

## 저온디젤연소에서 고세탄가 연료의 방향족 및 T90 온도가 배기가스에 미치는 영향

한 만 배<sup>\*†</sup>

\* 계명대학교 기계자동차공학과

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

Manbae Han<sup>\*†</sup>

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

(Received August 19, 2010 ; Revised January 26, 2011 ; Accepted January 26, 2011)

**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 55 에 대하여 방향족 성분(20%, 45%, vol. %)과 T90 온도(270°C, 340°C)의 조합으로 네 개이다. 주어진 실험 조건에서 모든 연료에 대하여 착화지연 시간이 증가함에 따라 PM 은 단조적으로 저감되었다. 동일한 착화지연 시간에 대하여 T90 온도가 높은 연료들의 PM 발생이 높았다. NOx 는 동일한 MFB50% 위치에서 모든 연료가 동등 수준이었다. THC, CO 발생은 연료 조성에 관계없이 동일한 착화지연 시간에 대하여 동등 수준이었다. 또한 착화지연 시간 증가에 따라 THC, CO 배출이 증가하였는데 이는 과혼합 증가가 주 원인으로 판단된다.

**Abstract:** The aim of this study is to investigate the effects of aromatics and T90 temperature for high cetane number (CN) of diesel fuels on combustion and exhaust emissions in low-temperature diesel combustion in a 1.9 L common rail direct injection diesel engine at 1500 rpm and 2.6 bar BMEP. Four sets of fuels with CN 55, aromatic content of 20% or 45% (vol. %), and T90 temperature of 270°C or 340°C were tested. Given engine operating conditions, all the fuels showed the same tendency of decrease of PM with an increase of an ignition delay time. At the same ignition delay time, the fuels with high T90 produced higher PM. At the same MFB50% location the amount of NOx was similar for all the fuels. Furthermore, at the same ignition delay time the amounts of THC and CO were similar as well for all the fuels. The amount of THC and CO increased with an extension of the ignition delay time mainly because of the increase of fuel-air over-mixing.

### 1. 서론

친환경적이면서 열효율이 높고 온실 가스인 이산화탄소를 적게 배출하는 클린디젤 자동차 개발에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 다양한 연구 분야 중에서 신 연소 기법에 관한 활발한 연구가 세계적으로 진행 중이다. 일반적으로 전통디젤연소에서는 입자상 물질(particulate matter, PM)을 줄이기 위하여 연료분사시기를 진각(advance)시

키거나 배기가스 재순환(exhaust gas recirculation, EGR)량을 줄이면 질소산화물 (nitrogen oxides, NOx)가 증가하거나, 혹은 NOx 를 저감시키기 위하여 연료분사시기(start of injection, SOI)를 지각(retard)시키고 EGR 을 증가시키면 PM 이 증가하는 소위 PM-NOx 상반관계(trade-off) 현상이 보고되어왔다.<sup>(1)</sup> 그러나 최근 다량의 EGR 과 고압의 연료분사 시스템 및 분사시기 제어를 통하여 연료와 공기의 예혼합(premixedness)을 증가시키고 연소 온도를 낮춰 PM 과 NOx 배출을 동시에 줄이는 신 연소 기법의 하나인 저온디젤연소(low-temperature

† Corresponding Author, mbhan2002@kmu.ac.kr  
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

diesel combustion)에 관한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(2-7)</sup> 그러나 저온디젤연소는 낮은 PM과 NO<sub>x</sub> 이외에 낮은 연소 온도로 인한 THC와 CO 배출이 증가하며 예혼합 연소의 특성에 기인한 급격한 열 발생으로 엔진 작동 영역이 제한적이어서 이에 대한 영역 확장이 요구된다.<sup>(6)</sup>

이러한 제한 조건을 극복하기 위한 다양한 연구 중에서 연료 조성이 저온디젤연소 미치는 영향에 관련된 다양한 연구들이 진행 중이다.<sup>(8-15)</sup> 황 성분(sulfur content)이 연료에 다량으로 포함되면 PM 배출이 증가되는 것으로 알려졌다<sup>(1)</sup> 이를 개선하기 위하여 초저유황 디젤연료(ultra low sulfur diesel fuel, 황 함유량 12ppm 이하)를 생산하도록 법규적으로 규제하고 있다.

