

이종연료 층상분사를 적용한 디젤엔진에서 광 계측을 이용한 연소해석

An Combustion Diagnosis Using Optical Measurement in D. I Diesel Engine with Dual Fuel Stratified Injection System

안현찬* · 강병무** · 염정국*** · 정성식**** · 하종률*****

H. C. An, B. M. Kang, J. K. Yeom, S. S. Chung, J. Y. Ha

Abstract

In previous study, diesel-methanol stratified injection system is manufactured and applied to a D.I. diesel engine in order to realize combustion improvement using methanol, which is oxygenated fuel with large latent heat. We know that NOx and soot is reduced by stratified injection of diesel fuel-methanol.

Therefore, in the present study, combustion diagnosis using optical measurement is tried to make clear effect of methanol on simultaneous reduction of NOx and soot.

Two-color method is used to measure flame temperature and KL value, which is approximately proportional to the soot concentration along the optical path. Laser induced scattering method was used to measure distribution of soot at two dimensional area. Also, it is compared exhaust characteristics of NOx and soot with results of optical measurement.

주요기술용어(Key Words): Dual Fuel, Stratified Injection, NOx, Soot, Two-Color Method, Laser Induced Scattering(LIS)

1. 서 론

디젤엔진에서 배출되는 주된 유해 배출가스인 NOx와 soot는 상호보상관계(trade off)에 있기 때문에 NOx를 저감하는 기술의 적용은 soot의 증가를 초래하게 되어 연소과정에서 두 물질의 생성을 동시저감 하는 데에는 많은 어려움이 있다.¹⁾

이와 관련하여 디젤엔진에서 연소개선을 통해 NOx와 PM을 저감하기 위해 다방면으로 연구가 진행되어 왔고 최근에는 기존의 디젤엔진에 대체 연료로서 합산소 연료를 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

합산소 연료 또는 물을 디젤엔진에 적용하는 방법에는 합산소 연료만을 이용하여 자기착화 또는 강제 점화를 시키는 단일연료 이용법, 경유와 합산소 연료 또는 물을 함께 이용하는 이종연료 이용법²⁾이 있고 선행 연구자들은 이러한 다양한 방법을 적용한 NOx와 PM의 저감 효과에 대해 보고하였다.^{3)~6)}

최근 저자⁷⁾ 등은 경유와 메탄올을 하나의 인젝터를 통해 층상으로 분사할 수 있는 층상분사 시스템을 디젤엔진에 적용하여 NOx와 soot의 동시저감을 확인할 수 있었고 메탄올의 증발잠열과 연소축진 현상에 의한 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 메탄올 공급에 의한 증발잠열 효과와 연소축진 현상을 보다 명확히 밝히기 위하여 광 계측을 이용하여 연소해석을 행하였다.

이색법(two-color method)을 이용하여 층상분사 시 연소실 내 국소 영역의 화염 온도와 soot 농도

* 동아대학교 기계공학과 대학원
** 창원전문대학 자동차과
*** 신라대학교 자동차과
**** 동아대학교 기계공학과

에 정성적으로 비례하는 KL치를 실시간으로 측정하고, 레이저 여기 산란법을 적용하여 연소실 내 soot 농도를 2차원적으로 가시화 하였고 이색법 측정결과와 레이저 여기 산란법 측정결과를 배기 배출농도 결과와 비교·분석하여 경유-메탄을 층상분사가 NOx와 soot의 생성에 미치는 영향을 밝혔다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 층상분사 시스템

Fig.1에 층상분사장치의 개념도를 나타낸다.

경유/메탄올이 층상 분사된 후 인젝터에는 경유만이 잔류하게 되고 이 후 메탄올 펌프에 의해서 인젝터 내부로 메탄올이 공급되면 인젝터 내부의 메탄올 공급위치에서부터 위쪽에 존재하는 경유를 경유 분사펌프의 정압식 딜리버리 밸브를 통해 밀어내어 경유/메탄올이 층상으로 인젝터 내부에 존재하게 된다.

