

급속압축 장치를 이용한 불균일 예혼합기가 HCCI연소에 미치는 영향에 관한 연구

임 옥 택*

울산대학교 기계자동차공학부

An Investigation of HCCI Combustion Processes of Stratified Charge Mixture Using Rapid Compression Machine

Ock Taeck Lim*

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea
(Received 28 July 2008 / Accepted 24 February 2009)

Abstract : Effect of heterogeneity of combustion chamber has been thought as one of the way to avoid dramatically generating heat in HCCI Combustion. The purpose of this research is to investigate the effect of heterogeneity, especially thermal stratification and fuel strength stratification on HCCI Combustion fueled with DME and n-Butane. Thermal stratification is formed in Combustion Chamber of Rapid Compression Machine with 3 Kinds of pre-mixture has different properties. The stratified charge mixture is adiabatic compressed and on that process, in cylinder gas pressure and two-dimensional chemiluminescence images are measured and analyzed.

Key words : Combustion(연소), Ignition(착화), Knocking(노킹), Internal combustion engine(내연기관), Rapid compression machine(급속압축장치), Homogeneous charge compression ignition(HCCI, 예혼합압축자기착화)

Nomenclature

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

Subscripts

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

1. 서론

대기오염 문제와 에너지 자원고갈 문제를 배경으로 예혼합 압축 자기착화(HCCI)기관이 고공해, 고효율 내연기관으로서 주목 받고 있다.¹⁾ HCCI기관은 실린더내에 균질하게 공급된 희박한 예혼합기를 피스톤에 의해 단열압축하고, 다점 동시적인 자기착화에 의해 벌크(Bulk) 연소시켜 운전하는 기관이다. 그러나, 이 연소는 착화를 화학반응에 의존하고 있기 때문에 연소 시기의 제어, 운전영역이 저부하 영역에 존재한다는 것 그리고, 고부하에 있어서 노킹의 발생 등이 해결해야 할 문제에 있다. 최근의 센서 기술이나 제어 기술의 진보에 의해, 상기의 2개의 문제는 해결되고 있지만, 노킹에 관해서는 아직 해결되지 못하고 있다. HCCI연소시의 노킹의 발생

*Corresponding author, E-mail: otlim@ulsan.ac.kr

은 연소실내의 압력상승율이 5MPa/ms를 넘으면 발생하는 것이 알려져 있다.²⁾ 노킹 회피의 방법으로 연소실내의 온도불균일성이나 조성의 불균질성을 도입하는 수법이 있다.^{2,3)} 같은 공간에서 다른 타이밍으로 열발생시키는 것으로 압력상승율을 저감하고, 노킹을 회피한다고 하는 것이 불균질성을 도입이 목적이다. 그러나 연소 실내에서는 온도의 불균일성에 더해, 조성의 불균질성이 형성되어 있으면 생각되어, 각각의 효과를 정량적으로 검토할 수 없다.^{2,4)} 본연구에서는, 연소 실내의 불균질성 중, 온도의 불균일성에만 착안하고, 잔류 가스나 유동의 영향을 최소화 할 수 있는 급속압축장치(RCM)를 이용하고, 조성불균질성을 주는 요인을 극히 제외하고, HCCI연소 특성에 끼치는 영향을 검증하는 것을 목적으로 한다. 또 동시에 연료농도의 불균일성의 HCCI연소에 끼치는 영향도 확인하고, 온도와 농도의 불균일성의 조합에 의한 HCCI연소에의 영향의 변화를 검증한다.

2. 실험방법

2.1 실험계획

본 연구에서는 연소실이 수평으로 설치되어 있는 급속압축장치를 이용해 3개의 흡기구로부터 각각

다른 온도나 연료농도의 예혼합기를 공급하고, 연소실내에 층상의 온도의 분포나 연료농도분포를 형성한다. 그 형성한 층상의 온도분포 또는 연료농도분포를 갖는 예혼합기를 압축하고 압력이력을 계측하고 동시에 연소시의 화학발광상을 고속카메라에 의해 촬영하고 해석을 행한다.

