

댐 안전관리를 위한 조압수조의 규모 결정

Determination of Surge Tank Scale for Dam Safety Management

이 호 진*

Lee, Ho Jin

Abstract

Phenomena of hydraulic transient such as water hammer should be analyzed to design the pipeline systems effectively in dam. Surge tanks generally are used to reduce change in pressure caused by hydraulic transient from load changes on the turbines. In this study, the appropriate scale of surge tank with chamber is investigated for dam safety management. The variation of water level in the surge tank are computed using governing equation. Using the Thoma-Jaeger's stability condition, static and dynamic stability are investigate for the cases of flood water level, normal high water level, rated water level and low water level. Finally appropriate diameters of shaft and chamber are determined in the surge tank with chamber.

요 지

댐에서 관로 시스템을 효과적으로 설계하기 위해서는 수격작용과 같은 과도수리현상을 해석해야 만 한다. 일반적으로 조압수조는 터빈의 부하변화에 의한 과도수리현상에 의해 발생하는 압력의 변화를 감소시키기 위해서 사용된다. 본 연구에서는 댐 안전관리를 위한 조압수조의 적정규모를 조사하였다. 지배방정식을 이용하여 조압수조 내 수위변동을 계산하였다. Thoma-Jaeger의 안정조건을 사용하여 홍수위, 상시만수위, 정격수위, 저수위인 경우에 정적안정조건과 동적안정조건을 검토하였다. 끝으로 조압수조의 수직갱과 수실의 적정 지름을 결정하였다.

Keywords : Surge tank, Water hammer, Thoma-Jaeger' stability condition, Dam

핵심 용어 : 조압수조, 수격작용, Thoma-Jaeger의 안정조건, 댐

* 정회원, (주)에이피테크 기술이사

E-mail : lhjce@hanmail.net 041-868-7224

•본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2007년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

관수로 내를 흐르는 유체가 갑자기 정지하게 되면, 유체 운동에너지의 변화가 유발되고, 그로 인해 관내에 급격한 압력의 상승이 일어나게 된다. 반대로 정지하고 있던 유체가 빠른 속도로 흐르게 되면 압력감소가 급격하게 발생한다. 이와 같이 유체 운동 상태의 급변에 의한 압력변화와 그에 따른 압력파가 음속의 속도로 상·하류로 전파되는 현상을 수격작용(water hammer)이라 한다(한국수자원학회, 1998).

이러한 수격현상을 이론에 기초해서 체계화하고 수격현상에 관한 일반이론을 제시한 사람은 Allievi (1903)이다. 수격작용에 관한 그의 이론과 차트를 이용한 해법은 컴퓨터에 의한 수치해석기법이 소개되기까지는 보편적으로 사용되어 왔다. 1950년대부터 시작된 컴퓨터의 출현은 수격현상의 연구 분야에도 많은 영향을 주어 60년대 초부터 특성법에 의한 차분방정식의 수치해석이 본격화 되었다.

1960년대에서 1970대의 수격현상에 관한 연구는 원자력발전소의 냉각수 순환장치에서의 과도수리현상에 관한 연구가 주류를 이루었다. 그 결과 관에서의 물이나 기름 같은 액체만의 흐름에 관한 해석보다 훨씬 복잡한 물과 수증기, 물과 고체입자 등의 흐름과 같은 혼상류의 수격현상에 관한 연구가 크게 진전되었다.

노재화 등(1984)은 모형실험을 통하여 조압수조 내의 수위변동을 측정하였고, 수치해석을 통하여 서징을 추적함으로써 조압수조의 안정성을 검토하였다. Parmakian(1985)은 발전소와 양수장에서의 수주분리현상을 연구하였다. 우효섭 등(1989)은 단면이 급축소 되는 관에서 액체의 급속한 채움에 의한 수격현상을 연속방정식, 운동량방정식 그리고 에너지 방정식을 이용하여 해석적으로 풀이하였고, Bergant and Simpson(1995)은 수주분리영역의 실험적해석과 이론적해석을 하류 차단밸브의 급폐쇄에 적용하여 관에서의 수주분리방정식의 일반적인 형태를 제기하였다. 이재수 등(1995)은 가상적인 관망에 공기실을 적용하여 공기실의 공기부피, 위치 면적, 오리피스에서의 손실계수 등을 분석하였다.

수격작용은 구조물을 파괴시킬 수 있을 정도의 엄청난

양의 에너지를 포함하고 있으므로 수격작용에 대한 정확한 해석은 대형관로 시스템을 안전하게 설계하고 유지관리하기 위해서 반드시 필요하다.

따라서 본 연구에서는 대표적인 대형 수공구조물인 댐의 도수로에서 발생하는 수격작용을 제어하는 수실을 갖는 조압수조(surge tank)에 대해 고찰하였다.

