<학술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2012.36.7.759 ISSN 1226-4881

디젤 연소 전략에 따른 배기가스 및 탄화수소 종 분석

한 만 배*†
* 계명대학교 기계자동차공학과

Diesel Combustion Strategies Effect on Exhaust Emissions and Hydrocarbon Species

Manbae Han*†
* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.

(Received March 2, 2012 ; Revised April 5, 2012 ; Accepted April 5, 2012)

Key Words: Split Injection(분할 분사), Low-Temperature Diesel Combustion(저온디젤연소), Hydrocarbon Species (탄화수소 종), HC Speciation(착화지연)

초록: 1.7L 커먼레일 직접분사 디젤 엔진을 이용하여 1500rpm 3.9bar BMEP 조건에서 세가지 연소 전략에 따른 배기가스 배출 특성 및 탄화수소 종 분석을 수행하였다. 첫째 전략은 EGR 을 사용하지 않고 연료 분할 분사를 이용하는 방법(split injection), 둘째는 적절한 EGR 적용 및 단일 연료분사 방법(single-1) 이며 셋째는 다량의 EGR 및 레일 압력 증대 등을 통한 저온디젤연소(single-2)이다. 본 실험 조건으로부터 split injection 방법과 single-1 방법은 PM-NOx 상반 관계를 보였고, single-2 방법은 PM-NOx 상관관계에서 벗어나 PM 및 NOx 동시 저감이 가능하였다. 탄화수소 종 분석 결과, THC 배출 경향과 동일하게 탄소번호에 관계없이 split injection 이 가장 적은 배출을 보였고, single-1 그리고 single-2 의 순서로 많이 배출하였다. 메탄, 아세틸렌 및 CO 의 THC 에 대한 비율은 공연비가 농후해 짐에 따라서 증가하였고 이는 공연비가 농후에 따른 연소 영역에서 산소 농도 감소로 열해리가 증가하였기 때문이다.

Abstract: This study investigates the effect of diesel combustion strategies on exhaust emissions and hydrocarbon species emissions for a 1.7 L common rail direct injection diesel engine at 1500 rpm and 3.9 bar BMEP. The first strategy is a method to adopt no EGR with a split injection composed of pilot and main injection (split injection). The second is to adopt a moderate EGR rate with main injection only (single-1). The third is to use a high level of EGR and main injection with rail pressure increase, *i.e.* low-temperature diesel combustion (single-2). Split injection and single-1 showed a renowned phenomenon of a PM-NOx trade-off, whereas single-2 was observed of a PM-NOx trade-off to reduce PM and NOx simultaneously. HC speciation results show that the split injection produced the least amount of HC species, regardless of the carbon number bin, followed by single-1 and single-2. The ratios of methane, acetylene, and CO to THC increased as a combustion A/F ratio is richer due to reduced oxygen content in the vicinity of the combustion zone, thus enhancing pyrolysis.

1. 서 론

지구 온난화에 따른 이산화탄소(CO_2) 배출 저감과 석유 에너지에 대한 의존성을 줄이기 위하여 친환경 고효율 디젤 엔진 개발에 관한 연구가 활발하다. 일반적으로 전통적인 디젤 연소에서는 입자상 물질(particulate matter, PM)과 질소산화물(nitrogen oxides, NO_x)의 발생은 서로 상반 관계를 갖는 것으로 알려져 있다.[1] 즉, PM 을 줄이기 위하여 연료분사시기를 진각(advance)시키거나 배기가스 재순환(exhaust gas recirculation, EGR)을 감소시키면 NO_x 이 증가하거나, 혹은 NO_x 을 저감시키기 위하여 연료분사시기를 지각(retard)시키고 EGR 을 증가시키면 PM 이 증가한다.

