

4氣筒 4사이클 스파크 點火機關 吸・排氣 系統의 流動에 關한 研究

A Study of Gas Flow in Intake and Exhaust Systems of a 4-Cylinder
4-Stroke Cycle Spark Ignition Engine

俞 炳 澈* 李 正 鉉**
Byung Chul Yoo, Jung Hyun Lee

ABSTRACT

When gas exchange process is to be calculated, the evaluation of the variation of the thermodynamic properties with time and position in the intake and exhaust system is required. For this purpose the application of the method of characteristics to the gas exchange process is known as the best method. In order to apply the method of characteristics, the gas flow at carburettor and inlet and exhaust valves must be replaced by some simple models by which thermodynamic properties can be calculated easily giving good agreement with actual values.

In this study, the carburettor is represented by an adiabatic pressure loss model. In this model resistance coefficients of carburettor are obtained by experiment. Using these resistance coefficients the pressure drop at carburettor can be calculated.

In order to select adequate average discharge coefficients for the inlet and exhaust valves, mass flow rate through intake and exhaust system is calculated by the method of characteristics using above resistance coefficient at specific engine operating condition and then it is compared with measured mass flow rate. The discharge coefficient is determined so that calculated mass flow rate gives good agreement with the measured mass flow rate.

For the engine used in this study average discharge coefficient of 0.6 gives good agreement with the measured mass flow rate over the whole engine operating conditions.

記 號 說 明

a : 音速

A_t : 流動面積

C_d : 流量係數

F : 管의 斷面積

f_c : 壓力降下係數 ($= \Delta P / \frac{1}{2} \rho u^2$)

h : 比엔탈피

K : 抵抗係數 ($= k f_c / 2$)

M : 마하 數

P : 壓力

P_T : 벨브 前後의 壓力比

* 高麗大學校 機械工學科

** 高麗大學校 大學院

- ΔP : 氣化器를 통한 壓力降下量
- R : 氣體常數
- T : 溫度
- u : 流體粒子的 速度
- x : 修正係數
- ρ : 密度
- k : 比熱比(= C_p/C_v)

下添字

- 0 : 停滯點
- 1 : 上流點
- 2 : 下流點

1. 緒 論

가스交換過程을 考慮한 機關 시뮬레이션에 있어서, 가스交換過程을 計算하기 위한 方法中 特性曲線法¹⁻³⁾을 使用하면 管內에서의 時間과 位置의 變化에 따른 熱力學的 狀態量을 計算할 수 있다. 特性曲線法을 使用하기 위해서는 氣化器를 지나는 流動 및 吸·排氣밸브의 流量係數를 計算이 容易한 簡單한 模型로 代置할 必要가 있다. Benson 등은 氣化器를 機關 吸氣系統에서 斷熱壓力降下가 일어나는 不連續點으로 생각하는 模型을 開發하여 氣化器 前後의 壓力差와 流量測定에 依해서 定해지는 抵抗係數를 定義하고 이것을 使用하여 氣化器에서의 壓力降下를 算定하였다.⁴⁾ 또한 吸·排氣밸브의 流量係數는 밸브의 揚程과 밸브 前後의 壓力比에 따라서 變化하며 그것을 考慮하려면, 밸브 揚程에 따른 變化 및 밸브 前後의 壓力比 變化에 따른 流量係數의 變化를 알아야 하고 計算이 極히 複雜해진다. 그러나 Benson 등은 밸브의 揚程이나 밸브 前後의 壓力比에 關係없이 單一의 流量係數를 適切하게 選定하면 變化하는 流量係數를 使用하였을 때와 比較하여 그 差異가 無視할 수 있을 程度로 작음을 밝힌 바 있다.⁵⁾ 그들은 이와 같은 一定한 값의 吸·排氣밸브 流量係數로서, 그것을 使用하여 計算한 吸入空氣量과 吸入空氣量의 實測值가 一致하도록 하는 값을 選定하였다.

本 論文은 Benson 등이 開發한 이들 方法을 實際의 4氣筒 4사이클 스파크 點火機關에 適用하여 그 妥當性을 檢討한 것이다. 그를 위하여 주어인 氣化器의 抵抗係數를 實驗으로 求하고, 이 값을 使用하여 吸·排氣系統에 대해서는 特性曲線法을 使用하고, 실린더內에서의 過程에 대해서는 尹, 俞 등^{3,6)}의 計算에 修正을 加하여 燃燒가 없는 單一領域模型로 생각한 시뮬레이션에 依하여 모터링의 경우의 機關으로의 吸入空氣量을 計算하였다. 또한 實際 機關으로의 吸入空氣量을 모터링 實驗에 依하여 測定하고 實測值와 計算值가 一致하도록 計算에 使用될 一定한 값의 流量係數를 決定하였다. 이와 같은 일을 任意로 選定한 基準 運轉條件에 대해서 施行한 結果 一定한 값의 吸·排氣밸브 流量係數로서 0.60을 얻었으며, 이 값이 다른 廣範圍한 運轉條件에서도 잘 適用될 수 있음을 實驗 結果와 計算 結果를 比較함으로써 確認하였다.

