

<기술논문>

메탄올-디젤기관의 스모크 저감에 관한 연구

한성빈* · 문성수** · 이성열***

(1996년 1월 18일 접수)

A Study on the Smoke Reduction of Methanol-Diesel Engine

Sung Bin Han, Sung Soo Mun and Songyol Lee

Key Words : Methanol-Diesel Engine(메탄올-디젤기관), Rate of Heat Release(열발생률), Fraction of Premixed Combustion(예혼합연소율), Optimum Injection Timing(최적 분사시기)

Abstract

The objective of this research is to apply effect of the pre-mixed combustion quantity and smoke emission in diesel engine. According as air fuel ratio is increased, emission of smoke concentration is linearly reduced. As Injection timing is advanced, smoke concentration is remarkably reduced. It is considered to be the primary cause of the increase in the premixed combustible mixture during long ignition delay period with advancing injection timing. Smoke is increased with increasing engine speed, so it is considered to be the primary cause of the increase of the mass of fuel injected. Smoke is decreased according to the increase of methanol volume ratio. It is considered that the primary cause of the increase in the quantity of pre-mixed combustion.

1. 서론

디젤기관의 스모크 배출은 연소실 내의 분위기, 즉 연소실 내의 압력과 온도에 지배를 받는다. 또한 연소실 내의 온도와 압력은 각 인자의 변화에 따라 그 크기가 변화된다. 연소실 내의 분위기가 스모크 생성과 산화의 비율을 좌우하여 스모크 배출량을 변화시키게 되므로, 연소실 내의 압력 및 온도의 영향에 직접적인 영향을 주는 인자를 규명해야 한다.⁽¹⁻⁵⁾

이와 같은 연소실 내부의 분위기를 파악하기 위

해서는 연소실 내의 압력과 온도 및 열발생률을 얻어내야 된다. 또한 스모크 배출은 공기와 연료가 혼합되지 않는 상태에서 연료의 열분해가 스모크 생성의 주 요인이며, 이는 확산연소의 특성이다. 따라서 스모크의 배출은 확산 연소의 양에 비례하며, 또한 확산 연소는 예혼합 연소의 양에 지배를 받게 된다.⁽⁶⁻⁹⁾ 따라서 본 연구에서는 분사시기, 기관회전수, 메탄올 혼입량을 실험변수로 채택하여 실험변수에 따른 스모크 배출 농도와와의 관계를 연소공학 측면에서의 해석을 기본 목적으로 하고 기관변수에 따른 어떤 인자가 스모크 배출에 직접적인 영향을 끼치는지를 파악한다. 이와 같은 디젤기관의 스모크 배출이 연소 측면에서의 해석이 보장이 되어 규명이 되면, 스모크 배출의 실험적 특성식을 창출할 수 있는 실험 상수의 결정을 위한 기본자료로 활용이 가능할 것으로 생각된다.

*인덕전문대학 기계과

**전남전문대학 자동차과

***성균관대학교 기계공학과

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 기관을 Table 1에 나타냈고, Fig. 1과 같은 실험장치를 구성하였다. 또한 연소실 내의 압력을 측정하기 위해, Fig. 2와 같이 분사노즐 상단부에 압력 변환기를 실린더 헤드에 삽입하여, 압력 변환기로부터 나온 신호는 충전증폭기를 거쳐 연소해석장치에 입력시킴과 동시에 크랭크 각도는 검출기로 측정하여 연소실 내의 압력과 크랭크 각도를 동기시킨다. 또한 흡기관에 메탄올을 공급하기 위해서는 Fig. 3과 같은 메탄올 공급량을 변경시킬 수 있는 회로를 구성하였다.

Table 1 Specification of test engine

| Item | Type |
|---------------------|--|
| Engine type | D. I. diesel, single cylinder, water cooled |
| Combustion chamber | toroidal chamber |
| Bore x stroke | 92×95mm |
| Displacement | 632cc |
| Compression ratio | 19 |
| Injection nozzle | pin type, 4-φ0.28, pressure 21.5 MPa, angle 145° |
| Fuel injection pump | KP-PER 1KZ, 75/1 NP K2 |

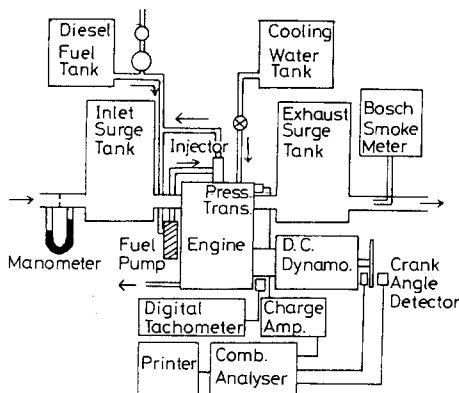


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험방법

스모크 배출 특성을 밝히기 위해 기관 변수로 분사량, 분사시기, 기관 회전수를 채택하였다.