최근에는 이러한 상반 관계를 벗어나 PM 및 NO_x 을 동시에 저감시키기 위하여 저온디젤연소

† Corresponding Author, mbhan2002@kmu.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

(low-temperature diesel combustion)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 즉, 다량의 EGR 과 고압 연료분사와 연료분사시기 제어를 통하여 착화지연(ignition delay) 기간을 늘려 연료와 공기의 예혼합(premixedness) 정도를 증가시키고, 연소 온도를 낮춰서 PM 과 NOx 배출을 동시에 줄인다.[2~6] 그러나, 저온디젤연소에서는 저온 연소로 인하여 탄화수소 (hydrocarbon, HC)와 일산화탄소 (carbon monoxide, CO)가 상대적으로 크게 증가하므로 배기가스 저감 장치 중의 하나인 산화촉매 (oxidation catalyst)의 적용이 요구된다.[6]

또한 커먼레일(common rail) 연료 분사 기술은 연료의 분할 분사(split injection)를 가능하게 한다. 이러한 연료 분할 분사 기법을 이용하여 배기가스 저감 및 연비 향상 관련 다양한 연구가 진행 중이다.[7~9] 파이럿 분사(pilot injection)를 통하여 예혼합 연소 기간(premixed combustion phase)을 줄이고, 급격한 열 발생(heat release)을 억제하여 NO_x 저감 효과가 있으나, PM 은 증가하는 것으로 알려져 있다. 그러나 분할 분사 영향뿐만 아니라 EGR 양, 연료분사 압력, 파이럿 분사와 주 분사(main injection) 시기의 차이, 과급 압력(boost pressure) 등을 비롯한 다양한 변수에 의하여 연소 및 배기가스에 미치는 영향은 복잡해지므로 최적화가 요구된다.

본 논문에서는 엔진 운전 영역은 1500rpm 3.9 bar BMEP 조건(전 부하 대비 약 30% 수준의 부분부하) 에서 세가지 연소 전략에 따른 배기가스 배출 특성 및 탄화수소 종을 비교 분석하였다. 첫째 연소 전략은 파이럿 및 주 분사를 조합한 분할 분사 방법으로 EGR 을 공급하지 않았다. 둘째는 주 분사만을 이용하였으며, EGR 을 33% 공급하였다. 셋째는 주 분사만을 사용하고, 레일압력을 1000bar 까지 증가시키고, EGR 을 45% 공급하여 저온디젤 연소를 이루었다. 이러한 세가지 연소 전략을 통하여 배기가스 특성 및 탄화수소 종을 비교 분석하여, 디젤산화촉매 개발에 필요한 기본 자료로 사용될 것이다.

2. 실험 방법

본 실험을 위하여 General Motor 사의 1.7L DOHC 커먼레일 직접 분사 엔진을 이용하였다. 직렬 4 기통으로 압축비는 16:1 이며 인젝터 노즐 수는 6 개이고, 분무각은 150 도이다. 피스톤은 보울인(bowl-in) 형상이며, 가변 형상 터보 과급기(variable geometry turbo-charger)와 흡기 스로틀 밸브(intake throttle valve)를 이용하여 EGR 량을 제어하였다. 보다 상세한 엔진 구성은 Fig. 1 과 Table 1 에 나타내었다.

사용한 연료는 초저유황 스웨덴 디젤 연료이며 세탄가 52, 황 성분은 12ppm 이다. 연료 조성은 체적기준 95% 정도가 포화 탄화수소 (saturated HC) 이며, 방향족 탄화수소는 3% 정도이다. 상세한 연료 조성치는 Table 2 에 나타내었다.

배기매니폴드 끝 단에서 약 20cm 떨어진 위치에서 AVL 사의 415S 장비를 이용하여 매연(smoke)을 측정하였다. 본 논문에서는 이렇게 측정된 매연을 PM 으로 명명하였다. 터보과급기에서 약 1m 정도 떨어진 위치에서 매연필터를 통과한 배기가스의 THC, CO, NO_x, CO_2, O_2 농도를 일반 배기가스 측정 장비를 이용하여 측정하였으며 실험 오차는 5% 이내였다. 배기가스 분석을 위한 모든 샘플라인(sampling line)은 190°C 로 유지하여 탄화수소

Table 1 Engine specifications.