그 외의 주요한 인자들로 세탄가(cetane number, CN), 방향족 성분(aromatic content), 90% 연료 증발 온도(temperature of 90% distillation recovery, T90)등을 들 수 있다.<sup>(8-12)</sup> 다량의 EGR을 적용한 저온디젤연소에서 낮은 세탄가는 착화지연 기간을 늘려 연료 및 공기의 예혼합 정도를 증가시켜 PM을 저감하는데 효과적이다.<sup>(8,15)</sup> 중·고 세탄가(40~63)의 경우 다량의 EGR을 적용하여 저온디젤연소를 이루었을 때 연료 증발온도에 의한 영향이 뚜렷하지 않으나,<sup>(8)</sup> 고 부하 영역에서는 연료 증발온도가 낮으면 PM 저감 효과가 있다고 보고되고 있다.<sup>(10)</sup> 방향족 성분의 영향에 대하여는 전통디젤연소에서는 PM 및 NO<sub>x</sub>가 증가한다고 알려져 있다.<sup>(10)</sup>

단기통(single cylinder) 엔진에 대하여 2000rpm 5.5bar IMEP 조건에 대한 저온디젤연소 연구 결과<sup>(13)</sup>에 의하면 세탄가를 증가시키면 PM과 NO<sub>x</sub> 발생 수준을 낮게 유지하면서 HC, CO 및 연료 소모율이 감소하였다. 세탄가가 증가함에 따라 저온 열 방출(low temperature heat release)량의 크기가 증가하였으며 또한 그 발생위치는 진각 되었다.

또한 균일혼합 압축착화 연소(homogeneous charge compression ignition)에서는<sup>(14)</sup> 세탄가, 연료 증발온도, 방향족 성분 중에서 세탄가가 연소 위상(combustion phasing)에 가장 크게 영향을 미치며 저세탄가의 경우 열효율 향상이 유리하였다고 한다. T90 온도가 높은 연료의 경우 THC 및 CO 발생이 증가하였고 방향족 성분에 의한 영향은 거의 없었다.

본 논문은 저세탄가 연료에 대하여 저속 저 부하 영역(1500rpm 2.6 bar BMEP)에서 저온디젤연소에서 방향족 성분과 연료의 증발온도에 대한 연구

결과<sup>(15)</sup>의 연장이다. 즉, 고 세탄가(CN 55)에 대하여 방향족 성분과 연료의 증발온도가 다량의 EGR(약 41%)을 적용한 저온디젤연소에서 연소 및 배기가스 배출 특성에 미치는 영향을 비교하였다.

저세탄가 연료의 경우(CN30) T90 온도가 착화지연 기간에 미치는 지배 인자로 T90 온도의 증가에 따라 착화지연 기간도 증가하였다. 이러한 착화지연 기간의 증가는 예혼합 정도를 증가시켜 PM 배출이 거의 없었다. 방향족 성분은 NO<sub>x</sub> 배출에 지배적인 인자로 방향족 성분 증가에 따라 NO<sub>x</sub> 배출 또한 증가하였다. 본 논문에서는 고 세탄가 이므로 착화지연 기간은 저 세탄가(e.g. CN 30) 연료 대비 짧기 때문에 PM 저감 효과는 저세탄가 연료보다 낮을 것으로 판단된다.

## 2. 실험 방법

본 실험을 위하여 미국 General Motors사의 1.9L DOHC 전자식 커먼레일 직접분사(common rail direct injection) 엔진을 이용하여 연료분사압력과 SOI를 제어하였다. 피스톤의 형상은 보울인(bowl-in) 타입이며 압축비는 17.5이다. 가변 형상 터보과급기(variable geometry turbo-charger)를 장착하고 있으며 EGR은 전자식으로 제어한다. 보다 상세한 엔진 구성은 Table 1에 나타내었다. 저온디젤연소를 위하여 기존의 엔진의 부품이나 하드웨어를 변경하지는 않았다.

