

스파크 點火機關의 가솔린-메탄올 燃料를 사용한
機關燃燒 및 排氣性能에 관한 研究
A Study on Performance of Engine Combustion and Emission
Using Gasoline-Methanol Fuel in SI Engine

윤창식* 김치원**
C.S.Yoon C.W.Kim

ABSTRACT

In recent years, the study about the high efficiency and low fuel consumption of the internal combustion engine has been mainly proceeding. To achieve these goals, the improvement of combustion process in SI engine and the use of substitute energy are suggested.

When the methanol blend fuel is used, the combustion rate of the initial ignition is diminishing by high latent evaporation of methanol. But it attracts the attention because of the high octane number, and lean mixture peculiarity. Considering these facts, the gasoline-methanol blend fuel in engine operation has been used to compare and analyze the pressure development, rate of heat release, mass burned fraction, and combustion process. The results of experiment show the power increase, lean combustion and low harmful component of emission.

기 호 설 명

- A_1 : Area of flow pipe(m^2)
- A_2 : Area of nozzle(m^2)
- AF : Air-fuel ratio
- d : Diameter of inlet nozzle(m)

* (주) 효성기계연구소 연구원

** 正會員 : 경남대학교 기계공학과 교수

- $dm/d\theta$: Mass burned fraction at crank angle
- $dP/d\theta$: Rate of pressure rise at crank angle(kg/cm²/deg)
- $dQ/d\theta$: Rate of heat release at crank angle(cal/deg)
- $dT/d\theta$: Rate of temperature at crank angle(°C/deg)
- $dV/d\theta$: Rate of volume rise at crank angle(m³/deg)
- D : Cylinder bore(m)
- f_i : Indicated specific fuel consumption(g/ps/h)
- F : Fuel consumption in experimentation(kg/h)
- N : Engine speed(rpm)
- P_{mi} : Indicate mean effective pressure(=IMEP) (kg/cm²)
- $V(\theta)$: Cylinder volume at optional crank angle(deg.)
- χ : Mass rate of methanol(%)
- y : Mass rate of gasoline(%)
- λ : L/r(Length ratio of connecting rod and crank arm)

I. 序 論

1973년 부터 시작된 두차레의 석유과동으로 석유 에너지 자원은 전 세계적으로 커다란 문제가 되었다. 내연기관에서도 에너지의 고효율화, 저연료소비화가 추진되어 많은 연구가 진행되어 왔다. 이와 더불어 배기가스의 공해도 산업안전 및 복지에 심각한 문제가 되어 배기가스의 공해성분 저감도 함께 연구되고 있다.

이들 문제를 해결하기 위한 방법으로는 연소후의 후처리방법 보다는 근본적인 해결방법이 요구된다. 이 근본적인 해결방법으로는 기관내에서의 연소과정의 개선과 대체에너지 개발을 필요로하고 있다¹⁾.

국외에서는 석유계연료의 대체연료로 알코올을 대체연료로 사용하는 기관을 실용화하고 있고,²⁻⁵⁾ 석유계연료의 단점을 보완하고 배기가스의 유해성분을 저감하는 방향으로 연구하고 있다.

내연기관에서 가솔린-메탄올 혼합연료를 사용시 메탄올의 높은 기화잠열로 인하여 연소 초기의 연소율이 다소 낮아지는 결점이 있으나 높은 옥탄가,⁶⁾ 희박혼합기 연소특성 등을 이용하여 출력 및 열효율을 향상시키고, 배기가스 중의 HC 및 CO의 성분⁷⁾을 저감할 수 있다는 점에서 크게 주목받고 있다.

이와같은 점을 고려하여 가솔린-메탄올 혼합연료

를 사용하여 기관을 운전함으로써 출력향상, 희박연소 및 배기가스의 유해성분의 저감에 대하여 비교분석하여 가솔린-메탄올 혼합연료의 실용화에 대한 타당성을 제시하려는데 목적이 있다. 그리고 연료비의 저감, 유해배기가스를 저감하고, 우수한 연소효과를 실현하기 위한 것이 본 연구의 필요성이다.

현재 사용되고 있는 스파크 점화기관은 연료로서 가솔린을 위주로 사용하고 있는데 연료비의 절감, 출력증대 및 유해배기가스의 저감을 위해서 기관내에서의 근본적인 연소과정개선을 위하여 가솔린만을 사용하기 보다는 가솔린-메탄올 혼합연료를 사용함으로써 연소과정을 개선할 수 있다는 점을 이용하여 기존의 기관에 혼합연료를 사용하여 출력향상, 희박연소 특성, 유해배기가스의 저감 등의 내용을 연구하게 되며 특히, 실린더 내에서의 압력변동, 열발생율, 연소율(질량)을 비교분석하여 이들로 부터 실린더내에서의 연소 및 배기 특성의 향상 방안을 제시하여 열효율이 높은 기관의 안전 설계와 산업 및 인체에 유해한 배기의 저감을 달성코자 한다.

