

DME 예혼합 압축착화 엔진에서 수소의 영향

백철우¹⁾ · 윤현숙²⁾ · 염기태²⁾ · 장진영²⁾ · 배충식^{*2)}

기아자동차(주)¹⁾ · 한국과학기술원 기계공학과²⁾

The Effects of Hydrogen on DME HCCI Combustion

Cheulwoo Baek¹⁾ · Hyeonsook Yoon²⁾ · Kitae Yeom²⁾ · Jinyoung Jang²⁾ · Choongsik Bae^{*2)}

¹⁾Cooperate Planning Division, Kia Motors, 231 Yangjae-dong, Seocho-gu, Seoul 137-938, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

(Received 24 February 2006 / Accepted 21 July 2006)

Abstract : The aim of this paper is controlling ignition timing and load in homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion with low cetane number fuel, hydrogen. Homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion is an advanced combustion technology that achieves higher thermal efficiency and lower NO_x emissions than that of conventional combustion system. Dimethyl ether (DME), which has been researched widely as the most attractive alternative fuel of diesel, is attractive for HCCI combustion because of the easy evaporation. In this study, the single cylinder DME engine operated with a direct injection system has been used to investigate combustion processes and emissions of DME HCCI with a premixed hydrogen supply. The experiment was carried out under various engine speed and fraction rates of hydrogen. As a result, the increase of fraction rates of hydrogen retard the DME ignition timing and eliminated the knocking during high engine speed condition. IMEP was increased with increase of fraction rates of hydrogen by 30%. 40% of the fraction rates of hydrogen resulted in misfiring. The NO_x emission was reduced by increasing the fraction rates of hydrogen, but HC emission was increased.

Key words : Dimethyl ether(DME), Homogeneous charge compression ignition(HCCI; 예혼합 압축착화), Hydrogen (수소), Ignition timing(점화시기)

Nomenclature

BTDC : before top dead center
CAD : crank angle degree
DME : dimethyl ether
HCCI : homogeneous charge compression ignition
HTO : high temperature oxidation
IMEP : indicated mean effective pressure
LHV : low heating value
LTO : low temperature oxidation

Q : fuel energy
R : fraction rate

1. 서론

예혼합 압축착화(HCCI: homogeneous charge compression ignition) 엔진은 공기연료비(air/fuel ratio)가 희박한 혼합기의 저온연소로 인하여 연료경제성이 향상되고 질소산화물(NO_x) 배출량이 저감되는 장점이 있다.^{1,2)} 그러나 기화 특성이 좋지 않은 디젤 연료를 사용한 예혼합 압축착화 엔진은 벽면 적심(wall-wetting)현상에 의한 입자상물질(PM: particulate

*Corresponding author, E-mail: csbae@kaist.ac.kr

matters)의 발생 문제가 제시되었다.³⁾

본 연구에 사용된 연료인 dimethyl ether(DME)는 저탄소 대체 연료로써 자발화 특성이 우수하고 세탄가(cetane number)가 디젤과 유사하며⁴⁾ 포화 증기압이 약 6bar로, 상온에서 기상으로 존재한다. 디젤과 비교하여 우수한 기화특성으로 인하여 입자상 물질이 배출되지 않는다.⁵⁻⁷⁾ 그러나 DME와 같은 높은 세탄가의 연료를 사용하여 예혼합 압축 착화를 구현하게 되면 고속, 고부하 운전은 조기착화와 노킹에 의해 제한된다.⁸⁻¹¹⁾ 따라서 운전 영역을 확대하기 위해 고옥탄가 연료인 수소를 첨가하여 DME의 압축착화 과정 중 발생하게 되는 화학반응을 지연시키고자 하는 시도가 이루어져 왔다.¹²⁾

본 연구에서는 DME를 사용한 예혼합 압축착화 연소에서 운전 범위 확대 시 나타나는 연소 특성을 파악하고, 수소를 DME와 일정 비율로 예혼합하여 압축착화 하여 나타나는 연소특성의 변화 및 배기가스 배출 특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

수소의 첨가 비율에 따른 엔진 내 연소와 배기가

스 특성 연구를 위해 Fig. 1과 같이 실험 장치를 구성하였다.

