

층상연료분사(경유/메탄올)를 이용한 디젤엔진의 유해 배출물 저감에 관한 연구

A Study on the Reduction of Harmful Exhaust Gas with Diesel-Methanol Stratified Injection System in a Diesel Engine

강 병 무*, 안 현 찬*, 이 태 원**, 정 성 식***, 하 중 료***
Byungmu Kang, Hyunchan An, Taewon Lee, Sungsik Chung, Jongyul Ha

ABSTRACT

In the present study, reduction of harmful exhaust gas in a diesel engine using stratified injection system of dual fuel (diesel fuel and methanol) was tried. The nozzle and fuel injection pump of conventional injection system were remodeled to inject dual fuel in order from the same injector. The quantity of each fuel was controlled by micrometers, which were mounted at rack of injection pumps. The injection ratio of dual fuel was certificated by volumetric ratio in injection quantity test. Cylinder pressure and exhaust gas were measured and analyzed under various supply condition of dual fuel. We confirmed that combustion of dual fuel was performed successfully by using modified injection system in a D.I. diesel. Soot and NO_x are simultaneously reduced by stratified injection without large deterioration of thermal efficiency, but THC and CO are relatively increased.

주요기술용어 : Dual fuel(이종연료), Stratified injection(층상분사), NO_x(질소산화물), Soot(매연), Heat release rate(열발생률), Mass fraction burned(질량연소율)

1. 서 론

디젤엔진에서 배출되는 주된 유해 배출가스인 NO_x와 soot는 상호보상관계(trade off)에 있기 때문에 연소과정에서 두 물질의 생성을 동시저감 하는 데에는 많은 어려움이 있다.

최근에 디젤엔진에 적용한 고압 분사 시스템은 soot의 배출을 현저하게 저감을 가능하게 하

였지만 NO의 배출이 증가하고,¹⁾ EGR을 통한 NO_x 저감방법은 EGR량이 제한적이고 연소효율이 저하되는 문제점이 있다. 근래에는 기존의 디젤엔진에 경유와 연료특성이 다른 이종연료(합산소 연료)를 사용하여 NO_x와 soot를 동시저감시키는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

물 에멀전 연료와 같은 물의 이용,²⁾ 연료에 합산소 연료를 첨가하는 방법,³⁻⁵⁾ 흡기 포트에 물 또는 물과 합산소 연료의 혼합 연료 분사,^{6,7)} 경유-물 층상분사⁸⁻¹⁰⁾ 등이 연구되었고 특히 새로운 방식의 연료 분사시스템인 층상분사에 대한 연

* 회원, 동아대학교 대학원

** 회원, 창원전문대학 자동차과

*** 회원, 동아대학교 기계공학과

구는 경유와 물을 하나의 인젝터를 통해 층상으로 연소실에 공급하기 때문에 에멀전을 위한 계면활성제의 사용과 흡기 포트에 합산소 연료를 공급하는 방법에 비해 많은 장점을 가진다. 또한 선행 연구자들이 NOx, PM이 장기적 배출가스 규제치에 도달하는 범위까지 크게 저감됨을 확인하였으며, 물-경유 체적비에 대한 NOx 저감 비율은 선형적 관계이며, 연비도 함께 향상됨을 보고하였다.

그러나 물의 공급량에 한계가 있고 공급량이 증가할수록 연비 및 출력이 저하되는 단점을 가질 수 있다. 층상분사의 장점을 최대한으로 이용하기 위해서는 물과 같이 증발잠열이 크고 산소를 다량으로 함유하고 있는 연료를 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

메탄올은 합산소 연료중에서도 합산소 비율이 높고 증발잠열이 크며, 천연가스, 석탄, 생물자원과 같은 풍족히 사용 가능한 원료로부터 합성이 가능하다는 장점을 가지고 있다.¹¹⁾

메탄올의 층상분사 시스템 적용은 국부 농후영역을 저감시켜 soot 생성을 억제하고 경유의 예혼합 연소시 메탄올의 증발잠열에 의해 연소온도를 저하시켜 NOx 저감이 가능할 것으로 생각되며 물의 공급량 증대에 따른 출력 및 연비가 저하되는 현상을 개선할 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 경유와 메탄올을 하나의 인젝터를 통해서 연소실내에 공급할 수 있는 층상분사시스템에 제작, 실제 엔진에 적용하고 경유와 메탄올의 공급비율 변화와 메탄올 농도에 따른 연소특성과 배출가스의 특성을 확인하는 것이 목적이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 경유/메탄올 층상분사 원리

Fig. 1은 본 연구의 목적에 대한 개념을 나타내고 있다. 예혼합 연소 및 확산 연소 초기의 연소온도를 낮추어 NOx, soot의 생성을 억제시키고, 메탄올을 사용하여 후 연소기간의 연소를 촉진시켜

soot의 산화촉진 및 출력, 연비개선을 목표로 한다.