2.2 실험장치

Fig. 1 및 Table 1은 본 연구에서 사용한 급속압축장치 및 그 사양이다. 연소실내의 압력을 피에조(piezo)형 압력 센서로 측정하고, 피스톤 변위를 로타리 인코더에 의해 계측한다. 급속압축장치의 연소실에는 3개의 흡기구가 마련되어 있어 Fig. 2의 흡기시스템을 이용하여 각각이 독립되어서 흡기온도, 연료농도를 설정할 수 있게 되어 있다. 흡입온도의 제어는 흡기구의 배관과 실린더 벽면에 감겨있는 리본 히터를 통해서 설정하고 열전상에 의해 측정한다.

공기유량 및 연료유량은 manometer에 의해 감시하고, 각각의 유량밸브에 의해 제어한다.

2.3 시험연료

본 연구에서는 기체연료인 DME, n-Butane을 이용했다. DME은 저온산화 반응(Low Temperature

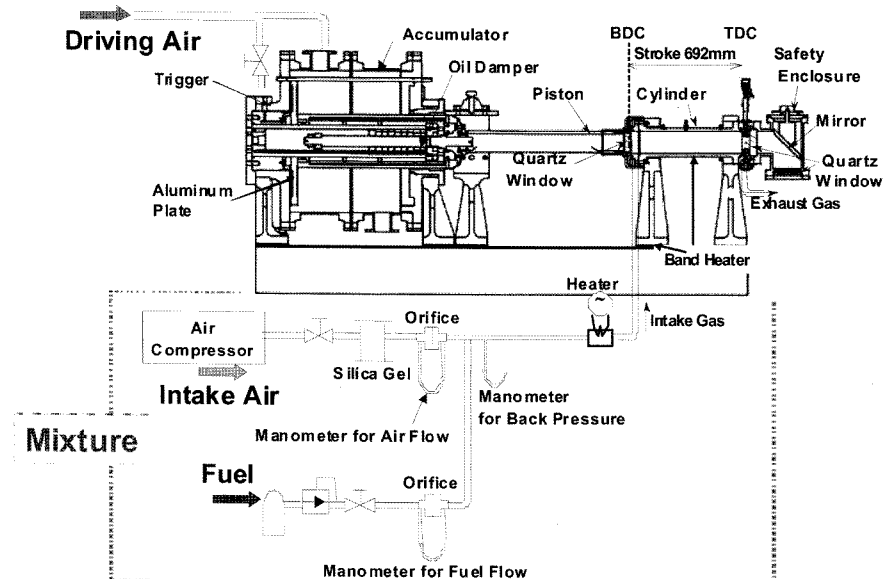


Fig. 1 Schematic of RCM

Table 1 Specification of RCM

Items	Value
Bore × Stroke	145×692 mm
Cylinder volume	$12.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
Combustion chamber volume	$7.93 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
Compression ratio	14.6
Combustion chamber thickness	48 mm
Combustion chamber type	Pancake type
Compression duration	185 ms
Maximum endurable pressure	5 MPa

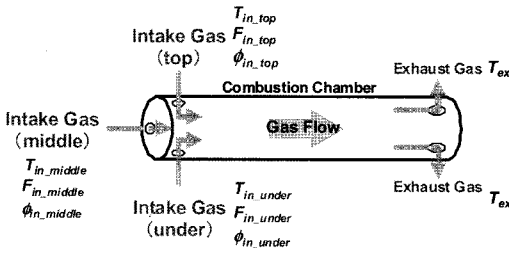


Fig. 2 Intake charging flow of RCM

Reaction; LTR)에 있어서의 발열량이 크고, n-Butane은 그 발열량이 작다고 하는 특징을 가진다. Table 2에 그 연료들의 특성을 정리했다.

Table 2 Fuel properties

Items	DME	n-Butane
Molecular formula	CH_3OCH_3	C_4H_{10}
Cetane number	55 - 60	<10
Low temperature reaction (LTR) start	$700 \pm 20\text{K}$	-
High temperature reaction (LTR) start	$880 \pm 20\text{K}$	$940 \pm 30\text{K}$
Molecular structure		

2.4 연소기간의 해석

연소실험에 의해 얻은 지압 선도와 체적이력에 의해 $\log P$ - $\log V$ 를 그리고, 그 경사가 나타내는 polytropic 지수가 변화되는 점을 순서대로, 저온산화 반응 발현 시기 $t_{LTRstart}$, 저온산화 반응 종료 시기 t_{LTRend} , 고온산화 반응(HTR) 발현 시기 $t_{HTRstart}$, 고온산화 반응 종료 시기 t_{HTRend} 로 하고, 저온산화 반응 발현으로부터 고온산화 반응 종료까지를 연소 기간으로 했다(Fig. 3).