DME 직접 분사를 위해 본 연구에서는 연소실에 슬릿형(slit type) 인젝터(Denso Co.)를 장착하였다. DME는 질소를 이용하여 90 bar로 가압된 상태로 슬릿형 인젝터를 통해 액상으로 분사된다. 또한 연료 공급 장치의 손상을 방지하기 위해 DME에 윤활 향상제(Infineum, R655)를 500ppm 첨가하였다. 수소는 흡기 포트에서 가스 인젝터(Kehin, KN3-1)를 통해 분사되어 공기와 예혼합된 상태로 실린더 내부로 공급하였다.

연소 해석을 위해 연소실에 압력 센서(Kistler, 6052B)를 장착하였으며, 흡기와 배기 매니폴드의 압력을 측정하기 위해 압력 센서(Kistler, 4045A5)를 장착하였다. 혼합기의 온도와 배기가스의 온도를 측정하기 위해 흡기, 배기 매니폴드에 각각 K 형 열전대(thermocouple)를 장착하였다. 혼합기의 공연비를 측정하기 위해 광대역 람다 미터(etas, LA4)를 배기 매니폴드에 장착하였다. 배기가스 배출물은 배기가스 분석기(Horiba, Mexa 1500d)를 이용하여 탄화수소, 질소산화물, 일산화탄소, 이산화탄소를 측정하였다. 이렇게 얻은 값들은 데이터 수집 장치

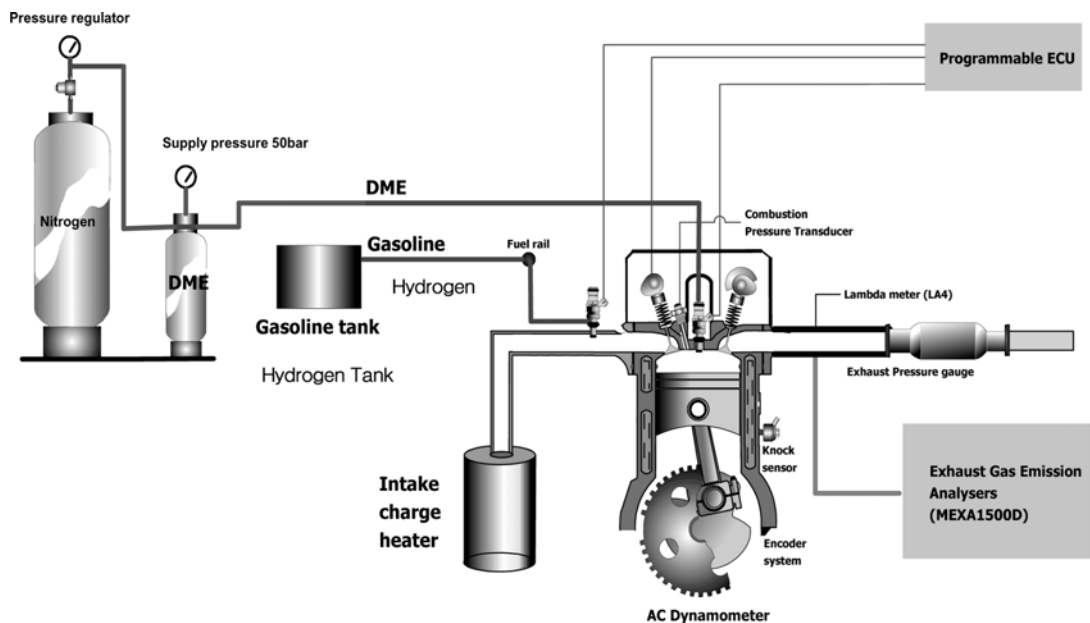


Fig. 1 Experimental setup

(IOTech, Wavebook 512H)를 이용 수집 저장하였다.

본 연구에 사용된 엔진은 4행정, 단기통 더블 오버헤드 캠축 가변 밸브 타이밍(double overhead camshaft variable valve timing: DOHC VVT) 엔진으로 배기량 494 cc, 압축비 13:1이다. 제원은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Engine specification

Bore (mm)		82
Stroke (mm)		93.5
Compression ratio		13
Displacement (cc)		494
Intake / Exhaust valve duration (CAD)		228 / 228
Valve timing [CAD]	Intake valve open (BTDC)	9
	Intake valve close (ABDC)	39
	Exhaust valve open (BBDC)	42
	Exhaust valve close (ATDC)	6
DME injection pressure (bar)		90

2.2 실험방법

본 연구에서는 DME 예혼합 압축착화 연소에서 운전 속도 변화에 따른 연소실내 압력 및 열방출률 분석을 통한 연소 특성을 알아보기 위하여 Table 2와 같이 엔진 운전 속도를 800, 1000, 1500 rpm으로 정하여 실험하였다. 또한 DME와 공기가 충분히 예혼합 될 수 있도록 DME를 상사점전 크랭크 각도(CAD: crank angle degree) 300에 분사하였다.