분사량은 분사 펌프내의 플런저 배열의 양정을 조절할 수 있는 래크 조절장치를 별도로 제작하여 장착하였으며 래크 조절 장치를 단계적으로 변화시켜 분사노즐에 공급되는 연료의 양을 변화시켰다.

분사시기는 분사펌프와 크랭크 케이스와의 연결 부위에 가스켓을 끼워 넣어 가스켓 두께를 바꾸면 분사펌프의 롤러태핏과 캠축의 분사펌프 구동캠의 접촉 시기의 변화에 의해 변화되도록 설계되어 있지만, 이 경우는 크랭크 각도로 약 3° 밖에 변화되지 않는다. 분사시기 변화에 대한 스모크 배출 특성을 해석하기 위해 최대 45°까지 변화시킬 수 있는 장치를 제작하여 분사시기를 변화시켰다.

기관 회전수는 안정 운전이 되는 1400RPM으로 고정하고 분사시기와 공기 연료비를 변화시켜 분사

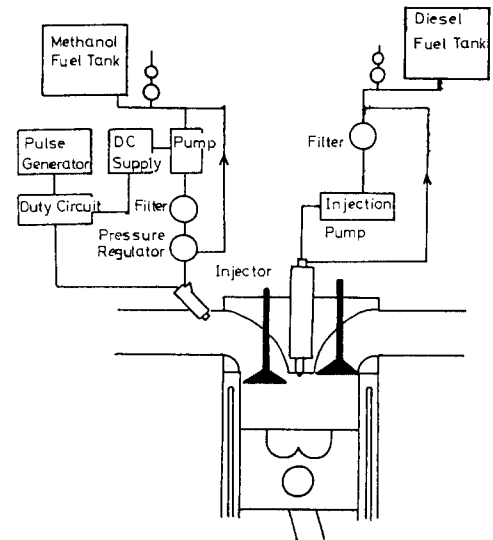


Fig. 2 Schematic diagram of diesel and methanol fuels supply system

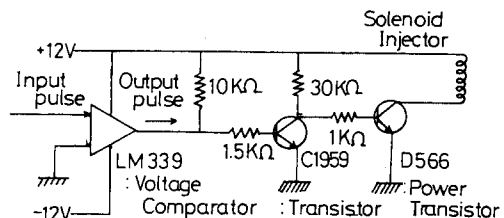


Fig. 3 Schematic diagram of duty circuit for methanol quantity control

시기와 공기 연료비에 대한 스모크 배출 특성을 파악하도록 하였으며, 기관 회전수 변화에 대한 스모크 배출 특성은 기관 주행시와 동일한 조건에 맞춰 결과를 얻도록 하였다.

메탄올 혼입량은 기관에 공급되는 메탄올과 경유의 체적비로서 계산을 하였다. 기관 운전중 메탄올 혼입량이 증가하여 기관 회전수가 ± 50 RPM 이상 변동이 되거나 부분적으로 실화가 일어나 압력 상승률이 가청 노킹 한계인 500 kPa/deg에 도달할 때를 안정운전한계로 설정하였다.

3. 스모크 배출과 확산연소와의 관계

디젤 기관의 열발생률 곡선은 Fig. 4 와 같이 일반적으로 나타낼 수 있다. 스모크 배출은 확산연소의 열량에 지배되며 확산 연소량은 먼저 발생된 예혼합 연소의 열량에 의해 그 크기가 변화된다. 예혼합 연소에 대한 스모크 배출의 관계를 규명하기 위해 식 (1)과 같이 예혼합 연소율 Fpr를 정의한다.

$$Fpr = Q_p / Q_t$$

Q_p : 예 혼합연소의 발생 열량, cal

Q_t : $Q_p + Q_d$, 총 발생 열량, cal

Q_d : 확산연소의 발생 열량, cal (1)

Fig. 5~7은 기관 회전수 1400 RPM에서 분사시기가 10°, 23°, 28° BTDC인 경우의 공기 연료비에 따른 열발생률 곡선을 나타내는 것으로서, 예혼합 연소량에 비해 증가되고 있지만 이 그림으로는

