또한 각각의 조건에서 연소실내 가스 온도 T_c 를 산출한 결과 온도가 균일한 경우에는 376K, 온도성층화의 경우에는 379K가 되었다.

1.2 HCCI 연소실험

작성된 온도분포를 가지는 예혼합기를 단열압축하고 HCCI 연소 실험을 하였다. 온도분포는 균일한 조건과 성층화의 조건에서 DME와 n-Butane을 사용하고 각각 당량비를 투입열량을 동일하게 하기 위해서 $\Phi=0.18, 0.14$ 로 하여 실험을 수행하였다.

DME에 있어서의 HCCI 연소 실험의 결과를 Fig. 8, 9에 나타냈다. Fig. 8에 내보인 압력이력, 온도이력으로부터는, 연소실내의 온도분포의 차이에 의한 영향은 확인하기 어려웠다. Fig. 9에 내보인 온도이력의 확대그림 및 연소기간해석으로부터는 그 차이가 작지만 온도분포의 차이에 의한 영향을 확인할 수 있었다. 온도성층화의 조건에서 균일한 조건에 비해 온도의 상승이 빠르고 저온산화 반응의 발생시기의 조기화에 기인하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 온도성층화 조건이 온도 균일한 조건에 비해서 저온산화 반응의 기간이 길고 그 만큼 연소 기간도 길어졌다.

Fig. 10에서 n-Butane의 경우 DME와 달리 저온산화반응이 존재하지 않고 있다. 하지만, 온도성층화의 경우 연소시간이 길어지는 동일한 경향을 확인할 수 있었다.

1.3 HCCI 화학발광의 계측

Fig. 12와 13은 DME와 n-Butane의 HCCI 연소 중의 고온산화반응 중에 발생하는 화학발광상을 보여주고 있다. 연소실의 구경을 전부 촬영하였다. 온도가 균일한 조건에서 연소압력상승률의 급격히 증가됨을 알 수 있었다. 연소발광과 압력 상승률의 변화를 서로 대응시켜보면 압력 상승률의 상승과 동시에 연소의 발광을 확인할 수 있었다. 온도 균일에서는 그 발광이 연소실 내에서 거의 동시에 보여지는 것에 비해 온도성층화 조건에서는 압축 전에 측정된 연소실내의 온도가 높은 상부에서 낮은 하부에 걸쳐서 순서대로 발광을 시작되고 있음을 알 수 있다. 또한, 저온산화 반응이 거의 보이지 않는 n-Butane에서도 같은 경향이 보여진다.

Fig. 10, 11에서 압력이력에는 온도분포의 영향은 그다지 보여지지 않지만, 온도성층화의 조건에서 온도의 상승이 빨리 시작하고 그 만큼 연소 기간이 길어지고 있으며 압력 상승률의 저감을 확인할 수 있었다(Fig. 13). 화학발광상에 있어서도 발광 시작 시기와 종료 시기에 더욱 편차가 있는 것을 확인할 수 있다.

1.4 화학발광시기와 온도상승률

Fig. 14는 화학발광 시작 시기에 대해서 해석한 그래프이다. Fig. 12의 DME의 화학발광상에 있어서 연소실의 상부와 하부의 40mm 사각형의 영역에 있어서 각각의 픽셀마다 발광 시작 시기가 이미지의 몇 번째의 화상에 있는지 조사했다. 온도 균일한 경우에는 상부와 하부의 양쪽의 영역에서 거의 동시에 발광이 시작되고 있는 것에 비해서 온도성층화 조건에서는 상부와 하부에서 약 1.4ms의 발광시기의 차이가 발생되었다. Fig. 15는 압축 초기의 온도분포 (ΔT)와 실험에서의 발광 시작의 시간차이 (Δt) 관계와 발광 시작시의 온도 상승률로 나눈 값 (Δt)도 같은 그림 위에 도시하였다. 약 1ms의 발광 시작의 시간차이를 발생시키는 데는 온도차이가 약 12K가 필요하고 발광시작의 시간차이가 길어진 것이 온도 상승률이 적은 시기에 발광하고 있는 것을 알 수 있다.

그러므로, 연소실내에 온도성층화를 만들어서 압력상승률이나 온도상승률이 적은 시기에 맞출 수 있다면 온도성층화의 효과를 보다 크게 얻을 수 있을 것이라 생각된다.

3.4 화학반응 수치계산

고온산화반응의 발생시기와 성층화 폭과의 관계를 확인하기 위해서 화학반응수치계산을 수행하였다. 계산에서 사용된 코드는 Sandia National Laboratory로 개발된 CHEMKINII⁽⁶⁾ 및 SENKIN⁽⁷⁾를 연구실에서 일부 수정하여 사용하였고, DME의 반응모델로서 Curran 등의 모델(화학종수: 79, 화학반응수: 351)⁽⁸⁾을 사용했다. 계산에서는 열손실, 잔류 가스는 고려하고 있지 않고, 모든 화학 종의 기체는 이상기체, 혼합기는 단열변화하고 질량은 보존된다고 하는 가정하에서 계산을 실시했다. Fig. 16은 상부와 하부로 그 영역을 나누어서, 각 영역에서의 질량평균가스 온도를 각각 초기 온도조건으로 가정하여 화학반응수치계산을 행한 결과를 보여주고 있다. 이전에 계측한 온도분포에서 연소실의 수평방향으로 상부의 온도평균(372K)과 하부의 온도평균(387K)으로 나누어서 계산하였다. 그

