

## 저온 디젤 연소에서 T90 온도가 배기가스에 미치는 영향

한 만 배\*

계명대학교 기계자동차공학과

### The Effect of T90 Temperature on Exhaust Emissions in Low-temperature Diesel Combustion

Manbae Han \*

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

(Received 9 August 2010 / Accepted 28 January 2011)

**Abstract** : This study is to investigate the effect of the distillation temperature in ultra low sulfur diesel fuel on exhaust emissions in the low-temperature diesel combustion with 1.9L common rail direct injection diesel engine. Low temperature diesel combustion was achieved by adopting an external high EGR rate with a strategic injection control. The engine was operated at 1500 rpm 2.6 bar BMEP. The 90% distillation recovery temperature (T90) was 270°C and 340°C for the respective cetane number (CN) 30 and 55. It was found that there exists no distinctive discrepancy on exhaust emissions with regards to the different T90s. The high CN (CN55) fuels follow the similar trend of exhaust emissions as observed in CN30 fuels' except that high T90 fuel (CN55-T340) produced higher PM compared to low T90 fuel (CN55-T270). This may come from that high T90 plays an active role in aggravating the degree of fuel-air mixture preparedness before ignition.

**Key words** : Low-temperature diesel combustion(저온 디젤 연소), 90% Distillation recovery temperature(90% 증발 온도), Cetane number(세탄가), Start of injection timing(연료분사시기), Ignition delay(착화지연), Exhaust gas recirculation(배기가스 재순환)

#### Nomenclature

- ATDC : after top dead center
- BMEP : brake mean effective pressure, bar
- BSFC : brake specific fuel consumption, g/kWh
- FT-IR : fourier transform infrared spectroscopy
- LHV : lower heating value, MJ/kg
- MFB : mass fraction burned
- T10 : temperature of 10% distillation recovery, °C
- T50 : temperature of 50% distillation recovery, °C
- T90 : temperature of 90% distillation recovery, °C

#### 1. 서론

저배기, 고효율 및 저 이산화탄소 배출 엔진 개발을 위하여 신 연소 기법 중에서 다량의 배기가스 재순환(exhaust gas recirculation, EGR)과 고압의 연료 분사 시스템 및 분사시기 제어를 이용하여 입자상 물질(particulate matter, PM)과 질소산화물(nitrogen oxides, NOx)의 배출을 동시에 줄이는 저온 디젤 연소(low-temperature diesel combustion)에 관한 연구가 활발하다.<sup>1-6)</sup>

전통적인 디젤 연소(conventional diesel combustion)에서는 PM-NOx 트레이드오프(trade-off) 현상이 보고되어왔는데<sup>7)</sup> 저온 디젤 연소에서는 기존의

\*Corresponding author, E-mail: mbhan2002@kmu.ac.kr

엔진의 구조를 거의 바꾸지 않고 다량의 EGR 과 고압의 연료분사 및 분사시기 최적화를 통하여 착화 지연(ignition delay) 기간을 늘려 연료와 공기의 예혼합(premixedness) 정도를 증가시키고 연소 온도를 낮춰 PM과 NOx 배출을 동시에 줄인다.

디젤연소는 연료의 물성치에 의하여 영향을 받게 되는데, 대표적으로 물성치는 세탄가(cetane number, CN), 방향족 성분(aromatic content), 연료의 90% 증발온도(temperature of 90% distillation recovery, T90)로 알려져 있다.<sup>8-11)</sup> 특히 다량의 EGR을 이용한 저온 디젤 연소에서 세탄가를 낮추면 착화지연(ignition delay)이 길어져 PM 감소 효과가 큰 것으로 알려져 있다.<sup>8)</sup> 세탄가 40-63 정도에서는 연료의 증발온도가 다량의 EGR을 이용한 저온 디젤 연소에서는 그 특징이 뚜렷하게 나타나지 않으며,<sup>8)</sup> 다른 연구 결과에서는 고 부하 영역에서 낮은 증발온도를 갖는 연료는 특히 PM 저감 효과가 있다고 보고되고 있다.<sup>10)</sup> 방향족 성분의 영향에 대하여는 전통디젤 연소에서는 PM 및 NOx의 증가한다고 알려져 있다.<sup>10)</sup>

본 연구에서는 저·고 세탄가를 갖는 연료의 T90 온도가 저온 연소 영역에서 연소 및 배기가스에 미치는 영향에 대하여 실험을 수행하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험을 위하여 미국 General Motors사의 1.9L DOHC 커먼 레일 직접 분사(common rail direct injection) 엔진으로 보울인(bowl-in) 타입의 피스톤을 사용하였고 압축비는 17.5이다. 가변 형상 터보 과급기(variable geometry turbo-charger)를 장착하고 있으며 EGR은 전자식으로 제어하였다(Table 1). 저온 디젤 연소를 위하여 기존의 엔진의 부품이나 하드웨어를 변경하지 않았다.

