

급속압축팽창기를 이용한 DME의 HCCI 연소

성 용 하¹⁾ · 정 길 성¹⁾ · 최 병 철²⁾ · 임 명 택^{*2)}

전남대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 전남대학교 자동차연구소²⁾

HCCI Combustion of DME in a Rapid Compression and Expansion Machine

Yongha Sung¹⁾ · Kil Sung Jung¹⁾ · Byungchul Choi²⁾ · Myung Taeck Lim^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

²⁾Automobile Research Center, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

(Received 14 March 2006 / Accepted 18 October 2006)

Abstract : Compression ignition of homogeneous charges in IC engines indicates possibilities of achieving the high efficiency of DI diesel engines with low level of NOx and particulate emissions. The objectives of this study are to further understand the characteristics of the HCCI(Homogeneous charge compression ignition) combustion and to find ways of extending the rich HCCI operation limit in an engine-like environment. DME fuel is supplied either in the form of premixture with air or directly injected in the combustion chamber of a rapid compression and expansion machine under the conditions of various equivalence ratio and injection timing. The cylinder pressure is measured and the rate of heat release is computed from the measured pressure for the analysis of the combustion characteristics. The experimental data show that the RCEM can operate without knock on mixtures of higher equivalence ratio, when DME is directly injected in the combustion chamber than introduced as a fraction of a perfect or nearly perfect premixture. Very early fuel injection timings usually employed in HCCI operation are seen to have only insignificant effects in control of ignition timing.

Key words : DME(Dimethyl ether), Rapid compression and expansion machine(급속 압축 팽창기), Homogeneous charge compression ignition(균일 혼합기 압축 착화), Rate of heat release(열발생률), Engine combustion(엔진 연소)

Nomenclature

ATDC : after top dead center
BDC : bottom dead center
BTDC : before top dead center
DI : directly injection
HTR : high temperature reaction
IMEP : indicated mean effect pressure
LTR : low temperature reaction
ROHR : rate of heat release

TDC : top dead center
 Φ : fuel-air equivalence ratio

1. 서론

엔진 배출가스에 의한 환경 문제와 화석연료 자원의 고갈로 인한 문제를 해결하기 위해서 배출 가스 저감과 연비 향상 및 대체 연료에 대한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 특히 디젤 엔진의 연소 개선 분야에서는 효율과 배기의 동시 개선이 기대되는 균일 혼합기 압축 착화(HCCI; homogeneous charge compression ignition) 연소 엔진의 연구

*Corresponding author, E-mail: mtlim@chonnam.ac.kr

개발에 관심이 집중되고 있다.¹⁻³⁾

이 연구에서는 HCCI 연소의 실용화에 가장 큰 문제로 지목되는 착화 시기 제어 및 운전영역 확대 방안을 실험적으로 모색하기 위하여 급속압축팽창기(RCEM; rapid compression and expansion machine)에 커먼레일형 분사 장치를 설치하고 DME 연료의 공급 방법, 당량비 및 분사시기를 변경하면서 압축 착화 실험을 수행하였다.

2. 실험 장치

RCEM, 커먼레일형 DME 분사 장치 및 데이터 취득 장치 등으로 구성된 실험 장치는 개략적으로 Fig. 1과 같다.

2.1 급속압축팽창기(RCEM)

이 연구에서는 HCCI 연소 실험을 위해서 구조가 실제 내연기관과 비슷한 Fig. 2와 같은 형상의 RCEM을 사용하였는데, 행정체적이 3,534cc(내경 100×450)인 이 RCEM의 설계 및 제원에 대해서는 이전의 논문⁴⁾에 상세하게 설명되어 있다.

