

저온디젤연소에서 저세탄가 연료의 방향족 및 T90 온도가 배기가스에 미치는 영향

한 만 배^{*†}

* 계명대학교 기계자동차공학과

Effects of Aromatics and T90 Temperature of Low Cetane Number Fuels on Exhaust Emissions in Low-Temperature Diesel Combustion

Manbae Han ^{*†}

* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.,

(Received August 18, 2010 ; Revised September 29, 2010 ; Accepted September 29, 2010)

Key Words: Low Temperature Diesel Combustion(저온디젤연소), Cetane Number(세탄가), Aromatics(방향족), Temperature of Distillation Recovery(증발온도), Mass Fraction Burned(질량연소율)

초록: 1.9L 커먼레일 직접분사 디젤 엔진을 이용하여 1500rpm 2.6bar BMEP 에서 다량의 EGR (약 41%)과 연료분사 제어를 통한 저온디젤연소 영역에서 연료의 특성이 연소와 배기가스에 미치는 영향을 분석하였다. 사용한 연료는 세탄가 30 에 대하여 방향족 성분 (20%: A20, 45%: A45)과 T90 온도(270°C: T270, 340°C: T340)의 조합으로 네 개이다. 주어진 엔진 운전 영역에서 실험계획법을 이용하여 방향족 성분 및 T90 온도에 따른 연소 및 배기가스에 미치는 영향을 분석하였다. 착화지연 기간은 T90 온도가 지배적인 인자로 T90 온도 증가에 따라 착화지연 기간도 증가하였다. 저세탄가에 의한 착화지연 기간의 증가로 네 가지 연료 모두 PM 배출은 거의 없었다. NOx 배출은 방향족 성분이 지배적인 인자로 방향족 성분 증가에 따라 NOx 배출이 증가하였다.

Abstract: This study is to investigate the effects of aromatics and T90 for low cetane number (CN) fuels on combustion and exhaust emissions in low-temperature diesel combustion. We use a 1.9-L common rail direct injection diesel engine at 1500 rpm and 2.6 bar BMEP. Low temperature diesel combustion was achieved via a high external EGR rate and strategic injection control. The tested fuels four sets: the aromatic content was 20% (A20) or 45% (A45) and the T90 temperature was 270°C (T270) or 340°C (T340) with CN 30. Given the engine operating conditions, the T90 was the stronger factor on the ignition delay time, resulting in a longer ignition delay time for higher T90 fuels. All the fuels produced nearly zero PM because of the extension of the ignition delay time induced by the low cetane number. The aromatic content was the main factor that affected the NOx and the NOx increased with the aromatic content.

1. 서론

친환경적이고 또한 지구 온난화의 주요 원인으로 간주되는 이산화탄소 배출을 줄이기 위하여 배기가스 배출을 현저하게 줄이고 또한 연료소모율을 낮추기 위한 다양한 연구 중이다. 특히 다량의 배기가스 재순환 (exhaust gas recirculation, EGR)과 고압연료분사와 분사시기

제어를 통하여 착화지연(ignition delay) 기간을 늘려 연료와 공기의 예혼합(premixedness) 정도를 증가시키고, 또한 다량의 EGR 도입을 통한 비열비(specific heat ratio)를 감소시켜 연소 온도를 낮춰서 입자상 물질(smoke or particulate matter, PM)과 질소산화물(nitrogen oxides, NOx)의 배출을 동시에 줄이는 저온디젤연소(low temperature diesel combustion)에 관한 연구가 활발하다.⁽¹⁻⁸⁾

연소 및 연소 생성물은 여러 물리적 변수들에 의하여 영향을 받게 되는데 그 중에서 연료 특성을 고려할 수 있다. 대표적인 연료 물성치로써

† Corresponding Author, mbhan2002@kmu.ac.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

황성분량(sulfur content), 세탄가(cetane number, CN), 방향족 성분(aromatic content), 연료의 증발 온도(temperature of distillation recovery)등을 들 수 있다.⁽⁹⁻¹²⁾ 이 중 황 성분은 PM 발생에 큰 영향을 미치므로 초저유황 디젤연료(ultra low sulfur diesel fuel, sulfur content < 12ppm)를 생산하도록 법규적으로 규제하고 있다.