사용한 연료는 초저유황 디젤 연료(ultra low sulfur diesel fuel, sulfur <12 ppm wt)로 두 개의 세탄가, 즉 CN30과 CN55에 대하여 방향족성분은 모두 20%이며, 각 각의 세탄가에 대하여 T90 목표치는 각각 270°C, 340°C이다. 연료에 관한 상세한 결과는 Table 2에 나타내었다.

엔진의 운전 영역은 1500rpm, 2.6 bar BMEP로 연료분사시기(start of injection, SOI)에 따른 토크의 변

Table 1 Engine specification

Cylinder	4
Displacement [L]	1.9
Bore [mm]	82.0
Stroke [mm]	90.4
Compression ratio	17.5
Piston geometry	Bowl-in-piston
Valves / Cylinder	4
Injection system	Common rail direct injection
Injector	7-hole, 148°
Injector location	Centrally mounted
Rated power	110kW @ 4000rpm

Table 2 Fuel properties

Fuel name	CN30-T270	CN30-T340	CN55-T270	CN55-T340
Specific gravity [-]	0.8084	0.8037	0.8086	0.8411
Cetane number [-]	29.9	28.0	54.2	53.3
Aromatics [% , vol.]	26.1	23.1	22.2	21.2
T10/ T50/ T90 [°C]	183/ 199/ 284	181/ 193/ 346	186/ 221/ 274	223/ 275/ 339
LHV [MJ/kg]	42.76	43.11	42.86	42.76
Sulfur [ppm]	1.9	0.4	1.2	2.8

동은 연료량으로 조정하였으며, 연료레일압력은 875 bar, EGR은 약 41%이다(흡입산소량 15.6%에 해당). EGR은 흡기관과 배기관에서 측정된 CO<sub>2</sub> 농도의 비로부터 계산하였다. 보다 상세한 엔진 운전 조건은 Table 3에 명시하였다.

배기매니폴드에서 약 20cm 떨어진 위치에서 AVL사의 415S으로 PM 측정을 하였으며, 터보 과급

Table 3 Engine operating condition

Engine Speed [rpm]	1500
BMEP [bar]	2.6
EGR fraction [%]	~ 41
A/F ratio [-]	~ 22.5
Intake oxygen [%]	~ 15.6
Intake manifold pressure [kPa]	108
Intake mixture temp. [°C]	90
Fuel rail pressure [bar]	875
Injection timing [°CA ATDC]	varying

기에서 약 1m 정도 떨어진 위치에서 매연필터를 통과한 배기가스의 THC, CO, NOx, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 농도를 측정하였다. 또한 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR, Nicolet Nexus 670)를 이용하여 탄화수소 종을 분석하였다. 배기가스 샘플라인은 190°C를 유지하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 1500rpm 2.6bar BMEP에서 T90이 저온 연소와 배기가스에 미치는 영향에 대하여 SOI를 변경하여 그 특성을 검토하였다. 고 EGR율과 전략적 연료분사 제어를 통하여 모든 연료에 대하여 PM과 NOx가 동시에 저감되는 저온 연소 영역을 확인하였다.

#### 3.1 SOI 영향

엔진제어 변수 중에서 SOI에 따른 배기가스와 연료소모율 (Brake Specific Fuel Consumption, BSFC) 및 탄화수소 종 분석을 실시하였다. Fig. 1은 SOI에 따른 배기가스와 연료소모율에 대한 그래프이다. Fig. 1에서 보듯이 연소 안정성이 유지되는 영역은 세탄가에 의하여 지배되었으며 T90의 영향은 미미하였다. 저세탄가인 CN30은 고세탄가인 CN55보다 SOI의 진각이 요구되었다.