사용한 연료는 초저유황 디젤연료이며 물성치의 목표치는 세탄가 55에 대하여 각각 방향족 성분 20%, 45% (vol. %), T90 온도는 270°C, 340°C이다. 최대한 목표치에 근접하도록 연료를 조성하였으나 A45-T270 연료는 목표치 세탄가에 못 미치는 44.3이었다. 세탄가는 연소특성 및 배기가스에 큰 영향을 미치므로 CN45 연료를 추가하여 A45-T270 연료에 의한 연소 및 배기가스 결과와 비교하면서 분석에 주의를 기울였다. 자세한 각각의 연료의 물성치를 Table 2에 정리하였다.

엔진의 작동 조건은 1500rpm, 2.6 bar BMEP로 SOI에 따른 토크의 변동은 연료량으로 조정하였으며 연료 분사는 1회 연료 분사(single injection)으로 파이롯 분사(pilot injection)없이 오직 주 분사(main injection)만으로 이루어졌다. 또한 연료레일 압력(fuel rail pressure)은 875bar이며, EGR은 약 41%이며 이때 흡입산소량은 약 15.6%이다. EGR은 흡기관과 배기관에서 측정된 CO<sub>2</sub> 농도의 비로부터 계산하였다. 자세한 엔진 작동시의 인자들을 Table 3에 나타내었다.

**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	CN45
Specific Gravity [-]	0.8086	0.8411	0.8375	0.8682	0.8462
Cetane Number [-]	54.2	53.3	44.3	50.0	45.0
Aromatics [% vol.]	22.2	21.2	46.2	43.5	37.0
T10/T50/T90 [°C]	186/221/274	223/275/339	193/229/267	248/273/342	184/255/319
LHV [MJ/kg]	42.86	42.76	42.32	42.16	42.42
Sulfur [ppm]	1.2	2.8	1.4	1.6	2.5

배기매니폴드 끝 단에서 약 20cm 떨어진 위치에서 PM 측정을 하였고(AVL 415S), 터보과급기에서 약 1m 정도 떨어진 위치에서 매연필터를 통과한 배기가스의 THC, CO, NOx, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 농도를 측정하였다. 배기가스 분석을 위한 모든 샘플 라인(sampling line)은 190°C 를 유지하여 탄화수소 및 물의 응축을 최소화 하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소위상(combustion phasing)에 따른 연소특성  
1500 rpm 2.6 bar 조건에 대하여 EGR 약 41% 로

**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

일정하게 유지하여 SOI 변경에 따른 방향족과 T90 온도에 따른 연소 특성을 분석하였다. Fig. 1 은 SOI 에 따른 질량연소율(mass fraction burned, MFB) 50%의 위치 변화를 나타낸다. 즉, 모든 연료에 대하여 SOI 지각에 따라서 MFB50% 위치가 단조롭게(monotonically) 지각(retard) 되었다. 동일한 SOI 에 대하여 MFB50% 연소 위상이 다른 것으로부터 방향족 및 T90 온도에 의한 연소 특성 변화가 있음을 알 수 있다. 즉, A20-T270 및 A20-T340 은 SOI 지각에 따라 MFB50% 위치가 서로 차이를 보이지 않았다. A45-T340 의 경우 동일한 SOI 에 대하여 A20-T270 및 A20-T340 보다 MFB50% 위치가 0.2~2.1°C 정도 지각되었다. 즉, SOI 지각 정도가 클수록 MFB50% 위치의 지각도 이에 따라 커졌다. A45-T270 의 경우는 A45-T340 보다 MFB50% 위치가 더 크게 지각되었는데 이것은 CN 의 영향으로 파악된다. 왜냐하면 A45-T270 과 비슷한 세탄가를 갖는 C45 연료와 비슷한 경향을 보이기 때문이다.

Fig. 2 는 MFB5% 위치에 따른 MFB50% 위치를 나타낸다. 방향족 성분, T90 온도에 관계없이 모두 선형관계를 이루며 동일한 직선 위에 존재하였으며 이는 SOI 를 변경하여 MFB5% 위치와 MFB50% 위치를 일정하게 제어가 가능함을 시사한다.