다량의 EGR 을 이용한 저온디젤연소에서 세탄가를 낮추면 착화지연이 길어져 PM 감소 효과가 큰 것으로 알려져 있다.⁽⁹⁾ 세탄가 40-63 정도에서는 다량의 EGR 을 이용한 저온디젤연소에서는 연료의 증발온도에 의한 영향이 뚜렷하게 나타나지 않으나,⁽⁹⁾ 다른 연구 결과에서는 고 부하 영역에서는 낮은 증발온도는 PM 저감 효과가 있다고 보고되고 있다.⁽¹¹⁾ 방향족 성분의 영향에 대하여는 전통 디젤 연소(PM-NOx 트레이드오프가 존재)에서는 PM 및 NOx 가 증가한다고 알려져 있다.⁽¹¹⁾

본 논문에서는 저 세탄가 (CN 30)에 대하여 방향족 성분과 연료의 증발온도가 다량의 EGR (약 41%)을 적용한 저온디젤연소에서 연소 및 배기가스 배출 특성에 미치는 영향을 비교하였다. 저세탄가 연료들이므로 고세탄가 (e.g. CN 55) 대비 착화지연 기간의 증가에 따른 PM 저감 효과와 더불어 방향족 성분 및 연료의 증발온도에 따른 영향을 분석하여 저온디젤연소에 대한 이해를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

2. 실험 방법

본 실험을 위하여 미국 General Motors 사의 1.9L DOHC 전자식 커먼레일 직접분사(common rail direct injection) 엔진을 이용하여 연료분사압력과 연료분사시기(start of injection, SOI)를 제어하였다. Table 1 에서 보듯이 피스톤의 형상은 보울인(bowl-in) 타입이며 압축비는 17.5 이다. 가변 형상 터보과급기(variable geometry turbo-charger)를 장착하고 있으며 EGR 은 전자식으로 제어한다. 저온디젤연소를 위하여 기존의 엔진의 부품이나 하드웨어를 변경하지는 않았다.

사용한 연료는 초저유황 디젤연료이며 물성치의 목표치는 세탄가 30 에 대하여 각각 방향족 성분 20%, 45%, T90 온도는 270°C, 340°C 이다. 최대한 목표치에 근접하도록 연료를 조성하였다. 상세한 연료 조성치는 Table 2 에 나타내었다.

엔진의 운전 영역은 1500rpm, 2.6 bar BMEP 로 SOI 에 따른 토크의 변동은 연료량으로 조정하였다. 연료 분사는 파이럿 분사 (pilot injection)없이

Table 1 Engine specifications.

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 specifications

Fuel Name	A20-T270	A20-T340	A45-T270	A45-T340
Specific Gravity [-]	0.8084	0.8037	0.8401	0.8355
Cetane Number [-]	29.9	28.0	32.0	28.4
Aromatics [% , vol.]	26.1	23.1	50.0	40.7
T10/ T50/ T90 [°C]	183/ 199/ 284	181/ 193/ 346	173/ 202/ 274	176/ 223/ 338
LHV [MJ/kg]	42.76	43.11	42.11	42.45
Sulfur [ppm]	1.9	0.4	2.6	0.1

오직 주 분사(main injection) 만으로 이루어졌다. 실험을 수행하는 동안 연료레일압력(fuel rail pressure)은 875bar 를 유지하였으며, EGR 은 약 41%로 흡입산소량의 약 15.6%에 해당한다. EGR 은 흡기관과 배기관에서 측정된 CO₂ 농도의 비로부터 계산하였다. Table 3 은 보다 자세한 엔진 작동시의 여러 인자들을 나타낸다.