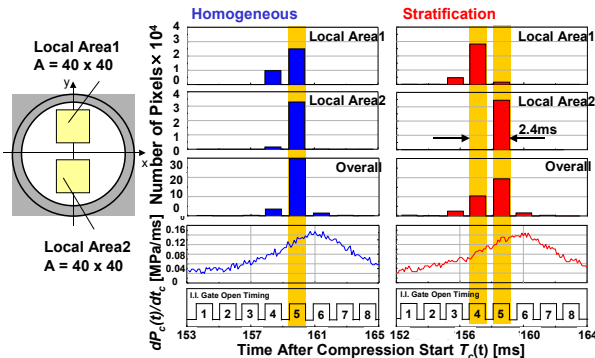


Fig. 14 Chemiluminescence start time with pressure rise rate fueled with DME

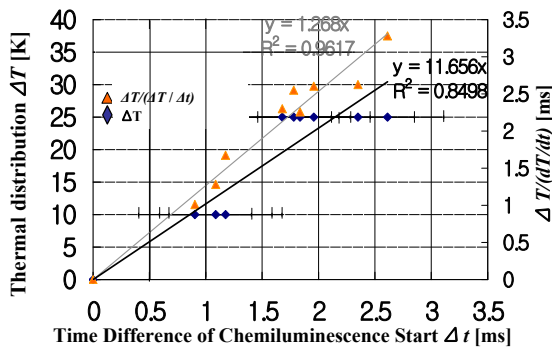


Fig. 15 Thermal distributions and time difference of chemiluminescence start timing fueled with DME

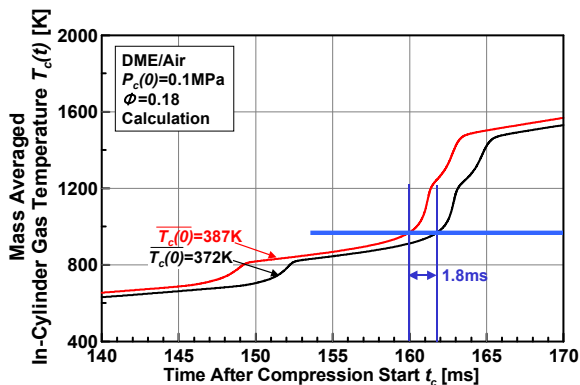


Fig. 16 In-cylinder gas temperature history calculate on CHEMKIN with DME

결과, 초기의 온도 차이에 의해서 고온산화 반응 발생 시기에 약 1.8ms 의 시간차이가 발생되었다. 실험조건에서는 열의 교환이 있는 것 등을 고려하면, 발광 시작의 시간차이와 거의 비슷한 값을 내 보이고 있는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 온도성층화의 정보를 정량적으로

알고 있는 조건을 만들고 저온산화반응의 특성이 다른 DME 와 n-Butane 을 연료로 하였을 경우의 HCCI 연소특성을 조사했다.

(1) 급속압축장치의 연소실내에 층상의 온도의 분포를 만드는 것으로, 저온산화반응의 열량의 차이가 다른 연료와 관계없이, HCCI 연소에 있어서의 압력상승률이 저감 되었다. 또한, 압력상승률의 저감은 연소 기간의 연장으로 기인된다.

(2) 화학발광상에 있어도 온도분포가 있음으로 인하여 발광의 시작시기에 차이가 발생되었다. 이것은 연소기간의 연장과 동일한 결과이다.

(3) 화학반응수치계산 결과에서 피스톤의 압축에 의한 온도 상승률의 차이가 발광의 시작시기에 시간차이가 발생되었다. 실제엔진에서 압축행정에서는 상사점 부근, 혹은 팽창행정으로 연소시킬 수 있으면, 온도 불균질성의 효과를 보다 더 크게 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문이 있도록 물심양면으로 응원해 주신 게이오 대학의 이이다 노리마사(Norimasa, IIDA) 교수님께 마음으로부터 감사를 드립니다.

본 연구는 지식경제부 기술혁신사업인 ‘클린 신 연료 동력시스템 개발’에서 수행된 연구입니다. 관계자들의 지원에 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Thring, R. H., 1989, “Homogeneous-Charge Compression-Ignition (HCCI) Engine,” *SAE Paper* 892068.
- (2) Kumano, K. and Iida, N., 2004, “Analysis of the Effect of Charge Inhomogeneity on HCCI Combustion by Chemiluminescence Measurement,” *SAE paper* 2004-01-1902.
- (3) Sjoberg, M., John E. D. 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) Eng, J. A., 2002, “Characterization of Pressure Waves in HCCI Combustion,” *SAE Paper* 2002-01-2859.
- (5) Kwon, O. and Lim O., 2009, “Effect of the Boost Pressure on Thermal Stratification on HCCI Engine Using Multi-Zone Modeling,” *Trans. of the KSME (B)*Vol.33, No.3.
- (6) Lim, O., Nakano, H. and Iida, N., 2006, “The Research About the Effects of Thermal Stratification on N-

Heptane/Iso-Octane-Air Mixture HCCI Combustion Using a Rapid Compression Machine,” *SAE paper* 2006-01-3319.

(7) Luz, A.E., Rupley, F. and Miller, J.A., 1989,

“CHEMKIN-II:A FORTRAN Chemical Kinetics Pacage for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics,” *Sandia National Laboratories Report*, SAND89-8009B.