

〈論 文〉

調壓水槽의 水理模型實驗과 數值解析

Hydraulic Model Test and Numerical Analysis of the Surge Tank

盧 在 華*
Noh, Jae Hwa

李 熙 榮**
Lee, Hee Young

ABSTRACT

The whole process from the model design to the results of the test, of hydraulic model test of restricted entry surge tank of Hapcheon dam, is reviewed with the respect to the flowchart of the experiment.

And the experimental results are compared with the numerical values which are calculated by Runge-Kutta-Gill scheme.

The comparision show a reasonable agreement.

In final design, it doesn't matter that only numerical values are considered in case of the short design period, or difficulties of budget, and or the comparably simple type surge tank as Hapcheon dam.

要 旨

陝川댐의 入口 調壓水槽의 模型設計로부터 實驗結果에 이르기 까지의 過程을 檢討하였다. 그리고 實驗結果는 Runge-Kutta-Gill 方法에 의한 數值解析과 比較하였다. 그 比較結果 相當히 一致하였다. 設計期間이 아주 짧거나 豫算面에서 어려움이 있는 경우이거나, 陝川댐과 같이 比較的 간단한 調壓水槽의 경우는 數值解析만으로 設計하여도 可能하다고 判斷된다.

가지 境遇에 대해서 理論解가 發表되었다.^{1), 2), 15), 16)}

한편 우리나라에서는 調壓水槽에서의 問題點 解決을 거의 模型實驗에만 依存해 왔으며 模型實驗도 設計目的上 實驗結果에만 力點을 두고 있는 實情이다. 또한 理論的 研究를 基調로 한 數值解析分野에는 檢討가 未洽하다고 思料된다.

그러므로 本 研究에서는 調壓水槽의 模型實驗節次와 實驗結果에 대해 檢討하여 보았으며 나아가서 模型實驗을 통한 實驗値와 理論解가 없는 境遇에도 適用 可能한 數值解析方法에 의한(Runge-Kutta-Gill 方法) 計算値와를 比較 檢討하여 Surging의 追跡方法을 摸索해 봄으로써 安定하고 經濟的인 調壓水槽의 設計에 利用

1. 序 論

요즈음 우리나라에서는 水資源의 效率的인 利用과 高度産業發展의 原動力을 確保하기 爲하여 水力發電의 機能을 가진 多目的댐들의 建設이 豫想되고 있다.

水力發電所에는 一般的으로 調壓水槽의 設置가 수반되므로 調壓水槽의 安定性 및 經濟性 뿐만 아니라, 發電所에서 發生할만한 偶發的인 事件에 對해서도 考慮되어야 한다.³⁾

그러므로 調壓水槽에서 發生되는 不定流의 흐름에 대한 研究도 比較的 많이 이루어져 왔으며 特殊한 및

*國立建設試驗所 水工科 技佐

**서울市立大學 工學部 土木工學科教授(農博)

하도록 하였다.

模型實驗節次는 相似法則, 模型縮尺의 決定, 實驗設備 및 測定方法, 그리고 豫備實驗 및 實驗方法 等에 대하여 詳細하게 整理를 하였다.

여기에서 言及되는 數值解析 方法으로는 常微分方程式을 數值積分할 수 있는 Runge 및 Runge-Kutta-Gill 의 方法¹⁶⁾을 使用하였으면 Surging 安定性에 대한 解析은 本 研究에서 除外하였다.

實驗結果와 計算結果는 陝川댐 調壓水槽를 對象으로 하여 比較 檢討하였다.

2. 制水口式 識壓水槽의 基本理論

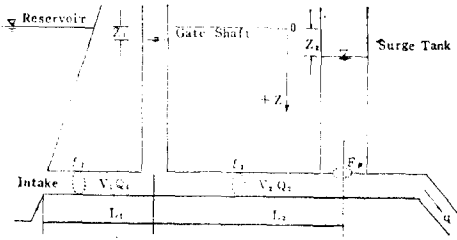


圖 2.1 Layout of Surge Tank System

圖 2.1과 같이 制水口를 가진 複式調壓水槽의 基本式은 運動方程式과 連續方程式으로부터 다음과 같이 誘導된다.¹⁶⁾

가. 運動方程式

1) 取水口-Gate Shaft間

$$\frac{L_1}{g} \frac{dV_1}{dt} = Z_1 - C_1 V_1 |V_1| \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

2) Gate Shaft-Surge Tank間.

$$\frac{L_2}{g} \frac{dV_2}{dt} = Z_2 - Z_1 - C_2 V_2 |V_2| - \frac{1}{2g} \frac{(f_2 V_2 - q) |f_2 V_2 - q|}{(C_d F_p)^2} \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

나. 連續方程式

1) Gate-Shaft에 對해서

$$F_1 \frac{dZ_1}{dt} = Q_2 - Q_1 = f_2 V_2 - f_1 V_1 \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

2) Surge Tank에 對해서

$$F_2 \frac{dZ_2}{dt} = q - Q_2 = q - f_2 V_2 \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

따. 여기서 L: 導水路 길이

f: 導水路 斷面積

F: Surge Tank 斷面積

Q: 導水路內 流量

q: 發電使用水量

p: 制水口 有效斷面積(C_dF_p)

Z: 貯水池를 基準으로 한 Surge Tank水位 (鉛直 下向이 +)

V: 導水路內 流速

c: 損失水頭係數

g: 重力加速度

t: 時間

F_p: 制水口 斷面積

C_d: 制水口 流量係數

윗 式들은 發電使用水量이 變動하는 境遇 調壓水槽內의 水位變化 및 壓力水路內의 流速變化를 表示하는 基本微分方程式이다.¹⁴⁾

3. 模型實驗

3-1. 相似法則

가. 力學的 相似條件

制水口式 調壓水槽에 相當하는 圖 2-1과 같은 系에 對해서 力學的 相似性을 檢토히 보면 式 (2.1)~(2.4)가 原型에서나 模型에서 同一하게 成立되어야 하므로 模型과 原型의 力學的 相似關係는 서로 對應하는 各項의 比例條件式으로 나타낼 수 있다.^{11,12,13,24)}

$$\left. \begin{aligned} \frac{(L_{1m}/g)(dV_{1m}/dt_m)}{(L_{1p}/g)(dV_{1p}/dt_p)} &= \frac{Z_{1m}}{Z_{1p}} = \frac{C_{1m}V_{1m}^2}{C_{1p}V_{1p}^2} \\ \frac{F_{1m}(dZ_{1m}/dt_m)}{F_{1p}(dZ_{1p}/dt_p)} &= \frac{f_{2m}V_{2m}}{f_{2p}V_{2p}} = \frac{f_{1m}V_{1m}}{f_{1p}V_{1p}} \\ \frac{(L_{2m}/g)(dV_{2m}/dt_m)}{(L_{2p}/g)(dV_{2p}/dt_p)} &= \frac{Z_{2m}}{Z_{2p}} = \frac{Z_{1m}}{Z_{1p}} \\ &= \frac{C_{2m}V_{2m}^2}{C_{2p}V_{2p}^2} = \frac{(Q_{2m}-q_m)^2/(2gp_m^2)}{(Q_{2p}-q_p)^2/(2gp_p^2)} \\ \frac{F_{2m}(dZ_{2m}/dt_m)}{F_{2p}(dZ_{2p}/dt_p)} &= \frac{q_m}{q_p} = \frac{Q_{2m}}{Q_{2p}} \end{aligned} \right\} \dots\dots(3.1)$$