Fig. 2에 층상분사장치의 개념도를 나타낸다. 경유와 메탄올을 하나의 인젝터에서 층상으로 분사하기 위하여 두 개의 분사펌프를 사용하였고 하나의 캠에 의해 순차적으로 연료를 공급한다. 이때 메탄올 분사 펌프는 메탄올을 인젝터 내부로 공급하는 역할만 하게되고 경유 분사펌프에 의해 인젝터 내부에서 층상으로 있는 경유-메탄올을 분사하게 된다. 층상분사의 원리는 다음과 같다.

경유-메탄올이 층상 분사된 후 분사 노즐에는 경유만이 잔류하게 되고 이후 메탄올 펌프에 의해서 노즐 내부로 메탄올이 공급되면 노즐 내부의 메탄올 공급위치에서부터 위쪽에 존재하는 경유를 공급되는 메탄올양 만큼 경유 분사펌프

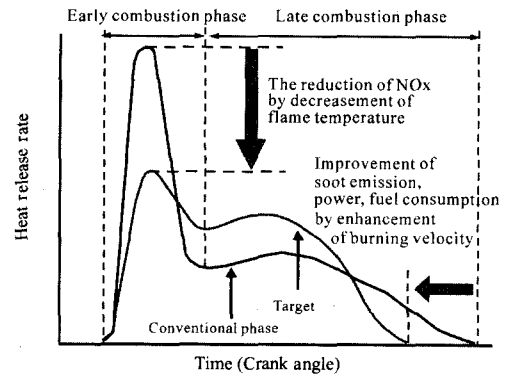


Fig. 1 Concept of study purpose

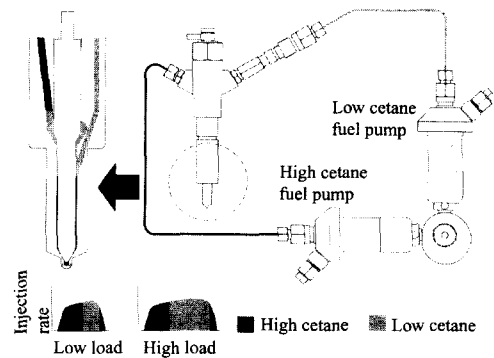


Fig. 2 Schematic of stratified injection system

의 정압식 덜리버리 밸브를 통해 밀어내어 경유-메탄올이 충상으로 노즐 내부에 존재하게 된다. 이후 경유펌프에 의해서 공급되는 경유량 만큼 노즐 내부의 경유-메탄올이 분사된다.

매 회 분사시 경유-메탄올 순서로 분사가 이루어지게 하려면 노즐 내부로 공급된 메탄올이 모두 분사되어야만 한다. 따라서, 경유 분사 펌프에서 공급되는 경유량이 메탄올 공급위치에서부터 아래쪽의 경유량과 노즐 내부로 공급된 메탄올양보다 많은 양이 공급되어만 경유-메탄올-경유 순서로 분사가 이루어지고 노즐내부에는 경유만이 존재하게 되어 이 후 메탄올이 공급되었을 때 경유-메탄올 순으로 충상이 이루어질 수 있다.

경유 및 메탄올 공급량을 정밀하게 제어하기 위하여 펌프의 제어랙에 마이크로미터를 설치하여 마이크로미터를 회전함에 따라 제어랙이 이송될 수 있도록 제작하였다. 제어랙의 이송량을 마이크로미터의 스케일을 통해 확인하는 방법으로 공급 연료량을 증감시켰다.

