

# 水壓調節水槽(Surge Tank)에 관한 研究

## A Study on the Surge Tank

南 宣 祐  
Nahm, Sun Woo

### Abstract

For the simplicity in the analytical solution, the simple surge tank has been chosen for the test where an unsteady flow is produced by suddenly closing the valve controlling the discharge. The valve is located immediately downstream from the surge tank. Momentum equations in the penstock and in the surge column are derived. The relationships between the time and the pressure are measured and recored on the oscillograph and then the calibration of surge column heights and scale readings on the oscillograph trace are made.

The diameter of the penstocks are determined by the trial and error method. The water levels in the surge column are computed by numerical integration of the differential equation of the surge tank. The relationships between the results from the experiment and numerical computation are figured, compared and discussed.

### §1. 序 論

壓力水路나 水壓管을 통해서 물을 水車에 보낼때 水車의 負荷가 急히 變하면 즉 Valve를 急히 閉하면 流量이 急히 變化하고 管內에는 水擊作用(Water hammer)이 일어난다.

本研究는 Valve를 急히 閉할 때 管內의 不定流에 關하여 考察하고자 한다. 水壓調節水槽에는 이러가지가 있으나 여기서는 試驗 및 解析을 간단히 하기 위하여 아주 간단한 水壓調節水槽(Surge Tank)를 利用하고자 한다. 이 Surge Tank는 Valve를 急히 閉할 때 流量의 變化로 不定流가 發生하도록 되어 있으며 Valve는 Surge Tank 바로 下流에 設置된다.

과 B點 사이에 있어서 다음과 같다.

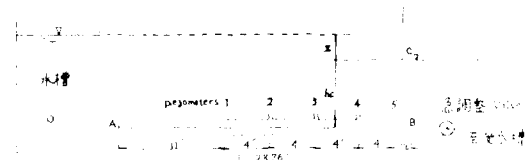
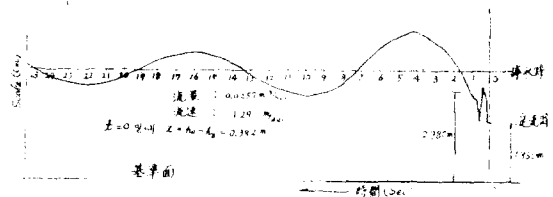


Fig. 1. 水壓調節 水槽 裝置 略圖



註 水溫=29.5°C  
停水時調壓水柱高:  $h_0=2.66$  m  
定流時調壓水柱高:  $h_B=2.278$  m

Fig. 2. 調壓水槽內的 壓力水頭變化圖

### §2. 壓力水路內的 運動量 方程式

壓力水路內的 流體기동의 線形運動量方程式은 A點

正會員·東國大學校 工科學士 土木科

— 1973. 3. 28 受理 —

$$\frac{\pi D^2}{4}(P_A - P_B) - \pi DL\tau_0 = \frac{\pi D^2}{4}\rho L \frac{dV}{dt} \dots (1)$$

여기서  $P_A$  및  $P_B$ 는 A點과 B點에 있어서의 壓力이고  $D$ 는 管徑이고  $L$ 는 壓力水路의 길이이며  $V$ 는 流速이고  $\tau_0$ 는 管壁의 剪斷應力度 즉

$$\tau_0 = \frac{f}{8}\rho V^2 \dots (2)$$

이다. (1)式에 (2)式을 代入하여 水頭  $h = \frac{P}{w}$ 로 表示하면

$$h_A - h_B - \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{fL}{D} = \frac{L}{g} \cdot \frac{dV}{dt} \dots (3)$$

와 같다.

