

알코올을 보조적으로 사용한 직접분사식 디젤기관의 성능에 관한 고찰

Some Considerations for Performance of D.I. Diesel Engine Using Auxiliary Fuel Such as Alcohol

이 형 곤*, 방 중 철**
Hyeonggon Lee, Joongcheol Bang

ABSTRACT

The objective of this paper is to quantitatively investigate the effects of alcohol mixture on the combustion improvement of main fuel in supplying alcohol to direct injection diesel engine by auxiliary injection method and blend method. If alcohol is supplied, engine performance greatly improves in high load range. In case of supplying ethanol, BSFC improves, the emission of smoke and NO decreases by delaying main fuel injection timing 5°CA. The maximum delivery quantity of alcohol is limited to approximately 50% of total fuel delivery due to misfire and knocking. The limit quantity of main fuel injection that does not accompany misfire and the deterioration of BSFC was approximately 15 ~ 18.5mg/st.

주요기술용어 : Alcohol(알코올), D.I. Diesel engine(직접분사식 디젤기관), Smoke density(매연농도), NO(질소산화물), BSFC(제동연료소비율), Knocking limit(노킹 한계)

1. 서 론

천연 자원의 고갈 문제와 각종 유해 배출가스에 대한 문제가 심각해짐에 따라 내연 기관에 있어서도 이 두 가지 문제를 동시에 해결할 수 있는 대체 연료의 개발이 절실히 요구되고 있다. 내연 기관의 대체 연료 중, 특히 매연 및 질소산화물의 배출이 많은 디젤기관에 적용 가능한 대체 연료로써는 액화석유가스(LPG), 천연가스(LNG), 알코올 등이 있다. 이들 중 액화석유가스 혹은 천연가스 등의 가스체 연료를 디젤기관에 사용할 경

우에는 기관의 개조 범위가 매우 넓어지고, 연료의 누출에 대한 불안 및 공급의 어려움 등 여러 가지 문제점들이 따르기 때문에 환경 당국의 권장과 개조 비용의 지원에도 불구하고 적용률은 매우 낮은 실정이다. 한편 에탄올이나 메탄올 같은 알코올은 탄소수가 적고 분자 내에 산소를 함유하고 있기 때문에 연소성이 양호하여 무연연소가 가능하지만 높은 기화잠열, 낮은 세탄가와 높은 자기착화 온도 때문에 압축착화가 곤란하다. 이 때문에 알코올도 디젤기관에 그대로 사용하는 것은 쉽지 않다. 그러나 보조분사법^{1,2)}이나 혼합법³⁾ 등의 방법을 사용하면 천연가스나 액화석유가스 등 기체상의 연료를 디젤기관에 적용

* 회원, 성주통합고등학교 자동차과
** 회원, 금오공과대학교 기계공학부

시키는 방법보다 훨씬 간편하고 비용도 저렴하며 효과도 우수하다.

보조분사법은 디젤기관에 있어서 주연료의 분사에 앞서 주연료와 같은 연료 혹은 연소성이 나 착화성이 우수한 다른 종류의 연료를 흡기 중에 혼합하거나 압축 행정의 초기에 분사하는 방법으로써 연소기구나 연소개선효과에 대해서는 이미 알려져 있다. 혼합법은 경유와 알코올을 일정비율로 혼합시킨 후 주분사 노즐을 통해 실린더 내에 분사하는 방법으로써 알코올의 기화에 의한 연소 영역의 냉각 효과에 따른 질소산화물의 저감과 연료 액적의 미립화 증진 및 신속한 증발에 의한 가연혼합기의 형성이 촉진됨으로써 연소개선효과가 기대된다.

그 동안 디젤기관에 알코올을 적용하기 위한 연구들^{4,9)}은 여러 차례 발표되었으며 나름대로의 성과들을 발표하였으나, 국내에서는 아직까지 실용화 단계에 이르지 못하고 있다.

따라서 필자들은 디젤기관의 대체 연료로써 알코올의 우수성을 입증하고 실용화에 접근할 목적으로 몇몇의 기초적인 실험을 하였다.