Number of cylinders	4
Displacement volume (L)	1.7
Bore (mm)	79
Stroke (mm)	86
Compression ratio	16:1
Piston geometry	bowl-in piston
Valves/cylinders	4
Injection system	Common rail direct injection
Injector	6-hole, 150°
Injector location	centrally mounted

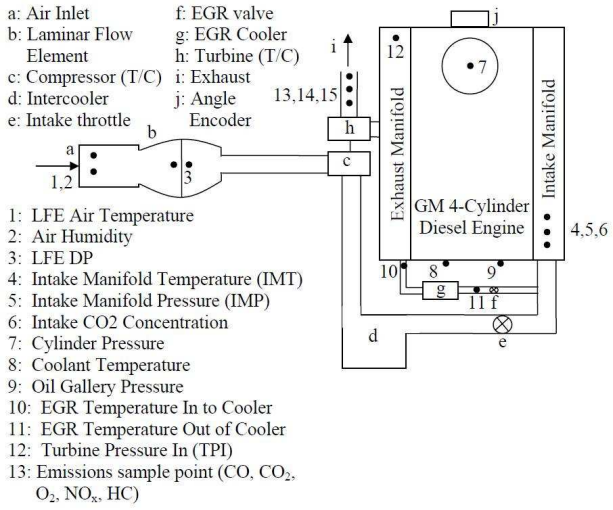

Fig. 1 Experimental set-up for an engine and exhaust emissions

Table 2 Fuel specifications

Sulfur (ppm wt.)	12
Cetane number (-)	52
T10 / T50 / T90 (°C)	201 224 268
Molecular C:H:O ratios	$C_1H_{1.966}O_{0.000}$
Fuel composition, sat. / olefins / arom. (% vol.)	95.4 1.3 3.3

Table 3 Engine operating parameters

Injection type		Split injection	Single injection-1	Single injection-2
Speed (rpm)		1500	1500	1500
BMEP (bar)		3.94	3.94	3.89
Inj. Timing (°CA BTDC)	Pilot	11	n/a	n/a
	main	0.4	5.0	15.0
Fuel quantity (mg/stroke)		0.8/10.0	11.2	11.3
Rail pressure (bar)		600	300	1000
EGR (%)		0	33	45
Combustion A/F ratio (-)		44.3	28.7	16.2
Intake manifold pressure (bar)		1.13	1.05	0.93

및 물의 응축을 최소화 하였다. EGR 은 흡기관과 배기관에서 측정된 CO_2 농도의 비로부터 계산하였다.

또한 탄화수소 종 분석을 위하여 매연필터를 통과한 일부의 배기가스를 샘플카트(sample cart)에 통과시켜 탄화수소를 채집하였다. 샘플카트에서 사용된 탄화수소 저장 장치는 테들라 백(Tedlar bag)과 테넥스 트랩(Tenax trap)으로 구성된다. 테들라 백을 이용하여 탄소 번호 8 보다 작은 탄화수소를 채집할 수 있었으며, 테넥스 트랩을 이용하여 탄소 번호 8 보다 큰 탄화수소를 채집할 수 있었다. 탄화수소 종 분석은 두 개의 가스 크로마토그래프(gas chromatograph, GC)와 불꽃 이온화 검출기(flame ionization detector, FID)를 사용하여 각각 테들라 백 및 테넥스 트랩에서 채집된 탄화수소를 분석하였다. 보다 상세한 탄화수소 종 분석법은 참고문헌 (10)을 참고하기 바란다.