2.2 액상 DME 고압 분사 장치

상온에서 가스 상태인 DME를 실린더 내에 고압

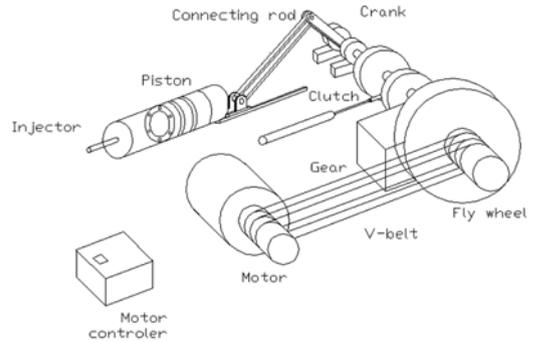


Fig. 2 Schematic diagram of RCEM

으로 직접 분사하기 위해 가압 액화 후 추가 승압하는 연료 공급 장치를 Fig. 3과 같이 구성하였다. 이 장치는 저압 펌프(Haskel, DTV-4)로 DME를 20 bar로 압축하여 액화시킨 후에 다시 승압 펌프(Haskel, ASF-100)로 설정 압력(300~1000 bar)까지 가압하고 커먼레일을 통해 연료를 인젝터(Denso, YJ74)에 공급하도록 구성되어 있다. 이 실험에 사용된 인젝터의 제원은 Table 1과 같다.

3. 실험 조건 및 방법

급속압축팽창기에서 DME 완전 예혼합기의 압축 착화 운전은 조기 착화로 인한 노크 때문에 압축비,

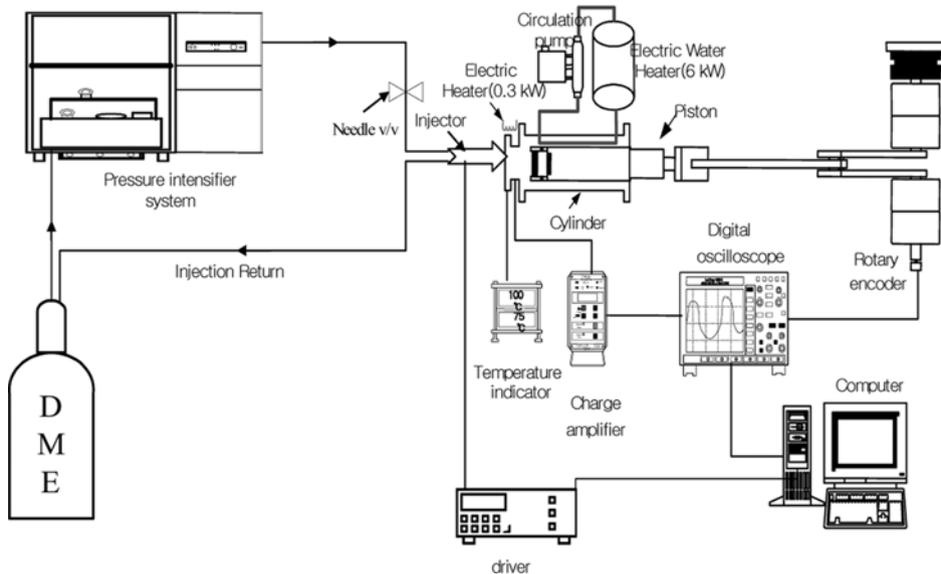


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

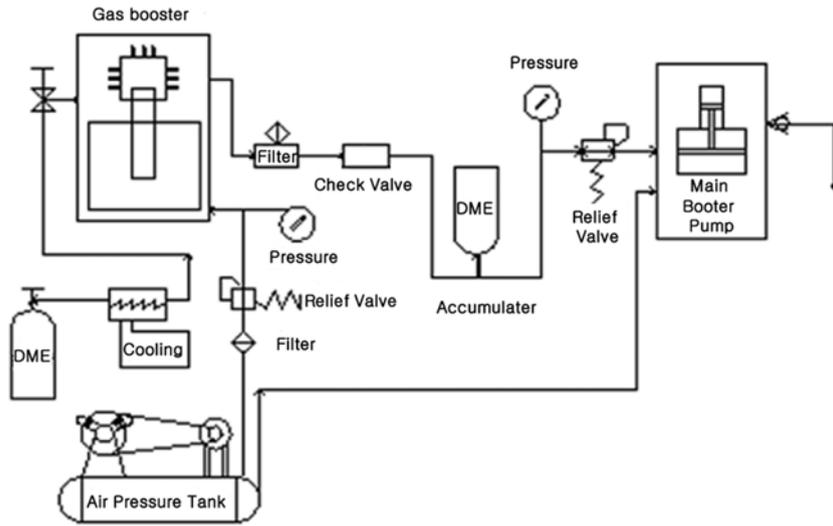


Fig. 3 Schematic diagram of DME supply system

Table 1 Specifications of fuel injector

Valve	Lift(μm)	45~50
Nozzle	Open pressure(kgf/cm ²)	50~60
	Needle lift(mm)	0.35
	Seat diameter(mm)	$\Phi 2.25$
	Nozzle holes(mm)	$6 \times \Phi 0.22$