단 여기서 添子 p는 原型值이고 m은 模型值이다. 한편, 模型의 原型에 對한 縮尺比를 K로 나타내고, 縮尺된 物理量을 整理하면 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} K_L &= K_{L1} = K_{L2} = L_{1m}/L_{1p} = L_{2m}/L_{2p} \\ K_V &= K_{V1} = K_{V2} = V_{1m}/V_{1p} = V_{2m}/V_{2p} \\ K_t &= t_m/t_p \\ K_Z &= K_{Z1} = K_{Z2} = Z_{1m}/Z_{1p} = Z_{2m}/Z_{2p} \\ K_C &= K_{C1} = K_{C2} = C_{1m}/C_{1p} = C_{2m}/C_{2p} \\ K_F &= K_{F1} = K_{F2} = F_{1m}/F_{1p} = F_{2m}/F_{2p} \\ K_Q &= K_{Q1} = K_{Q2} = Q_{1m}/Q_{1p} = Q_{2m}/Q_{2p} \\ &= K_q = K_{(q-Q_2)} = K_{(q_2-Q_1)} \\ K_f &= K_{f1} = K_{f2} = f_{1m}/f_{1p} = f_{2m}/f_{2p} \\ K_P &= P_m/P_p \end{aligned} \right\} \dots\dots(3.2)$$

(3.2)式을 (3.1)式에 代入하여 整理하면 相似條件式으로써 式(3.3)이 얻어진다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{K_L K_V}{K_t} &= K_Z = K_C K_V^2 = \frac{K_0^2}{K_F^2} \\ \frac{K_F K_Z}{K_t} &= K_0 = K_f K_V \end{aligned} \right\} \dots\dots (3.3)$$

式(3.3)은 一般의 力學的 相似條件式으로 이것을 그대로 模型實驗에 應用하기에는 未知數가 많으므로 不充分하다. 따라서, 나.와 같은 具體的인 諸條件을 檢討하여 附加하여야 한다.¹¹⁾¹³⁾

나. 附加 相似率의 檢討

1) 制水口 抵抗에 관한 檢討

制水口部는 導水路와 調壓水槽를 連結하는 重要한 部分이므로 一般의 制水口(port)에 의한 損失水頭의 效果가 크다는 것을 考慮하여 調壓水槽와 制水口의 有效斷面의 縮尺을 一致시킬 必要가 있다.¹¹⁾¹³⁾

$P = C_a \cdot F_p$ 이므로

$K_p = K_{t,a} \cdot K_{F,p} = K_F \dots\dots (3.4)$

2) 損失水頭의 檢討

摩擦損失水頭 h_f 는 Manning公式을 使用하면

$$h_f = f' \frac{LV^2}{R2g} = \frac{2gn^2}{3\sqrt{R}} \frac{L}{R} \frac{V^2}{2g} \dots\dots (3.5)$$

로 表示된다. 여기서, R =導水路의 徑深 따라서, 式(2.1), (2.2)의 總損失水頭 CV_2 項은 다음과 같은 諸要素로 構成되어 진다.

$$h = CV^2 = \left(1 + \sum f_i + \frac{2gn^2}{3\sqrt{R}} \frac{L}{R} \right) \frac{V^2}{2g} \dots\dots (3.6)$$

여기서, f_i =副次的인 損失水頭係數, 原型에서는 C 가 設計計算 結果 $C = h/v^2$ 으로 주어지나 模型에서 이것을 明確히 把握하기란 힘들기 때문에 模型設計에서는 C 의 構成要素中 摩擦損失이 차지하는 比率이 크므로 이를 감안하여 粗度係數 n_m 을 副次項까지 포함할 수 있도록 크게 假定하기로 한다.¹¹⁾¹³⁾

$$h_m = C_m V_m^2 = \frac{2gn_m^2}{R_m^{1/3}} \frac{L_m}{R_m} \frac{V_m^2}{2g} = \frac{n_m^2 L_m}{R_m^{5/3}} V_m^2 \dots\dots (3.7)$$

따라서 K_c 는 (3.8)式으로 된다.

$$K_c = \frac{C_m}{C} = \frac{n_m^2 L_m / R_m^{4/3}}{h / V^2} \dots\dots (3.8)$$

윗 식에다 $L_m = K_L \cdot L$, $R_m = (D/4) \cdot K_f^{1/2}$ 을 代入하면

$$\left. \begin{aligned} K_c &= \frac{n_m^2 K_L L / [(D/4) \cdot K_f^{1/2}]^{4/3}}{h / V^2} \\ &= \left(\frac{4^{4/3} n_m^2 L^{1/3}}{D^{4/3} C^{1/3}} \right)^3 \frac{K_L}{K_f^{2/3}} \\ &= a^3 \frac{K_L}{K_f^{2/3}} \end{aligned} \right\} \dots\dots (3.9)$$

여기서, D =導水路의 直徑($K_D = K_f^{1/2}$)

$$a = \frac{4^{4/3} n_m^2 L^{1/3}}{D^{4/3} C^{1/3}} = \left(\frac{4^3 n_m^2 L}{D^4 C} \right)^{1/3}$$

$$= \text{Const.} \dots\dots (3.10)$$

3) 調壓水槽의 幾何學的인 相似性; 調壓水槽는 幾何學的으로 歪曲이 되지 않는 것이 좋다.¹³⁾

그러므로, $K_Z = K_F^{1/2} \dots\dots (3.11)$

4) 實驗의 相似率과 獨立量의 選定

式(3.3)에 式(3.4), (3.9) 및 (3.11)을 附加한 것이 制水口式 調壓水槽 水理模型實驗을 위한 相似率이 된다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{K_L K_V}{K_t} &= K_Z = K_C K_V^2 \\ \frac{K_F K_Z}{K_t} &= K_0 = K_f K_V = K_F K_Z^{1/2} \\ K_C &= a^3 K_L / K_f^{2/3} \\ K_Z &= K_F^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots (3.12)$$

式(3.12)에는 未知量이 8個가 있고 等號가 7個가 있으므로, 獨立量으로서 K_f 를 選定하면 나머지 未知量들은 式(3.13)과 같이 된다.¹¹⁾¹³⁾

$$\left. \begin{aligned} K_L &= a K_f^{4/7} \\ K_Z &= K_f^{5/9} / a \\ K_t &= K_Z^{1/2} = K_f^{5/18} / a^{1/2} \\ K_V &= K_f^{7/18} / a^{5/2} \\ K_F &= K_P = K_f^{10/9} / a^2 \\ K_0 &= K_f^{25/18} / a^{5/2} \\ K_C &= a^4 / K_f^{2/9} \end{aligned} \right\} \dots\dots (3.13)$$

5) 幾何學的인 模型製作에 관한 考察

本 調壓水槽와 같이 導水路와 調壓水槽와의 連結部分에 있어서 副次的인 損失이 無視할 수 없는 程度로 크다고 判斷되는 境遇에는 導水路와 調壓水槽의 連結部分에 幾何學的인 相似性이 要求되며, 다음과 같은 條件을 附加하여야 한다.

$$K_f = K_F \dots\dots (3.14)$$

그러나, (3.14)式을 (3.13)式에 同時에 附加한다는 것은 自由度의 關係로부터 不可能한 것이다.

