

저온 디젤 연소에서 연료의 방향족 성분이 배기가스에 미치는 영향

한 만 배*

계명대학교 기계자동차공학과

The Effect of an Aromatic Content 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 30 December 2010)

Abstract : This study is to investigate the effect of an aromatic content in high cetane number (CN) fuels on exhaust emissions under low temperature diesel combustion, which expands the previous research about an aromatic content in low CN fuels. A 1.9L common rail direct injection diesel engine was run at 1500 rpm 2.6 bar BMEP with four fuel sets: an aromatic content of 20% (A20) or 45% (A45) with CN30, *i.e.* low CN fuels, and CN55, *i.e.* high CN fuels. Given experimental conditions, the trend of exhaust emissions in high CN fuels was inconsistent with that of low CN fuels which all produced nearly zero smoke but higher NO_x for the high aromatic fuel (CN30-A45). For high CN fuels, however, the low aromatic fuel (CN55-A20) produced lower smoke than the high one (CN55-A45) while NO_x was similar to each other. The cause of this discrepancy between high CN and low CN fuels is unclear whether it comes from that CN may be a dominant factor to govern exhaust emissions rather than an aromatic content or that the actual CN value of CN55-A45 is lower than CN55-A20. More decent fuel matrix should be prepared and further experiments are needed to confirm it.

Key words : Low temperature diesel combustion(저온 디젤 연소), Aromatic content(방향족 성분), Cetane number (세탄가), Exhaust gas recirculation(배기가스 재순환)

Nomenclature

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

A20 : aromatic content 20%

A45 : aromatic content 45%

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, NO_x)의 배출을 동시에 줄이는 저온 디젤 연소(low temperature diesel combustion)에 관한 연구가

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

활발하다.¹⁻⁶⁾ 이는 전통적인 디젤 연소(conventional diesel combustion)에서의 PM-NOx 상반 관계⁷⁾(trade-off relationship) 영역을 벗어나 다량의 EGR과 고압의 연료분사 및 분사시기 최적화를 통하여 착화지연(ignition delay) 기간을 늘려 연료와 공기의 예혼합(premixedness) 정도를 증가시키고 연소 온도를 낮춰 PM과 NOx 배출을 동시에 줄이는 방법이다. 그러나 이러한 저온 디젤 연소의 단점은 예혼합 정도의 증가에 의하여 연소시의 압력상승이 급격하여 엔진 운전 영역이 중, 저 부하로 제한되며 저온 연소 특성에 의하여 THC, CO 배출이 전통디젤 연소와 비교하여 높다. THC 및 CO는 디젤산화촉매와 같은 후처리 장치를 이용하여 저감이 가능하다.

저온 디젤 연소의 운전 영역을 넓히기 위하여 엔진 제어 변수에 관련된 연구와 더불어 연료의 조성에 따른 연구 또한 필요하다. 연료의 조성에서 연소에 영향을 미치는 다양한 물성치 중에서 대표적으로 세탄가(cetane number, CN), 방향족 성분(aromatic content), 연료의 90% 증발온도 (temperature of 90% distillation recovery, T90) 등을 들 수 있다.⁸⁻¹²⁾ 저 세탄가 연료는 저온 디젤 연소에서 착화지연을 길게 하여 연료와 공기의 혼합 정도를 높여서 국소 당량비(equivalence ratio)를 낮추어 PM 감소 효과가 큰 것으로 알려져 있다.⁸⁾ 세탄가 40-63 정도에서는 연료의 증발온도가 저온 디젤 연소에서는 그 특징이 뚜렷하게 나타나지 않으며,⁸⁾ 다른 연구 결과에서는 고 부하 영역에서 낮은 증발온도를 갖는 연료는 PM 저감 효과가 있다고 보고되고 있다.¹⁰⁾ 방향족 성분의 영향에 대하여는 전통디젤 연소에서는 PM 및 NOx가 증가한다고 알려져 있다.¹⁰⁾ 저자의 최근 연구 결과에 의하면 저속 저 부하 영역에서의 저온 디젤 연소 영역에서 저 세탄가(CN30) 연료의 경우 방향족 성분의 증가는 NOx 발생 증가의 주 인자였다.¹²⁾