CN30의 경우 SOI가 지각(retard)됨에 따라서 T90 온도에 관계없이 PM 배출은 거의 없었고, NOx는 저감되었다. CN30-T340은 SOI에 따른 THC, CO 배출의 민감 정도가 CN30-T270보다 작았다. CN30-T340은 SOI가 지각됨에 따라서 BSFC는 감소하였으나 CN30-T270은 감소하다가 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 Fig. 2의 MFB50% 위치에서와 같이 T90 온도 차이에 의하여 발생된 연소 위상(combustion phasing)차이에 기인하는 것으로 판단된다.

고세탄가 CN55 연료에 대하여 T90 온도의 차이에 의한 배기가스는 PM을 제외한 나머지 NOx, THC, CO는 거의 차이가 없었다. 또한 BSFC도 거의 동일한 경향을 보였다. CN55-T340이 CN55-T270보다 PM 배출이 많았으나 SOI가 압축 상사점에 근접할수록 PM 배출의 차이는 거의 없었다. Fig. 2로부터 CN55 연료들의 착화지연(ignition delay, 여기서

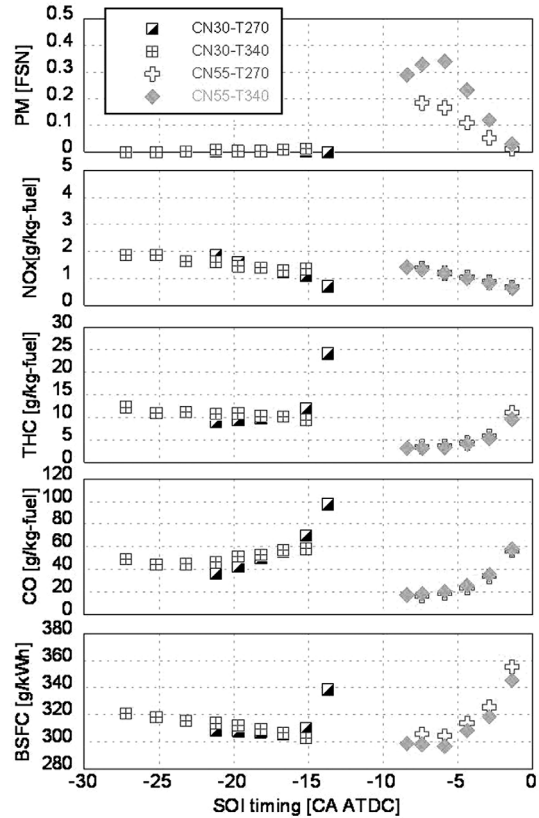


Fig. 1 PM, NOx, THC, CO, BSFC trends with SOI timing

는 MFB50%에 해당하는 각과 SOI 시기의 차이로 정의)과 MFB50% 발생위치, 그리고 연소기간(combustion duration, 여기서는 MFB50% 위치- MFB50% 위치로 정의)을 비교한 결과 동일한 SOI에 대하여 이 값들의 차이가 없음을 알 수 있다. 동일한 SOI에 대하여 NOx 발생량이 거의 일정한 사실로부터(Fig. 1) PM 배출 정도의 차이는 연소 온도에 의한 영향보다는 T90 온도에 따른 점화(ignition)전의 혼합기 생성 차이에 기인한 것으로 판단된다. 즉, CN55-T340 연료의 증발 온도가 CN55-T270보다 높기 때문에 국소적으로 과농한 연료-공기-EGR 혼합기가 상대적으로 많이 분포하여 PM 배출이 증가한 것으로 판단된다.

CN30 및 CN55 연료 각각에 대하여 T90 온도에 의한 착화지연, MFB 50% 발생 위치, 연소기간은 SOI 지각에 따라서 비슷한 경향을 보였다(Fig. 2). CN30의 연료는 T90 온도에 관계없이 SOI가 지각됨에 따라 착화지연은 감소하고, MFB50%는 지각되