II. 實驗裝置 및 方法

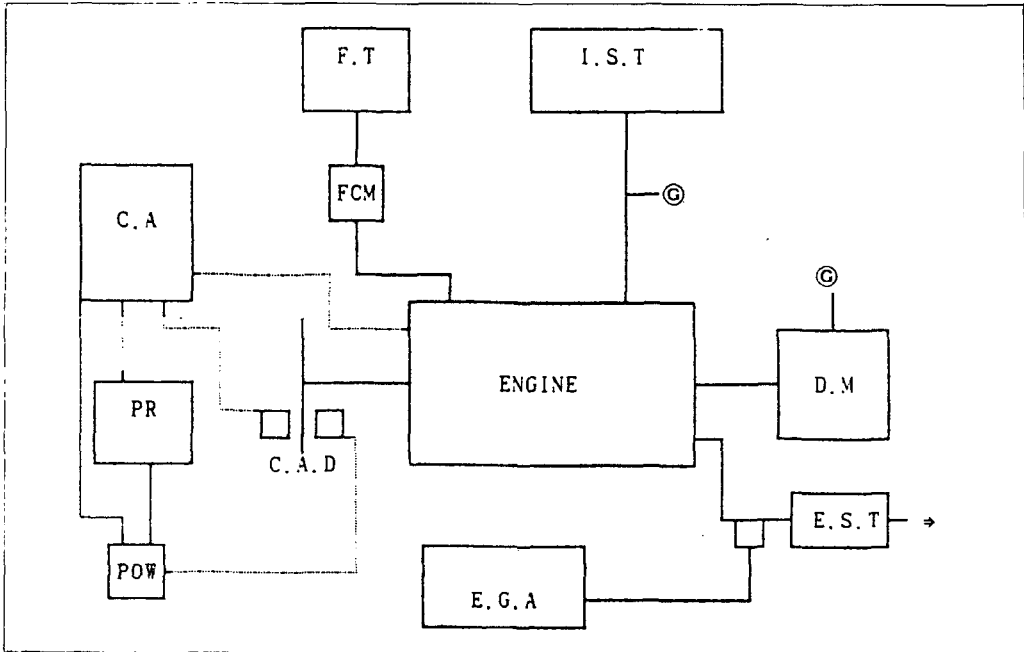
2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 단기통 공냉식 스파크점화식 가솔린 기관(DE-270 RG), 동력계(EW-100PS), 연소분석기(CB-366), 배기가스 분석기(RX-777 A) 및 디지털 연료소비계(PP-500)로 구성되어 있다.

그림 2-1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.
C.A PR POW C.A.D FCM F.T I.S.T ENGINE E.G.A D.M E.S.T
© ©

Table 2-1 Specification of engine used

| Item | Specification |
|---------------------|--|
| Model & maker | DE-270 RG, DAEHEUNG |
| Type | Single cylinder four stroke cycle air cooling vertical L-head type |
| Piston displacement | 267cc |
| Compression ratio | 6.0 |
| Bore×stroke | 74×62mm |
| Max. output | Crank shaft : 6.5ps/4000rpm output shaft : 6.5ps/2000rpm |
| Method of ignition | Magneto ignition |



- C.A : Combustion Analyzer C.A.D : Crank Angle Detector
 D.M : Dynamometer E.G.A : Exhaust Gas Analyzer
 E.S.T : Exhaust Surge Tank F.C.M : Fuel Consumption Meter
 F.T : Fuel Tank I.S.T : Inlet Surge Tank
 POW : Power Supply PR : Printer

Fig. 2-1 Arrangement diagram of experimental apparatus

2.1.1 기관 및 동력계

기관(Engine)은 단기통 공냉식 4사이클 기관으로 실험을 위하여 부분적으로 개조하였으며, 기본적인 제원은 표(Table) 2-1과 같다.

2.1.2 측정장치

각종 데이터를 얻기 위해 사용된 기기는 연소분석기(Combustion analyzer : CB-366), 배기가스 분석기(Emission analyzer : RX-777A) 및 디지털 연료소비계(Digital fuel consumption meter : PP-500)을 사용하였다.

실린더내의 압력을 측정하는 방법에는 스트레인계 이지식(Strain gage type)과 압전식(Piezo electric type)이 있다. 압전식에는 공냉식과 수냉식이 있으며, 본 실험에서는 공냉식(Model : 601A)을 사용하였다. 크랭크 각도 검출기(CAD : Crank Angle Detector)는 360P/R, 1 P/R로 디스크(Disk)에 360개의 슬롯이 표시되어 있어서 정확한 상사점의 위치를 검출할 수 있다.

2.1.3 사용연료

실험에 사용된 연료는 순수가솔린(Pure gasoline)과 가솔린-메탄올 혼합연료(Gasoline-Methanol blend fuel)를 사용했다. 가솔린과 메탄올 혼합연료의 특성은 표 2-2와 같다.