본 실험에서 엔진 운전 영역은 1500rpm 3.9 bar BMEP 으로 전 부하 대비 약 30% 수준의 부분 부하 조건이다. 이를 위하여 세가지 연소 전략 도입하여 각각의 연소조건에 대하여 최적화하였다. Table 3 에서와 같이 첫째 연소 전략(split injection)은 파이럿 및 주 분사를 조합하였으며 EGR 은 공급하지 않았다. 둘째 연소 전략(single injection-1, 이하 single-1)은 주 분사만을 이용하였으며 EGR 33%를 적용하였다. 이를 통하여 전통적인 디젤 연소 방식에서 PM 저감을 이룬다. 셋째 연소 전략(single injection-2, 이하 single-2)는 주 분사만을 사용하고, 레일압력을 1000bar 까지 증가시키고, 전통적인 디젤 연소 방식에서 채택하는 EGR 보다 더 높은 EGR 을 45% 공급하여 착화지연을 증대하여 예혼합을 증가시키고 저온 연소를 이루는 저온디젤연소 전략이다. 보다 상세한 실험 조건은 Table 3 에 정리하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 배기가스 특성 비교

1500 rpm 3.9 bar 조건에 대하여 세가지 연소 전략에 따른 배기가스 배출 특성을 비교하였다. Fig. 2 에서 split injection 과 single-1 의 PM 및 NOx 는 서로 상반된 결과를 얻어 Split injection 의 경우 PM 은 저감되고 NOx 는 증가하였다. 이와 비교하여 single-2 는 PM 및 NOx 모두 최소의 결과를 보였다. 즉, 본 실험 조건에서 split injection 과 single-1 전략은 PM-NOx 상반관계를 갖는 전통 디젤 연소 특성을 보이며, single-2 전략은 이에서 벗어난 동시에 PM 및 NOx 저감되었다.

그 외의 THC, CO 배출 특성은 split injection 방법에서 최소로 배출되었고, 이어서 single-1 이었으며 single-2 방법이 최대의 배출을 보였다. 연료 소모량(brake specific fuel consumption, BSFC) 또한 THC, CO 배출 특성과 동일한 순서로, split injection 이 최소의 연료 소모를 single-1, single-2 가 각각 그 뒤를 이었다. 저온디젤연소에 의한 상대적으로 높은 THC, CO 배출 특성이 single-2 연소기법에서 나타났다. 다음에서 각각의 연소기법에 따른 탄화수소 종 분석을 통하여 THC 거동을 보다 상세하게 다룬다.

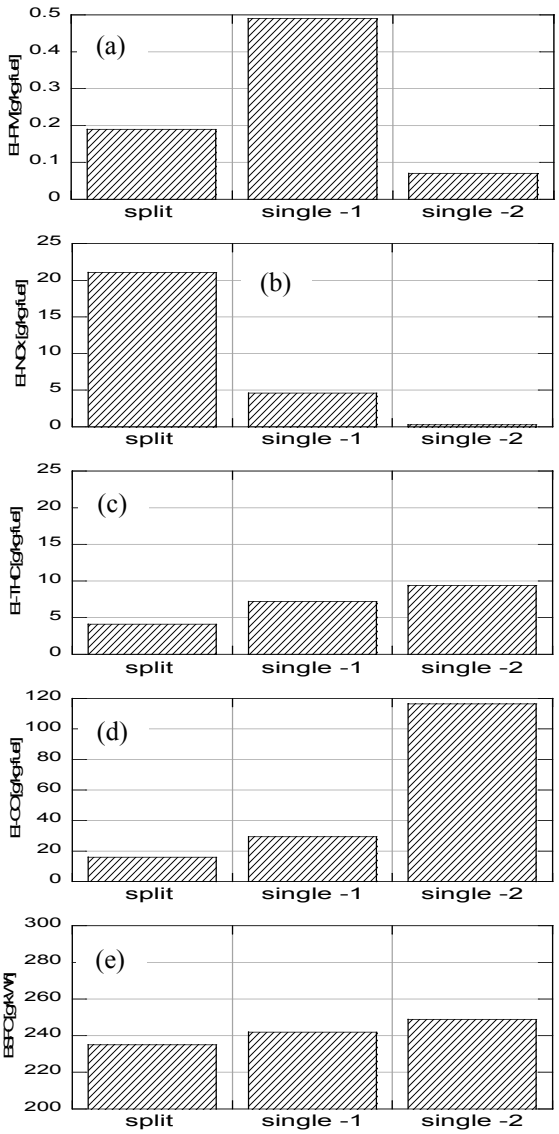

Fig. 1 (a) EI-PM, (b) EI-NOx, (c) EI-THC, (d) EI-CO, and (e) BSFC for three combustion strategies at 1500rpm 3.9 bar BMEP

