

論 文

水擊作用(워터햄머)의 解析에 關한 研究

(Study on Waterhammer Analysis)

南 宣 祐*

Nahm Sun Woo

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop the computer program to compute the unsteady, transient flow conditions in a hydraulic system.

The unsteady flow condition may be brought about due to power failure to pump motors, pump start-up, or modulation of control valve.

The program was written specially for analyzing the water-hammer in the pumping system. The pumping system which can be simulated by the program can contain pipelines, tunnel, surge tanks, branched lines, reservoirs, dead end pipes and valve controls.

The use of a computer program to analyze hydraulic transients is of great benefit to the designers of transmission main and distribution systems. Advantages include time savings, the ability to analyze complex piping systems, and increased accuracy. The author outlines a program developed for the above system.

要 旨

本 研究는 管水路內의 不定流 즉 펌프모터의 始動, 停止 및 밸브調節時에 壓力管水路에 나타나는 急變流의 現狀, 特히 水擊作用의 解析을 Computer 에 依해 自動解析하는 方法을 講究하였다. 따라서 使用되는 管水路가 펌프, 管網, 터널, 調壓水槽, 分岐管, 貯水池, 閉端管 및 밸브장치를 갖는 一連의 管水路內에 일어나는 水擊作用을 檢討分析하였다. 急變流의 解析을 爲해서 電子計算機를 使用하면 送水 또는 配水管路設計에 있어 設計者의 時間과 努力을 감소하고 正確한 結果를 얻을 수 있는 長點이 있다.

1. 序 論

廣域利水計劃에 따라 한 地域에서 經濟적 效果가 큰 他地域으로 大規模의 물을 輸送하는 計劃에 必要한 送水本管이나 配水管路의 設計에 있어서 急變水流 또는 壓力上昇의 解析과 調節이 重要한 일이다. 이와같은 急變現象은 管路의 正常的인 運轉이나 送水펌프의 動力中斷과 같은 非正常的인 條件下에서 나타난다. 管路에는 急變流를 調節할 수 있는 裝置와 技術이 必要하다. 이들 裝置에는 空氣室, 調壓水槽, 調壓밸브, 閉端管 等이다. 또한 技術은 流速을 制限하거나 急變壓力에 管子 건더도록 管材料의 應力을 增加시키는 것 등이다. 이를 爲한 事項들에는 管徑, 管材料, 管두께, 물의 體積彈性係

數, 물의 空氣含量, 管材料의 彈性率 및 管內流速의 變化 등이다.

急變流에 對한 解析과 計算은 파마기안(John Parmakian)의 圖解法⁽¹⁾과 Rich⁽²⁾의 代數的解法 등이 使用되고 있다.

이 方法들의 一般的인 結論은 特別解析을 하는데 時間이 많이 걸리고 分岐管이나 T字管 등을 갖는 複雜한 管路의 解析에 있어서 困難한 點과 不可能한 點, 不確切한 點이다. 그러므로 急變流의 解析을 爲해 컴퓨터 프로그램을 하는 것은 設計者에게 대단히 有益하며 正確한 結果를 얻을 수 있다. 프로그램은 管路에서 몇개의 境界條件을 쉽게 적용할 수 있다. 즉 管摩擦과 摩擦以外的 損失이 쉽게 解析에 적용될 수 있다. 調壓水槽의 解析은 밸브를 잠그는 速度에 따라 管路內의 흐름의 運動方程式과 連統方程式을 聯立하여 數值積分하여 求한다.

2. 特性方程式

特性曲線法^{(1),(2),(3),(4)}을 利用하는 컴퓨터 프로그램은 時間周明에 對해서 開發되었고 管路의 壓力上昇을 解析하는데 使用되고 있다. 特性曲線法은 不定流의 連統方程式과 運動方程式을 時間에 따라 管路의 모든 點에 있어서 流速과 壓力을 聯立해서 물 수 있는 4개의 方程式으로 變形한 것이다. 非線形項을 包含하는 閉合壓力

* 東國大學校 工科大学 副敎授

管内의 流體의 運動方程式은

$$L_1 = \lambda \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV}{2D} |V| = 0 \quad \dots (1)$$

이요

여기서

L_1 : 特性曲線法에 의한 運動方程式의 表示

g : 重力可速度

h : 全水頭

x : 管의 距離

t : 時間

f : Darcy Weisbach 의 摩擦係數

D : 管徑

V : 流速(순간值)

또 非線形項을 包含하는 連續方程式은

$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a'}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial x} + V \sin \alpha = 0 \quad \dots (2)$$

