

멀티존 모델에 의한 改質메탄올을 燃料로 하는 電氣點火機關의 燃燒過程 및 排出物의 豫測

Multi-Zone Model Approach to the Prediction of Combustion
Process and Exhaust Emissions of Reformed Methanol Fueled S.I. Engine

池 堯 漢,* 金 應 瑞**
Yo Han Chi, Eung Seo Kim

ABSTRACT

Multi-zone model is applied to the spark ignition engine fueled with neat methanol and reformed methanol, which is formed by mixing pure reformed methanol obtained by dissociating liquid methanol into hydrogen and carbon monoxide, and neat methanol, to model the combustion process in the cylinder and predict the concentration of NO emissions.

Exhaust gas was used as heat source for dissociating neat methanol into reformed methanol and the modeling was performed by comparing the cylinder pressure and combustion rate obtained from experiments and calculation.

Calculated temperature distribution in the cylinder indicates that there is temperature difference between the spark plug and the opposite sides, the former is about 350-450 K higher than the latter.

Flame propagation velocity of reformed methanol is 1-3 m/sec faster than that of neat methanol as a result of the combustion of the hydrogen in the reformed methanol.

Calculated NO concentration is about 10% higher than that of experiments.

기 호 설 명

<로마문자>

A_p : 피스톤 단면적

C_p : 정압 비열

K_p : 평형 상수

M : 몰 수

M_w : 혼합기의 평균 분자량

m_b : 연소하는 질량

m_{ub} : 미연가스 질량

m_{ij} : 기연영역 j내의 i 화학종의 질량

n_{ij} : 기연영역 j내의 i 화학종의 몰 수

s_{ij} : 기연영역 j내의 i 화학종의 entropy/
mole

S. T : 점화 시기

U_b : 연소 속도

U_f : 화염전파 속도

U_g : 가스 유동속도

- u_{ij} : 기연영역 j내의 i 화학종의 총 내부 에너지
- X : 물 분율
(회랍문자)
- α : Kinetic Mechanism에 의해 단위 시간 : 에 생성되는 NO
- ϵ : 압축비
- θ : 크랭크 각도
- λ : 커벡팅 로드의 길이와 크랭크 반경의 비
- ν_i : 반응 계수
(상첨자)
- ' : 압력 p의 초기 상태
- " : 압력 p의 최종 상태
- 0 : 초기 상태
(하첨자)
- 0 : 초기 상태
- f : 최종 상태
- i : 초기 상태

1. 序 論

메탄올은 옥탄가가 높고, 火炎傳播速度가 빠르며, 有害排出物이 적다는 등의 장점이 있으나 體積當發熱量이 가솔린의 1/2 정도이며 연료계통에 腐蝕을 초래하고, 氣化潛熱이 커서 냉간시동성이 양호하지 못하고 低負荷運轉時運轉安定성이 저하되는 등의 문제점도 있다. 이런 문제를 해결하기 위한 방안으로 排氣熱을 열원으로 熱分解하여 기체상태의 水素와 一酸化炭素로 改質시켜 사용하면 低負荷運轉安定성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 액체 메탄올에 비하여 發熱量이 약 20% 증가하므로 熱效率의 향상도 期할 수 있게 된다.

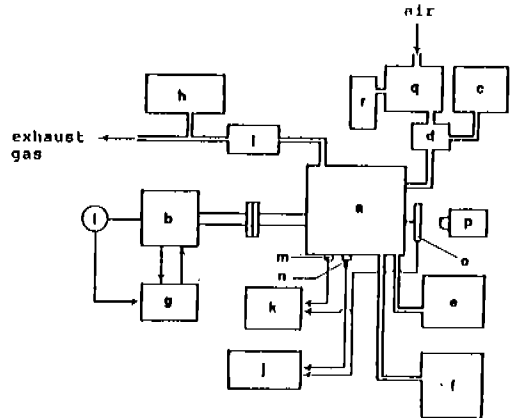
이러한 사실에 입각하여 本研究에서는 먼저 改質메탄올(메탄올과 改質器를 통하여 열분해된 水素와 一酸化炭素의 순수改質메탄올이 熱量基準으로 각각 1/2 씩으로 되어 있는 것)과 메탄올을 燃料로 하는 경우의 出力 등의 機關性能에 관한 實驗을 하여 實用性에 대하여 조사하였다. 또 이 때 排出物의 濃度を 測定하고 豫測에서 필요로 하는 實驗資料도 구하였다.

豫測에 있어서는 멀티존 모델(multi-zone model)을 사용하였으며 燃燒過程에서는 指壓線圖, 燃燒率, 실린더內 溫度分布, 火炎傳播速度 등에 대해서, 排出物에 있어서는 一酸化炭素와 窒素酸化物에 대해서 考察하였다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

2-1 實驗裝置

實驗裝置는 機關의 機關動力計, 실린더內 燃燒分析裝置, 排氣가스 分析裝置 및 그 밖의 裝置로 構成하였으며, 機關의 排氣系統과 燃料供給系統은 燃料改質裝置를 부착하기 위하여 일부 改造하였다. Fig.1은 實驗裝置의 概略圖를 表示한다.



- a : single cylinder E/G
- b : E/G dynamometer
- c : fuel system
- d : intake system
- e : cooling system
- f : lubrication system
- g : load control system
- h : exhaust gas analyzer
- i : muffler
- j : combustion analyzer
- k : spark advance meter
- l : tachometer
- m : spark advance, meter
- n : pressure transducer
- o : TDC & angle sensor
- p : light source
- q : air surge tank
- r : inclined manometer

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

燃料供給裝置는 氣化器 또는 電子制御 燃料噴射裝置를 통하여 燃料을 供給할 수 있는 2종 계통의 회로로 되어 있으며 改質메탄올을 燃料로 使用하는 경우에는 電子制御燃料噴射裝置에 燃料噴射밸브를 2개 설치하여 改質器

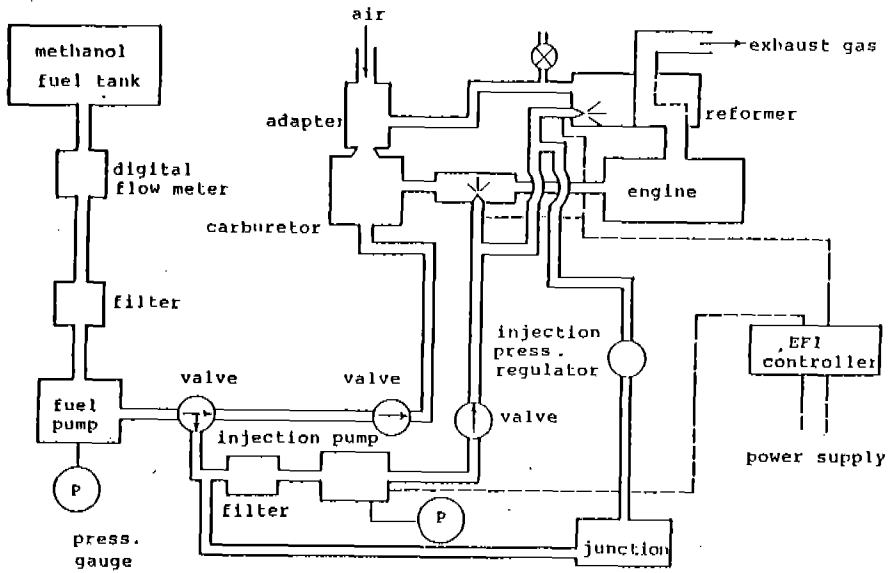


Fig.2 Fuel supply system

와 機關의 吸氣管에 燃料을 공급하고 改質器에서 生成된 純粹改質메탄을 氣化器 상부의 어댑터를 통하여 機關에 공급하도록 하였다. Fig. 2는 燃料供給裝置의 概略圖를 表示한다.

改質器는 機關의 排氣熱을 열원으로 사용하게 되어 있는데, Fig. 3은 改質器의 概略圖를, Table 1은 改質器의 주요 제원을 나타낸다.