여러 가지 제한 조건에 대하여 수격작용에 대해 안정여부를 판단하였다. Thoma-Jaeger의 안정조건을 이용하여 홍수위(FWL), 상시만수위(NHWL), 정격수위(RWL), 저수위(LWL)에 대한 정적 안정상태를 살펴보았다. 여기서, 정격수위는 발전기 용량을 결정하는데 사용되는 수위이다. 정적안정 해석결과를 바탕으로 설계조건에 따라 조압수조의 동적 안정에 대한 검토를 수행하였다. 수실식 조압수조에 대하여 부하가 급변하는 경우의 수위변화 양상을 고찰하였다. 또한, 조압수조의 적정 규모를 수직갱(shaft) 단면적을 조절하는 경우, 상부 수실 단면적을 조절하는 경우, 조압수조 상부수실 높이를 조정하는 경우의 3가지 조건에 대하여 검토하였다.

2. 지배방정식과 안정조건

2.1 지배방정식

관수로 흐름의 기본방정식인 운동방정식과 연속방정식을 유도하기 위해 Fig. 1과 같은 펌프나 수차가 설치된 전형적인 조압수조 시스템을 고려하였다. 펌프와 수차의 부하용량 변화는 관수로 내의 흐름변동을 일으키고 이것은 조압수조 내의 수면 진동을 가져온다(강주복, 1999).

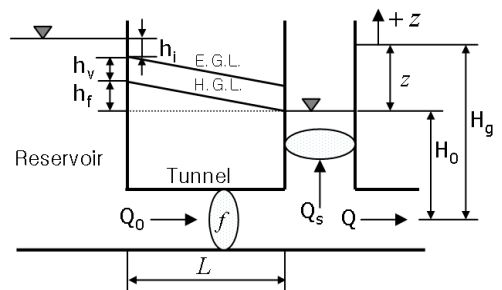


Fig. 1 조압수조의 개략도

2.1.1 운동방정식

수면변동의 운동방정식을 유도하기 위해 Fig. 2와 같은 자유물체도를 생각한다.

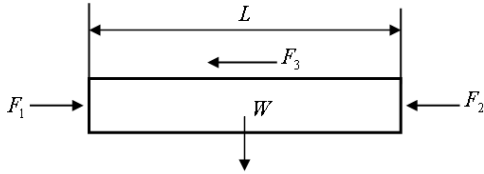


Fig. 2 자유물체도

힘들의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$F_r = F_1 - F_2 - F_3 \quad (1)$$

F_1 은 저수지 총 수두에서 입구 손실과 속도수두 손실을 제외한 수두에 의한 힘으로 다음과 같다.

$$F_1 = \gamma f(H_g - h_i - h_v) \quad (2)$$

여기서, γ 는 단위중량, f 는 도수로의 단면적, H_g 는 저수지 수위, h_i 입구손실, h_v 는 속도수두 이다.

F_2 는 부하량 변화에 의해 조압수조 내 수위변화가 일어날 때 발생하는 힘으로 다음과 같다.

$$F_2 = \gamma f(H_g - z) \quad (3)$$

여기서, z 는 조압수조 내의 수위변화이다. F_3 는 마찰에 의해 발생하는 힘으로 다음과 같다.

$$F_3 = \gamma f h_f \quad (4)$$

여기서, h_f 는 마찰손실수두 이다.

위 식들을 식(1)에 대입하여 합력 F_r 을 구하면 다음과 같다.

$$F_r = \gamma f(z - h_i - h_v - h) \quad (5)$$

도수로 내를 흐르는 물의 운동량의 시간변화율과 힘의 관계를 이용하면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\frac{dQ_0}{dt} = \frac{\gamma f}{L}(z - h_i - h_v - h) \quad (6)$$

수로에서 발생하는 전 손실수두를 흐름의 역방향을 고려하여 나타내면 다음과 같다.

$$h = h_i + h_v + h_f = cv|v| \quad (7)$$

여기서, c 는 수로의 전 손실수두를 h 로 표현할 때 사용되는 계수이다.

위 식을 식(6)에 대입하고 정리하면 조압수조가 설치된 관수로에서의 흐름의 운동방정식을 얻는다.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{z - cv|v|}{L/g} \quad (8)$$

2.1.2 연속방정식

Fig. 1에서 도수로와 수조의 접합부에서 질량보존 법칙을 생각하면 다음 식을 얻는다.

$$Q_0 + Q_s = Q \quad (9)$$

수조의 유량은 $Q_s = F(dz/dt)$ 의 관계를 갖고 도수로 내의 유량은 $Q_0 = fv$ 이므로 이것을 위식에 대입하면 조압수조가 설치된 관수로에서의 흐름의 연속방정식을 얻는다.

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q - fv}{F} \quad (10)$$

여기서 F 는 조압수조 수실의 단면적을 나타낸다.

2.2 수면진동의 안정조건

조압수조는 운전 중에 생긴 수위의 진동이 감소되어

항상 평형상태로 복원할 수 있는 안정성을 가져야 한다. 앞에서 구한 연속방정식과 운동량방정식에 미소진폭과 이론을 적용하면 다음과 같은 상수계수를 갖는 2계 상미분 방정식을 얻는다.

$$\frac{d^2 z'}{dt^2} + \frac{4\pi}{T} \cdot \frac{h_0}{z_*} \left(1 - \frac{fL}{2cgH_0 F}\right) \frac{dz'}{dt} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{1}{H_0} (H_g - h_0) z' = 0 \quad (11)$$

여기서, 아래첨자 '0'는 정상상태(steady state)의 값을 ' '는 정상상태에서 벗어난 값을 나타내고, h_0 는 정상상태일 때 손실수두 이다.