이 후 경유 분사펌프에 의해 인젝터 내부에서 층상으로 있는 경유/메탄올을 분사하게 된다. 매 사이클마다 확실한 층상분사를 위해서는 인젝터 내부로 공급된 메탄올을 모두 분사해야만하기 때문에 경유 분사 펌프에서 공급되는 경유량을 메탄올 공급위치에서부터 아래쪽의 경유량과 공급된 메탄올양 보다 다소 많이 공급하여 경유/메탄올/경유 순서로 분사하였다.

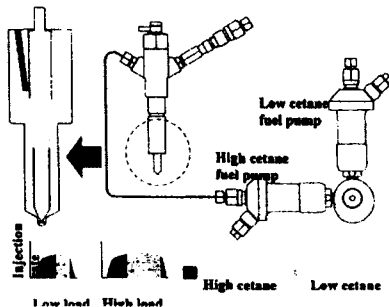


Fig.1 Schematic of stratified injection system

2.1.2 이색법 측정 시스템

이색법의 원리는 휘염 내의 soot에서 방사되는 두 파장의 복사광을 검출하여 화염온도 및 soot의 농도에 정성적으로 비례하는 KL치를 구하는 방법이다. 실제 기관에서의 화염은 비축체이며 이 때의 단색복사휘도 $E_\lambda(T)$ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_\lambda(T) = \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \\ = C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T_a) \text{ -----(1)}$$

C_1 과 C_2 는 프랑크 상수이며 T 는 진온도, T_a 는 파장 λ 에서 휘도 온도, ϵ_λ 는 화염의 단색 방사율이다.

디젤화염에서 soot 입자만의 단색 방사율은 Hottel-Broughton⁸⁾에 의해서 (2)식으로 표현된다.

$$\epsilon_\lambda = 1 - \exp(-KL/\lambda^\alpha) \text{ -----(2)}$$

α 는 가시역의 경우 1.38로 정해진 상수이며 K 는 흡수계수 L 은 측정광 축 방향의 화염두께이므로 KL 은 화염중의 soot 미립자 농도에 비례하는 값이다. 식(1)을 식(2)에 대입하고 KL 에 대해 정리하면 식(3)과 같이 된다.

$$KL = -\lambda^\alpha \ln[1 - \exp(\frac{C_2}{\lambda} (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}))] \text{ -----(3)}$$

여기서 KL 은 파장에 관계없이 일정하므로 서로 다른 두 파장에 대해 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_1^\alpha \ln[1 - \exp(\frac{C_2}{\lambda_1} (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{s,1}}))] \\ = \lambda_2^\alpha \ln[1 - \exp(\frac{C_2}{\lambda_2} (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{s,2}}))] \text{ -----(4)}$$

식(4)에서 이색법을 통해 측정된 온도 값과 두 파장 값을 대입하면 화염의 진 온도를 구할 수 있고 식(3)에 대입하면 KL 치 까지도 구할 수 있다. 본 연구에 선택된 파장은 가시광선영역인 550, 755nm이며 이 파장에서는 온도에 대한 단색 복사광 강도의 변화가 커서 측정온도의 오차를 줄일 수 있다.⁹⁾

Fig. 2는 이색법 계측 시스템의 개략도를 나타낸다. 연소실 내의 화염으로부터 복사광을 채취하기 위해 실린더 헤드에 광 프로브(optical probe)를 설치하였다.

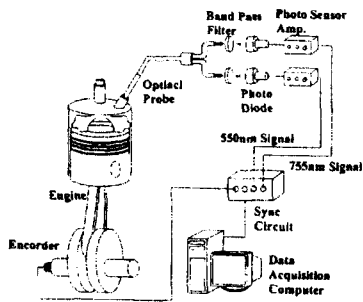


Fig. 2 Schematic for two color method system

2.1.3 LIS광 계측 시스템

연소실 내 soot의 LIS 광을 계측하기 위한 시스템은 가시화 엔진, 레이저 광 계측 시스템, 제어부로 구성되며 LIS 계측 시스템의 개략도를 Fig. 3에 나타낸다.