본 논문에서는 다량의 EGR을 적용하고, 전략적인 연료 분사 제어를 통하여 PM 및 NOx 생성을 현격히 줄인 저온 디젤 연소 영역에서 저 세탄가(CN 30) 연료와 더불어 고세탄가(CN 55) 연료에 대하여 방향족 성분이 연소 및 배기가스에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

2. 실험 방법

본 실험을 위하여 1.9L DOHC 커먼 레일 직접 분사(common rail direct injection) 엔진을 이용하였다. 피스톤의 형상은 보울인(bowl-in) 타입이며 압축비는 17.5이다. 가변 형상 터보 과급기(variable geometry turbo-charger)를 장착하고 있으며 배기가스 재순환은 전자식으로 제어한다. Table 1은 보다 상세한 엔진 설명이다.

사용한 연료는 초저유황 디젤 연료(ultra low sulfur diesel fuel, sulfur <12 ppm wt)로 세탄가의 목표치는 30과 55이며, T90 온도의 목표치는 270°C이며, 방향족 성분의 목표치는 20%, 45%이다. 최대한 상기 목표치에 접근하도록 연료를 조성하였으며 연료 이름은 목표 세탄가와 목표 방향족 성분량을 기준으로 명명하였다. Table 2는 연료 조성에 관한 상세한 설명이다. 특히 CN55-A45연료의 세탄가가 44 정도로 목표치인 55와 비교하여 차이가 났다.

엔진의 운전 영역은 1500rpm, 2.6 bar BMEP로 연료분사시기(start of injection, SOI)에 따른 토크의 변동은 연료량으로 조정하였다. 실험을 수행하는 동안 연료레일압력은 875 bar를 유지하였으며, EGR은 약 41%이고 흡입산소량은 약 15.6%이다. EGR은 흡기관과 배기관에서 측정된 CO₂ 농도의 비로부터 계산하였다. Table 3은 엔진 운전 조건에 관한 상세한 설명이다.

배기매니폴드 끝단에서 약 20cm 떨어진 위치에서 AVL사의 415S를 이용하여 매연(smoke)을 측정하였으며 매연을 PM의 대푯값으로 사용하였다. 일반적인 배기가스 분석을 위하여 터보 과급기에서 약 1m 정도 떨어진 위치에서 매연필터를 통과한 배기가스를 채취하여 THC, CO, NOx, CO₂, O₂ 농도를 측정하였다. 특히 배기가스 성분 중에서 THC를 상세하게 분석하기 위하여 배기가스의 일부를 Nicolet 사의 Nexus 670 푸리에 변환 적외선 분광계(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)에 공급하여 각 운전 조건에 대하여 탄화수소 종을 분석하였다. 배기가스 채집 라인의 온도를 190°C로 유지하여 배기라인에 탄화수소 및 물이 응축되는 것을 최소화하였다.

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-A20	CN30-A45	CN55-A20	CN55-A45
Specific Gravity [-]	0.8084	0.8401	0.8086	0.8375
Cetane Number [-]	29.9	32.0	54.2	44.3
Aromatics [%, vol.]	26.1	50.0	22.2	46.2
T10/	183/	173/	186/	193/
T50/	199/	202/	221/	229/
T90 [°C]	284	274	274	267
LHV [MJ/kg]	42.76	42.11	42.86	42.32
Sulfur [ppm]	1.9	2.6	1.2	1.4

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

3. 실험 결과 및 고찰

본 실험의 조건하에서 연료 분사 압력, 분사 시기와 같은 연료 분사 제어와 더불어 다량의 EGR 적용은 연료-공기의 예혼합 정도를 증가시키고 연소 온도를 낮추었다. 이를 통하여 전통적인 디젤 연소에서 발견되는 PM-NOx 트레이드오프 영역에서 벗어나서 PM과 NOx를 동시에 저감하는 저온 디젤 연소를 이루었다.