위 식을 다음과 같은 상수계수를 이용하여 정리한다.

$$b = \frac{2\pi}{T} \frac{h_0}{z_*} \left(1 - \frac{fL}{2cgH_0 F}\right) \quad (12)$$

$$q = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{1}{H_0} (H_g - 3h_0) \quad (13)$$

위에 정의된 상수계수를 이용하여 식(11)의 해를 구하면 다음과 같다.

$$z' = e^{-bt} (K_1 e^{\sqrt{b^2 - qt}} + K_2 e^{-\sqrt{b^2 - qt}}) \quad (14)$$

위의 계수식에서 $b > 0$, $q > 0$ 일 조건을 구하면 다음과 같은 Thoma의 안정조건을 구할 수 있다.

$$h_0 < \frac{H_g}{3} \quad (q > 0) \quad (15)$$

$$F > \frac{fL}{2cgH_0} \quad (b > 0) \quad (16)$$

Thoma의 미소진폭에 대한 안정조건을 큰 진폭에 대해서 확장한 것이 Jaeger의 안정조건으로서 식(17)은 정적 안정조건을 식(18)은 동적 안정조건을 나타낸다.

$$h_0 < \frac{H_g}{6} \quad (17)$$

$$F > \left(1 + 0.482 \frac{z_*}{H_g}\right) \frac{fL}{2cgH_0} \quad (18)$$

그러나 상당히 큰 진폭을 가정한 Jaeger 안정 조건을 그대로 따르는 것은 결국 안전율을 너무 크게 하는 경우에 해당하므로 비실용적이 된다. 따라서, 일본토목학회에서는 실용적인 계산을 위해 다음과 같은 식을 제안하고 있다(日本土木學會, 1985).

$$h_0 < \frac{H_g}{3} \left(\frac{1}{1 + \frac{z_m - h_0}{H_g - h_0}} \right) \quad (19)$$

2.3 최고 상승수위

부하 변화에 따른 최고 상승수위를 계산하기 위하여 Frank-Schüller 식을 이용하였다.

$$e^{\frac{2(x_m - x_c)}{\epsilon_c}} = \frac{1 + \frac{2x_m}{\epsilon_c}}{1 - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_c} [1 - e^{\frac{2(x_c - 1)}{\epsilon_s}}]} \quad (20)$$

여기서, x_m 은 z_m/h_0 , z_m 은 최고 상승수위, x_c 는 z_c/h_0 , z_c 는 기준 수위에서 상부수실 바닥까지의 거리(m), ϵ_c 는 수실식 조압수조 내의 물의 위치에너지에 대한 도수로 내의 물의 위치 에너지를 나타낸다.

2.4 수면변동의 수치계산

지배방정식 식(8)과 식(10)을 수치적분함으로서 수조 내에서의 부하변동에 의해서 발생한 수위의 진동이 시간이 경과됨에 따라 감소 되는지를 검토할 수 있다.

식(8)과 식(10)은 일반적으로 다음과 같은 연립 1계 상미분 방정식으로 표현된다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \phi(z, v, \dots, ; t) \\ \frac{dv}{dt} &= \psi(z, v, \dots, ; t) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

위 식을 Runge-Kutta 법을 이용하여 수치적분을 수행하면 $t=t_0$ 일 때 $z=z_0$, $v=v_0$ 가 되는 z , v 의 값을 알고 있을 경우에는 $t_1=t_0+\Delta t$ 일 때 z , v 의 값은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= z_0 + \Delta z \\ v_1 &= v_0 + \Delta v \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

위 식에서는 Δz 와 Δv 는 Runge-Kutta 법에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \Delta z &= \frac{1}{6} [(\Delta z)_1 + 2(\Delta z)_2 + 2(\Delta z)_3 + (\Delta z)_4] \\ \Delta v &= \frac{1}{6} [(\Delta v)_1 + 2(\Delta v)_2 + 2(\Delta v)_3 + (\Delta v)_4] \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

이와 같은 방법으로 지배방정식을 시간에 대해 적분하여 수위변동 곡선을 추적할 수 있다.

3. 계산결과 및 고찰

본 연구에서는 발전소 용량변경에 따라 조압수조규모를 조정해야 하는 용담댐을 그 적용대상으로 선정하였다. Fig. 3과 같이 수실을 갖는 조압수조에 대해 도수로 내에서 일어나는 수격현상을 고찰하고, 그림에서 제시된 각각의 수위에 대해서 조압수조의 정적안정과 동적안정을 검토하였다.

그 결과를 이용하여 수조의 규모를 결정하고, 이 때 발생 가능한 최고 상승수위를 계산하여 조압수조의 수실을 월류하는 흐름의 발생여부를 함께 고찰하였다.

