

**층상연료분사(경유/메탄올)를 이용한
디젤엔진의 NO_x와 Soot 동시 저감에 관한 연구
(제1보 : 층상분사장치의 설계 및 층상분사 연소특성)**

A Study on the Simultaneous Reduction of NO_x and Soot
with Diesel-Methanol Stratified Injection System in a Diesel Engine
(Part I : Design of Stratified Injection System
and Combustion Characteristics of Stratified Injection)

강병무* 김종률* 이선봉* 이태원** 하종률***

B. M. Kang J. Y. Kim S. B. Lee T. W. Lee J. Y. Ha

To reduce the soot and NO_x simultaneously, a new system of stratified injection is developed. This system discharges stratified diesel-methanol in a D. I. Diesel Engine.

Nozzle and delivery valve of conventional injection system were remodeled to inject diesel and methanol from one injector sequently. The quantity of diesel and methanol was controled precisely by micrometers mounted on the injection control lack.

The real injection ratio of dual fuel was measured by volumetric ratio. We could confirm the capabilities that soot and NO_x simultaneously were reduced by diesel-methanol stratified injection from the results of in-cylinder pressure data obtained from combustion experiment by stratified injection, heat release rate and mass fraction burned.

주요기술용어 : Dual Fuel (이종연료), Stratified Injection(층상분사), NO_x (질소산화물),
soot(매연), Heat Release Rate (열발생률), Mass Fraction Burned (질량연소율)

1. 서론

높은 열효율과 양호한 내구성을 가진 디젤엔진은 그 우수성 때문에 다양한 용도의 자동차 동력원으로 사용되고 있다. 그러나 타기관에 비하여 다량 배출되는 질소산화물(NO_x), 입자상물질(PM)에 대한 동시저감 대책은 아직도 미흡한 반면에 배출가스 규제 기준은 날이

강화되고 있는 실정이다.^{(1)~(3)}

이에 대비하여 최근에 새로운 방식의 연료분사 시스템을 적용한 NO_x와 PM의 동시저감 및 연비향상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Susumu⁽⁴⁾ 등은 신방식 연료분사시스템인 연료와 물의 층상혼합연료분사 시스템을 무과급 직분 디젤엔진에 적용하여 배출가스 13모드에서 NO_x, PM을 장기적 배출가스 규제치에 도달하는 범위까지 크게 저감됨을 확인하였으

* 동아대학교 기계공학과 대학원

** 정희원, 창원전문대학

*** 정희원, 동아대학교 기계공학과

며, 물/경유 체적비에 대한 NOx 저감 비율은 선형적 관계이며, 연비도 함께 저감됨을 보고 하였다.

Yozo⁽⁶⁾ 등은 신방식 연료분사시스템을 고속 디젤엔진에 적용하여 시험한 결과 연료-물 층상분사연소에 의해 대폭적인 NOx 저감효과와 동시에 연비 및 매연농도의 개선과 대형저속 2행정 디젤기관에도 적용하여 저속기관에 있어서도 연비의 대폭적인 악화를 수반하지 않고 약 50% 수준의 NOx 저감 효과를 얻었다.⁽⁶⁾

그러나 경유/물의 신방식 연료분사시스템에서도 물의 양이 증가할수록 soot, HC 발생, 연비악화가 발생하며, 물 자체가 연료가 아니기 때문에 부하증가에 따른 엔진의 출력이 저하되는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 soot와 NOx를 동시에 저감시키기 위한 위의 연료분사시스템 적용에 가장 적절한 방법은 경유/물보다 경유/메탄올을 하나의 인젝터에서 순차적으로 분사하는 것으로 판단하였다. 이를 위해 경유/메탄올 층상분사장치를 제작하고 이중연료의 층상분사를 통해 soot와 NOx를 동시에 저감할 수 있는 연소방법을 밝히기 위해 층상분사에 의한 연소특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 경유/메탄올 층상분사 원리

Fig.1에 층상분사장치의 개념도를 나타낸다. 두 개의 분사펌프의 동작은 하나의 캠의 회전에 의해 일정 시간차를 두고 순차적으로 행해진다. 즉, 경유/메탄올이 층상분사된 후 인젝터에는 경유가 잔류된다. 경유의 잔압이 안정된 시기에 캠의 회전에 의해 메탄올 분사펌프를 구동하면 압송된 메탄올은 체크밸브를 밀어 열고 인젝터 내로 메탄올을 공급한다. 압송된 메탄올은 분사노즐 내의 합류부보다 상류쪽에 있는 경유를 경유 분사펌프의 정압식 릴리버리 밸브를 통해 밀어내고, 그 자리에 메탄올 연료 펌프에서 공급된 양만큼 메탄올이 채워진다.