당량비 및 혼합기 온도가 낮은 영역으로 제한되어 보다 넓은 범위에서 HCCI 연소를 실현하려면 착화 시기를 제어할 방법이 필요하다.⁴⁾ 이 연구에서는 실린더 내에 연료를 다양한 시기에 직접 분사하면 완전혼합기로 공급하는 경우에 비해서 착화시기를 얼마나 제어할 수 있는지 조사하기 위해 일련의 압축 착화 시험을 수행하였다. 실험 조건은 이전에 수행된 DME 엔진 연구 결과⁵⁾와 DME-공기의 완전 예혼합기 압축 착화 실험 결과⁴⁾를 토대로 Table 2와 같이 결정하였다.

실험용 연료로 사용된 DME(CH₃OCH₃)는 기화성이 좋아서 공기와 혼합이 용이하고, 상온에서 쉽게 액화하며, 분자 속에 산소가 들어 있으며 인체에 대한 독성이 LPG 정도로 적은 물질이다. DME를 압축착화 엔진에 사용하면 불꽃 점화 엔진에 비해 높은 효율을 유지하면서 PM을 저감할 수 있고, EGR과 함께 적용하면 NO_x도 저감할 수 있어서 디젤 대체 청정 연료 후보로 각광 받고 있다.^{6,7)} 그러나

Table 2 Test conditions

Parameters	Description	
Compression ratio	12	
Revolution per minute	100	
Initial air temperature (°C)	30	
Fuel	DME	
Way of fuel introduction	Premixed mixtures	Direct injection
Fuel supply pressure (bar)	-	500
Equivalence ratio (Φ)	0.1, 0.2, 0.25, 0.3	0.1, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4
Fuel injection timing (deg)	-	180°BTDC ~10°ATDC

DME는 점도가 너무 작아서 연료 공급 계통의 누설과 마멸 등의 문제를 일으키기 때문에 윤활성 향상제(ETHYL, hitec-4140)를 750 ppm 정도 첨가한 후에 사용하였다.

엔진을 이용한 연소 연구는 대부분 수백 사이클의 평균 연소 압력을 이용하여 연소 특성을 파악하지만 RCEM은 1회의 실험을 수행하기 위한 준비 시간이 길어 수백 사이클의 시험 결과를 확보하기가 매우 어렵다. 그러나 RCEM은 1사이클만을 운전하는 단기동 엔진으로 사이클 변동이 적다는 장점이 있다고 알려져 있고, 이 연구에서도 별도의 재현성 실험에서 imep 사이클 변동이 표준편차의 3% 이내임을 확인하였다. 따라서 연소 해석에는 동일한 조

건에서 2~3회 반복 측정된 압력의 평균값을 사용하였다.

분사시점과 분사기간은 RCEM의 크랭크축 끝단에 설치된 로터리 인코더(Autonics, E40S-360-3-5) 신호를 이용하여 Labview 프로그램으로 제어하고, 압축 및 연소 과정 중 연소실 내부의 압력은 압전형 압력 센서(Kistler, 6061B)와 전하 증폭기(Kistler, 5011A)를 사용하여 측정하였다. 착화시점 및 연소 특성은 연소실 압력 선도로부터 열발생률을 계산하여 분석하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 연료 공급 방법의 영향

연료 공급 방법이 DME 혼합기의 착화와 연소에 미치는 영향을 보기 위하여 아래와 같이 3가지 방법으로 실험을 수행하였다. 첫째 방법은 가스 상태의 DME를 공기와 혼합하여 하루 정도 안정시킨 후 연소실에 공급하고 압축 착화하는 완전 예혼합 연소이고, 둘째 방법은 BDC에서 500 bar의 액상 DME를 연소실 안에 분사하고 5분 후 압축 착화하는 방법이며, 셋째 방법은 BDC에서 DME를 연소실 안에 분사하고 바로 압축 착화하는 것이다.