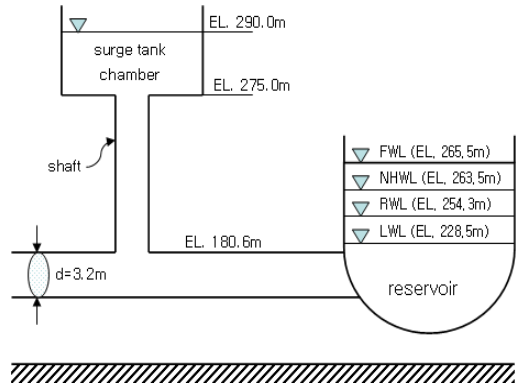


Fig. 3 용담댐 조압수조 제원 및 수위

3.1 수면진동의 안정성 검토

조압수조는 운전 중에 생긴 미소한 수위의 진동이 항상 평형상태로 복원할 수 있는 안정성을 갖아야 한다. Table 1은 본 연구에서 사용된 값들로서 저수지 모의운영과 수리계산을 통해서 얻어진 것이다(한국수자원공사, 1996).

Table 2는 각각의 경우에 따른 정적안정 해석결과를 나타낸 것으로서 결과에서 알 수 있는 바와 같이 저수지 수위가 정격수위인 경우와 저수위인 경우에 하강시 Jaeger의 안정조건을 만족시키지 못하고 있다.

그러나 Jaeger의 안정조건이 최고 상승수위가 총낙차 크기까지 발생할 수 있다고 가정하고 유도한 것임으로 상당히 과대평가가 되었다고 볼 수 있다. 또한, 일본토목학회에서 제시한 실용식으로 검토한 결과가 모든 경우에 대해서 정적으로 안정한 결과를 보이므로 조압수조의 정적안정에 대해서는 문제가 없는 것으로 판단된다.

Table 1 용담댐 수위별 수문량

Reservoir head (EL. m)	Discharge (m ³ /sec)	Head loss(m)		Velocity (m/sec)	Loss coefficient (contain velocity loss)	
		Up surging	Down surging		Up surging	Down surging
265.5 (FWL)	15.66	16.11	25.02	1.947	4.25	6.60
263.5 (NHWL)	15.95	16.71	25.95	1.983	4.25	6.60
254.3 (RWL)	17.62	20.41	31.67	2.191	4.25	6.60
228.5 (LWL)	16.27	17.41	27.00	2.023	4.25	6.60

Table 2 정적안정조건 계산결과

(unit : m)

Reservoir head	Total drop	Surging condition	Head loss	H/3~H/6	Practical formula	Stability	Remark
265.5(FWL)	185.8	Up	16.11	61.93~30.97	59.35	Stable	
265.5(FWL)	185.8	Down	25.02	61.93~30.97	56.84	Stable	
263.5(NHWL)	183.8	Up	16.71	61.26~30.63	59.61	Stable	
263.5(NHWL)	183.8	Down	25.95	61.26~30.63	56.14	Stable	
254.3(RWL)	174.6	Up	20.41	58.20~29.10	54.91	Stable	
254.3(RWL)	174.6	Down	31.67	58.20~29.10	52.72	Unstable	*
228.5(LWL)	148.8	Up	17.41	49.60~24.80	46.79	Stable	
228.5(LWL)	148.8	Down	27.00	49.60~24.80	43.51	Unstable	*

Table 3 동적안정조건 계산결과

(unit : m)

Reservoir head	Total drop	Q (m ³ /sec)	Head loss	F_s	F_c	ϕF_c	Stability
265.5(FWL)	185.8	15.66	16.11	14.66	14.55	4.30	Stable
265.5(FWL)	185.8	15.66	25.02	9.96	10.34	3.63	Unstable
263.5(NHWL)	183.8	15.95	16.71	14.89	14.85	4.35	Stable
263.5(NHWL)	183.8	15.95	25.96	10.14	10.59	3.67	Unstable
254.3(RWL)	174.6	17.62	20.41	16.13	16.49	4.58	Unstable
254.3(RWL)	174.6	17.62	31.67	11.21	12.07	3.92	Unstable
228.5(LWL)	148.8	16.27	17.41	18.93	19.35	4.96	Unstable
228.5(LWL)	148.8	16.27	27.00	13.15	14.17	4.25	Unstable

Table 3은 동적 안정조건을 이용하여 각각의 경우에 대한 수조의 동적 안정성을 검토한 것이다. Table 3에서 F_s 는 수면변동이 진폭이 미소하다고 생각한 Thoma의 안정조건을 이용하여 구한 수직갱의 수평단면적에 20%의 안전율을 고려한 값이고, F_c , ϕF_c 는 수면변동의 진폭이 큰 경우에 적용되는 Jaeger의 동적 안정조건으로 결정된 수평단면적과 지름을 나타낸다.

수조가 동적으로 안정되기 위해서는 모든 경우에 $F_s > F_c$ 인 관계가 유지되어야 하지만 결과에서 알 수 있는 바와 같이 홍수위와 상시만수위 일 때 상승인 경우를 제외하고는 동적으로 불안정한 것으로 판정되었다. 따라서 동적안정 조건을 만족시키기 위해서는 수직갱의 지름을 5.0m 이상으로 해야함을 알 수 있다.

수직갱의 지름을 5.0m, 수실의 지름을 10m로 가정하고 각 수위별로 수위의 진동이 시간이 경과함에

따라 효과적으로 감소되는지를 수치계산을 통하여 검토하였다.