합류부보다 하류쪽에 있는 경유는 메탄올로 치환되지 않은 상태로 남아 있게 되어 인젝터 내에는 경유/메탄올이 층상으로 구성된다. 이후 경유분사펌프가 캠에 의해 구동되고 경유가 공급되어 인젝터 내에 채워져 있는 경유/메탄올을 순차적으로 실린더 내에 분사한다.

이때 경유분사펌프에서 공급된 경유량은 인젝터내의 초기 경유량+공급한 메탄올양 만큼 공급되므로, 인젝터 안의 경유/메탄올을 분사하

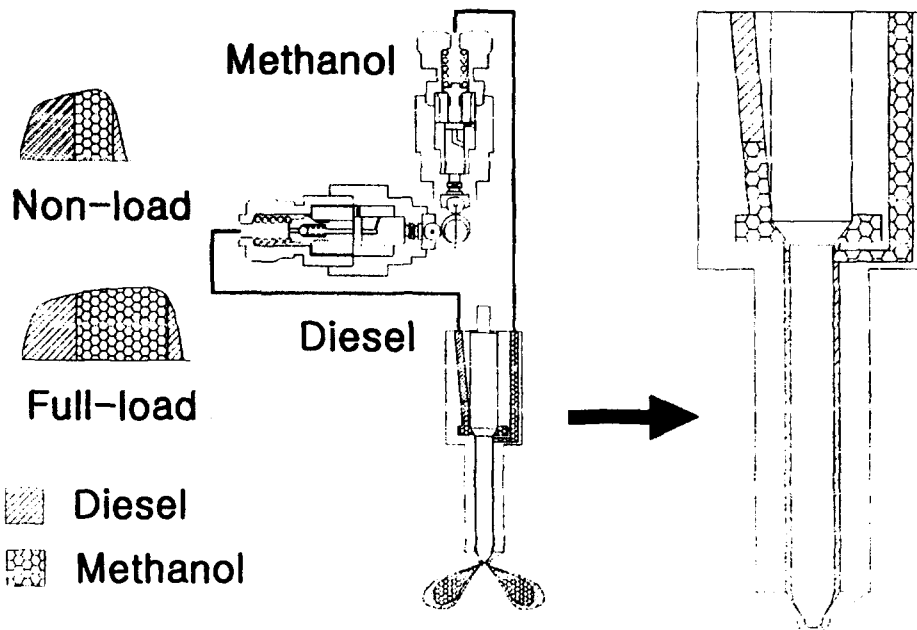


Fig. 1 Schematic diagram of stratified injection system

고 노즐 내에는 경유가 다시 채워진다. 따라서 메탄올 분사펌프는 노즐 내로 메탄올을 공급하는 역할만 하고 경유 분사펌프가 노즐내의 연료를 밀어내는 역할을 하게된다.

그러나 인젝터 내에 공급된 "초기 경유량+공급한 메탄올양" 만큼을 분사시킬 수 있도록 경유량을 제어하기가 쉽지 않다. 또한 초기에 메탄올이 먼저 분사되면 연소안정성이 매우 나빠질 것이다. 따라서 본 연구에서는 보다 확실한 초기 착화 안정성을 위해 경유 분사펌프에서 공급되는 경유의 양을 초기 경유량+메탄올양보다 다소 많이 공급을 하여 경유/메탄올/경유순으로 분사되도록 하였으며, 이때 메탄올 이후에 분사되는 경유량은 최소화할 수 있도록 제어하였다.

2.2 총상분사 장치 설계 및 제작

총상분사장치 설계 및 제작의 목표는 다음과 같다.