Fig. 3 은 MFB50% 위치와 착화지연(ignition delay, 여기서는 MFB5% 위치와 SOI 시기의 차이로 정의) 과의 관계를 나타낸다. MFB50% 위치의 지각에 따라 착화지연 기간이 증가하였다. A20-T270 과 A20-T340 는 일정한 MFB50% 위치에 대하여 거의 동일한 착화지연 기간을 갖는다. 그러나 A45-T340 은 동일한 MFB50% 위치에 대하여 A20-T270 과 A20-T340 보다 전체적으로 약 0.7°C

정도 긴 착화지연 기간을 보였다. A45-T270 의 경우 MFB50% 위치에 대하여 가장 긴 착화지연 경향을 보였는데 이것은 세탄가에 의한 영향으로 파악된다. 왜냐하면 비슷한 세탄가를 갖는 CN45 의 착화지연 기간과 비슷한 수준이기 때문이다.

A45-T340 의 착화지연 기간이 동일한 MFB50% 위치에 대하여 다른 두 연료 A20-T270, A20-T340 과 비교하여 약 0.5~0.7°CA 정도 길게 나타났다. 그 원인으로 A45-T340 의 실제 측정된 세탄가가 50 으로 A20-T270 및 A20-T340 두 연료의 평균 세탄가 53.8 와 비교하여 다소 낮아서 세탄가 영향인지 혹은 방향족 성분이 많아서 방향족 성분의 링 구조(ring structure)에 기인한 열분해(thermal decomposition) 혹은 열해리(pyrolysis)의 어려움<sup>(11)</sup> 때문인지 본 실험의 결과로부터 판단하기가 어려우며 이를 위하여 추가적인 실험이 요구된다.

Fig. 4 는 MFB50% 위치와 연소기간 (combustion duration) 을 비교한 결과이다. 예혼합 연소 위상은 저온 디젤 연소에서 MFB50%위치와 MFB10%위치 차이로 정의하기도 하며 THC 및 CO 발생을 이해 하는데 주요 인자로 사용한다.<sup>(16)</sup> 본 논문에서는 예혼합 연소 위상을 연소기간으로 명명하였으며 앞선 연구결과<sup>(16)</sup>와 달리 MFB50%위치와 MFB5% 위치의 차이로 정의하였다. 동일한 MFB50% 위치에 대하여 A20-T270 과 A20-T340 은 거의 같은 연소기간을 보였다. 그러나 A45-T270 와 A45-T340 은 MFB50% 위치가 12°CA ATDC 이후부터 다른 두 A20 연료보다 긴 연소기간을 가진다.

3.2 연소위상에 따른 배기가스 특성 비교

상기 시험 결과를 토대로 각각의 연료에 대하여 MFB50% 위치, 연소기간 및 착화지연 기간에 따른 PM, NOx, THC, CO 및 BSFC 를 비교하였다.

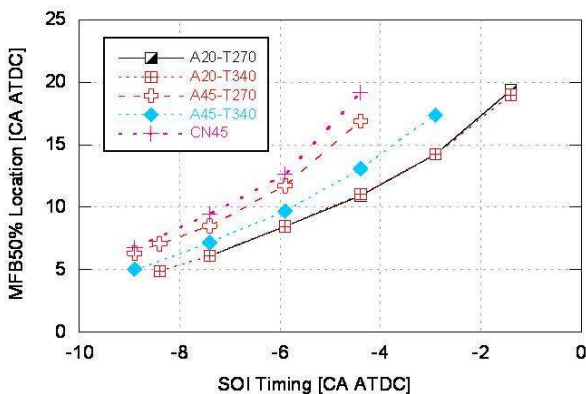


Fig. 1 MFB50% location with regards to an SOI timing at 1500 rpm 2.6 bar BMEP

Fig. 5 는 착화지연 기간에 따른 PM 배출 특성을 보여준다. 네 가지 연료 모두 매우 낮은 PM 배출을 보였으나 저 세탄가인 CN30 연료들의 실험 결과<sup>(15)</sup>와 비교하면 다소 높은 수준이다. Fig. 5 에서 알 수 있듯이 PM 배출은 동일한 착화지연 기간에 대하여 방향족 성분보다 T90 온도에 따라 뚜렷한 차