이며

여기서

L_2 : 特性曲線法에 의한 連續方程式의 表示

a' : 用力波의 傳播速度

α : 管路의 傾斜

(2)式에 未知量 λ 를 消去해서 (1), (2)式을 線形結合하면

$$L_1 + \lambda L_2 = \lambda \left[\frac{\partial H}{\partial x} \left(V + \frac{g}{\lambda} \right) + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \left[\frac{\partial V}{\partial x} \left(V + \frac{a'}{\lambda} \right) + \frac{\partial V}{\partial t} \right] + V \sin \alpha + \frac{fV}{2D} |V| = 0 \quad \dots (3)$$

여기서 λ 는 定常의 數値값을 有한다(3)式을 H 와 V 를 變數로 變換하면 (1)式의 變換 意味을 有하는 2個의 式으로 表示된다. 即 (3)式을 2個의 全微分方程式의 雙으로서 代換할 수 있는 2個의 變數를 求하므로써 特性曲線法을 應用할 수 있다.

지음 $V = V(x, t)$, $H = H(x, t)$ 라 하면

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad \frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t}$$

라 할지므로 (3)式에 代換

$$\frac{dx}{dt} = V + \frac{g}{\lambda} \quad V + \frac{a'}{\lambda} = 0 \quad \dots (4)$$

의 條件을 用하면

$$\lambda \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial t} + \lambda \sin \alpha + \frac{fV}{2D} |V| = 0 \quad \dots (5)$$

(3) 全微分方程式의 變換

(4)式의 條件에서 $\lambda = \pm \frac{a'}{g}$, $\frac{dx}{dt} = V \pm a'$ 에서

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a'}{g} \frac{dV}{dt} + V \sin \alpha + \frac{afV}{2gD} |V| = 0 \quad \dots (6)$$

$$\frac{dx}{dt} = V \pm a' \quad \dots (7)$$

$$\frac{dH}{dt} - \frac{a'}{g} \frac{dV}{dt} + V \sin \alpha - \frac{afV}{2gD} |V| = 0 \quad \dots (8)$$

$$\frac{dx}{dt} = V - a' \quad \dots (9)$$

와같은 特別曲線方程式을 引을 수 있다

그림-1에서 既知點 R과 S에서의 V 와 H 를 알면 C^+ 曲線은 (7)을 나타내는 曲線이며 (6)은 C^- 特性曲線上에서 一致한다. 또 C^- 曲線도 (9)를 나타내는 曲線이며 (8)은 C^+ 特性曲線上을 따라 一致한다.

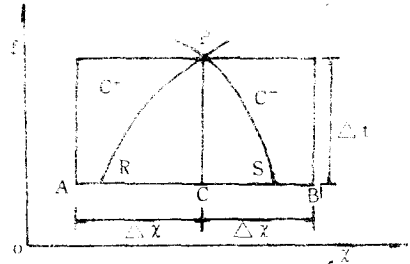


그림-1

(6)과 (8)은 各各 한 特性曲線上의 既知點에서 2個의 未知量을 有한다. C^+ 와 C^- 曲線의 交點 P에서 의 流速 V_p 및 水頭 H_p 는 (6)과(8)로 부터 求할 수 있다. 또 (7)과(9)로 P點의 x 와 t 를 求할 수 있다. 따라서 特性曲線을 따라解를 求하므로써 既知條件으로부터 任意에서 任의 時間에 나타날 水頭와 流速을 求할 수 있도록 새로운 交點을 求해나갈 수 있다.

즉 (6)~(9)를 有線差分式으로 展開하면

$$V_p - V_R + \frac{g}{2} (H_p - H_R) + \frac{f}{4} V_R \sin \alpha (t_p - t_R) + \frac{f}{2D} V_R |V_R| (t_p - t_R) = 0 \quad \dots (10)$$

$$x_p - x_R = (V_R + a') (t_p - t_R) \quad \dots (11)$$

$$V_p - V_S - \frac{g}{2} (H_p - H_S) - \frac{f}{4} V_S \sin \alpha (t_p - t_S) + \frac{f}{2D} V_S |V_S| (t_p - t_S) = 0 \quad \dots (12)$$

$$x_p - x_S = (V_S - a') (t_p - t_S) \quad \dots (13)$$

$$x_p$$
와 t_p 를 計算의 目的을 爲하여 定數로 假定하고 求하면 點(A), (B), (C), (D)에서 計算할 수 있는 點을 K와 S에 對하여 補間法을 用해서 求한다. 即 $\frac{x_p - x_R}{x_R - x_S} = \frac{t_p - t_R}{t_R - t_S}$ 라 하면

$$x_p = x_C, \quad x_S = x_A + \frac{t_p - t_S}{t_R - t_S} (x_R - x_A)$$

$$V_R = \frac{V_C - \theta a' (V_C - V_A)}{1 - \theta (V_C - V_A)} \quad \dots (14)$$