Fig. 4~Fig. 7은 각 수위에 대하여 부하 급차단에 의해 상승 서징이 발생할 때 수위변동을 도시한 것이고, 그림에서 가로축은 수위변동곡선을 추적한 경과시간을 나타내고, 세로축은 시간에 따라 변하는 수위를 나타낸다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 상승 초기에는 수위변동이 매우 크지만 시간이 경과됨에 따라 수위 변동폭이 급격히 감소함을 알 수 있다. 또, 수실이 설치된 구간 EL. 275m 이상에서는 수실의 영향으로 수위변동곡선이 완만해 짐을 알 수 있다.

따라서, 수직갱의 지름을 5m 이상으로 취할 경우에 조압수조 내에서 상승 서징에 의해서 발생하는 수위변동은 시간에 따라 감소되어 수위변동에 대해서는 안정적임을 알 수 있다.

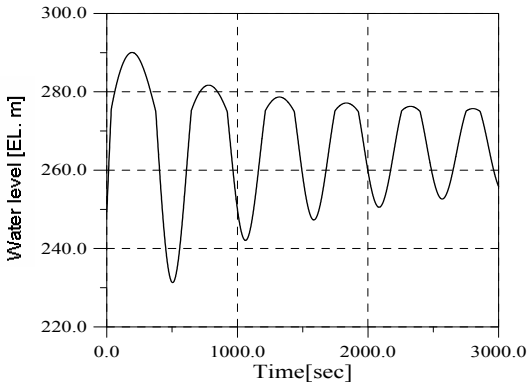


Fig. 4 홍수위 일 때 상승서징에 의한 수위변동

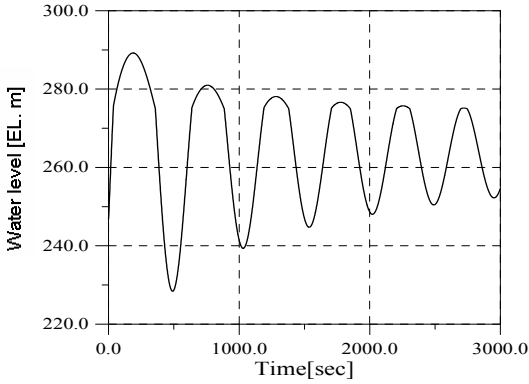


Fig. 5 상시만수위 일 때 상승서징에 의한 수위변동

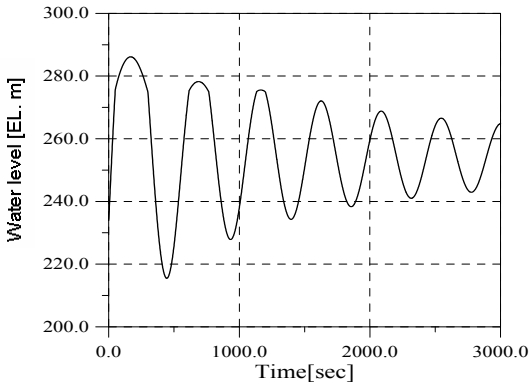


Fig. 6 정격수위 일 때 상승서징에 의한 수위변동

Fig. 8~Fig. 11은 부하 급증에 의한 하강 서징에 의해서 발생하는 수위 변동곡선을 각 수위에 대해서 도시한 것이다.

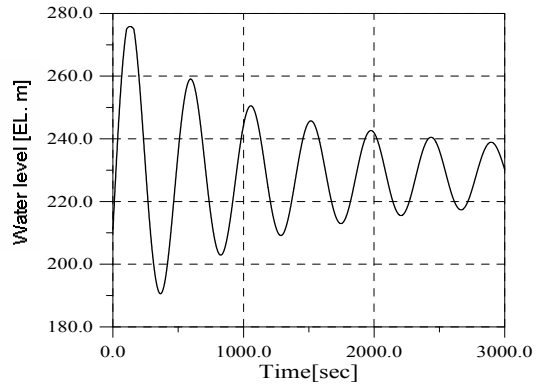


Fig. 7 저수위 일 때 상승서징에 의한 수위변동

Fig. 8~Fig. 11에 나타난 바와 같이 하강서징이 발생한 초기에는 수위가 급격히 하강하지만, 일단 수위 회복이 일어난 후에는 수위 변동이 감소하며 안정 상태를 유지함을 알 수 있다.