2.2.1 분사량 측정장치

분사량을 측정 위해서 실린더 헤드를 제거한 엔진을 직류전동기(DC motor, 0.37kW : 최대 3000rpm)를 사용하여 구동할 수 있도록 분사량 측정장치를 제작하였다. 분사량 측정은 설정된 회전수에서 직류전동기가 안정된 회전을 시작한 후 분사량 제어용 마이크로미터를 회전하여 제어랙의 위치를 2mm씩 변화시켜 설정시간 동안 계측하였고 전자저울로서(HM-200 :최소 계측범위 0.1mg) 연료중량을 측정하였다. 충상 분사량은 메스실린더를 사용하여 상 분리된 경유-메탄올의 체적비율을 계산하였다.

2.2.2 연소 및 배기가스 분석 장치

Table 1은 본 연구에 사용된 엔진의 사양을 나타낸다. 엔진의 부하조절은 와전류식 동력계(Eddy current type, Hwan Woong. CO.) 를 사용하였다. 연소 실험과 동시에 배기가스 분석기를(Horiba EXA-1500) 사용하여 CO, CO₂, NOX, THC,

O₂를 계측하였고 soot의 농도측정을 위해 디젤 스토크 미터를(필터 광반사 방식) 사용하였다.

2.2.2 실험변수 및 실험방법

Table 2에 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 메탄올과 증류수를 체적비로 2:1, 1:1, 1:2로 혼합하여 66, 50, 33 vol% 농도의 메탄올을 제작하여 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분사량 및 분사압력 측정결과

제작된 충상분사장치의 분사량 측정 및 충상 분사특성을 확인한 결과를 Fig. 3에 나타낸다. 경

Table 1 Engine specification

Description	Specification
Type	4 Cycle water cooled D. I. diesel engine
Displacement	0.631 ℓ
Bore × Stroke	92 × 95
Compression ratio	19
Injection nozzle	4 × 0.3mm
Fuel Inj. pressure	21MPa

Table 2 Experimental conditions

Description	Condition
Engine speed	1000 rpm
Torque	29.4 N · m
Cooling water temperature	348K
Used fuel	- Diesel - Diesel+Methanol (Methanol : 99.99, 66, 50, 33 vol%)

유와 메탄올 펌프에서 분사량 제어용 마이크로미터 스텝에 따른 분사량을 각 5회씩 계측하고 평균을 구하여 나타내었다. 각 분사펌프에서 마이크로미터의 스텝이 증가함에 따라 분사량이 선형적으로 증가하는 것을 볼 때 마이크로미터를 사용한 연료 분사량의 제어가 정확히 이루어짐을 알 수 있다. 단 메탄올의 분사량이 경유 분사량보다 각 스텝에서 적은 이유는 메탄올 공급측의 연료 공급 라인이 경유측 공급라인 보다 상대적으로 길고, 또한 메탄올 공급라인에는 딜리버리 밸브를 이용한 체크밸브가 설치되어 메탄올 공급압력이 감소하는 결과로 생각된다.

Fig. 3에서 나타낸 것처럼 메탄올과 경유펌프의 마이크로미터를 8mm로 설정하고 층상분사를 행하면, 경유 분사펌프에 의해 인젝터로 공급되는 경유량은 "D+M" 만큼이고, 이 때 노즐 내부에는 메탄올이 "M" 양 만큼 존재하고 있으므로 분사되는 연료는 "M" 양 만큼의 메탄올과 "D" 양 만큼의 경유가 분사된다. 그리고 "D" 양 만큼의 경유는 Fig. 3에 나타낸 것처럼 노즐 내부에서 메탄올 공급 위치 아래에 존재하는 초기 경유 분사량 (d_1)과 메탄올 이후에 분사되는 경유량 (d_2)에 해당된다.

Fig. 4는 Fig. 3에서의 나타낸 각 분사펌프의 분사량 결과값을 사용하여 경유-메탄올-경유 순서로 층상분사가 가능하도록 경유와 메탄올 분사 펌프에 설치되어있는 마이크로미터의 이동량을

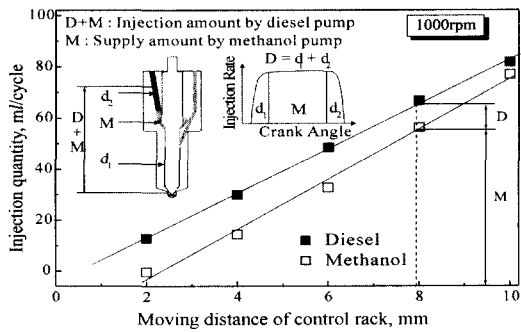


Fig. 3 The results of injection quantity for each pump using stratified injection system