### § 3. 調壓水槽內的 運動量方程式

調壓水槽內的 BC 水柱(물기둥)의 運動量方程式은

$$\frac{\pi D_B}{4}(P_B - O) - \frac{\pi D_B^2}{4}(wh_c - O) - \pi\tau_0 D_B L_B - \frac{\pi D_B^2}{4} \cdot \frac{\rho V^2}{2} K_B = \frac{\pi D_B^2}{4}\rho L_B \frac{dV_B}{dt} \dots (4)$$

이 式에서  $D_B$  및  $L_B$ 는 調壓水槽의 直徑 및 높이이고  $V_B$ 는 調壓水槽內的 流速이며  $K_B$ 는 B點에서의 굴곡과 擴大에 依한 저항 係數이다.

萬一  $K_B$ 가 直徑  $D$ 에서  $D_B$ 로 擴大함에 依해서 생기는 저항계수라고 한다면

$$K_B = \left[1 - \left(\frac{D_B}{D}\right)^2\right]^2 \dots (5)$$

이고 (4)式을 壓力水頭로 表示하면

$$h_B - h_C - \frac{V_B^2}{2g} \frac{f_B L_B}{D_B} - K_B \frac{V^2}{2g} = \frac{L_B}{g} \cdot \frac{dV_B}{dt} \dots (6)$$

이 式에서  $f_B$ 는 Darcy-Weisbach의 調壓水槽壁 저항계수이다.

### § 4. 水壓調節水槽의 方程式

水槽內的 水面高는 運動量 方程式(3) 및 (6)과 壓力水路內의 調壓水槽內的 連速方程式을 結合한 微分方程式에 依하여 表示할 수 있다. 壓力管水路의 入口에서의 水頭損失은 定流와 不定流에 對하여 同一하다고 假定하면 損失係數  $K_A$ 는 다음 式으로 表示된다.

$$h_A = h_0 - (1 + K_A) \frac{V^2}{2g} \dots (7)$$

여기서 (3), (6) 및 (7)式을 結合하면

$$h_0 = h_B - \left(1 + K_A + K_B + \frac{fL}{D}\right) \frac{V^2}{2g} - \frac{f_B L_B}{D_B} \cdot \frac{V_B^2}{2g} = \frac{L_B}{g} \frac{dV_B}{dt} + \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \dots (8)$$

壓力水路와 調壓水槽內的 連續方程式으로부터

$$V_B = \left(\frac{D}{D_B}\right)^2 V \dots (9)$$

(4)式을  $t$ 에 關하여 微分하면

$$\frac{dV_B}{dt} = \left(\frac{D}{D_B}\right)^2 \frac{dV}{dt} \dots (10)$$

(8)式에 (9) 및 (10)式을 代入하고  $h_0 - h_C = Z$ 로 表示하면

$$Z - \left[1 + K_A + K_B + \frac{fL}{D} + \frac{f_B L_B}{D_B} \left(\frac{D}{D_B}\right)^4\right] \frac{V^2}{2g} = \frac{L}{g} \left[L + \frac{L_B}{L} \left(\frac{D}{D_B}\right)^2\right] \frac{dV}{dt} \dots (11)$$

(9)式과 (10)式을 微増分形으로 表示하면 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$\Delta z = - \left(\frac{D}{D_B}\right)^2 V \Delta t \dots (12)$$

$$\Delta V = \frac{\frac{g}{L} \left\{ z - \left[1 + K_A + K_B + \frac{fL}{D} + \frac{f_B L_B}{D_B} \left(\frac{D}{D_B}\right)^4\right] \frac{V^2}{2g} \right\} \Delta t}{1 + \frac{L_B}{L} \left(\frac{D}{D_B}\right)^2} \dots (13)$$

### § 5. 試驗裝置

一定水頭를 유지할 수 있는 大容量의 水槽(貯水池), 2" 直徑의 鉛直管으로 된 壓力水路, 4.5" 直徑의 plastic 製 透明水槽, 壓力水路의 入口는 6"×2"의 圓錐形 漸縮小管으로 되고 調壓水槽는 4"×2"의 鑄鐵製 T字管으로 壓力水路에 連結된다. 또 gate valve는 調壓水槽 바로 下流에 設置한다. (Fig. 7 참조)

### § 6. 測定

定流일 때 測定한 값은 다음 表 1과 같다.