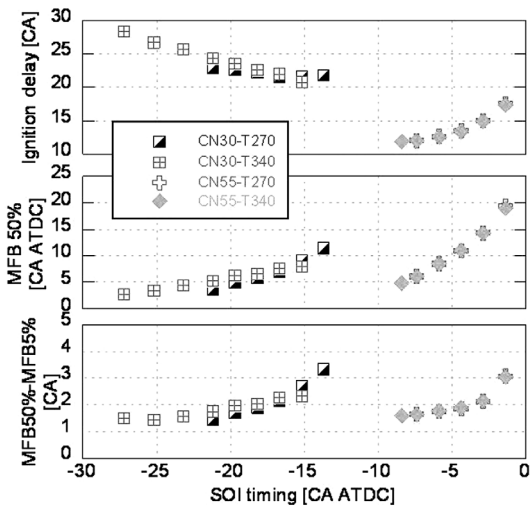


Fig. 2 Ignition delay, MFB50% location, and combustion duration for various SOI timing

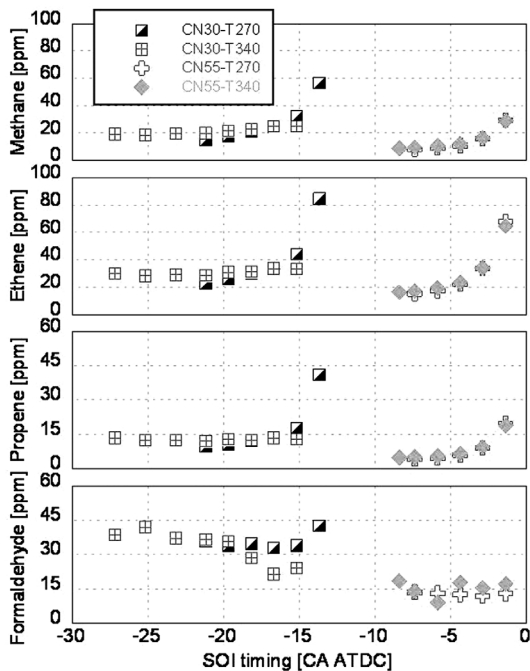


Fig. 3 Several major HC species trends with SOI timing

고, 연소기간은 증가하였다. 이에 반하여 CN55 연료는 착화지연이 증가하고, MFB50%는 지각되고, 연소기간이 증가하였다.

Fig. 3은 시험한 연료들에 대하여 SOI에 따른 대표적인 탄화수소 종인 메탄(methane, CH<sub>4</sub>), 에텐

(ethene, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), 프로펜(propene, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>), 포름알데히드(formaldehyde, HCHO)의 거동을 보여준다. T90온도에 관계없이 SOI가 지각됨에 따라 THC가 증가하는 거동과 유사하게 메탄, 에텐, 프로펜이 증가하였다. 그러나 CN30-T340 연료는 SOI 지각에 따른 그 증가 정도가 다른 연료에 비하여 미미하였다. 포름알데히드는 다른 탄화수소 종과 다르게 SOI 지각에 따라 증가하는 경향을 보이지 않았으나, T90온도에 관계없이 CN30에서 발생한 포름알데히드가 CN55보다 약 2배 정도 많았으며, 포름알데히드의 증가 원인은 낮은 세탄가에 의한 착화지연 기간의 증가로부터 냉염(cool flame) 존재 영역이 길었기 때문으로 판단된다.

이상과 같이 본 연구에서는 저속 부분부하(1500rpm 2.6bar BMEP) 운전 영역에서 T90이 저온 연소와 배기가스에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 보다 넓은 운전 영역에서의 추가 실험을 통하여 T90 온도 영향의 파악이 요구된다.

### 3.2 최적화된 SOI에서 배기가스 특성 비교

상기 시험 결과를 토대로 각 연료에 대하여 배기가스와 연비에 대하여 가중치(weighting factor)를 적용한 가격함수(cost function)를 최소화하는 SOI를 최적화된 지점으로 결정하는데, 본 논문에서는 이를 간략화 하여 최저 BSFC를 갖는 SOI를 최적화된 SOI로 간주하였다. SOI는 CN 30-T270의 경우 -16.7° CA ATDC, CN 30-T340은 -15.2° CA ATDC이다. 그리고 CN 55-T270과 CN 55-T340은 -5.9° CA ATDC 이었다. 각각의 경우에 대한 실린더 압력과 열방출 특성을 비교하였다(Fig. 4).