임의로 4 조건을 설정하고 각 조건에서 실제 경유-메탄올의 분사량 비율이 각 조건에서 예상하는 비율과 비교한 결과이다. 만약 경유-메탄올-경유 순서로 분사가 이루어지지 않았다면 실제 경유와 메탄올의 분사량에 많은 차이가 있어야만 한다. Fig. 4의 결과를 볼 때 실제 층상 분사량과 예상 분사량과 유사한 값을 나타내고 경유 분사량이 예상 분사량보다 많은 것을 볼 때 경유-메탄올-경유 순서로 분사가 이루어진다는 것을 알 수 있다. 따라서 제작된 층상분사 시스템으로 경유-메탄올 층상분사가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 5는 개조된 층상분사 시스템의 분사압력 측정 결과이다.

경유만을 분사한 경우에 비해 층상으로 경유와 메탄올을 층상 분사하는 경우가 메탄올이 공급되는 시기에 연료관내의 잔류압력이 다소 낮아지기

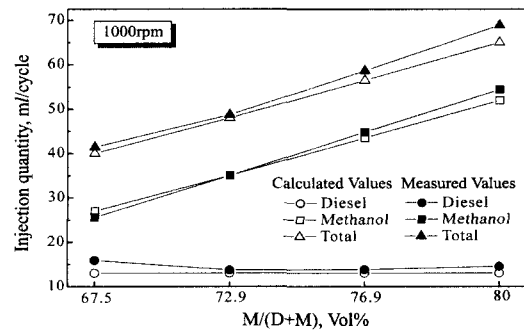


Fig. 4 Comparison of real injection quantity with calculated injection quantity

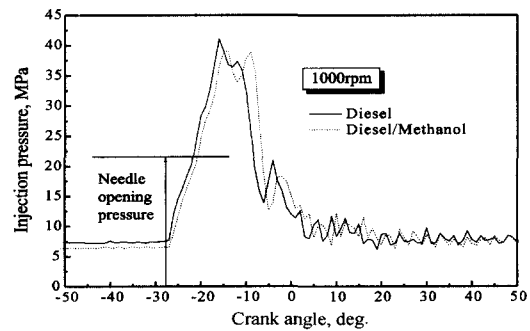


Fig. 5 History of injection pressure

때문에 니들밸브 개변 압력 도달 시기가 크랭크 각으로 1° 정도 지연되나 분사특성은 유사함을 알 수 있고 1° 정도의 분사시기 지연은 연소특성에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다.

3.2 충상 분사시 연소 특성

Fig. 6은 각 실험 조건에서 공급된 연료의 1회 분사량과 발열량을 나타낸다. “D”는 경유만을 사용한 경우, “DM100”은 경유와 99.99% 메탄올을 충상분사한 경우이고 “DM66”, “DM50”, “DM33”은 각각 66, 50, 33 vol %의 메탄올을 경유와 충상분사한 경우이다. 순수 메탄올의 발열량(19.92 MJ/kg)이 경유 발열량 (42 MJ/kg)의 약 1/2 정도이기 때문에 메탄올에 혼합된 증류수의 양이 증가할 수록 동일 출력을 유지하기 위해서는 전체 분사시간이 증가해야만 한다. 각 실험 조

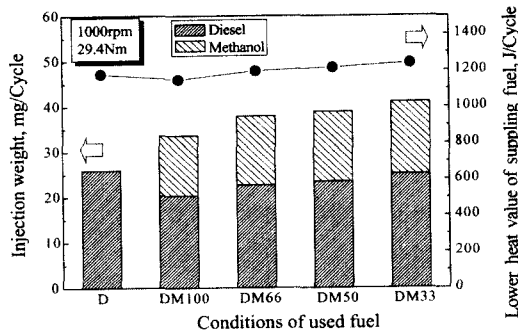


Fig. 6 Injection weight and lower heat value for cycle at various condition of supplied fuel

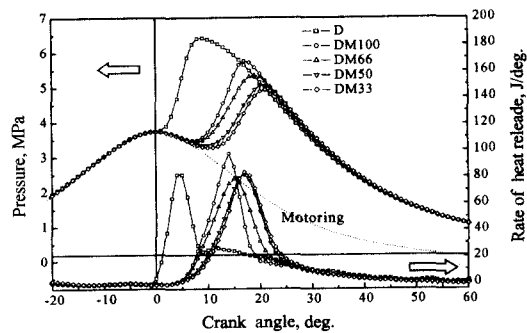


Fig. 7 Pressure and rate of heat release rate at various condition of supplied fuel

건에서 공급된 연료의 비율은 메탄올의 비율이 전체연료에 대해 약 38%정도 공급된 경우이며 공급된 연료의 총 저발열량 값은 메탄올에 혼합된 증류수량 증가에 따라 다소 증가한다.