B點에서의 時間과 壓力 사이의 關係는 壓力計에 依

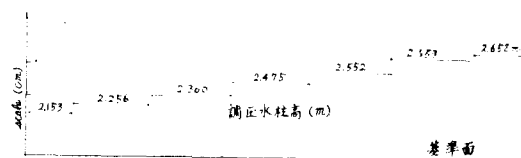


Fig. 3. 調壓水柱의 OSCILLOGRAPH

〈表-1〉

Item	單位	測定番號						
		1	2	3	4	5	6	7
Piezometer No. 1	cm	51.0	55.9	60.9	69.59	82.40	101.00	114.70
No. 2	cm	39.3	44.7	51.1	60.7	76.30	97.6	113.7
No. 3	cm	27.3	33.6	40.7	52.3	69.4	64.2	112.5
No. 4	cm	16.2	22.6	31.0	43.7	62.9	90.5	111.2
No. 5	cm		12.1	20.8	34.7	55.8	86.8	110.0
槽(池) 水 位	cm	121.5	121.5	121.5	121.5	121.5	121.5	121.5
水 溫	°C	29.5	30.1	30.3	30.5	30.5	30.6	30.6
最 初 重 量	kg	400	400	400	400	400	400	340
最 終 重 量	kg	500	500	500	500	500	500	400
時 間	Sec	21.3	22.1	22.8	24.85	29.35	40.7	44.3
		21.5	22.1	22.85	24.8	29.3	40.65	44.2
		21.2	22.05	22.9	24.75	29.3	40.75	44.35

하여 測定하여 Fig. 2 와 같이 oscillograph 에 記錄된다. 調壓水槽의 높이와 oscillograph 의 눈금은 Fig. 3 과 같이 表示된다.

§ 7. 計 算

1. 壓力水路의 管徑 決定

penstock(壓力水路)의 管徑은 定流일 때 다음(14) 및 (15)式에 依하여 求한다.

$$-\frac{dh}{dx} = \frac{f}{D} \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(14)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log Re \sqrt{f} - 0.08 \dots\dots\dots(15)$$

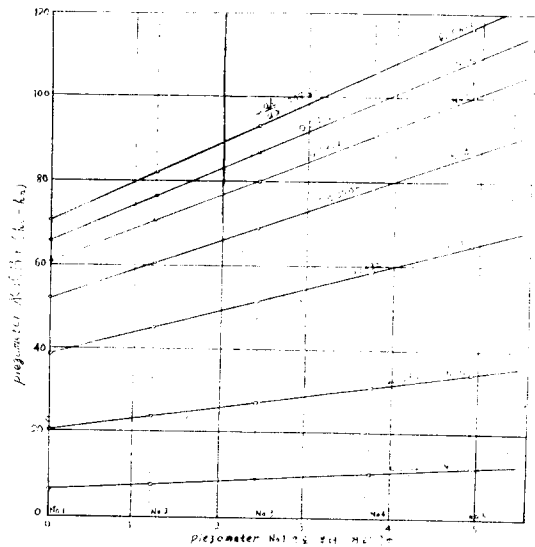


Fig. 4. PIEZOMETER 의 壓力水頭와 位置사이의 關係曲線圖

여기서  $\frac{dh}{dx}$  는 piezometer 의 壓力水頭勾配이고  $Re$  는 Reynold 數

$$Re = \frac{VD}{\nu} \dots\dots\dots(16) \text{ 이다.}$$

水槽(貯水池)와 壓力水路間의 任意位置에서 壓力水頭差  $h_0-h_n$  는 表-2 에 表示되어 있다. 變數  $h_0$  와  $h_n$  는 水槽(貯水池) 水位와  $n$  番 地點에서의 壓力水頭를 나타낸다.