Table 2-2 Properties of gasoline and blend fuels

| Item | Fuel | gasoline | 10% Meth | 15% Meth | 20% Meth | 25% Meth | 30% Meth | Methanol |
|-------------------------------|-----------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Formula | C ₈ H ₁₈ | - | - | - | - | - | - |
| Specific gravity | 0.692 | 0.702 | 0.707 | 0.712 | 0.717 | 0.722 | 0.792 | |
| Low heating value(kcal/kg) | 10600 | 10020 | 9730 | 9440 | 9150 | 8860 | 4800 | |
| Stoichiometric air-fuel ratio | 15.1 | 14.23 | 13.80 | 13.37 | 12.94 | 12.51 | 6.45 | |
| Octan number | 100 | 100.6 | 100.9 | 101.2 | 101.5 | 101.8 | 106 | |
| Latent heat evaporation | 65kcal/kg | 86.30 | 96.95 | 107.6 | 118.2 | 128.9 | 278 | |

2.2 실험방법

본 연구를 위한 실험으로는 순수 가솔린과 가솔린-메탄올(혼합비율 10%, 15%, 20%, 25%, 30%) 혼합연료를 사용하였다. 메탄올의 혼합 비율에 따른 기관의 특성을 파악하기 위하여 각각의 변수에 따른 기관의 운전인자 즉, 표 2-3과 같이 기관회전수(Engine speed), 체적효율(Volumetric efficiency), 당량비(Equivalence ratio) 및 점화시기(Spark timing)를 변화시켜 실험하였다.

부하량은 η_v 가 0.25, 즉 체적효율이 25%일때를 1/4

Table 2-3 Engine operation variables for experiment

| | |
|-----------------------|-------------------------|
| Engine speed | 1200, 1800, 2400rpm |
| Volumetric efficiency | 25, 50, 75% |
| Equivalence ratio | 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 |
| Spark timing | BTDC 10, 20, 30, 40, 50 |

본 실험에 사용된 동력계는 소형의 실험용 기관에 사용시 동력의 손실로 인한 회전의 불균일을 줄이기 위해서 기존의 기관에 중량의 플라이휠(자동차용)을 부착시켜 기관의 회전을 원활하게 하였으며, 기관의 크랭크축 회전수에 대한 속도비는 1/2이다.

2.2.1 기관의 부하량 결정

본 실험에서 기관의 부하량을 결정하는 기준은 체적효율(Volumetric efficiency : η_v)을 이용하였다.

부하로 하고, η_v 가 0.5일때를 2/4부하, η_v 가 0.75일때를 3/4부하 및 η_v 가 1.0일때를 4/4부하로 하였다. 각 회전수에 대한 η_v 는 동력계의 하중(kg), 흡입공기의 압력차(mmAq), 드로틀밸브의 개도(%)를 조절하여 결정하였다. 부하량을 결정하기 위한 기관의 운전 조건은 실제 운전에서의 최적 공기연료비와 최적점화시기에서 운전하여 얻은 데이터를 기준으로 하였다.

부하량을 결정하기 위한 실험에서 체적효율은 흡입노즐의 입구와 출구의 압력차로 부터 계산하였다.

2.2.2 MBT의 결정 및 공기연료비의 조절

점화시기는 회전수와 부하량에 대해 MBT(Mini-mum spark advance for Best Torque)로 하였다. MBT의 결정은 기관의 동력계에 하중을 주어 기관 회전수를 일정하게 유지하고, 진각을 시키면서 회전수의 변화를 관찰한다. 진각에 따라 회전수가 빨라지면 동력계 하중을 높이고, 회전이 느려지면 동력계하중을 줄여서 회전수를 일정하게 유지하면서 최대 토오르크를 얻을 수 있는 점화시기를 찾아내어 MBT를 결정한다.

공기연료비의 변화는 니들밸브의 조정 및 보조연료와 보조공기의 유입으로 변화시켰으며 공연비의 조정으로는 다음과 같은 방법을 사용하였다.

① 농후혼합비를 위해서 연료 공급라인으로 부터 연료를 인출해서 기화기의 벤츄리와 드로틀밸브 사이에서 보조(추가)연료를 공급하는 방법을 이용하였다. 보조연료를 공급하기 위한 연료의 조정은 밸브를 이용하였다.

② 희박혼합비를 위해서는 공기 흡입라인으로 부터 기화기의 벤츄리와 드로틀밸브 사이를 파이프로 연결하여 보조공기를 공급하는 방법을 택하였다. 공기의 공급량 조절 역시 밸브를 사용하였다. 공연비 조정을 위한 보조 연료 및 공기의 공급방법을 나타내는 개략도를 그림 2-2에 나타내었다.

2.2.3 점화시기의 변화

점화시기의 변화는 전자점화방식의 픽업코일(Pick up coil)의 각도(위치)를 변화시킬 수 있게 제작하여 각 실험에서의 MBT를 찾아서 이 상태에서 실험하였다. 픽업코일의 진각범위는 BTDC5°~BTDC65°까지 60°이다. 타이밍라이트(Timing light)로 측정하였다. 점화시기 변화를 위한 진각기구를 그림 2-3에 나타냈다.