배기매니폴드 끝 단에서 약 20cm 떨어진 위치에서 PM 측정을 하였으며, AVL 사의 415S 장비를 이용하여 광학식 방법으로 측정하였다. 터보과급기에서 약 1m 정도 떨어진 위치에서 매연필터를

Table 3 Engine operating parameters

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] (single injection)	varying

통과한 배기가스의 THC, CO, NO_x, CO₂, O₂ 농도를 일반 배기가스 측정 장비를 이용하여 측정하였으며 실험 오차는 5% 이내였다. 배기가스 분석을 위한 모든 샘플라인(sampling line)은 190°C로 유지하여 탄화수소 및 물의 응축을 최소화 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

저세탄가인 CN 30에 대하여 방향족 성분과 T90 온도를 조합한 4 가지 연료에 대하여 엔진제어 변수 중에서 SOI에 따른 연소 특성 및 배기가스 분석을 실시하여 연료 특성이 저온디젤연소에 미치는 영향을 분석하였다.

3.1 연소위상(combustion phasing)에 따른 연소특성

1500 rpm 2.6 bar 조건에 대하여 SOI에 따른 연소 해석을 통하여 방향족과 T90 온도에 따른 연소 특성을 분석하였다. 4 가지 연료에 대하여 EGR 약 41%로 일정하게 유지였다. SOI에 따른 질량연소율 (mass fraction burned, MFB) 50% (MFB50%)를 갖는 크랭크 각을 비교하였다. Fig. 1에서 보듯이 모든 연료에 대하여 SOI 지각에 따라서 MFB50% 위치가 단조롭게(monotonically) 지각(retard) 되었다. 동일한 SOI에 대하여 MFB50% 연소위상이 다른 것으로부터 방향족 및 T90 온도에 의한 연소 특성 변화가 있음을 알 수 있다.

Fig. 2는 MFB5% 위치와 MFB50% 위치와의 상관 관계를 나타낸다. 방향족이나 T90 온도에 관계없이 네 가지 연료 모두 선형관계를 이루며 동일

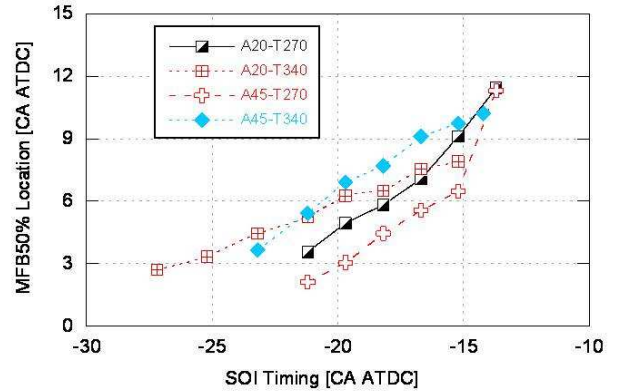


Fig. 1 MFB50% location with regards to SOI timing at 1500 rpm 2.6 bar BMEP

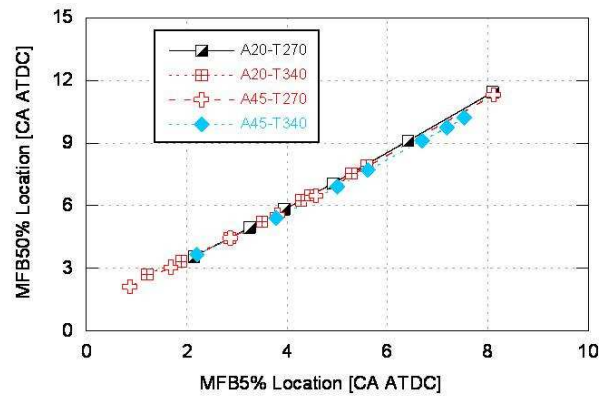


Fig. 2 Relation between MFB 5% location and MFB 50% location at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

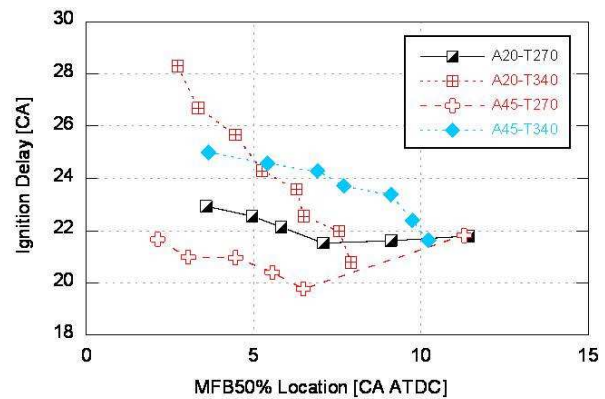


Fig. 3 Relation between MFB 50% location and ignition delay at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

한 직선 위에 존재하였으며 이는 SOI를 변경하여 MFB5% 위치와 MFB50% 위치를 일정하게 제어할 수 있음을 나타낸다.

