

◆ 連載講座 ◆

第 3 回(終)

往復式 壓縮機의 電算機시뮬레이션

8. 有效流動斷面積

式(21)에서 有效斷面積 A_v 는 實驗的으로 規明된다. 實驗設備(그림 10)는 밸브리드와 밸브자리(valve seat)의 거리를 임의로 調節할 수 있게 하고 流量은 오리피스(orifice) 流量計로 測定한다. 溫度 T_u 와 壓力 P_u 를 測定하면 式(24)로부터

$$A_v = \frac{\dot{m}_v}{P_u \sqrt{\frac{2kg_c}{(k-1)T_u}} \sqrt{r^{2/k} - r^{k+1/k}}} \quad (47)$$

을 얻을 수 있다. 여기서 밸브의 下流를 大氣와 通하게 設치하면

$$r = \frac{P_{atm}}{P_u} \quad (48)$$

이다. 勿論 式(47)에서 $r \leq r_c$ 이면 r 은 r_c 로 바뀌어 진다.

이 實驗裝置에서는 밸브리드가 밸브자리의 平行하게 移動하는데 實際로는 平行하게 열리지 않는다. 電算機 모델을 위하여는

$$A_v = A_{vp}(W(x, y)) \quad (49)$$

로 假定한다. 여기서 p 는 平行移動을 나타내는 添字이

裴 洵 勳*

다. A_{vp} 는 밸브의 平行移動거리 W 에 따라서 그림 11과 같이 變한다.

그림 8에서와 같이 두개의 別個로 된 오리피스의 경우에는

$$A_v = A_{vp} = A_{vp1} + A_{vp2} \quad (50)$$

여기서

$$A_{vp1} = \frac{\Delta A_1}{A} A_{vp} \quad (51)$$

$$A_{vp2} = \frac{\Delta A_2}{A} A_{vp} \quad (52)$$

따라서

$$A_v = \frac{\Delta A_1}{A} A_{vp}(W(x_1, y_1)) + \frac{\Delta A_2}{A} A_{vp}(W(x_2, y_2)) \quad (53)$$

이 되고 一般的으로는

$$A_v = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^k \Delta A_i A_{vp}(W(x_i, y_i)) \quad (54)$$

가 되는데 이 式들은 시뮬레이션에서 잘 맞는다.

9. 有效 힘面積

式(37)에 使用된 有效 힘面積 $B(W)$ 도 위와 비슷한 方式으로 求할 수 있다. 有效流動斷面積에서 利用한 實驗裝置에 밸브리드 固定裝置만을 改造하여 밸브리드에