燃料噴射밸브에서 噴射된 메탄올은 관 A부에서 氣化되어 B부를 거쳐 觸媒가 들어 있는 22개의 관 C로 들어가 熱分解反應에 의해 分解된 다음 D부에 모여 출구 G 및 氣化器 上部의 어댑터를 통해 기관에 공급된다. 排氣가 스는 입구 E로 들어와 출구 F로 나가게 되며

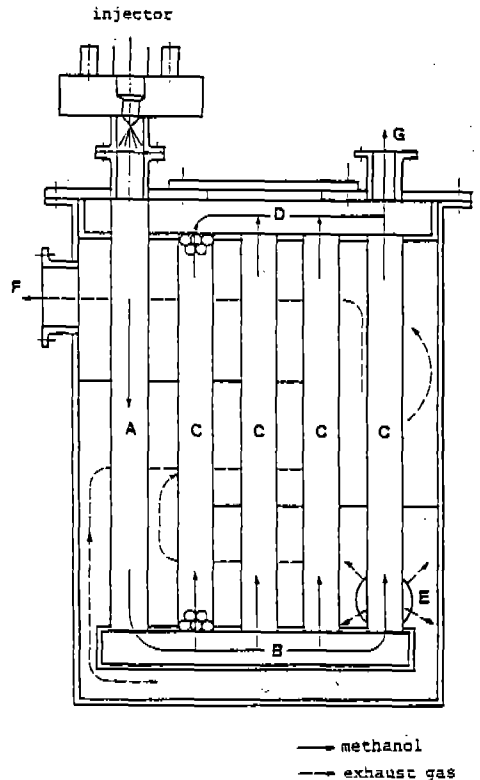


Fig.3 Schematic diagram of reformer

Table 1. Specification of reformer

Dimension(H×W×L mm)	290×190×184
Total Weight (kg)	22.5
Volume of Fuel Path(cc)	2.655
Catalyst Volume(cc)	1.000
Material of Fuel Path	Stainless Steel
Material of Exhaust Gas Path	Steel
No. of Tubes	23
Size of Tube (Outer Dia./ Thickness, mm)	22.3/1.0

排氣가스의 流路에는 熱傳達效率을 높이기 위한 2개의 배플이 설치되어 있고 석면과 유리면으로 改質器와 外氣사이가 斷熱되어 있다. 純粹改質메탄올의 溫度는 열전대(CA type)로 改質器의 출구에서 測定하게 되어 있다.

2-2 實驗方法

純粹改質메탄올과 메탄올을 1:1로 혼합한 改質메탄올과, 메탄올을 각각 燃料로 使用하는 경우의 機關의 性能에 대하여 實驗하였으며 機關負荷를 WOT로 하고 機關回轉速度, 空氣過剩率 등을 변화시키면서 燃料消費量, 空氣量, 動力計 荷重 등을 測定하였다. 改質메탄올에 대한 實驗에서는 改質器 出口에서 純粹改質메탄올의 溫度를 測定하였다. Table 2 는 전체적인 실험범위를 나타낸다.

排出物濃度는 모든 實驗에서 약 60초간 측정하여 그 평균치를 측정치로 하였다.

Table 2. Experimental condition

Fuel	Methanol and Reformed Methanol
Engine Speed	1500, 2000, 2500 rpm
Excess Air Ratio	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2
Spark Timing	15°, 20°, 25°, 30° BTDC

3. 數值解析

本 計算에서 設定된 멀티존 모델에 대해 使用된 假定은 다음과 같다.

1. 燃燒室內의 混合氣 및 燃燒가스는 理想氣體의 性質을 만족한다($PV=NRT$).
2. 燃燒室內의 壓力은 均一하다.
3. 混合氣는 燃燒室內에 均一하게 分布한다.
4. 燃燒室 벽으로의 熱傳達 및 體積要素間의 熱傳達은 없다.
5. 各 연소영역의 質量은 보존되며 既燃燒部分의 各 영역은 서로 혼합되지 않는다.
6. 混合氣는 서로 反應하지 않으며 燃燒過程은 熱量添加로 모델링된다.
7. 燃燒生成物은 化學平衡界로 생각한다.

3-1 燃燒모델

3-1-1 熱力學的 考察

各 연소영역은 서로 다른 熱力學的 過程을 거치며 첫번째 要素가 거치는 過程은 다음과 같다.

1. 初期壓力 P_0 에서 燃燒에 의하여 熱量이 添加된다.
2. 최종압력 P_f 까지 可逆斷熱過程으로 壓縮된다.

初期溫度 T_0 에서 ΔH_r 의 熱量添加에 의해 도달되는 溫度는 다음과 같다.

$$T_1 = T_0 + \Delta H_r / C_p \dots \dots \dots (1)$$

可逆斷熱壓縮後에 첫번째 要素에 의해 도달되는 最種溫度는 다음과 같다.

$$T_{f1} = [T_0 + \Delta H_r / C_p] (P_f / P_0)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \dots \dots \dots (2)$$

最後에 燃燒되는 要素는 初期壓力 P_0 로부터 最終壓力 P_f 까지 火炎面에 의해 可逆斷熱壓縮된 後에 燃燒가 일어나게 된다.

可逆斷熱壓縮過程의 溫度는 다음과 같다.

$$T_2 = T_0 (P_f / P_0)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \dots \dots \dots (3)$$

燃燒後에 도달되는 最終溫度는 다음과 같다.

$$T_{f2} = T_0 (P_f / P_0)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} + \Delta H_r / C_p \dots \dots \dots (4)$$

첫번째 燃燒要素와 最終의 燃燒要素間에는 다음 식에 의해 주어지는 溫度差가 존재한다.

$$T_{f1} - T_{f2} = (\Delta H_r / C_p) [(P_f / P_0)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - 1] \dots \dots \dots (5)$$

3-1-2 燃燒過程의 모델링

燃燒現狀에 있어 制限된 系內의 火炎傳播速度 (U_f)는, 火炎이 未燃가스 영역으로 傳播해 가는 速度 (U_b)와, 未燃가스가 進行하는 화염면에 의해 燃燒室 벽면에 대해 이동하는 가스流動速度 (U_g)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$U_f = U_b + U_g \dots \dots \dots (6)$$

本 計算에서는 燃燒速度(U_b)가 크랭크각도
의 2차 함수로 주어진다.

$$U_b = a + b(|S.T| + \theta) + c(|S.T| + \theta)^2 \dots\dots\dots (7)$$

$S.T.$: 點火時期

θ : 크랭크각도

a, b, c : 實驗值와의 비교에 의해 결정되는 상수

3-2 基本方程式

3-2-1 熱力學 諸法則

系の 總 內部에너지의 變化는 각 燃燒要素에 대하여 쓸 수 있다.

$$(U_f - U_i)_{system} = m_{ub} (u - u)_{ub} + \{ \sum \sum [(m_{ij} u_{ij}) - (m_{ij} u_{ij})] \}_b + m_b (u_b - u_b)_{burning - gas} \dots\dots\dots (8)$$

m_{ub} : 미연가스의 질량

m_{ij} : 기연영역 j 내 i 화학종의 질량

m_b : 연소하는 질량

u_{ij} : j 영역내 i 화학종의 총 내부 에너지

壓力變化에 따른 可逆斷熱壓縮過程後의 未燃가스의 狀態는 다음 식에 의해 결정된다.

$$[\int ds] = 0 = [\int (C_p(T)/T) dT - R \ln (1 + \frac{\Delta p}{p})]_{ub} \dots\dots\dots (9)$$

$C_p(T)$: 미연 혼합기의 비열

可逆斷熱壓縮된 後의 既燃가스 Δm_j 의 성분의 狀態는 다음 식에 의해 결정된다.

$$[\int ds] = 0 = [(\sum n_{ij} s_{ij})'' - (\sum n_{ij} s_{ij})']_{burned - zone} \dots\dots (10)$$

여기서 (') : 壓力 p 의 初期狀態

('') : 壓力 p 의 最終狀態

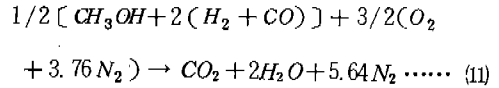
n_{ij} : j 번째 기연가스 영역 내의 i 화학종의 몰 수

s_{ij} : j 번째 기연가스영역내 i 화학종의 entropy / mole

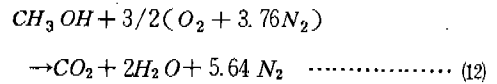
3-2-2 化學平衡方程式

改良메탄올과 메탄올을 燃料로 한 경우의 化學反應式은 다음과 같이 주어진다.

1. 改良메탄올을 燃料로 한 경우



2. 메탄올을 燃料로 한 경우



$CO_2, CO, N_2, O_2, H_2O, O, N, H, H_2, OH, NO$ 의 11종의 燃燒生成物을 考慮하고 각각의 몰 분율을 $X_1 \sim X_{11}$ 로 表示한다.

燃燒生成物의 몰 분율을 구하기 위해서 必要한 11개의 式은 다음과 같이 주어진다.

