

송수관로 밸브폐쇄에 따른 수충격현상 완화기법 연구

박종호* · 박한영**†

Study of Waterhammer Suppression Technique due to Valve Closing on Water Supply Pipeline

Park, Jong Ho*, Park, Han Yung**†

Key Words : Butterfly Valve(버터플라이밸브), Loss Coefficient(손실계수), Inherent Flow-Coefficient(고유용량계수), Effective Flow-Coefficient(유효용량계수), Waterhammer(수충격), Two-step Valve Closing(밸브이단폐쇄), Upsurge(상승서지), Downsurge(하강서지), Wave speed(파속)

ABSTRACT

The cause of waterhammer phenomenon due to valve closing which is installed on pipeline is clarified in this study. Also if waterhammer phenomenon occurs on simple pipeline, expensive facilities like pressure relief valve is adapted to protect pipeline from waterhammer so far. But this study shows that waterhammer phenomenon can be suppressed by just simple modification of valve control sequence, and this technique is verified by simulation and site experiment.

1. 서론

물을 수송하는 관로에서 펌프의 기동 및 정지 또는 밸브의 개도 조정 등으로 인해 유속변화가 발생하면 압력이 증가하는 상승서지 또는 압력이 감소하는 하강서지로 인해 수충격 현상이 발생하며, 단순관로의 경우 Joukowsky 식을 사용하여 이에 따른 압력변화를 구할 수 있다. 이 상승서지와 하강서지는 서로 상호작용하며 또한 교대로 주기적으로 발생한다. 단순관로의 경우 상승서지가 수충격현상의 원인이 될 경우 압력상승 크기를 감소시키고, 반대로 하강서지가 수충격현상의 원인이 될 경우 압력강하 크기를 감소시켜 수충격현상을 완화시킬 필요가 있다. 이러한 수충격현상을 완화시키기 위해 통상적으로 고가의 조압수조, 에어챔버, 압력완화밸브 등을 사용하여 왔다.

본 연구에서는 송수관로에 설치된 밸브의 폐쇄시 발생하는 수충격현상을 수충격현상의 고유성질인 상승서지와 하강서지의 주기성을 이용하여 간단하게 밸브의 동작시간을 조정하여 수충격현상을 완화시키는 기법을 제시한다.

2. 단순관로 밸브폐쇄에 따른 수충격현상의 이해

Fig. 1은 저수지에 연결된 단순관로의 유출부 말단부에 설치된 밸브를 급폐쇄할 경우 나타나는 수충격현상을 보여주며 이때 발생하는 압력변화 $\Delta H[m]$ 는 Joukowsky 식을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.⁽¹⁾

$$\Delta H = \pm a \frac{\Delta V}{g} \tag{1}$$

여기서 a : 파속(m/s)

ΔV : 밸브 폐쇄에 따른 유속변화(m/s)

g : 중력가속도(m/s²)

상기 식에서 파속 a 는 관의 재질, 직경, 두께, 관지방법 및 유체의 물리적 특성에 따라 결정되는 압력파의 속도로 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽²⁾

$$a = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1 + \frac{K D}{E e}}(C)} \tag{2}$$

여기서 K : 배관내 유체의 체적탄성계수(N/m²)

ρ : 유체 밀도(N/m³)

E : 배관의 영계수(N/m²)

