

往復式 壓縮機의 電算機 시뮬레이션

裴 洵 勳*

1. 序 論

最近 冷凍 壓縮機의 需要가 急増하여 世界的으로 壓縮機의 生産量이 不足하게 되었다. 特히 需要量이 龐大한 美國은 많은 量의 壓縮機를 輸入하고 있었는데 美貨의 價値 切下로 結果의으로는 壓縮機의 國際 市勢는 上昇한 셈이 되었다. 우리나라에서는 全需要量을 輸入에 依存하고 있는데 日本等 壓縮機 輸出國에서 自體의 需要 增加로 輸出을 制限하게 되어 國內 生産이 時急하게 되었다.

그 間 國內 企業體에서 散發的으로 外國 製品의 模作을 試圖하였으나 아직까지 成功의인 製品이 나오지 않았다. 여러가지 原因을 생각할 수 있겠으나 根本的인 理由는 國內에서 生産한 各 部品의 部品別 成能을 判別하기 힘들어 皮相的으로 壓縮機 全體의 性能만을 가지고 容量이 不足하니 精밀가공을 하지 못하였다고 추측하는데 그치고 좀더 本格的인 開發 研究를 하지 못한다 고 있다고 생각된다.

近來에 外國에서는 壓縮機의 數學的인 모델을 만들어 電算機로 시뮬레이션(Simulation)하여 各 設計 變數가 시스템에 미치는 影響을 조사하여 過去에는 經驗에 依存하던 設計를 좀더 解析的으로 하고 있다. 이 시뮬레이션에 依한 基礎 設計 方法은 비단 壓縮機에서만 有用한 것이 아니라 內燃機關, 펌프等에도 適用될 수 있기 때문에 基礎 機械 設計의 基本 資料로 研究 開發할 必要性이 있다. 특히 우리나라에서와 같이 機械加工 技術이 發達되지 못한 나라서는 시뮬레이션에 依하여 重要한 加工 工差를 定하고 될수록 各 部品을 加工 精度에 依한하지 않도록 設計하는 것이 필요하다.

여기에 連載講座로 說明해 나가고자 하는 것은 美國 Purdue 大學의 Soedel 教授가 1972年度 여름學期 特別 講義를 위하여 準備한 노트를 中心으로 Purdue 大學에서 開發한 시뮬레이션 모델을 紹介하고 現在 이 分野에서 當面하고 있는 研究 課題를 指摘하고자 한다.

2. 시뮬레이션 모델의 概要

대체적으로 高速回轉 壓縮機의 사이클은 여러가지 複雜한 現象이 짧은 時間안에 相互 有機的인 關係를 가지고 일어난다. 基礎的인 數學的인 모델은 相關되는 네개의 方程式으로 構成된다. 첫째로 氣筒의 體積이 時間에 따른 變化를 算出하는 體積方程式이 있고 둘째로 氣筒內의 瞬間的인 氣體의 壓力, 溫度, 質量으로 주어지는 熱力學方程式이 있고 셋째로 밸브(valve)를 통해서 흐르는 瞬間的인 流量에 관한 質量流量方程式이 있고 마지막으로 밸브 板의 動力學方程式等 以上の 네개의 式인데 하나 하나 詳細하게 誘導하려 한다.

이들 方程式과 더불어 다섯 組의 實驗 結果가 數值解를 求하는데 필요하다. 簡單한 模型 實驗에 依하여 有

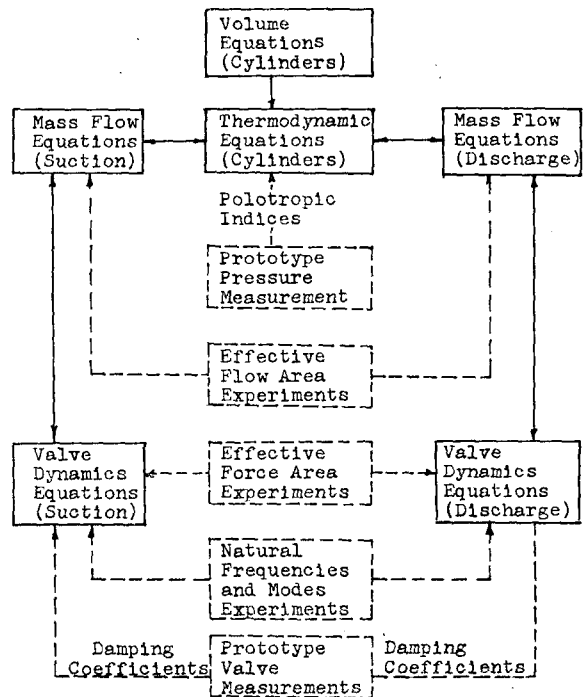


Fig. 1. Interaction of Equation Systems and Auxiliary Experimental Information.