2. 基礎理論

2-1 氣化器에서의 定常流動

機關의 吸·排氣 系統의 構成要素중 氣化器 등을 지나는 가스流動을 解析할 때 氣化器를 斷熱壓力降下가 일어나는 簡單한 不連續點으로 생각하는 模型을 使用하는 것이 便利하다.^{4),7),8)}

一般的으로 斷熱壓力降下係數를 다음과 같이 定義한다.

$$f_c = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho u^2} \dots\dots\dots (1)$$

壓力降下係數 f_c 는 流動의 Mach數와 解析하려는 各 裝置에서의 여러 變數에 따라 變化하는 量이다.

定常流動에서도 氣化器에서의 流動 樣狀은 매우 複雜하며, 本 論文에서는 空氣-燃料 混合氣를 一定한 比熱을 갖는 理想氣體로, 그리고 流動을 1次元 流動으로 假定하고 解析하였다.

氣化器를 통한 壓力降下量 ΔP 와 基本的인 定常流動 方程式은 다음과 같다.

$$\Delta P = f_c \frac{1}{2} \rho_1 u_1^2 \dots\dots\dots (2)$$

에너지 方程式 :

$$h_0 = h_1 + \frac{u_1^2}{2} = h_2 + \frac{u_2^2}{2} \dots\dots\dots (3-a)$$

또는,

$$a_0^2 = a_1^2 + \frac{k-1}{2} u_1^2 = a_2^2 + \frac{k-1}{2} u_2^2 \dots\dots\dots (3-b)$$

連續方程式 :

$$F_1 \rho_1 u_1 = F_2 \rho_2 u_2 \dots\dots\dots (4)$$

音速 :

$$a = \sqrt{\frac{kP}{\rho}} \dots\dots\dots (5)$$

抵抗係數 K 를 다음과 같이 定義한다.

$$K = \frac{k f_c}{2} \dots\dots\dots (6)$$

式 (3)을 정돈하면,

$$\left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2 = \frac{\frac{2}{k-1} + M_1^2}{\frac{2}{k-1} + M_2^2} \dots\dots\dots (7)$$

式 (4)와 (5)를 정돈하면,

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{F_1}{F_2} \frac{a_2 M_1}{a_1 M_2} \dots\dots\dots (8)$$

抵抗係數 K 는 다음과 같이 變形시킨다.

$$K = \frac{k f_c}{2} = \frac{\Delta P}{\rho_1} \frac{k}{u_1^2} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \frac{k P_2}{\rho_1 u_1^2} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \frac{P_2}{P_1} = 1 - KM_1^2 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

式 (7), (8), (9)를 組合하여 M_1 에 關해서 풀면 다음의 式 (10)을 얻는다.

$$M_1 = \left(\frac{(2nK + \alpha m) - \sqrt{(2nK + \alpha m)^2 - 4n(nK^2 - \alpha)}}{2(nK^2 - \alpha)} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

여기서,

$$m = \frac{2}{k-1}, \quad n = m M_2^2 + M_2^4, \quad \alpha = \left(\frac{F_1}{F_2}\right)^2$$

氣化器 前後의 狀態量들은 抵抗係數 K 가 주어져 있으면 M_2 를 假定하여 式 (10)에서 M_1 을 計算하고 이들과 狀態量間的 關係式을 利用하여 反復法에 依하여 求할 수 있다. 여기서 抵抗係數 K 는 스토프 밸브 開度와 M_2 의 函數로서 實驗에 의하여 導出한다.

이와 같이 氣化器 入出口에서의 新氣의 熱力學的 狀態量을 구함으로써 機關으로 吸入되는 吸入空氣量을 計算할 수 있다.

2-2 吸·排氣밸브에서의 流動

機關의 性能을 보다 正確하게 豫測하기 위해서는 밸브를 지나는 流量을 正確하게 알아야 한다. 다음의 式 (11)은 流量을 求하는 式이며 여기서 流量係數 C_d 는 밸브의 揚程과 밸브 前後의 壓力比, 流動의 方向에 따라서 變化한다.

$$\dot{m} = C_d \frac{P_0 A_t}{\sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_r^{2/k} [1 - P_r^{(k-1)/k}] \dots (11)}$$

이때 機關의 運轉條件에 따라 變化하는 流量係數를 使用하는 대신에 平均的인 하나의 流量係數의 값을 選定하여 使用하면 便利하다.