수소 첨가율에 따른 DME의 예혼합 압축착화 특성을 살펴보기 위하여 총발열량 606 J에 해당하는 수소와 DME를 연소실에 공급하였다. Table 3에 각 실험조건에 따른 수소와 DME 분사량을 나타내었다. 수소 첨가율, R_{H_2} 는 발열량을 기준으로 식 (1)과 같이 정의 하였고, 연료의 발열량, Q_{fuel} 은 수소와 DME의 총 발열량으로 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$R_{H_2} = \frac{Q_{H_2}}{Q_{H_2} + Q_{DME}} \times 100(\%) \quad (1)$$

Table 2 Experimental conditions

Engine speed (rpm)	800, 1000, 1500
DME injection timing (CAD, BTDC)	300
Hydrogen injection timing	Intake TDC
Intake air temperature (°C)	60

Table 3 Hydrogen and DME injection quantity

R_{H_2}	$Q_{H_2}(J)$	Mass(mg)/cycle	$Q_{DME}(J)$	Mass(mg)/cycle
10%	60.6	0.505	545.4	19.2
20%	121.2	1.01	484.8	17.07
30%	181.8	1.52	424.2	14.94
40%	242.4	2.02	363.6	12.67

$$Q_{fuel} = LHV_{fuel} \times fuel\ mass \quad (2)$$

도시평균유효압력(IMEP: indicated mean effective pressure) 및 열방출률 계산을 위하여 각 조건별로 150회의 엔진 싸이클의 데이터를 취득하여 분석하였다.¹³⁾

3. 실험결과 및 토의

3.1 연소압력과 열방출률

Figure 2와 3에 나타난 연소 압력 및 열방출률을 통하여 엔진 운전 속도가 증가함에 따라 연소 압력 최대치가 증가하며 저온 산화반응 구간이 진각되고 있음을 알 수 있다. 또한 엔진 운전 속도 1500 rpm에서 약 3 ~ 7 bar 정도의 불규칙적인 압력상승이 나타난다. 이는 단위 시간동안 많은 양의 연료가 연소되면서 연소실 벽면에서 혼합기로의 열전달이 증가하게 되고 압축 행정중의 외부로의 열손실이 감소하게 된다. 따라서 낮은 회전수에 비하여 혼합기의 온도가 빠르게 상승하여 자착화가 일어나기 위한 연소실 조건이 이른 시기에 만들어지고 그에 따라 연소 압력이 크게 상승하는 것으로 판단된다.

Figure 4에는 엔진 운전 속도 800rpm에서 수소 첨가율에 따른 실린더 압력과 열방출률을 나타내었다. 수소의 첨가에 의해 모든 실험 조건에서 착화시기가 지각되는 현상이 발견되었다. 이러한 착화 지연 현상은 DME와 수소의 산화과정 기구를 통해 설명이 가능하다.

DME는 압축 착화 과정에서 저온 산화반응(LTO:

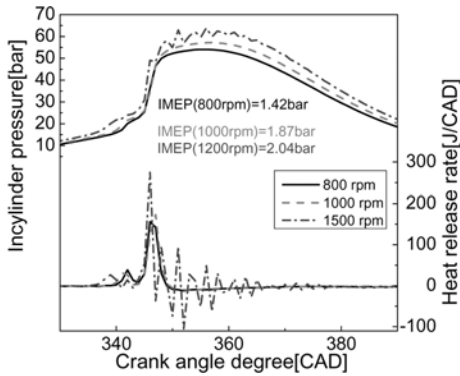


Fig. 2 Combustion pressure and heat release rate respect to engine speed of DME HCCI