Fig. 3은 MFB50% 위치와 착화지연(ignition delay, 여기서는 MFB5% 위치와 SOI 시기의 차이로 정의)과의 관계를 나타낸다. A20-T340을 제외한 나

머지 세 연료들은 동일한 MFB50% 위치에 대하여 착화지연 기간의 차이가 서로 겹침이 없이 확연히 구분되었다. MFB50% 위치가 5°CA ATDC 이전까지는 A20-T340, A45-T340, A20-T270, A45-T270의 순서대로 착화지연 기간이 길었다. 이는 방향족 성분의 링 구조 (ring structure)에 기인한 열분해 (thermal decomposition) 혹은 열해리(pyrolysis)의 어려움과 T90 온도가 높기 때문으로 판단된다⁽¹⁰⁾. 방향족 성분과 T90 온도 중 어느 것이 착화지연에 지배적 인자인지를 판단하기 위하여 Minitab 을 이용하여 실험계획법을 수행하였다. MFB50% 위치에 관계없이 T90 온도가 착화지연에 가장 지배적인 인자였고, 5°CA ATDC 이후에는 T90 온도와 방향족 성분의 교호작용(interaction) 효과가 증가하였다.

Fig. 4 는 MFB50% 위치와 연소기간(combustion duration, MFB50% 위치와 MFB5% 위치의 차이로 정의)을 비교한 결과이다. 동일한 MFB50% 위치에 대하여 A45-T340 연료를 제외한 나머지 연료들은 거의 동일한 연소기간을 가짐을 알 수 있었다. A45-T340 연료의 경우 MFB50% 5°CA ATDC 이후부터 다른 세 연료와 비교하여 짧은 연소기간을 가진다. 이로부터 5°CA ATDC 이후에는 A45-T340 연료의 고온 연소(high temperature combustion)가 보다 강렬하게 (intensive) 이루어짐을 유추할 수 있고 NOx 생성 증가에 영향을 미친다.

이상의 결과를 정리하면 세탄가 30 인 저세탄가 연료에서 방향족 성분과 T90 온도가 연소특성에 미치는 영향을 질량연소율 위치에 대하여 착화지연기간, 연소기간을 비교 분석하였다. 연료의 종류에 관계없이 SOI 변경에 따라 MFB5% 위치와 MFB50%의 위치를 제어 할 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 실험계획법에 의하여 MFB50% 위치에 따른 착화지연 기간의 관계는 T90 온도가 가장

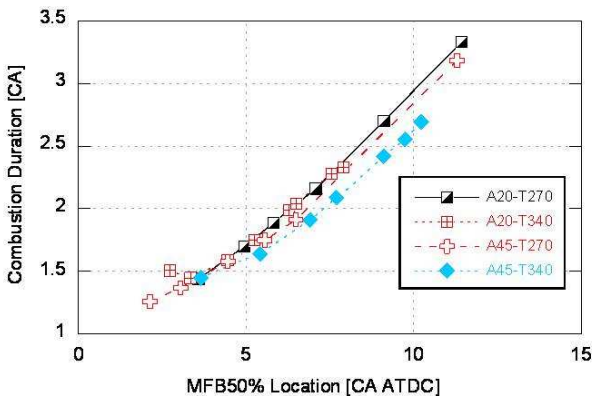


Fig. 4 Relation between MFB 50% location and combustion duration at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

지배적인 인자였으며, MFB50% 위치가 지각됨에 따라 T90 온도와 방향족 성분에 의한 교호작용이 존재함을 확인하였다.