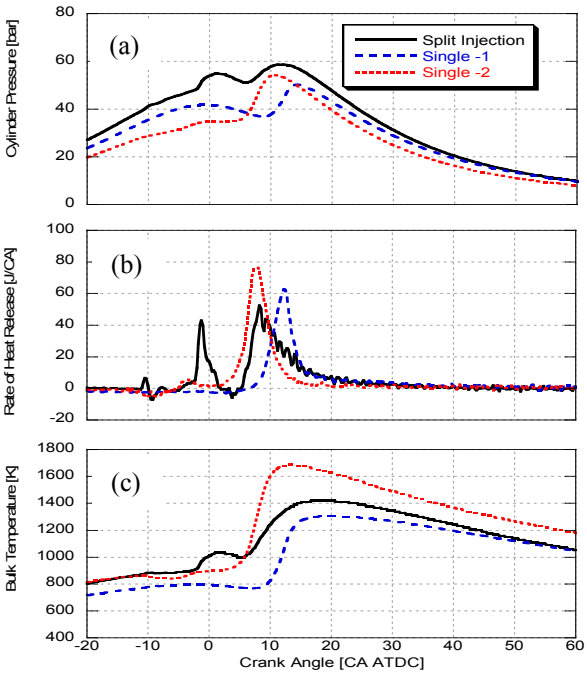

Fig. 2 (a) Cylinder pressures, (b) rate of heat release, and (c) bulk temperature for three combustion strategies at 1500rpm 3.9 bar BMEP

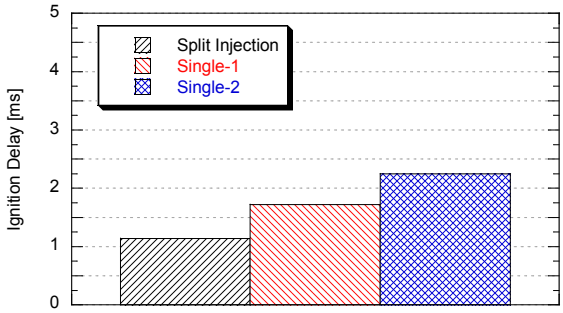

Fig. 4 Comparison of the ignition delay for three combustion strategies at 1500rpm 3.9 bar BMEP

실린더 압력 해석을 통한 열 방출 특성 및 실린더 체적 가스(bulk gas) 온도변화를 Fig. 3 에 나타내었다. 또한 착화지연은 질량연소율 (mass fraction burned) 10%와 연료분사시기(start of injection)의 차이로 규정하였으며 Fig. 4 에 나타내었다. 착화지연 기간은 split injection 이 가장 짧았으며 single-1, single-2 의 순서로 길었다. NOx 배출이 가장 높고, THC 와 CO 배출이 가장 낮은 split injection 의 경우 실린더 가스의 온도가 가장 높을 것으로 예상되었지만 그러한 경향은 나타나지 않았다. 이러한 배기배출 특성은 EGR, 연료분사시기, 연료분사압력 및 연료분사 방법 등의 차이에 의하여 연료와 공기의 혼합도 및 조성의 차이, 착화지연, 연소위상 변화 등에 영향을 주어 복잡한 특성을 나타낸다. 특히, single-2 전략의 경우 45% EGR 적용 및 레일 압력 증대 등을 통하여 착화지연 기간이 가장 길었으며 이를 통하여 예혼합의 증대 및 저온연소로 인하여 THC 및 CO 배출이 가장 큰 것으로 파악된다.