N 에 대한 C, H, O 의 질량평형식

$$\frac{(C)}{(N)} = \frac{X_1 + X_2}{2X_3 + X_7 + X_{11}} \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{(H)}{(N)} = \frac{2X_9 + X_8 + 2X_5 + X_{10}}{2X_3 + X_7 + X_{11}} \dots\dots (14)$$

$$\frac{(O)}{(N)} = \frac{X_5 + X_{10} + X_{11} + 2X_4 + X_6 + X_2 + 2X_1}{2X_3 + X_7 + X_{11}} \dots\dots\dots (15)$$

燃燒平衡狀態를 위해 考慮한 7가지 化學平衡式

$$1/2 H_2 \rightleftharpoons H \dots\dots\dots (16)$$

$$1/2 N_2 \rightleftharpoons N \dots\dots\dots (17)$$

$$1/2 O_2 \rightleftharpoons O \dots\dots\dots (18)$$

$$H_2O + 1/2 N_2 \rightleftharpoons NO + H_2 \dots\dots\dots (19)$$

$$H_2O \rightleftharpoons 1/2 H_2 + OH \dots\dots\dots (20)$$

$$H_2O \rightleftharpoons 1/2 O_2 + H_2 \dots\dots\dots (21)$$

$$CO_2 \rightleftharpoons 1/2 O_2 + CO \dots\dots\dots (22)$$

에서 反應에 대한 化學平衡式은 다음과 같이 된다.

$$K_{p1} = \frac{X_8}{X_9^{1/2}} P^{1/2}$$

$$K_{p2} = \frac{X_6}{X_4^{1/2}} P^{1/2}$$

$$K_{p3} = \frac{X_7}{X_3^{1/2}} P^{1/2}$$

$$K_{p4} = \frac{X_9 X_4}{X_3^{1/2}} P^{1/2} \dots\dots\dots (23)$$

$$K_{p5} = \frac{X_{10} X_9}{X_5^{1/2}} P^{1/2}$$

$$K_{p6} = \frac{X_2 X_4}{X_1^{1/2}} P^{1/2}$$

$$K_{p7} = \frac{X_{11} X_9}{X_5 X_3^{1/2}} P^{1/2}$$

몰 분율 관계에서

$$\sum X_i = 1 \dots\dots\dots (24)$$

3-3 窒素酸化物의 Chemical Kinetics

NO Kinetics는 다음의 mechanism에 의해 기술된다.



여기에서 式(25)~(28)에 대한 反應率常數는 Table 3에 주어져 있다. 이로부터 *j* 영역내의 NO의 시간에 대한 變化率은 다음 式으로 주어진다.

$$\frac{1}{V} \frac{dN_{NO}}{dt} = \{ k_1 [N_2] [O] + k_2 [O_2] [N]$$

Table 3. Reaction rate constants

Reaction	Rate constant ($\frac{\text{mole}}{\text{cm}^3 \cdot \text{sec}}$)
$N_2 + O \xrightarrow{k_1} NO + N$	$7 \times 10^{13} \exp(-75,000/RT)$
$O_2 + N \xrightarrow{k_2} NO + N$	$13.3 \times 10^9 T \exp(-7,080/RT)$
$NO + N \xrightarrow{k_3} N_2 + O$	1.55×10^{13}
$NO + O \xrightarrow{k_4} O_2 + N$	$3.2 \times 10^9 \exp(-39,100/RT)$

$$- k_3 [NO] [N] - k_4 [NO] [O] \}; \dots\dots\dots (29)$$

이 式을 積分하기 위해서는 다음의 假定을 한다.

1. N과 O 原子의 濃度는 化學平衡으로 주어지고 考慮하고 있는 時間內에서 일정하게 維持된다.

2. 考慮하고 있는 時間의 初期段階에서 N_2 와 O_2 의 濃度는 化學平衡으로부터 주어진다.

式(29)를 各種의 몰 분율로 表示하면 다음과 같다.

$$\frac{dX_{NO}}{dt} = \left(\frac{\rho}{M_w} \right) [k_1 X_{N_2} X_O + k_2 X_{O_2} X_N + - k_3 X_{NO} X_N - k_4 X_{NO} X_O] \dots\dots\dots (30)$$

各 時間段階에서 生成되는 NO의 Kinetic 濃度는 다음과 같다.

$$\alpha = X_{NO} - X_{NO}^0 \dots\dots\dots (31)$$

各種의 몰 분율은 다음과 같이 表示된다.

$$X_{O_2} = X_{O_2}^0 - \frac{\alpha}{2} \dots\dots\dots (32)$$

$$X_{N_2} = X_{N_2}^0 - \frac{\alpha}{2} \dots\dots\dots (33)$$

$$X_O = X_O^0 \dots\dots\dots (34)$$

$$X_N = X_N^0 \dots\dots\dots (35)$$

式(32)~(35)를 式(31)에 代入하면 다음의 式을

얻을 수 있다.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \Gamma(\eta - \xi\alpha) \dots\dots\dots (36)$$

$$\Gamma = \frac{\rho}{M_w} \dots\dots\dots (37)$$

$$\eta = [k_1 X_{N_2}^0 X_O^0 + k_2 X_{O_2}^0 - k_3 X_{NO}^0 X_N^0 - k_4 X_{NO}^0 X_O^0] \dots\dots\dots (38)$$

$$\xi = 1/2[k_1 X_O^0 + k_2 X_N^0] + k_3^0 + k_4 X_O^0 \dots\dots\dots (39)$$

式을 時間에 대해 積分하면

$$\alpha = \left(\frac{\eta}{\xi}\right) (1 - \exp^{-\xi/\Gamma \Delta t}) \dots\dots\dots (40)$$

가 된다.

NO의 初期量은 各 領域마다 火災이 도달하기 前에 0 이 되므로

$$(X_{NO})_k = \sum_{i=1}^{i=k} \alpha_i \dots\dots\dots (41)$$

이 된다.

4. 結果 및 檢討

Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6은 機關回轉速度 2000 rpm, 空氣過剩率 0.8~1.2, 點火時期를 BTDC 20°, 25° 및 30°로 하였을 때의 改質메탄올과 메탄올의 制動馬力을 표시한 것이다. Fig. 4의 點火時期 BTDC 20°의 경우, 空氣過剩率 0.9에서 改質메탄올과 메탄올이 각각 8.9 PS와 9.6 PS로 最大馬力을 나타내고, 이들 사이에는 7.3%의 차이가 있다. 또 空氣過剩率 1.0에서는 각각 8.65 PS와 9.47 PS, 空氣過剩率 1.1에서는 8.4 PS와 9.3 PS, 空氣過剩率 1.2에서는 7.65 PS와 8.65 PS를 나타내어 空氣過剩率이 커짐에 따라 그 차이가 커지고 있다. Fig. 5의 點火時期 25° BTDC의 경우에는 空氣過剩率 0.8에서 改質메탄올과 메탄올이 각각 8.9 PS 및 9.8 PS로 最大出力을 나타내며, 9.2%의 차

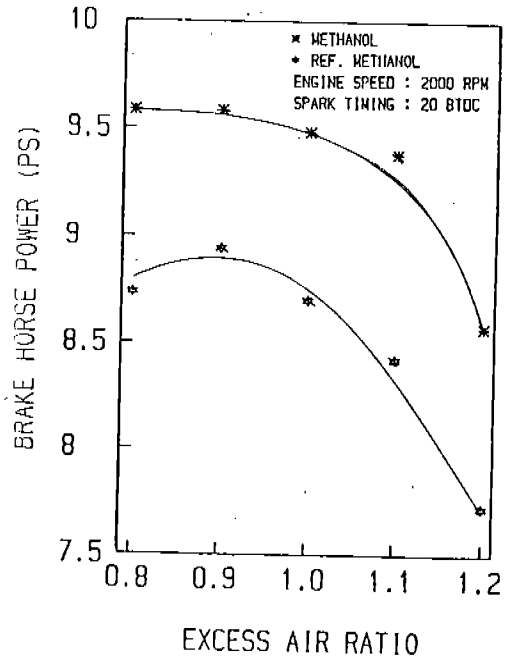


Fig. 4 Brake horse power vs. excess air ratio at 2,000 rpm, 20° BTDC ignition timing

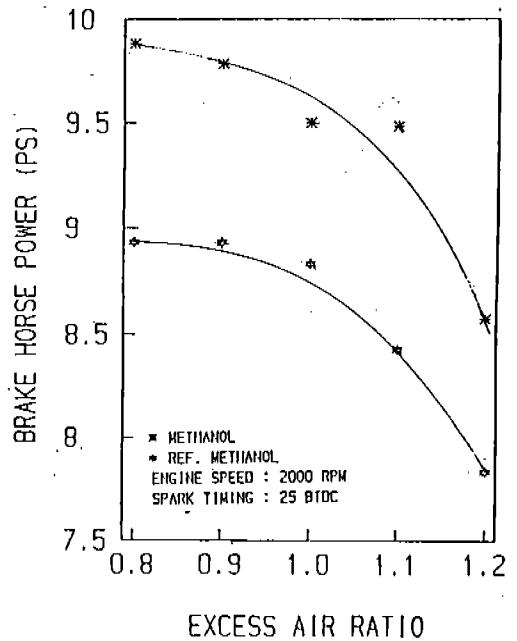


Fig. 5 Brake horse power vs. excess air ratio at 2,000 rpm, 25° BTDC ignition timing