Fig. 4 는 定流일 때 penstock 內의 壓力水頭의 勾配를 表示한다.

2. 第1測定時的 計算

第1 試算 :  $Q = \frac{\Delta W}{w \Delta t} = 0.00474 (m^3/sec)$

$D = 5.08 \text{ cm (假定)}$

$A = 0.00203 \text{ m}^2$

$V = \frac{Q}{A} = 2.334 \text{ m/sec}$

$Re = \frac{VD}{\nu} = 1.456 \times 10^5$

$f$  와  $Re$  의 關係는 Rouse 의 圖表(2)에서 求하였고 미끈한 管에서  $Re$  가  $1.456 \times 10^5$  일 때  $f$  의 값은 0.0167 이다.

〈表-2〉 Penstock 에 設置한 piezometer 의 壓力水頭 差( $h_0-h_n$ )

Piezometer No.	測定番號( $h_0-h_n$ ) (cm)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	70.5	65.6	60.6	52.0	39.1	20.5	6.8
2	82.2	76.8	70.4	60.8	45.2	3.9	7.8
3	94.2	87.9	80.8	69.2	52.1	27.3	9.0
4	105.3	98.9	90.5	77.8	58.6	31.0	10.3
5	—	109.4	100.7	86.8	65.7	34.7	11.5

第2試算：(14)式에서

$$-\frac{dh}{dx} = 0.0255Q^2 - \frac{f}{D^5} \dots\dots\dots(17)$$

이 (17)式에  $\frac{dh}{dx}$ ,  $Q$ ,  $f$ 를 代入하면

$$D = 5.031 \text{ cm}$$

또 이  $D$ 의 값을 利用하여  $f$ 를 檢算하면

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 0.002 \text{ m}^2$$

$$V = 2.37 \text{ (m/sec)}$$

$$Re = 1.471 \times 10^5$$

(15)式에 依하여  $f$ 의 값은  $f = 0.0167$ 을 얻을 수 있다.

그러므로 penstock의 直徑은  $D = 5.03 \text{ cm}$ 이다. 表-3은 各 경우에 對한 penstock의 直徑을 求한 計算結果이다. 이 結果에 依하여 penstock의 平均直徑은  $D = 5.06 \text{ cm}$ 이다.

貯水池(水槽)에서 penstock로 流入할 때 잃는 損失水頭는

$$He = h_0 - h_A - \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(18)$$

이제서 損失係數  $K_A$ 는

$$K_A = \frac{He}{V^2/2g}$$

$$Y_1 = (h_0 - h_1) - (h_0 - h_A)$$

$$Y_2 = Y_1 \times \frac{11}{12}$$

$$h_0 - h_A = (h_0 - h_1) - Y_2 \text{ 이다.}$$

$K_A$  및  $He$ 의 값을 求하긴 表-4와 같이 計算된다.

이제서  $K_A$ 의 平均値는 0.340임을 알 수 있다. Fig. 5에서  $B$ 點의 損失係數  $K_B = 0.646$ 이다.

### § 8. Penstock(壓力水路) 入口에서의 損失係數 決定

Fig. 5와 같이 piezometer의 水頭差( $h_0 - h_n$ )를 表示할 수 있다.

Fig. 5. 壓力水路內의 水頭傾斜線

<表-3>

Penstock(壓力水路)의 直徑

測定番號	水溫 °C	w (t/m <sup>3</sup> )	ΔW (kg)	Δt (sec)	Q m <sup>3</sup> /sec	$-\frac{dh}{dx}$	f	D (cm)
1	29.5	0.9944	100.25	21.25	0.0047	0.0968	0.0167	5.03
2	30.1	0.9942	100.25	22.1	0.0045	0.0912	0.0168	5.03
3	30.3	0.9941	100.25	22.85	0.0044	0.0812	0.0170	5.09
4	30.44	0.9940	100.25	24.8	0.0041	0.0705	0.0169	5.06
5	30.44	0.9940	100.25	29.3	0.0034	0.0536	0.0175	50.3
6	30.55	0.9940	100.25	40.7	0.0025	0.0280	0.0187	5.12
7	30.55	0.9940	60.15	44.3	0.0014	0.0102	0.0213	5.03