3.2 연소위상에 따른 배기가스 특성 비교

상기 시험 결과를 토대로 각각의 연료에 대하여 MFB50% 위치에 따른 PM, NOx, THC, CO 및

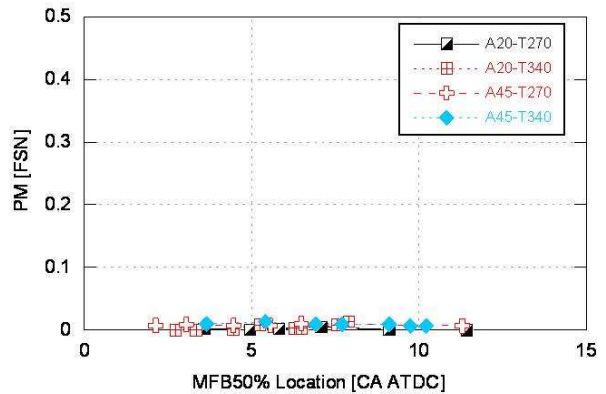


Fig. 5 PM emissions with regards to MFB 50% location at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

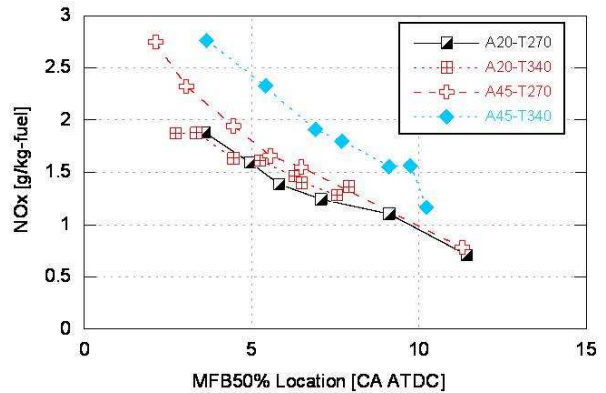


Fig. 6 NOx emissions with regards to MFB 50% location at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

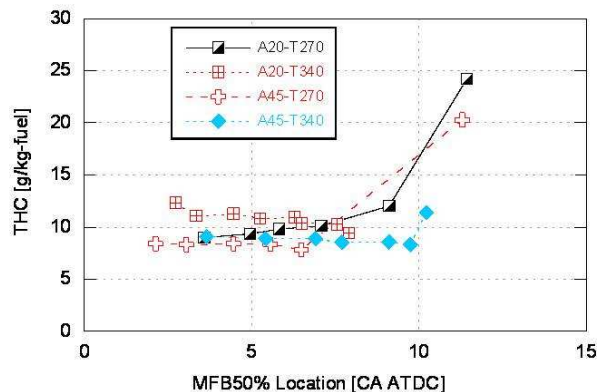


Fig. 7 THC emissions with regards to MFB 50% location at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

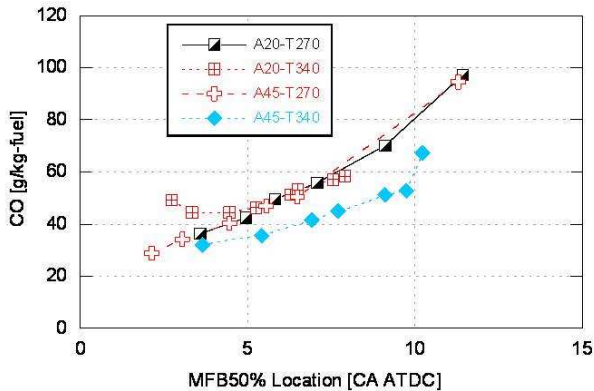


Fig. 8 CO emissions with regards to MFB 50% location at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