따라서, 調壓水槽實驗에서는 導水路에 對한 相似率은 式(3.13)의 K_f 를 適用하고, 이 導水路는 單純히 相似條件에 맞는 慣性力을 주기 위한 機構라고 判斷되므로, 調壓水槽連結部의 극히 짧은 導水路 部分의 相似率은 式(3.14)를 滿足시키는 K_f 를 適用하여도 實驗方法上 別로 支障이 없다.¹¹⁾¹³⁾

3-2 模型縮尺의 決定¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾

一般의 損失水頭를 相似시키기란 대단히 어려우나, 調壓水槽 模型實驗의 境遇에는 模型管路에 설치된 Sluice밸브를 조작함으로써 力學的 相似率에 의해 要求되는 損失水頭로 맞출 수 있다. 이를 위해서는, 製作後 模型의 損失水頭가 設計損失水頭보다 작아야 하므로, 式(3.13)에 의한 諸縮尺의 決定時 考慮해야 한다.

模型縮尺을 決定하려면 우선 a 값을 計算하여야 하며 a 의 變數에는 模型導水路의 假想粗度 n_m 와 原型損失水頭 h_p 가 있음을 式(3.9)에서 알 수 있다. 만일 n_m 을 實際値보다 크게 假定하고 h_p 는 最小値를 취한다면, 이는 모두 a 의 增加를 가져오게 되며, a 가 增加하게 되면 式(3.13)에 의해 L_m 은 a 와 같은 Order로 增加하지만 V_m^2 은 a^5 Order로 減小하게 되므로, 模型損失水頭 ($h_m = n_m^2 L_m V_m^2 / R_m^{4/3}$)가 期待하는 대로 安全側에 들려면, n_m 을 實際値보다 크게 假定하고 h_p 는 最小値를 選擇하여야 한다.¹²⁾ a 가 決定된 후, K_f 의 選定은 다음 條件을 考慮해야 한다.¹¹⁾¹³⁾

1) 模型導水路는, 經費를 절감하기 위하여 市販하는 P.V.C.管을 使用하는 것이 좋으며, 그 길이는 實驗室 面積이 許容하는 範圍內에서 될 수 있는 대로 길게 한다.

2) 調壓水槽 높이는, 測定の 精度와 便利함을 考慮하여 0.5m~1.0m 程度로 한다.

3) 模型管路內의 流速은, 實驗對象 範圍에서 限界 流速보다 크게 되도록 한다. 따라서, Q_{max} 에 대한 $Reynolds$ 數가 적어도 10⁴以上이 되도록 하는 것이 必要하다.

4) 模型管路內 流量은, 測定精度上 1.2l/sec以上이 바람직하다.

上記의 事項을 바탕으로, 圖 3.1과 같은 陝川댐 調壓水槽의 模型縮尺을 決定하였다.¹³⁾

1) 模型導水路를 P.V.C管($n=0.009\sim0.01$)을 使用한다면, 實際 P.V.C管의 粗度係數보다 크게 假定할 必要가 있기 때문에 本 模型設計에서는 $n_m=0.013$ 으로 하였다.

2) 模型導水路는 市中에서 販賣하는 4''($\phi 100mm$)의 P.V.C管을 使用하였다.

3) 1), 2)項目을 바탕으로, 式(3.13)의 各 縮尺을 決定하였으며 이 縮尺에 의한 模型의 主要 諸元은 表 3.1과 같다.

단 여기서, * : 等價換算길이

$$K_F : K_f^{10/9} / a^2$$

3-3 實驗設備 및 測定方法

가. 實驗設備

1) 펌프시설

60Hp用 펌프를 使用하여 貯水槽(35×30×2m)에서 流量을 7m 높이에 있는 高水槽(10×20×2.5m)까지 끌어올려 300mm管을 통해 實驗室로 一定한 流量이 供給되도록 되어 있다.

2) 實驗室

폭 20m, 길이 50m로써 펌프室로부터 流量을 供給할 수 있는 管路가 設置되어 있다.

3) 環水路

實驗에서 使用한 流量을 貯水槽로 流入시켜 물의 損失을 防止하기 위한 水路로써 實驗室과 貯水槽를 連結한다.

나. 實驗裝置

實驗에 必要한 裝置는 다음과 같다.¹³⁾

1) 貯水槽 및 給水

貯水槽는 原型에 있어서 貯水池의 役割을 하는 것으로 水位를 一定하게 維持시키기 위한 裝置가 있어야 하며, 給水는 最大實驗流量보다 더 많은 流量을 供給할 수 있도록 하였다.

2) 模型導水路

原型導水路가 전길이에 걸쳐 等斷面이 아닌 境遇에는, 運動 Energy 概念을 빌려 等價길이로 換算하여 等斷面으로 模型을 製作하는 것이 便利하며, 調壓水槽附近의 導水路는 制水口의 幾何學的인 相似性의 必要性에 의해 K_F 로 設計되어야 하므로, 自由度 關係上 K_F 導水路와 K_f 導水路 사이에 4°未滿의 漸縮管을 두었으며,³⁾ 3-2에서 及及했다시피 模型導水路 中間에 損失水頭調節用 Sluice밸브 2個를 連結하였고, 通水時의 殘留空氣를 排除하기 위해서 8m 間隔으로 12個의 通氣孔을 導水路 곳곳에 設置하였다. 調壓水槽로부터 下流側의 壓力管(penstock) 部分은 實驗結果에 直接的인 影響을 미치지 않으므로,¹¹⁾ 단지 特殊밸브와의 連結部로서 3'' 鐵管을 使用하였다.

3) 調壓水槽 및 Gate Shaft模型

內部の 流況觀察이 容易하도록 두께 5mm의 透明아크릴로 製作하였다.