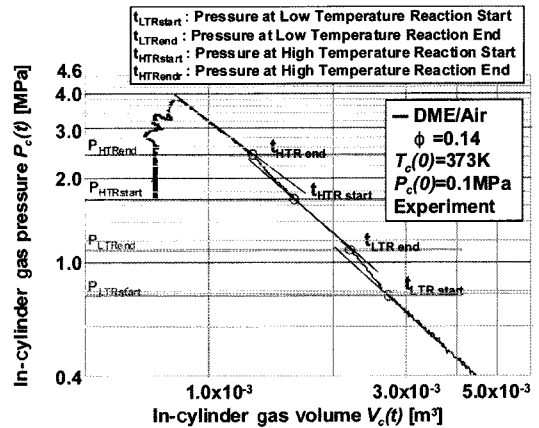


Fig. 3 Definition of combustion duration

3. 실험결과

3.1 온도의 성층화의 작성

연소실내의 온도의 불균일성의 영향을 정량적으로 보기 위해서 수평으로 설치된 급속압축장치의 연소실에 3개의 흡기구로부터 각각 다른 온도와 유량의 예혼합기를 공급하고 온도성층화를 형성시켰다. 형성된 온도분포와 각각의 온도에 있어서의 연소실내 가스의 체적은 Fig. 4-Fig. 9에 보여준다. 흡기온도를 $T_{in}=353\text{K}$ 으로 일정하게 유지하고 연소실 안에서 혼합기가 혼합되도록 흡기유량을 $F_{in}=0.63\text{l/s}$ 로 한 조건에서는 수직방향(Z방향)에 5K, 전체로 $T_c(0)=10\text{K}$ 의 온도차이가 존재하고 있고 온도의 표준편차는 5.3이었다(Fig. 4, Fig. 5). 이 흡기유량을 $F_{in}=0.24\text{l/s}$ 로 하면 전체적으로 24K의 온도차이가 생기고 있지만 표준편차가 10.0이다(Fig. 6, Fig. 7). 또한, 흡기구(상)로부터 $T_{in_top}=413\text{K}$, 흡기구(중)과 흡기구(하)로부터 $T_{in_middle}=T_{in_under}=293\text{K}$ 의 예혼합기를 공급했을 경우에는 수직방향(Z방향)에 25K, 전체로 $T_c(0)=45\text{K}$ 의 온도차이를 생성시킬 수 있었다. 또한, 위의 두 조건에 있어서 수평방향에 관해서는 거의 같은 온도로 분포되었다.

3.2 온도성층화의 HCCI연소 실험

3.1에서 보인 3종류의 온도분포를 소유하는 예혼합기를 단일압축하여 초기 온도 $T_c(0)=353\text{K}$, 당량비 $\Phi=0.23$ 의 DME HCCI연소 실험을 행했다. $T_c(0)=10\text{K}$ 과 $T_c(0)=24\text{K}$ 의 사이에는, 압력이거나 온도

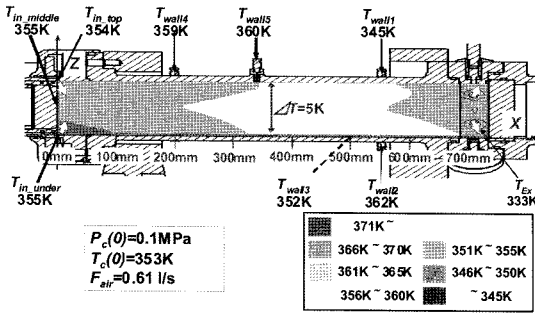


Fig. 4 Thermal distribution ($\Delta T_c(0)=10K$)

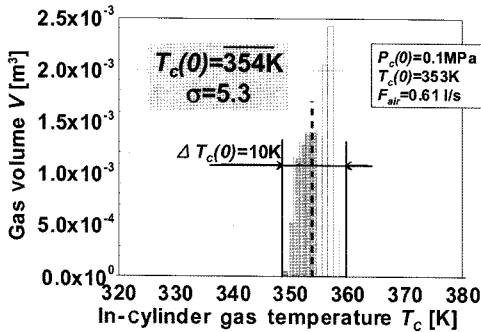


Fig. 5 Histogram of thermal distribution ($\Delta T_c(0)=10K$)