$$H_R = H_C + \theta (V_R + a') (H_C - H_A) \quad \dots (15)$$

$$H_S = H_C - \theta (V_S - a') (H_C - H_A) \quad \dots (16)$$

같은 方法으로 다음의 式을 引을 수 있다

$$V_S = \frac{V_C - \theta a' (V_C - V_B)}{1 - \theta (V_C - V_B)} \quad \dots (17)$$

$$H_R = H_C + \theta (V_R + a') (H_C - H_A) \quad \dots (18)$$

$$H_S = H_C - \theta (V_S - a') (H_C - H_A) \quad \dots (19)$$

여기서

- R : 管의 始點을 表示하는 點자
- S : 管의 終點을 表示하는 點자
- A, B, C : 特性曲線上의 點을 表示하는 點자

$$\theta : 格子의 傾斜比 \left(\theta = \frac{\Delta t}{\Delta x} \right)$$

면역 $V \frac{\partial V}{\partial x}$ 와 $V \frac{\partial H}{\partial x}$ 의 效果가 對한히 작다면 式 (7)(9) 式에서 $V_R + a, V_S - a$ 의 값은 a 와 $-a$ 로 代換할 수 있고 다시 補間法을 適用하여 다음과 같이 簡便히 表示된다.

$$V_R = V_C - \theta a (V_C - V_A) \dots\dots\dots (14)$$

$$V_S = V_C - \theta a (V_C - V_B) \dots\dots\dots (15)$$

$$H_R = H_C - \theta a (H_C - H_A) \dots\dots\dots (16)$$

$$H_S = H_C - \theta a (H_C - H_B) \dots\dots\dots (17)$$

이들 式은 區間管路 양쪽 端 始點과 終點에서의 流速과 水頭를 나타낸다. 管路内部의 임의點에서 流速 V_p 와 水頭 H_p 를 求하는 式은 式 (10) ~ (13) 과 式 (6), 와 式 (8) 로부터 다음과 같다.

$$V_p = 0.5 \left\{ V_R + V_S + \frac{g}{a} (H_R - H_S) - \frac{g}{2a} \Delta t \sin \alpha (V_R - V_S) - f \frac{\Delta t}{2D} (V_R |V_R| + V_S |V_S|) \right\} \dots\dots\dots (18)$$

$$H_p = 0.5 \left\{ H_R + H_S + \frac{g}{a} (V_R - V_S) - \Delta t \sin \alpha (V_R + V_S) - \frac{a}{g} f \frac{\Delta t}{2D} (V_R |V_R| - V_S |V_S|) \right\} \dots\dots\dots (19)$$

여기서

V_p : 特性曲線解에서 XY 面의 未知點 P 에서의 流速

H_p : 特性曲線解에서 XY 面의 未知點 P 에서의 水頭

이다. 또 時間區間 Δt 는 計算格子 選定에 있어 計算의 安定과 解의 收斂을 위하여 반드시 上述한 바와같이 線形補間法을 썼기 때문에 誤差의 累積의 念慮가 많어 이를 制御하기 위해 다음과 같이 Δt 를 求하여야 한다. 즉

$$\Delta t \leq \frac{L}{(V+a)N} \dots\dots\dots (20)$$

이고 $\Delta t (V+a) \leq \Delta x$ 로 하여야 함은 물론이다. 여기서 L 은 管의 길이이고 N 은 管을 이룬 區間數이다. 또 管路의 上流端에서의 流速을 水路의 項으로 나타내는 式은

前提의 (6)(8) 式에서 計算始初의 境界條件이 매우 重要하다. 이것은 電算處理때 大端히 큰 比重을 차지하므로 (6)(8) 式을 다른 형태로 具現하면 다음과 같이 表示된다. 지금 上流端을 0 이라는 添字를 써서 一般式과 識別하면

$$V_{p,0} = V_S + \frac{g}{a} (H_{p,0} - H_S) + \frac{g}{a} \Delta t V_S \sin \alpha - \frac{f}{2D} \Delta t V_S |V_S| \dots\dots\dots (21)$$

미첨가지로 下流端에서의 것을 N 이라는 添字를 써서 一般式과 識別하면

$$V_{p,n} = V_R - \frac{g}{a} (H_{p,n} - H_R) - \frac{g}{a} V_R \Delta t \sin \alpha - \frac{f \Delta t}{2D} V_R |V_R| \dots\dots\dots (22)$$

이다.