式 (11)에서 流量係數 C_d 를 任意의 一定한 값으로 놓고 吸入空氣量을 計算한 다음 이 計算값이 實驗으로 求한 吸入空氣量과 一致하면 이때 計算에 使用한 C_d 값을 그 運轉條件에서의 流量係數로 잡는다.

위와 같은 方法으로 구한 流量係數를 使用하여 機關의 吸·排氣過程중의 壓力變化를 計算한 값과, 밸브의 揚程이나 壓力比에 따라서 變化하는 流量係數를 使用하여 壓力變化를 計算한 값을 比較하면 그 差異가 無視할 수 있을 程度로 작음이 알려져 있다.^{5,9)}

2-3 流動圖

本 論文에서 밸브 流量係數를 選定하기 위하여 使用된 프로그램은 FORTRAN IV로 作成되었으며 실린더內와 管內에서의 流動 및 各種 境界에서의 流動의 計算을 包含한다. 실린더內 狀態量의 計算은 熱力學 第1法則과 連續方程式을 利用하여 실린더內 壓力變化率과

質量變化率을 導出하고, Runge-Kutta法과 理想氣體 狀態式에 의하여 다음 時間段階에서의 壓力, 溫度 및 質量을 計算한다.³⁾ 吸·排氣管內에서의 流動은 壁面과의 摩擦과 斷面積의 變化, 熱傳達 및 엔트로피 變化를 갖는 非定常 1次元 流動으로 假定하여 이를 特性曲線法에 의하여 計

算하는 尹, 俞 등^{3,6)}의 프로그램을 使用하였다. 이 프로그램은 吸氣 및 排氣 밸브, 氣化器, 分岐管 連結部 및 大氣와 接한 境界 등의 各種 境界條件의 計算을 包含하며 이들 境界條件은 準定常流動으로 假定하고 計算하였다. Fig.1은 그 流動圖를 表示한다.

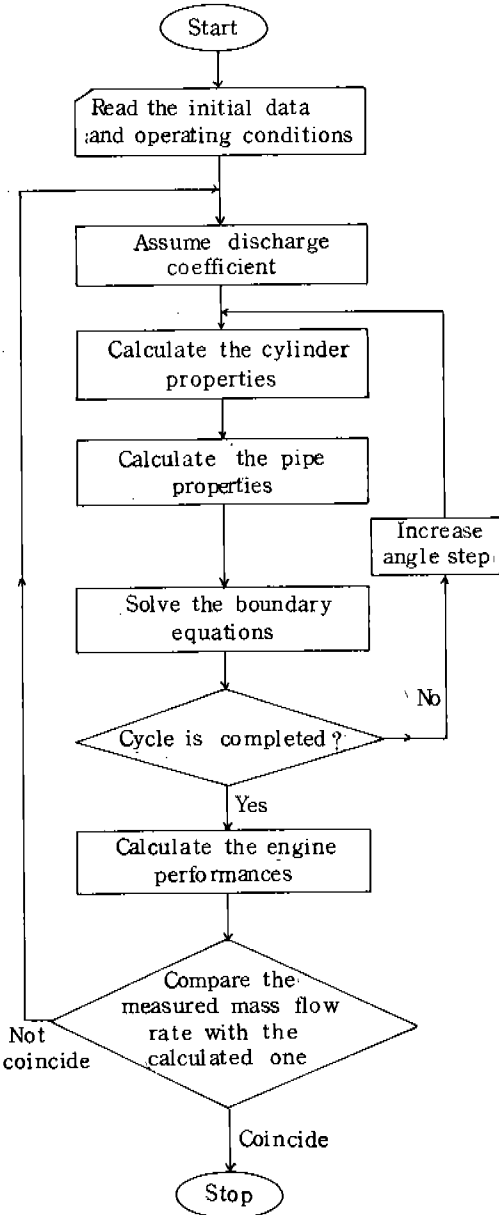


Fig.1 Flow chart for calculation of the valve discharge coefficient.

3. 實驗裝置 및 實驗方法

3-1 氣化器

抵抗係數를 決定하기 위한 定常流動 實驗裝置의 構成圖는 Fig.2 와 같다.