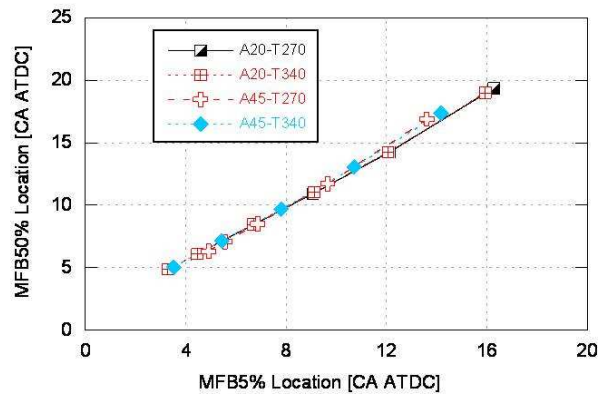


Fig. 2 Relation between MFB 5% location and MFB 50% location at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

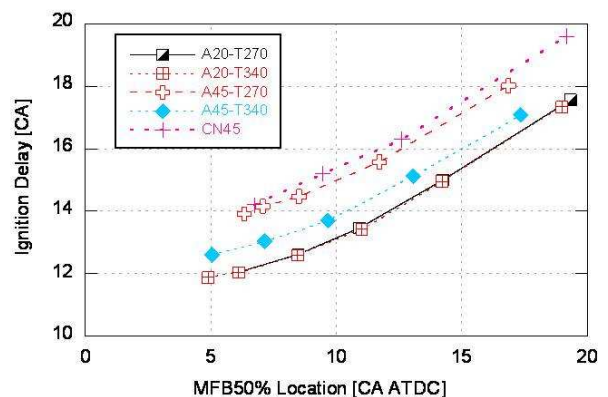


Fig. 3 Relation between MFB 50% location and an ignition delay time at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

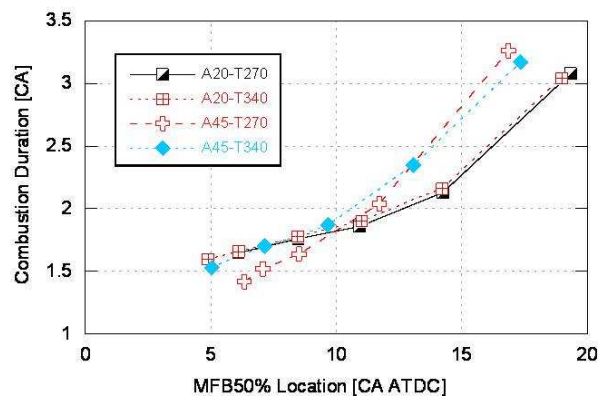


Fig. 4 Relation between MFB 50% location and a combustion duration(defined as MFB50% - MFB5%) at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

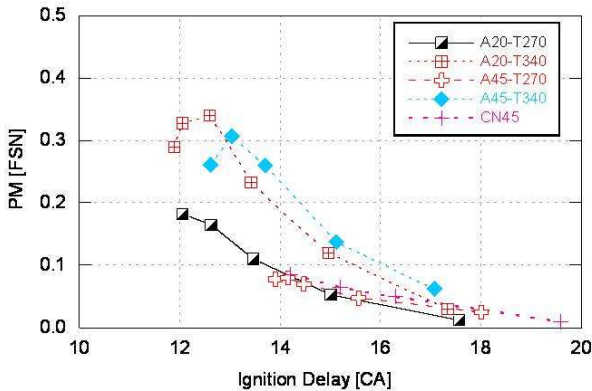


Fig. 5 PM emissions with regards to an ignition delay time at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

이를 보였다. 동일한 착화지연 기간에 대하여 T90 온도가 높은 A20-T340 과 A45-T340 연료의 PM 배출이 A20-T270 와 A45-T270 연료 보다 높았다. 즉, 높은 T90 온도에 의한 예혼합 정도의 상대적인 불리함에 의하여 PM 배출이 증가한 것으로 파악된다. A45-T340 이 A20-T340 이나 A20-T270 보다 착화지연 기간이 0.5~0.7 $^{\circ}$ CA 정도 길어서 예혼합 정도의 증가로 PM 이 감소가 예상되었으나 실험 결과는 이러한 차이에 의한 영향은 보이지 않았다.