3. 閘의 條件

閘의 잠금 (**) 은 時間周期에 따라 감소되는 開口 部面積을 갖는 오리피스로 閘보를 취급해서 數學的으로 表示한다. 特히 閘보 開口部의 감소는 無次元量 τ 로 나타낸다.

$$\tau = \frac{C_d \cdot A_r}{C_{do} A_{vo}} \dots\dots\dots (23)$$

여기서

- A : 管의 断面積
- C_d : 閘보의 流量係數
- A_r : 閘보의 開口部 断面積

C_{do} 는 A_{vo} 는 $t=0$, 즉 閘보를 잠그기 시작할 순간의 값들이다. t 時間에 Q 를 閘點에서의 순간적인 流量이라 할때

$$Q = AV = A_v \cdot C_d \cdot \sqrt{2gH} \dots\dots\dots (24)$$

t = 0 일때 流量은 流速을 V_0 라 할때

$$Q_0 = A_0 V_0 = A_{v0} \cdot C_{d0} \sqrt{2gH_0} \dots\dots\dots (25)$$

이다. 위식 (24) 와 (25) 를 조합하면

$$V = V_0 \frac{A_v \cdot C_d}{A_{v0} \cdot C_{d0}} \sqrt{\frac{H}{H_0}} = V_0 \cdot \tau \sqrt{\frac{H}{H_0}} \dots\dots\dots (26)$$

이며 이식과 管의 下流點에서 水頭와 流速을 求하는 式 (22) 와 聯立해서 들면 閘보를 잠글때의 流速은 구할 수 있다.

$$V = \frac{-C_4}{2} + \sqrt{\left(\frac{C_4}{2}\right)^2 + C_3 \cdot C_4} \dots\dots\dots (27)$$

이며 여기서

$$C_3 = V_R + \frac{g}{a} H_R - \frac{f}{2D} \Delta t V_R |V_R| \dots\dots\dots (28)$$

$$C_4 = \frac{V_0^2 (\tau)^2}{C_1 \cdot H_0} \dots\dots\dots (30)$$

$$C_1 = \frac{g}{a} \dots\dots\dots (31)$$

4. 펌프의 境界條件

펌프의 境界條件은 두가지 경우 즉 펌프모터의 動力 (中斷의 경우와 一定速度運轉의 경우)이다.

펌프의 流量은 서서히 잠그는 閘보나 逆止閘보로 조절된다.

$$U_i \sqrt{\{ \text{Var}(Z_i^{(1)}) - \text{Cov}^2(Z_i^{(1)}, Z_i^{(2)}) \} / \text{Var}(Z_i^{(1)})}$$

라) 지금까지 논술한 모델變數의 산정식들을 써서 (2)식을 다시 쓰면

$$\left. \begin{aligned} y_i^{(1)} &= B_i(1.1)y_{i-1}^{(2)} + B_i(1.2)y_{i-1}^{(1)} + Z_i^{(1)} \\ y_i^{(2)} &= B_i(2.1)y_{i-1}^{(1)} + B_i(2.2)y_{i-1}^{(2)} + Z_i^{(2)} \end{aligned} \right\} \dots (12)$$

로 표시할 수 있다.

4) 최종적으로 (12)식의 결과에서 얻어진 값들을 (1)식에 의하여 原流量資料로 다시 變換함으로써 요구되는 模擬發生資料를 획득할 수 있다. 즉

$$\left. \begin{aligned} F_i^{(1)} &= y_i^{(1)}S_i^{(1)} + \bar{y}_i^{(1)} \\ F_i^{(2)} &= y_i^{(2)}S_i^{(2)} + \bar{y}_i^{(2)} \end{aligned} \right\} \dots (13)$$

여기서 $y_i^{(1)}, y_i^{(2)}$ 는 (13)식에 의한 결과치이고 $S_i^{(1)}, S_i^{(2)}$ 와 $\bar{y}_i^{(1)}, \bar{y}_i^{(2)}$ 는 각각 과거觀測值에서 얻어진 月別標準偏差와 平均值들이며 $F_i^{(1)}, F_i^{(2)}$ 는 최종적으로 얻어진 模擬發生된 月流量의 값들이다.

전술한 (13)식의 결과 얻어진 月流量資料를 보다綜合的으로 分析하기 위하여 單一地點을 위한 Thomas Fiering 모델에 의하여 地點別로 模擬發生을 行하였는 바, 이 모델의 모의발생식은 다음과 같다.

$$Q_t = \bar{Q}_t + b_t(Q_{t-1} - \bar{Q}_{t-1}) + Z_t \cdot S_t \sqrt{1 - r_t^2} \quad (14)$$