최적화된 SOI에 대하여 CN30-T340의 SOI가 CN30-T270보다 약 1.5° CA 정도 지각되었음에도 불구하고 CN30-T340의 MFB50%의 발생위치가 CN30-T270 대비 약 0.4° CA 정도 진각(advance)되었다. 이와 비교하여 고세탄가인 CN 55-T270과 CN55-T340의 T90 온도 차이에 의한 연소 위상 차이는 거의 없었다(Fig. 4). 즉, 착화 지연과 연소 기간은 T90 온도 차이에 의한 영향은 미미하였으며 세탄가의 영향이 지배적이었다(Fig. 5).

Fig. 6은 PM 및 NO<sub>x</sub> 배출 특성을, Fig. 7은 THC 및

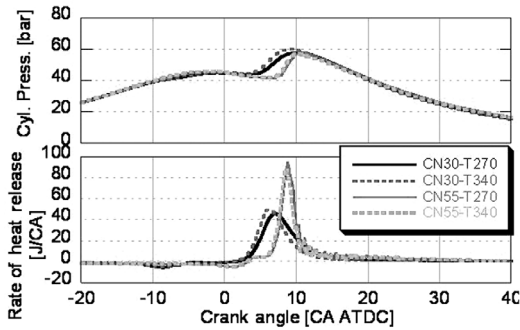


Fig. 4 Cylinder pressure and heat release rates at the optimized SOI timing

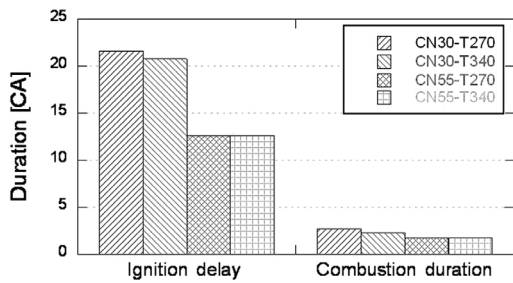


Fig. 5 Ignition delay and combustion duration at the optimized SOI timing

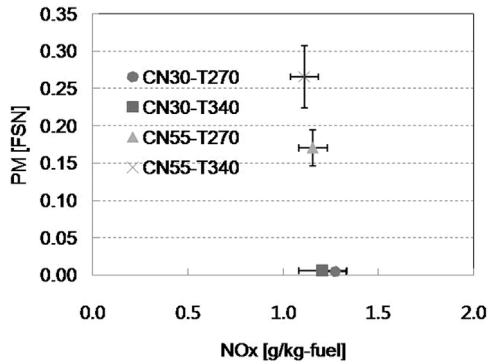


Fig. 6 PM and NOx emissions at the optimized SOI timing

CO 배출 특성을 그리고 Fig. 8은 연료소모율을 각각 비교하였다. 동일한 NOx 배출에 대하여 CN55-T340이 CN55-T270보다 PM이 약 50% 정도 증가하였으나 CN30-T340과 CN30-T270은 PM 발생의 차이가 없었다. CN55-T340은 높은 세탄가와 더불어 높은 연료증발온도로 인하여 연료-공기-EGR의 예혼합 정도가 다른 연료들과 비교하여 가장 열위에 있었을 것으로 판단되며, 이로 인한 국소공연비 농

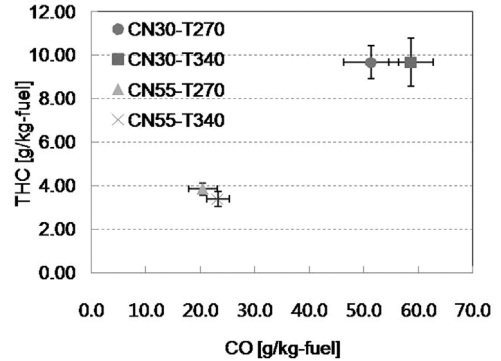


Fig. 7 THC and CO emissions at the optimized SOI timing

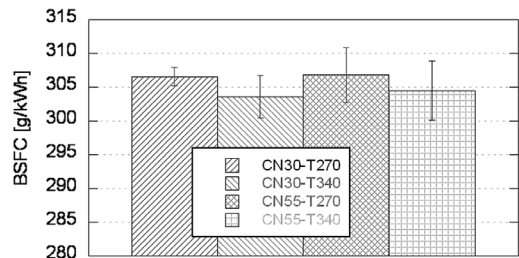


Fig. 8 Comparison of BSFC at the optimized SOI timing

후 분포가 커서 PM이 증가한 것으로 판단된다. 각각의 세탄가에 대하여 T90 온도 차이에 의한 THC 및 CO배출 특성은 시험 오차 범위 내에서 동등 수준으로 세탄가에 의한 영향이 지배적이었다. BSFC는 모든 연료에 대하여 시험오차 범위 내에서 동등수준이었다(Fig. 8).