* 충남대학교 기계공학과

** 한국수자원공사 수도기술처

† 교신저자, E-mail : hanyung@kwater.or.kr

- D : 배관 직경(m)
- e : 배관 두께(m)
- C : 배관 지지방법에 따른 상수

Fig. 1에서 L 은 관로 길이이고, 밸브 급폐쇄시 발생하는 상승서지(압력과 a 의 진행방향과 유동방향이 반대 방향으로 진행할 때 발생하는 서지)는 파속 a 로 상류측으로 진행하여 시간 $t=L/a$ 에서 저수지에 도달하고, 저수지에 도달한 상승서지는 반사되어 하류로 진행하면서 관로 내 압력은 정상압력으로 회복되며 시간 $t=2L/a$ 에서는 상승서지가 밸브에 도달하여 관로 전 구간에서 정상 압력으로 회복된다. 밸브에 도달한 상승서지는 밸브에서 반사되어 이번에는 하강서지(압력과 a 의 진행방향과 유동방향이 같은 방향으로 진행할 때 발생하는 서지)가 되어 상류로 진행하면서 관로 내 압력을 저하시키고 시간 $t=3L/a$ 에서는 하강서지가 저수지에 도달하여 관로 전 구간에서 압력이 저하된다. 저수지에 도달한 하강서지는 다시 반사되어 밸브로 향하고 시간 $t=4L/a$ 에서는 관로 내 전체 구간에서 압력은 다시 정상으로 회복된다.⁽³⁾

이와 같이 단순관로에서 밸브 폐쇄시 수충격현상이 발생하면 압력파의 1왕복시간인 $t=2L/a$ 동안 상승서지가 발생하여 밸브에서 압력은 상승하고, 압력파의 2 왕복시간인 $t=4L/a$ 동안 하강서지가 발생하여 압력이 하강하게 된다. 이러한 주기로 상승서지와 하강서지가 계속하여 발생하여 관로 내 압력이 변화하게 된다.

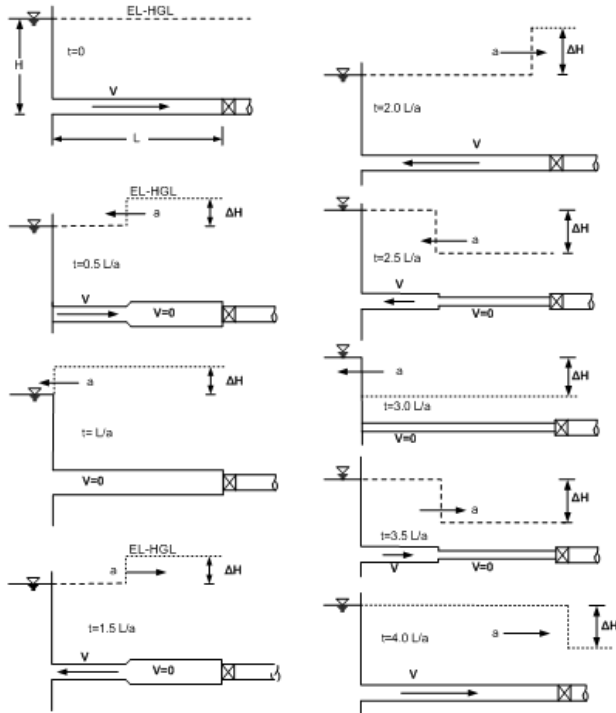


Fig. 1 Evolution of a transient pressure wave in pipe

3. 밸브개도제어 수충격완화 기법

3.1 밸브의 고유용량계수 C_{vi} 및 유효용량계수 C_{ve}

밸브의 개도별 손실계수, 관로에 설치된 피팅류의 부차적 손실 및 관마찰손실, 그리고 밸브 상류와 하류의 고도차를 고려하여 개도별 밸브를 통과하는 시간당 유량을 용량계수 C_v 로 표현한다. 먼저 밸브를 통과하는 유속[m/s]은 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$V = \sqrt{\frac{2g\Delta H}{K + K_1 + K_2 + \dots + K_n + f\frac{L}{D}}} \quad (3)$$

$$= \sqrt{\frac{2g\Delta H}{K + K_{friction}}}$$

여기서 K : 밸브 개도별 손실계수

$K_{friction}$: 관로 부차적손실 및 마찰손실

$$\left(K_{friction} = K_1 + K_2 + K_3 + \dots + f\frac{L}{D} \right)$$

f : 달시-바하 마찰계수

L : 관로 길이(m)

ΔH : 밸브 상류와 하류의 고도차(m)

상기 유속을 시간 당 통과 유량인 용량계수 C_v [m^3/hr]로 변환하면 다음과 같다.