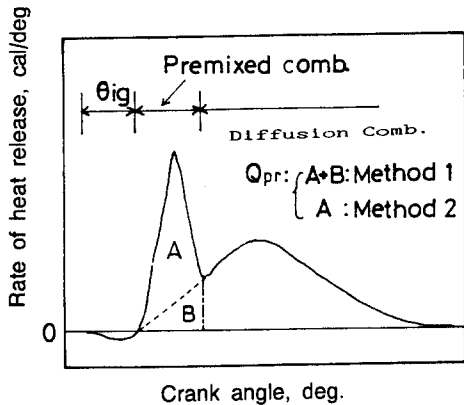


Fig. 4 Rate of heat release as a function of crank angle

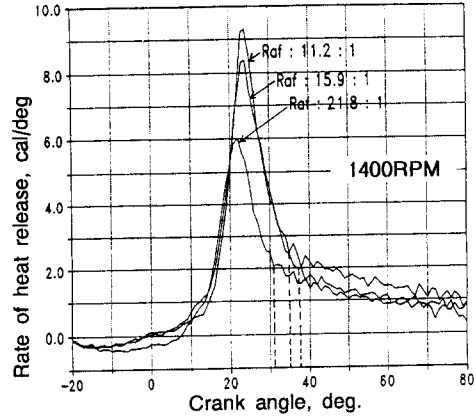


Fig. 5 Rate of heat release as a function of crank angle at various air fuel ratio, injection timing 10° btdc.

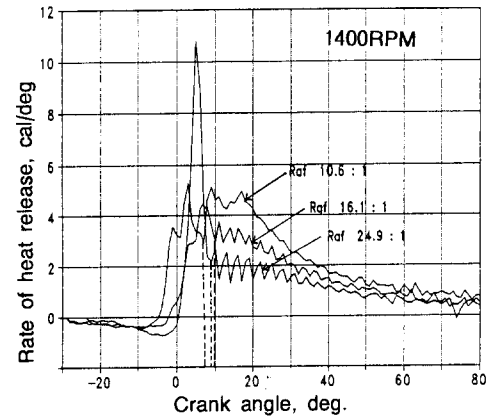


Fig. 6 Rate of heat release as a function of crank angle at various air fuel ratio, injection timing 20° btdc.

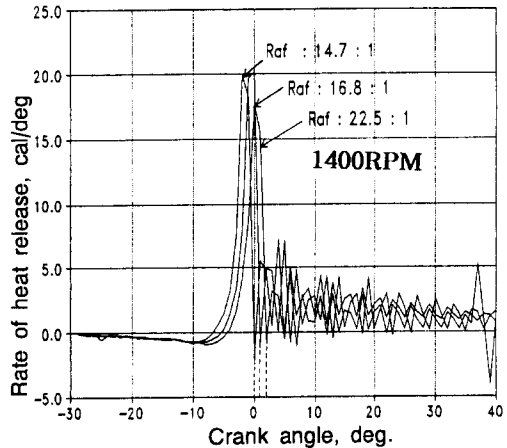


Fig. 7 Rate of heat release as a function of crank angle at various air fuel ratio, injection timing 20° btdc.

명확하게 비교가 되지 않는다.

따라서 각 경우에 대하여 예 혼합 연소율을 계산하여 Fig. 8과 같은 공기 연료비 변화에 대한 예 혼합 연소율을 얻어냈다. 그림에서 나타난 바와 같이 공기 연료비가 증가함에 따라 예혼합 연소율이 점차적으로 증가하고 있는데, 이는 확산 연소량에 비해 예혼합 연소량이 증가하는 경향을 보여주고 있다.

또한 예혼합 연소량은 점화 지연 시간과 관계가 있으며, Fig. 9는 공기 연료비에 따른 점화지연시간을 나타낸 것으로서, 공기 연료비가 희박하게 됨에 따라 점화지연시간이나, 예혼합 연소율은 동일한 경향으로 증가되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 기관 회전수 1400 RPM, 공기 연료비 20 : 1인 경우의 분사 시기 변화에 대한 예혼합 연

소율을 나타낸 것으로서 최적 분사 시기인 23° BTDC 에서 예 혼합 연소율이 가장 적게 나타나며, 분사시기를 진각 또는 지각시키게 되면 예혼합 연소율이 증가된다. 따라서 이 결과로부터 예혼합 연소율과 스모크 배출과의 관계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta S = -0.21 \cdot \Delta F_{pr}$$

ΔS : 스모크 배출, BSU

ΔF_{pr} : 예 혼합 연소율의 증가율, % (2)

즉, 예혼합 연소율이 10% 증가되면 스모크 배출은 2.1 BSU 만큼 감소하게 된다.

Fig. 11, Fig. 12는 기관 회전수 변화에 대한 열 발생률과 예혼합 연소율을 나타낸 것으로서, 이는 공기 연료비, 분사시기, 기관 회전수의 세 인자의

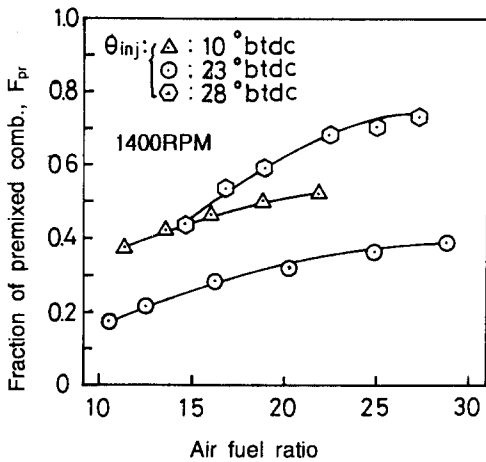


Fig. 8 Fraction of premixed combustion as a function of air fuel ratio at various injection timing of 10°, 20°, 28° btdc.