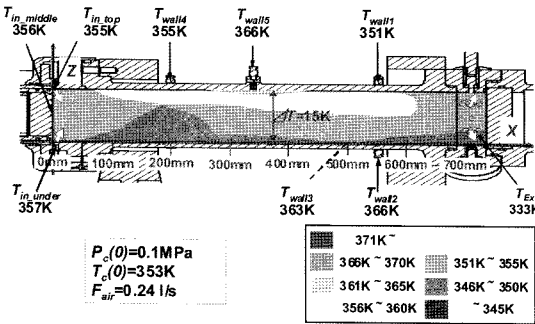


Fig. 6 Thermal distribution ($\Delta T_c(0)=24K$)

이력에서 큰 차이가 보여지지 않지만, $T_c(0)=45K$ 과는 확실하게 차이를 확인할 수 있다.

압력의 최대치는 거의 같아 상승이 완만하지만 온도 최대치에서 50K 정도의 차이가 생기고 있고 상승의 모양도 완만하다. 그림의 확대 및 연소 기간을 Fig. 11에 보였다. 최대압력상승율에 관해서는, $T_c(0)=10K$ 의 조건에서 $dP_c(t)/dt=0.24MPa/ms$, $T_c(0)=45K$ 의 조건에서는, $dP_c(t)/dt=0.18MPa/ms$ 와 0.06 MPa/ms도 저감되어 있다. 이것은, $T_c(0)=45K$ 의 조건으로 연소 기간이 가장 길어져 있는 것에 기인하

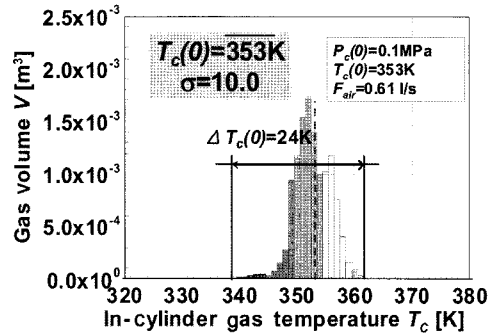


Fig. 7 Histogram of thermal distribution ($\Delta T_c(0)=24K$)

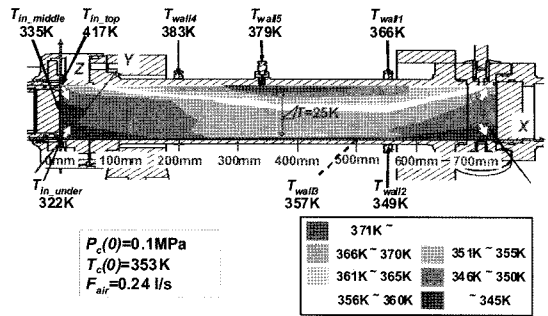


Fig. 8 Thermal distribution ($\Delta T_c(0)=45K$)

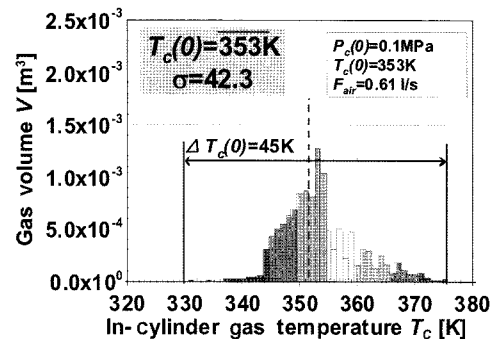


Fig. 9 Histogram of thermal distribution ($\Delta T_c(0)=45K$)

다고 생각된다. 연소 기간이 길어진 것은, $T_c(0)=10K$ 에 비해, 고온부에서 저온산화 반응 시작이 빠른 시기에 시작하고, 저온부에서 고온산화 반응이 가장 늦게 종료했기 때문이라고 생각된다. 이 연소 기간이 오랫동안 열손실과 연결되어 최대온도의 상승을 저감시킨 원인의 하나로 생각된다. 또, $T_c(0)=10K$ 과 $T_c(0)=24K$ 에서 연소 기간은 차이가 보여지지 않지만 고온산화 반응 기간이 $T_c(0)=24K$ 쪽이 약 1ms 정도 길게 되어, 그 영향으로 인해 최대압력상승율