이 연구에서는 압축 착화 후 연소 압력이 급격하게 상승했다가 감소 및 요동하며 비정상적 굉음이 발생하는 현상을 노크로 간주하였는데 압축비 12, 초기온도 30°C인 조건에서 노크가 일어나는 한계 당량비는 연료 공급 방법에 따라 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 변화하였다. 즉, DME와 공기를 완전히 혼합하여 실린더로 공급하고 운전한 경우에는 당량비 0.25부터 노크가 일어나기 시작하지만, 분사 5분 후 압축 착화하는 경우에는 당량비 0.3일 때 노크가 관찰된다. 연료를 분사하자마자 압축 착화하는 경우에도 노크는 당량비 0.3부터 관찰되나 분사 5분 후 압축을 시작하는 경우에 비해 노크가 약하게 일어난다. 따라서 압축 시작 또는 착화 시점에 혼합기가 균일하게 형성될수록 노크 발생 한계당량비가 약간 낮아짐을 알 수 있다.

연료 공급 방법이 연소에 미치는 영향을 보기 위하여 당량비는 0.2로 유지하되 연료공급 방법을 3가지로 변경하며 수행한 실험에서 취득한 연소 압력

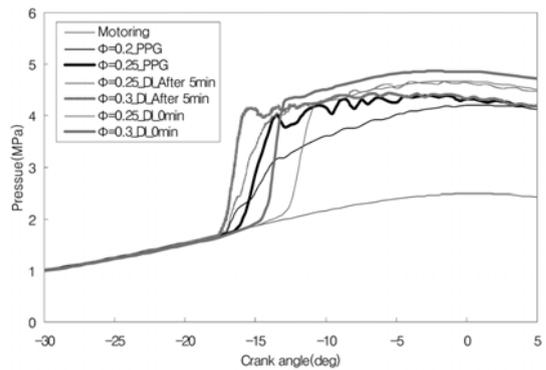


Fig. 4 Measured combustion pressure to show knock-limited equivalence ratio for different ways of fuel addition

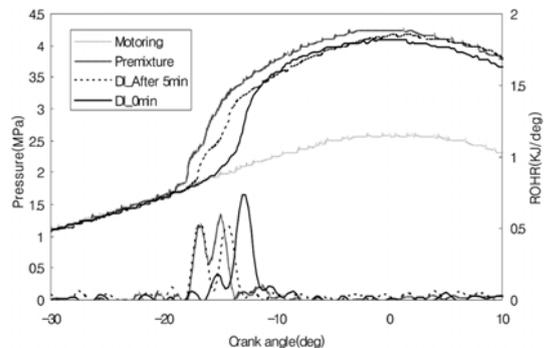


Fig. 5 Combustion characteristics to show influence of fuel supply method ($\Phi = 0.2$)

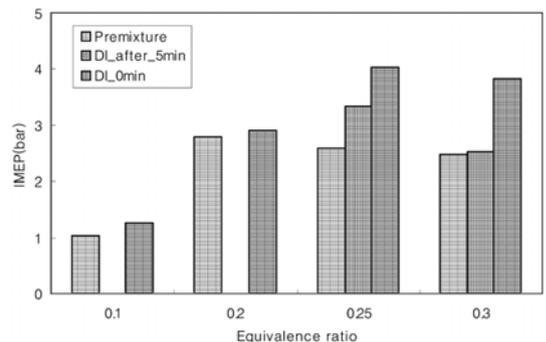


Fig. 6 IMEP to show influence of fuel supply method

과 열발생률을 Fig. 5에 제시하고, 효율 및 성능에 미치는 영향을 보기 위해 당량비를 0.1부터 0.3까지 단계적으로 증가시킨 경우의 IMEP를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5를 보면 열발생률에 각기 2개의 봉우리가 보이는데 이것은 저온 연소 반응과 고온 연소 반응이 차례로 진행되면서 2개의 발열 곡선이 중첩되

기 때문에 풀이된다. 완전 예혼합기의 압축 착화와 비교할 때 DME를 분사하고 5분 후 압축 착화하면 저온 연소 반응은 비슷한 시기에 발생하지만 고온 연소 반응이 늦게 발생하고, DME를 분사하자마자 압축 착화하면 저온 연소 반응과 고온연소 반응이 모두 늦게 시작함을 볼 수 있다. 이는 연소실내 연료 분포의 균일성이 착화시기에도 약간 영향을 준다는 것을 의미한다.