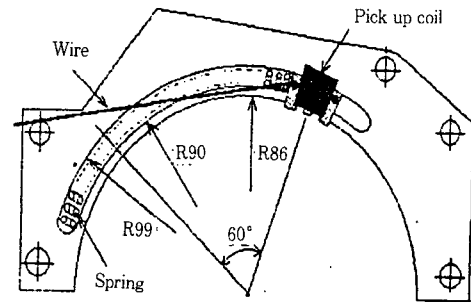


Fig. 2-3. Mechanism of spark timing variation

III. 結果 및 考察

3.1 기관 성능

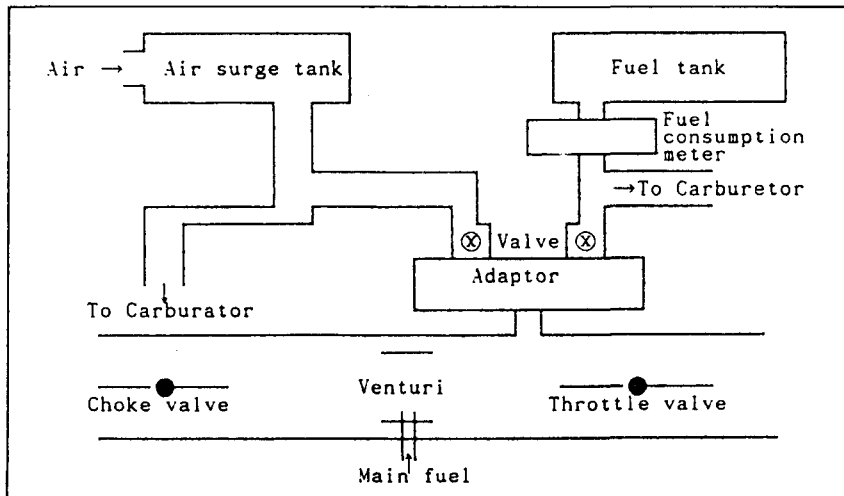


Fig. 2-2 Providing diagram of auxiliary fuel and air

기관성능은 지압선도(Indicated diagram)에서 얻을 수 있는 지시 평균유효압력(Indicated mean effective pressure : IMEP)으로 부터 지시 마력(Indicated horse power : IHP)과 지시열효율(Indicated thermal efficiency : η_i)로 평가하고자 한다. 본 실험에서는 기관의 운전조건 변화실험에서 부하의 결정을 체적효율(η_v)을 기준으로 하였으며, 최대 체적효율은 회전수가 높을수록 낮게 나타났다. 그림 3-1은 기관의 각 회전수 변화에 따른 흡입압력과 체적효율과의 관계를 나타냈다. 드로틀 밸브(Throttle valve)의 개도를 최대로 하여 운전했을 때 기관의 회전수가 1200rpm에서는 η_v 가 최대 76%였고, 1800rpm에서는 64.5%, 2400rpm에서는 최대 58%였다.

그림 3-1에서 보는 바와 같이 기관의 회전수가 증가함에 따라 최대 체적효율의 감소현상은 노즐의 직경이 15mm인 좁은 통로를 통하여 유체가 빠른속도로 유동할 때 노즐면의 마찰에 의한 유동저항현상 때문으로 판단된다.

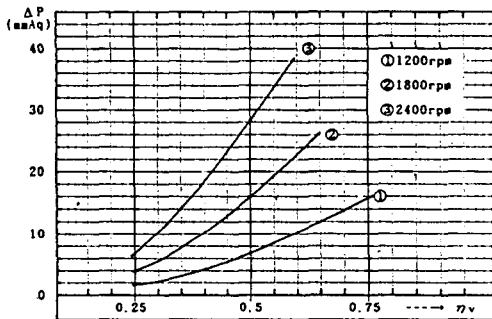


Fig. 3-1 Relationship of volumetric efficiency Vs. intake charge pressure at each engine speed

표 3-1에는 $\phi=1.1$, $\eta_v=50\%$ 에서 메탄올의 혼합비율과 회전수에 따른 MBT를 BTDC값으로 나타내었다.

3.2 연소특성의 비교

표 3.2는 메탄올 10% 혼합시의 운전조건에서 크

Table 3-1 Data of MBT with methanol blend & engine speed ($\phi=1.1$, $\eta_v=50\%$)

| Fuel RPM | G100 | ME10 | ME15 | ME20 | ME25 | ME30 |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| 1200 | 27 | 26 | 25.5 | 24.5 | 24 | 23.5 |
| 1800 | 29 | 27.5 | 27 | 26.5 | 26 | 25 |
| 2400 | 33 | 31 | 30 | 29 | 28 | 26.5 |

랭크각도로 나타내었고 그림 3-2에서 3-11까지는 체적효율, 기관회전수, 당량비, 점화시기등 각 운전 변수에 대해서 연소특성을 분석 비교하였다.