- ① 경유/메탄올을 하나의 인젝터로 차례로 분사 가능
- ② 경유/메탄올 혼합비를 변화 가능
- ③ 부하 증가에 따라 메탄올 분사량의 증대 가능

위의 3가지 설계조건을 고려한 총상 분사장치는 기존의 연료분사 인젝터에서 니들 부근에 메탄올이 공급되는 통로, 분사시에 메탄올 쪽으로 역류를 방지하기 위해 설치된 체크밸브 및 경유와 메탄올을 분사노즐 내에 공급하기 위한 2개의 연료펌프로 구성된다.

(1) 딜리버리밸브(deliverly valve) 개조

총상분사장치에서 메탄올 공급시 인젝터 내의 니들을 들어올리지 않으면서 인젝터 내의 경유를 경유분사펌프 라인쪽으로 밀어내고 그 자리를 메탄올이 차지하기 위해서는 경유 분사펌프라인 쪽으로 노즐내의 경유가 역류될 수 있어야 한다. 그러나 경유 분사 펌프쪽에 있는 딜리버리 밸브의 역류방지 기능에 의해 메탄올 공급시 바로 인젝터에서 분사가 이루어지는 현상이 발생한다. 경유분사펌프에서 역류가 되면

서 딜리버리 밸브의 기능인 후적 방지 및 잔압유지가 이루어지기 위해서는 딜리버리 밸브의 개조는 필수적이다. 따라서 대형 디젤기관에 사용되는 정압용 딜리버리 밸브를 현 시스템에 맞게 개조하여 설치하였다. 정압용 딜리버리 밸브는 경유 분사 펌프 라인쪽으로 역류가 가능하면서 잔압유지 기능이 우수한 결과를 보였다.

(2) 분사펌프 설치 및 개조

두개의 분사펌프 설치에 있어서 경유분사펌프는 기존엔진의 크랭크케이스 설치위치에 장착을 하고 메탄올 분사 펌프는 경유 분사 펌프에 90°가 되게 설치하였다. 각 분사 펌프의 연료 공급량을 외부에서 수동으로 조절하기 위해 마이크로미터를 각 분사 펌프의 제어랙에 설치하였다. 경유 및 메탄올 공급량을 정밀하게 제어하기 위하여 펌프의 제어랙에 마이크로미터를 설치하여 마이크로 미터를 회전함에 따라 펌프의 제어랙이 이동될 수 있도록 제작하였다. 제어랙의 이동량을 마이크로 미터의 스케일을 통해 확인하는 방법으로 공급 연료량을 증감 시켰다.

(3) 인젝터 개조

인젝터에 메탄올 공급을 위해 경유공급라인과 동일하게 직경 1mm의 통로를 만들고 메탄올 라인 공급부를 경유측 반대편에 용접하여 설치

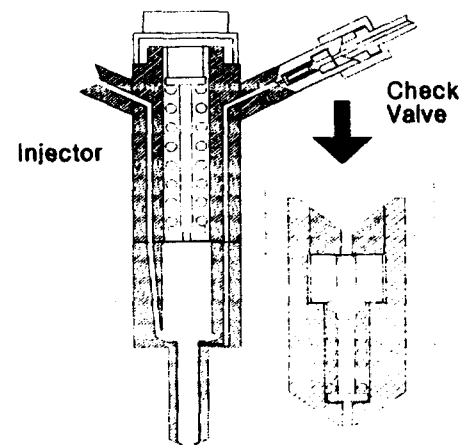


Fig. 2 Injector holder and check valve

하였다. 또한 경유분사펌프가 캠에 의해 구동되어 인젝터 내에 채워져 있는 경유/메탄올을 분사할 때 노즐내의 메탄올이 메탄올 분사 펌프쪽으로 역류되는 현상을 방지하기 위해 메탄올 연료라인 고정부에 체크밸브를 장착하였다. Fig.2에 개조된 인젝터 홀더와 자체 제작된 체크밸브를 나타낸다. 경유와 메탄올이 총상으로 분사되기 위해서는 노즐부의 변경이 필요하다. 기존 노즐의 외형을 변형하지 않고 메탄올이 노즐 내로 공급될 수 있도록 노즐 압력실의 하단부에 직경 1mm의 메탄올 공급라인을 가공하였다.