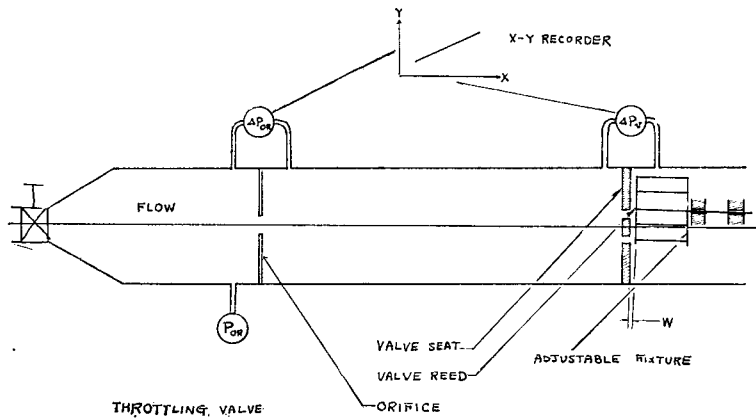


Fig. 10 Flow Bench

* 正會員, 韓國科學院

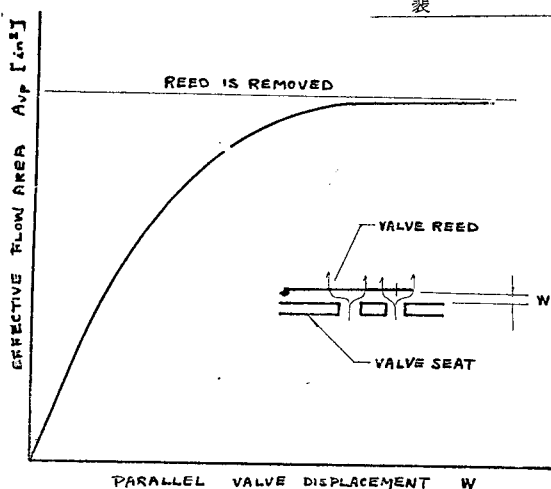


Fig. 11 Typical Effective Flow Area for Parallel Displacement

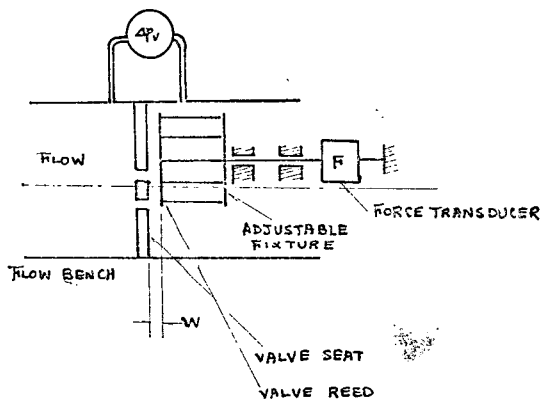


Fig. 12 Force Measurement Using Flow Bench

작용하는 힘을測定할 수 있도록 힘測定용 트랜스듀서(Transducer)를設置한다.(그림 12). 이 트랜스듀서는 피에조이렉트릭(piezo-electric) 형이 많이 쓰이고 직접 X-Y 레코더(Recorder)의 Y軸에連結된다. X軸은壓縮機밸브前後의壓力差를測定하는壓力트랜스듀서에連結한다. 밸브리드의移動거리를固定시키고流量을천천히增加시키면壓力差에依하여 밸브에作動되는 힘을連續적으로測定할 수 있다.

힘 F 와壓力差 Δp_v 를 그래프로 나타내면 그림 13에서의 같이直線이 되는데 이 기울기가有效 힘面積 $B(W)$ 가 된다.逆流가 중요한경에는逆方向의 힘도 고려하여야 한다. 그림 14는有效面積이移動거리 W 에 따라서 어떻게變化하는가를 보여준다.

10. 固有振動數와 모드

式(46)에서는固有振動數 ω_m 와固有振動모드 $\phi_m^{(x)}$ 을 알아야 하는데 이것도實驗으로求할 수 있다. m 은理論적으로는1에서 ∞ 까지이나 실제로는 $m=3$ 정

도로 그쳐도數值에는 영향이 없고大部分 $m=1$ 만考慮해도充分하다.

밸브리드가 m 번째固有振動數와 같은振動數로振動하면 리드는 m 번째固有振動모드라고 하는特性形態로變形한다. 리드에 브래를 뿌려 놓으면 리드가振動함에 따라 브래에形態가 나타나게 되는데 특히振動數가 리드의固有振動數와 같을 때는線이 나타난다. 이線들을 chlandi figure 라고 부른다. 실험에서는 밸브리드를名固有振動數로振動시켜 모드를測定한다. 밸브리드는 실제壓縮機에서의와 같은方法으로固定을 하여야 한다.振動은電磁石을使用하여 일으킨다. 그림 15에서代表的인計器를 볼 수 있는데 Hewlett packard variable frequency signal generator (0~1200 Hz), amplifier 가 달린電磁石, Bently-Nevada variable displacement transducer, power supply 그리고 two channel Tektronix oscilloscope 쓰인다. Signal generator 가電