Table 3-2 Data of ignition & combustion duration at each engine operation variables (ME 10)

| Item | Combustion | | ID | CD |
|-----------------------------|------------|----|----|----|
| | | | | |
| SA | 50 | 14 | 58 | |
| | 40 | 14 | 46 | |
| | 30 | 15 | 43 | |
| | 20 | 16 | 40 | |
| | 10 | 15 | 47 | |
| ϕ | 0.8 | 23 | 63 | |
| | 1.0 | 22 | 36 | |
| | 1.2 | 16 | 42 | |
| | 1.4 | 15 | 39 | |
| | 1.6 | 22 | 34 | |
| η_v (%) (N=1800rpm) | 25 | 14 | 84 | |
| | 50 | 15 | 40 | |
| | 60 | 22 | 34 | |
| N ($\eta_v=50\%$) | 1200 | 13 | 46 | |
| | 1800 | 15 | 40 | |
| | 2400 | 16 | 40 | |

그림 3-2와 3-3은 체적효율의 변화에 따른 ME10과 ME30의 열발생율과 질량연소율을 비교한 것이다. 두 그래프에서 $\eta_v=25\%$ 일 때는 열발생율의 크기만이 차이가 있을 뿐 위치에서는 차이가 없다. 그러나 연소기관에는 약간의 차이가 있는데, 이것은 혼합기의 양, 즉 연료의 공급량에는 상대적인 차이가

크지 않기 때문에 연료의 메탄올 첨가비에 따른 저압축비 효과에 의한 연소속도의 저하에 기인된 결과라 생각된다. 열발생율을 보면 ME15와 ME30보다 ME10이 약간 낮은 값을 보이고 있는데, 체적효율이 증가함에 따라 전체적으로 ME30이 ME10 보다 안정된 상태를 보이고 있다. 질량연소율에서도 $\eta_v=50\%$ 일때 CD를 크랭크 각도로 나타내면 ME10에서는 40° 정도이고, ME30에서는 약 38° 로 ME30이 가장 빠른 연소속도를 보이고 있다. $\eta_v=63\%$ 에서는 ME10일 때 약간 불안정하였고, ME30의 혼합조건에서 안정된 상태를 보였다.

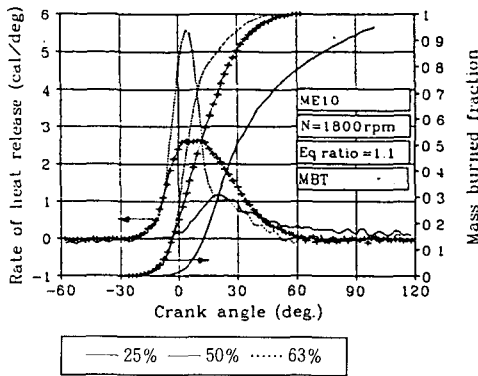


Fig. 3-2 Combustion rate with volumetric efficiency at ME10

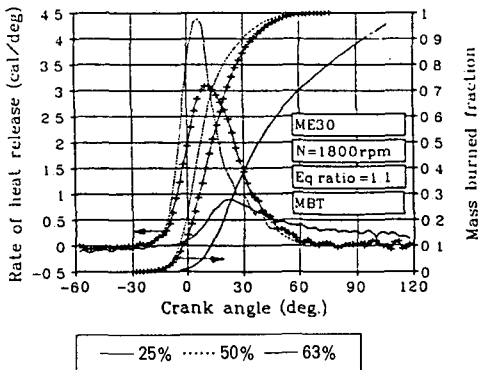


Fig. 3-3 Combustion rate with volumetric efficiency at ME30

그림 3-4와 3-5는 회전수변화에 따른 연소특성

의 결과로서 연소상태를 보면 ME20, ME30 모두 1200rpm이나 2400rpm 보다 1800rpm의 경우가 안정된 상태를 보여주고 있다.