Table 3 Experimental conditions

Fuel inhomogeneity	Thermal width $\Delta T_c(0)$	$T_c(0)$	Fuel	ϕ
Homogeneous	10K	354K	DME	0.23
			n-Butane	0.18
	24K	353K	DME	0.23
			n-Butane	0.18
	45K	353K	DME	0.23
			n-Butane	0.18
Inhomogeneous	24K	353K	DME	0.23
			n-Butane	0.18
	45K	353K	DME	0.23
			n-Butane	0.18
	24K	353K	DME	0.23
			n-Butane	0.18
45K	353K	DME	0.23	
		n-Butane	0.18	

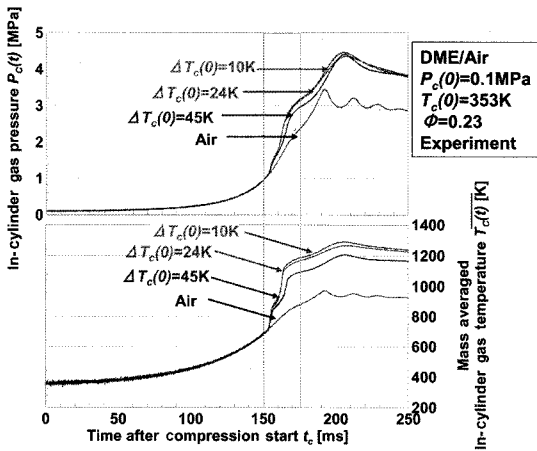


Fig. 10 DME HCCI combustion under thermal stratification effect

이 저감했다고 생각된다. 이것은, n-Butane에서도 같은 효과가 보여지고 있어서 고온산화 반응기간이나 연소 기간은 $T_c(0)=45K$ 의 조건으로 가장 길게 되어 그 영향으로 최대압력상승율이 저감되었다(Fig. 13).

3.3 농도성층화의 HCCI연소 실험

다음은 3개의 흡기구로부터 각각 다른 당량비의 예혼합기를 공급하고 연료농도분포를 형성시킨 후 단열 압축해 HCCI연소 실험을 행했다. 연료농도균일을 상정한 조건에서는 모든 흡기구으로부터 $\phi=0.23$ 의 예혼합기를 공급하고 불균일조건 때에는, 흡기구(상)와 흡기구(하)의 한쪽에는 당량비 $\phi = 0.46$ 의 예혼합기를 공급하고, 다른 한 방향에는 공기만을 주입하고, 흡기구(중)에는 당량비 $\phi=0.23$ 의 예혼

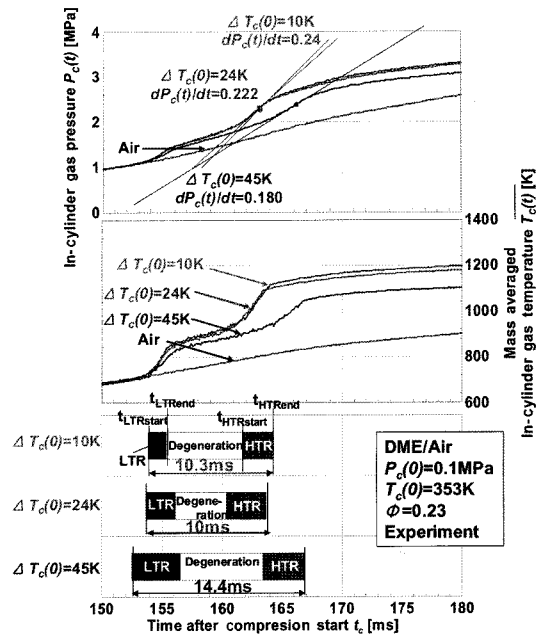


Fig. 11 DME HCCI combustion under thermal stratification effect on combustion duration

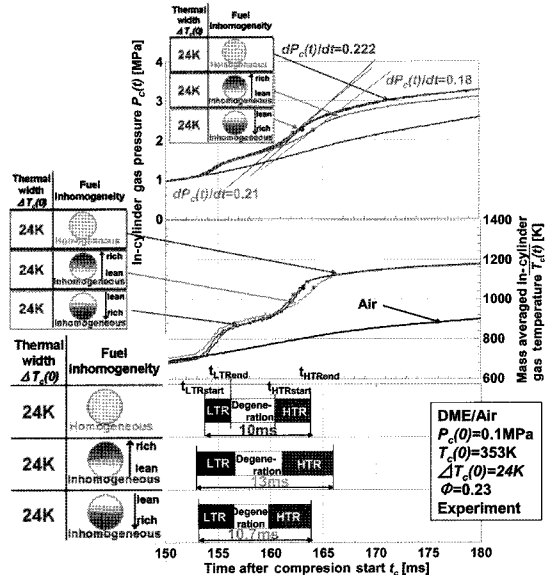


Fig. 12 DME HCCI Combustion under Fuel stratification effect on pressure, temperature and combustion duration