본 연구에서는 Nd:YAG 펄스 레이저(Continuum, Surelite I-10)를 광원으로 사용하였고 제2고조파인 532 nm의 파장의 레이저 빔을 실린더형 렌즈 어셈블리를 거쳐 두께 0.25 mm 폭 40 mm의 시트 빔으로 만들어지고 전 반사 거울을 통해 연소실 내부로 조사된다. 또한 soot에 의해 산란되는 광 신호를 채취하기 위해 중심 파장이 532 nm이고 반치폭이 3 nm인 밴드 패스 필터를 사용하였다. 연소실 내의 soot에 의해 산란된 광 신호는 최저 노출 시간이 10ns인 ICCD 카메라(V-TEK, single frame camera)를 사용하여 채취되었다.

Fig. 4는 가시화 창 위치를 나타내는 개략도이다. 가시화 창의 실린더 헤드상의 위치는 분무 중인 줄기를 관찰할 수 있도록 하였고 가시화 창은 직경 23 mm의 원형으로 전체 피스톤 헤드면적의 약 6%이다.

Table 1은 사용된 엔진 사양을 나타내고 있다.

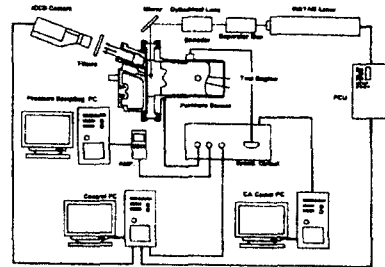


Fig. 3 Schematic diagram of LIS measurement system

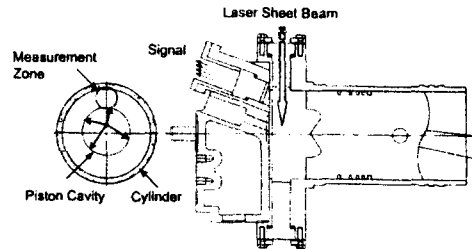


Fig. 4 Schematic diagram of measurement zone

Table 1. Test engine specification

Description	Conventional Engine	Visualized Engine
Engine Type	Single cylinder, 4Cycle D. I. Diesel Engine	←
Bore×Stroke	92×95 mm	←
Compression Ratio	19	17.2
Injection Pressure	21 MPa	←
Piston Length	90 mm	126

2.2 실험방법

Table 2 에 연소실험의 조건을 나타낸다.

동일 출력조건에서 충상 분사에 의한 연소특성을 비교하기 위해 각 연료 조건에서 엔진회전수 1000rpm, 토크를 29.4N·m로 일정하게 유지하도록 위해 연료 분사량을 증감시켰다.

충상분사에 사용된 메탄올은 99.99%의 메탄올과 메탄올에 증류수를 체적비로 2:1, 1:1, 1:2로

혼합하여 66, 50, 33 vol% 농도의 메탄올을 제작하여 사용하였다. 이후 "D"는 경유만을 사용한 경우, "DM100"은 경유와 99.99% 메탄올을 충상 분사한 경우이고 "DM66", "DM50", "DM33"은 각각 66, 50, 33 vol%의 메탄올을 경유와 충상 분사한 경우로 표현하였다.

Table 2. Experimental conditions

Description	Condition
Engine speed	1000 rpm
Torque	29.4 N · m
Used Fuel	- Diesel - Methanol : (99.99, 66, 50, 33 vol%)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 이색법 계측 결과

Fig. 5는 경유만을 연소한 경우와 100%, 33% 메탄올을 충상 분사한 경우에 이색법을 통해 계측된 화염온도 및 KL치를 연소압력, 열발생률 결과와 같이 나타낸 것이다.