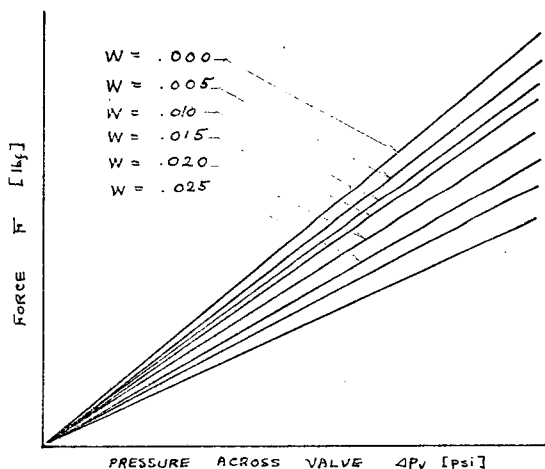


Fig. 13 Typical F vs. P Plot

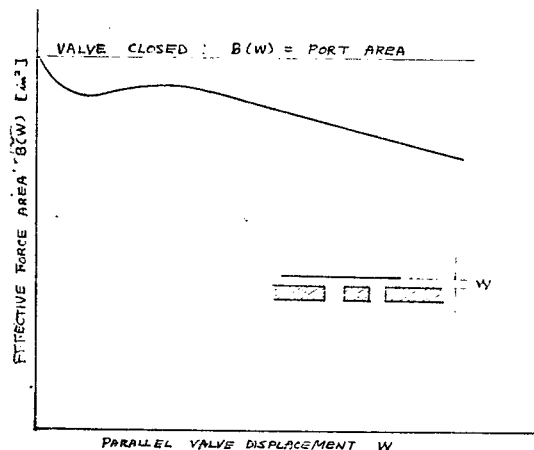


Fig. 14 Typical Effective Force Area

磁石을 作動하여 벨브를 振動시키고 Bently-Nevada probe 로 벨브의 振幅과 位相을 測定한다.

B-N probe 는 Oscilloscope 의 한 Channel 에 연결되고 signal generator 는 다른 channel 에 연결된다. 變位幅과 Signal generator 의 output 의 比가 Oscilloscope 에 나타나게 되는데 이 比가 局部的으로 最大가 될때가 固有振動이고 모래를 뿌리면 Chlandi figure 가 나타난다. 大部分의 경우에는 소리로도 識別할 수 있다. 벨브 리드가 固有振動數로 振動하면 그 모드는 리드表面에 거리트랜스듀서를 使用하여 測할 수 있다. 最大와 最少 振幅을 各點에서(그림 16)에서 測定하는데 測定되는 量은 振幅의 二배되는 크기 뿐이므로 +와 - 부호를 부칠때 주의하여야 한다. 位相이 180° 바뀔때 마다 부호가 달라진다. 이 實驗을 하는 동안 Signal generator 와 amplifier 의 gain 은 一定하게 유지하고 電磁石도 位置를 固定시켜야 한다. 實驗結果는 各 ω_m 에 대하여 $\phi_m(x, y)$ 를 얻게 되는데 絕對振幅보다도 相對振幅이 計算에 필요하다. 例를들면

$$\begin{Bmatrix} \phi_m(x_j, y_j) \\ \phi_m(x_{j+1}, y_{j+1}) \\ \phi_m(x_{j+2}, y_{j+2}) \\ \vdots \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.6 \\ 1.0 \\ 1.3 \\ \vdots \end{Bmatrix} = 2 \begin{Bmatrix} 0.3 \\ 0.5 \\ 0.65 \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (55)$$

여기서 常數는 式(46)에서 상쇄되므로 상관없다. 電算機시뮬레이션에 쓰기 위하여 式(49)은 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

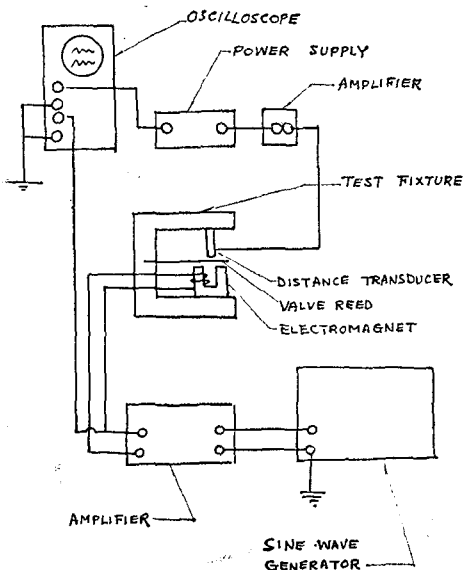


Fig. 15. Typical Instrumentation for Natural Frequency and Mode Measurement

$$\ddot{g}_m(t) + 2\zeta\omega_m \dot{g}_m(t) + \omega_m^2 g_m(t)$$

$$= \frac{\Delta p(t)}{A\phi h} \frac{\sum_{i=1}^{i=k} \phi_m(x_i, y_i) B(W(x_i, y_i)) \Delta A_i}{\sum_{j=1}^j \phi_m^2(x_j, y_j) \Delta A_j} \quad (56)$$

여기서 주의 할 점은 (x_i, y_i) 와 ΔA_i 는 구멍의 위치와 면적이고 (x_j, y_j) 와 ΔA_j 는 리드위의 一般的인 點이다. 따라서 (x_i, y_i) 와 (x_j, y_j) 가 一致하지 않을 때는 (x_i, y_i) 에서도 振動모드를 測定하여야 한다.