모든 연료에 대하여 착화지연 기간이 약 13 $^{\circ}$ CA(1.44 ms) 보다 증가하면 PM 발생량 또한 단조적으로 저감되어 PM 발생의 차이가 크게 줄었고 착화지연 기간이 약 17 $^{\circ}$ CA(1.89 ms)에서는 거의 배출되지 않았다.

연소기간 및 MFB50% 위치에 따른 NO<sub>x</sub> 배출경향을 Fig. 6 및 Fig. 7 에 나타내었다. 모든 연료에 대하여 방향족 성분 및 T90 온도의 차이에 따른 뚜렷한 차이가 없었으며, 저온 연소 특성에 의한 낮은 NO<sub>x</sub> 배출을 확인하였다. 또한, 연소기간의 증가와 MFB50% 위치가 지각될수록 NO<sub>x</sub> 배출은 감소하였다. 저자의 저세탄가 CN30 에 대한 연구<sup>(15)</sup>에서는 방향족 성분의 증가에 따른 NO<sub>x</sub> 발생 증가가 발견되었으나 고세탄가 CN55 연료들의 실험에 있어서는 그렇지 않았다. 고세탄가 특성이 방향족 성분보다 NO<sub>x</sub> 생성에 미치는 영향이 지배적인 것으로 파악된다.

Fig. 8 과 Fig. 9 는 THC 배출 특성을 MFB50% 위치와 착화지연 기간에 대하여 각각 나타내었다. MFB50%의 위치에 따라서 각각의 연료에 따른 THC 배출 특성이 달랐으며 특히 A20-T270 과 A20-T340 의 배출은 동등 수준이며 다른 연료들에 비하여 낮았다. 그러나 Fig. 9 와 같이 THC 배출을 착화지연 기간에 대하여 분석한 결과는 연료에 관계없이 동일한 착화지연 기간에 대하여 동등 수준의 THC 배출 특성을 보였다.

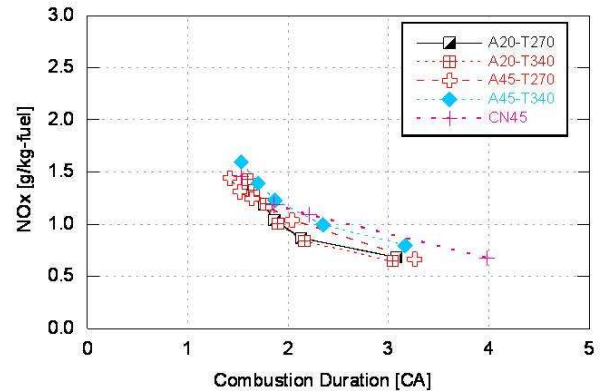


Fig. 6 NO<sub>x</sub> emissions with regards to a combustion duration (defined as MFB50% - MFB5%) at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

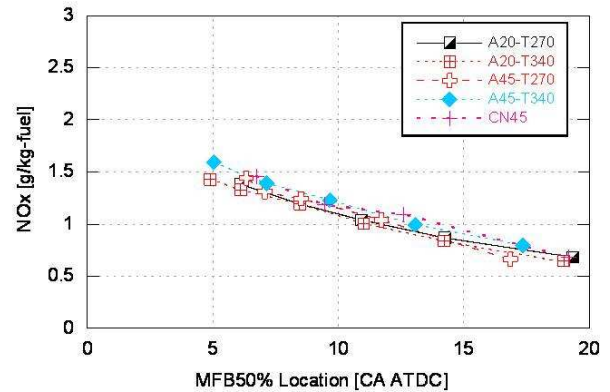


Fig. 7 NO<sub>x</sub> emissions with regards to MFB 50% location at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

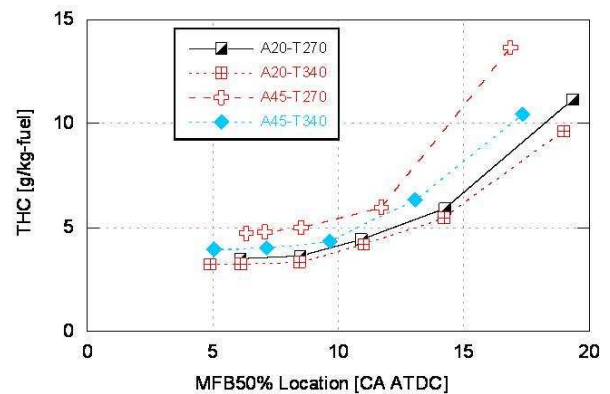


Fig. 8 THC emissions with regards to MFB50% location at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