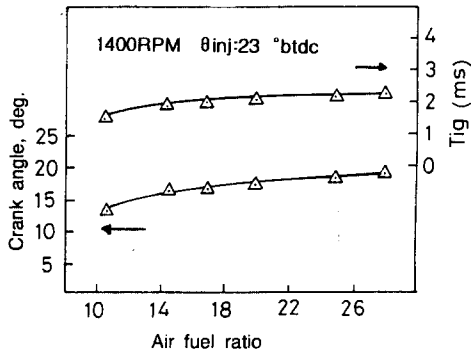


Fig. 9 Ignition delay as a function of air fuel ratio

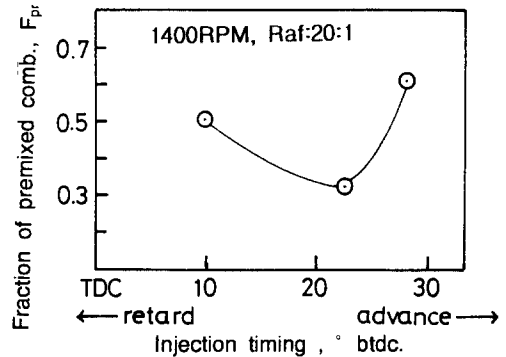


Fig. 10 Fraction of premixed combustion as a function of injection timing at air fuel ratio 20 : 1

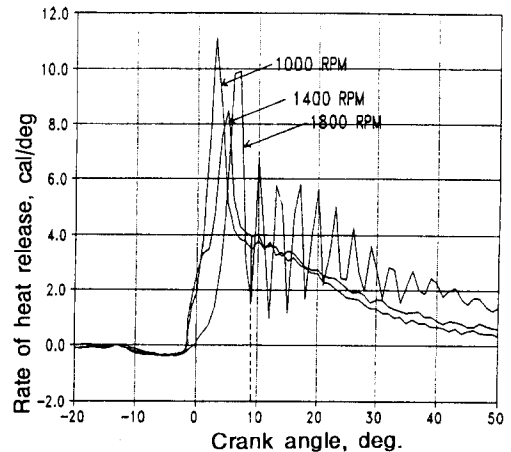


Fig. 11 Rate of heat release as a function of crank angle at various engine speed

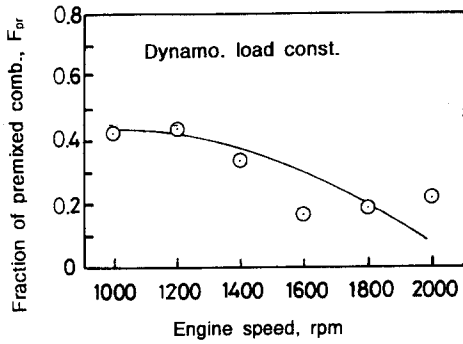


Fig. 12 Fraction of premixed combustion as a function of engine speed

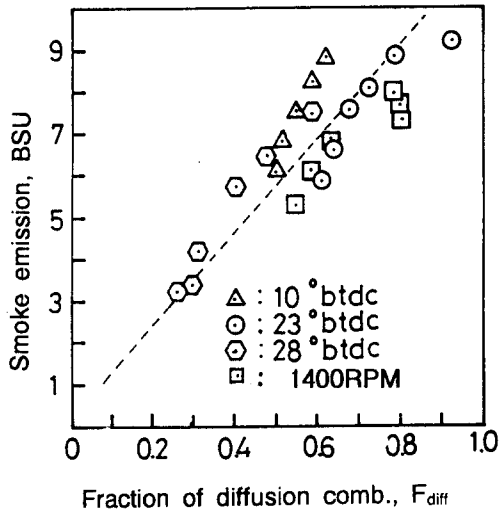


Fig. 13 Smoke emission and fraction of diffusion combustion as a function of engine variables

영향을 나타내며, 기관 회전수 증가에 따라 공기 연료비가 높추하게 되는 영향으로 인해 예혼합 연소율은 점차적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 이와 같이 기관 변수에 대한 스모크 배출과 예혼합 연소율과의 관계에 있어서, 스모크 배출과 예혼합 연소율은 서로 반비례하며, 식 (3)과 같은 확산 연소율의 정의에 따라 각 기관 변수에 대하여 스모크 배출과 확산 연소율을 총괄적으로 나타내면 Fig. 13과 같다.