2.3 실험장치 및 변수

(1) 총상분사 분사량 측정장치

총상분사장치의 분사량 측정 및 총상분사 효과를 가지적으로 확인하기 위한 분사량 측정장치를 Fig. 3에 나타낸다. 분사량 측정장치는 캠 구동부, 총상분사장치, 측정부로 구성되었다.

실엔진의 분사조건과 유사한 조건을 갖추기 위해 직류전동기(DC 전동기, 0.5 HP : 최대 3000rpm)를 사용하여 1000 rpm 조건으로 고정시킨 후 분사량을 측정하였다. 캠 구동부는 실엔진에서 실린더 헤드를 제거하고 일정한 캠회전을 위해 플라이휠을 장착하여 실험을 행하였다. 분사량 측정은 직류전동기가 1000rpm 조건에서 안정된 회전을 시작한 후 경유와 메탄올 분사량 제어용 마이크로미터를(플런저의 유효행정을) 1 단계씩 증가시켜 가면서 1분동안 분사된 연료를 메스실린더(50ml)에 받아 전자저

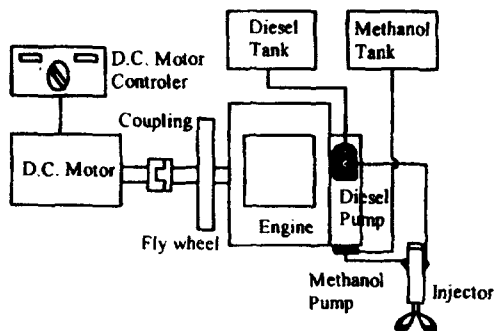


Fig. 3 Schematic diagram of injection quantity measurement system

울로서(HM-200:최소 계측범위 0.1mg) 연료중량을 계측하였고 경유/메탄올의 총상분사량을 체적비율로 확인하였다.

(2) 엔진 실험장치

단기동 4사이클 직분식 디젤엔진(ND80, 대동:배기량631cc)을 사용하고, 연소실은 토로이달(toroidal) 형식이며, 엔진의 부하조건은 와전류식 동력계를 사용하였다.

(3) 실험변수 및 실험방법

총상분사 시스템의 연소실험조건을 Table. 1에 나타낸다. 엔진회전수 1000 rpm, 토크를 29.4N·m로 일정하게 조정하고, 메탄올 공급량을 총 연료공급량(경유+메탄올)의 0, 30, 50%로 증가시키면서 실험을 하였다.

Table 1. Experimental conditions

Parameters	Conditions
Engine speed	1000 rpm
Torque	29.4 N · m
The Ratio of supplied methanol	0, 30, 50 [M/(M+D) (%)]

3. 결과 및 고찰

3.1 총상분사 분사량 측정

제작된 총상분사장치의 총상분사특성 및 분사량 측정을 확인하기 위하여 직류모터에 의해 구동되는 예비실험용 분사장치에서 분사실험을 수행하고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

각 분사펌프에 설치된 마이크로미터를 사용하여 연료 공급량의 제어상태를 확인하기 위해 제어랙의 이송거리를 1mm씩 증가시키면서 경유와 메탄올을 각각 분사하여 분사량을 계측하고 5회 평균한 값을 나타내었다.

각각의 결과에서 알 수 있듯이 제어랙 이송거리 증가에 따라 분사량이 직선적으로 증가하는 것으로 볼 때 마이크로미터로 경유, 메탄올 분사펌프의 연료공급량 분사량 제어가 가능함을

확인하였다. 단 같은 종류의 분사펌프임에도 불구하고 메탄올 분사량이 경유 분사량 보다 적은 이유는 분사시 노즐 내부에 존재하는 메탄올의 역류방지를 위한 체크밸브가 메탄올 공급라인에 설치되어 있어서 메탄올 펌프에서 메탄올을 압송할 때 체크밸브를 통과하는 과정에서 압력강하가 일어나기 때문으로 생각된다. Fig. 4의 결과는 층상분사를 실행할 경우 제어랙의 이송거리에 따른 이종연료의 연료 공급량 비율을 계산하기 위한 기초 자료로 사용되었다.