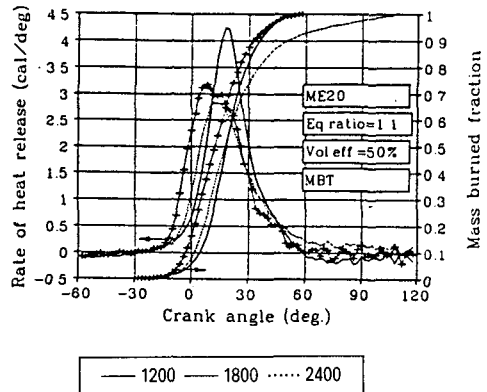


Fig. 3-4 Combustion rate with engine speed at ME20

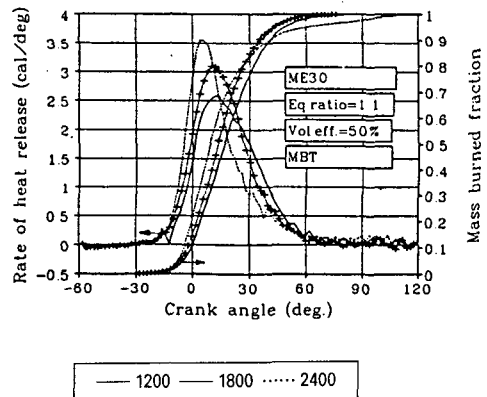


Fig. 3-5 Combustion rate with engine speed at ME30

그림 3-6 부터 3-9는 당량비의 변화에 따른 연소특성의 결과로서 $\phi=1.2$ 부근에서 가장 안정된 연소상태를 나타내고 있으며 메탄올의 첨가량에 따라 $\phi=1.6$ 에서 메탄올의 첨가량이 증가할수록 연소기간이 길어지는 현상을 나타내고 있는데 이것은 메탄올의 연소속도가 빠르지만 주연소기간의 후반부에서 연소가 불안정하게 늦추어지는 현상때문으로 판단된다. $\phi=0.8$ 에서 전체적으로 열발생 및 연소의 진행에서 메탄올의 첨가비율이 증가할수록 향상되는 결과가 나타나는 것은 메탄올의 첨가에 따라 희박연소의 확대

가 유리하다는 것을 보여주는 것이다.

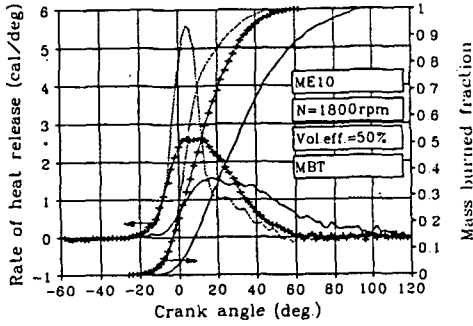


Fig. 3-6 Combustion rate with equivalence ratio at ME10

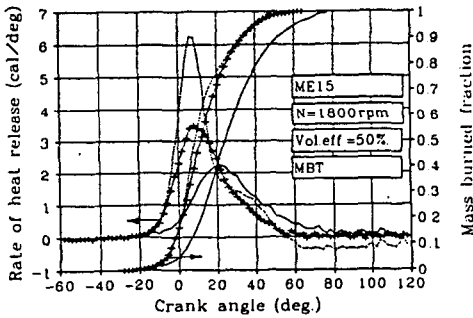


Fig. 3-7 Combustion rate with equivalence ratio at ME15

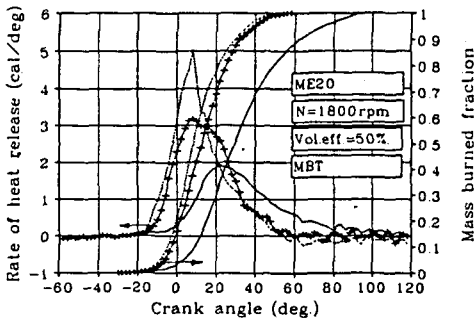


Fig. 3-8 Combustion rate with equivalence ratio at ME20

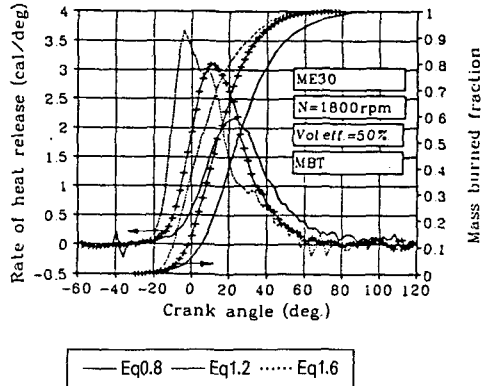


Fig. 3-9 Combustion rate with equivalence ratio at ME30

그림 3-10과 3-11은 점화진각에 따라서 비교한 것으로 MBT 가까운 점화시기에서 가장 유리한 것을 알 수 있다.

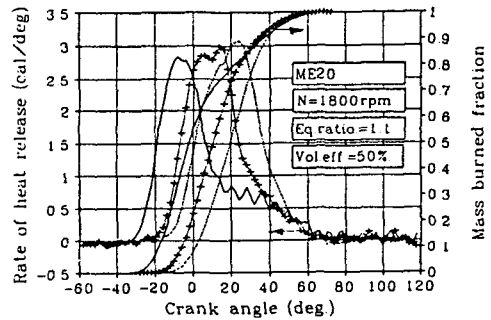


Fig. 3-10 Combustion rate with spark advance at ME30

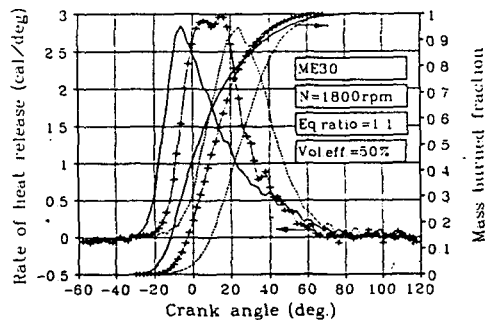


Fig. 3-11 Combustion rate with spark advance at ME30

그림 3-12에 연소기간(CD)과 지시평균유효압력(IMEP)과의 관계를 나타냈다. 그림 3-12에서 연소기간이 짧을수록 지시평균유효압력은 높아지고 연소기간이 길수록 역으로 낮아진다는 것을 알 수 있다.