합기를 공급하여 연료농도분포의 형성을 도모했다. 온도분포와 연료농도분포를 조합시킨 HCCI연소 실험조건을 정리한 것이 Table 3이다. Fig. 12는

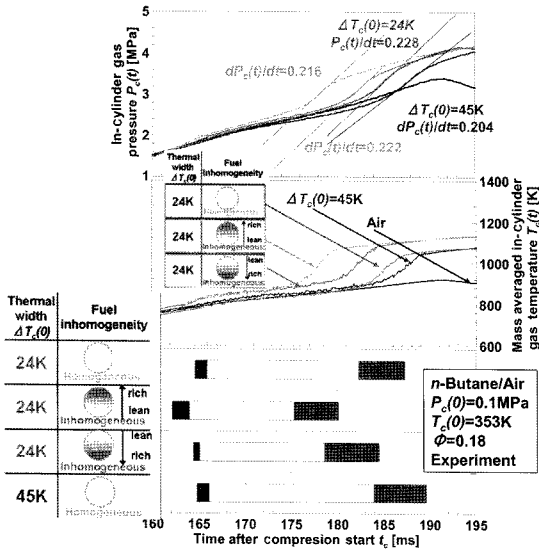


Fig. 13 n-Butane HCCI Combustion under Fuel stratification effect on pressure, temperature and combustion duration

$T_c(0)=24K$ 으로 온도분포의 영향을 제외한 조건에 있어서의 연료농도분포의 HCCI연소에의 영향을 조사한 것이다. 연료농도의 분포를 불균일하게 한 조건 쪽이 균일한 조건에 비해 전체로서 연소 기간이 장기화되고 있어, 최대압력상승율도 저감되어 있다. 이것은 $T_c(0)=24K$ 에 의한 영향으로 저온산화 반응에서의 발열에 의해, 원래 조금 고온이었던 상부가 보다 고온이 되어, 온도분포가 형성되었기 때문이라고 생각된다.

3.4 농도성층화, 온도성층화가 동시에 존재하는 경우의 HCCI연소 실험

Fig. 14에서 연소 실내의 온도분포와 연료농도분포가 동시에 존재하고 있었을 경우에 HCCI연소에 어떻게 영향을 끼칠지를 검증했다. 연소 기간과 압력상승율에 관해서 정리하였다. 이 조건은 고온산화 반응과 최대압력상승율에 큰 상관이 있다. 그와 동시에, 고온산화 반응 기간과 발광이 국소에서 확인되고 나서 전체적으로 발광이 확인될 때까지의 시간에는 상관이 있다. 이 발광이 산화 반응에 의존하고 있으므로 발광의 시작 시기가 국소에서 크게 다른 것은 고온산화 반응 시작전의 국소간에 크게 온도차이가 있다고 생각된다. 그것을 확인할 수 있

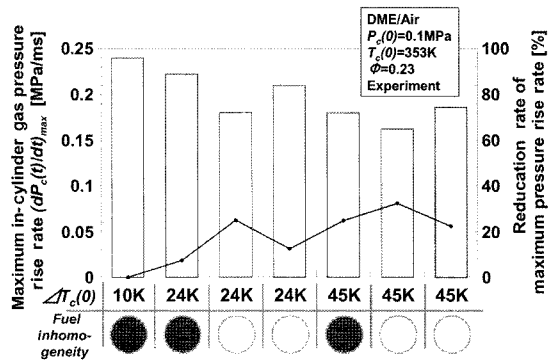


Fig. 14 DME HCCI Combustion under heterogeneity of pre-mixture effect on maximum pressure rise