11. 數值解

以上の 方程式은 mode participation factor 의 二次微分方程式과 두개의 一次微分方程式 즉 시린더 質量方程式과 流動方程式으로 나누어 생각할 수 있다.

初期條件 問題를 푸는 方法은 많으나 Runge-Kutta 方法이 흔히 쓰인다. 質量方程式과 같은 一次式은

$$\dot{m} = f_1(t, m) \quad (57)$$

初期條件은

$$m(t=0) = m_0 \quad (58)$$

Runge-Kutta 方法으로

$$m_{n+1} = m_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (59)$$

여기서

$$k_1 = \Delta t f_1(t_n, m_n) \quad (60)$$

$$k_2 = \Delta t f_1\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}, m_n + \frac{k_1}{2}\right) \quad (91)$$

$$k_3 = \Delta t f_1\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}, m_n + \frac{k_2}{2}\right) \quad (92)$$

$$k_4 = \Delta t f_1(t_n + \Delta t, m_n + k_3) \quad (63)$$

다음으로 modal participation factor 方程式은

$$\ddot{g} + a\dot{g} + bg = L(t, g, \dot{g}) \quad (64)$$

Runge-Kutta 方法으로 一次微分方程式만을 해결할 수 있으므로

$$\dot{g} = S \quad (65)$$

라고 놓으면 式(64)는

$$\dot{S} + aS + bg = L(t, g, S) \quad (66)$$

또는

$$\dot{S} = L(t, g, S) - aS - bg \quad (67)$$

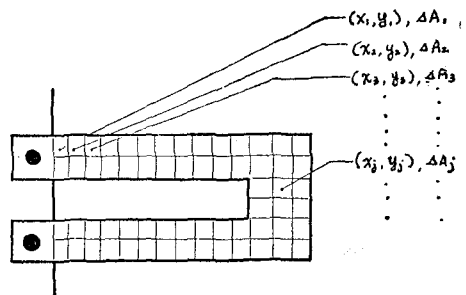


Fig. 16. Locations of Mode Measurements

따라서 식 (65)의 解는

$$g_{n+1} = g_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (68)$$

여기서 $k_1 = \Delta t S_n$ (69)

$$k_2 = \Delta t \left(S_n + \frac{k_1}{2} \right) \quad (70)$$

$$k_3 = \Delta t \left(S_n + \frac{k_2}{2} \right) \quad (71)$$

$$k_4 = \Delta t (S_n + k_3) \quad (72)$$

이고 식 (67)의 解는

$$S_{n+1} = S_n + \frac{1}{6}(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \quad (73)$$

여기서 $l_1 = \Delta t [L(t_n, g_n, S_n) - aS_n - bg_n]$

$$l_2 = \Delta t \left[L \left(t_n + \frac{\Delta t}{2}, g_n + \frac{k_1}{2}, S_n + \frac{l_1}{2} \right) - a \left(S_n + \frac{l_1}{2} \right) - b \left(g_n + \frac{k_1}{2} \right) \right]$$

$$l_3 = \Delta t \left[L \left(t_n + \frac{\Delta t}{2}, g_n + \frac{k_2}{2}, S_n + \frac{l_2}{2} \right) - a \left(S_n + \frac{l_2}{2} \right) - b \left(g_n + \frac{k_2}{2} \right) \right]$$

$$l_4 = \Delta t \left[L \left(t_n + \Delta t, g_n + \frac{k_3}{2}, S_n + l_3 \right) - a(S_n + l_3) - b(g_n + k_3) \right]$$

初期條件은 $g_0 = 0$
 $S_0 = 0$

따라서 $g_1 = 0 + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) = 0$
 $i_1 = 0 + \frac{1}{6}(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4)$

여기서

$$l_1 = \Delta t L(0, 0, 0)$$

$$l_2 = \Delta t \left[L \left(\frac{\Delta t}{2}, 0, \frac{l_1}{2} \right) - a \frac{l_1}{2} \right]$$

$$l_3 = \Delta t \left[L \left(\frac{\Delta t}{2}, 0, \frac{l_2}{2} \right) - a \frac{l_2}{2} \right]$$

$$l_4 = \Delta t [L(\Delta t, 0, l_3) - al_3]$$

같은 方法으로 $n=2, n=3$ 일때도 數值解를 얻을 수 있다.