### § 9. 水壓調節水槽의 微分方程式의 數值積分

(12), (13)式을 積分하기 위한 物理量을  $K_A = 0.34$ ,  $K_B = 0.65$ ,  $L_B = 156.085 \text{ (cm)}$ ,  $f_B = 0.020$ 라 하면 (13)式에서

<表-4>

Penstock 入口에서의 損失係數

測定番號	Q (m <sup>3</sup> /sec)	V (m/sec)	Re	$\frac{V^2}{2g}$ (cm)	$h_0 - h_A$ (cm)	$h_0 - h_1$ (cm)	$Y_1$ (cm)	$Y_2$ (cm)	$h_0 - h_A$ (cm)	He (cm)	$K_A$
1	0.00474	2.356	$1.47 \times 10^5$	28.377	106.0	70.5	35.5	32.5	37.9	9.479	0.334
2	0.0045	2.265	$1.43 \times 10^5$	26.243	99.0	65.6	33.4	30.6	35.0	8.748	0.333
3	0.0045	2.185	$1.35 \times 10^5$	24.414	90.5	60.7	29.7	27.2	33.5	9.053	0.370
4	0.0041	2.018	$1.28 \times 10^5$	20.818	77.7	52.0	25.7	23.6	28.4	7.559	0.363
5	0.0034	1.707	$1.09 \times 10^5$	14.874	58.6	39.1	19.5	17.8	21.2	6.340	0.426
6	0.0025	1.244	$7.86 \times 10^4$	7.894	30.7	20.5	10.2	9.3	11.2	3.292	0.417
7	0.0014	0.677	$4.31 \times 10^4$	2.396	10.3	6.6	3.7	3.4	3.2	0.823	0.351