$$C_v = 3600AV = 3600 \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2g\Delta H}{K + K_{friction}}} \quad (4)$$

$$= 12511D^2 \sqrt{\frac{\Delta H}{K + K_{friction}}}$$

식 (4)에서 밸브가 설치된 관로의 마찰손실 fL/D 을 무시하고 오직 밸브 개도별 손실계수 K 만을 고려하고, 밸브 상류와 하류의 고도차 $\Delta H=10m$ 로 일정하게 유지할 때 밸브를 통과하는 시간당 유량을 고유용량계수 C_{vi} 라고 정의한다.

$$C_{vi} = 12,511D^2 \sqrt{\frac{\Delta H}{K}} \quad (5)$$

그러나 송수관로를 포함한 모든 관로설비는 긴 배관은 물론 엘보 등과 같은 수 많은 피팅들로 구성되어 반드시 배관에서 발생하는 손실수두를 고려하여야 한다. 또한 밸브 상류와 하류의 고도차는 $\Delta H=10m$ 로 고정되지 않는다. 특히 K-water와 같이 광역상수도를 운영하는 경우 관로 길이는 수백 km에 이르는 경우가 대부분이다. 이와 같이 밸브의 개도별 손실계수 K 는 물론 관로에서 발생하는 마찰손실과 부차적손실 $K_{friction}$ 모두를 고려하고 $\Delta H=10m$ 가 아닌 조건에서 밸브를 통과하는 시간당 유량을 유효용량계수 C_{ve} 라 하며 이를 다음 식으로 표현할 수 있다.

Table 1 Inherent flow coefficient of butterfly valve (D=400mm)

Opening(°)	K	$C_{vi}(m^3/hr)$
0	5.00E+10	0
10	800	224
20	120	578
30	35	1,070
40	15.5	1,608
50	5.1	2,803
60	1.7	4,855
70	0.68	7,677
80	0.34	10,856
90	0.17	15,353

Table 2 Inherent & effective flow coefficient of butterfly valve

Opening(°)	C_{vi}	$C_{ve}(L=1km)$	$C_{ve}(L=5km)$	$C_{ve}(L=10km)$
0	1	0.63	0.63	0.63
10	224	217.13	195.36	175.57
20	578	485.51	329.09	254.23
30	1,070	686.61	374.97	273.68
40	1,608	782.17	388.50	278.81
50	2,803	852.79	396.34	281.66
60	4,855	880.39	399.01	282.62
70	7,677	889.20	399.82	282.90
80	10,856	892.20	400.09	283.00
90	15,353	893.71	400.22	283.05

$$C_{ve} = 12,511D^2 \sqrt{\frac{\Delta H}{K + K_{friction}}} \quad (6)$$

직경 400mm 버터플라이밸브의 개도별 손실계수가 Table 1의 K 와 같을 때⁽⁵⁾ 고유용량계수 C_{vi} 는 다음과 같다.

다른 조건들은 앞과 동일하고 관마찰계수 $f=0.02$, 관로 길이 $L=1km$ 인 경우 밸브의 완전 개방상태에서의 유효용량계수 C_{ve} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{ve} &= 12,511D^2 \sqrt{\frac{\Delta H}{K + K_{friction}}} \\ &= 2001.76 \sqrt{\frac{10}{0.17 + 50}} \\ &= 894m^3/hr \end{aligned}$$

계산결과 유효용량계수 C_{ve} 는 밸브보다는 관로의 마찰손실에 의해 크게 영향을 받아 유량이 크게 감소한 것을 알 수 있다. 따라서 관로 길이가 길수록 유효용량계수 C_{ve} 는 더욱 감소하는 것을 알 수 있다. 동일한 방법으로 관로 길이가 $L=5 km, 10 km$ 인 경우 계산결과는 Table 2와 같다. 관로 길이가 다를 경우 밸브를 통과하는 유효용량계수를 90도 값을