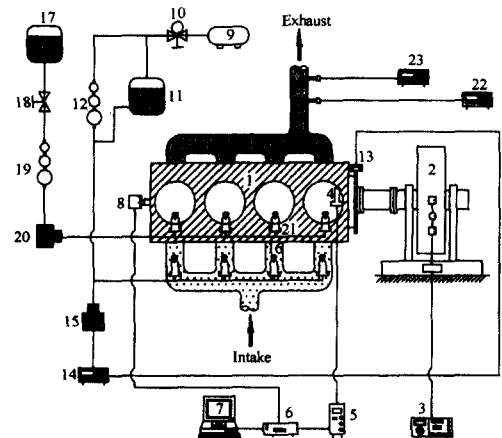
전보¹⁰⁾에서는 단기통 기관을 개조하여 만든 가시화 기관을 이용하여 “알코올 - 경유” 혼합 연료의 착화에서부터 연소 종료까지의 연소 과정을 촬영하고 착화 직후의 화염거동 및 화염의 발달상태, 연소 기간 등을 화상으로 분석하여 알코올 혼합기의 영향에 의한 연소개선효과를 직접 확인 할 수 있었다.

본 연구에서는 알코올 혼합기가 주분무인 경유의 연소개선에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하기 위하여 열효율은 높으나 매연, 질소산화물 등의 배출이 많은 직접분사식 디젤기관에 보조분사법과 혼합법을 사용하여 알코올을 공급하고 제동평균유효압력(BMEP), 제동연료소비율(BSFC) 및 열발생률 등의 기관출력성능개선과 CO, HC, NO 및 매연 등의 배기가스 저감에 미치는 효과를 알코올 공급방법별로 비교 고찰하였다. 또 알코올의 최대 공급량이 어떠한 요인에 의해 제한을 받는지에 대해서도 검토함과 동시에 실제

기관에 유효하게 이용할 수 있는 수법도 제시함으로써 실용화에 대비하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 실험에 사용된 기관은 4행정 직접분사식 디젤기관으로 주요 제원은 Table 1에 나타내었다.



- 1. Test engine
- 2. Dynamometer
- 3. Dynamometer controller
- 4. Pressure transducer
- 5. Charge amplifier
- 6. Terminal board
- 7. Personal computer
- 8. Encoder
- 9. Air compressor
- 10. Pressure control valve
- 11. Alcohol tank
- 12. Alcohol flowmeter
- 13. Photo-diode
- 14. Pulse transducer
- 15. Alcohol injector controller
- 16. Alcohol injector
- 17. Diesel oil tank
- 18. Check valve
- 19. Diesel oil flowmeter
- 20. Fuel injection pump
- 21. Fuel injection nozzle
- 22. Exhaust gas thermometer
- 23. Exhaust gas measurement unit

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of the experimental engine

Items	Specifications
Engine type	4-Stroke direct injection diesel engine
Number of cylinder	4
Displacement (cc)	3455
Bore x Stroke (mm)	100 x 110
Compression ratio	14
Injection timing	22°BTDC

기관의 회전수와 부하의 조정은 와전류식 동력계를 사용하여 제어하였으며, 실린더 내의 지압선도 채취는 압전형 압력변환기(piezoelectric pressure transducer)로부터의 출력을 크랭크 축 0.5° 회전마다 디지털로 변환시켜 기록하였다.

알코올을 흡기관 내에 공급하는 방법에는 액체의 상태로 인젝터를 통해 분사하는 방법과 배기가스의 폐열을 이용하여 기화시켜 공급하는 방법이 있다. 본 연구에서는 예비 실험을 통하여 두 가지 경우 모두 지압선도를 채취하고 매연 농도 등을 측정하여 비교한 결과 우열을 가릴 수 없어 실용화에 편리한 액체 상태로 공급하는 방법을 택하였다. 실험에 있어 알코올은 약 2kg/cm²으로 가압되어 전자식 인젝터가 열리는 기간만큼 흡기관 내에 분사된다. 인젝터의 개방 기간은 인젝터 구동장치의 펄스변환기에 의해 0에서 99.9ms까지 임의로 조정하는 것이 가능하다.

한편 알코올과 경유의 혼합 연료는 알코올의 함량이 많아질수록 시간의 경과와 더불어 상분리가 일어나므로 n-butanol을 약 4%(Vol.%) 혼입시켜 상분리를 방지하였다. 또 알코올의 단위체 적당 발열량은 경유에 비하여 매우 작으므로 알코올의 혼합량이 많아질수록 공급 열량이 부족하여 출력이 저하된다. 따라서 연료분사펌프의 랙(rack) 위치를 옮겨 최대 분사량을 증가시켰다. 단, 실험에 사용된 알코올은 순도 99.5%의 에탄올과 99%의 메탄올이며, 매연 농도 측정시 사용한 매연 테스트는 검출지의 농도를 -0.6에 맞추도록 되어 있다. 마지막으로, 기관 성능의 측정에 있어서는 연료소비율이 높고 매연 등의 발생이 많은 1000rpm에 중점을 두고 고찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 알코올을 흡기관에 보조 공급한 경우의 기관 성능