이러한 저온 디젤 연소 영역에서 저 세탄가(CN

30)와 고세탄가(CN 55)에 대하여 방향족 성분이 적은 디젤 연소에서 연소 및 배기가스에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

3.1 SOI 영향

엔진 제어 변수 중에서 특히 SOI에 따른 배기가스 특성, 연료소모율(Brake Specific Fuel Consumption, BSFC) 및 탄화수소 중 분석을 실시하였다. Fig. 1은 SOI에 따른 매연, NOx, THC, CO, BSFC를 각 연료들에 대하여 비교하였다. 또한 Fig. 2는 각 연료들에 대하여 착화지연, 질량연소율(Mass Fraction Burned, MFB) 50% 위치 및 연소 기간을 비교하였다. 본 논문에서는 착화지연 기간을 MFB 5%에 해당하는 각과 SOI 시기의 차이로 그리고 연소 기간(combustion duration)은 MFB 50% 발생 위치와 MFB 5% 발생 위치의 차이로 정의하였다.

Fig. 1에서 보듯이 연소 안정성이 유지되는 SOI

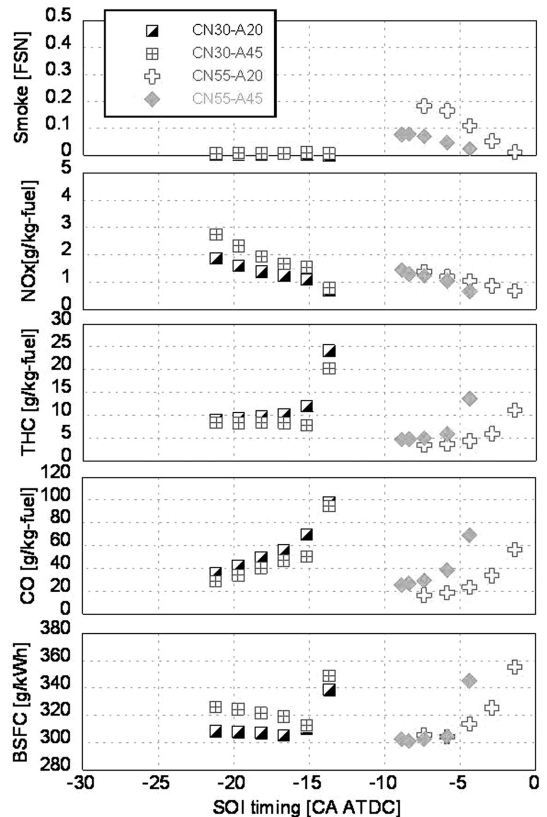


Fig. 1 Smoke, NOx, THC, CO, BSFC trends with SOI timing

영역은 세탄가에 의하여 지배되어 CN30 연료들은 CN55 연료들 보다 SOI 진각(advance)이 필요하였다. 또한 저 세탄가인 CN30 연료에 대하여 SOI 지각(retard)에 따라 방향족 성분의 양에 관계없이 매연은 거의 배출되지 않았고, NO_x는 저감되었다. 동일한 SOI에 대하여 방향족 성분이 많은 CN30-A45가 방향족 성분이 적은 CN30-A20 보다 NO_x 발생이 많았다. 이는 저 세탄가 연료의 경우 방향족 성분의 증가는 저온 디젤 연소 영역에서 NO_x 배출에 영향을 미친다는 연구 결과¹²⁾를 재확인하였다. THC 및 CO는 CN30-A20에서 다소 적게 배출되었다.

그러나 고세탄가 연료에 대하여 본 실험 조건 및 사용한 연료의 조성치의 범위에서는 저 세탄가 연료에서 방향족 성분의 증가에 의한 배기가스 배출 경향과 일치하지 않았다. 즉, 고세탄가 CN55 연료들의 경우 동일한 SOI에 대하여 방향족 성분이 많은 CN55-A45는 방향족 성분이 적은 CN55-A20보다 매연이 저감되고 THC 및 CO는 증가하였으며 NO_x 배출은 거의 동일하였다.