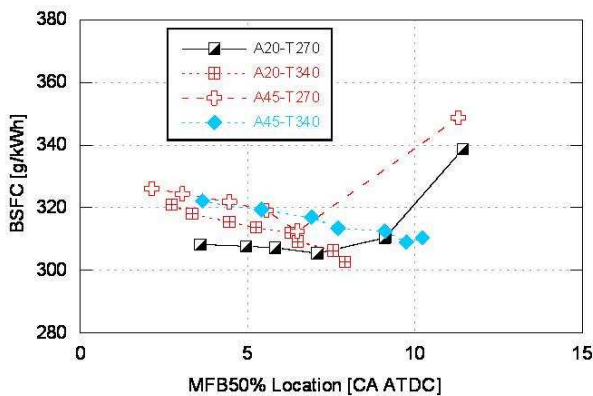


Fig. 9 BSFC with regards to MFB 50% location at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

BSFC 를 비교하였다. Fig. 5 는 MFB50% 위치에 따른 PM 배출 경향이다. PM 의 경우 MFB50% 위치에 관계없이 그리고 방향족 및 T90 온도에 관계없이 거의 배출이 없었다. 이와 달리 본 논문에는 포함되지 않았지만, 세탄가 55 에 대하여 방향족 및 T90 온도에 따른 실험 결과는 MFB50% 위치에 따라서 PM 은 0.4 이하의 값으로 세탄가 30 의 경우보다 높았다. 이러한 차이는 저세탄가에 의한 충분한 착화지연에 의하여 예혼합 정도가 증가하여 PM 발생이 줄어든 것으로 판단된다.

Fig. 6 은 MFB50% 위치에 따른 NOx 배출 경향이다. NOx 의 경우 동일한 MFB50% 위치에 대하여 A45-T340 연료의 경우 NOx 발생이 특히 현저하였다. 이는 Fig. 4 에서 설명하였듯이 연소기간이 다른 연료에 비하여 짧아서 고온연소 영역에서 보다 강렬한 열 발생으로 인한 연소온도 증가에 따른 것으로 판단된다. 방향족 성분과 T90 온도 중 NOx 생성에 지배적 인자를 판단하기 위하여 Minitab 을 이용한 실험계획법을 수행하였다. MFB50% 위치에 관계없이 방향족 성분이 NOx 생

성에 주효과로 작용하였고, T90 온도와 두 인자에 의한 교호작용에 의한 효과는 작았다. 전통디젤연소에서와 같이 저온디젤연소에서 방향족 성분의 증가는 높은 NOx 생성 배출 특성을 보였다⁽¹¹⁾.

Fig. 7 은 MFB50% 위치에 따른 THC 배출 경향이다. THC 의 경우 MFB50% 위치가 8°CA ATDC 이 전까지는 연료에 관계없이 뚜렷한 차이를 보이지 않았으나 그 이후에는 A45-T340 연료가 가장 적게 배출하였다. 이것 또한 다른 연료보다 높은 연소 온도에 의한 영향으로 판단된다.

Fig. 8 은 MFB50% 위치에 따른 CO 배출 경향이다. A45-T340 을 제외한 다른 세 연료들은 동일한 MFB50% 위치에 대하여 CO 발생량의 차이가 없었고 A45-T340 연료의 CO 배출이 가장 적었다. 이러한 이유는 THC 감소와 동등한 이유인 연소온도 증가로 판단된다.

Fig. 9 는 MFB50% 위치에 따른 BSFC 경향이다. BSFC 는 네 가지 연료에 대하여 시험 오차 범위에서 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. 연료에 따른 BSFC 특성 비교를 위하여 다른 운전 영역에서의 확인이 필요하다.