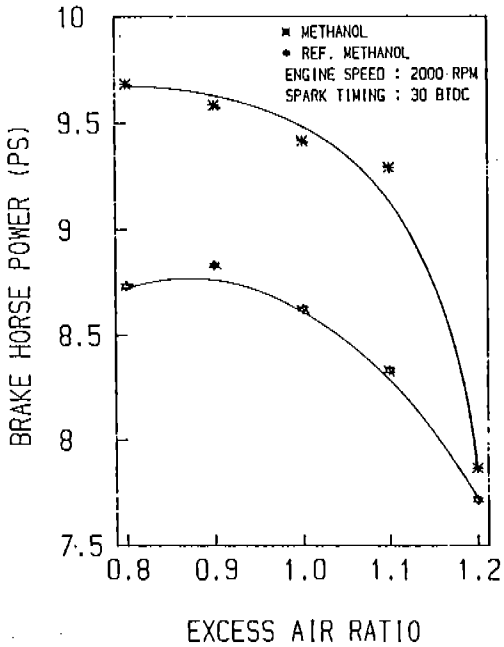


Fig. 6 Brake horse power vs. excess air ratio at 2,000 rpm, 30° BTDC ignition timing

이가 있다. 그리고 空氣過剩率 1.0에서는 각각 8.9 PS와 9.5 PS, 空氣過剩率 1.1에서는 8.45 PS와 9.5 PS, 空氣過剩率 1.2에서는 7.9 PS와 8.6 PS를 나타내어 이 경우에도 空氣過剩率이 커짐에 따라 그 차이가 커지고 있다. Fig. 6의 點火時期 30° BTDC에 있어서는 空氣過剩率 0.8에서 改質메탄올과 메탄올이 각각 8.75 PS 및 9.7 PS로 最大出力을 나타내며, 이들 사이에는 9.8%의 차이가 있다. 또 空氣過剩率 1.0에서는 각각 8.6 PS와 9.45 PS, 空氣過剩率 1.1에서는 8.3 PS와 9.35 PS, 空氣過剩率 1.2에서는 7.7 PS와 8.6 PS를 나타내어 이 경우에도 空氣過剩率이 커짐에 따라 그 차이가 커지다가 空氣過剩率 1.2에서 매우 근접되어 차이가 급속히 감소되고 있다.

以上の 결과를 종합하면, 改質메탄올과 메탄올이 모두 空氣過剩率 0.8~0.9에서 最大出力을 나타내고, 全般的으로 보아 改質메탄올에 의한 出力이 메탄올에 의한 것에 比하여

7~8% 적으며, 空氣過剩率이 커짐에 따라 그 차이가 소량이기 는 하나 더 커지는 傾向을 나타낸다. 또 Fig. 5의 경우로부터 미루어 보아 改質메탄올을 사용하는 이 경우의 MBT는 25° BTDC 근처에 存在한다는 것을 알 수 있다. 空氣過剩率 0.8~0.9에서 最大出力을 나타내는 것은 가솔린의 경우 등과 同一하고, 改質메탄올의 出力이 메탄올의 경우에 比하여 적은 것은 改質메탄올이 1/2 정도 가스상으로 되어 있어 메탄올에 比하여 體積效率이 적으므로 이것에 기인되는 것으로 생각된다.

燃料消費率は Fig. 7 및 Fig. 8에 표시한 것과 같다. 즉 機關回轉速度 2000 rpm, 點火時期 20° BTDC에서의 空氣過剩率과 燃料消費의 관계는 Fig. 7에서와 같이 空氣過剩率 0.8에서 改質메탄올의 燃料消費率は 528g/ps-h, 메탄올은 575g/ps-h로 改質메탄올이 메탄올에 比하여 約 8.9% 적으며, 空氣過剩率 1.0에서는 改質메탄올이 445g/ps-h, 메탄올이 478g/ps-h로 約 7.4% 적다. 또

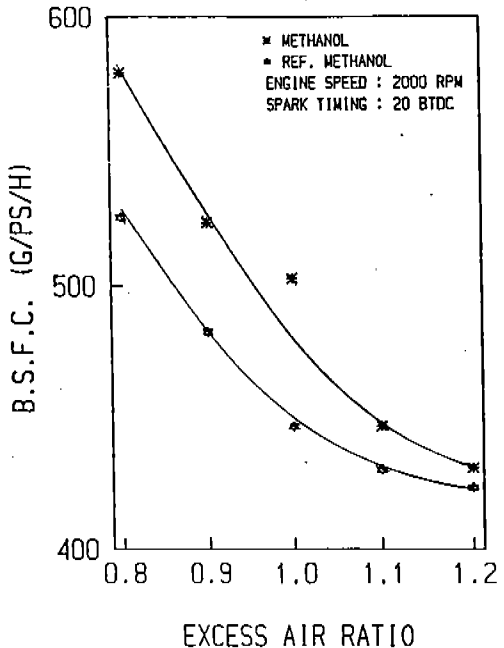


Fig. 7 BSFC vs. excess air ratio at 2,000 rpm, 20° BTDC ignition timing

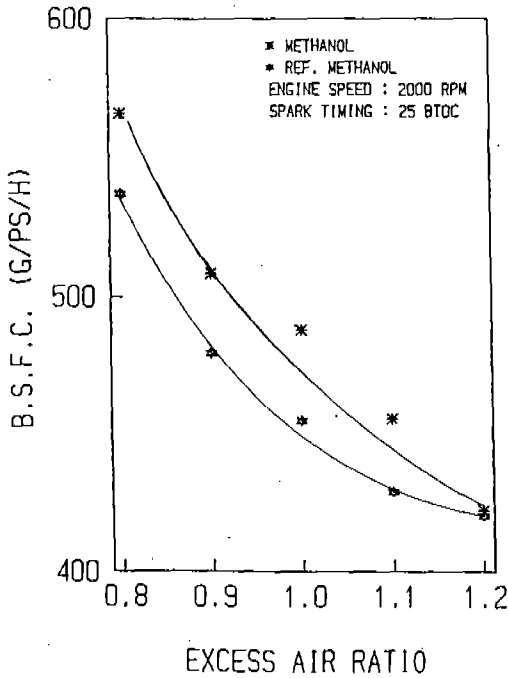


Fig. 8 BSFC vs. excess air ratio at 2,000 rpm, 25° BTDC ignition timing

空氣過剩率이 커짐에 따라 두 燃料의 燃料消費率의 차이가 점점 작아지고 있다. Fig. 8의 點火時期 25° BTDC의 경우는 空氣過剩率 0.8에서 改質메탄을 540 g/ps-h, 메탄을 565 g/ps-h로 改質메탄율이 메탄율에 比하여 4.4% 적으며, 이러한 狀態를 空氣過剩率 1.1가 가까이까지 계속 유지하다가 空氣過剩率 1.2부근에서 거의 一致하고 있다.

改質메탄율과 메탄율을 사용하는 경우의 制動熱效率은 Fig. 9과 Fig. 10에 표시한 것과 같다. 空氣過剩率 0.8~1.2의 범위에서는 改質메탄율과 메탄율 모두 空氣過剩率이 커질수록, 즉 混合氣가 희박 영역으로 갈수록 制動熱效率이 증가한다. 또 全般的으로 改質메탄율의 制動熱效率이 메탄율에 比하여 큰 값을 가지며, 空氣過剩率 0.8에서 그 차이가 가장 크고, 空氣過剩率이 커짐에 따라 감소한다. 空氣過剩率 1.2 부근에서는 메탄율의 制動熱效率이 改質메탄율에 比하여 약간 큰 값을 나타내기도 한다. 이것은 空氣過剩率이 커짐에

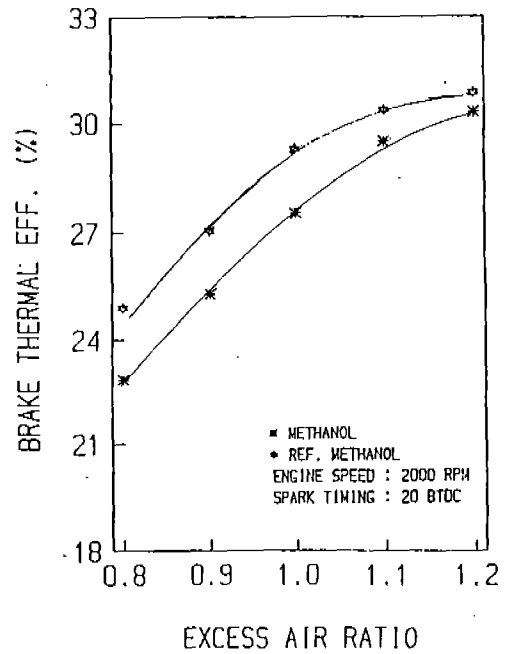


Fig. 9 Brake thermal efficiency vs. excess air ratio at 2,000 rpm, 20° BTDC ignition timing

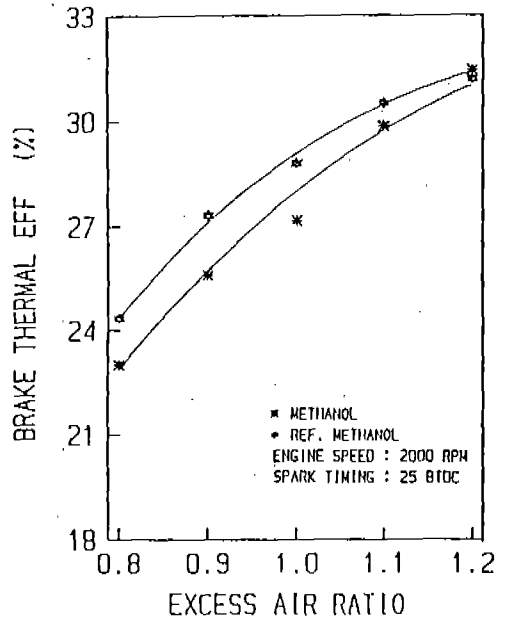


Fig. 10 Brake thermal efficiency vs. excess air ratio at 2,000 rpm, 25° BTDC ignition timing

따라 排氣의 溫度가 낮아지고 이에 따라 改質器 出口의 溫度가 낮아져 결과적으로 排氣熱의 回收가 충분히 이루어지지 않는 것에 원인한다고 생각된다.