먼저 알코올을 흡기관 내에 액체 상태로 공급한 경우에 있어서 주연료의 착화시기 및 연소기간이 어떻게 변화되는지를 알아보기 위하여 지

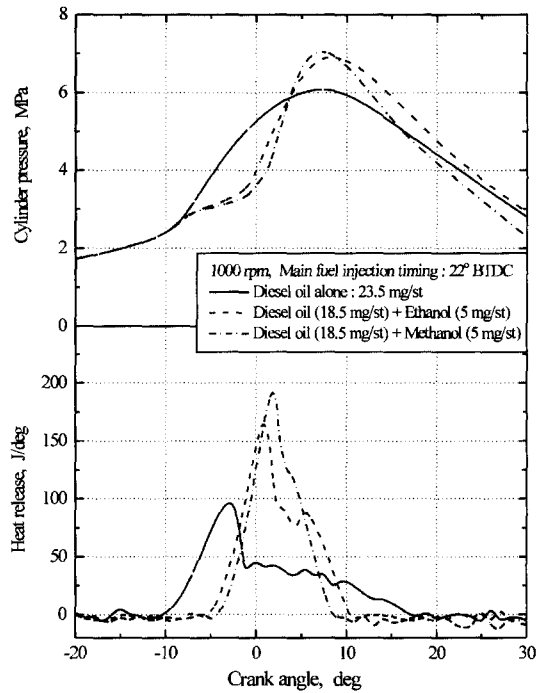


Fig. 2 Diagram of cylinder pressure, heat release with and without the supply of ethanol or methanol

압선도를 채취하여 해석하여 보았다. 그 일례를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 의하면, 경유만을 분사한 경우에 비하여 알코올을 공급한 경우에는 주연료의 착화지연기간이 약 5~6°CA 정도 길어진 반면 예혼합연소량이 증가되어 크랭크 각에 따른 열발생률이 매우 커짐을 알 수 있다.

또 알코올 공급량의 증가에 따른 흡기 온도의 저하를 나타낸 Fig. 3에 있어서는 약 5mg/st 정도의 소량 공급에도 흡기 온도는 10~15°C 정도 저하되었으나, 공급량을 늘려도 흡기 온도의 저하는 더 이상 일어나지 않았다. 이것은 흡기관 내에서 기화시킬 수 있는 알코올의 양에는 한계가 있음을 보여주는 것이며, 기화되지 못한 여분의 공급량은 액체 상태로 실린더 내에 유입되어 실린더 벽이나 피스톤 등에 부착되었다가 압축 행정 중 서서히 증발함으로써 실린더 내의 공기 온도를 떨어뜨리게 되고, 따라서 알코올의 공급량이 증가할수록 착화지연기간이 조금 길어질 것으

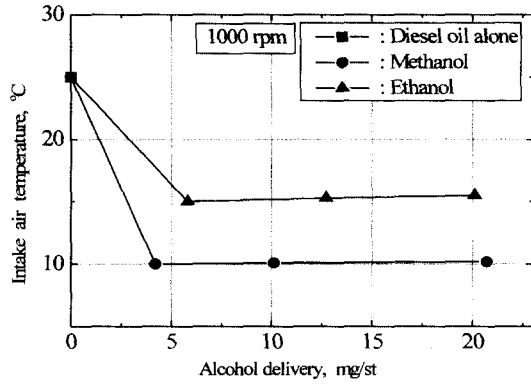


Fig. 3 Effect of alcohol delivery on intake air temperature

로 생각된다. 그러나 Fig. 2나 전보¹⁰⁾의 화염사진을 통한 고찰에서 알 수 있듯이 알코올이 혼합된 경우의 화염은 발화핵의 형성은 조금 지연되었으나, 발화 후의 연소과정은 급격하여 캐비티로부터 압축간극부로의 화염분출이 빠르고, 또 분출량도 많아 화염이 거의 연소실 전역까지 확산됨을 확인하였다. 이러한 사실을 미루어 볼 때 발화핵의 형성은 늦어졌으나 연소 기간이 매우 단축되어 발화핵의 형성이 지연된 시간만큼 주연료분사시기를 앞당기지 않아도 연소상태가 양호할 것으로 예측되어진다.