* 正會員, 韓國科學院

有效 밸브 流動面積(effective valve flow areas)과 有效 밸브 힘面積(effective valve force areas)와 밸브板의 固有振動數와 型(model)等을 求하여야 하고 다음에는 完全한 全시스템의 性能 試驗을 통하여 폴리트로픽(poly-tropic) 指數와 밸브板의 減衰係數 等을 얻어야 한다.

이 實驗 結果와 위의 方程式 사이의 相互關係를 그림 1에 나타내었다.

이 基礎的인 모델에서는 吸入口와 排出口의 條件을 入力 材料로 하고 있는데 만약 吸入口와 排出口의 現象도 시뮬레이션하려고 하면 몇개의 方程式이 더 要求된다. 이 외에도 電動機의 特性이나 熱傳達 方程式 等 여러가지 式을 첨부하여 더 複雜한 모델을 만들 수 있다.

3. 氣筒內 氣體 體積의 時間에 대한 變化率

往復式 壓縮機의 體積과 時間의 關係를 誘導하려고 한다. 다른 型態의 容積式 壓縮機(positive displacement compressors)에 대하여 비슷한 式을 誘導할 수 있다.

$V(t)$: 瞬間的인 氣筒의 體積

V_c : 空腔體積 in³

D : 피스톤 直徑 in³

R_1 : 크랭크 半徑 in

R_2 : 連結軸 길이 in

$\theta(t)$: 크랭크 回轉角 radians

$Z(t)$: 피스톤 變位 in

그림 2에서

$$V(t) = V_c + \frac{\pi D^2}{4} (2R_1 - Z(t)) \quad (1)$$

氣筒內의 幾何學的인 關係는

$$R_2 + Z(t) = R_1 - R_1 \cos\theta(t) + R_2 \cos\phi(t) \quad (2)$$

$$R_2 \sin\phi(t) = R_1 \sin\theta(t) \quad (3)$$

따라서

$$Z(t) = R_1 - R_2 - R_1 \cos\theta(t) + R_2 \sqrt{1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \sin^2\theta(t)} \quad (4)$$

그리고 (1)式은

$$V(t) = V_c + \frac{\pi D^2}{4} R_1 \left[1 + \cos\theta(t) + \frac{R_2}{R_1} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \sin^2\theta(t)} \right] \right] \quad (5)$$

위에서 $V(t)$ 와 $\theta(t)$ 는 各各 크랭크의 下限點에서 부터 氣筒의 體積과 크랭크의 角度이다.

만약에 크랭크의 速度가 일정하다고 하면

$$\theta(t) = \omega t \quad (6)$$

여기서 ω 는 크랭크의 角速度, radian/sec, 이고 t 는 時間이다.

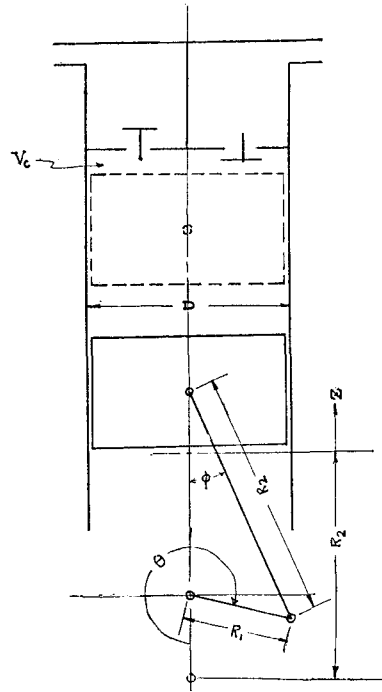


Fig. 2. Reciprocating Piston Compressor Kinematics

4. 氣筒內의 熱力學的 關係

그림 3에서 보는 바와 같이 氣筒內의 氣體의 狀態 變化는 세가지 熱力學 過程으로 나누어 생각할 수 있다. 吸入밸브로 통한 膨脹過程, 氣筒內에서 壓縮 또는 膨脹過程, 排出밸브를 통한 膨脹過程 등의 세 過程이다.

熱力學 方程式을 誘導하기 위하여 다음과 같은 假定을 한다.

- (1) 氣筒內의 氣體는 完全氣體와 같이 作動한다.
- (2) 氣筒內의 氣體 性質은 瞬間的으로 氣筒內에 傳播된다. 다시 말하자면 어떤 瞬間에서든지 氣筒內 氣體 狀態는 均一하다.
- (3) 氣體 狀態의 變化는 폴리트로픽 過程을 따른다.
- (4) 氣體의 氣筒을 出入하는 流動은 次元的이다.