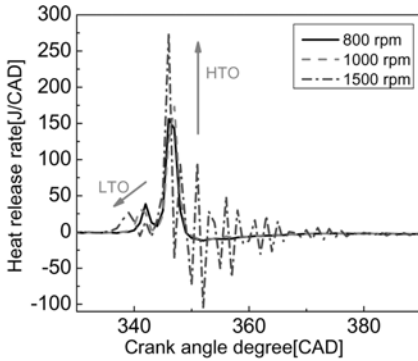


Fig. 3 Heat release rate respect to engine speed of DME HCCI

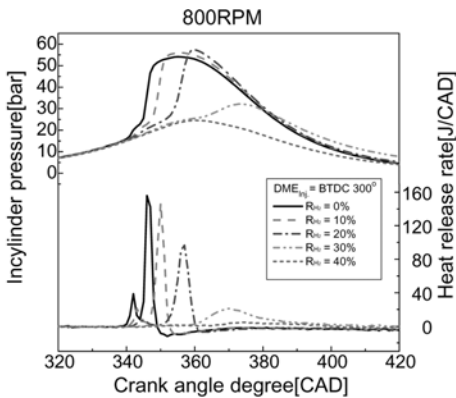
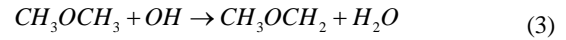


Fig. 4 Combustion pressure and heat release rate respect to fraction rates of hydrogen

low temperature oxidation)과 고온 산화반응(HTO: high temperature oxidation), 두 단계의 연소과정을 거친다. 여기서 고온 산화 반응의 경우 대부분의 탄화수소계 연료와 유사한 화학반응 기구를 나타낸

다. 반면에 저온 산화반응은 연료의 분자구조에 따라 다른 화학반응 기구를 가진다.¹⁴⁾

식 (3)과 (4)는 DME의 압축착화 과정 중 저온 산화반응기간 중 나타나는 화학반응식을 단순화 하였고,¹⁵⁾ 식 (5)에 같은 기간 중 나타나는 수소의 화학반응을 나타내었다.



식 (4)와 같이 DME가 1차 산화반응을 일으키기 위하여 식 (3)에서 나타나는 OH에 의한 H추출이 먼저 발생하여야 하는데, 수소 산화 반응도 OH와 반응하기 때문에 DME의 저온 산화에 필요한 OH가 부족하여 DME의 저온 산화반응기간이 연장된다.¹²⁾

엔진 운전 속도 1500 rpm에서 수소 첨가율에 따른 실린더 압력과 열방출률을 Fig. 5에 나타내었다. 엔진 운전 속도 800rpm에서는 관찰되지 않은 노킹 현상이 발생하며 수소가 첨가됨에 따라 노킹 현상이 뚜렷이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 수소첨가에 의해 DME의 저온 산화반응기간이 연장되고, 이로 인하여 고온 산화반응이 상사점(TDC: top dead center) 이후로 지각됨에 따라 최대 연소 압력과 연소 압력 상승률이 감소하였기 때문으로 판단된다.

엔진 운전 속도와 수소 첨가율에 따른 도시평균 유효압력을 Fig. 6에 나타내었다. 모든 엔진 운전 속

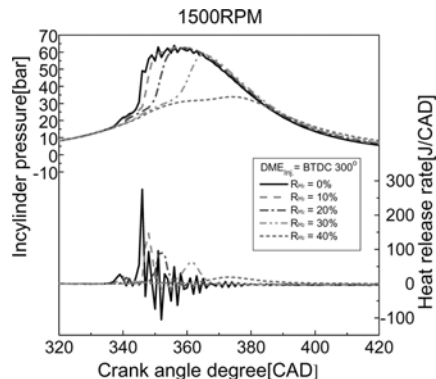


Fig. 5 Combustion pressure and heat release rate respect to fraction rates of hydrogen of DME HCCI at 1500rpm

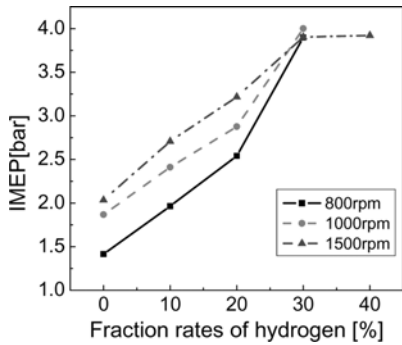


Fig. 6 IMEP respect to fraction rates of hydrogen and engine speed

도에서 수소 첨가율이 증가하면 도시평균유효압력이 증가하는 경향이 있다. 이는 수소가 첨가됨에 따라 고온 산화 반응의 지각에 의해 음의 일(negative work)이 감소하기 때문으로 판단된다.