이것을 확인하기 위하여 주분사시기를 27°BTDC에서 12°BTDC까지 5°CA씩 변화시켜 기관 성능을 측정된 결과, 27°BTDC와 12°BTDC에서는 제동연료소비율이 현저하게 악화되었으며, 실험 기관의 정규 분사시기인 22°BTDC와 17°BTDC에서의 측정 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에 의하면, 제동연료소비율은 에탄올을 공급한 경우에 있어서는 17°BTDC, 메탄올을 공급한 경우에 있어서는 22°BTDC에서 개선됨을 보여주고 있다. 또 매연은 어느 알코올을 공급하더라도 주분사시기에 영향을 받지 않고 거의 무색으로 나타났으며, NO 농도는 두 알코올 모두 주분사시기를 17°BTDC로 지연시키는 쪽이 저하됨을 알 수 있다. 한편 CO 및 HC의 농도는 주분사시기의 영향을 거의 받지 않아 기술을 생략한다.

여기에서 에탄올과 메탄올을 공급할 경우에

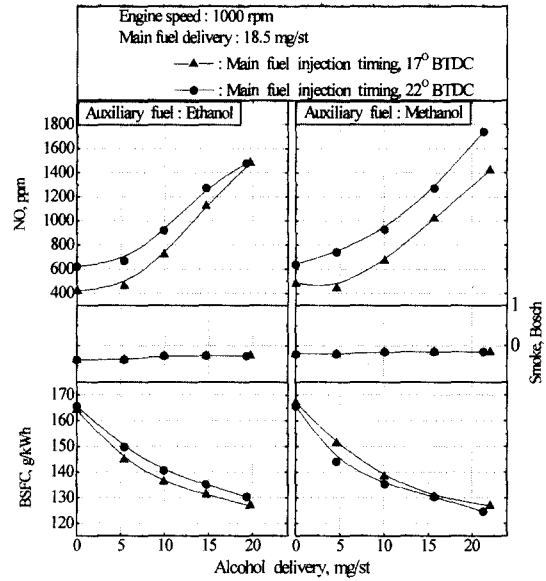


Fig. 4 Effect of main fuel injection timing on BSFC and exhaust emission

주연료의 최적분사시기를 더욱 명확히 파악할 목적으로 22°BTDC와 17°BTDC에 있어서의 열발생률을 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 주분사시기를 22°BTDC로 해서 에탄올을 공급한 경우에는 TDC 전에 상당량의 열발생을 볼 수 있다. 압축 행정중의 열발생은 부(-)의 일량이므로 주분사시기가 17°BTDC인 경우에 비하여 제동연료소비율이 약간 악화된다. 또 동일 분사시기에 있어서 열발생률 곡선을 비교하여 보면 메탄올을 공급한 경우의 곡선이 약 2°CA 정도 우측으로 이동되어 있음을 볼 수 있다. 이것은 메탄올의 기화잠열이 에탄올보다 크기 때문인 것으로 생각되며, 이 경우에는 에탄올을 공급한 경우처럼 주분사시기를 17°BTDC로 늦추지 않더라도 기관의 정규 분사시기에서 양호한 연소상태를 얻을 수 있음이 판명되었다.

한편 알코올의 최대 공급량은 실화와 노킹에 의해 제한된다. 이러한 점을 관찰하기 위하여 Fig. 6(a)와 (b)에서는 주연료인 경유와 보조연료인 알코올의 공급비율이 실화와 노킹의 한계에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하였다. Fig. 6(a)