연료와 공기를 예혼합하여 연소실에 공급하면 직접 분사하는 경우보다 균일한 착화와 연소에 유리하다. 그러나 Fig. 6에서 보이는 것처럼 IMEP가 감소하는 경향을 동반한다. 이는 연료의 조기 착화로 인해 사이클의 압축일이 증가하기 때문이다. 완전 예혼합 연소의 경우에는 당량비가 0.2를 초과하면 연료량이 증가함에도 불구하고 IMEP가 감소함을 볼 수 있는데 이는 조기 착화와 노크로 인한 급속 연소로 인해 압축일이 크게 증가하고 압력과 열손실 증가도 발생하기 때문으로 보인다. 연료를 직접 분사하는 경우에도 당량비 0.3부근에서는 노크가 발생하면서 IMEP가 낮아짐을 볼 수 있다.

4.2 당량비와 분사시기의 영향

당량비가 DME의 착화와 연소에 미치는 영향을 보기 위하여 먼저 압축비 12, 분사시기 BDC, 초기온도 30°C인 조건에서 당량비를 0.2부터 0.3까지 0.05씩 증가시킨 시험에서 얻어진 연소압력과 열발생률을 Fig. 7에 나타내었다.

노크가 발생하지 않는 당량비 범위인 0.3미만에서는 당량비가 증가하면 착화 시점 이후의 압력 상승률이 증가하면서 착화 즉 고온 연소 반응 시기가 조금 지연되는 것을 볼 수 있는데 이는 연료 분사량이 많아짐에 따라 커지는 증발 잠열이 혼합기의 온도를 내리기 때문으로 판단된다. DME의 저발열량이 경유의 67% 정도이나 증발잠열은 오히려 148% 가량으로 더 크기 때문에 당량비 증가에 따른 냉각 효과는 DME의 경우에 훨씬 더 클 것이다.

분사시기가 IMEP에 미치는 영향을 보기 위하여 압축비 12와 초기온도 30°C의 다양한 당량비 조건에서 분사시기를 BDC부터 10°ATDC까지 변화시킨 경우의 IMEP를 Fig. 8에 나타내었다.

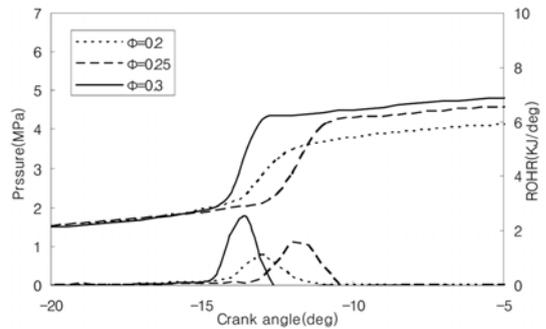


Fig. 7 Influence of equivalence ratio on combustion characteristics (Injection timing = BDC)

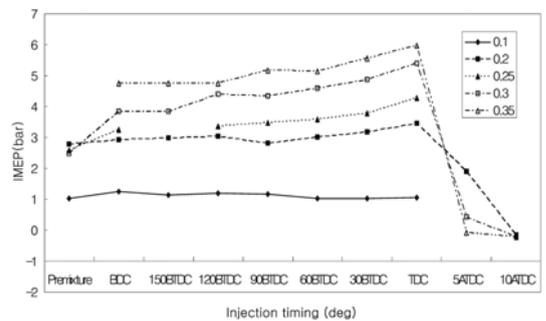


Fig. 8 IMEP to show influence of injection timing and equivalence ratio

Fig. 8에서는 연료를 늦게 분사할수록 착화가 늦어지며 그에 따라 IMEP가 증가하는 경향을 볼 수 있는데 당량비가 클수록 이러한 현상이 뚜렷하다. 이 실험에서는 TDC에서 연료를 분사하는 경우에 착화가 팽창행정 초기에 일어나면서 IMEP가 가장 크게 발생하고, 5°ATDC 이후에 연료를 분사하면 착화가 너무 늦거나 안 일어나서 IMEP가 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있다.