3.2 배기가스 특성

Figure 7에 수소첨가율과 엔진 운전 속도에 따른 질소 산화물, 이산화탄소, 탄화수소, 일산화탄소 배

출량을 도시하였다. 수소 첨가에 따라 고온 산화 반응이 지각되며 TDC 이후에 대부분의 열방출이 나타남에 따라 연소 온도가 낮아지고 질소산화물 배출량이 감소한다.¹⁶⁾ 엔진 운전 속도 1500 rpm에서 수소첨가율이 0 %와 10 %일 때 질소산화물이 100 ppm 이상으로 나타난 것은 노킹으로 인한 국부적인 고온영역 발생에 의한 것으로 판단된다. 이산화탄소 배출량의 경우 수소 첨가율 0 ~ 30 %에서는 탄화수소계열 연료의 수소연료로의 대체에 따라서 공급된 탄소 분자수가 감소하여 이산화탄소 배출량의 감소로 나타났다. 그러나 탄화수소 배출량은 수소 첨가율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 수소 첨가율이 증가함에 따라 연소온도가 낮아지면서 실린더 외벽근처에서의 소멸효과(quenching effect)가 증가하며, 팽창행정 중 탄화수소의 산화반응이 감소하기 때문으로 판단된다. 일산화탄소 배출량은 수소 첨가율 0 ~ 20 %의 조건에서는 배출량이 감소하는 경향을 나타내지만 수소 첨가율 30 % 이상의 조건에서는 배출량이 증가하는

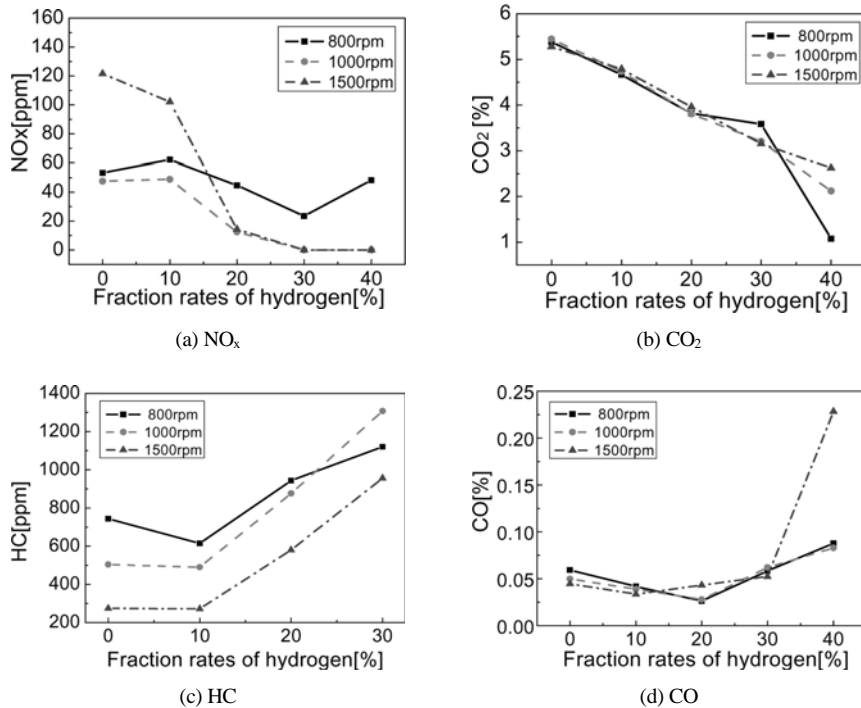


Fig. 7 Engine out emissions respect to fraction rates of hydrogen and engine speed.
(a) NO_x, (b) CO₂, (c) HC, (d) CO

경향을 나타내고 있다. 수소 첨가비율이 20 % 이하의 조건에서는 수소 첨가비율이 증가할수록 혼합기 전체의 탄소분자가 감소하여 일산화탄소 배출량이 감소하지만 수소 첨가비율이 30 % 이상인 조건에서는 낮은 연소온도로 인하여 팽창행정 중 산화반응이 부족하게 되어 일산화탄소 배출량이 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결론