예를 들어 경유와 메탄올의 제어랙 이송거리를 8mm로 동일하게 설정한 상태에서 층상분사를 실행하였다고 가정을 한다면 총 분사되는 경유의 양은 'A' 만큼이고 분사되는 메탄올의 양은 'B' 만큼이 되며 이종연료는 Fig. 12에 나타나 있는 분사를 그림과 같이 경유/메탄올/경유 순서로 분사된다. 따라서 분사되는 경유량 'A'는 초기 분사량(a₁)과 메탄올 뒤에 분사되는 후기 경유 분사량(a₂)의 합이 된다. 앞서서도 언급했던 것처럼 층상분사 노즐 구조상 초기 경유량은 일정하기 때문에 메탄올 공급량을 일정하게 한 상태에서 경유 공급량을 증가시키게 되면 후기 경유 분사량이 증가하게 된다. 또한 공급되는 메탄올의 양을 증가시키려면 경유의 공급량도 동시에 증가를 시켜야만 한다. 만약 증가된 메탄올 공급량만큼 경유 공급량을 증가시키지 않으면 노즐내부에 있는 메탄올이 모두 분사되지 않고 잔류하게 되고 다음 사이클에서는 메탄올/경유/메탄올 순서로 층상분사가 이루어져 연소 안정성이 저하된다.

Fig. 4에서 얻은 결과를 이용해서 경유/메탄올/경유 순서로 층상분사가 이루어질 수 있는 각 분사펌프의 연료 공급량 조건을 임의로 설정하고 그 조건들에서 실제 층상분사한 결과와 Fig. 4의 결과를 통해 계산된 결과 값을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. Table 2는 층상분사가 이루어질 수 있는 각 연료의 연료 공급량을 임의로 설정한 조건들을 나타낸다.

Fig. 5에서 Table. 6의 임의의 네가지 조건에서 계산된 결과와 실제 측정된 층상분사량의 비교 결과가 다소 오차를 나타내지만 본 연구

에서 제작한 층상분사장치로써 이종연료의 공급량 변화에 따른 경유/메탄올/경유 순서의 층상분사가 이루어짐을 확인 할 수 있다.

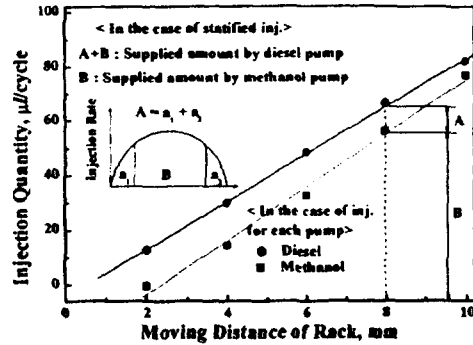


Fig.4 The results of injection amount measurement for each pump at stratified injection system

Table 2. Conditions of stratified injection

Injection Conditions	Diesel (μl)	Methanol (μl)	Total (μl)	M/(M+D) (%)
1	13	27	40	67.5
2	13	35	48	72.9
3	13	43.5	56.5	76.9
4	13	52	65	80

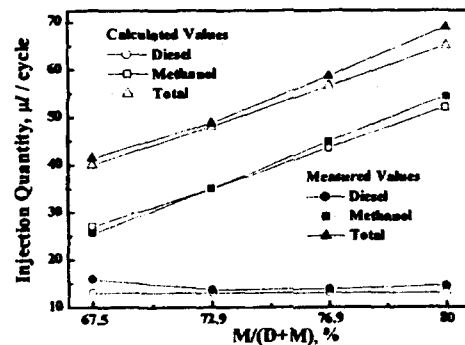


Fig. 5 The results of measurement of injection amount at stratified injection conditions

3.2 층상분사시 연소 특성

동력계 부하 29.4N·m, 엔진회전수를 1000 rpm으로 일정하게 경유분사펌프의 분사량을

고정한 후 메탄올 공급량을 전체 연료공급량 (메탄올+경유분사량)의 0(M_0), 30(M_{30}), 50(M_{50}) %로 증가시키면서 엔진을 구동하고 크랭크 각에 따른 연소 압력, 열 발생률, 질량 연소율을 구하여 Fig. 6에 나타낸다.