여기서 Q_t, Q_{t-1} ; t, t-1月の 模擬發生된 月流量

\bar{Q}_t, \bar{Q}_{t-1} ; t, t-1月の 觀測值의 月平均流量

Z_t : 平均 0, 分散 1인 正規分布亂數

S_t : t月の 觀測月流量의 標準偏差

r_t : (t-1)月과 t月과의 月流量의 相關係數

3. 月流量資料의 分析 및 模擬發生

月流量資料의 Bivariate Extension을 위한 Thomas Fiering 모델에 依하여 月流量資料를 과거의 觀測值로

부터 模擬發生시키기 위하여 比較的 長期間의 觀測值를 가지고 있는 낙동강 流域의 왜관과 현풍 2개地點을 挾하였다. 入力된 資料는 1925年~1975年(1941年~1955年 終結)간의 36年間の 月流量記錄值를 使用하였다. 中間에 결측된 期間때문에 時系列 資料의 連續性이 없어 未洽한 點이 있으나 36年間の 月流量資料인 만큼 季節的 流量特性은 把握할 수 있고 또한 模擬發生의 偶然成分을 감안하여 Sample 로서 挾하였다. 이들 入力資料의 月平均流量($\bar{y}_t^{(1)}, \bar{y}_t^{(2)}$)과 月流量의 標準偏差($S_t^{(1)}, S_t^{(2)}$)의 計算結果는 후술한 Table-2에 나타내었다.

전술한 (2)식의 偶然成分을 決定하기 위한 等分布亂數의 發生은 PDP-11의 SSP의 Randu를 使用하였고 平均이 0이고 分散이 1인 正規分布로써 變換은 前述한 바의 Box-Muller의 方法을 利用하여 計算하였다. 또한 入力된 資料와 模擬發生된 資料의 月平均流量, 標準偏差 및 系列 相互相關係數(Serial Cross-Correlation Coefficient)의 計算을 위하여 컴퓨터를 作成計算하였다. Lag-k인 系列 相互相關係數 $r_{11}(k), r_{22}(k)$ 의 算出式은 月流量時系列을 $q_t(t=1, 2, \dots, M)$ 라 놓으면 다음과 같다(16).

$$\begin{aligned} r_{11}(k) &= \frac{1}{M-R} \frac{\sum_{t=1}^{M-k} (q_t^{(1)} - \bar{q}_t^{(1)})(q_{t+k}^{(1)} - \bar{q}_{t+k}^{(1)})}{S_t^{(1)} \cdot S_{t+k}^{(1)}} \\ r_{22}(k) &= \frac{1}{M-R} \frac{\sum_{t=1}^{M-k} (q_t^{(2)} - \bar{q}_t^{(2)})(q_{t+k}^{(2)} - \bar{q}_{t+k}^{(2)})}{S_t^{(2)} \cdot S_{t+k}^{(2)}} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $S_t^{(1)}, S_t^{(2)}$ 는 각각 1, 2地點의 月流量의 標準偏差를 나타내며 系列 相互相關係數간에는 $r_{11}(k) = r_{11}(-k)$, $r_{22}(k) = r_{22}(-k)$ 의 관계가 成立됨을 注意할 수 있어서 $r_{11}(k)$ 는 通常 $r_{11}(-k)$ 로 표시한다. 전술한 (3)-(12)

Table-1. Estimates of Model Parameters for Rivariate Generation

Month for Generation	b_{11}	b_{22}	b_{12}	b_{21}	Variance $Z_t^{(1)}$	Variance $Z_t^{(2)}$	Covariance $Z_t^{(1)}, Z_t^{(2)}$
Jan.	0.0556	0.0471	0.1581	0.1126	0.9939	0.9368	0.5783
Fed.	0.5404	0.3109	0.2400	0.0303	0.8111	0.9501	0.2828
Mar.	0.3120	0.0611	0.3320	0.0062	0.9849	0.8882	0.7249
Apr.	0.9325	0.5638	0.8533	0.4325	0.6927	0.7026	0.6697
May	0.5308	0.1676	0.7705	0.4119	0.5177	0.8517	0.2665
Jun.	0.2393	0.0557	0.3026	0.0451	0.9535	0.9206	0.7446
Jul.	0.1249	0.1665	0.2181	0.4489	0.9232	0.9086	0.7518
Aug.	0.1819	0.4897	0.1230	0.5271	0.8723	0.8128	0.8010
Sept.	0.9280	0.5926	1.0773	0.5691	0.8372	0.6772	0.5309
Oct.	0.1419	0.5989	0.2129	0.6532	0.7500	0.7386	0.2569
Nov.	0.7044	0.1088	0.2363	0.1944	0.5703	0.8594	0.3318
Dec.	0.3906	0.1498	0.4591	0.1482	0.9312	0.6946	0.0468

動力을 中斷할때 펌프의 境界条件解析은 펌프의 水頭, 토르크, 流量 및 慣性效果를 나타내는 方程式의 聯立解로서 얻을 수 있다. 펌프의 水頭와 토르크를 나타내는 식(9)은 比速度만에 따라 變하는 펌프자료를 써서 表示할 수 있다.

$$W_h | W_h | = \frac{h^3}{\gamma^3 + v^3} \dots\dots\dots (32)$$

$$W_t | W_t | = \frac{\beta^3}{\gamma^3 + v^3} \dots\dots\dots (33)$$

여기서

- h : 펌프水頭
- γ : 펌프速度
- β : 펌프토르크
- v : 펌프流量
- W_h : 펌프水頭函数
- W_t : 펌프토르크函数

W_h 와 W_t 는 h, γ , β 및 v에 따라 決定되는 E 값에 따라 變하여 E는 $0^\circ \sim 360^\circ$ 의 값이며

$$\tan E = \frac{\gamma}{v} \dots\dots\dots (34)$$

로 表示되고 W_h 와 W_t 의 값은 그림-2와 같은 曲線으로부터 구한다.