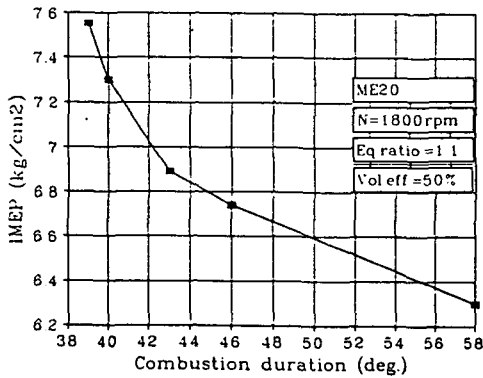


Fig. 3-12 Correlation of IMEP & combustion duration

그 이유는 연소기간이 압력변화에 깊은 연관성이 있는 것으로 해석 할 수 있다.

3.3 배기성분의 비교

그림 3-13, 3-14 및 3-15는 당량비의 변화, 점화시기, 기관회전수에 따른 HC와 CO의 배출량을 비교하여 나타낸 것이다.

그림 3-13a, 3-14a 및 3-15a에서 알 수 있는 바와같이 HC는 메탄올의 첨가량이 증가할수록 감소하고, 또 당량비가 $\phi=1.2$ 에서 최소가 된다. 그 이유는 메탄올의 혼합비율이 증가할수록 혼합연료의 높은 휘발성 및 화염전파 속도에 의한 연소율의 증가에 기인하고, 경제적인 공연비, 즉 당량비(ϕ)가 1.2에서 HC의 배출이 가장 낮은 결과가 된다. 또 점화진각에 있어서는 MBT를 기준으로 점화시기를 진각시키거나 지연시키면 배출량이 줄어든다. 기관 회전수에 대해서는 저속회전 보다 고속회전에서 배출량이 줄어드는 경향을 보였다.

CO의 배출량도 그림 3-13b, 3-14b 및 3-15b에 나타낸 바와같이 메탄올의 첨가량이 많을 수록 감

소하고 최소값은 당량비가 1이하($\phi < 1$)에서 나타나는데 당량비가 1이상($\phi > 1$)에서 배출량이 증가하는 것은 산소의 부족이 원인이 된다. 일정 당량비에서는 메탄올의 혼합비율이 증가하면 CO의 배출량은 감소하는 경향을 보이는데, 이 또한 메탄올의 연소 속도가 빠르기 때문으로 판단된다. 점화진각에서는 점화시기를 지각시킬 때 보다 진각시킬 때가 현저하게 감소하였다. 기관 회전수는 저속에서 감소하는 경향을 보였다.

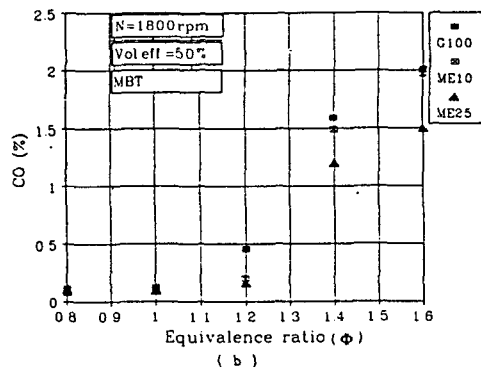
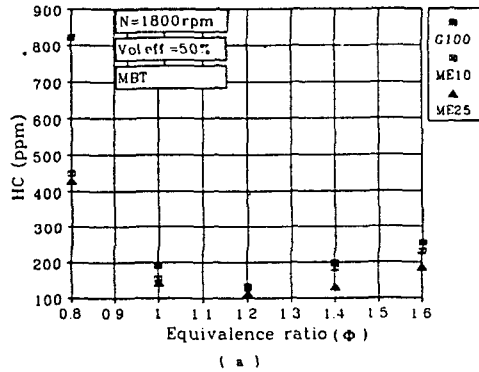
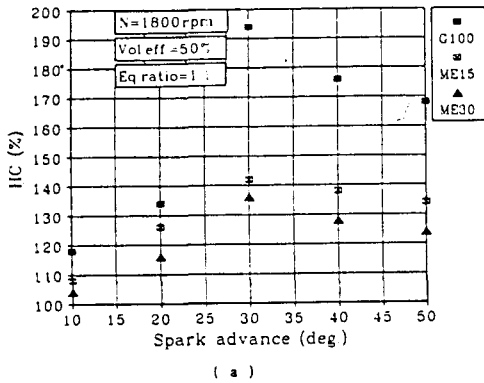