이와 유사한 현상은 CO 배출 특성에서도 발견된다. MFB50% 위치에 따른 CO 배출을 보여주는 Fig. 10 과 착화지연 기간에 따른 CO 배출을 나타내는 Fig. 11 이 그것이다. 즉 MFB50%의 위치에 따라서 A20-T270 과 A20-T340 의 CO 배출은 동등 수준이며 다른 연료들에 비하여 낮았다. 그러나 동일한 착화지연 기간에 대하여 연료에 관계없이 동등 수준의 CO 배출 특성을 보였다.

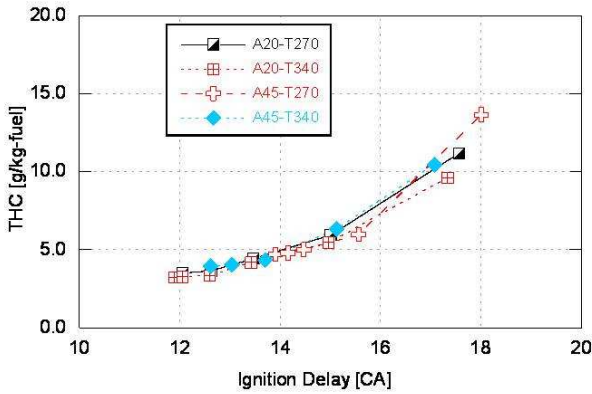


Fig. 9 THC emissions with regards to an ignition delay time at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

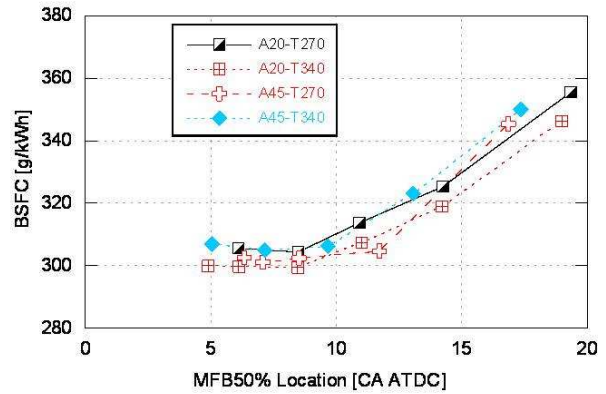


Fig. 12 BSFC with regards to MFB 50% location at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

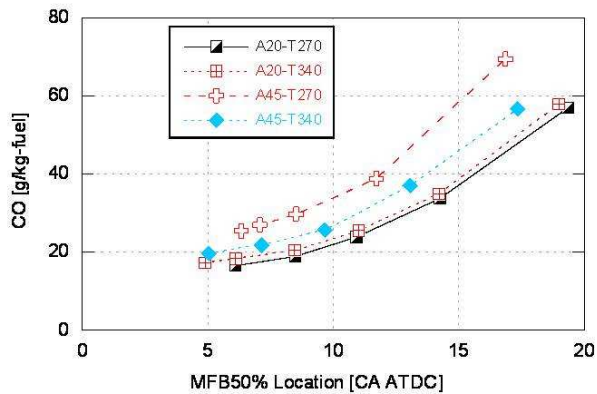


Fig. 10 THC emissions with regards to MFB50% location at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

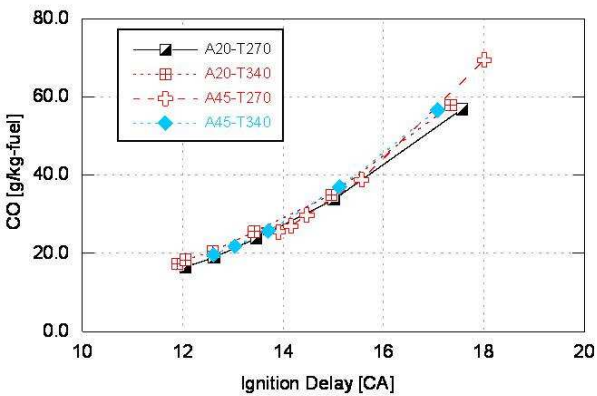


Fig. 11 CO emissions with regards to ignition delay time at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