DME 예혼합 압축착화 연소에서 운전속도 변화에 따른 연소특성과 수소 첨가에 따른 연소상의 변화를 파악하기 위하여 실린더 내 연소압력과 배기 배출물의 측정에 의하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) DME 예혼합 압축착화 연소에서 운전 속도를 800 rpm에서 1,500 rpm으로 증가시킴에 따라 착화시기가 진각되고, 1,500 rpm에서는 불균일 점화에 따른 노킹이 발생하였다.
- 2) 엔진 운전 속도에 관계없이 수소 첨가비율이 증가하게 되면 착화 시점이 지각되는 경향을 나타내었으며 1,500rpm에서 DME 예혼합 압축 착화 연소시 발생되었던 노킹이 수소 첨가에 의해 제거되었다.
- 3) 수소의 첨가 비율이 40%를 넘었을 때 수소에 의한 자착화 방해가 심각하여 실화가 발생하였다.
- 4) 수소 첨가에 따른 연소상의 지각으로 도시평균 유효압력이 상승하였다.
- 5) 질소산화물과 이산화탄소 배출량은 감소하였지만 탄화수소 배출량은 증가하였다.

후 기

이 연구는 “미래형 자동차 배기가스 제로화 기술 개발”과 과학재단의 우수 연구 센터 (ERC)의 지원 아래 “연소 기술 연구 센터” 과제의 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- 1) A. Hultqvist, M. Christensen, B. Johansson, A. Franke, M. Richter and M. Aldén, “A Study of

- the Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion Process by Chemiluminescence Imaging,” SAE1999-01-3680, 1999.
- 2) R. H. Thring, “Homogeneous-Charge Compression-Ignition (HCCI) Engines,” SAE 892068, 1989.
- 3) U. Wagner, R. Anca, A. Velji and U. Spicher, “An Experimental Study of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) with Various Compression Ratios, Intake Air Temperatures and Fuels with Port and Direct Fuel Injection,” SAE 2003-01-2293, 2003.
- 4) H. Teng, J. McCandless and J. Schneyer, “Compression Ignition Delay (Physical+ Chemical) of Dimethyl Ether,” SAE 2003-01-0759, 2003.
- 5) W. Choi, J. Lee and C. 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.
- 6) J. Lee, S. Kook, C. Park and C. Bae, “DME and Diesel HCCI Combustion Characteristics,” pp. 225-230, 27th KOSCO Symposium, 2003.
- 7) Y. Pyo, G. Kim, Y. Lee and M. Kim, “A Study on Performance and Exhaust Emissions of DI Diesel Engine Operated with Neat DME and DME Blended Fuel,” Transactions of KSAE, Vol.11, No.2, pp.75-82, 2003.
- 8) Y. Sato, A. Noda, T. Sakamoto and Y. Goto, “Performance and Emission of a DI Diesel Engine Operated on Dimethyl Ether Applying EGR with Supercharging,” SAE 2000-01-1809, 2000.
- 9) S. Nam, Y. Kim and Y. Lee, “Effect of Cooled-EGR on the Emission Characteristics of DI DME Fuelled Engine,” Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.203-209, 2003.
- 10) P. Yelvington and W. Green, “Prediction of the Knock Limit and Viable Operating Range for a Homogeneous-Charge Compression-Ignition (HCCI) Engine,” SAE 2003-01-1092, 2003.
- 11) T. Tsurushima, E. Kunishima, T. Asaumi and Y. Aoyagi, “The Effect of Knock on Heat Loss in Homogeneous Charge Compression Ignition Engines,” SAE 2002-01-0108, 2002.

- 12) T. Shudo, Y. Ono and T. Takahashi, "Influence of Hydrogen and Carbon Monoxide on HCCI Combustion of Dimethyl Ether," SAE 2002-01-2828, 2002.
- 13) J. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill International Editions, 1988.
- 14) H. Yamada, H. Sakanashi, N. Choi and A. Tezaki, "Simplified Oxidation Mechanism of DME Applicable for Compression Ignition," SAE 2003-01-1819, 2003.
- 15) H. Curran, W. Pitz, C. Westbrook, P. Dagaut, J. Boettner, M. Cathonnet, "A Wide Range Modeling Study of Dimethyl Ether Oxidation," 2000 International Journal of Chemical Kinetics, Vol.30, No.3, pp. 229-241, 2000.
- 16) S. Kook, C. Bae and J. Kim, "Diesel-fueled Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Optimized Premixing Strategies," International Journal of Engine Research (In press).