表 3.1 模型의 主要諸元

主要 諸元	縮	尺	原 型	模 型
導水路길이	$K_L = aK_f^{4/9}$	1/33.966	2508.65m	*73.6m
直 徑	$K_D = K_f^{1/2}$	1/55	5.5m	0.1m
調壓水槽높이	$K_Z = K_f^{5/9} / a$	1/89.060	80m	0.9376m
直 徑	$K_P = K_F^{1/2}$	1/89.060	12m	0.1347m
最大使用水量	$K_Q = K_f^{25/18} / a^{5/2}$	1/74582.5	122m ³ /s	1.63l/sec

4) 特殊밸브와 負荷變化裝置

使用水量을 調節하기 위해서는 壓力管終端에 水車의 governor代用인 特殊밸브를 製作하여 設置하였다. 이 밸브는 sluice型으로 一定水頭에 대하여 그 開放度와 流量이 比例하도록 되어 있다. 그리고, 特殊밸브와 負荷運轉板을 spindle로 連結하여 밸브의 開放度가 5倍로 擴大되어 運轉板에 전달되도록 하였으며, 模型上에서도 所定の 負荷運轉을 行할 수 있도록 負荷變化裝置를 製作하였다.

다. 測定方法

1) surging의 測定

調壓水槽 및 gate shaft內에서의 發生 surge를 測定하기 위하여 容量式 波高(水位)計를 設置하였다. 波高計 sensor의 길이는 down surge water level에서 부터 up surge water level의 範圍를 測定할 수 있도록 하였으며, 記錄은 pen type linear recorder를 使用하였다.

2) 定常水位의 測定

一定한 貯水池水位 또는 그외의 定常水位의 測定에는 point gauge와 level을 使用하였다.

3) 流量의 測定

模型管路 末端의 特殊밸브로부터 流出되는 實驗使用 流量은 表 3.1에서 보는 바와 같이, 最大使用水量이 1.63l/s에 지나지 않는 比較的 작은 流量이므로 測定 精度를 考慮하여 60°三角웨어를 使用하여 測定하였다.

3-4 豫備實驗

本 豫備實驗은 調壓水槽 水理試驗中 가장 重要한 部分을 차지하며, 正確한 流量測定을 위한 三角웨어의 檢定, 模型導水路의 妥當性 與否의 檢討, 制水口의 有效斷面積을 相似시키기 위한 制水口形狀의 調整 및 發電所에서 行하는 負荷運轉을 模型上에서 再現하기 위한 特殊밸브의 負荷運轉曲線의 作成으로 構成되어 진다.

가. 三角웨어의 檢定

앞에서 言反한 바와 같이 實驗對象 流量이 比較的 적으므로 stop watch와 저울을 使用하여 容量式으로 三角웨어의 流量을 測定하였다. 越流水深은 測定에는, manometer를 設置한 point gauge를 使用하였으며, point gauge의 zero point는 三角 weir의 V-notch頂點과 一致하도록 레벨을 使用하여 定하였다. 한편 實測 值와 比較할 수 있는 三角웨어의 流量公式으로는 日本의 邊渡式에 $\theta=60^\circ$ 를 代入하여 아래와 같은 式이 있

$$Q = \beta h^{5/2} (m^3/sec) \left. \begin{aligned} \beta &= 1.363 \left(0.573 + \frac{0.00183}{h} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.15)$$

이 式에 의한 流量 Q—越流水深 h '의 關係는 圖 3.1

이다. 圖 3.1에서 보는 바와 같이, 檢定值가 計算值보 다 약간 많으나 最大誤差는 5%이내였다. 약간의 誤差는 웨어製作上의 問題인 것으로 思思料되어 本實驗에 서는 檢定值를 使用하였다.

나. 模型導水路의 損失水頭

實驗의 對象이 되는 損失水頭는 原型導水路에서 豫想되어 지는 最大 또는 最小의 損失水頭이며, 그 式은 다음과 같다.¹³⁾

$$\left. \begin{aligned} h &= 0.000535647Q^2 (n=0.012) \\ h &= 0.000861813Q^2 (n=0.016) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.16)$$

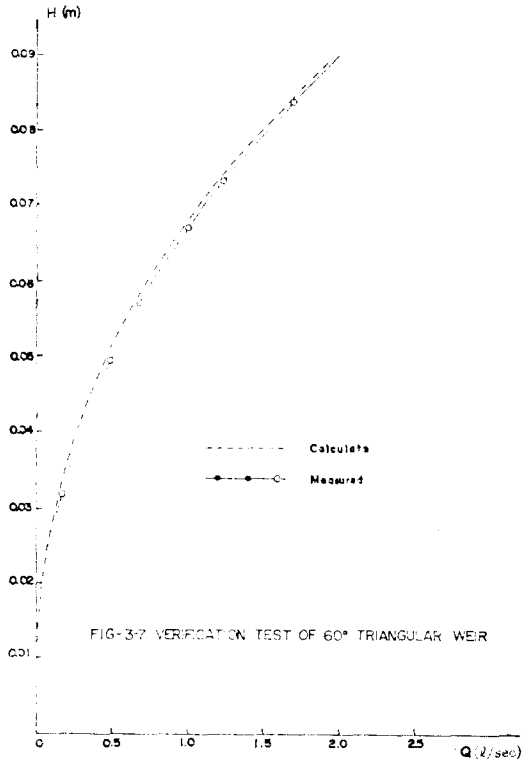


圖 3.1 60°三角웨어의 檢定實驗

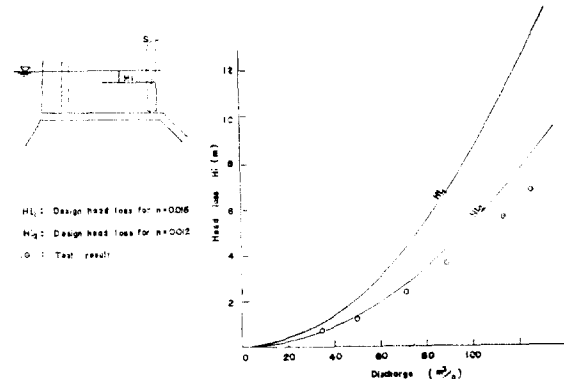


圖 3.2 取水口 및 調壓水槽의 損失水頭

어떤 流量에 있어서 模型導水路의 特殊밸브를 全開한 境遇의 損失水頭가 原型에서 對象으로 하는 最小損失水頭보다 작아 模型의 妥當性을 認定할 수 있는 것이다. 이와 같이, 本 豫備實驗은 製作된 模型導水路의 損失水頭가 妥當한가의 與否를 檢討하는 것이다. 實驗方法으로는 特殊밸브를 使用하여 貯水池水位에 따른 流量을 여러가지로 變化시켜 가면서 貯水槽와 調壓水槽間의 水位差 즉 損失水頭를 測定하는 것이다. 實驗值과 設計值을 比較한 結果는 圖 3.2과 같으며, 圖 3.2에서 보는 바와 같이, 模型에서의 實測值는 原型의 最小損失水頭($n=0.012$)보다 작으므로, 本 模型의 妥當性을 認定할 수 있다.