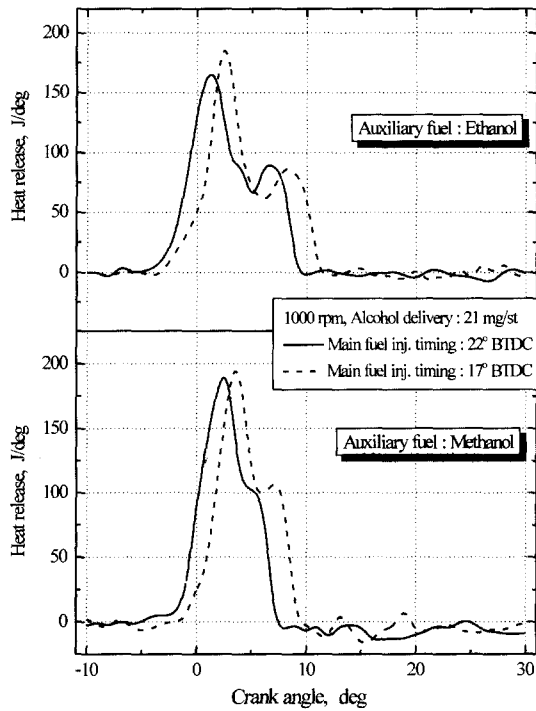


Fig. 5 Effect of main fuel injection timing on heat release

는 주분사시기를 17°BTDC로 하고 에탄올의 공급량을 변화시켜 실화와 노킹의 한계를 나타낸 것이며, Fig. 6(b)는 주분사시기를 22°BTDC로 하고 메탄올의 공급량을 늘려가면서 실화와 노킹의 한계를 나타낸 것이다. 앞서 기술한바와 같이 알코올의 공급량이 늘어나면 착화지연기간이 길어지게 되고 그 사이 주연료로부터 형성된 다량의 예혼합기가 일시에 폭발을 일으켜 노킹을 가져올 것이라는 것은 충분히 예측할 수 있다. 이로 인해 알코올의 공급량이 증가할수록 노킹을 일으키지 않게 공급할 수 있는 주분사량은 줄어들게 된다. Fig. 6(a)와 (b)에서는 이러한 사실을 정량적으로 잘 나타내고 있다. 더욱이 기화잠열이 큰 메탄올의 경우에는 공급량이 늘어날수록 주연료의 분사량을 보다 더 많이 줄이지 않으면 안 된다는 것을 알 수 있다.

한편 실화를 일으키는 한계분사량은 보조연료의 분사량보다도 주분사량에 의해 지배되는 것으로 생각된다. 이와 같은 한계주분사량은 에

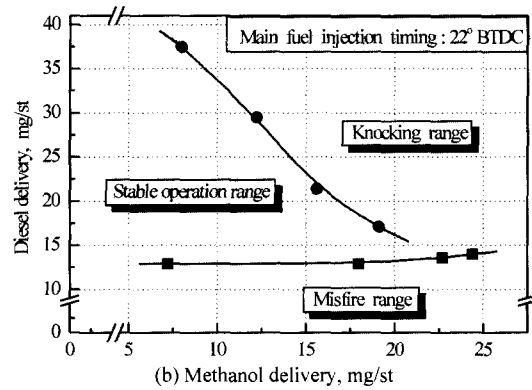
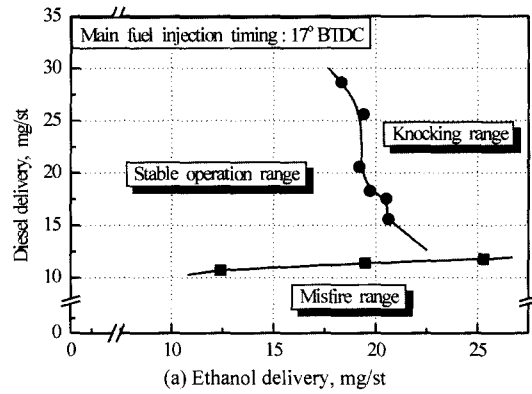


Fig. 6 Limit of knocking and misfire on main flame with the supply of ethanol or methanol

탄올의 경우에는 약 11mg/st, 메탄올의 경우에는 약 13.5mg/st였으며, 또 실화를 일으키지 않으면서 연료소비율도 악화되지 않는 한계주분사량은 에탄올의 경우에는 약 15mg/st, 메탄올의 경우에는 약 18.5mg/st으로써, 각각 실화한계량보다 약 5mg/st 정도 많은 양이다.

Fig. 7은 지금까지의 고찰 결과에서 최적의 연소상태를 얻을 수 있었다고 생각되는 조건으로 기관을 운전하여 성능을 측정된 결과이다. Fig. 7에 의하면, 에탄올 및 메탄올의 어느 경우를 공급하여도 거의 동등한 정도의 제동연료소비율이 얻어지고 있으며, 중부하 영역을 넘어 고부하 영역으로 갈수록 경유만을 분사한 경우에 비하여 제동연료소비율이 현저하게 개선되고 있음을 보여주고 있다. 또 매연도 전부하 영역에 걸쳐서 거의 배출이 없어 무연 연소가 가능함을 알 수 있