이색법 계측결과를 연소압력 결과와 비교해보면 경우만을 연소시켰을 때 TDC부터 ATDC 10° 사이에 예혼합 연소가 이루어지고 이때 화염온도의 최대값이 2100K을 나타낸다. 예혼합 연소시 급격하게 상승하는 화염온도는 ATDC 20°~30. 정도에서 감소하였다가 이후 다시 1900K까지 상승하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 연소실 내부의 스웰 유동에 의해 화염의 주류가 이동하기 때문에 나타난 현상으로써 연소실 전 영역의 화염온도가 아니라 이색법 광 프로브의 광 경로 상에서 계측된 값이기 때문이다. Soot의 농도값에 정성적으로 비례하는 KL치의 결과는 예혼합 연소시 화염온도가 급격히 상승함에 따라 KL치는 급격히 증가하고 이후 확산연소기간을 거쳐 KL치는 서서히 감소하지만 연소종료까지 높은 값을 나타낸다.

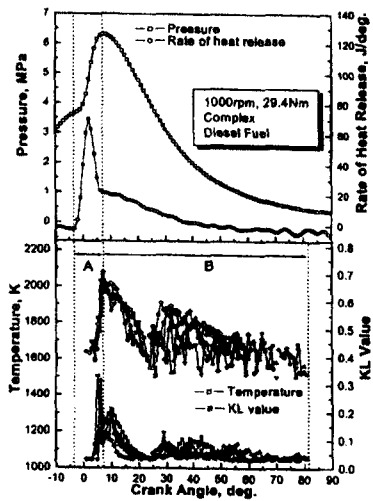
이러한 결과는 연소실 체적이 좁은 공간에서 급격한 화염온도의 상승은 국부적으로 고온 과농영역을 형성하여 soot의 다량 생성을 초래하게 되고 팽창 행정시 연소실 체적이 증가하면서 확산과 역 스퀴시 유동에 의해 산소와 만나 산화되

는 현상을 나타내는 것으로 생각된다. 또한 예혼합 연소시 높은 화염온도에 기인하여 NOx의 배출 농도를 증가할 것으로 생각된다.

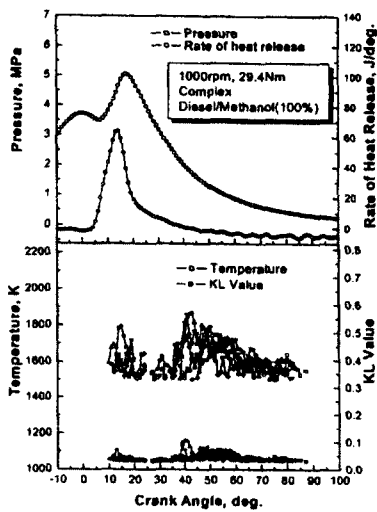
99.99% 메탄올을 충상 분사한 DM100의 경우에도 역시 약 ATDC 10°~20° 기간에서의 예혼합 연소기간 동안 화염온도가 상승하지만 최대 1800K 정도에 불과하고 메탄올 농도가 낮아질수록 최대 화염온도는 감소하고 있으며 33% 메탄올 충상 분사의 경우에는 약 1600K 정도의 값을 보인다. 이후 나타나는 화염온도의 변화는 경유만을 연소한 경우처럼 ATDC 20°~30° 부근에서 감소하였다가 다시 증가하는 현상을 보인다. 메탄올을 충상 분사한 경우에 화염온도 계측 결과의 특징은 예혼합 연소시 발생하는 화염온도보다 확산 연소기간에서 나타나는 화염온도가 상대적으로 높은 값을 보인다. KL치 역시 화염온도와 유사한 경향을 보이는데 메탄올 33%의 경우에는 초기의 KL치 값이 거의 나타나지 않고 있다. 이러한 화염온도의 저하는 공급된 메탄올의 증발잠열에 기인한 것이고 예혼합 연소시 급격한 압력 상승의 억제 가능했기 때문이라 생각되며 확산 연소시 화염온도 값이 상대적으로 높게 나타나는 것은 메탄올 이후에 분사된 경유의 확산연소에 의한 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 메탄올 충상 분사의 경우 예혼합 연소시의 급격한 화염온도의 상승이 없고 화염 최고 온도도 낮게 발생한다는 것을 알 수 있다. 예혼합 연소시 화염온도의 저하는 soot의 생성에도 영향을 미치므로 메탄올을 충상 분사한 경우에 예혼합 연소시 KL치가 감소하였고 확산연소기간에서는 메탄올 이후에 분사된 경유가 연소되지만 발생한 KL치 역시 낮은 것을 알 수 있다. 확산연소기간에서의 KL치 감소는 확산 연소량의 감소와 메탄올의 의한 연소촉진 효과 때문으로 고려된다.