연료 분사시기가 착화와 연소에 미치는 영향을 보기 위해 압축비 12, 초기온도 30°C인 조건에서 분사시기를 BDC부터 10°ATDC까지 변경하며 시험하여 취득한 연소실 압력과 열발생률을 Fig. 9에 나타내었다.

연소실 압력이 DME를 분사한 이후에 모터링 압력보다 낮아졌다가 저온 반응이 일어난 후 상승하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 앞에서 이미 언급한 DME의 증발잠열로 인해 발생하는 현상이다. 연료 분사시기가 BDC에서 30°BTDC까지 150° 변화하면

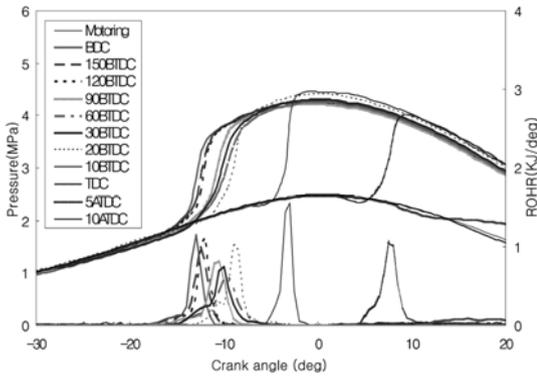


Fig. 9 Effect of injection timing on combustion characteristics of DME ($\Phi = 0.2$, $T=30^{\circ}\text{C}$, $\text{CR}=12$)

착화시기가 점진적으로 늦어지기는 하지만 $15^{\circ}\text{BTDC}\sim 5^{\circ}\text{BTDC}$ 사이의 비교적 좁은 구간에 머무는 것으로 보인다. 하지만 분사시기를 30°BTDC 에서 TDC까지 30° 변경하는 구간에서는 착화시기가 크게 ($12\sim 13^{\circ}$) 변화함을 볼 수 있다. 이 결과로 미루어 보면 30°BTDC 이전의 연료 분사시기 변화는 균일한 혼합기 구성에 영향이 있어도 착화시기 제어에는 별 효과가 없다. 따라서 착화시기를 제어하려면 사실상 30°BTDC 이후의 분사시기를 사용해야 가능하다. 그러나 분사시기가 30°BTDC 보다 늦어지면 연료와 공기의 균일한 혼합을 달성하기 어려울 것이므로 원하는 시기에 HCCI 연소를 달성하려면 연료 분사시기 조절 이외의 보완기술이 반드시 개발되어야 할 것으로 판단된다.

이상의 실험 결과에서 DME 연료의 분사시기 조절로 HCCI 연소의 착화시기 제어가 매우 제한적임을 확인하였다. 결과적으로 DME를 압축행정 중 직접 분사하며 압축착화 엔진을 운전하면 압축행정 중에 연소가 완료되고 연소 최고 압력이 발생하는데 이렇게 되면 엔진에 기계적 과부하가 걸리고 열효율이 낮아서 실용적 가치가 적다. 그러나 이 현상은 이 연구에서 사용한 RCEM의 운전 속도가 100 rpm 정도로 매우 낮아서 실제 엔진에서 보다 심화된 것으로 추정된다. 실제로 이 현상을 확인하기 위하여 당량비 0.2, 초기 혼합기 온도 30°C , 압축비 9인 조건에서 회전속도를 150 rpm으로 변경하여 압축 착화 실험해본 결과 Fig. 10과 같이 착화가 지연되고 열발생률이 TDC 부근으로 이동하는 것으로 나타났