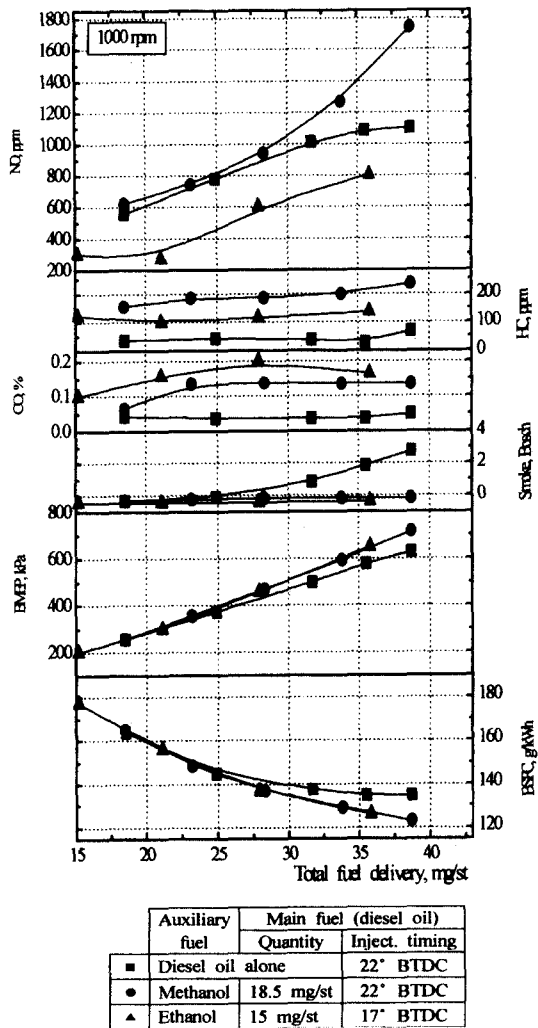


Fig. 7 Engine performance of optimum operation condition in this experiment

다. 그러나 CO 및 HC의 배출은 주분사만을 한 경우에 비하여 약간 증가하였으나 배출량 자체가 작아 문제되지는 않을 것으로 생각된다. 한편 NO 농도는, 에탄올을 공급한 경우에는 주분사시기를 5°CA 늦추었기 때문에 억제 가능하였으나, 메탄올을 공급한 경우에는 중부하 영역까지는 경유만 분사한 경우와 비슷한 농도를 보이고 고부하 영역에서는 상당량 증가하였다. 이것은 긴 착화지연기간을 거친 후의 급격한 연소 발열에 의한 실린더 내의 온도 상승이 원인일 것이다.

3.2 알코올과 경유의 혼합 연료를 분사한 경우의 기관 성능

앞 절에서처럼 알코올을 흡기관 내에 직접 공급하는 방법에서는 예혼합연소량이 증가하여 착화 직후의 연소가 매우 급격하였다. 이에 비하여 알코올과 경유를 혼합하여 주분사 노즐을 통하여 실린더 내에 직접 분사하는 방법은 예혼합연소량을 줄일 수 있어 충격적인 연소를 피할 수 있고, 노킹의 발생도 제어할 수 있어 정속한 운전이 가능할 것으로 예상된다. 본 절에서는 에탄올과 경유의 혼합 연료를 실린더 내에 직접 분사한 경우에 있어서의 기관 성능에 관하여 고찰한다. 참고적으로 알코올과 경유의 혼합 연료를 실제의 기관에 유효하게 이용하기 위해서는 상분리를 방지하여야 하며, 에탄올과 경유의 혼합비율 50:50(Vol.%)까지는 n-butanol 4~5%의 혼입으로 상분리가 해결된다. 그러나 메탄올의 경우에는 메탄올의 공급량에 상당하는 만큼의 n-butanol을 혼입시키지 않으면 상분리가 일어난다. 그러므로 혼합 연료의 실제 적용에는 에탄올을 사용하는 것이 편리하다.

먼저 혼합 연료 사용시의 최적 분사시기를 예비 실험에서 고찰한 결과, 에탄올의 혼합비율에 관계없이 17°BTDC에서 최량의 제동연료소비율과 NO 농도를 얻었다.

Fig. 8은 전체 공급연료의 50%에 상당하는 에탄올을 경유와 혼합하여 실린더 내에 직접 분사하거나 흡기관 내에 공급한 경우에 있어서의 기관 성능을 주연료만 분사한 경우와 비교한 것이다. Fig. 8에 의하면, NO 농도는 혼합 연료를 사용하여 운전한 경우가 흡기관 내에 에탄올을 직접 공급한 경우보다 전체의 부하 영역에 걸쳐 감소됨을 보여주고 있으나, 제동연료소비율과 매연 농도는 고부하 영역에서 약간 증가되고 있음을 볼 수 있다. 이 원인을 규명하기 위하여 전부하로 기관을 운전하고 지압선도를 채취하여 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9에 의하면, 혼합 연료는 단위체적당의 발열량이 적기 때문에 연료분사기간이 매우 길어