Fig. 11과 Fig. 12는 각각 메탄올과 改質메탄올을 燃料로 하고, 機關回轉速度 2000rpm 點火時期을 20°BTDC로 하였을 때 실린더內의 壓力線圖와 燃燒率에 대한 實驗結果와 計算結果를 크랭크角에 따라 표시한 것이다. 메탄올을 燃料로 한 경우 燃燒室內의 最高壓力는 實驗値가 45 atm, 計算値는 55 atm으로 約 10 atm의 차이가 있고, 改質메탄올을 燃料로 한 경우에는 實驗値와 計算値가 각각 52 atm, 63 atm으로 11 atm의 차이를 나타낸다. 이로부터 改質메탄올을 燃料로 한 경우에 比하여 燃燒室內의 最高壓力가 높다는 것을 알 수 있다. 또 計算値가 實驗値에 比하여 높은 것은 計算에서 燃燒過程을 斷熱過程으로 가정

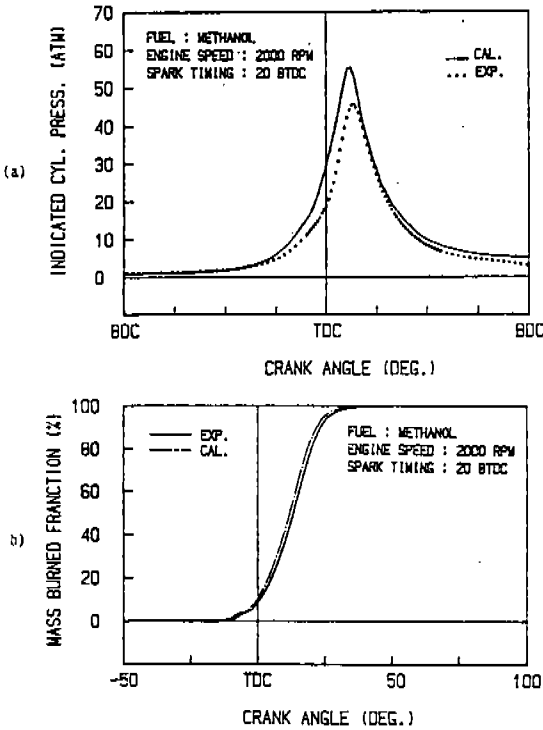


Fig. 11 (a) P-θ diagram and (b) mass burned fraction for methanol at 2,000 rpm, 20° BTDC ignition timing

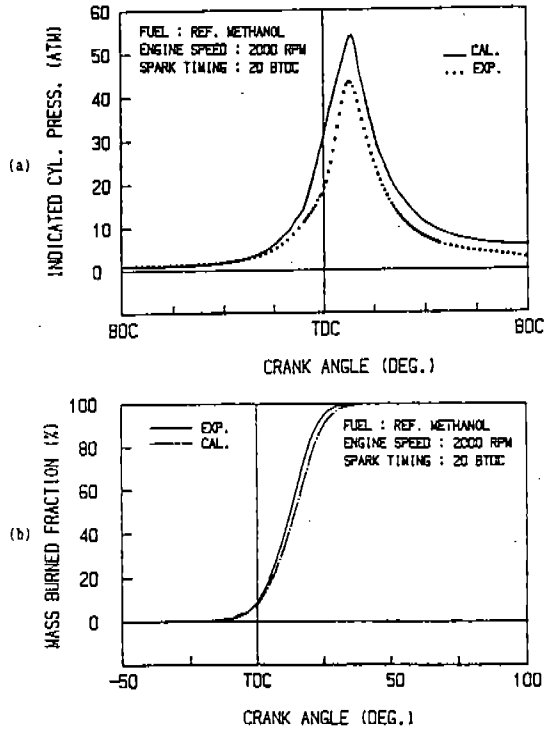


Fig. 12 (a) P-θ diagram and (b) mass burned fraction for reformed methanol at 2,000 rpm, 20° BTDC ignition timing

한 것에 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 13과 Fig. 14는 각각 메탄올과 改質메탄올을 燃料로 하고 機關回轉速度 2000 rpm, 點火時期 BTDC 25°와 30°일 때, 燃燒의 進行에 따른 燃燒室內의 溫度分布를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 既然部分에 溫度勾配가 存在하며, 火炎面을 境界로 既然部分과 未燃部分의 溫度의 차이가 급격하게 형성되며, 이들로부터 다음과 같은 것을 알 수 있다.

즉 改質메탄올을 사용하는 경우 燃燒室의 溫度는 메탄올을 사용하는 경우에 比하여 150 ~ 250 K 높아지며, 機關回轉速度를 一定하게 한 경우 點火進角이 커질수록 높아진다.

改質메탄올의 사용에서 燃燒室의 溫度가 높아지는 것은 水素의 斷熱火炎溫度가 메탄올에 比해 높기 때문이라고 생각할 수 있다.

Fig. 15와 Fig. 16은 機關回轉速度 2000

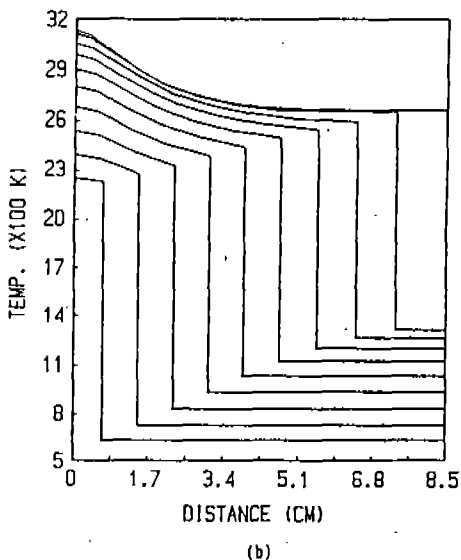
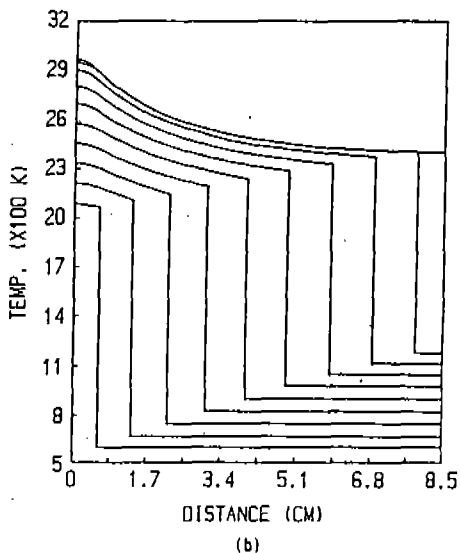
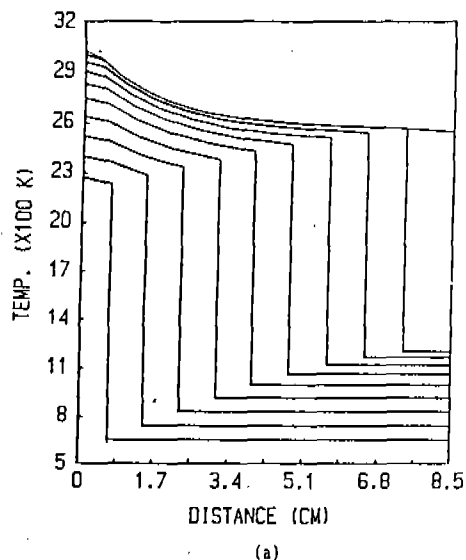
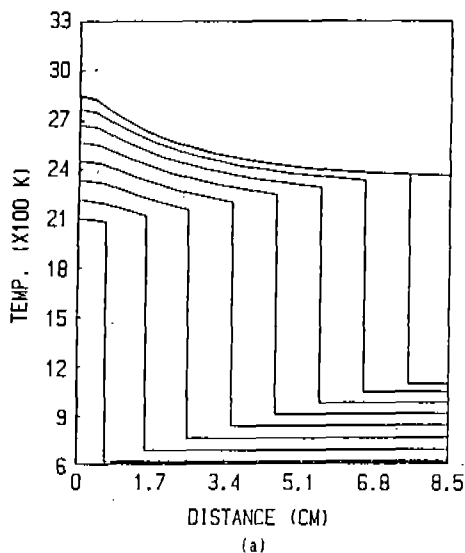
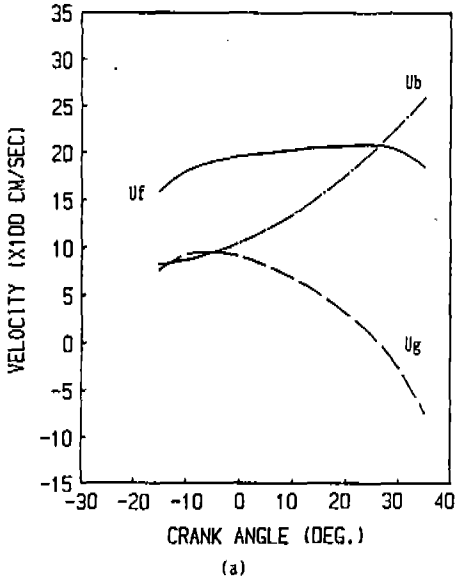