排出과 吸入에서 modal participation factor 方程式은 $\dot{g}_{md} = S_{md}$ (74)

$$S_{md} = \frac{(P(t) - P_d) \sum_{i=1}^{i=kd} \phi_{md}(x_i, y_i) B_d(W(x_i, y_i)) \Delta A_{id}}{A_d \rho_d h_d \sum_{j=1}^{j=ld} \phi_{md}^2(x_j, y_j) \Delta A_{jd}} - 2\zeta_{d\omega_{md}} S_{md} - \omega_{md}^2 g_{md} \quad (75)$$

$$\dot{g}_{ms} = S_{ms} \quad (76)$$

$$S_{ms} = \frac{(P_s - p(t)) \sum_{j=1}^{j=ls} \phi_{ms}(x_j, y_j) B_s(W(x_j, y_j)) \Delta A_{js}}{A_s \rho_s h_s \sum_{j=1}^{j=ls} \phi_{ms}^2(x_j, y_j) \Delta A_{js}} - 2\zeta_s \omega_{ms} S_{ms} - \omega_s^2 g_{ms} \quad (77)$$

$$\dot{m} = \dot{m}_{vs} - \dot{m}_{vd} \quad (78)$$

$$\dot{m}_{vd} = A_{vd} P_{ud} \sqrt{\frac{2kg_c}{(k-1)RT_{ud}}} \sqrt{r_d^{\frac{2}{k}} - r_d^{\frac{k+1}{k}}} \quad (79)$$

式 (74)와 (75) 그리고 (76)과 (77)은 各各 모드 의 이 m 個씩 있다. 그리고 式 (79)를 積分하는 理由는 排出 밸브를 통한 質量流量을 計算하기 위하여 이다. 全 方程式의 數는 考慮되는 모드의 數에 따라서 결정되는 것 을 유의하라.

예를 들어서 모드 한個만을 고려하면 方程式은 6個가 된다.