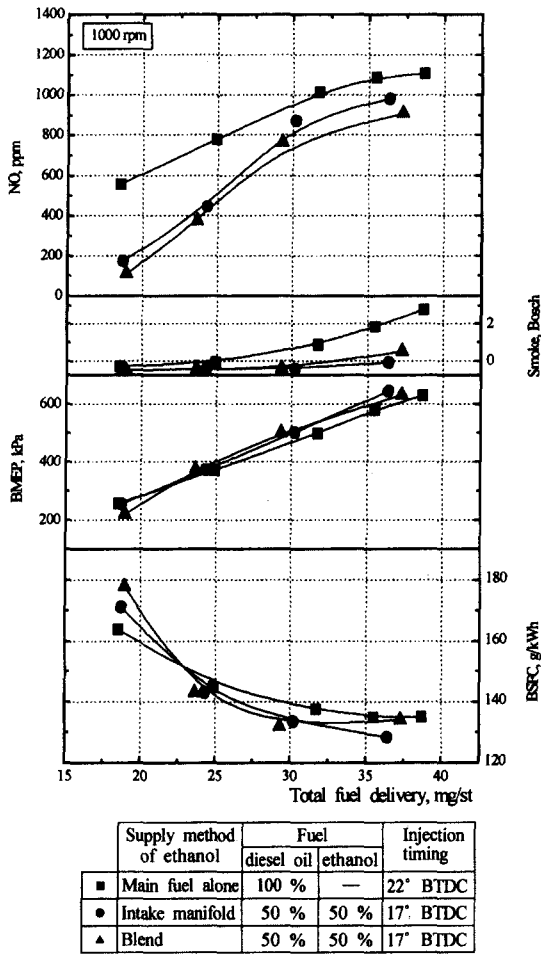


Fig. 8 Effect of supply method of ethanol on engine performance

지게 된다. 따라서, 고부하 운전에서는 압축 간극 부나 cavity 내의 잔류 배기가스 내에 전회 분사된 연료가 미연소 혹은 불완전연소된 상태로 남아 있고 그 위에 또 다량의 연료가 분사되므로 해서 매연 발생의 원인이 된 것으로 생각되며 자연적으로 후연소기간이 길어짐으로 인해 열발생을 곡선에서도 볼 수 있듯이 팽창 행정 중에도 작은 열발생이 이어지고 있다. 또, 혼합 연료를 분사한 경우에는 착화 전에 형성되는 예혼합기의 양이 비교적 적기 때문에 착화 직후의 연소는 알코올을 흡기관 내에 직접 공급한 경우 만큼은 급격하지 않고 배기가스의 온도도 저하됨으로

해서 NO 농도도 낮아진 것으로 생각된다. 이상과 같이 혼합 연료를 사용하면 흡기관 내에 에탄올을 직접 공급한 경우에 비하여 NO의 저감에는 유리하나 부하가 커질수록 매연 농도와 제동연료소비율의 저감에는 불리하다. 한편, Fig. 8에서 2가지 방법으로 알코올을 기관에 공급한 경우와 주연료만을 분사한 경우의 기관 성능을 비교하여 보면, 알코올 공급의 경우에는 중·고부하 영역에서는 제동연료소비율이 개선되었으나, 저부하 영역에서는 오히려 악화되었다. 이것은 저부하 운전에서는 알코올의 기화잠열에 의한 실린더 내의 온도 강하로 인해 노즐의 분류 주위에 형성된 희박혼합 영역에 존재하던 비말(fringe spray)이 착화에 이르지 못하고 미연소된 채로 배출되었기 때문으로 추측된다. 그러나 NO 농도는

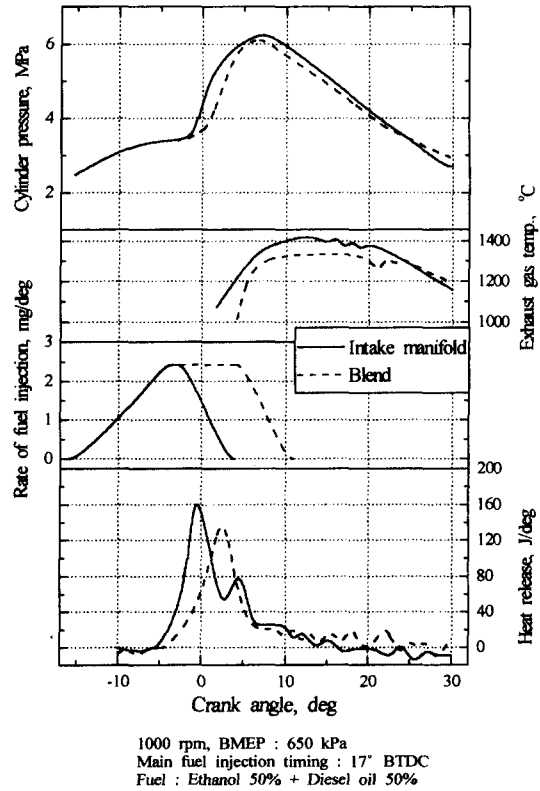


Fig. 9 Effect of supply method of ethanol on cylinder pressure, exhaust gas temperature and heat release at full load