5. 프로그램作成

위 特性曲線法에 依하여 時間區間 Δt 마다, Δt 의 增加에 따라 水頭와 流速이 求해지도록 프로그램化 했다. 그림-3과 같은 管路에 境界条件 즉 調圧水槽, 발브, 펌프, 저수지 등으로 区分하여 計算되도록 프로그램하였다.

프로그램은 20개의 管, 10개의 調圧水槽, 10개의 貯水池 및 10개의 발브를 취급할 수 있도록 했으며, 管은 上流쪽에서 부터 번호를 부여했고 또 主管의 번호가 먼저 주어지고 支管의 번호가 나중에 주어졌으며, 上流쪽의 支管의 번호가 먼저 주어졌다. 발브, 貯水池, 水槽도 같은 方法으로 번호를 부여했다.

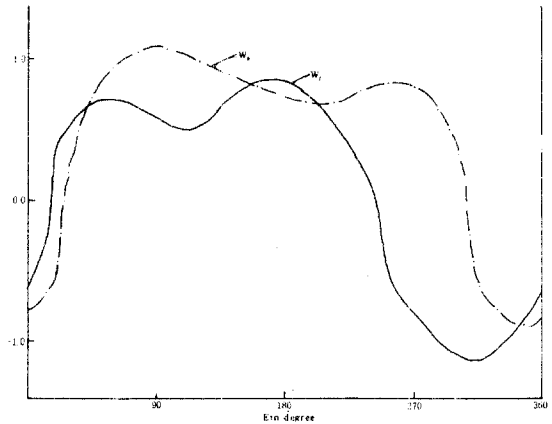


그림 2 Homologous pump data

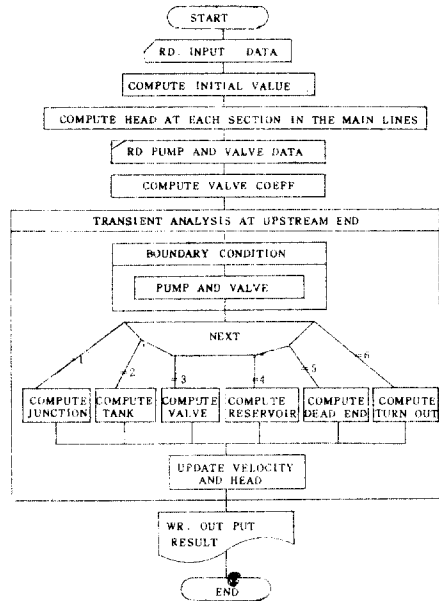


그림 4 FLOW CHART
흐름도

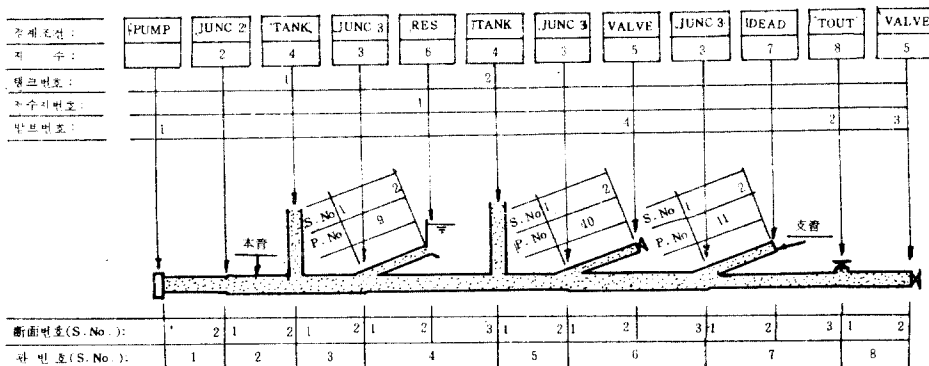


그림-3 관 계 통 도

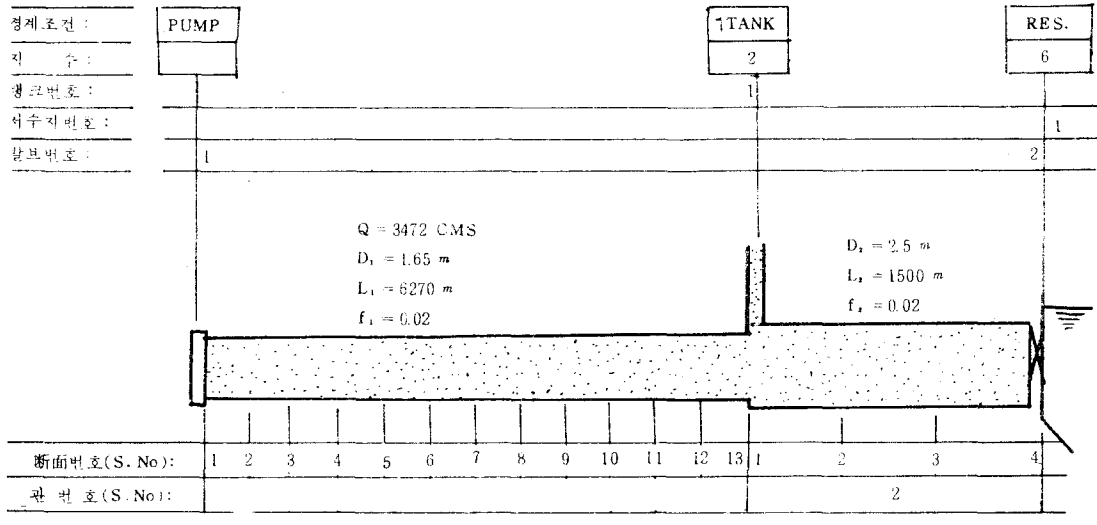


그림-5 入力資料用 관계동도

各境界条件에 따라 特性方程式을 数值解析하는 프로그램의 흐름도는 그림-4와 같다.

6. 入力資料

프로그램을 테스트 하기 위하여 그림-5와 같은 送水管路를 沢하였으며 入力자료의 기호와 수치는 다음과 같다.

- 管路의 数 : $NL = 2$
- 펌프의 数 : $NP = 4$
- 調圧水槽의 数 : $NT = 1$