3.2 탄화수소 종 배출 특성 비교

세가지 연소 전략에 대하여 탄화수소 배출 특성을 보다 상세히 분석하기 위하여 GC-FID 를 이용하여 탄화수소 종 분석을 실시하였다.

Fig. 5 는 탄소번호에 따른 각각의 연소 전략에 따른 탄화수소 농도의 분포를 나타낸다. 전체적으

로 탄소번호에 관계없이 THC 배출 경향과 동일한 순서로 split injection 이 가장 적게 배출되었고, single-1 과 single-2 의 순서로 많이 배출되었다. 이렇게 분석된 탄화수소를 사용한 연료의 탄화수소 성분과 비교하여 발견되지 않은 탄화수소를 본 논문에서 partially burned HC 라 이름하였고, 그 외에 연료에서도 발견되는 탄화수소를 unburned HC 라 칭하였다.

Fig. 6 는 THC 에 대한 이러한 partially burned HC 와 unburned HC 의 상대적인 비율을 나타낸다. 세가지 연소 전략 중에서 THC 배출은 split injection 이 가장 낮았으나 unburned HC 의 비율은 약 80%로 가장 높았다. 즉, split injection 에 의한 탄화수소의 대부분은 연소에 참여하지 않은 연료 성분임을 알 수 있다. 다른 single-1 과 single-2 의 경우 THC 배출량은 다르지만 partially burned HC 와 unburned HC 의 비율은 실험 오차 범위 내에서 유사하였다.

Fig. 7~Fig. 9 은 각각의 연소 전략에 따른 탄화수소 종 농도를 상세하게 비교하였다. Fig. 7 은 아세틸렌(acetylene) 및 알켄(alkene) 계열의 주요 탄화수소 종들(ethane, propene, 1-butene, 1,3-butadiene, 1-pentene)을 비교하였다.

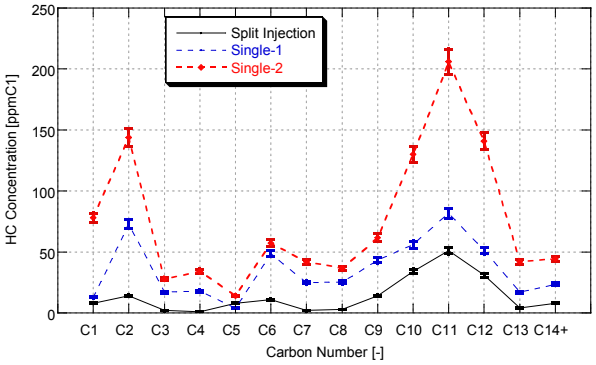

Fig. 5 Comparison of engine-out HC distribution by the carbon number bin

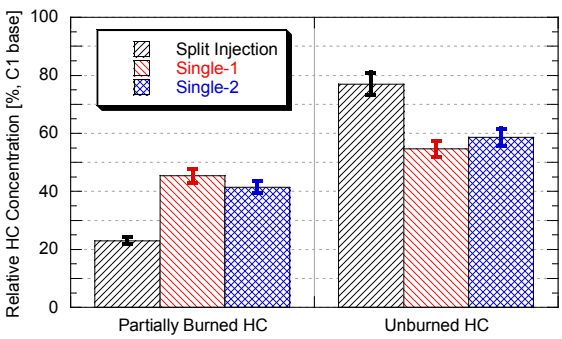

Fig. 6 Relative HC compositions grouped into partially burned HC and unburned HC

Fig. 8 은 방향족(aromatics) 성분 중에서 벤젠(benzene)과 톨루엔(toluene)을 비교하였다. Fig. 9 은 메탄(methane)과 그 외의 주요 노멀 알케인(n-alkane) 계열의 탄화수소 종을 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 split injection 의 경우 모든 탄화수소 종의 농도가 가장 낮았고, single-1, single-2 의 순서로 증가하였다. 이는 THC 배출 경향과 동일한 결과였다.