Fig. 7은 각 실험 조건에서 채취한 연소압력과 열 발생률 결과를 나타낸다.

충상 분사된 메탄올의 증류수 혼합량이 증가할수록, 즉 “DM100” 조건에서 “DM33” 조건으로 갈수록 착화시기와 연소최고압력 발생시기가 지연되고 연소최고압력이 낮아진다. 열발생률 결과에서 메탄올의 농도값이 낮아질수록 예혼합 연소기간이 증가하고, 특히 “DM100”조건에서 다른 충상분사 조건에 비해 연소가 다소 급격히 발생하는 현상을 보인다.

Fig. 8은 Fig. 7의 결과로부터 계산된 각 실험 조건에서의 연소기간 비교 결과이다.

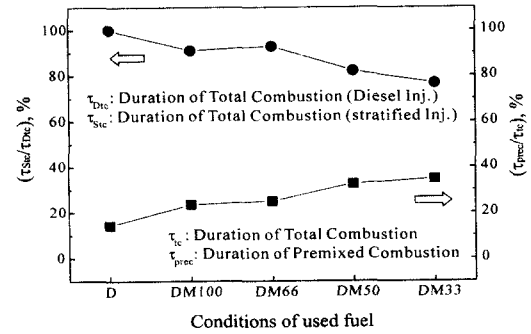


Fig. 8 Comparison of combustion duration at various condition of supplied fuel

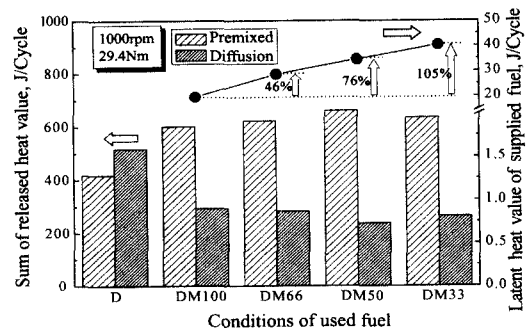


Fig. 9 Results of sum of heat release value and latent heat value of supplied fuel

경유만을 사용하였을 때의 전 연소시간에 대한 증상분사시의 전 연소시간에 대한 비율을 살펴보면 증상 분사함에 따라 연소시간이 감소하고 “DM33”조건에서 최대 20%까지 연소시간이 단축됨을 보인다. 그리고 각 실험 조건에서의 전 연소시간에 대한 예혼합 연소시간 비율의 결과에서 증상 분사시 경유만을 사용한 경우에 비해 예혼합 연소시간의 비율이 증가하고 역시 “DM33” 조건에서 약 2배정도 증가한다. 이러한 결과로부터 경유-메탄올 증상분사에 의해 예혼합 연소 시간이 증가하게 되고 상대적으로 연소 속도가 느린 확산연소시간이 감소하여 전 연소 시간이 단축됨을 알 수 있다. 이것은 공급된 메탄올의 증발잠열에 의해 착화지연이 발생하고 예혼합기량이 증가하는 원인으로 생각된다.

Fig. 9에 나타난 각 실험조건에서의 예혼합 · 확산 연소의 발열량과 공급된 연료의 증발 잠열량 (경유 경우 제외)의 비교 결과에서 확인할 수 있듯이 공급된 연료의 증발 잠열량이 증가할수록 예혼합연소 발열량이 증가하는 결과를 보인다.

3.3 증상 분사시 배기 특성

Fig. 10은 각 실험조건에서의 NOx와 soot의 배출농도를 나타내고 있다. NOx는 경유만을 사용한 “D”의 경우에 비해 “DM100”에서 26.2% 정도 증가하고 공급된 메탄올의 증류수 혼합량이 증가함에 따라 NOx의 배출량이 감소하고 최대

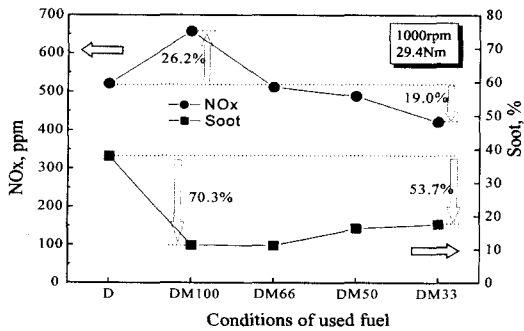


Fig. 10 Results of NOx and soot at various condition of supplied fuel

“DM33”에서 19%까지 감소하는 것을 알 수 있다.