$$F_{diff} = 1 - F_{pr}$$

$$F_{diff}; Q_{diff}/Q_t, \text{ 확산 연소율}$$

$$Q_{diff}; Q_t - Q_{pr}, \text{ 확산 연소량, cal} \quad (3)$$

이 그림에서 보는바와 같이 스모크 배출과 확산

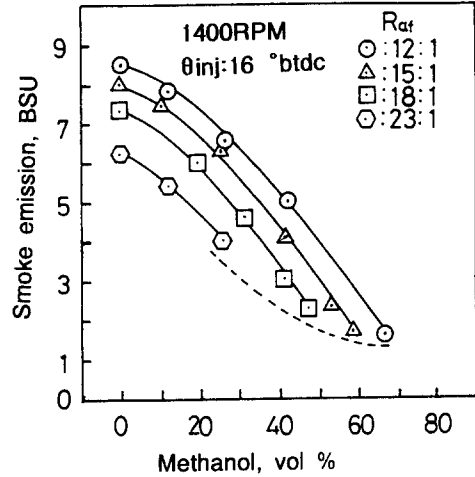


Fig. 14 Smoke emission at various air fuel ratio as a function of methanol vol %, engine speed 1400rpm and injection timing at 16° btdc.

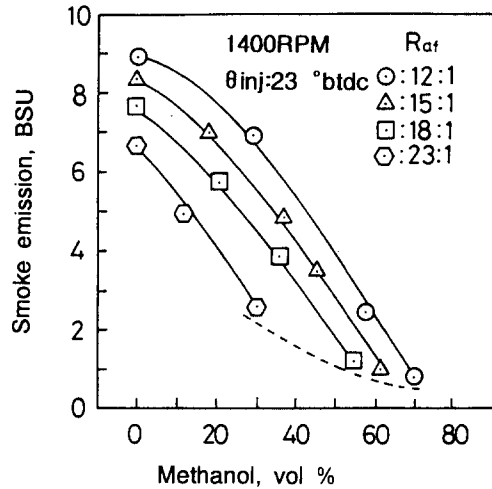


Fig. 15 Smoke emission at various air fuel ratio as a function of methanol vol %, engine speed 1400rpm and injection timing at 23° btdc.

연소율과는 정비례함을 알 수 있으며, 이는 스모크의 배출이 확산연소에 지배됨을 뒷받침하는 자료가 된다.

Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16 은 분사시기를 16°, 23°, 28° BTDC 로 설정한 경우, 메탄올 혼입량 (Vol, %) 변화에 따른 스모크 배출농도를 나타낸 것으로서 메탄올 혼입량을 증가함에 따라 비례적으로 감소하고 있음을 알 수 있으며, 메탄올 혼입량 증가에 따라 안정운전한계가 존재하게 되는데, 이

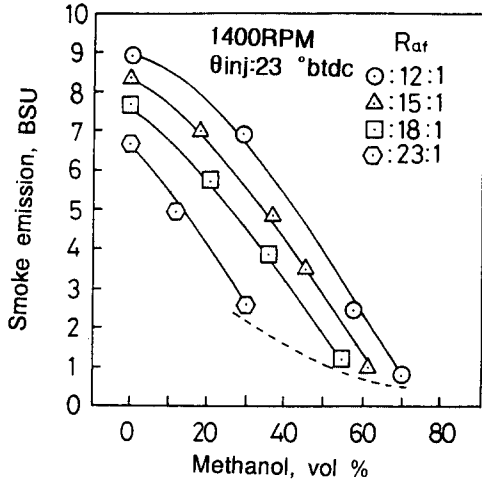


Fig. 16 Smoke emission at various air fuel ratio as a function of methanol vol %, engine speed 1400rpm and injection timing at 28° btdc

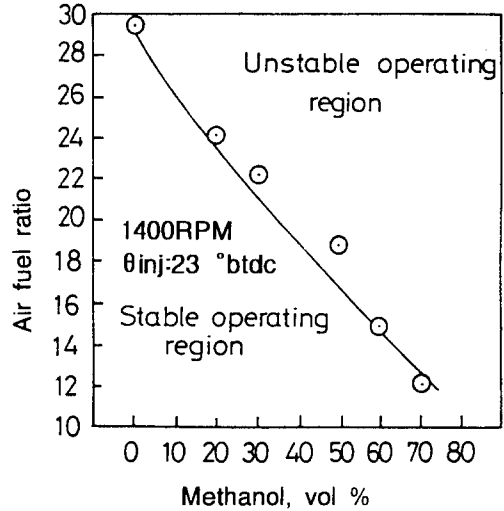


Fig. 17 Air fuel ratio as a function of methanol vol % for stable operating limit, engine speed 1400rpm and injection timing at 23° btdc.