Fig. 13 Temperature distribution in cylinder during the combustion process for methanol at 2,000 rpm, (a) 25° BTDC and (b) 30° BTDC ignition timing

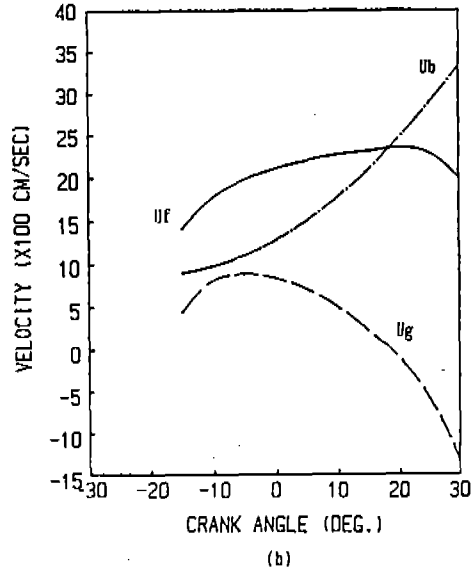
Fig. 14 Temperature distribution in cylinder during the combustion process for reformed methanol at 2,000 rpm, (a) 25° BTDC and (b) 30° BTDC ignition timing

rpm에서 點火時期를 각각 BTDC 20°와 30°로 하였을 때의 메탄올과 改質메탄올의 燃燒速度 U_b , 가스流動速度 U_g , 火炎傳播速度 U_f 를 크랭크角에 대해 표시한 것이다. Fig. 17은 機關回轉速度 2500 rpm, 點火時期 BTDC 20°일 때의 火炎傳播速度 등을 나타낸 것인

데 以上の 내용을 고찰해 보면 改質메탄올은 氣相의 水素를 포함하고 있어 그 火炎傳播速度가 메탄올에 比하여 1~3 m/s 정도 빠르고, 機關回轉速度가 증가함에 따라 火炎傳播速度가 증가된다.



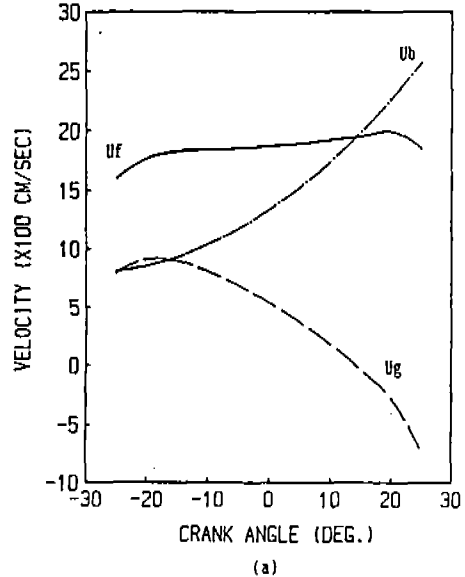
(a)



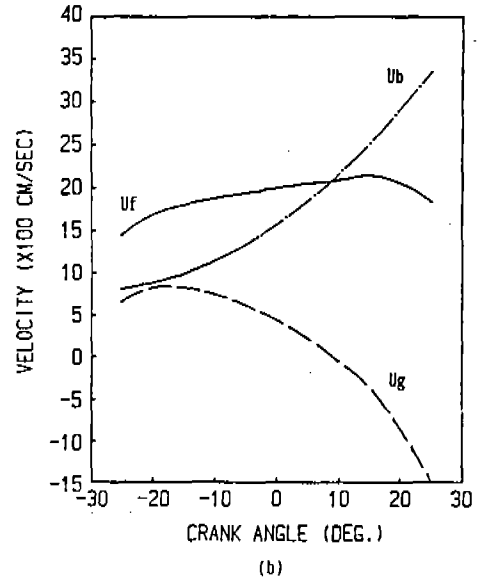
(b)

Fig. 15 Flame propagation U_f , burning U_b , and gas velocity U_g vs. crank angle at 2,000 rpm, 20° BTDC ignition timing for (a) methanol and (b) reformed methanol

燃焼中 실린더内に 生成되는 一酸化炭素(CO)의 平衡濃度는 Fig. 18과 Fig. 19에 표시한 것과 같다. Figs.는 機關回轉速度 2000 rpm에서 點火時期를 BTDC 20°와 25°로 하였을 때의 平衡濃度를 크랭크角度에 따라 표시



(a)



(b)

Fig. 16 Flame propagation U_f , burning U_b , and gas velocity U_g vs. crank angle at 2,000 rpm, 30° BTDC ignition timing for (a) methanol and (b) reformed methanol

한 것인데 濃度는 燃焼가 進行됨에 따라 급격히 증가하여 燃焼가 終了되었을 때 最高값을 나타내고, 이 후 膨脹過程에서 燃焼室의 溫度가 낮아짐에 따라 점차로 低下되고 있다. 또 平衡濃度의 最高값은 點火時期 BTDC 20°

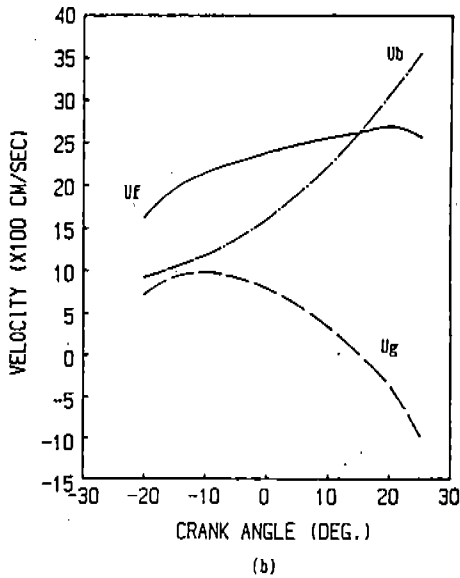
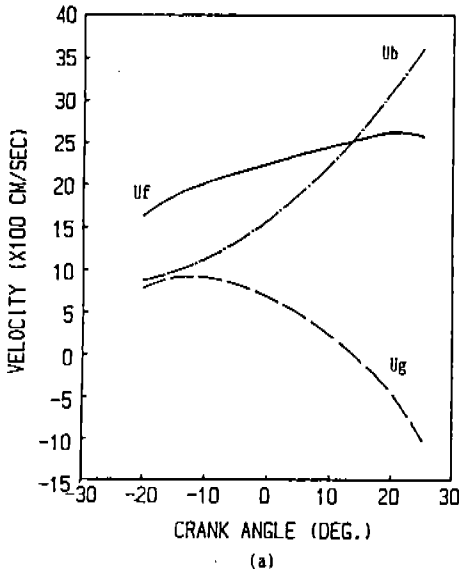


Fig. 17 Flame propagation U_f , burning U_b , and gas velocity U_g vs. crank angle at 2500 rpm, 25° BTDC ignition timing for (a) methanol and (b) reformed methanol

의 경우 5.3%이고, 25°에서는 5.7%로 커지고 있는데, 이것은 改質메탄올 사용시의 MBT가 BTDC 25°근처라는 것과 어떤 범위 내에서는 點火時期가 進角될수록 燃燒室溫度가 높아진다는 것을 감안하면 타당한 결과라고 할 수 있다.