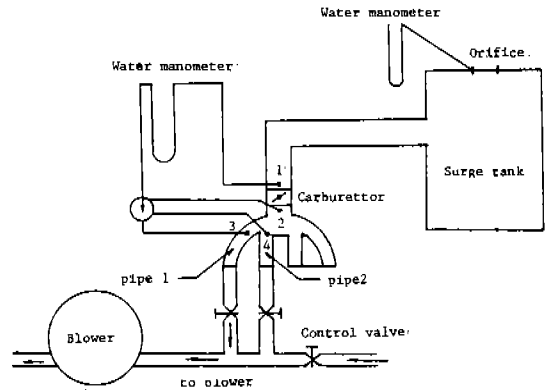


Fig.2 Schematic diagram of steady-flow test rig for carburettor.

氣化器는 吸入管을 通하여 送風機에 連結되어 있고 氣化器를 지나는 空氣流量은 調整밸브에 의하여 調節된다.

氣化器 前後 1, 2點에서의 壓力降下量을 水柱 마노미터로 測定하였으며 스톱 밸브의 開度는 全開, 3/4開, 1/2開, 3/8開, 1/4開의 5개의 境遇에 대하여 實驗하였다. 實驗은 一定한 스톱 밸브 開度 아래서 空氣가 機關으로 들어가는 正常的인 경우와 逆流의 경우에 대하여 施行하였다. 氣化器를 지나서 흐르는 空氣量은 서지탱크의 入口에 設置된 圓形노즐 前後의 壓力差를 測定함으로써 決定된다. 實驗에 使用한 送風機의 主要諸元은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

Table 1. Specification of blower

Item	Specification
Type	Y. T. F- 31/2
Air flow rate	15 m ³ /min
Air pressure	630mm Aq
Revolution	3500rpm
Driving motor power	5PS

3-2 吸入空氣量の測定

國產 乘用車用 4氣筒 4사이클 스프라크 點火 機關을 可變速모터로 모터링하여 機關으로의 吸入空氣量を 測定하였다.

氣化器의 스톨밸브 開度を 全開에서 1/4 開까지 5가지로 變化시켰으며, 이 때 各 스톨 밸브의 開度 아래서 機關의 回轉速度를 1000 rpm에서 3000 rpm까지 5가지로 變化시켰다.

서지탱크의 圓形노즐 前後의 壓力差를 水柱 마노미터로 測定하여 吸入空氣量を 算定하였으며 各 경우의 吸氣 매니폴드에서의 壓力을 水銀 마노미터로 測定하고 機關으로부터 冷却 水로의 傳熱量과 吸·排氣管에서의 流動空氣 溫度를 測定하였다.

Fig. 3은 實驗裝置의 構成圖를 表示한다.

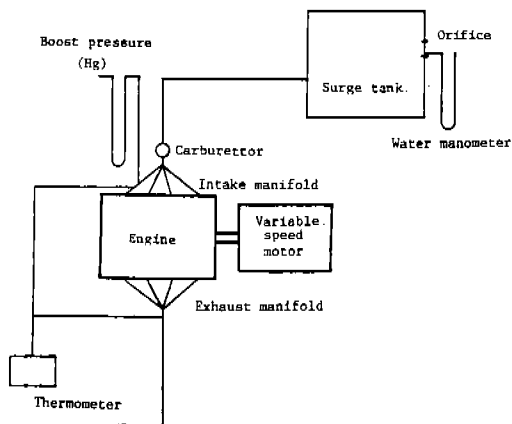


Fig.3 Schematic diagram of experimental apparatus.

實驗에 利用한 機關과 可變速모터의 主要諸元은 Table 2와 Table 3에 나타난 바와 같다.

Table 2. Engine specification

Item	Specification
Type	4CYL - IN LINE - OHC Water cooled
Piston displacement (cc)	1238
Bore × Stroke (mm)	73 × 74
Connecting rod length (mm)	153.7
Compression ratio	9.0
Maximum output (PS/rpm)	80 / 6300
Maximum torque (kgm/rpm)	10.8 / 4000
Valve timing	
Intake valve open	7 BTDC
Intake valve close	47 ABDC
Exhaust valve open	42 BBDC
Exhaust valve close	6 ATDC

Table 3. Eddy current coupling variable speed motor

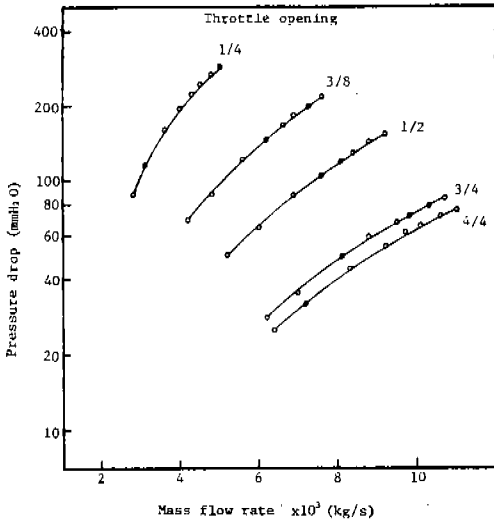
Item	Specification
Type	VSM - FT
Driving motor	3φ 2P AC 220/380V 15 PS
Revolution	330 - 3300 rpm
Torque	3kgm