- 발브의 数 : $NV = 2$
- 貯水池의 数 : $NRE = 1$
- 時間区間 : $DT = 0.5 \text{ 초}$
- 計算最大時間 : $TMAX = 60 \text{ 초}$

- 管路 1의 길이 $L(1) = 6,270 \text{ m}$
- 管路 1의 직경 $D(1) = 1.65 \text{ m}$
- 管路 1의 压力波速 $WV(1) = 1,000.0 \text{ m/sec}$
- 管路 1의 流量 $Q(1) = 3,472 \text{ m}^3/\text{sec}$
- 管路 2의 길이 $L(2) = 1,500 \text{ m}$
- “ 직경 $D(2) = 2.50 \text{ m}$
- “ 压力波速 $WV(2) = 1,000.0 \text{ m/sec}$
- “ 流量 $Q(2) = 3,472 \text{ m}^3/\text{sec}$
- 펌프의 压力水頭 $HR = 68.0 \text{ m}$
- “ 회전速度 $SPR = 700 \text{ RPM}$
- “ 效率 $EFR = 85\%$
- Homologous pump 資料 그림-2 참조
- 체크발브직경 $VD(1) = 1.5 \text{ m}$ $VD(2)$

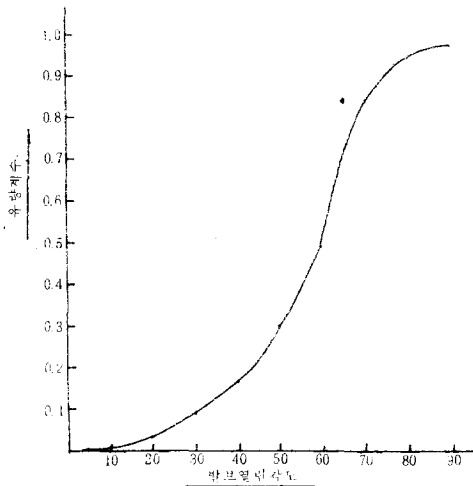


그림 6 체크발브유량계수

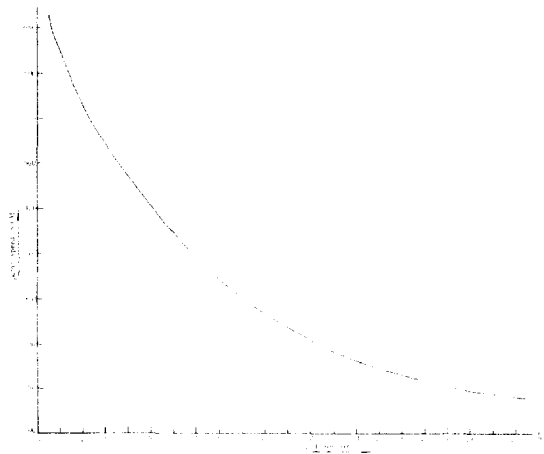


그림-7 펌프 회전속도 변화도

체크받브잠금시간 VTF(1) : 60 초 ~ VTF(2)