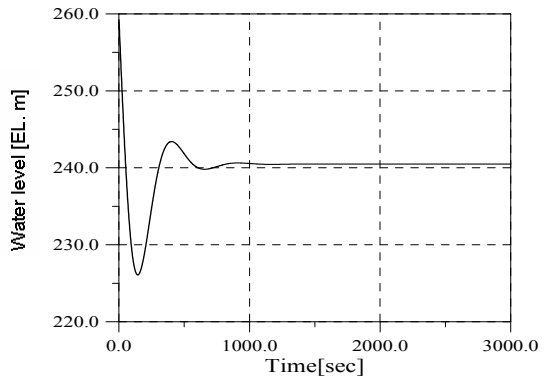


Fig. 8 홍수위 일 때 하강서징에 의한 수위변동

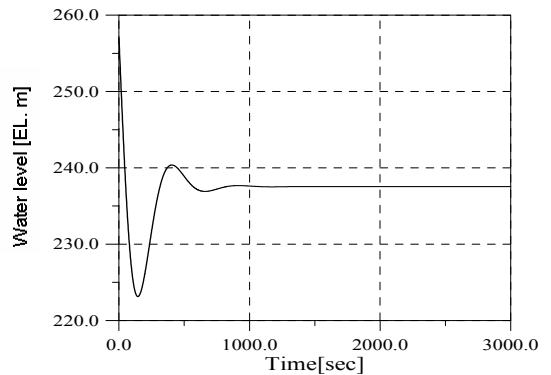


Fig. 9 상시만수위 일 때 하강서징에 의한 수위변동

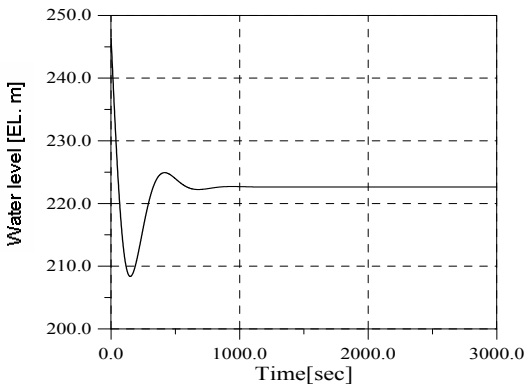


Fig. 10 정격수위 일 때 하강서징에 의한 수위변동

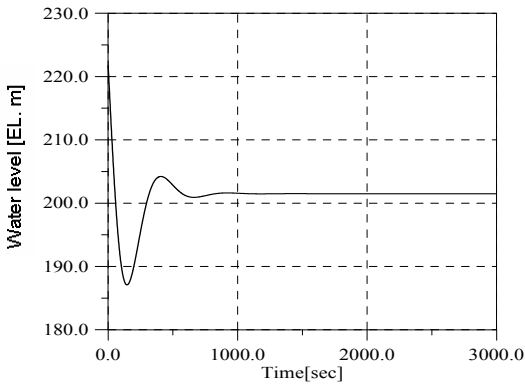


Fig. 11 저수위 일 때 하강서징에 의한 수위변동

상승서징과 마찬가지로 수직갱의 지름을 5m 이상으로 하면 하강서징에 의해 발생한 수위변동도 시간에 따라 감쇠되어 수위변동에 대해서는 안정적임을 알 수 있다.

3.2 부하 변화에 따른 수면변동의 최대진폭

Table 4는 홍수위(EL. 265.5m)를 기준으로 하여

앞에서 결정한 수직갱의 크기를 기초로 조압수조의 수실(chamber)과 수직갱의 단면적을 변화시켜 가면서 이에 따른 최고 상승수위를 계산한 결과이다.

제시된 결과에서 알 수 있는 바와 같이 최고 상승수위는 수직갱이나 수실의 크기가 커질수록 더 낮아지는 것을 알 수 있다.

지배방정식을 수치적으로 해석한 결과와 Frank-Schüller 식을 이용한 결과가 용담댐 실시 설계시 월류량에 대한 여유고 1.5m를 확보할 수 없으므로 이에 대한 대책을 수립해야만 한다.

일반적으로 최고 상승수위에 대한 여유고를 확보하는 방법으로는 ①조압수조 수직갱의 단면적을 조정하는 방법, ②수실의 단면적을 조절하는 방법, ③조압수조 수실의 높이를 조정하는 방법이 있다.

앞의 계산결과에서 알 수 있는 바와 같이 수직갱의 지름이 5m 이상이면 동적으로 안정하고, 수실보다 긴 구간에 대해서 설치하기 때문에 시공에 불리하므로 수직갱의 단면적을 조정하는 방법은 다른 방법에 비해 불리하다.

제2안과 제3안에 대해서 검토한 결과, Table 4의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 수실의 크기를 조절하는 경우에는 지름을 11m 이상 확대시켜야 하고, 수실의 높이를 조절하는 경우에는 여유고에 해당하는 1.5m를 높여 주어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 12~Fig. 14는 Frank-Schüller 식과 지배방정식을 이용하여 최고 상승수위를 계산한 결과를 도시한 것이다.

이때, 수직갱의 단면적을 일정하게 하였으며 수실 단면적변화에 따른 최고 상승수위의 변화를 살펴보고자 하였다.