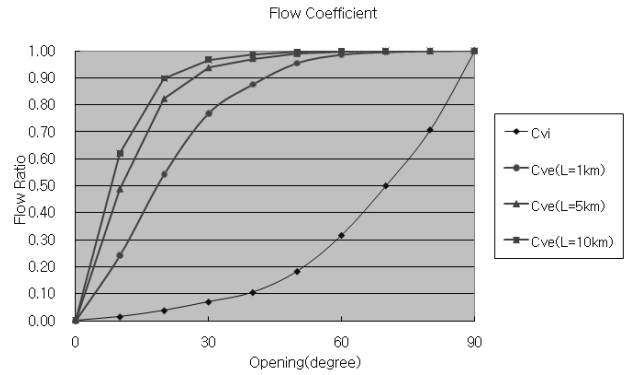


Fig. 2 Inherent & effective flow coefficient of butterfly valve

기준으로 무차원화(normalization)한 결과는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2로부터 관로 길이가 $L=5 km, 10 km$ 인 경우 $K_{friction} = 250, 500$ 이 되어 버터플라이밸브를 30°까지 폐쇄하여도 유량은 약 10% 정도만 감소하는 것을 알 수 있다.

또한 Fig. 2, 식 (6) 그리고 테이블 2로부터 $K_{friction}$ 수치가 커질수록 밸브 개도별 K 의 변화폭이 감소되어 유량조절 범위가 감소되고, 관로 길이가 $L=10 km$ 가 되면 밸브의 유량제어범위는 최종 개도 20° 정도로 감소되므로 개도 90°(완전 개방)~20°까지는 밸브를 교축하여도 유량에서 큰 변화가 발생하지 않는다.

3.2 수충격현상 완화를 위한 밸브 폐쇄 개도 결정

이제 관로에 설치된 완전 개방된 상태의 밸브 폐쇄시 발생하는 상승서지를 일정한 수두를 초과하지 않도록 제어하여 수충격현상을 완화하기 위한 밸브 개도를 결정하기로 한다. 식 (1)에서 수두변화는 단순히 파속 a 과 유속변화의 크기 ΔV 로 결정되므로 밸브가 완전 개방된 상태에서의 관로 내 유속 V_0 와 밸브 폐쇄에 따른 상승서지를 일정 수두로 제어하기 위해 밸브의 1차 폐쇄 개도에서의 관로 내 유속 V_1 의 차이인 $\Delta V (= V_0 - V_1)$ 를 결정하면 된다.

단순화를 위해 단순관로시스템의 수두차 $H=50 m$, $a=1000 m/s$, 관로 길이 $L=20 km$, 배관 직경 $D=0.4 m$, 직경 400 mm 버터플라이밸브가 설치된 경우 완전 개방된 상태에서 관로 내 유속 $V[m/s]$ 은 식 (3)에 따라 다음과 같이 계산할 수 있다. 단, 여기서 단순화를 위해 관로 마찰손실계수 $f=0.0196$ 으로 가정한다.

$$V_0 = \sqrt{\frac{2gH}{K + K_{friction}}} = \sqrt{\frac{2 \times 9.8 \times 50}{0.17 + 980}} = 1$$

여기서 $K=0.17$

$$K_{friction} = f \frac{L}{D} = 0.0196 \frac{20,000}{0.4} = 980$$

이 관로시스템에서 밸브 폐쇄시 발생하는 압력변화 $\Delta H=50 m$

Table 3 Loss coefficient of butterfly valve (A company, D=400mm)

Opening (°)	Experiment K	Opening (°)	Calculated K_1
9	1963.6437	5	14299.937
18	249.5246	10	1543.099
27	68.6386	20	166.515
36	28.4344	30	45.272
45	12.4168	40	17.969
54	6.4309	50	8.775
63	3.8789	60	4.885
72	2.5608	70	2.977
81	1.6550	80	1.939
90	1.5455	90	1.328

로 제어하고자 할 경우 식 (1)로부터 $\Delta V=0.5\text{m/s}$ 이다. 따라서 밸브 1차 폐쇄시 유속 $V_1=0.5\text{m/s}$ 이다. 이 유속을 형성하기 위해 1차 폐쇄하여야 할 밸브 개도는 식 (3)으로부터 $K=2940$ 가 된다.