체크받브유량계수 VC(1, j) 그림 - 5 참조 = VC(2, j)

7. 結果分析檢討

T. J. Shear⁽⁶⁾의 研究에 의하면 火力發電所冷却水管路系統에서 突進한 펌프회전 속도, 压力水頭 및 流速의 값과 컴퓨터 計算結果의 값은 잘 一致되어 컴퓨터 解析의 妥当性을 立証했다. 本프로그램에 의한 計算에서 위 入力자료를 썼을 때 펌프의 시간에 따른 회전속도는 그

림-7 과 같고 관로의 各점에서 시간에 따른 压力水頭와 流速은 각각 그림-8과 같이 나타난다. 그림-8에서 曲線번호의 첫 数字는 관로단면의 위치를 表示하는 数字이다.

本 研究分析에서 実測値를 얻을 수 없어 実測値와 計算結果値를 比較檢討할 수 없는 것이 매우 遺憾스러운 일이다.

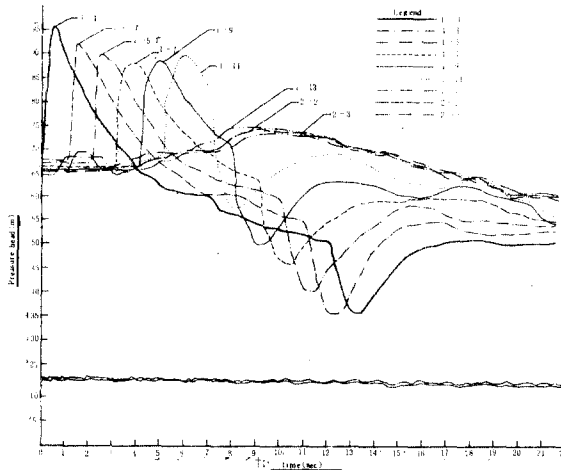


그림 8 压力水頭變化圖

8. 結論

몇개의 境界条件을 갖는 複合管路에서 急変流의 解析은 電子計算機 프로그램을 使用함으로써 이룰 수 있다. 즉 開發된 프로그램은 여러 形態의 흐름의 水擊作用解析에 있어서 便利한 設計方法이다. 水力送電所의 送水管系統에서의 컴퓨터 計算結果는 實際와 잘 一致할 수 있으며 凶解法⁽¹⁾에 比하여 時間과 努力이 적게 들고 경제적이며 合理的인 結果를 알 수 있다.

正確하고 細分化된 解析으로 送水管系統에서 正確한 발브조절을 함으로써 流量調節을 定할 수 있다. 따라서 부정확한 발브조절로 야기될수 있는 管로시설의 막대한 破損을 막을 수 있다.

또 送水펌프운전条件을 境界条件으로 하는 特性曲線方法은 水擊作用을 數値解析하는 合理的인 方法이며 正確한 入力資料는 確實하고 실제와 맞는 結果를 얻는 필수적인 要件이다.

本 研究에서 実測値와 計算結果를 比較檢討하지 못하였으나 앞으로 계속적인 研究로 完全한 프로그램의 補完이 必要할 것이다.

謝 辭

本 研究는 1978年度 峨山社会福祉事業財団 學術研究 開發支援費로 이루어 졌음에 峨山財団에 對하여 感謝하

며 本 研究수행에 指導와 協助를 해주신 여러분께 感謝한다.

References

1. Parmakian, John, Waterhammer Analysis, Dover Publications, Inc., New York 1963.
2. Rich, George R, Hydraulic Transients, Dover Publication, Inc., New York, 1963.
3. Victor L. Streeter and E. Benjamin Wylie, Fluid Mechanics, McGRAW-Hill, 1975, pp.629-673.
4. Victor L. Streeter and E. Benjamin Wylie, Hydraulic Transients, McGRAW-Hill, 1967, pp.22-52.
5. Epp, Robert and Fowler, A.G., Efficient Code for Steady State flows in Networks. Journal of ASCE-Hydraulic Div., Jan 1970.
6. T. J. Shear, computer Analysis of Waterhammer in Power Station Cooling Water Systems, International Conference on pressure surges, 1972.
7. Victor L. Streeter, Computer Solution of surge problems, Proc. Instn. Mech. Engrs 1965-66, Nov. 1965.
8. Bayard E. Bosserman, Computer Analysis of Hydraulic Transients in a Complex Piping System, Journal AWWA, July 1978.
9. P. Suter, Representation of pump characteristics for calculation of Waterhammer, sulzer Technical Review, 1966.