Table 4 최고 상승수위

(unit : m)

	Diameter of shaft	Diameter of chamber	Maximum upsurging water level(EL. m)		Remark
			Frank Schüller	Governing equation	
Case 1	5.0	10.0	289.91	290.06	Top. of surge tank EL. 290.0m
Case 2	5.0	10.5	288.56	289.03	
Case 3	5.0	11.0	287.48	288.11	
Case 4	5.5	10.0	289.55	289.61	
Case 5	5.5	10.5	288.71	288.62	
Case 6	5.5	11.0	287.58	287.68	

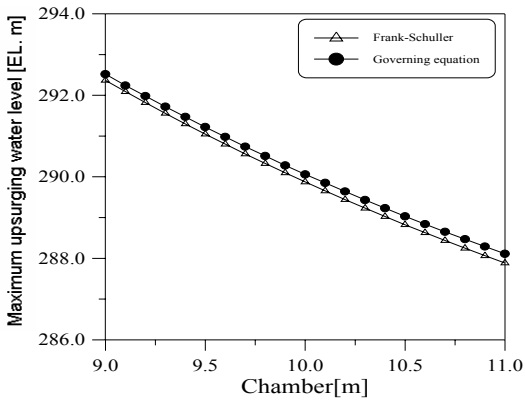


Fig. 12 수실 지름의 크기 변화에 따른 최고상승수위의 변화(수직갱의 지름=5.0m)

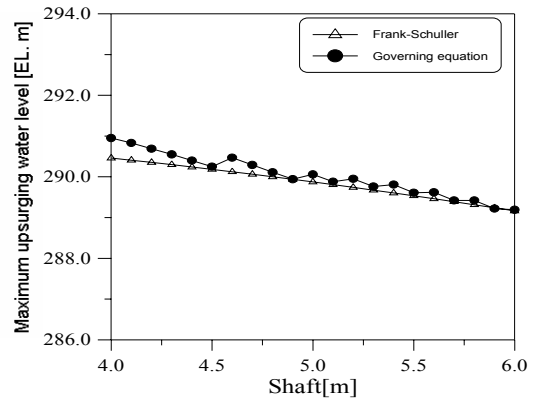


Fig. 15 수직갱 지름의 크기 변화에 따른 최고상승수위의 변화(수실의 지름=10.0m)

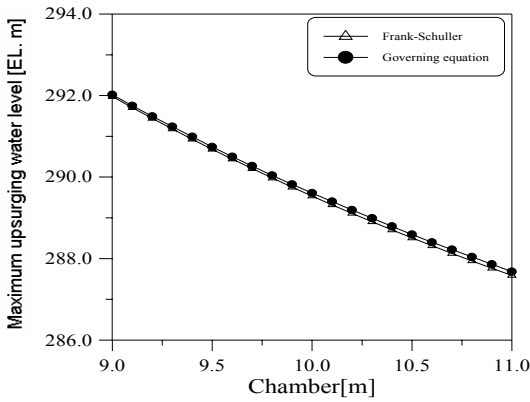


Fig. 13 수실 지름의 크기 변화에 따른 최고상승수위의 변화(수직갱의 지름=5.5m)

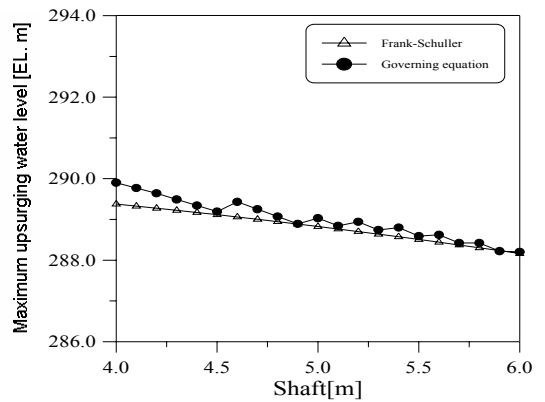


Fig. 16 수직갱 지름의 크기 변화에 따른 최고상승수위의 변화(수실의 지름=10.5m)

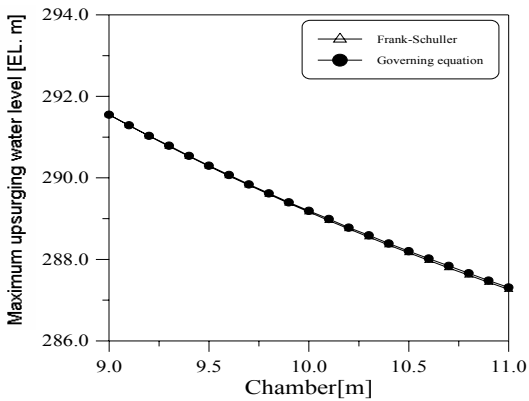


Fig. 14 수실 지름의 크기 변화에 따른 최고상승수위의 변화(수직갱의 지름=6.0m)

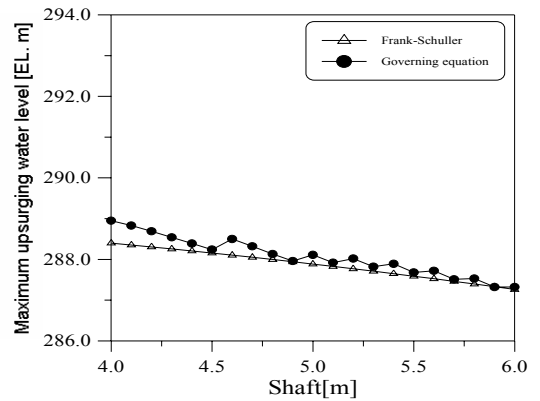


Fig. 17 수직갱 지름의 크기 변화에 따른 최고상승수위의 변화(수실의 지름=11.0m)

Table 5 조건별 여유고 계산결과

(unit : m)