$$\frac{f_B L_B}{D_B} \left(\frac{D}{D_B}\right)^4 = 0.01$$

이 된다. 고로 (12) 및 (13)式은 各各

$$\Delta Z = -0.196 V \Delta t \dots\dots\dots (12a)$$

〈表 一5〉 調壓水柱의 水位計算表

① t	② V (m/sec)	③ ΔZ (m)	④ Z (m)	⑤ $Re = \frac{VD}{\nu}$	⑥ f	⑦ 173.2f	⑧ 2.0+⑦	⑨ $\frac{V^2}{2g}$	⑩ ⑧×⑨	⑪ Z-⑩	⑫ $\Delta V = \frac{0.54 \times ⑩}{m/sec}$
0	1,286	0	0.384	—	—	—	—	—	—	—	—
0.5	1,186	-0.125	0.259	$8.0 \times 10^5$	0.019	3.29	5.29	0.084	0.444	-0.185	-0.100
1.0	1,052	-0.116	0.143	$7.4 \times 10^5$	0.020	3.46	5.46	0.072	0.393	-0.250	-0.135
1.5	0.905	-0.104	0.039	$6.5 \times 10^5$	0.020	3.46	5.46	0.056	0.306	-0.267	-0.144
2.0	0.756	-0.088	-0.049	$5.6 \times 10^5$	0.020	3.46	5.46	0.042	0.229	-0.278	-0.150
2.5	0.601	-0.073	-0.122	$4.7 \times 10^5$	0.021	3.46	5.64	0.029	0.158	-0.280	-0.152
3.0	0.445	-0.058	-0.179	$3.7 \times 10^5$	0.022	3.81	5.81	0.018	0.105	-0.284	-0.153
3.5	0.293	-0.043	-0.223	$2.8 \times 10^5$	0.024	4.16	6.16	0.010	0.062	-0.286	-0.154
4.0	0.143	-0.027	-0.247	$1.8 \times 10^5$	0.026	4.51	6.51	0.004	0.026	-0.273	-0.147
4.5	-0.030	-0.015	-0.262	$8.9 \times 10^4$	0.032	5.54	7.54	0.001	0.008	-0.270	-0.146
5.0	-0.143	+0.000	-0.262	—	—	—	—	—	—	-0.262	-0.142
5.5	-0.274	+0.015	-0.247	$8.9 \times 10^4$	0.032	5.54	7.54	-0.001	-0.008	-0.239	-0.129
6.0	-0.378	+0.027	-0.219	$1.7 \times 10^4$	0.027	4.68	6.68	-0.004	-0.027	-0.192	-0.104
6.5	-0.451	+0.037	-0.183	$2.3 \times 10^4$	0.025	4.33	6.33	-0.007	-0.044	-0.139	-0.075
7.0	-0.491	+0.046	-0.137	$2.8 \times 10^4$	0.024	4.16	6.16	-0.010	-0.062	-0.075	-0.041
7.5	-0.506	+0.049	-0.088	$3.0 \times 10^4$	0.023	3.99	5.99	-0.012	-0.072	-0.016	-0.006
8.0	-0.485	+0.049	-0.039	$3.1 \times 10^4$	0.023	3.99	5.99	-0.013	-0.078	+0.039	+0.021
8.5	-0.441	+0.049	+0.009	$3.0 \times 10^4$	0.023	3.99	5.99	-0.012	-0.072	-0.081	-0.044
9.0	-0.381	+0.043	+0.052	$2.7 \times 10^4$	0.024	4.16	6.16	-0.010	-0.062	+0.114	+0.062
9.5	-0.308	+0.036	+0.088	$2.4 \times 10^4$	0.025	4.33	6.33	-0.007	-0.044	+0.132	+0.071
10.0	-0.227	+0.031	+0.119	$1.9 \times 10^4$	0.026	4.51	6.51	-0.004	-0.026	+0.145	+0.078
10.5	-0.143	+0.021	+0.140	$1.4 \times 10^4$	0.028	4.85	6.85	-0.003	-0.021	+0.161	+0.087
11.0	-0.055	+0.015	+0.155	$8.9 \times 10^3$	0.032	5.54	7.54	-0.001	-0.003	+0.163	+0.088
11.5	+0.034	+0.006	+0.162	$3.4 \times 10^3$	0.023	3.99	5.99	-0.003	-0.002	+0.164	+0.089
12.0	+0.119	-0.003	+0.158	$2.1 \times 10^3$	0.049	6.77	8.77	+0.000	—	+0.158	+0.085
12.5	+0.195	-0.012	+0.146	$7.4 \times 10^2$	0.033	5.72	7.72	+0.001	+0.008	+0.138	+0.075
19.5	—	-0.018	+0.128	$1.2 \times 10^4$	0.029	5.03	7.03	+0.002	+0.014	+0.114	+0.062

$$\Delta V = 1.079 \left[ Z - (2.00 + 173.2f) \frac{V^2}{2g} \right] \Delta t \dots\dots\dots (13a)$$

로 되며  $V=1,256$  m/sec,  $Z=38.41$  cm 가 初期值라 하면 (12a) 및 (13a)式에 依한 數值積分結果는 表一5와 같이 求해진다.

### § 10. 調壓水槽 水位測定値의 환산

調壓水柱의 높이를 測定하는 曲線과 記錄된 Scale 은 Fig. 3 에 있는 값을 plot 하여 Fig. 6 을 얻을 수 있다. Fig. 2 에 表示한 바와 같은 壓力이 調節되는 동안 水柱의 記錄水位는 Fig. 6 을 使用하여 表一6 과 같이 求해진다.