Fig. 2에서 보듯이 CN30 연료들의 방향족 성분 차이에 의한 착화지연 기간은 CN30-A45가 CN30-A20 보다 전체적으로 1.5°CA 이내로 짧았다. 즉, 저 세탄가 연료의 경우 방향족 성분 증가에 따라 착화지연이 감소하였다. 그러나 고세탄가 CN55 연료들의 경우 방향족 성분이 높은 CN55-A45가 방향족 성분이 낮은 CN55-A20보다 착화지연 기간이 약 2.5°CA 정도 길었다. 저 세탄가와 고세탄가 연료들의 방향족 성분의 변화에 따른 착화지연 기간의 경향도 서로 일치하지 않았다. 그 외 MFB 50% 위치는 연료에 관계없이 SOI 지각에 따라서 단조적으로 지각되었으며 연소 기간 또한 증가하였다.

이상의 결과들로부터 저 세탄가 연료에서 방향족 성분의 증가는 동일한 SOI에서 착화지연 기간 및 연소 기간이 감소하여 열 발생률이 증가하여 NO_x 발생이 증가하고 THC 및 CO가 감소한 것으로 판단된다. 그러나 고세탄가 연료에서 방향족 성분이 증가함에 따라 동일한 SOI에서 착화지연 및 연소 기간은 증가하였으며 매연은 감소하고, NO_x 발생은 뚜렷한 차이를 보이지 않았으며 THC 및 CO는 증가하였다.

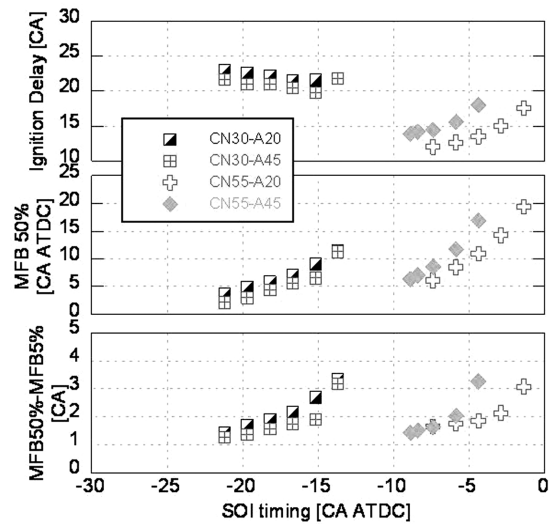


Fig. 2 Ignition delay, MFB50% location, and combustion duration for various SOI timing

주어진 실험 조건 및 연료 조성치 범위 내에서 저 세탄가 고세탄가 연료에 대하여 방향족 성분이 연소와 배기가스에 미치는 영향은 동일하지 않았다. 이는 고세탄가 연료의 경우 세탄가에 의한 영향이 방향족 성분보다 연소에 보다 지배적인 인자로 작용한 것인지 혹은 CN55-A45의 실제 세탄가가 CN55-A20보다 10정도 낮은 데에서 기인한 것인지 불분명하며 이에 대한 추가 실험을 통한 재확인 필요하다.

Fig. 3은 시험 연료들에 대하여 SOI에 따른 대표적인 탄화수소 중인 메탄(methane, CH₄), 에텐(ethene, C₂H₄), 프로펜(propene, C₃H₆), 포름알데히드(formaldehyde, HCHO)의 거동을 보여준다. 모든 연료에 대하여 SOI가 지각됨에 따라 포름알데히드를 제외한 탄화수소 중들의 배출량이 증가하는 경향을 보였다. 포름알데히드는 방향족 성분의 양에 관계없이 CN30에서 발생한 포름알데히드가 CN55보다 2배 정도 많았으며 이는 낮은 세탄가에 의한 착화지연 기간이 길어져 과혼합(overmixing)이 증가하였기 때문으로 판단된다.