Soot는 “DM100”에서 70.3% 감소하였고 공급된 메탄올의 증류수 혼합량이 증가함에 따라 다소 증가한다. 증상분사에 의해 착화가 지연되고 예혼합량이 많아졌음에도 불구하고 NOx가 저감되는 이유는 공급된 연료의 증발 잠열로 인해 예혼합 연소시 연소온도가 억제된 결과로 생각된다. “DM100”에서는 NOx의 배출량이 증가하는 현상을 보이는데 예혼합기 양이 많은 상태에서 Fig. 7의 열발생률 결과에서 알 수 있었듯이 “DM100”의 조건이 다른 증상분사 조건보다 연소가 급격히 이루어진 결과로 판단된다.

Soot 배출의 저감은 예혼합 연소량 증가에 따른 확산 연소량의 상대적인 감소와 메탄올에 의한 국부 농후 영역이 감소된 결과로 판단되고, 증상 분사된 메탄올의 증류수 혼합량이 증가할수록 예혼합기의 양이 증가하지만 soot가 다소 증가하는 현상을 나타내는 것을 볼 때 후연소시 메탄올에 의한 연소촉진 결과로 예측된다.

Fig. 11은 각 실험조건에서의 THC와 CO의 배출농도를 나타내고 있다. 증상 분사함에 따라 THC, CO의 배출농도가 증가하고 메탄올의 증류수 혼합량이 증가할수록 증가율이 매우 커짐을 알 수 있다.

디젤엔진은 공급된 연료의 공기 혼합이 불균일 하지만 전체적으로는 희박연소를 행한다. 예혼합기의 양이 증가하면 THC가 증가하나 가솔

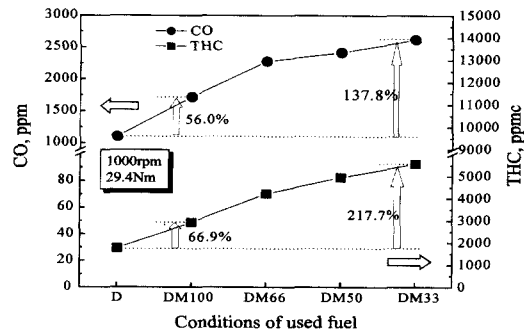


Fig. 11 Results of CO and THC various condition of supplied fuel

린 엔진에 비해 예혼합기량이 적고 확산 연소시 국소적으로 농후영역에서 연소가 이루어지기 때문에 가솔린 엔진에 비해 CO와 THC 배출량은 적고 soot의 배출량이 많다.

메탄올을 충상 분사함에 따라 착화시기가 지연되어 분사된 연료의 예혼합 시간이 증가하고, 확산 연소량에 비해 예혼합 연소량이 증가함으로써 경유만을 연소했을 경우보다 CO, THC는 증가하고 soot의 배출량은 감소하는 것으로 판단된다. THC의 증가의 다른 원인으로서는 착화시기 지연으로 인한 최고압력 발생시기 역시 지연되어 예혼합 연소시 연소실의 체적이 증가하기 때문에 연소실 벽으로의 소염 현상에 의한 것으로 생각된다. 메탄올에 공급된 증류수 양의 증가에 의해 CO, THC의 배출 농도가 크게 증가함은 공급된 연료의 연소효율 저하에 기인하는 것이며 이러한 현상은 Fig. 11의 열효율 결과에서도 확인할 수 있다.

Fig. 12는 충상 분사시 열효율의 결과이다.

경유만을 연소했을 경우에 비해 충상 분사함에 따라 열효율이 다소 감소하고 있고 “DM33”의 조건에서 최대 약 9%까지 감소된다.

4. 결론

경유와 메탄올의 충상분사시 연소특성과 배기특성을 확인한 결과는 다음과 같다.