	Diameter of shaft	Diameter of chamber	Maximum upsurging water level(EL. m)	Free board	Remark
Case 1	5.0	10.0	290.06	-0.06	Top. of surge tank EL. 290.0m
Case 2	5.0	10.5	289.03	0.97	
Case 3	5.0	11.0	288.11	1.89	
Case 4	5.5	10.0	289.61	0.39	
Case 5	5.5	10.5	288.62	1.38	
Case 6	5.5	11.0	287.68	2.32	
Case 7	6.0	10.0	289.19	0.81	
Case 8	6.0	10.5	288.20	1.80	
Case 9	6.0	11.0	287.31	2.69	

그림에서 가로축은 수실 지름의 변화를 나타내고 세로축은 최고 상승수위 변화를 나타낸다. 결과에서 알 수 있는 바와 같이 두 공식에 의한 계산결과는 동일한 양상을 띠고 있으며, 수실의 면적이 커질수록 최고 상승수위는 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 15~Fig. 17은 수실의 지름을 일정하게 하고 수직갱의 단면적을 변화시켜 가면서 이에 따른 최고 상승수위의 변화를 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 수직갱 단면적의 크기가 증가할수록 최고 상승수위는 감소하고 있음을 알 수 있다.

그러나 지배방정식을 이용해서 구한 최고 상승수위가 주기적으로 진동하는 경향을 보이고 있다. 이것은 Frank-Schüller식이 수직갱으로부터 수실쪽의 단면변화를 고려하여 유도되었지만 지배방정식은 단지, 도수로와 수조의 접합부에서의 연속방정식과 운동방정식을 이용하여 계산된 것이므로 이러한 단면변화의 영향을 고려하지 못했기 때문이다.

Table 4와 Fig. 12~Fig. 17에 제시된 최고 상승수위는 지배방정식을 이용한 결과가 크게 나타난다. 이 결과를 이용해서 조압수조 상당표고(EL. 290m)와의 차인 여유고를 산정하여 Table 5에 제시하였다.

Table 5에 제시된 결과를 분석해 볼 때 수직갱의 단면적을 증가시키는 것보다 수실의 단면적을 증가시키는 것이 여유고를 확보하는 데 효과적임을 알 수 있다.

4. 결 론

- 1) 최고 상승수위가 총 낙차까지 발생한다고 가정된 Jaeger의 정적 안정조건은 실제보다 상당히 과대 평가하고 있으므로 실용성을 이용하는 것이 합리적이다.
- 2) Thoma-Jaeger의 동적 안정조건을 만족하도록 수조의 규모를 결정할 경우, 부하급폐색에 의한 상승서징은 시간이 지남에 따라 급속히 감소하고, 부하량 급증에 의한 하강 서징은 하강 후 즉시 수위가 회복되어 안정적인 상태를 유지한다.
- 3) 동적 안정을 만족시키는 수조에서 발생하는 최고 상승수위는 수실의 크기나 수직갱의 크기가 커질수록 감소하고, 수직갱의 크기를 변화시키는 것보다 수실의 크기를 변화시키는 것이 최고 상승수위 감소에 더 효과적이다. 이것은 단위 높이당 체적의 증가량이 수직갱에 비해 수실이 크기 때문인 것으로 판단된다.
- 4) 본 연구에 선정된 조압수조는 수직갱의 지름이 5m 이상이면 Thoma-Jaeger의 동적 안정조건을 만족시키며, 월류량에 대한 여유고를 확보하기 위해서는 수실의 지름을 11m 이상으로 하거나 수실의 높이를 1.5m 이상 높여 주어야 한다.

참고문헌

1. 강주복, "수리학", 구미서관, 1999, pp. 715~739.

-
2. 노재화, 이희영, “조압수조의 수리모형실험과 수치해석”, 한국수자원학회지 제7권 제1호, 1984, pp. 45-46.
 3. 우효섭, 이삼희, “빈관의 급속한 채움에 의한 관단면의 급축소 부분에서의 수격작용”, 한국수자원학회지 제22권 제4호, 1989, pp. 155-160.
 4. 이재수, 윤용남, 김중훈, “공기실을 사용한 압력수두의 완화효과에 대한 분석”, 한국수자원학회지 제28권 제5호, 1995, pp. 141-150.
 5. 한국수자원공사, “용담댐 제1발전소 설계변경에 따른 수리검토계산서”, 1996.
 6. 한국수자원학회, “제6회 수공학 workshop 교재-관수로내 수격작용의 해석 및 응용”, 한국수자원학회, 1998.
 7. 日本土木學會, 水理公式集, 1985.
 8. Allievi, L., “Teoria Generale del Moto Perturbato dell’acqua nei Tubi in Pressione”, Ann. Soc. Ing. Arch., Ital., Milan, 1903.
 9. Bergant, A., and Simpson, A.R., “Water Hammer and Column Separation Measurements in An Experimental Apparatus”, Res. Rep. No. R128, Dept. of Civ. and Envir. Engrg., The Univ. of Adelaide, Australia, 1995.
 10. Parmakian, J., “Water Column Separation in Power and Pumping Plants”, Hydro Review, Summer, 1985, pp. 85-89.
- 급행 (접수일자 : 2006년 7월 13일)