Fig. 10 은 메탄과 CO 의 THC 에 대한 비를 세 가지 연소 전략에 해당하는 공연비(air to fuel ratio) 따라서 나타내었다. 공연비가 농후해질수록

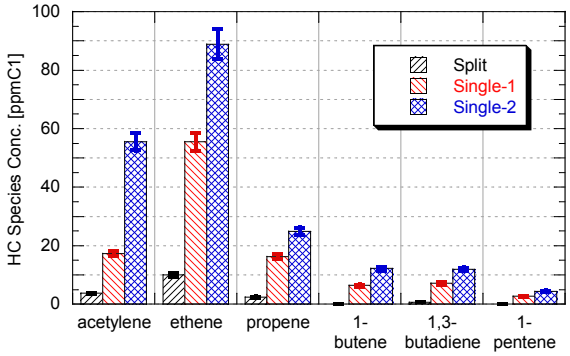

Fig. 7 Comparison of acetylene and several alkenes concentrations

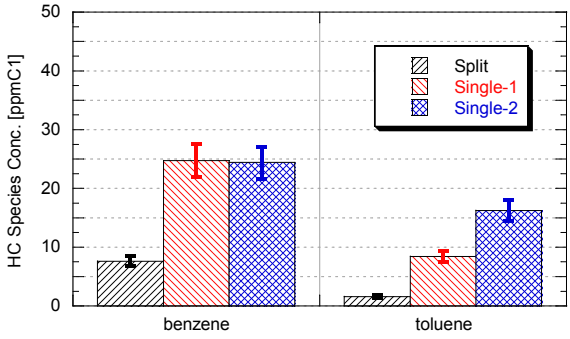

Fig. 8 Comparison of benzene and toluene concentrations

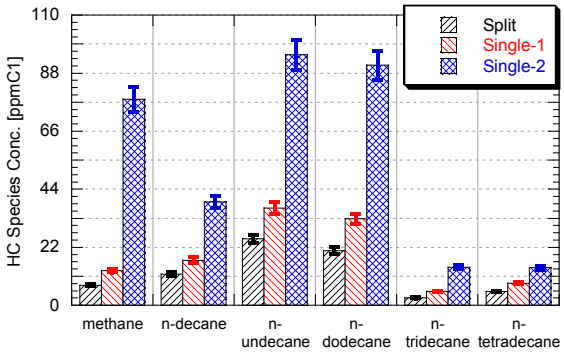

Fig. 9 Comparison of methane and several n-alkanes concentrations

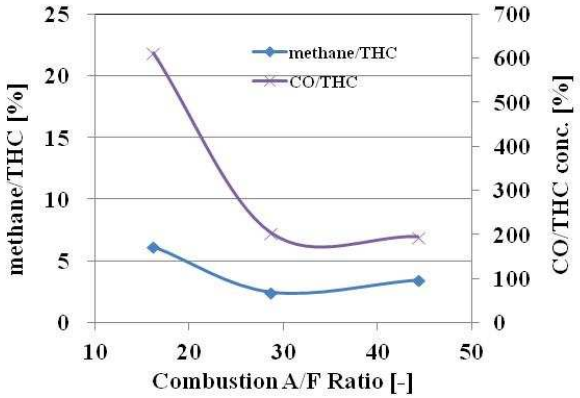

Fig. 10 Comparison of the ratios of methane to THC and CO to THC w.r.t. a combustion A/F ratio

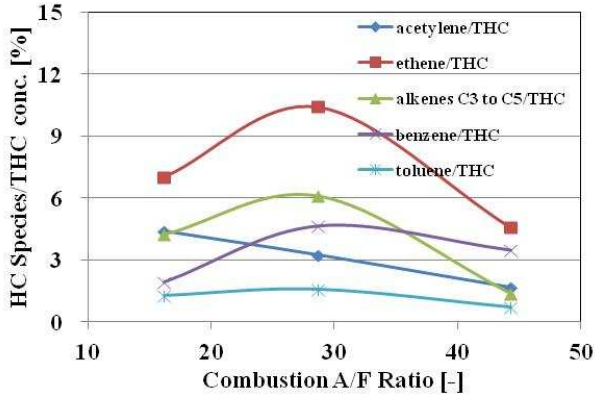

Fig. 11 Comparison of the ratios of acetylene, ethane, small alkenes, benzene and toluene to THC w.r.t. a combustion A/F ratio

그 비율의 증가가 급격해짐을 알 수 있다.