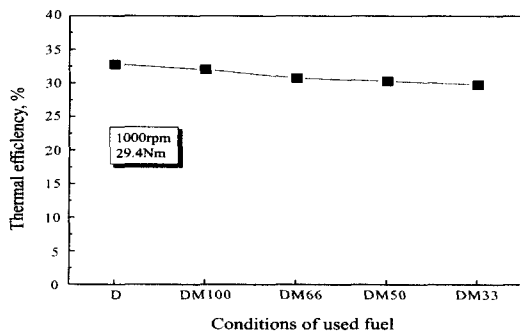


Fig. 12 Results of thermal efficiency using stratified injection

1) 충상 분사된 메탄올의 증류수 혼합량이 증가할 수록 착화시기와 연소최고압력 발생시기가 지연되고 연소최고압력이 낮아진다.

2) 경유-메탄올 충상분사에 의해 예혼합 연소기간이 증가하게 되고 상대적으로 연소속도가 느린 확산연소기간이 감소하여 전 연소기간이 최대 20%까지 단축되었다.

3) NOx는 경유만을 사용한 “D”의 경우에 비해 “DM100”에서 26.2% 정도 증가하고 공급된 메탄올의 증류수 혼합량이 증가함에 따라 NOx의 배출량이 감소하고 최대 “DM33”에서 19%까지 감소하는 것을 알 수 있다. Soot는 “DM100”에서 70.3% 감소하였고 공급된 메탄올의 증류수 혼합량이 증가함에 따라 다소 증가한다.

4) 충상 분사함에 따라 THC, CO의 배출농도가 증가하고 메탄올의 증류수 혼합량이 증가할수록 증가율이 커졌다.

5) 경유만을 연소했을 경우에 비해 충상 분사함에 따라 열효율이 다소 감소하고 “DM33”의 조건에서 최대 약 9%까지 감소된다.

후 기

이 논문은 2000년 에너지 기술 학술 진흥 사업의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) J. Senda, I. Hotta, D. Kawano, H. Fusimoto, “Fuel Design Concept for Low Emission in Engine Systems,” Proceeding of the 15th Internal Combustion Engine Symposium(International), pp.99-103, 1999.
- 2) Tsukahara, et al., “Effect of Cooling Loss Reduction on Reducing BSFC of a Diesel Engine Fueled by Emulsified Fuel,” Trans. JSME, 61-590, pp.3561-3566, 1995.
- 3) N. Miyamoto, et al., “Ultra Low NOx and Smokeless Diesel Combustion with Highly Oxygenated Fuel,” Proceedings of the 15th Internal Combustion Engine Symposium(International),

- pp.81-86, 1999.
- 4) 오영택, 近久 武美, “직접분사식 디젤 기관에서 합산소연료 첨가에 의한 매연 과 NOx 동시 저감에 관한 실험적 연구,” 한국자동차공학회 논문집, pp.104-164, 1996.
 - 5) 이형곤, 방중철, “화상 분석에 의한 디젤기관의 연소과정에 관한 연구-에탄올-경유 혼합 연료의 사용-,” 한국자동차공학회논문집, pp. 94-101, 2001.
 - 6) Ishida, et al., “Significant NOx Reduction Dissel Engine based on Electronically Controlled Port Water Injection,” Proceedings of the 22nd CIMAC, Vol. 4, pp.879-893, 1998.
 - 7) H. Imaji, et al., “Simultaneous Reduction of NOx and Smoke by Port Injection of Methanol/Water Blend in a D.I. Diesel Engine,” Proceedings of The 15th Internal Combustion Engine Symposium sium(International), pp.93-98.
 - 8) K. Takasaki, et al., “Improvement of Diesel Combustion with Stratified Fuel/Water Injection System,” Proceedings of the 4th COMODIA, pp.57 -62, 1998.
 - 9) K. Susumu, et al., “Reduction of Exhaust Emission with Fuel-Water Stratified Injection System in a Diesel Engine,” 第13回 内燃機關 Symposium 講演論文集, pp.465-470, 1996.
 - 10) T. Yozo, et al., “Stratified Fuel-Water Injection for Low-NOx Diesel Combustion,” 第10回 内燃機關 Symposium 講演論文集, pp.247 -252, 1992.
 - 11) T. Seko, “The Promise of New Technology in the Automobile Industry,” Proceedings of Society of Automobile Engineering, the18th FISITA Congress, pp.121-127, 1990.