3.2 최적화된 SOI에서 배기가스 특성 비교

상기 실험 결과를 토대로 각각 연료에 대하여 배기가스와 연비에 대하여 가중치(weighting factor)를

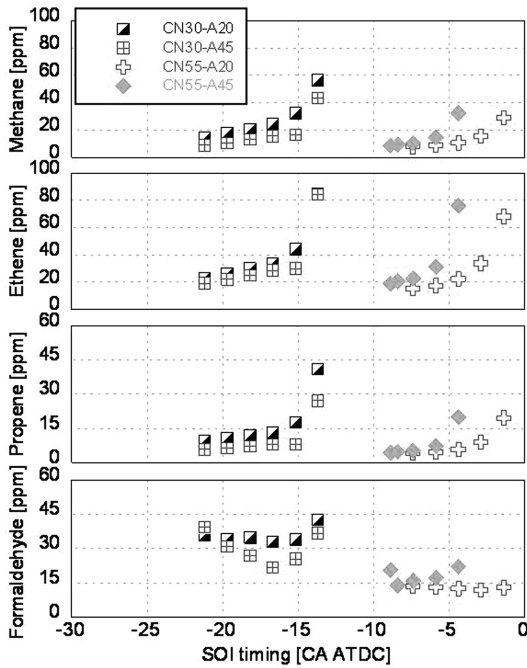


Fig. 3 Several major HC species trends with SOI timing

적용한 가격함수(cost function)를 최소화하는 SOI를 최적화된 지점으로 결정하는데, 본 논문에서는 이를 간략화하여 최저 BSFC를 갖는 SOI를 최적화된 SOI로 간주하였다. 각각의 SOI는 CN30-A20의 경우 -16.7°CA ATDC, CN30-A45는 -15.2°CA ATDC이다. 그리고 CN 55-A20은 -5.9°CA ATDC, CN 55-A45는 -8.0°CA ATDC이었다.

각각의 연료에 대한 실린더 압력과 열 방출 특성을 Fig. 4에서 비교하였다. 최적의 SOI 시기에서는 CN30-A45의 SOI가 CN30-A20보다 약 1.5°CA 정도 지각되었음에도 불구하고 실린더 압력과 주 열 방출(main heat release)의 발생은 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 그러나 CN55-A20은 CN55-A45보다 주 열 방출이 보다 급격하고 빠르게 이루어졌다.

Fig. 5는 최적의 SOI에서 착화지연과 연소기간을 비교하였으며 CN30 연료들의 방향족 성분량에 따른 착화지연 기간의 차이는 CN55 연료들의 그것과 비교하여 작았다. 연소 기간은 동일한 세탄가에 대하여 방향족 성분에 의한 영향은 거의 보이지 않았다.

Fig. 6은 최적화된 SOI에서 매연 및 NOx 배출 특성을 비교하였다. CN30 연료의 경우 매연 및 NOx

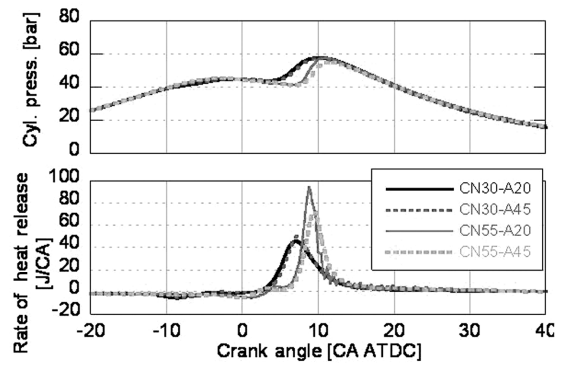


Fig. 4 Cylinder pressure and heat release rates for the optimized SOI timing

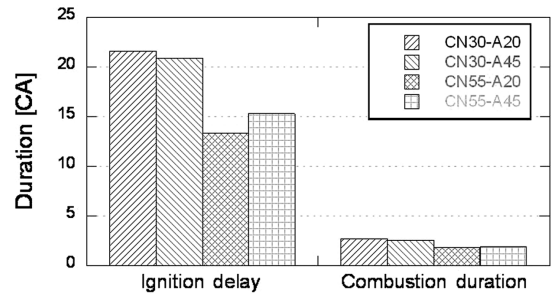


Fig. 5 Ignition delay and combustion duration for the optimized SOI timing

배출은 시험 오차 범위 내에서 비슷한 수준이었다. 그러나 CN55 연료의 경우 NOx는 시험 오차 범위 내에서 비슷하였으나, 매연은 방향족 성분이 높은 CN55-A45 연료가 CN55-A20 연료 대비 약 30% 수준의 배출 경향을 보였다.