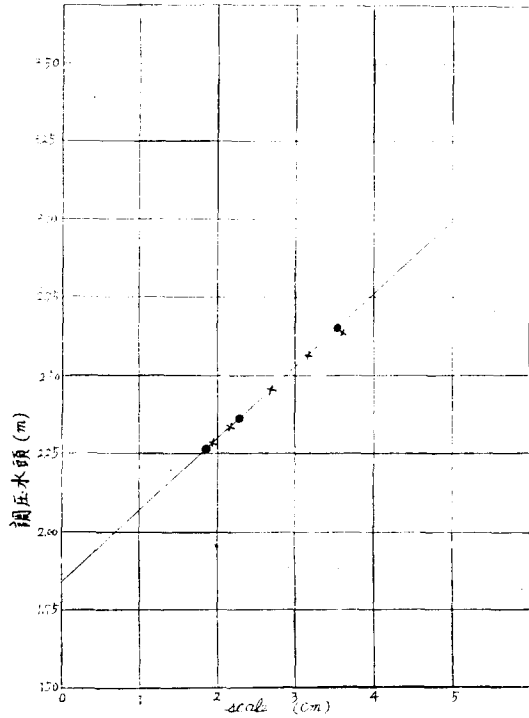


Fig. 6. Oscillograph의 Scale과 調壓水柱高 사이의 關係

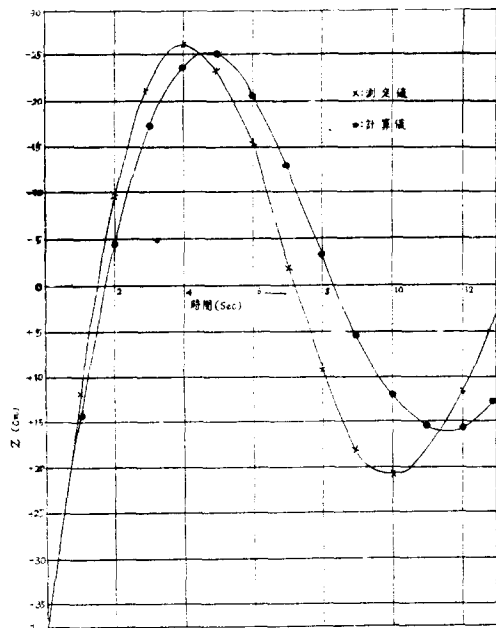


Fig. 7. 調壓水調內水頭의 測定値와 計算値의 曲線

〈表—6〉 -Oscillograph와 Calibration  
곡선에 의한 調壓水柱의 水位

時 間 (sec)	Fig. 2 의 Scale (cm)	水 柱 高 (m)	Z (m)
0	1.86	2.28	+0.38
1	2.98	2.54	+0.12
2	3.99	2.76	-0.10
3	4.46	2.88	-0.22
4	4.65	2.93	-0.27
5	4.54	2.90	-0.24
6	4.14	2.82	-0.16
7	3.60	2.68	-0.02
8	3.06	2.57	+0.09
9	2.72	2.48	+0.18
10	2.58	2.45	+0.21
11	2.70	2.48	+0.18
12	3.00	2.545	+0.115
13	3.38	2.635	+0.025
14	3.37	2.725	-0.065
15	3.28	2.775	-0.115
16	4.05	2.79	-0.13
17	3.26	2.77	-0.11
18	3.75	2.72	-0.06
19	3.47	2.665	-0.05
20	3.20	2.59	+0.07
21	3.00	2.545	+0.115
22	2.96	2.53	+0.13
23	3.05	2.565	+0.095
24	3.23	2.60	+0.06
25	3.47	2.665	-0.005
26	3.70	2.71	-0.05
27	3.82	2.735	-0.075
28	3.85	2.74	-0.08

### § 11. 結 言

微分方程式 (13)에서 表示한 바와 같이 저항과 質量에 의한 Energy 量이 計算에 포함되었기 때문에 Fig. 7에 表示한 計算結果를 나타내는 曲線과 實驗結果를 나타내는 曲線이 正確히 一致하지 않는다. 이는 저항과 質量에 의한 Energy 量이 지나치게 推定되었다고 볼수 있다.