다. 制水口 流量係數의 調整

本 實驗의 相似率에 의하면, 調壓水槽와 制水口 및 導水路와의 連結部는 幾何學的인 相似條件을 갖도록 되어 있다(式 3.4, 3.11, 3.14 參照)

그러나, 制水口의 抵抗值는 設計值과 반드시 一致한다고는 볼 수 없다. 그러므로, 豫備實驗에서 調壓水槽內 surging 現象에 銳敏하게 影響을 미치는 制水口의 形狀을 調整하여 設計值과 合致시켜야한다. 制水口의 形狀이 調壓水路쪽으로는 거의 90°이고 導水路쪽으로는 流線形에 가까운 境遇, 流量係數의 設計值는 調壓水槽에 流入時(up surge) $C_d=0.9$ 調壓水槽로부터 流出時(Down Surge) $C_d=0.6$ 로 보고 있다.¹⁷⁾

한편, 制水口 抵抗은 다음式으로 주어진다.

$$K=Q^2/2g(C_d \cdot F_p)^2 \dots \dots \dots (3.17)$$

단 여기서, K : port 抵抗(損失水頭)

Q : port의 通過流量

g : 重力加速度

C_d : 流量係數

F_p : port 斷面積

따라서, 制水口 抵抗은 $C_d \cdot F_p$ 의 값에 의하여 정해진다. 模型制水口 損失水頭 K_m 은

$$K_m=Q_m^2/2g(C_{dm} \cdot F_{pm})^2 \dots \dots \dots (3.18)$$

이므로, 流量係數의 模型值는

$$C_{dm}=Q_m/\sqrt{2gK_m \cdot F_{pm}} \dots \dots \dots (3.19)$$

에 의해 K_m 을 測定해 計算할 수 있으며, K_m 을 測定하는 裝置는 圖 3.3와 같다. 計算結果 流出時 流量計數의 模型值는 $C_{dm}=0.64$ 이었다.¹⁸⁾ 原則的으로 $C_{dm}=C_d=0.6$ 이어야 하나, 式(3.4)에서 보는 바와 같이, 有效斷面積概念을 利用하면

$$K_F \cdot (C_d F_p) = C_{dm} \cdot F_{pm} \dots \dots \dots (3.20)$$

에서 $C_{dm} \cdot F_{pm} = \text{Const.}$ 볼 수 있으므로, 模型制水口의 直徑을 3.03cm에서 2.94cm로 줄였다. 따라서, 流入時의 流量係數도 設計值와 同一한 有效斷面積을 가지려면

면 $C_{dm}=0.957$ 이 되어야 한다. 그리하여, $C_{dm}=0.957$ 이 될 때까지 本 制水口의 流線形部分을 調整하였으며, 流出, 流先時의 最終 結果는 圖 3.3와 같다.

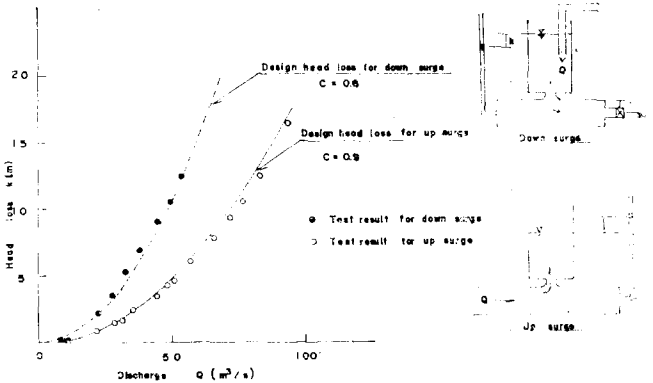


圖 3.3 制水口의 流量係數

다. 特殊밸브의 特性檢討 및 負荷運轉曲線의 作成
本 實驗에서 模擬負荷運轉을 하려면, 먼저 單獨運轉時의 出力 一定條件인

$$P=ngQH_c(KW) \dots \dots \dots (3.21)$$

와 governor의 條件인

$$Q=Q_R \sqrt{H/H_R} \dots \dots \dots (3.22)$$

에 의해¹⁷⁾ 負荷運轉曲線을 作成하여야 한다.

단 여기서, P : 出力

n : 效率(0.87을 使用)

H_c : 有效水頭

Q : R.W.L이하의 貯水池에서 guide vane 展開容量에 의해 決定되는 最大使用水量.

H : Q 일때 有效水頭

Q_R : R.W.L時 使用水量

H_R : Q_R 일 때 有效水頭

이 負荷曲線을 負荷變化裝置上 Pannel의 負荷運轉曲線으로 바꾸기 위해서는, 다음과 같은 特殊밸브의 特性을 檢討하여야 한다.

- 1) 特殊밸브 開放度에 따른 調壓水槽—流量關係
- 2) 調壓水槽水位에 따른 流量과 特殊 밸브의 開放度 혹은 運轉板 stroke의 關係

3-5 實驗方法

模型檢定과 豫備實驗이 끝나면, 다음과 같은 節次에 따라 實施한다.

- 1) 貯水池 水位를 實驗에서 對象으로 하는 水位가 되도록 over flow裝置를 利用하여 一定하게 維持시킨다.
- 2) 導水路 곳곳에 設置되어 있는 空氣孔을 全開하여 管內에 있는 空氣를 排除한 後 通氣孔을 全閉한다.
- 3) 特殊밸브를 全閉하고, 導水路 中間에 設置된

sluice 밸브를 操作하여 模型導水路의 損失水頭가 設計 損失水頭와 一致하도록 한다.

4) down surge 實驗의 境遇, 調壓水槽底部에 連結된 manometer의 水位가 運轉板에 附着된 負荷運轉曲線과 一致하도록 所要時間內에 運轉板을 操作하여 特殊밸브가 開放되도록 한다.

5) up surge 實驗의 境遇, manometer 水位가 負荷運轉曲線과 一致하도록 運轉板을 操作하고 調壓水槽內 水面이 安定될 때까지 기다렸다가 所要時間內에 運轉板을 操作하여 特殊밸브가 全開되도록 한다.

6) surging을 記錄計로 測定한다.

4. 數值解析

4-1 Surging의 數值計算

調壓水槽에서 成立되는 基本微分方程式을 直接積分이 되지 않으므로, 다음 式들을 聯立하여 數值積分을 행하여야 한다.^{4,5,6)}

$$\left. \begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \varphi(z, v, \dots; t) \\ \frac{dv}{dt} &= \psi(z, v, \dots; t) \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.1)$$

위와 같은 微分方程式의 數值積分法으로는 다음과 같은 것이 있다.

가. Runge의 方法

式(4.1)로 부터 $t=t_0$ 일 때 $z=z_0, v=v_0$ 가 되고, z, v의 값을 알고 있는 境遇 $t_1=t_0+dt$

이에 대한 Z, V, \dots 의 값은

$$Z_1 = Z_0 + \Delta Z, V_1 = V_0 + \Delta V, \dots\dots(4.2)$$

로 주어진다.

$$\left. \begin{aligned} \Delta Z &= \varphi \left(Z_0 + (\Delta Z)_1, V_0 + (\Delta V)_1, \dots, t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right) \cdot \Delta t \\ \Delta V &= \psi \left(Z_0 + (\Delta Z)_1, V_0 + (\Delta V)_1, \dots, t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right) \cdot \Delta t \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.3)$$

위 式에서

$$\left. \begin{aligned} (\Delta Z)_1 &= \varphi(Z_0, V_0, \dots; t_0) \frac{\Delta t}{2} \\ (\Delta V)_1 &= \psi(Z_0, V_0, \dots; t_0) \frac{\Delta t}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.4)$$

위 式으로부터 surging의 數值計算을 行할 수 있다.