4. 結果 및 考察

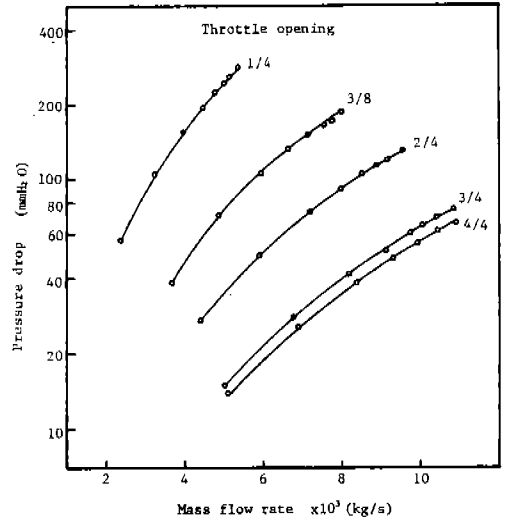
4-1 氣化器의 抵抗係數

Fig. 4는 定常狀態流動에서 各 스톨 밸브 開度에서의 流量에 따른 氣化器 上下流 間의 壓力降下量을 各 流動方向에 따라 圖示한 것며, 이들과 式 (9)를 利用하여 導出한 正常流動에서의 抵抗係數와 氣化器 下流側의 Mach數와의 關係를 Fig. 5에 나타낸다.

이들 그림에서 보는 바와 같이 氣化器의 抵抗係數는 流動速度와는 거의 無關하며 스톨

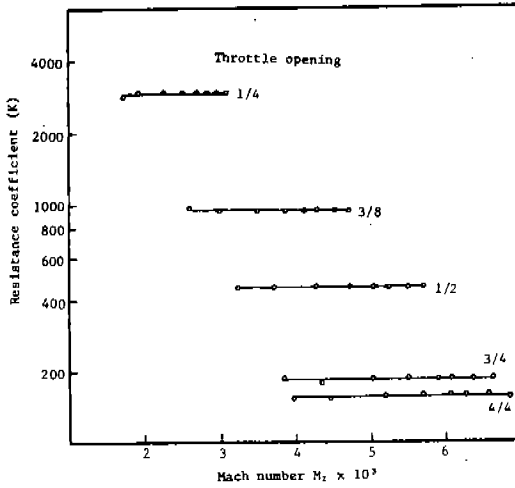


(a) Normal flow

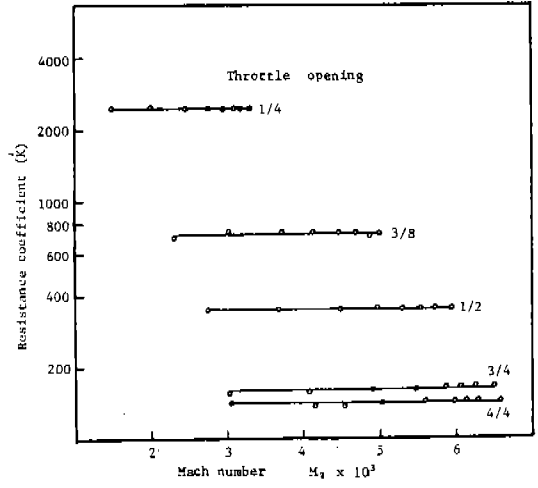


(b) Reverse flow

Fig.4 Pressure drop across the carburettor vs. mass flow rate.



(c) Normal flow



(d) Reverse flow

Fig.5 Resistance coefficient vs. Mach number at downstream of carburettor.

밸브 開度만의 函數임을 알 수 있다. 卽,

$$K = f(\text{스스로틀밸브 開度})$$

이것은 Benson 등⁴⁾의 研究結果와 一致한다. 逆流의 경우는 抵抗係數가 正常流動方向일 때 보다 다소 작은 값을 나타낸다. Table 4는 各 스스로틀 밸브 開度와 流動方向에 대한 抵抗係數의 實驗값을 나타낸다.