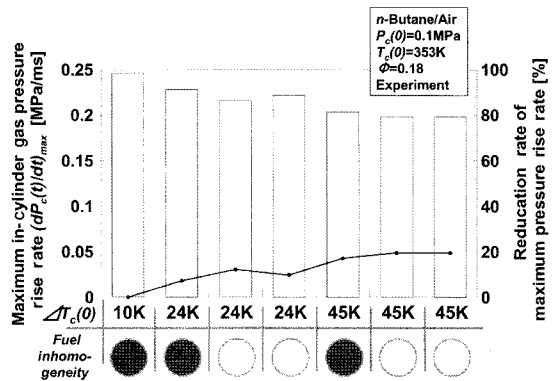


Fig. 15 n-Butane HCCI Combustion under heterogeneity of pre-mixture effect on maximum pressure rise

는 것이, 온도분포와 농도분포를 조합시킨 조건에서의 결과다. 조합에 의해 압력상승율의 저감 효과의 정도가 다르고 있어, 온도가 높은 상부에 연료농도가 짙은 부분이 함께 존재하는 분포가 되면, 균일 조건으로의 최대압력상승율의 저감율은 32.5%과 크고, 반대로 온도가 높은 상부에 연료농도가 얇은 부분이 이르는 것 같은 분포가 되면, 최대압력상승율의 저감율은 22.5%과 온도분포 단체에서의 저감율보다도 작아져 있다. DME는 저온산화 반응에서의 발열량이 당량비에 따라 다른 특징을 가지고 있기 때문에 연료농도분포가 존재하면 저온산화 반응 종료시에 온도분포가 형성된다. 압축 시작전의 온도분포와 그 형성된 온도분포가 적합했을 경우에는, 고온산화 반응 기간이 장기화되고 최대압력상승율은 저감되어 반대로 서로 상쇄했을 경우에는 최대압력상승율 저감의 효과도 상쇄되어버린다.

Fig. 15는 n-Butane을 이용했을 경우이며, DME과는 다르게, 연료농도분포에 의한 최대압력상승율의 저감 효과가 그다지 보여지지 않는다. 이것은, n-Butane이 DME과 다르게, 저온산화 반응에서의 발열량이 작기 때문에 저온산화 반응 종료시에 온도차이가 그다지 생기지 않기 때문이라고 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 온도 및 농도가 불균일한 예혼합기를 급속압축장치에 의해 압축하고, HCCI연소 실험을 행했다. 그 결과 이하의 의견을 얻을 수 있었다.

- 1) 연료에 관계없이 연소실내에 층상의 온도분포를 형성하는 것으로 HCCI연소에 있어서의 압력상승율의 저감을 할 수 있었다. 또, 동시에 연소기간의 장기화도 보여졌다.
- 2) DME과 같은 저온산화 반응에서의 발열량이 크고 그 발열량에 당량비 의존성이 있을 경우에는 연소 실내에 농도분포를 형성하는 것으로 압력상승율의 저감 효과를 얻을 수 있다. 반대로, 저온산화 반응이 작은 n-Butane에서는, 연료농도분포에 의한 압력상승율의 저감 효과는 그다지 보여지지 않았다.
- 3) 화학발광 상에 있어서 온도분포나 농도분포의 HCCI연소에의 영향을 확인할 수 있었다. 발광의 시작 시기의 국소간에서의 시간차이는 연소기간의 장기화에 기여하고 있다고 생각된다.
- 4) 온도분포와 연료농도분포는 잘 조합시키는 것으로 각각에서의 압력상승율 저감 효과에 비해

큰 효과를 얻을 수 있는 것을 알았다. 본 연구에 있어서는 최대로 32% 저감할 수 있었다.

후 기

이 논문이 있도록 물심양면으로 지원해 주신 게이오대학(KEIO University)의 이이다 노리마사(Nori-masa IIDA) 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

References

- 1) R. H. Thring, "Homogeneous-Charge Compression-Ignition (HCCI) Engine," SAE 892068, 1989.
- 2) K. Kumano and N. Iida, "Analysis of the Effect of Charge Inhomogeneity on HCCI Combustion by Chemiluminescence Measurement," SAE 2004-01-1902, 2004.
- 3) M. Sjöberg, J. E. Dec and N. 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 2005-01-0113, 2005.
- 4) J. A. Eng, "Characterization of Pressure Waves in HCCI Combustion," SAE 2002-01-2859, 2002.
- 5) O. T. Lim, "Research about Thermal Stratification Effect on HCCI Combustion Fueled with Primary Reference Fuel," Transactions of KSAE, Vol.16 No.5, pp.1-7, 2008.