나. Runge-Kutta의 方法

Runge의 方法을 多少修正한 것으로 式(4.1)로부터 $t=t_0$ 에 대해 $Z=Z_0, V=V_0, \dots$ 가 되고, Z, V 의 값을 알고 있는 境遇는 $t_1=t_0+dt$ 에 대한 V, Z, \dots 의 값

을 式(4.2)에서 計算한다.

$$\left. \begin{aligned} \Delta Z &= \frac{1}{6} \{ (\Delta Z)_1 + 2(\Delta Z)_2 + 2(\Delta Z)_3 + (\Delta Z)_4 \} \\ \Delta V &= \frac{1}{6} \{ (\Delta V)_1 + 2(\Delta V)_2 + 2(\Delta V)_3 + (\Delta V)_4 \} \end{aligned} \right\} (4.5)$$

여기서, $(\Delta Z)_1 = \varphi(Z_0, V_0, \dots; t_0) \cdot \Delta t$

$$(\Delta Z)_2 = \varphi \left(Z_0 + \frac{(\Delta Z)_1}{2}, V_0 + \frac{(\Delta V)_1}{2}, \dots; t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right) \cdot \Delta t$$

$$(\Delta Z)_3 = \varphi \left(Z_0 + \frac{(\Delta Z)_2}{2}, V_0 + \frac{(\Delta V)_2}{2}, \dots; t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right) \cdot \Delta t$$

$$(\Delta Z)_4 = \varphi(Z_0 + (\Delta Z)_3, V_0 + (\Delta V)_3, \dots; t_0 + \Delta t) \cdot \Delta t$$

및 $(\Delta V)_1 = \psi(Z_0, V_0, \dots; t_0) \Delta t$

$$(\Delta V)_2 = \psi \left(Z_0 + \frac{(\Delta Z)_1}{2}, V_0 + \frac{(\Delta V)_1}{2}, \dots; t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right) \cdot \Delta t$$

$$(\Delta V)_3 = \psi \left(Z_0 + \frac{(\Delta Z)_2}{2}, V_0 + \frac{(\Delta V)_2}{2}, \dots; t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right) \cdot \Delta t$$

$$(\Delta V)_4 = \psi(Z_0 + (\Delta Z)_3, V_0 + (\Delta V)_3, \dots; t_0 + \Delta t) \cdot \Delta t$$

로 된다. 위 式으로부터, surging의 數值計算을 行할 수 있다.

5. 實驗—陝川댐 調壓水槽

5-1 水理實驗

가. 實驗條件

本 實驗은 陝川댐 調壓水槽를 對象으로 實施하였으며, 實驗案은 表 5.1에서 보는 바와 같다.

단 F.L.R; 全負荷遮斷 H.L.I; 半負荷增加

n ; 粗度係數 W.L.; 貯水池水位

Q_1 ; 初期流量 Q_2 ; 最終流量

T ; guide vane 操作時間

1) 1案은, 貯水池水位가 high water level인 境遇, 最上昇 surging을 檢討하기 위해 最小損失水頭를 取하고 半負荷急增加時에 대한 實驗을 實施한 것이다.

2) 2, 3案은, 貯水池水位가 rated water level인 境遇의 surging을 檢討하기 위해 最小損失水頭를 取하고 半負荷急增加時에 대한 實驗을 實施한 것이다.

3) 4, 5案은, 貯水池水位가 low water level인 境遇 最下降 Surging을 檢討하기 위해 最大損失水頭를 取하고 半負荷急增加時에 대한 實驗을 實施한 것이다.

나. 實驗結果¹⁾

表 5.1

實驗案 및 條件

實驗案	W.L(EL.m)	n	流 量(m ³ /sec)		負荷條件	T(sec)
			Q ₁	Q ₂		
1	H.W.L 176	0.012	103.9	0	F.L.R	4
2	R.W.L. 164	0.012	54.9	119.3	H.L.I	20
3	R.W.L. 164	0.012	0	54.9	H.L.I	20
4	L.W.L 140	0.016	0	74.2	H.L.I	20
5	L.W.L 140	0.016	74.2	113.6	H. L.I	20

表 5.2 實驗結果

實驗案	1st Surge		2nd Surge		3rd Surge	
	T(sec)	H(m)	T(sec)	H(m)	T(sec)	H(m)
1	60(22)	195.8(175.2)	180(38)	168.0(174.8)	290(56)	182.0(175.2)
2	64	148.5	180	161.8	300	156.0
3	60	152.0	178	170.2	292	158.8
4	63	124.3	180	141.0	300	134.0
5	66	124.6	190	130.5	300	128.7

表 5.1의 實驗條件을 前提로 하여 實驗을 實施한 結果는, 表 5.2와 같다.

단, 여기서 T; Surging의 發生時間

H; Surge 높이

()내 數值; gate shaft의 값

1) 最上昇水位는, guide vane操作開始後 60秒 後에 發生하며 Surging의 높이(U.S.W.L)는 195.8m이며 調壓水槽上端 높이 198.0m에 대하여 2.2m의 餘裕를 갖고 있다.

2) 最下降水位는, guide vane 操作開始後 63秒 後에 發生하며 Surging의 높이는 124.3m이며 이는 調壓水槽 바닥높이 117.5m에 대하여 6.8m의 餘裕를 갖고 있으므로 導水路內에 空氣가 混入되는 現象은 發生되지 않을 것으로 思慮된다.

3) gate shaft의 surge로 인한 最高上昇水位는, surge發生前 gate shaft의 靜水面보다 0.6m程度 上昇하여 W.L 175.2m에 이르며, Gate Shaft上端 E.L 181.0m에 대하여 5.8m의 餘裕를 가지고 있다. 또한 水位上昇中에 發生하는 Surging의 周期는 20sec, 最大振幅은 0.4m程度이다.

5-2 數值解析

가. 計算

實驗値와 比較하기 위해서 陝川댐 調壓水槽를 對象으로 하였으며, 單動制水口式으로 表 5.1의 모든 案에 대해 計算을 實施하였으며, 解의 安全性을 確認하기 위하여 1案에 對해 $\Delta t=2\text{sec}$ 에서 1, 0.5sec로 減小시켜 計算을 實施하였다.⁵⁾

한편, 損失水頭를 無視한 free surge, 制水口가 없는 單動式 및 複式制水口型으로 1案에 대해서만 計算을 實施하였다.

나. 計算結果

上記의 境遇에 대하여 計算을 實施한 結果는 表5.3, 5.4와 같다.

단, 여기서 t; 計算時間 間隔이며, 괄호내 數値는 gate shaft의 값이다.