Table 4. The values of resistance coefficient

Throttle Opening	Normal Flow	Reverse Flow
4 / 4	156.78	136.75
3 / 4	184.42	157.20
1 / 2	448.75	346.17
3 / 8	956.43	725.61
1 / 4	2950.37	2466.67

4-2 吸入空氣量

Fig. 6 은 吸氣管에서의 壓力降下와 機關回轉速度와의 關係를 各 스톱 밸브의 開度에 대하여 實測하여 나타낸 것이다. 스톱 밸브의 開도가 작아질수록 絞縮效果에 의하여 吸氣管

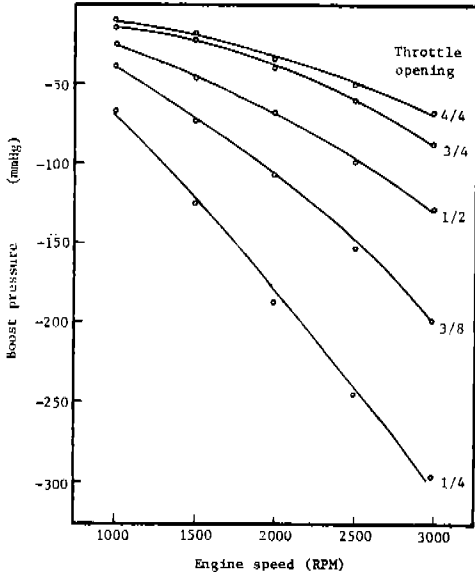


Fig. 6 Variation of boost pressure with throttle opening and engine speed.

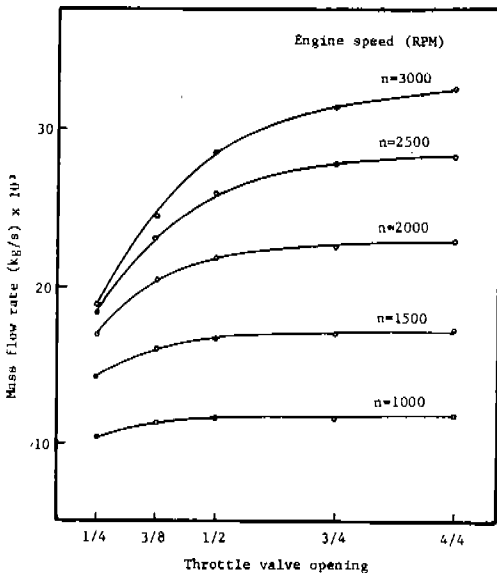


Fig. 7 Effect of the throttle opening on mass flow rate.

에서의 壓力降下는 커짐을 알 수 있다. Fig. 7 은 吸入空氣량과 스톱 밸브 開度와의 關係를 實測하여 各 回轉速度를 파라미터로 하여 나타낸 것이다. 全開에서 1/2開까지는 各 機關回轉速度에서 吸入空氣량의 變化가 작으나 1/2開 以下로 開도가 작아지면 吸入空氣량의 變化가 커짐을 볼 수 있다.

4-3 밸브의 流量係數

밸브의 流量係數를 選定하기 위하여 機關回轉速度 2000 rpm, 스톱 밸브 1/2開인 경우를 基準 運轉條件으로 삼고 이 條件에서 流量係數를 여러가지로 바꾸면서 計算된 流量이 實測된 流量과 一致하도록 하는 流量係數를 찾아낸다. 이때 氣化器에서의 流動을 計算하기 위하여 適用되어야 하는 抵抗係數 K는 實際 運轉條件에서 나타나는 非定常效果를 考慮해 주어야 하므로 앞서 定常流動의 實驗에서 구한 抵抗係數에 修正係數 x를 곱하여 이를 非定常 流動의 抵抗係數로 使用하였다. 이 修正係數의 決定은 밸브 流量係數의 選定作業과 並行하여 吸入空氣량과 부스트 壓力의 計算값이 實驗값에 接近하도록 反復的으로 計算하는 方法에 의하여 決定하였다. 이와 같은 方法으로 2000rpm, 스톱 밸브 1/2開인 경우에 流量係數 $C_d=0.60$, 修正係數 $x=0.80$ 을 選定하였다. 이 값을 같은 機關回轉速度인 2000 rpm, 에서 다른 스톱 밸브 開度에 適用하여 計算한 結果를 Fig. 8 과 Fig. 9에 나타낸다. Fig. 8 은 計算된 吸入空氣량을 實驗값과 比較한 것이다. Fig. 9는 부스트 壓力의 實驗값과 計算한 값을 比較하여 圖示한 것이며 兩者가 比較的 잘 一致하고 있다. Table 5는 實驗에 의하여 測定된 吸入空氣量, 計算된 吸入空氣量 및 兩者間의 誤差를 나타낸 것이다. 여기서 볼 수 있는 바와 같이 스톱 밸브의 開度에 關係없이 앞에서 定한 抵抗係數 K의 값과 流量係數 0.60 및 修正係數 0.80을 使用한 吸入空氣량의 計算값은 實測된 값과 잘 一致하고 있다.