Fig. 11 은 아세틸렌을 비롯한 작은 사슬(small chain) 알켄 (propene, 1-butene, 1,3-butadiene, 1-pentene 의 합) 및 방향족 성분인 벤젠과 톨루엔의 THC 에 대한 비율을 공연비에 대하여 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 아세틸렌은 공연비의 농후에 따라서 그 비율이 증가하였다. 그러나 이를 제외한 나머지는 탄화수소 종들은 종 모양(bell shape)의 분포를 보여 공연비에 따른 일정한 경향을 보이지 않는다.

Fig. 10 과 Fig. 11 로부터 연소 후기 생성물로 알려진 메탄, 아세틸렌 및 CO 는 공연비가 농후해짐에 따라서 증가하는 경향을 보였고 특히 CO 의 상대적 증가가 컸다. 이는 공연비가 농후함에 따라서 연소 영역에서 연소에 참여하는 산소 농도가 줄어서 열해리(pyrolysis) 발생 증가로 메탄, 아세틸렌, CO 와 같은 연소 후기 생성물들의 비율이 증가한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 1.7L 커먼레일 직접분사 디젤 엔진을 이용하여 1500rpm 3.9bar BMEP 조건에서 세가지 연소 전략에 따른 배기가스 배출 특성 및 GC-FID 을 이용하여 탄화수소 종 분석을 수행하였다. 이로부터 다음의 결론을 얻었다.

- Split injection 과 주 분사만을 이용하고 EGR 을 33% 공급한 single-1 은 PM-NOx 상반 관계를 보였다. 주 분사만을 사용하고, 레일압력을 1000bar 까지 증가시키고, EGR 을 45% 공급하여 착화지연을 증대하여 예혼합을 증가시킨 Single-2 방법은 이러한 PM-NOx 상관관계에서 벗어나 PM 및 NOx 동시 저감이 가능하였다.

- 탄화수소 종 분석 결과, THC 배출 경향과 동일하게 탄소번호에 관계없이 split injection 이 가장 적은 배출을 보였고, single-1 그리고 single-2 가 가장 많이 배출하였다.

- 메탄, 아세틸렌 및 CO 의 THC 에 대한 비율은 공연비가 농후해 짐에 따라서 증가하였고 이는 공연비가 농후에 따른 연소 영역에서 산소 농도가 감소로 열해리가 증가하였기 때문으로 판단된다.

참고문헌

(1) Heywood, J. B., 1988, “Internal Combustion Engines Fundamentals,” McGraw-Hill

(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) Gill, K., Marriner, C., Sison, K. and Zhao, H., 2005, "In-Cylinder Studies of Multiple Diesel Fuel Injection in a Single Cylinder Optical Engine," SAE paper No. 2005-01-0915.
(8) Abdullah, N., Mamat, R., Rounce, P., Tsolakis, A., Wyszynski, M. and Xu, H., "Effect of Injection Pressure with Split Injection in a V6 Diesel Engine," 2009, SAE paper No. 2009-24-0049
(9) Jung, D., Jeong, J., Lim, O., Pyo, Y., Lee, Y. and Iida, N., 2011, "Influence of Pilot Injection on Combustion Characteristics and Emissions in a DI Diesel Engine Fueled with Diesel and DME," SAE paper No. 2011-01-1958.
(10) Han, M., 2010, "Hydrocarbon Speciation in Low Temperature Diesel Combustion," *Transactions of the KSME B*, Vol. 34, No.4, pp.417~422.