Fig. 6은 충상 분사시 공급된 메탄올의 농도에 따른 평균 화염온도와 KL치를 NOx, soot의 배출 농도 값을 같이 비교하여 나타낸다. 평균 화염온도와 KL치는 Fig. 3 (a)의 결과에 표현한 것처럼 예혼합 연소기간(A)과 확산 연소기간(B)에서의 화염온도와 KL치를 각각 적산하여 평균치를 구하였다. 경유만을 연소한 경우에 비해 공급된 메탄올의 농도가 낮을수록 예혼합 연소기간과 확산

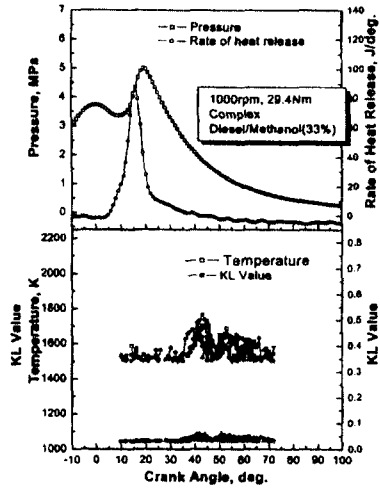
연소기간의 평균화염온도가 감소하고 있으며 NOx의 생성에 큰 영향을 미치는 예혼합 연소시의 평균화염온도와 NOx 배출 농도 결과를 비교하면 매탄올 농도가 낮을수록 감소하는 경향이 유사한 것을 알 수 있다. 평균 KL치 역시 매탄올 농도가 낮아질수록 두 연소기간에서의 표현된 평균값이 감소하는 경향을 보이며 soot의 배출 농도 결과와 예혼합 연소시의 평균 KL치 결과의 경향은 일치하고 있다.



(a) In case of using diesel fuel



(b) In case of using 100% methanol



(C) In case of using 33% methanol

Fig. 5 Results of measurement of two color method and combustion

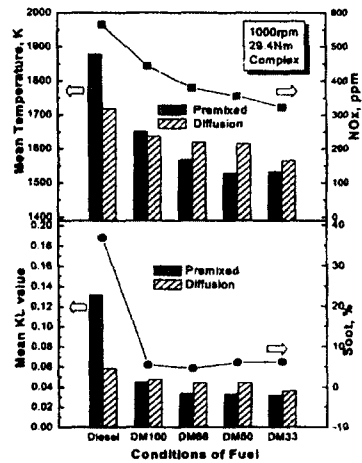


Fig. 6 Mean temperature and KL value and concentration of exhaust gas

이상과 같이 경유-메탄올 증상분사시 화염온도와 KL치의 특성을 볼 때 메탄올 증발잠열에 의해 연소실 내의 화염온도가 저하되고 확산 연소량이 감소함으로써 NOx와 soot의 생성을 억제되고 확산 연소시 메탄올에 의해 soot의 산화가

측진됨을 확인 할 수 있다.

3.2 LIS 광 계측 결과

본 연구를 통해 연소실 내 soot의 농도 분포를 LIS법으로 계측한 원시 화상들은 육안으로 soot의 농도 분포를 구체적으로 확인하기가 곤란하다. 따라서 계측된 화상을 이미지 처리하여 원시 화상에서 광 강도의 값을 표시하고 같은 강도 값을 함께 표현하여 쉽게 해석할 수 있도록 나타내었고 경유만을 연소한 경우와 99.99%, 33%의 메탄올을 층상분사한 경우의 결과 값들이다.