連續方程式을 壓縮機에 適用하면

$$\dot{m}(t) = \dot{m}_{os} - \dot{m}_{od} \quad (7)$$

여기서

\dot{m}_{os} : 吸入밸브를 통한 質量 lbm/sec

\dot{m}_{od} : 流量排出밸브를 통한 質量 流量 lbm/sec

$m(t)$: 氣筒內의 瞬間的인 氣體 質量 lbm

위에서 時間에 대한 微分量을 위에 點을 찍어 表示하였다. \dot{m}_{os} 의 陽方向은 氣體가 氣筒內로 들어오는 方向이

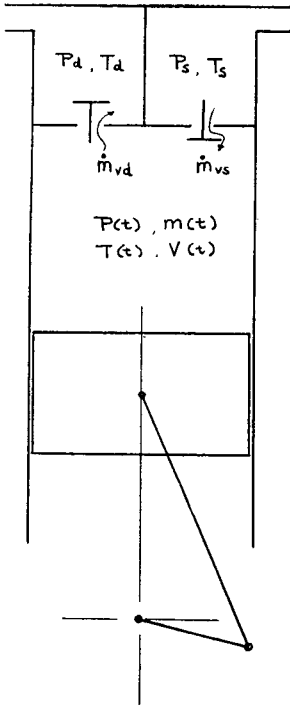


Fig. 3. Cylinder Thermodynamics

고 陰方向은 나가는 方向이다. 陰方向의 流動은 逆流動이라고 하는데 좋은 設計에서는 可能限한 피하여야 하지만 實際로 모든 壓縮機에서 小量의 逆流動이 일어난다. 이와 비슷하게 \dot{m}_{vd} 的 陽方向은 氣體가 氣筒에서 밖으로 나가는 方向으로 定하는데 이 때에도 逆流動 現象이 일어난다.

式 (7)은 一次 微分方程式인데 氣筒內의 瞬間的인 質 量을 算出하는데 쓸 수 있다. 다음 章에서 \dot{m}_{vs} 和 \dot{m}_{vd} 에 관한 式을 誘導하기로 한다.

氣筒內의 壓力은 폴리트로픽 過程을 假定하였으므로

$$\frac{p(t)}{\rho(t)^n} = \frac{p_0}{\rho_0^n} \tag{8}$$

$p(t)$: 氣筒內의 壓力 psi

$\rho(t)$: 氣筒內의 氣體의 密度 1dm/in³

P_0, ρ_0 : 初期 條件

n : 폴리트로픽 指數

初期 條件으로서의 壓縮期의 始動點을 擇하든가 또는 正常狀態를 研究할 경우에는 壓縮사이클의 어느 한 點을 擇하는데 보통 吸入밸브가 닫힌 直後를 擇한다. 이 計算에서 初期 條件의 正確性은 별로 問題가 되지 않는

다. 시뮬레이션 모델은 初期 條件이 正確하지 않다고 하더라도 몇 사이클을 計算한 후에는 스스로 正確한 正常狀態를 算出하게 되기 때문이다. 단지 初期 條件이 不正確하면 計算 時間이 길어질 뿐이다.

위의 計算에서 폴리트로픽 指數는 假定했으므로 이 指數를 吸入口와 排出口 사이의 熱傳達에 依한 影響을 고려하고 定할 수도 있다. 또한 吸入 過程과 排出 過程에 各各 다른 常數로 定할 수도 있고 시간이나 크랭크 角度의 函數로 주어 질수도 있다. 이 指數는 시뮬레이션을 해 나가는 過程에서 定하므로 자세한 說明은 後로 미루기로 한다.

$$\rho(t) = \frac{m(t)}{V(t)} \tag{9}$$

이므로

$$P(t) = P_0 \left[\frac{m(t)}{\rho_0 V(t)} \right]^n \tag{10}$$

그리고

$$T(t) = T_0 \left[\frac{P(t)}{P_0} \right]^{\frac{n-1}{n}} \tag{11}$$

現在까지 발표된 대부분의 시뮬레이션 모델은 完全氣體의 폴리트로픽 過程을 假定하고 있는데 計算 時間이 더 걸리더라도 氣體의 實際 性質을 使用할 수도 있다. 몇몇 冷媒에서는 完全氣體와 매우 다른 性質 때문에 實際의 性質을 使用하는 것이 불가피할 경우가 있다.

氣筒의 體積方程式을 算出하는 方法은 위의 方法 外에도 두가지 方法이 더 있다. 그 한가지 方法은 氣筒의 制限體積(control volume)에 熱力學 第一法則을 適用하는 方法이다. 우선 制限體積의 出入 流動을 一次元이라고 보고 內部에너지와 엔탈피 項에 比해서 位置에너지와 運動에너지 項은 무시될 수 있을 만큼 작기 때문에 간단히 氣筒內部 壓力의 時間에 대한 微分式을 求할 수 가 있다. 그러나 이 式은 數學적으로 算出하기 힘든 熱傳達量의 時間에 대한 變化量의 項을 포함하고 있어서 이 項은 아무리 작더라도 어떤 方法으로든 고려해 주어 야 하기 때문에 폴리트로픽 過程 方法 보다는 자주 使用되고 있지 않다.

또 다른 한 가지 方法은 連續方程式과 運動方程式을 使用하는 方法인데 이 式들은 特性方法(the method of characteristics)으로 풀어야 한다. 이 方法에서는 氣體의 粒子 速度와 氣筒內의 波動現象을 究明할 수 있는 長點이 있기는 하나 適用하는데 많은 努力이 必要하다. (次號에 繼續)