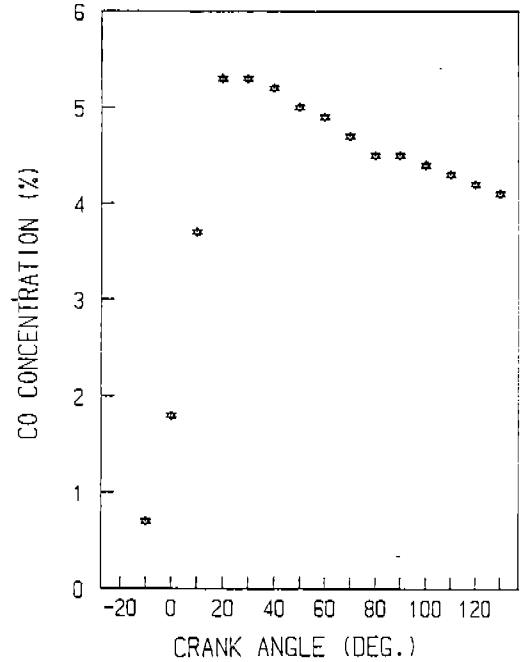


Fig. 18 Equilibrium CO concentration for reformed methanol vs. crank angle at 2,000 rpm, 20° BTDC ignition timing

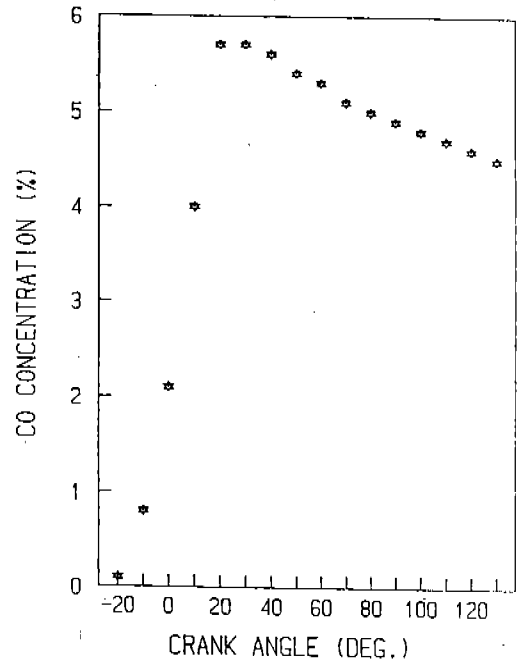


Fig. 19 Equilibrium CO concentration for reformed methanol vs. crank angle at 2,000 rpm, 25° BTDC ignition timing

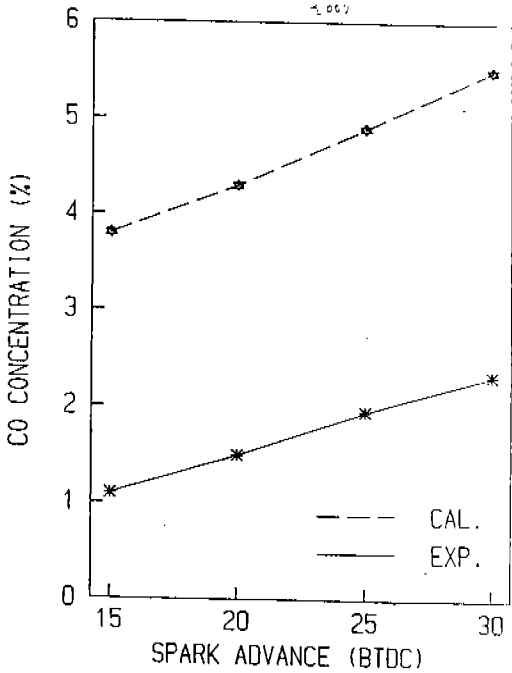


Fig. 20 Computed and experimental CO concentration vs. ignition timing at 2,000 rpm

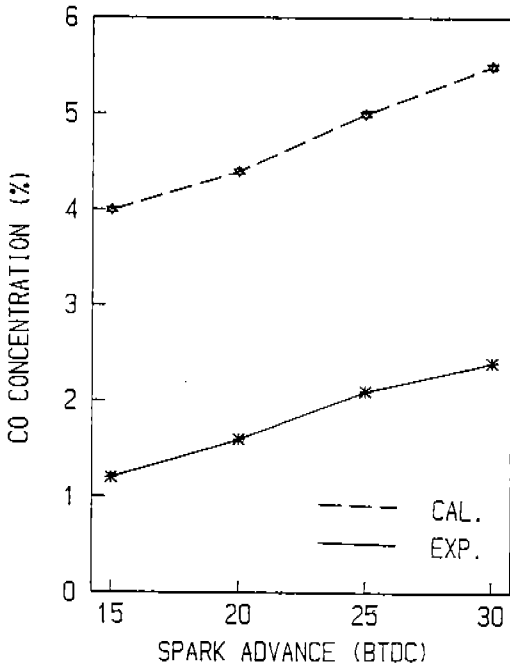


Fig. 21 Computed and experimental CO concentration vs. ignition timing at 2,500 rpm

實驗値와의 比較에 있어서는 計算値의 경우 위에서와 같이 平衡濃度를 나타내기 때문에 큰 차이를 표시한다. 즉 Fig. 20과 Fig. 21은 機關回轉速度 2000rpm 및 2500 rpm 일 때의 CO 排出物의 濃度를 比較한 것인데 機關回轉速度 2000 rpm, 點火時期 BTDC 25° 일 때 實驗値는 1.9%, 計算値는 4.8%로 計算値가 實驗値보다 2.5배 크다. 또 2500rpm BTDC 25°에서는 實驗値 2.2%, 計算値 5.2%로 이 경우에도 計算値가 實驗値의 2.3배에 이르고 있다. 그러나 點火時期가 進角될수록, 機關回轉速度가 증가될수록 CO 排出量이 증가되고 있는데 이 傾向은 計算値와 實驗値가 잘 일치되고 있다.

窒素酸化物(NO)의 濃度는 燃燒初期에는 거의 0이며, 燃燒가 進行됨에 따라 증가하여 燃燒가 終了되었을 때 最高값을 나타내고, 이후에는 점진적으로 감소되다가 거의 一定한 값을 유지하여 NO의 kinetic 反應이 종결된다. Fig. 22와 Fig. 23은 機關回轉速度 2000 rpm

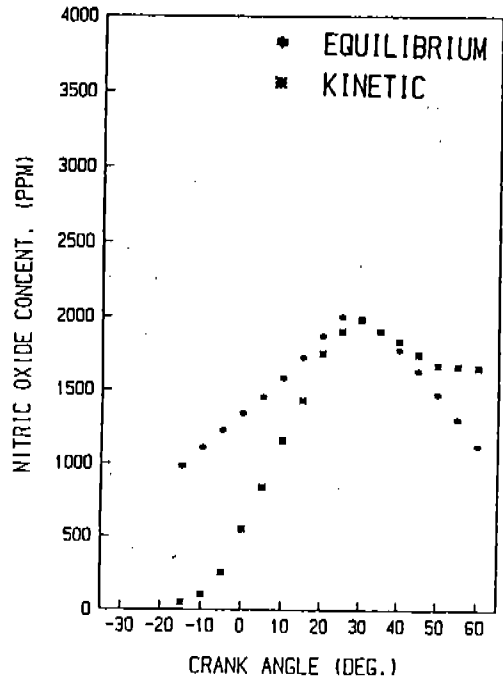


Fig. 22 Kinetic and equilibrium NO concentration for reformed methanol vs. crank angle at 2,000 rpm, 20° BTDC ignition timing

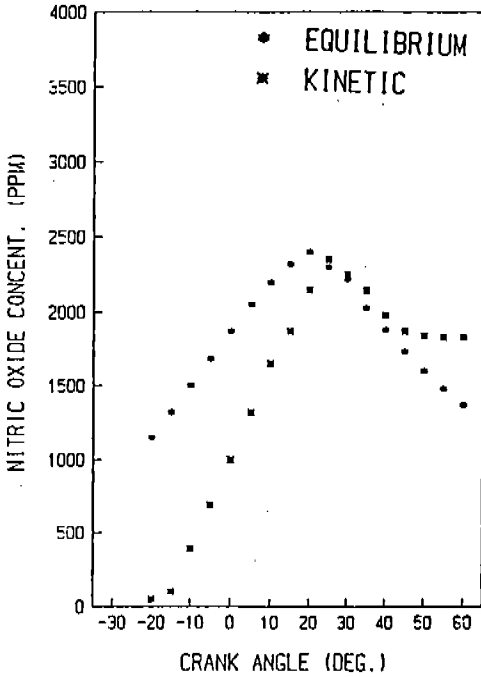


Fig. 23 Kinetic and equilibrium NO concentration for reformed methanol vs. crank angle at 2,000 rpm, 25° BTDC ignition timing

에서 點火時期를 BTDC 20°와 25°로 하였을 때의 이 관계를 나타낸 것이다. 또 點火時期의 영향을 받고 있다. Figs.에 의하면 點火時期 BTDC 20°일 때의 NO의 最大값은 1950 ppm인데 대해 25°일때에는 2350 ppm으로 약 20%증가되고 있다. Figs.에서 NO의 平衡濃度는 參考로 계산한 것이다.