LIS 계측결과는 LIS 광이 나타나는 ATDC 20°에서 120°까지 10° 간격으로 것을 나타내었으며, 각 화상은 다수의 사이클을 운전하는 동안 설정한 각 크랭크 각도에서 10회 씩 측정하였다. 기관 회전수가 일정할 때까지 사이클을 덤프(dump)시킨 후 계측을 행했으며 가시화 창 오염 정도가 약하다고 판단되는 초기에 계측된 화상을 선정하여 이미지 해석을 하였다. 이미지 해석 결과로부터 구한 LIS광 강도 값의 평균강도 값과 전체 강도의 합을 크랭크 각도에 따라 표현한 결과를 Fig. 7에 나타낸다.

층상 분사시에는 메탄올의 발열량이 낮기 때문에 동일 출력을 유지하기 위해서는 메탄올 농도 값이 낮을수록 전체 분사시간은 증가하게 되며 경유만을 연소한 경우보다 연소실 내에서의 연료 액적에 의한 산란광이 많이 발생하게 되지만 층상 분사한 경우에 계측 초기의 산란광이 나타나지 않는 것을 볼 때 본 연구에서의 LIS광 계측결과는 연소실 내 공급된 연료 액적의 산란 영향은 거의 없는 것으로 판단되므로 계측된 LIS 광 강도는 연소실 내의 soot 입자만에 의한 값으로 판단된다.

경유만을 연소한 경우에는 LIS 광의 이미지 결과가 초기부터 LIS의 강도가 강하게 나타나며 ATDC 50°~70°에서 다소 약해졌다가 ATDC 100°에서 가장 강한 강도를 나타낸 후 소멸되는 현상을 나타낸다.

층상분사의 경우에는 계측 ATDC 20°~40°까지는 일부 영역에서 LIS광이 약하게 나타나고 있고 경유만을 연소한 경우와 비교해서 LIS광의 강

도가 상대적으로 낮음을 알 수 있다.

ATDC 50°부터 ATDC 80°까지는 LIS광의 강도가 경유만을 연소한 경우와 유사한 값을 보이지만 약 ATDC 80°부터 LIS광 강도가 소멸되기 시작하고 ATDC 120°에서 경유만을 사용한 경우에 비해 LIS 광 강도가 낮게 나타남 알 수 있다. 메탄올 농도에 따른 영향은 DM33의 경우가 DM100의 경우보다 평균 LIS 강도가 다소 높게 나타나며 ATDC 90° 이 후에는 부분적으로 강한 LIS 강도 값이 나타난다.

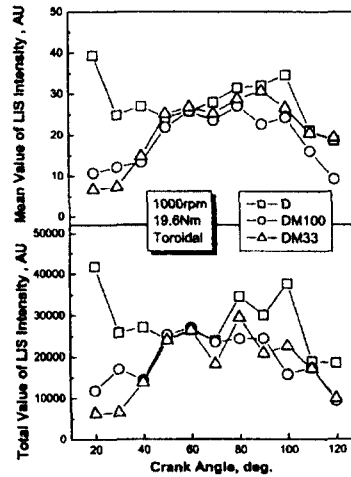


Fig. 7 Total and mean value of LIS intensity with/without stratified injection

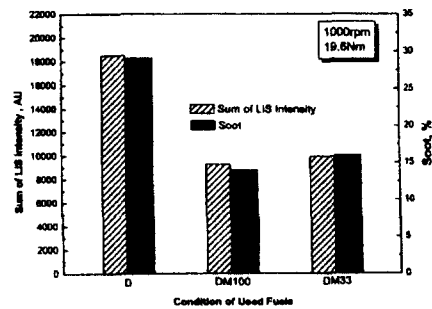


Fig. 8 Exhaust concentration of soot at condition of LIS measurement

Fig. 8은 ATDC 120°에서 계측된 LIS 광의 전체 광 강도 값과 LIS 계측과 동시에 계측된 soot

농도 값을 비교한 결과이다.