$$g_{1d} = f_1(t, g_{1d}, S_{1d}, g_{1s}, S_{1s}, m, m_{vd})$$

$$S_{1d} = f_2(t, g_{1d}, S_{1d}, g_{1s}, S_{1s}, m, m_{vd})$$

$$g_{1s} = f_3(t, g_{1d}, S_{1d}, g_{1s}, S_{1s}, m, m_{vd})$$

$$S_{1s} = f_4(t, g_{1d}, S_{1d}, g_{1s}, S_{1s}, m, m_{vd})$$

$$\dot{m} = f_5(t, g_{1d}, S_{1d}, g_{1s}, S_{1s}, m, m_{vd})$$

$$\dot{m}_{vd} = f_6(t, g_{1d}, S_{1d}, g_{1s}, S_{1s}, m, m_{vd})$$

여기서 $f_1 = S_{1d}$ 이고 $f_3 = S_{1s}$ 이다. 그리고 初期條件은

$$g_{1d}(t=0) = g_{1d0}$$

$$S_{1d}(t=0) = S_{1d0}$$

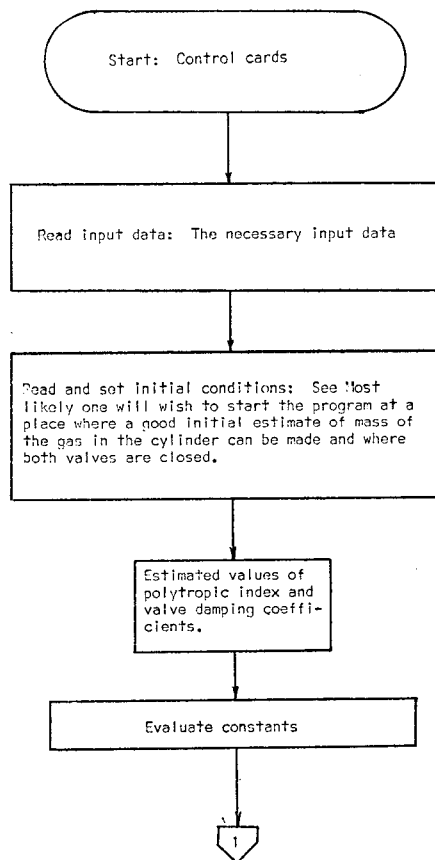
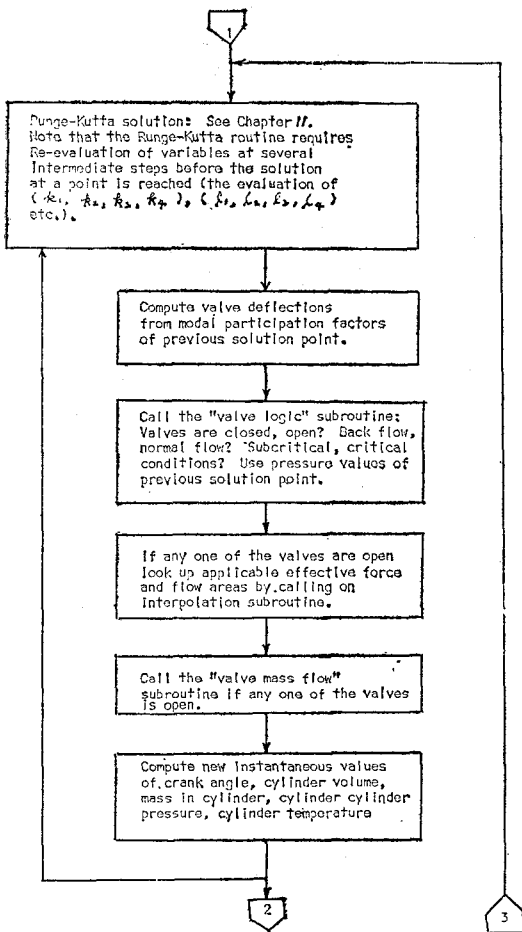


Fig. 17. Outline of Flow Chart



$$g_{1s}(t=0) = g_{1s0}$$

$$S_{1s}(t=0) = S_{1s0}$$

$$m(t=0) = m_0$$

$$m_{vd}(t=0) = m_{vd0}$$

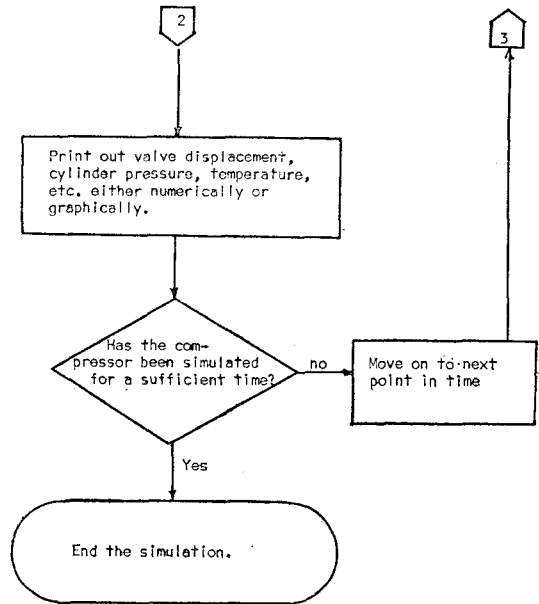
만약에 $m=3$ 일 때에는 식은 모두 14개가 되나 Runge-Kutta의 一般의인 解析方法은 Subroutine packages로 準備되어 있어서 그것을 直接 使用할 수 있다.

電算機프로그램의 概略은 그림 17과 같다.

12. 結 言

以上에 往復式 壓縮機의 시뮬레이션에 관하여 說明하였다. 基本的인 方程式은

1. 排出밸브의 動力學
2. 吸入밸브의 動力學



3. 氣筒壓力
4. 氣筒體積
5. 氣筒氣體의 質量
6. 排出밸브를 통한 質量流量
7. 吸入밸브를 통한 質量流量
8. 氣筒溫度

電算機 input 으로 쓰이는 實驗 Data는

1. Bench 實驗
 - a. 有效流動斷面積
 - b. 有效흡斷面積
 - c. 固有振動數와 모드
2. Prototype 實驗
 - a. 폴리트로프常數
 - b. 밸브리드의 감쇄계수

吸入및排出口에서 壓力과 溫度는 測定值를 使用하거나 一定하다고 假定했고 크랭크의 速度도 一定하다고 假定했다.

여기서 다른 시뮬레이션은 간단하기는 하나 어느 정도 正確하므로 產業界에서 지나친 費用을 드리지 않기도 使用할 수 있고 주로 밸브리드의 應力解析, 吸入과排出口의 連結 部分에서의 振動, 電氣모타의 시뮬레이션 소음 등에 관한 研究에 適用시킬 수 있다.