Fig. 24와 Fig. 25는 機關回轉速度 2000 rpm에서 點火時期를 각각 BTDC 20°와 25°로 하고 燃燒가 終了되었을 때 NO Kinetic을 고려하여 計算한 NO의 濃度를 點火플러그로부터의 거리에 따라 표시한 것이다. NO의 濃度는 點火플러그부에서 가장 높고, 반대쪽으로 멀어질수록 점차로 감소되고 있다. 연소실 내의 溫度分布는 點火플러그부가 가장 높고, 멀어질수록 낮아지는 것에 비추어 볼 때 그 영향이 잘 일치되고 있는 것을 알 수 있다.

計算과 實驗의 結果는 比較的 잘 一致되고 있다. 즉 Fig. 26과 Fig. 27은 機關回轉速度

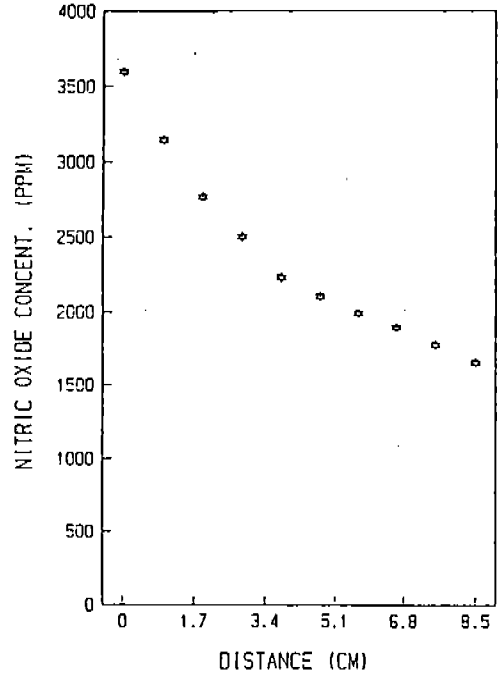


Fig. 24 Kinetic NO concentration for reformed methanol at the end of flame travel at 2,000 rpm, 20° BTDC ignition timing

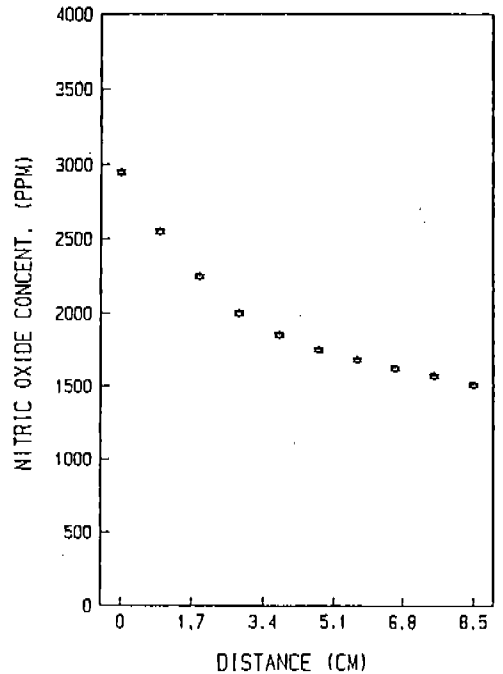


Fig. 25 Kinetic NO concentration for reformed methanol at the end of flame travel at 2500 rpm, 25° BTDC ignition timing

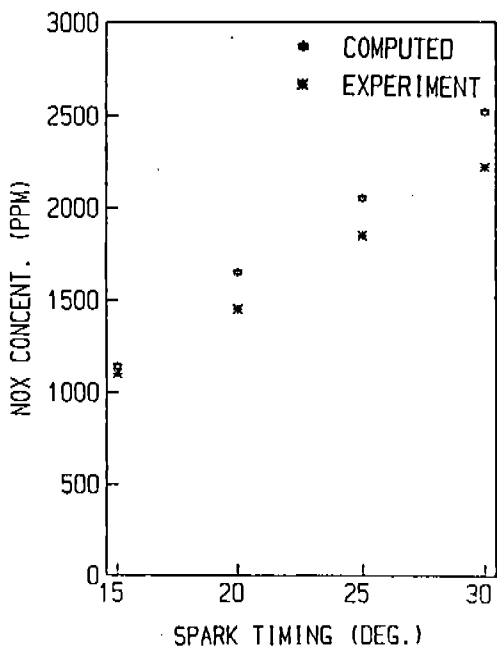


Fig.26 Computed and experimental NO concentration vs. ignition timing at 2,000 rpm

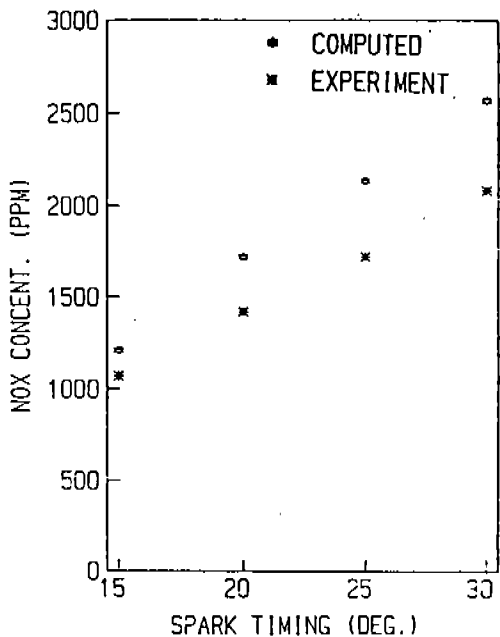


Fig.27 Computed and experimental NO concentration vs. ignition timing at 2,500 rpm

를 각각 2000 rpm과 2500 rpm으로 하고 NO의 排出濃度를 點火時期에 따라 표시한 것인데, 2000 rpm, 25°에서 計算値는 2050 ppm, 實驗値는 1835 ppm으로 計算値와 實驗値 사이에 約 10%의 차이밖에 없다. 이 차이는 計算에서 모든 過程을 斷熱過程으로 假定한 것에 크게 原因한다고 생각된다. 또 計算値와 實驗値가 모두 點火時期가 進角됨에 따라 增加되고 있는데 이 傾向에 있어 두 값이 잘 일치되고 있고, NO의 濃度가 點火時期의 進角과 함께 增加되는 것은, 燃燒室의 溫度가 點火時期의 進角에 따라 높아지고 NO가 高溫生成物이라는 것으로부터 이해할 수 있다.

5. 結 果

改質메탄올을 燃料로 하는 電氣點火機關의 排出物 濃度를 멀티존 모델을 사용하여 豫測한 다음 實驗値와 比較하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 改質메탄올을 燃料로 하는 機關은 보통 電氣點火機關과 마찬가지로 室氣過剩率 0.8~0.9에서 最大出力을 나타내고, 全般的으로 보아 메탄올의 경우에 比하여 7~8% 적다. 燃料消費率은 空氣過剩率이 커짐에 따라 減감되고 메탄올에 比하여 4~8% 적다. 또 制動熱效率은 空氣過剩率이 커짐에 따라 增加되며, 全般에 걸쳐 改質메탄올이 메탄올에 比하여 높다.

(2) 燃燒室內의 壓力線圖에 있어서는 計算値의 最高壓力이 實驗値의 最高壓力에 比하여 10~11 atm 높고 燃燒率에 있어서는 實驗値와 計算値의 主燃燒期間이 크랭크角度 2°以內的 범위에서 일치된다. 最高壓力에서 計算値가 實驗値에 比하여 높은 것은 計算에서 燃燒過程을 斷熱過程으로 假定한 것에 原因한다.

(3) 燃燒室의 溫度는 點火進角이 커질수록 높아지고, 改質메탄올이 메탄올에 比하여 150~250 K 높다.

(4) 火炎傳播速度에 있어서는 改質메탄올이 氣相의 水素의 影響으로 메탄올에 比하여 1~3 m/s 빠르다.

(5) 一酸化炭素(CO)의 排出濃度を 平衡濃度法에 따라 豫測하는 경우 實驗値에 比하여 훨씬 높은 값을 표시한다. 따라서 實際的인 것이 되지 않는다.

(6) 窒素酸化物(NO)의 排出濃도를 NO의 Kinetic를 고려하여 計算하면 實驗値보다 10% 정도 높은 범위 내에서 豫測된다.

參 考 文 獻

1. L.J. Muzio; "The Effect of Temperature Variation in Engine Combustion Chamber on Formation & Emission of Nitrogen Oxide", SAE 710518, 1971.
2. Benson & Whitehouse; "Internal Combustion Engine", Pergamon Press, 1979.
3. J.B. Heywood; "Engine Combustion Modelling - An Overview," (in Combustion Modelling in Reciprocating Engine), pp.1-38, Plenum Press, 1980.
4. I. Yamaguchi; "Development Research on Dissociated Methanol Fueled Spark Ignition Engine", JSAE 83009, 1983.
5. 유세중; "개질 메탄올을 연료로 사용하는 전기점화기관의 성능 및 배출물", 서울대학교 기계공학과 석사학위 논문, 1987.