채취한 연소압력의 데이터는 수회 사이클을 평균한 값으로 경유만 분사시켰을 경우에 (M_0) 연소최고 압력의 발생시기는 ATDC 11°이며 메탄올 공급량이 증가할수록 ATDC 12° (M_{30}), 13° (M_{50})로 조금씩 지연되며 연소최고압력은 약 4.76MPa에서 공급되는 메탄올의 양이 증가할수록 4.79(M_{30}), 4.82MPa(M_{50})로 증가함을 보인다. 또한 착화시점은 경유만 분사했을 경우 ATDC 2°에서 공급 메탄올량이 증가할수록 ATDC 4°, 6° 지연되는 현상을 보인다.

이는 메탄올의 증발잠열 효과로 인한 착화시점과 연소최고 압력 발생시기의 지연의 결과로 생각되고 메탄올량이 증가할수록 연소최고압력이 높게 나타나는 이유는 착화지연기간에 따른 예혼합 연소량의 증가와 메탄올의 빠른 화염전파속도에 의한 급속연소의 결과로 생각된다.

채취한 압력값을 3차 7점 최소자승법을 이용

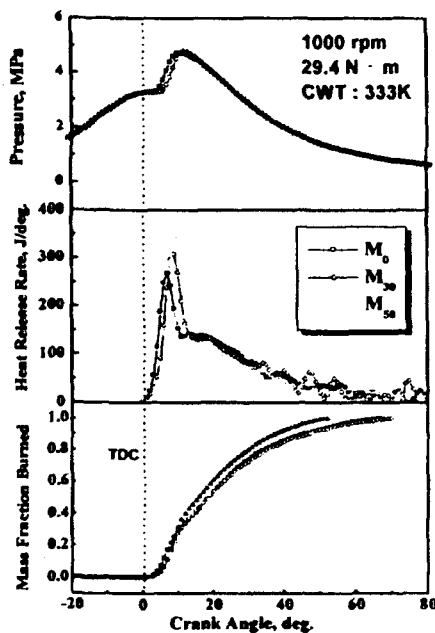


Fig. 6 The results of in-cylinder pressure, heat release rate and mass fraction burned

여 평탄화한 후 그 값으로 열발생률을 구하였다. 결과는 메탄올 공급량이 증가할수록 최고열발생률 위치는 경유만 분사한 경우에 비하여 2° 정도 지연되며 최고열발생률 값은 14%(M_{30}), 19%(M_{50})정도 증가하는 경향을 보인다. 이때 경유의 경우에는 열발생 감소가 완만한데 비하여 메탄올 공급량이 증가할수록 최대치를 보인 후 다소 급격히 감소하는 특징을 보인다.

열발생률 값으로 구한 질량연소율로부터 메탄올이 총 연료량의 50%공급된 경우가 다른 두 경우 보다 질량연소율의 기울기가 전 영역에서 커짐을 알 수 있다. 이는 연소압력이나, 열발생률에서 확인한 결과와 동일하다. 특히 연소후반인 80%에서 다소 급격한 기울기 구배를 보이는 반면에 다른 두 조건에서는 80%부터 구배가 완만해지는 현상을 보인다.

위의 결과로부터 연소초기에 메탄올 공급량이 증가할수록 착화지연 현상은 발생하나 착화된 후 급속한 연소로 연소최고압력이 높아지고 후 연소 기간에도 역시 메탄올 공급에 따른 연소 촉진효과가 있음을 알 수 있다

메탄올의 저 발열량이 경유의 47%정도이고 메탄올의 공급량이 증가할수록 공급되는 경유량이 감소하게 되는데 반해 연소초기에 위와 같은 결과를 보이는 것은 메탄올은 합산소 연료이므로 공연비가 낮아 공급된 경유의 공기 이용률이 증가함으로써 연소효율이 향상되고 메탄올의 빠른 화염전파속도에 의한 급속연소의 결과로 생각된다.

또한 후 연소기간에 연소가 촉진되는 결과물 통해 soot의 산화에 긍정적인 영향을 줄 것으로 생각되며 또한 열발생 후기의 급격히 감소되는 현상으로 미루어 후 연소기간의 단축을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

단, 초기 예혼합연소시 최고압력이 상승하는 것으로 볼 때 초기의 화염온도가 높아 NOx의 배출량이 다소 증가할 것으로 생각되어진다.