전부하 영역에 걸쳐 주분사만을 한 경우보다 현저히 낮아졌으며, 매연농도 또한 고부하 영역으로 갈수록 개선효과가 커짐을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 직접분사식 디젤기관에 흡기관 내 보조분사법과 연료 혼합법에 의하여 알코올을 기관에 공급하고 알코올의 혼합비가 주연료의 연소개선에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하였다. 또 이러한 알코올 공급 방법들의 실용화에 있어 유리한 방법도 검토하였다. 그 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1) 디젤기관의 성능 개선을 위한 방법은 여러 가지를 생각할 수 있으나, 알코올을 보조적으로 공급하여 기관의 성능을 개선하는 방법은 기관을 개조하지 않고도 쉽게 적용시킬 수 있으며 개선효과도 우수하다.

2) 알코올을 공급하면, 특히 연료소비율이 악화되고 매연의 발생이 많은 고부하 운전에서 기관의 성능개선효과가 크고, 에탄올을 공급하는 경우에는 주연료분사시기를 5°C 정도 늦추어 줌으로써 연료소비율 및 매연의 개선과 더불어 NO 농도의 저하 효과도 크다.

3) 알코올의 최대 공급량은 실화와 노킹에 의해 전체 공급량의 약 50%(Vol.%) 정도로 제한된다. 본 실험에서는 실화를 일으키지 않으면서 연료소비율도 악화되지 않는 한계주분사량이 약 15~18.5mg/st이었다.

4) 실용화에 있어서는, ① 기화잠열이 큰 메탄올보다 에탄올을 사용하는 편이 노킹이나 실화 방지 측면에서 유리하다. ② 혼합 연료를 공급할 경우에는 메탄올보다 에탄올을 사용하는 편이 상분리 방지에 유리하다. ③ 혼합 연료를 공급할 경우에는 적어도 약 4% 이상의 계면활성제를 혼합시켜야 하므로 적용의 편리성이나 기관성능 개선효과로 볼 때 흡기관 내 보조분사 하는 방법이 유리하다.

참고 문헌

- 1) Y. Hirako, M. Otha, "An Evaluation of Effect of Intake Fuel Addition on Performances with Various Prechambers on a Diesel Engine," JSME, Vol.13, No.63, pp.1104-1110, 1970.
- 2) T. Murayama, N. Miyamoto, T. Yamada, J. Kawashima, K. Itow, "A Method to Improve the Solubility and Combustion Characteristics of Alcohol-Diesel Fuel blend," SAE 821113, pp.3485-3503, 1982.
- 3) M. Alperstein, W. B. Swim, P. H. Schweitzer, "Fumigation Kills Smoke-Improves Diesel Performance," SAE Trans., Vol.66, pp.574-595, 1958.
- 4) W. L. Mitchell, T. A. Litzinger, D. A. Santavicca, "Neat Methanol Combustion in a D.I. Diesel Engine Using Catalytically Coated Glow Plugs," SAE 912418, pp.1893-1901, 1991.
- 5) J. R. Agama, D. L. Abata, M. E. Mullins, "Catalytic Ignition of Methanol in a Diesel Engine with a Platinum Coated Glow Plugs," SAE 911737, pp.1443-1450, 1991.
- 6) J. Kusaka, T. Saito, Y. Daisho, "Ignition and Combustion Characteristics of Glow-Plug Assisted D.I. Methanol Engine," JSAE, Vol.25, No.3, pp.75-80, 1994.
- 7) A. Kameoka, H. Orihashi, S. Shiga, T. Karasawa, T. Kurabayashi, "A Study of the Ignition Assistance Mechanism of Hot Surface in Alcohol Fueled Diesel Engine," JSAE, Vol.22, No.1, pp.15-20, 1991.
- 8) H. Ogawa, T. Chikahisa, N. Miyamoto, T. Murayama, "Combustion and Performance in Multi-spark-assisted Diesel Engine with Alcohol Fuels," JSAE, No.34, pp.86-93, 1987.
- 9) T. Seko, Y. Yoshida, I. Yamaguchi, M. Hori, E. Kin, "Engine Performance and Exhaust Emissions of Methanol Direct-Injection Spark Ignition Diesel Engine," JSAE, No.33, pp.49-57, 1986.
- 10) 이형곤, 방중철, "화상분석에 의한 디젤 기관의 연소과정에 관한 연구," 한국자동차공학회논문집, 제9권 제1호, pp.94-101, 2001.