1) 表 5.4 및 圖 5.1에서 보는 바와 같이, 單動制水口式은 單動式에 비해 surging의 減衰性이 빠르고 最上昇水位도 낮아 制水口의 特性을 確認할 수 있었다.

2) 表 5.4에 나타난 바와 같이, 單動制水口式과 複式制水口型의 計算結果를 比較해 보면 surging의 周期는 一致하고 있으며, 最上昇水位에 있어서는 0.0124m의 差異가 發生하고 있으므로 거의 一致한다고 볼 수 있다. 또한, gate shaft內 最上昇水位는 3번째 波峰에서 32sec後에 發生되나 水位變動은 매우 미미하였다.

表 5.3 單動制水口式 計算結果

案	t	1st Surge		2nd Surge		3rd Surge	
		T	H	T	H	T	H
1	2	58	195.8668	176	167.9277	286	182.3054
	1	58	195.8668	176	167.9277	—	—
	0.5	58	195.8668	176	167.9277	—	—
	2	(14)	(176.0623)	(22)	(175.7430)	(32)	(176.4448)
2	2	68	147.3003	182	160.1159	296	154.7434
3	2	60	151.6097	174	168.3560	284	158.9481
4	2	62	124.0597	178	139.4755	292	133.3920
5	2	76	124.1611	194	130.3213	310	128.3999

表 5.4 各型式의 計算結果

區 分	1st Surge		2nd Surge		3rd Surge	
	T	H	T	H	T	H
Free Surge	54.74	208	164.22	144	273.70	208
單 動	60	204.3	170	152.7	280	195.8
單動制水口	58	195.8668	176	167.9277	286	182.3054
複式制水口	58	195.8544	176	167.9304	286	182.3028

3) 表 5.3에 나타난 바와 같이, 單動制水口式 數值解의 安定性을 確認하기 위하여 $\Delta t=2\text{sec}$ 에서 1, 0.5sec로 減小시켜 보아도 아무런 差異가 없었다.

4) 最上昇水位는(表 5.3參照) 58sec後에 發生하며, 그 높이는 195.8668m이다.

5) 最下降水位는(表 5.3參照) 62sec後에 發生하며, 그 높이는 124.0597m이다.

6. 考 察

調壓水槽의 水理實驗과 數值解析을 通해 다음과 같은 事項을 考察하여 보았다.

1) 調壓水槽의 模型縮尺은, 基本方程式에서 誘導되어 여러가지 相似率을 附加시킨 것으로 Froude相似法則에 Reynolds相似法則이 加味되었다고 할 수 있다.

2) 調壓水槽의 豫備實驗은, 模型實驗에 있어서 가장 重要한 部分을 차지하고 있으므로 慎重하게 實施되어야 한다.

3) Surging의 數值計算으로 Runge-Kutta-Gill의 方法을 使用하였는 바, 圖 6.1로부터 圖 6.5에서 보는 바와 같이 實驗値와 全體의으로 잘 一致하고 있으므로 Surging의 追跡方法으로 無理가 없다고 思慮된다.

4) 圖 2.1와 같은 陝川댐 制水口式調壓水槽의 境遇, 單動制水口式으로 數值計算을 實施하여도 거의 差異가 없었던 바 이는 L_1 과 F_1 이 L_2 와 F_2 에 비해 相當히 작기 때문인 것으로 思慮된다. 그리고, 實驗에서나 計算에서 gate shaft의 水位豫動은 아주 미미하였다. 따라서 實驗値와 比較檢討 對象이 된 資料는 모두 單動制水口式이다.

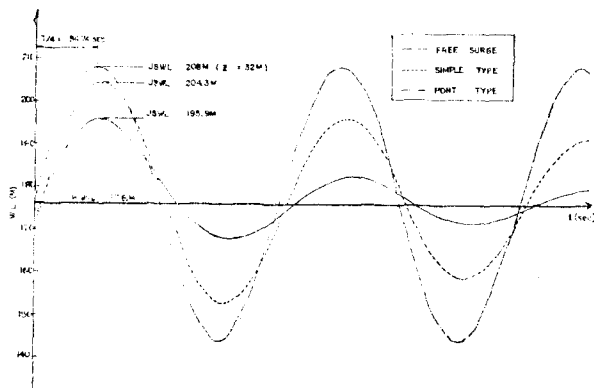


圖 5.1 各型式의 比較

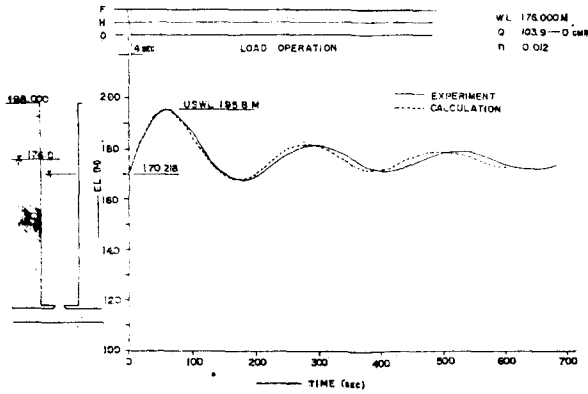


圖 6.1 Surging 條件(I)

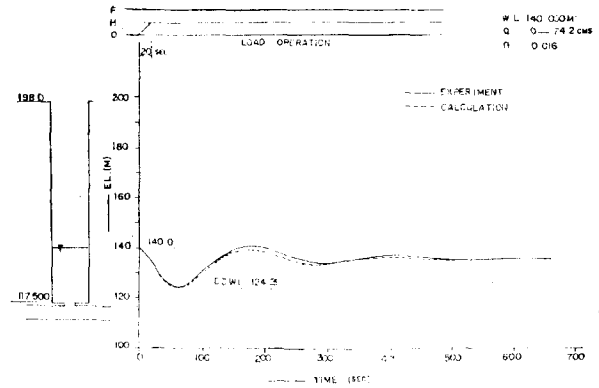


圖 6.4 Surging 條件(IV)

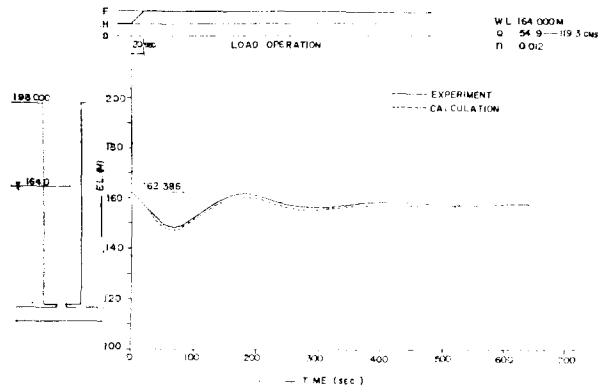


圖 6.2 Surging 條件(II)