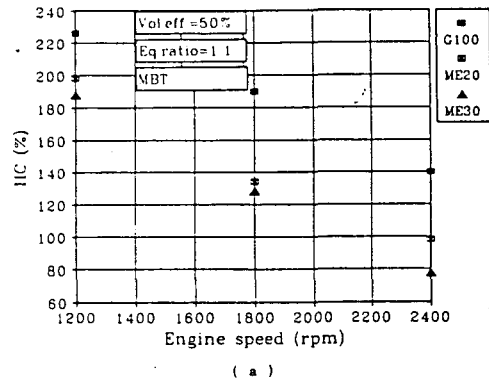
Fig. 3-13 Variation of HC & CO emissions with equivalence ratio

IV. 結 論

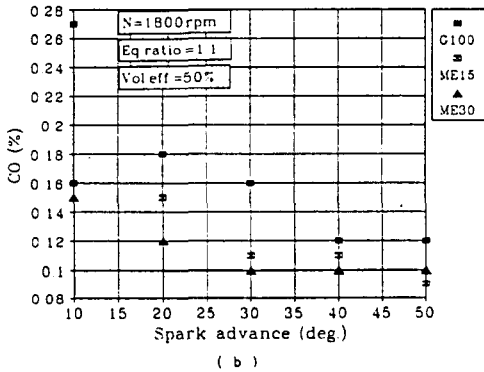
기관성능 향상 및 유해배기가스 저감을 위하여 스파크점화, 기화기연료공급 방식인 단기통 공냉식기관에서 메탄올 혼합연료를 사용하여 연소 및 배기 특성을 규명하였다. 메탄올의 혼합비율을 변수로한 실험



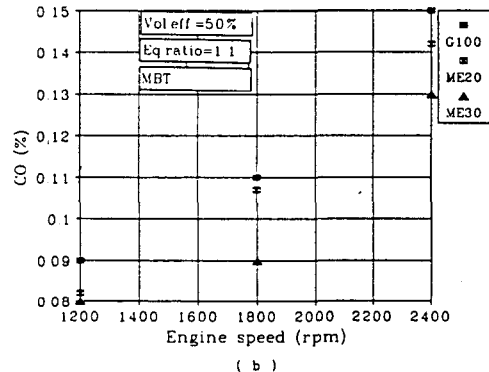
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 3-14 Variation of HC & CO emissions with spark advance

Fig. 3-15 Variation of HC & CO emissions with engine speed

으로 점화시기, 당량비, 체적효율 및 기관회전수의 변화를 기관운전인자로하여 실험을 수행하고, 동력행정 중 연소실로부터 실린더압력을 채취하였으며 배기 분석기로 배기성분을 측정하여 각각 출력 및 배기성능을 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 혼합연료에서 메탄올의 첨가량에 따라서 IHP 및 η 가 증가하는 경향을 나타내었고, 가장 양호한 연소효과를 얻을 수 있는 비율은 ME25로서 경제적으로 가장 유리한 혼합비율이었다고, 희박연소 영역이 확대됨을 알 수 있었다.

② 최적인전조건에서 질량연소율 관계식으로 예측 계산 및 실험치와 비교한 결과 메탄올 혼합연료의 연소기간(CD)은 ME25에서 단축되어 연소가 양호하였고, 또한 연소기간이 짧을수록 저시평균유효압력이 높게 나타났다.

③ 배기가스 중에 함유된 HC는 당량비 1.2와 고속에서 가장 낮은 값을 보인 반면 MBT에서 가장 높은 값을 보였고, CO는 낮은 당량비, 저속 및 점화시기가 빠를수록 감소하였으며, 메탄올의 첨가량이 많을수록 HC 및 CO의 배출량이 감소하였다.

④ 이상의 실험 연구로부터 기존의 기화기식 스파크 점화기관에서 알콜계 연료첨가로 인체에 유해한 배기와 연소 특성이 향상됨을 확인 하였다.

참고문헌

- 1) D.L. Hagen, "Methanol as a Fuel. A Review with Bibliography", SAE Trans 770792, pp. 2764-2796, 1977.
- 2) Eric E. Wigg and Robert S. Lunt, "Emissions

- as a Gasoline Extender Fuel Economy, Emission and High Temperature Drive-ability", SAE Paper #74100, pp. 3131-3142, 1974.
- 3) R.G. Jackson, "The Role of Methanol as Clean Fuel", SAE Paper #740642, 1973.
- 4) T.B. Read and R.M. Lerner, "Methanol : A Versatile Fuel for Immediate", Use Science 182, pp. 1299, 1973.
- 5) G.D. Ebersole and F.S. Manning, "Engine Performance and Exhaust Emission; Methanol Vs. Iso-octane", SAE Paper #720692, 1972.
- 6) H.R. Ricardo, "Recent Research Work on the Internal Combustion Engines", J. SAE Vol. 10, pp. 305, 1922.
- 7) Edward F. Obert, Internal Combustion Engines and Air Pollution, IEP, pp. 87~90, 223~241, 1973.