萬約調壓水調內의 저항  $K_F \frac{v^2}{2g}$ 을 생략하고 質量項,  $1+L_B/L(D/D_B)^2=1.03$ 을 1로 갈소시키면 좀더 實驗結果와 一致 할수 있었을 것이다.

調壓水柱內의 저항과 質量에 의한 Energy는 實際應用分野에서는 一般으로 생략된다.

測定장치는 비교적 精確했다고 보나 調壓水柱가 壓

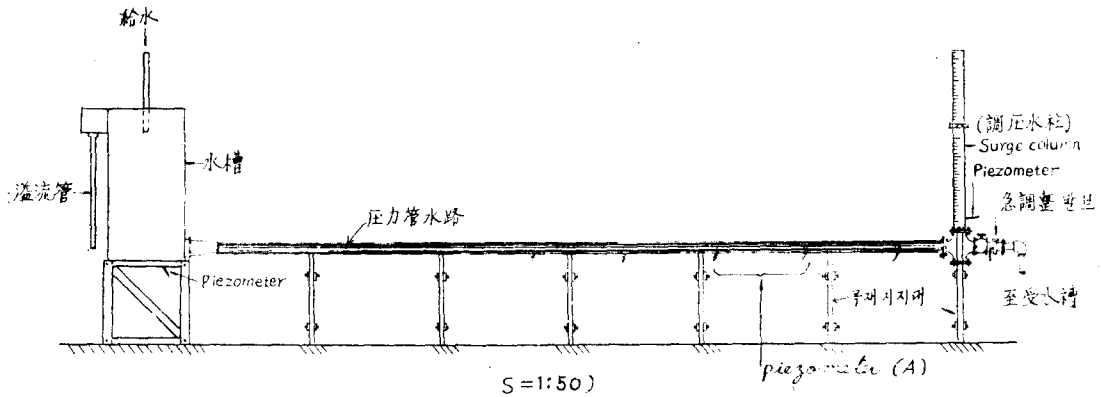


Fig. 8. 實驗裝置一般圖

力水路에 連結된 곳에 일어나는 不等流를 피하도록 Piezometer를 移動시켰으면 좀더 確實한 實驗結果를 얻지 않았나 한다.

參 考 文 獻

1. 水理學：安守漢 著 pp 350~387.
2. Engineering Hydraulics: By Rause Hunter pp 459~468
3. Surge Tank Stability By phase plane Method: By M. Hanif. Chaudhry (1971)
4. The Stability of Surge Tanks: By Paynter, H. M. (1949)
5. Surge and water hammer problems: By Paynter, H.M. (1953)
6. 發電水力工學：金麗澤，崔榮博 共著
7. Hand book of Applied Hydraulics: By Davis, Sorensen. pp 28-1~28-34.
8. 水理公式集 (1971)；日本土木學會

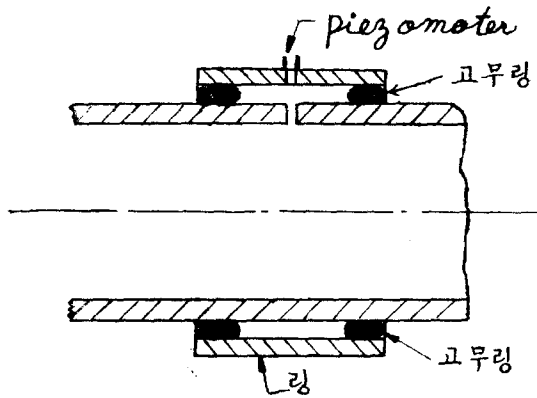


Fig. 9. Piezometer (A) 詳細圖