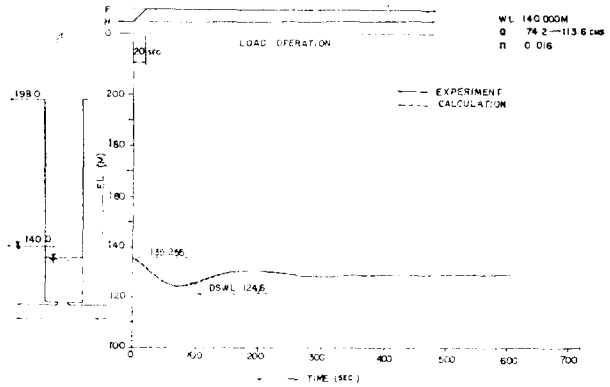


圖 6.5 Surging 條件(V)

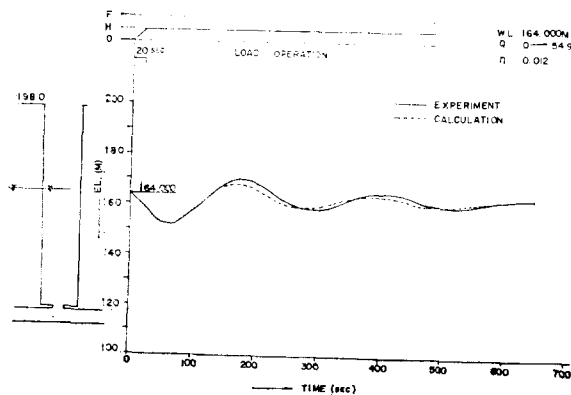


圖 6.3 Surging 條件(III)

5) 實驗値와 計算値를 比較檢討해 온 結果, 表 6.1 및 圖 6.1~圖 6.5에서 보는 바와 같이, 全體의 으로 잘 一致하고 있으나, Surge의 周期面에서 보면 實驗値가 多少 길어져서 세번째 波峰에서는 10sec程度 差異가 發生하고 있으며, 이는 模型製作上 誤差와 實驗誤差에 基因한다고 思慮된다.

7. 結 論

本 研究는, 制水口式 調壓水槽內 Surging의 發生時 그 追跡方法에 대해서 模型實驗과 數値解析을 통해 比較分析한 것으로 다음과 같은 事項들을 確認하였다.

- 1) 模型實驗 計劃부터 結果까지 全 過程의 흐름을 鳥瞰하여 보았다.
- 2) gate shaft의 斷面積과 取水口에서부터 gate shaft

表 6.1 實驗值와 計算值의 比較

案	區 分	Ist	Surge	2nd	Surge	3rd	Surge
		T	H	T	H	T	H
1	M	60	195.8	180	168.0	290	182.0
	C	58	195.8668	176	167.9277	286	182.3054
2	M	64	148.5	180	161.8	300	156.0
	C	68	147.3003	182	160.1159	296	154.7434
3	M	60	152.0	178	170.2	292	158.8
	C	60	151.6097	174	168.3560	284	158.9481
4	M	63	124.3	180	141.0	300	134.0
	C	62	124.0597	178	139.4715	292	133.3970
5	M	66	124.6	190	530.51	300	128.7
	C	76	124.1611	194	130.3213	310	128.3999

단, 여기서 M:測定值
C:計算值

까지 距離가 調壓水槽의 斷面積과 gate shaft에서 調壓水槽까지 距離에 비해 相當히 작은 複式調壓水槽의 境遇 單動으로 간주하여 數值計算을 하더라도 實驗值와 計算值間의 差異가 거의 없었다.

3) 模型實驗值와 數值計算值가 全體的으로 잘 一致하고 있다. 따라서, 水理實驗과 數值實驗이 相互補充補完하는 關係가 있지만, 축박한 工期와 豫算上의 어려움이 있는 境遇 및 陝川湄 調壓水槽처럼 比較的 單純型인 境遇에는 Runge-Kutta-Gill의 方法에 의한 數值解析에 의해 實施設計를 하어도 無妨하다고 思慮된다.

<參 考 文 獻>

1. Streeter & Wylie, Fluid Mechanics, McGraw Hill, Ch. 12 pp. 629-647.
2. Wen-Hsiung Li, Differential Eqs. of Hydraulic Transients, Dispersion and Ground Water Flow, Prentice-Hall, Inc. Ch. 1 pp. 1-37.
3. P. Novak, J. Cabelka, Models in Hydraulic Engineering, Pitman, 1981, pp. 100 pp. 106.
4. KUO, Computer Applications of Numerical Methods, Addison Wesley Publishing Co. Inc., 1972, Ch.7 pp. 142-145.
5. Carnahan, Luther, Wilkes, Applied Numerical Methods, John Wiles & Sons, Inc., 1969, Ch.6, pp. 361-362.
6. Durand, W., Application of the law of Kinematic Similitude to the Surge Tank Problem, Mech. Engineering, 1921, pp.43.
7. Haindl, K., Mechanical Similarity of Surge Tank Models, Vodni-hospodarstvi, No.9, pp. 241-242.
8. Novak, P., Water Hammer and Surge Tanks 2nd Edn, IHE, Delft, 1977.
9. Wisner, P. and Bratosin, D., Study of Surge Tanks with a Diagram, Hidrotechnica, No.1, 1960, pp.9-12.
10. Jaeger, Ch., Contribution to the Stability Theory of Systems of Surge Tanks, ASME, Vol.80, 1958.
11. 國立建設研究所, 昭陽江湄 水理模型實驗報告書, 1970, pp. 46-64.
12. Nippon Koei Co. Ltd., Chongpyong Pumped-Storage Power Project; Report on Hydraulic Model Test, 1976.
13. 國立建設試驗所, 陝川湄 水理模型實驗報告書 1983, No.436.
14. 安守漢, 水理學, 交運堂, 1977, pp. 336-337.
15. 本間仁, 物部水理學, 岩波書店, ch. 19.
16. 日本土木學會編, 水理公式集, pp. 256, pp. 322-340, pp. 337-339.
17. 千秋信一, 信發電力演習, 學獻社, 1975, pp. 293.
18. 千秋信一, 秋元 保, 複式 Surge Tank 水路系の

- 研究, 電力中央研究所, 技術研究所報, 第11卷 第5, 6號, 1961.
19. 林泰造, 特殊調壓水槽의 水理에 關한 研究, 土木學會年次學術 講演概要, 1955.
 20. 電力中央研究所 技術研究所, Surge Tank 模型實驗의 相似版과 模擬水路系 試驗設備에 關한 研究, 技術研究所報告, 土木 59009, 1959.
 21. 電力中央研究所 技術研究所, 分水第一發電所 調壓水槽水理模型試驗報告書 技術研究所報告, 土木 54030, 1954.
 22. 電力中央研究所 技術研究所, 坂下發電所 調壓水槽水理模型試驗報告書 技術研究所報告書, 土木 55101, 1956.
 23. 電力中央研究所 技術研究所, 大森川發電所 Surge Tank의 水理模型實驗, 技術研究所報告, 土木 59008, 1959.
 24. 林泰造, 日本產業技術協會 技術研究所 水理實驗室, 岩手縣 仙人發電所 Surge Tank 水理模型實驗報告書, 1972.