착화지연 기간의 증가에 따라서 THC 및 CO 는 증가하였는데 이는 착화지연 기간의 증가에 의한 연료와 공기의 과혼합(over-mixing)이 증가하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 12 는 네 가지 연료에 대한 연료소모율인 BSFC 를 MFB50% 위치에 대하여 비교한 것이다. BSFC 는 동일한 MFB50% 위치에 대하여 연료에 관계없이 동등 수준의 결과를 보였다.

#### 4. 결론

본 연구는 1.9L 커먼레일 직접분사 디젤 엔진을 이용하여 1500rpm 2.6bar BMEP 조건에서 다량의 EGR (약 41%)을 적용한 저온디젤연소 영역에서 세탄가 55(고세탄가)에 대하여 방향족 성분과 T90 온도가 연소특성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 실험 조건에서 모든 연료에 대하여 착화지연 기간의 증가에 따른 PM 발생의 단조적 저감을 확인할 수 있었다. 또한 동일한 착화지연 기간에 대하여 방향족 성분보다 T90 온도에 따라 PM 발생의 차이가 커서 T90 온도가 높은 A20-T340 과 A45-T340 의 PM 배출이 A20-T270 와 A45-T270 보다 높았다. 모든 연료에 대하여 저온 연소 특성에 의한 낮은 NOx 배출을 확인하였고, 연료 조성의 차이에 관계없이 동일한 MFB50% 위치에서 NOx 발생은 동등 수준이었다. 저세탄가 연료(CN30) 연구<sup>(15)</sup>에서는 방향족 성분의 증가에 따른 NOx 발생 증가가 발견되었으나 본 실험인 고세탄가(CN55) 연료에서는 이러한 경향이 발견되지 않았다. 이는 고세탄가 특성이 방향족 성분보다 지배적인 영향을 미친 것으로 파악된다. 동일한 착화지연 기간에 대하여 연료에 관계없이 THC, CO 배출은 동등 수준이었으며 착화지연기간의 증가에 따라 모두 증가하였는데 이는 착화지연 기간 증가에 따른 과혼합 증가가 주 원인으로 판단된다. 또한 동일한 MFB50% 위치에 대하여 BSFC 는 연료에 관계없이 동등 수준이었다.

#### 참고문헌

- (1) Heywood, J. B., 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw Hill, New York.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Kitano, K., Nishiumi, R., Tsukasaki, Y., Tanaka, T. and Morinaga, M., 2003, "Effects of Fuel Properties on Premixed Charge Compression Ignition Combustion in a Direct Injection Diesel Engine," SAE paper No. 2003-01-1815.
- (11) 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.
- (12) Han, M., 2010, "Hydrocarbon Speciation in Low Temperature Diesel Combustion," *Transactions of the KSME B*, Vol. 34, No.4, pp.417~422.
- (13) Butts, R.T., Foster, D., Krieger, R. andrie, M., Ra, Y., 2010, "Investigation of the Effects of Cetane Number, Volatility, and Total Aromatic Content on Highly-Dilute Low Temperature Diesel Combustion," SAE Paper No. 2010-01-0337.
- (14) Bunting, B.G., Eaton, S.J. and Crawford, R.W., 2009. "Performance Evaluation and Optimization of Diesel Fuel Properties and Chemistry in an HCCI Engine," SAE Paper No. 2009-01-2645.
- (15) Han, M., 2010, "Effect of Aromatics and T90 Temperature for Low Cetane Number Fuels on Exhaust Emissions in Low Temperature Diesel Combustion," *Transactions of the KSME B*, Vol.34, No.12, pp.1121~1126.
- (16) Petersen, B. R., Ekoto, I. W., Miles, P. C., 2010, "An Investigation Into the Effects of Fuel Properties and Engine Load on UHC and CO Emissions From a Light-Duty Optical Diesel Engine Operating in a Partially Premixed Combustion Regime," *SAE Transactions - Journal of Engines*, Vol. 119, SAE Paper No. 2010-01-1470.