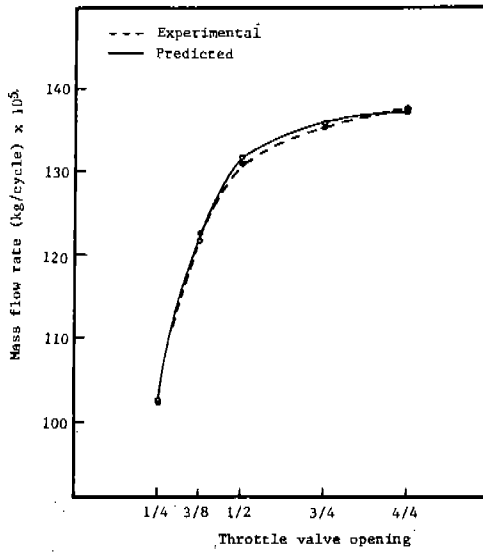


Fig.8 Effect of the throttle opening on mass flow rate ($C_d=0.60, x=0.80, 2000 \text{ rpm}$).

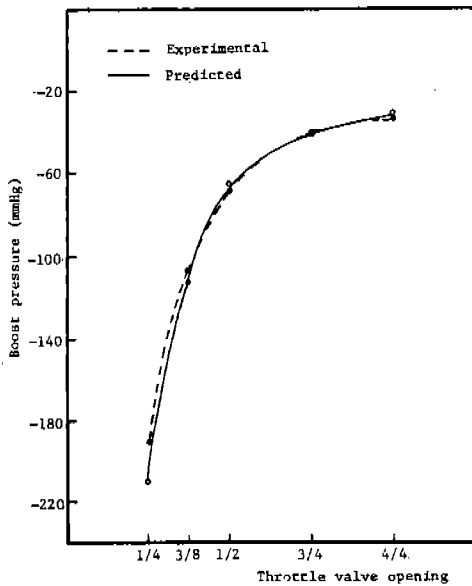


Fig.9 Effect of the throttle opening on boost pressure ($C_d=0.60, x=0.80, 2000 \text{ rpm}$).

스스로 밸브 開度를 1/2로 固定하고 機關 回轉速度를 1000 rpm에서 3000 rpm까지 變化시키면서 앞에서 定한 抵抗係數와 流量係數 0.60 및 修正係數 0.80을 使用하여 計算한 吸入空氣量과 實驗값의 比較를 Fig.10에 나타

Table 5. Measured and calculated mass flow rate ($C_d=0.60, x=0.80, 2000 \text{ rpm}$)

Throttle opening	Measured mass flow rate (kg/cycle)	Calculated mass flow rate(kg/cycle)	Error (%)
4 / 4	1.375 E-3	1.371 E-3	0.3
3 / 4	1.352	1.354	0.1
1 / 2	1.307	1.316	0.7
3 / 8	1.221	1.211	0.8
1 / 4	1.014	1.018	0.4

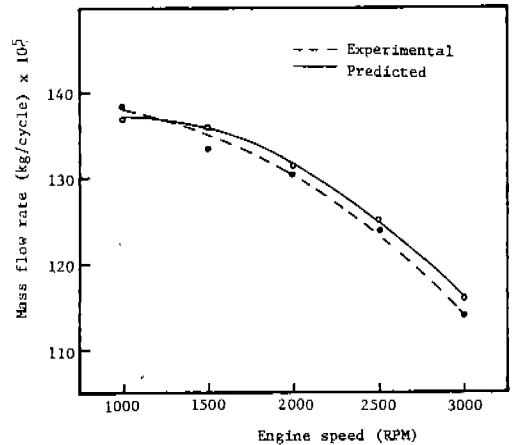


Fig.10 Effect of the engine speed on mass flow rate ($C_d=0.60, x=0.80, 1/2 \text{ throttle opening}$).

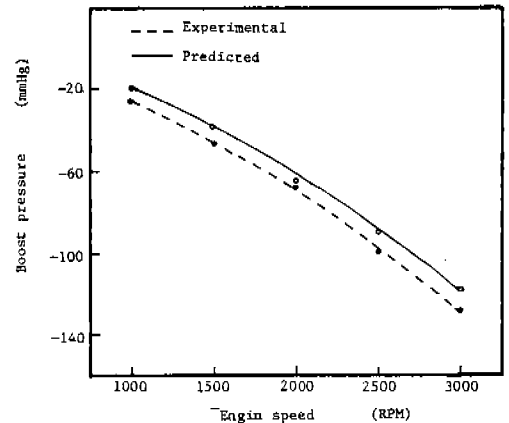


Fig.11 Effect of the engine speed on boost pressure ($C_d=0.60, x=0.80, 1/2 \text{ throttle opening}$).