는 메탄올 혼입량 증가에 따라 흡기관에 분사되는 메탄올 연료량이 증가하고, 많은 양의 메탄올 연료가 연소실내로 흘러 들어가 메탄올의 기화잠열에 의해 연소실내의 온도가 낮아지게 되어, 착화원인 분사된 경유가 증발에 필요한 열량을 흡수하지 못하기 때문에 실화가 일어나게 된다. 분사시기와 메탄올 혼입량에 따른 스모크 배출농도 측정으로부터, 분사시기가 16°, 23°, 28°BTDC인 경우의 공기 연료비에 대한 스모크 배출농도를 데이터로부터 산술평균으로 구한 결과로서 식 (4)와 같다.

$$\Delta S = -0.0885 \cdot \Delta MVR$$

ΔS ; 스모크 배출, BSU
 ΔMVR ; 메탄올 혼입률, Vol % (4)

식에서 나타난 바와 같이 경유와의 체적 비율로서 메탄올 혼입량을 10 % 증가시키면 스모크의 배출은 0.885 BSU 만큼 저감된다.

Fig. 17은 기관 회전수 1400 RPM 에서의 최적 분사시기인 23°BTDC에서 메탄올 혼입량에 따른 안정 운전한계 영역을 나타낸 것으로서, 메탄올 혼입량을 증가시키기 위해서는 착화원인 경유의 분사량을 증가시켜야 함을 알 수 있다.

Fig. 18은 메탄올 혼입량에 따른 열발생률 곡선으로 대표적으로 기관 회전수 1400 RPM, 분사시기 23°BTDC인 경우에 대하여 나타냈으며, 메탄올 혼입량 증가에 따라 예혼합 연소량이 점차적으로 커지는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 19와 같이 메탄

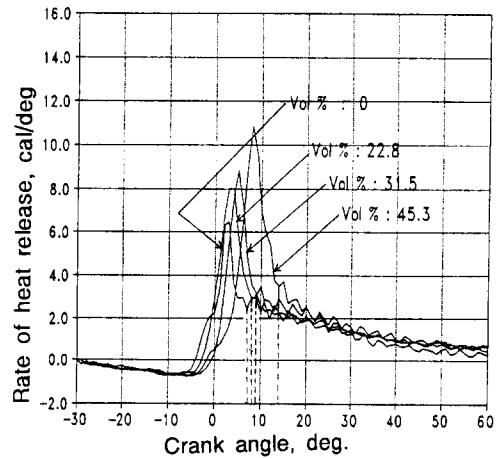


Fig. 18 Rate of heat release as a function of crank angle at various methanol vol %.

올 혼입량 증가에 따른 스모크 배출과 예 혼합 연소율의 감소 폭이나 증가폭은 서로 다르다. 따라서 메탄올 혼입에 따른 예 혼합 연소율과 스모크 배출과의 관계식을 직접적으로 나타내기 어렵지만, 메탄올 혼입량과 예혼합 연소율과의 관계식은 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta F_{pr} = 0.435 \cdot \Delta MVR$$

ΔF_{pr} : 예혼합 연소율의 증가, %
 ΔMVR : 메탄올 혼입량 증가, % (5)

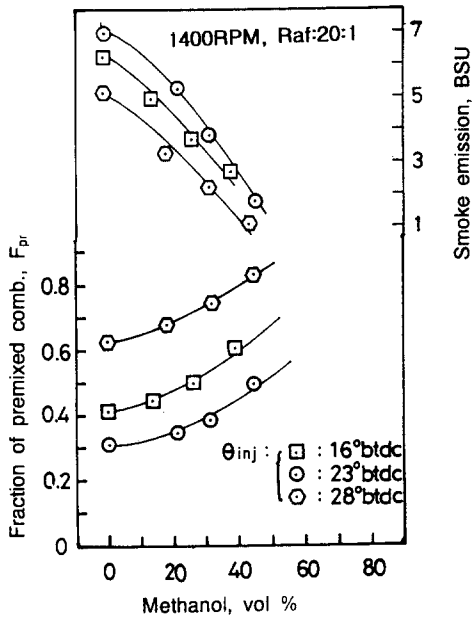


Fig. 19 Fraction of premixed combustion and smoke emission as a function of methanol vol % at various injection timing of 16°, 23° and 28° btdc.

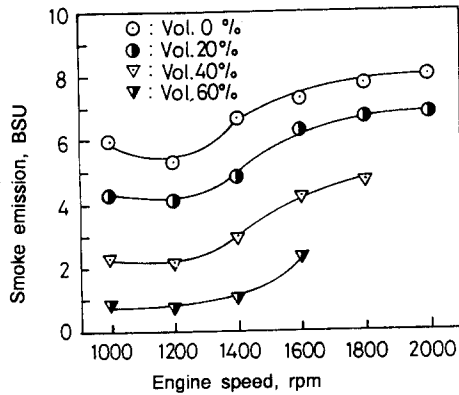


Fig. 20 Smoke emission at various methanol vol % as a function of engine speed.