이를 해결하기 위해 보다 증발잠열이 큰 메탄올과 물을 혼합한 에멀전(메탄올이 친수성이 강함으로 메탄올의 포화도까지 물을 혼합)을 디젤과 함께 층상분사하고, 분사시기를 조정하

고 분사장치를 개선한다면 NOx의 저감도 가능할 것으로 생각되고 연소특성의 결과와 함께 배기가스의 측정을 동시에 수행할 계획이다.

4. 결 론

경유를 착화원으로 하고 메탄올을 주연료로 하는 경유/메탄올/경유 층상분사장치를 제작하여 메탄올 공급량 증대에 따른 연소특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 경유/메탄올 층상분사장치는 기존 엔진의 인젝터 변경을 통해 설계 가능하였고 제작한 층상분사 시스템으로 연소가 가능함을 확인하였다.
2. 층상분사 연소시 메탄올의 증발 잠열로 인해 공급되는 메탄올량이 증가함에 따라 착화시기가 더욱 지연되는 것을 알 수 있고 착화시기가 지연 증가와 착화 후 메탄올의 급격한 연소속도로 인해 최고 연소 압력은 증가한다. 따라서 초기 분사되는 경유의 양을 감소시키고 메탄올의 공급비율을 더욱 증가시킨다면 예혼합연소시 메탄올의 증발 잠열에 의한 화염온도 저하 효과가 커질 것으로 생각된다.
3. 메탄올 공급량이 증가할수록 최고열발생률 위치는 경유만 분사한 경우에 비하여 2° 정도 지연되며 최고 열발생률 값이 증가하는 경향을 보인다. 초기의 화염온도가 높아 NOx의 배출량이 다소 증가할 것으로 생각되어진다. 이를 해결하기 위해 보다 증발잠열이 큰 메탄올과 물을 혼합한 에멀전 연료를 경유와 함께 층상 분사하고, 분사시기를 조정하고 분사장치를 개선한다면 예혼합 연소시 화염온도를 낮추어 NOx의 저감이 가능할 것으로 생각된다.
3. 질량연소율 결과로부터 메탄올 50% 공급의 경우 경유만을 연소하였을 때 보다 연소기간이 크랭크 각으로 20° 정도 줄어드는 것을 알 수 있고 메탄올의 증발잠열에 의한 착화시기 지연으로 총 공급된 연료량의 예혼합연소량이 증가함으로써 확산 연소량이 상대적으로 줄어들었다.

고 질량연소율 80% 이후의 기율기 급격해지는 것을 볼 때 예혼합연소 과정 이후에 분사된 경유의 연소가 메탄올에 의해 촉진된 것으로 판단되며 생성된 soot의 산화를 촉진하는 효과를 가질 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 (997-001-E008) 1997년 한국 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 또 본 연구를 위해 협조해주신 (주)두원정공 여러분에게 감사드립니다.

참고 문헌

1. J. H. Johnson, et al., "A Review of Diesel Particulate Control Technology and Emission Effect", SAE Trans. No. 940233, 1994.
2. Changlin Yang, et al., "Effect of Rich and High Turbulence Combustion on NOx and Particulate Emission from a High Speed Direct-Injection Diesel Engine", The Fourth Internal Symposium COMODIA 98, pp. 63~68, 1998.
3. 瀧美好崇 外4人, "天然ガスエンジンにおける燃焼室内の混合気流動が燃焼および排気特性に及ぼす影響", 第12回 内燃機関シンポジウム, No.9537493, 1995.
4. Susumu, K. et al., "Reduction of Exhaust Emission with Fuel-Water Stratified Injection System in a Diesel Engine", 第13回 内燃機関 Symposium 講演論文集, pp. 465~470, 1996.
5. Yozo Tosa, et al., "Stratified Fuel-Water Injection for Low-NOx Diesel Combustion", 第10回 内燃機関 Symposium 講演論文集, pp. 247~252, 1992.
6. Koji Takasaki, et al., "Some Measures Measures to Control Exhaust Emissions from Stationary and Marine Diesel Engine." 第13回 内燃機関 Symposium 講演論文集, pp. 471~476, 1996.