경유만을 연소한 경우에 비해 DM100의 경우 약 50%, DM33의 경우 약 45% 저감됨을 알 수 있고 두 계측결과 값이 유사한 경향을 나타내는 것을 볼 때 전술한 것처럼 본 연구에서 계측된 LIS 광 강도 값이 연소실 내 soot 이외의 입자에 의한 산란광 영향 없이 soot 분포 및 농도를 나타낸다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

경유-메탄올 증상분사 시스템을 적용한 디젤엔진에서 이색법과 LIS 계측법을 이용하여 NOx와 soot 저감의 효과를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 경유만을 연소한 경우 보다 메탄올을 증상분사한 경우에 예혼합 연소기간에 나타나는 화염온도가 약 300K정도 감소하고 메탄올 농도가 낮아질수록 최대 화염온도는 감소한다. 증상분사시 예혼합 연소기간의 화염온도의 저하는 NOx 배출농도 저감에 영향을 미침을 알 수 있다.
2. 메탄올을 증상분사한 경우에 예혼합 연소시 발생하는 화염온도보다 확산 연소기간에서 나타나는 화염온도가 상대적으로 높은 값을 보이며 전 영역에서 KL치가 감소하였다. 이러한 현상은 증상분사에 의해 확산연소가 촉진됨을 알 수 있다.
3. NOx와 soot가 생성되는 예혼합 연소기간의 평균 화염온도와 KL치가 낮아질수록 NOx와 soot의 배출농도가 감소하고 두 결과의 감소 경향이 유사함을 알 수 있다.
4. LIS 광 계측결과를 통해 증상 분사시 확산 연소 초기의 soot 생성이 억제되고 이후 메탄올에 의해 soot의 산화가 촉진됨을 확인하였다.

참고문헌

1. J. P. Mello and A. M. Mellor, "NOx Emission from Direct Injection Diesel Engines with Water/Steam Dilution", SAE Paper No. 1999-01-0836, 1999
2. 齊藤史彦, 高森勇治, 齊藤博昭, " 霧混合氣貯留型 グローアシスト直接メタノル機關の燃燒特性", 日本自動車技術會論文集, Vol.22, No.3, pp13~18, 1991
3. K. S. Varde et al., "Ignition delay and emission characteristics of a Methanol- Diesel Fuel engine at Low charge temperature", SAE No. 920037, 1992
4. 오영택, 近久武美, " 직접분사식 디젤기관에서 합산소 연료첨가에 의한 매연과 NOx 동시저감에 관한 실험적 연구 " 한국자동차공학회 논문집, 제4권, 제2호, pp106~114, 1996
5. Masahiro Ishida, Hironobu Ueki, Daisaku Sakaguchi, "Simultaneous Reduction of NOx and Smoke by Port Injection of Methanol/Water Blend in a DI Diesel Engine", Proceeding of The 15th Internal Combustion engine Symposium, pp93~98, 1999
6. Yozo Tosa, et al., "Stratified Fuel- Water Injection for Low-NOx Diesel Combustion (2nd Report, Test Results on Low-Speed Diesel Engine)", JSME section B, Vol.64, No. 625, 1998
7. 강병무, 이태원, 정성식, 하종률, " 증상연료분사 (경유/메탄올)를 이용한 디젤기관의 NOx와 Soot의 동시 저감에 관한 연구 (제2보:증상분사 연소 및 배기특성)", 액체미립화학회지, 7권 1호, pp.7-13, 2002
8. H. C. Hottel and F.P. Broughton, " Determination of True Temperature and Total Radiation from Luminous Gas Flame", Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition, Vol. 4, 1932
9. 이태원, 이선봉, 하종률, " 디젤엔진에서 연소실 형상이 화염온도 및 KL치에 미치는 영향", 한국자동차공학회논문집, pp.99~106, 1999