#### 4. 결론

본 연구는 1.9L 커먼레일 직접분사 디젤 엔진을 이용하여 1500rpm 2.6bar BMEP 조건에서 다량의 EGR(약 41%)을 적용한 저온 디젤 연소 영역에서 T90 온도 차이에 따른 연소 및 배기가스 배출특성에 대한 실험으로 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 연소 안정성은 세탄가에 의한 영향이 지배적으로 저세탄가 CN30 연료들은 고세탄가 CN55 연료들보다 SOI 진각이 요구되었다.
- 2) 저세탄가 연료(CN30-T270, CN30-T340)에 대하여 T90 온도에 따른 연소 및 배기가스 배출 특성의 뚜렷한 차이점은 보이지 않았다. 낮은 세탄가에 의한 착화 지연 기간의 증가로 T90 온도에 관

계없이 PM 배출이 거의 없었다.

- 3) 고세탄가 연료(CN55-T270, CN55-T340)에 대하여는 PM을 제외한 다른 배기가스는 시험오차 범위에서 동등 수준이었다. CN55-T340은 CN55-T270대비 PM 배출 증가가 현저하였으며 이는 고세탄가와 더불어 연료증발온도가 높아져 혼합 정도가 불리하였기 때문으로 판단된다.

### References

- 1) H. Akagawa, T. Miyamoto, A. Harada, S. Sasaki, N. Shimazaki, T. Hashizume and K. Tsujimura, "Approaches to Solve Problems of the Premixed Lean Diesel Combustion," SAE Transactions - Journal of Engines, Vol.109, SAE 1999-01-0183, 1999.
- 2) K. Akihama, Y. Takatori, K. Inagaki, S. Sasaki and A. Dean, "Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature," SAE Transactions - Journal of Engines, Vol.110, SAE 2001-01-0655, 2001.
- 3) S. Kimura, O. Aoki, Y. Kitahara and E. Aiyoshizawa, "Ultra-clean Combustion Technology Combining a Low-temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standard," SAE Transactions - Journal of Fuels & Lubricants, Vol.110, SAE 2001-01-0200, 2001.
- 4) M. P. B. Musculus, T. Lachaux, L. M. Pickett and C. A. Idicheria, "End-of-injection Over-Mixing and Unburned Hydrocarbon Emissions in Low-temperature-combustion Diesel Engines," SAE Transactions - Journal of Passenger Cars: Mechanical Systems, Vol.116, SAE 2007-01-0907, 2007.
- 5) M. Han, D. N. Assanis and S. V. Bohac, "Comparison of HC Species from Diesel Combustion Modes and Characterization of a Heat-up DOC Formulation," Int. J. Automotive Technology, Vol.9, No.4, pp.405-413, 2008.
- 6) M. L. McMillan and R. Halsall, "Fuel Effects on Combustion and Emissions in a Direct Injection Diesel Engine," SAE Transactions - Journal of Fuels and Lubricants, Vol.97, SAE 881650, 1988.
- 7) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill, New York, 1988.
- 8) T. Li, Y. Okabe, H. Izumi, T. Shudo and H. Ogawa, "Dependence of Ultra-high EGR Low Temperature Diesel Combustion on Fuel Properties," SAE 2006-01-3387, 2006.
- 9) A. M. Ickes, S. V. Bohac and D. N. Assanis, 2009, "Effect of Fuel Cetane Number on a Premixed Diesel Combustion Mode," Journal of Engine Res., Vol.10, No.4, pp.251-263, 2009.
- 10) K. Kitano, R. Nishiumi, Y. Tsukasaki, T. Tanaka and M. Morinaga, "Effects of Fuel Properties on Premixed Charge Compression Ignition Combustion in a Direct Injection Diesel Engine," SAE 2003-01-1815, 2003.
- 11) S. Kee, A. Mohammadi, Y. Kidoguchi and K. Miwa, "Effects of Aromatic Hydrocarbons on Fuel Decomposition and Oxidation Process in Diesel Combustion," SAE Transactions - Journal of Fuels and Lubricants, Vol.114, SAE 2005-01-2086, 2005.