4. 결론

본 연구는 1.9L 커먼레일 직접분사 디젤 엔진을 이용하여 1500rpm 2.6bar BMEP 조건에서 다량의 EGR (약 41%)을 적용한 저온디젤연소 영역에서 저세탄가(CN30) 연료에서 방향족 성분과 T90 온도가 연소 및 배기가스에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 주어진 엔진 작동 조건하에서 방향족 성분 및 T90 온도에 따른 영향을 구분하기 위하여 실험계획법을 이용하였다. 연료에 관계없이 MFB5% 위치와 MFB50% 위치는 선형 관계를 이루어 SOI 변경에 따라서 두 개의 연소위상 위치를 동일하게 제어할 수 있음을 확인하였다. 실험계획법을 통하여 착화지연 기간은 MFB50% 위치에 관계없이 T90 온도가 가장 지배적인 인자임을 확인할 수 있었다. 연료에 관계없이 저세탄가에 의한 착화지연 기간의 증가로 PM 배출은 거의 존재하지 않았다. NOx, THC, 및 CO 에 대하여 A45-T340 의 경우 동일한 MFB50% 위치에 대하여 NOx 배출은 가장 많았으며, THC 및 CO 는 가장 적었다. 이는 가장 짧은 연소기간으로부터 가장 강렬한 고온연소가 이루어졌고 이로 인하여 연소 온도가 가장 높았기 때문으로 판단된다. 특히, 실험계획법을 통하여 NOx 생성에 지배적 인자는 MFB50% 위치에 관계없이 방향족 성분임을 확인

하였다.

후 기

본 연구는 2010 년도 계명대학교 비사연구기금으로 이루어졌습니다. 또한 미국 오크리지 국립 연구소 (Oak Ridge National Laboratory)의 실험 장비를 이용하였으므로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Akagawa, H., Miyamoto, T., Harada, A., Sasaki, S., Shimazaki, N., Hashizume, T. and Tsujimura, K., 1999, "Approaches to Solve Problems of the Premixed Lean Diesel Combustion," *SAE Transactions - Journal of Engines*, Vol. 109, SAE Paper No. 1999-01-0183.
- (2) Akihama, K., Takatori, Y., Inagaki, K., Sasaki, S. and Dean, A., 2001, "Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature," *SAE Transactions - Journal of Engines*, Vol. 110, SAE Paper No. 2001-01-0655.
- (3) Kimura, S., Aoki, O., Kitahara, Y. and Aiyoshizawa, E., 2001, "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 Paper No. 2001-01-0200.
- (4) Musculus, M. P. B., Lachaux, T., Pickett, L. M. and Idicheria, C. A., 2007, "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 Paper No. 2007-01-0907.
- (5) Han, M., Assanis, D. N. and Bohac, S. V., 2008, "Comparison of HC Species from Diesel Combustion Modes and Characterization of a Heat-up DOC Formulation," *Int. J. of Automotive Technology*, Vol. 9, No. 4, pp. 405~413.
- (6) McMillan, M. L. and Halsall, R., 1988, "Fuel Effects on Combustion and Emissions in a Direct Injection Diesel Engine," *SAE Transactions - Journal of Fuels and Lubricants*, Vol. 97, SAE paper No.881650.
- (7) Kim, H.M. Lee, D.H., Park, S.K., Choi, K.S. and Wang, H.M., 2008, "An Experimental Study on Heat Exchange Effectiveness in the Diesel Engine EGR Coolers," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 361~366.
- (8) Han, M., 2010, "Hydrocarbon Speciation in Low Temperature Diesel Combustion," *Transactions of the KSME B*, Vol. 34, No.4, pp.417~422.
- (9) Li, T., Okabe, Y., Izumi, H., Shudo, T. and Ogawa, H., 2006, "Dependence of Ultra-High EGR Low Temperature Diesel Combustion on Fuel Properties," SAE paper No. 2006-01-3387.
- (10) Ickes, A. M., Bohac, S. V. and Assanis, D. N., 2009, "Effect of Fuel Cetane Number on a Premixed Diesel Combustion Mode," *Journal of Engine Res.*, Vol. 10, No. 4, pp. 251~263.
- (11) Kitano, K., Nishiumi, R., Tsukasaki, Y., Tanaka, T. and Morinaga, M., 2003, "Effects of Fuel Properites on Premixed Charge Compression Ignition Combustion in a Direct Injection Diesel Engine," SAE paper No. 2003-01-1815.
- (12) Kee, S., Mohammadi, A., Kidoguchi, Y. and Miwa, K., 2005, "Effects of Aromatic Hydrocarbons on Fuel Decomposition and Oxidation Process in Diesel Combustion," *SAE Transactions - Journal of Fuels and Lubricants*, Vol. 114, SAE Paper No. 2005-01-2086.