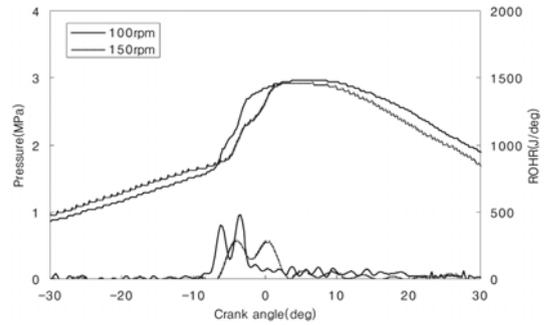


Fig. 10 Effect of revolution speed on combustion characteristics of DME ($\Phi = 0.2$, $T=30^{\circ}\text{C}$, $\text{CR}=9$)

다.⁸⁾ 따라서 자동차용 고속 엔진에서는 압축 과정 중 연소가 완료되는 문제점이 다소 완화되었지만 그럼에도 불구하고 연료 분사 시기 조절보다는 더 효과적인 착화 제어 기술이 확립되어야 고효율 HCCI 엔진 기술이 완성될 수 있을 것이다.

5. 결론

HCCI 엔진의 압축 착화시기를 효과적으로 제어함으로써 노크로 제한되는 고부하 운전영역의 확장 과 효율 개선을 도모하고자 급속압축팽창기와 커먼 레일형의 고압연료분사장치를 사용하여 다양한 조건에서 DME 연료의 압축 착화 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 500 bar의 액상 DME를 RCEM의 연소실에 직접 분사하여 압축 착화하면 완전 예혼합기 연소의 경우에 비해 약간 더 큰 당량비 범위까지도 노크의 발생 없이 운전 가능하다.
- 2) DME를 압축 행정 중 직접 분사하면 완전 예혼합기 운전에 비해 더 큰 IMEP를 얻을 수 있다.
- 3) 연료가 연소실에 지연 분사될수록 착화시기가 조금씩 지연되지만 고효율 및 고부하 운전을 위해서는 TDC 이후에 연료를 분사하는 것이 필요하다. 그러나 이 정도로 연료 분사를 지연하면 균일 혼합기 연소라는 HCCI의 본질에서 멀어지므로 고효율 HCCI 엔진 기술의 완성을 위해서는 보다 더 효과적인 착화 제어 기술의 확보가 필수적이다.

후 기

이 연구는 2005년도 미래형 자동차 기술 개발 사업의 결과이며 관계자들과 감사드립니다.

References

- 1) R. H. Thring, "Homogeneous-Charge Compression-Ignition (HCCI) Engine," SAE 892068, 1989.
- 2) A. W. Gray III and T. W. Ryan III, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) of Diesel Fuel," SAE 971676, 1976.
- 3) K. H. Lee, H. M. Kim, J. D. Ryu and C. S. Lee, "An Experimental Study on the Two Stage Ignition of Cool Flame and Hot Flame in HCCI Engine According to Fuel Composition," Transactions of KASE, Vol.12, No.1, pp.17-24, 2004.
- 4) S.-H. Cho, K.-S. Kim and M. T. Lim, "Development of a Rapid Compression Expansion Machine and Compression Ignition Combustion of Homogeneous Premixtures," Transactions of KASE, Vol.12, No.2, pp.83-90, 2004.
- 5) S.-M. Yang, Y.-J. Lee and Y.-K. Kim, "Effect of Pilot Injection on the Performance and Emission Characteristics of DME DI Engines Using Common Rail Fuel Injection System," Spring Conference Proceedings, Vol. I, KASE, pp.482-487, 2002.
- 6) H. Ofner and D. W. Gill, "Dimethyl Ether as Fuel for CI Engine - A New Technology and its Environmental Potential," SAE 981158, 1998.
- 7) W. Choi, J.-K Lee and C.-S. Bae, "Combustion Characteristics of Dimethyl Ether (DME) and Diesel Fuel Using a Common-rail Fuel Injection System," Transactions of KSAE, Vol.12, No.6, pp.30-37, 2004.
- 8) L. Zhou, H. Wang, D. Jiang, Z. Huang, "Study of Performance and Combustion Characteristics of a DME-Fueled Light-Duty Direct-injection Diesel Engine," SAE 1999-02-3669, 1999.