즉, 메탄올 혼입량을 20% 증가시키면 예혼합 연소량은 8.7%가 증가된다.

Fig. 20은 기관 회전수에 대한 메탄올 혼입량에 따른 스모크 배출을 나타낸 것으로서, 메탄올 혼입량을 0%(경유100%), 20%, 40%, 60%로 변화시켰으며, 분사시기는 경유만으로 운전한 경우와 동일하게 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 각각의 기관 회전수에서 메탄올 혼입량을 증가함에 따라

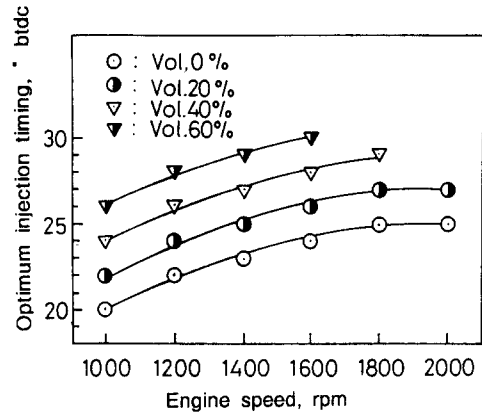


Fig. 21 Optimum injection timing at various methanol vol % as a function of engine speed.

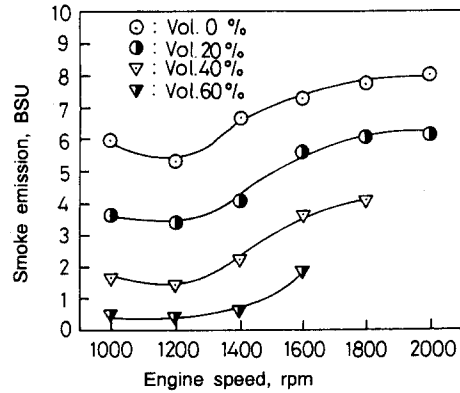


Fig. 22 Smoke emission at various methanol vol % as a function of engine speed at optimum injection timing.

스모크 배출은 저감되며, 각각의 기관 회전수에서의 메탄올 혼입량 증가에 따른 스모크 배출도 식 (4)를 만족한다.

또한, 메탄올 혼입량 증가에 따라 경유의 최적 분사시기는 Fig. 21과 같이 진각된다. 이것은 메탄올 혼입량을 증가시키기에 따라 메탄올의 기화에 필요한 열량의 증가로 인해 점화지연기간이 길어지기 때문이다. 그림에서 보는 바와 같이 메탄올 혼입량을 20% 증가시킬 경우 최적 분사시기는 2°BTDC 진각됨을 알 수 있다. 따라서 메탄올 혼입량에 따른 경우의 최적 분사시기와와의 관계는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \theta_{inj} = 0.1 \cdot \Delta MVR \quad (6)$$

$\Delta \theta_{inj}$; 분사진각, degree

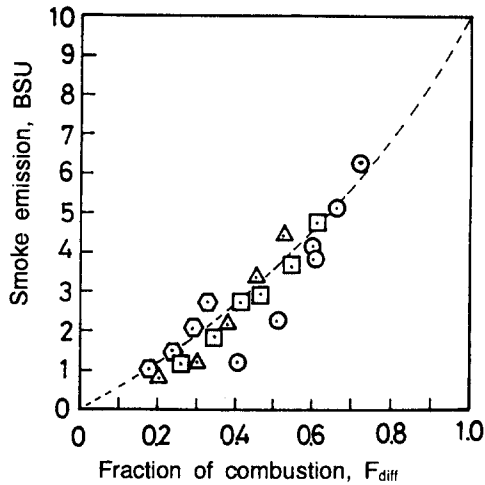


Fig. 23 Smoke emission and fraction of diffusion combustion as a function of methanol vol %.

메탄올 혼입량에 따라 분사시기를 최적으로 한 경우는 Fig. 22와 같으며, 각각의 기관 회전수에서 메탄올 혼입량을 증가시키기에 따라 분사 시기를 최적 분사시기로 한 경우가 분사시기를 일정하게 한 경우보다 평균적으로 0.5 BSU 만큼 저감되었다. 따라서 메탄올 혼입에 따라 예혼합 연소량이 증가됨으로써 상대적으로 확산 연소량은 저감되며 식 (3)에 의하여, 메탄올 혼입에 따른 확산 연소율과 스모크 배출과의 관계를 Fig. 23에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 확산 연소율과 스모크의 배출은 아래 복록 곡선을 따라 증가하는 관계를 보인다. 이는 Fig. 13의 직선적인 비례관계에서 이탈되는데 이것은 메탄올이 합산소 연료라는 특성을 가지고 있으며 이 특성이 스모크 배출에 영향을 주어 직선에서 이탈한 것으로 판단된다.