내며 Table 6에 이들 값과 그 誤差를 나타낸다. Fig.11은 이 경우의 부스트 壓力의 變化를 實驗값과 計算값을 比較하여 나타낸 것이다.

Table 6. Measured and calculated mass flow rate
($C_d=0.60, x=0.80, 1/2$ throttle opening)

Engine speed (rpm)	Measured mass flow rate(kg/cycle)	Calculated mass flow rate(kg/cycle)	Error (%)
1000	1.386 E-3	1.366 E-3	1.5
1500	1.333	1.361	2.1
2000	1.307	1.316	0.7
2500	1.241	1.254	1.0
3000	1.141	1.163	1.9

위의 結果에서 알 수 있는 바와 같이 스로틀 밸브의 開度와 機關回轉速度에 關係없이 앞에서 定한 抵抗係數의 값과 流量係數 $C_d=0.60$, 修正係數 0.80이라는 값을 使用하여 計算된 吸入空氣量의 값은 實驗값과 잘 一致하였으며 부스트 壓力의 豫測은 3~11mmHg 以內的 正確度로 豫測할 수 있다.

5. 結 論

주어진 4氣筒 4사이클 스파크 點火機關의 가스交換過程에 대한 特性曲線法에 必要한 氣化器의 抵抗係數 및 修正係數와 吸·排氣밸브에서의 流量係數를 理論的 및 實驗的인 節次를 통하여 求하였으며 이에 의하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 氣化器의 抵抗係數는 機關 回轉速度에는 無關係하고 스로틀 밸브의 開度만의 函數임을 밝혔으며, 주어진 氣化器에 대하여 各 스로틀 밸브 開度에서의 抵抗係數를 實驗에 의하여 求하였다.

(2) 氣化器의 抵抗係數 및 修正係數와 單一값의 吸·排氣 밸브 流量係數를 使用하여 計算한 吸入空氣量의 豫測값이 實測된 값과 一致하도록 하는 流量係數를 任意로 定한 基準 運轉條件에서 選定하였다.

(3) 위의 값이 任意的 基準 運轉條件에서 選定한 單一의 吸·排氣밸브 流量係數와 各 스로틀 開度에서의 氣化器의 抵抗係數 및 修正係數를 使用하여 計算한 吸入空氣量의 豫測값은 여러 機關回轉速度와 스로틀 밸브 開度에 대하여 實測값과 잘 一致하였으며 이때 부스트 壓力의 豫測값도 實測값과 比較的 잘 一致하였다.

參 考 文 獻

1. R.S. Benson, R.D. Garg and D. Woollatt, "A Numerical Solution of Unsteady Flow Problems", Int. J. Mech. Sci., vol.6, pp. 117-144, 1964.
2. R.S. Benson, W.J.D. Annand and P.C. Baruah, "A Simulation Model Including Intake and Exhaust Systems for a Single Cylinder 4-Stroke Cycle S.I. Engine", Int. J. Mech. Sci., vol.17(2), pp.97-124, 1975.
3. 尹健植, 俞炳澈, "單氣筒 4사이클 스파크 點火機關 吸·排氣過程의 시뮬레이션", 自動車工學會誌 7(1), pp.24~34, 1985.
4. R.S. Benson, P.C. Baruah, Ir. R. Sierens, "Steady and Nonsteady Flow in a Simple Carburettor", Proc. Instn. Mech. Engrs., vol.188, pp.537-548, 1974.
5. R.S. Benson, K. Galloway, "An Experimental and Analytical Investigation of the Gas Exchange Process in a Multi-Cylinder Pressure-Charged 2-Stroke Engine", Proc. Instn. Mech. Engrs., vol.183, pp.253-279, 1968.
6. 李秉海, 尹健植, 俞炳澈, "4氣筒 4사이클 스파크 點火機關의 性能 및 排氣組成 豫測", 韓國自動車工學會 1987年 秋季 學術 講演會 抄錄集, pp.45~55, 1987.
7. R.S. Benson, "The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engine", vol.1, pp.398-478, Clarendon Press, Oxford, 1982.
8. R.S. Benson and N.D. Whitehouse, "Internal Combustion Engines", Combined Ed., pp. 260-268, Pergamon Press, Oxford, 1979.
9. Masaaki Takizawa, Tatsuo Uno and Toshiaki Oue, "A Study of Gas Exchange Process Simulation of an Automotive Multi-Cylinder Internal Combustion Engine", SAE Paper 820410, 1982.