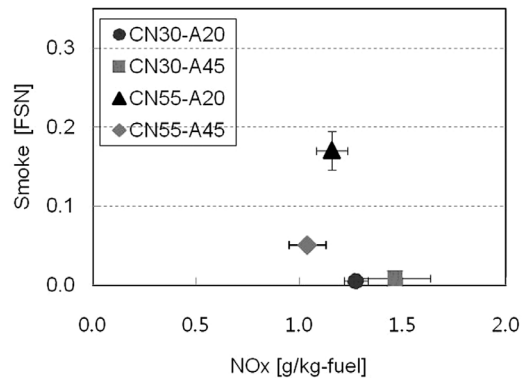


Fig. 6 Smoke and NOx emissions for the optimized SOI timing

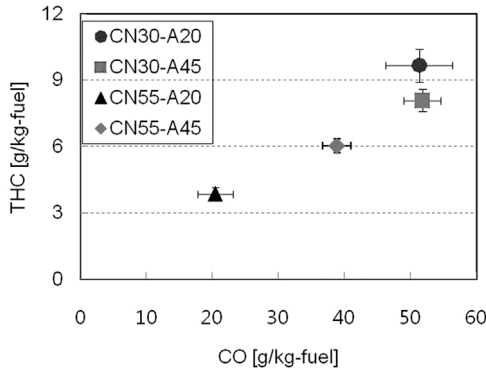


Fig. 7 THC and CO emissions for the optimized SOI timing

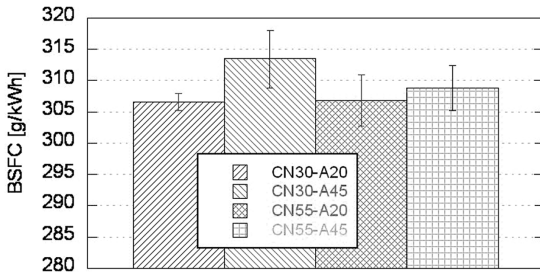


Fig. 8 Comparison of BSFC for the optimized SOI timing

Fig. 7은 최적화된 SOI에서 THC 및 CO의 배출 특성을 비교하였으며, CN30의 경우 두 연료의 CO 배출은 동등수준이고, CN30-A20이 CN30-A45보다 THC 배출이 컸다. 그러나 CN55 연료는 방향족 성분이 높은 A45가 A20보다 THC 및 CO 모두 많이 배출되었다.

Fig. 8은 최적화된 SOI에서 연료 소모율을 비교하였다. 저 세탄가 연료인 CN30에 대하여 A20보다 A45의 연료소모율이 다소 컸다. 그러나 CN30-A45와 고세탄가의 두 연료들은 시험 오차 범위에서 뚜렷한 차이가 없었다.

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 저 세탄가 고세탄가 연료에 대하여 방향족 성분이 연소 및 배기가스에 미치는 영향을 분석하였다.

저 세탄가인 CN30 연료의 경우 방향족 성분량에

따른 매연 배출 차이는 없었고 NOx는 증가하였다. 즉, 저 세탄가 연료의 경우 방향족 성분에 의한 NOx 생성 증가를 확인하였다. 그러나 고세탄가인 CN55 연료는 방향족 성분 증가에 따라 매연이 감소하고 NOx는 비슷한 수준을 보였다. 이는 고세탄가 연료의 경우 세탄가에 의한 영향이 방향족 성분보다 지배적인 인자로 작용한 것인지 혹은 CN55-A45의 실제 세탄가가 CN55-A20보다 10정도 낮은 데에서 기인한 것인지 불분명하며 이에 대한 추가 실험을 통한 재확인이 요구된다.

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, “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 Properites 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.
 - 12) M. Han, “Effect of Aromatics and T90 Temperature for Low Cetane Number Fuels on Exhaust Emissions in Low Temperature Diesel Combustion,” Transactions of KSME B, Vol.34, No.12, pp.1121-1126, 2010.