또한 연소 해석 장치에서 채취한 최고 압력값의 표준편차에 의해 식 (7)과 같은 사이클 변동계수 (CMPV)를 결정할 수 있다. 이 사이클 변동계수는 사이클 변동의 척도로 삼을 수 있다.

$$CMPV = \frac{\sigma}{(P)_{\max - \text{mean}}} \cdot 100, \%$$

σ : 최고 압력의 표준편차, bar
 CMPV : 최고 압력 변동계수 (7)

Fig. 24는 메탄올 혼입량에 따른 사이클 변동계수를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 메탄올 혼입량이 증가함에 따라 변동계수가 점차적으로 증가하고 있는데, 이는 메탄올 혼입량의 증가에 따라

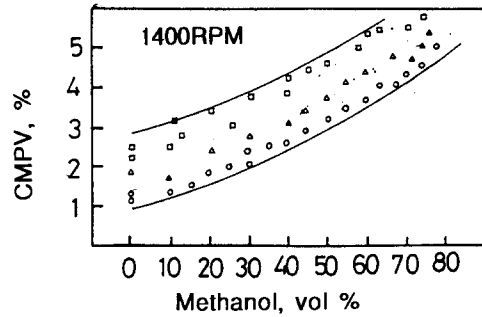


Fig. 24 CMPV as a function of methanol, vol %

메탄올과 공기의 혼합기가 연소실 내에서의 불균질의 분포에 의해 점화 지연 기간의 변동에 의하여 착화원인 경유의 다발 화염핵 형성의 변동에 의한 사이클 변동이 커지게 되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

(1) 공기 연료비가 희박함에 따라 예혼합 연소율이 점차적으로 증가되고 있음을 알 수 있다. 이는 분사 기간이 짧아지게 되어 확산 연소량을 좌우하는 Rich Core 영역의 연료가 감소하기 때문이다.

(2) 분사 시기가 진각됨에 따라 예혼합 연소율이 비례적으로 증가하는데, 이는 분사 시기가 진각됨에 따라 분사 시점의 연소실 내의 온도와 압력이 낮기 때문에 점화 지연 기간이 길어져 예혼합기량이 증가되기 때문이다.

(3) 기관 회전수가 증가함에 따라 스모크의 배출이 증가하는데, 이는 공기 연료비가 농후해지기 때문에 예혼합 연소율이 점차적으로 감소하는 경향으로 되며, 상대적으로 확산 연소율이 증가되기 때문이다.

(4) 메탄올 혼입량 증가에 따라 스모크 배출 농도는 선형적으로 감소한다. 이는 메탄올과 공기의 예혼합 형성에 의한 예혼합 연소율이 증가하게 되며, 상대적으로 확산 연소율이 감소하기 때문이다. 이와 같은 관계를 토대로 메탄올 혼입량에 따른 예혼합 연소율과 스모크 배출과의 관계식을 얻었다. 또한 메탄올 혼입량과 안정 운전 한계와의 관계도 밝혔으며, 메탄올 혼입량과 사이클 변동과의 관계도 규명하였다.

참고문헌

- (1) 佐藤豪, 飯田訓正, 1984, “ディーゼル機関の微

- 粒子狀排出物質の低減に関する研究(第1報, 酸素富和給氣の効果について),” 日本機械學會論文集, 51卷, 467號, pp. 2479~2486.
- (2) 中川泰彦, 1983, “火花塞火機關における燃焼のサイクル變動の研究,” 日本機械學會論文集, 50卷, 459號, pp. 2678~2685.
- (3) 村山正, 山田貴延, 1984, “ディーゼル機關の燃焼變動に関する研究,” 日本機械學會論文集, 51卷, 463號, pp. 946~953.
- (4) 廣安博之, 角田敏一, 1981, “直接噴射式ディーゼル機關の燃焼モデルと性能豫測,” 日本機械學會論文集, 48卷, 432號, pp. 1606~1613.
- (5) 村山正, 山根浩二, 1989, “ディーゼル機關の燃焼後期かく亂による黒煙およびNOXの同時低減に関する研究,” 日本機械學會論文集, 55卷, 517號, pp. 2919~2923.
- (6) 村山正, 1989, “ディーゼル機關において生成されるすす粒子の構造,” 日本機械學會論文集, 55卷, 518號, pp. 3251~3254.
- (7) Smith, O. I., 1982, “Fundamental of Soot Formation in Flames with Application to Diesel Engine Particulate Emissions,” *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 7, pp. 275~292.
- (8) 村山正, 藤原康博, 1989, “燃料性狀か”微粒子の生成に及ぼす影響,” 日本機械學會論文集55卷, 516號, pp. 2915~2918.
- (9) Vuk, C. T., Jones, M. A. and Johnson, J. H., 1976, “The Measurement and Analysis of Diesel Particulate Emission,” *SAE Paper, NO. 760131*.