동일한 형식과 규격의 버터플라이밸브라 해도 제작사마다 디스크, 시트, 그리고 몸체의 설계방법이 약간씩 다르게 되어 Table 1과 같은 표준 수치를 사용할 수 없다. 국내 A사가 제작하고 K-water에서 실험한 밸브의 개도별 손실계수는 Table 3과와 같다.⁽⁶⁾ 이 Table에서 실험값 K 는 실제 시험으로 구한 개도별 손실계수이고, 계산값 K_1 은 실험결과를 근거로 개도별 손실계수를 다음과 같은 로그 추세식으로 구한 것이다.

$$K_1 = -1.395LN(\theta) + 6.4005 \quad (7)$$

$K_1 = 2940$ 가 되기 위한 밸브 개도는 식 (7)로부터 다음과 같이 구할 수 있다. 여기서 주의하여야 할 점은 K_1 은 상용로그이고 밸브 개도 θ 는 자연로그이다.

$$\log(K_1) = \log(2,940) = 3.4683$$

$$LN(\theta) = \frac{6.4005 - K_1}{1.395} = \frac{6.4005 - 3.4683}{1.395} = 2.1019$$

상기 자연로그를 실수로 변경시키면

$$\theta = e^{2.1019} = 8.2^\circ$$

따라서 밸브 폐쇄에 따른 수두상승을 50 m로 제한하기 위한 밸브의 1차 폐쇄 개도는 $\theta=8.2^\circ$ 가 된다.

3.3 2차 밸브 폐쇄를 시작하기 위한 유지시간 결정

밸브개도 $\theta=8.2^\circ$ 에서 계속하여 더욱 폐쇄하면 식 (1)에 따라 상승서지가 발생하여 수두가 증가하게 된다. 그러나 밸브 폐쇄에 따른 수두상승을 50 m로 제한하여야 할 필요가 있으므로 Fig. 1에 따라 압력파가 다음과 같이 1왕복하는 시간 $t[s]$ 동안 이 밸브개도를 유지한다.

$$t = \frac{2L}{a} = \frac{2 \times 20,000}{1000} = 40$$

40초에는 밸브 1차 폐쇄에 따라 발생한 상승서지가 저수지에서 반사되어 밸브에 도달한다. 밸브에 도달한 상승서지는 밸브에서 반사되어 하강서지가 되어 이번에는 상승서지에 따른 수두상승과 동일한 크기의 수두저하 -50 m가 발생한다. 이를 연속적으로 표현하면 Fig. 3과 같다.

밸브를 1차 폐쇄하고 압력파가 1왕복하는데 소요되는 시간 40초 후에는 하강서지가 발생하므로 이 시간에 나머지 밸브개도를 급폐쇄하면 상승서지와 하강서지가 조합되어 이론적으로는 Fig. 4와 같이 40초 후 수충격현상을 $\Delta H=0\text{m}$ 으로 제어할 수 있다.

Fig. 4에서 ΔH_1 은 상승서지, ΔH_2 는 하강서지, 그리고 ΔH 는 밸브를 2단계로 폐쇄할 때 상승서지와 하강서지가 조합되어 실제 발생하는 수두변화를 나타낸다.

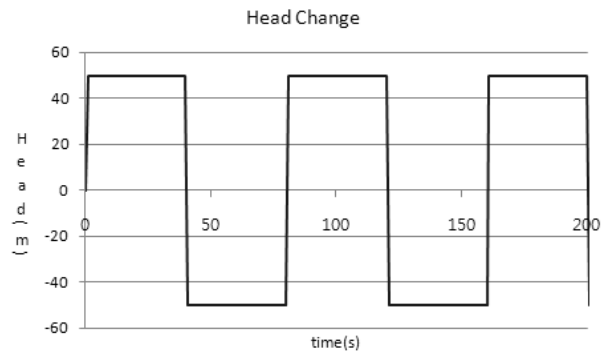


Fig. 3 Head change resulting from sudden valve closing

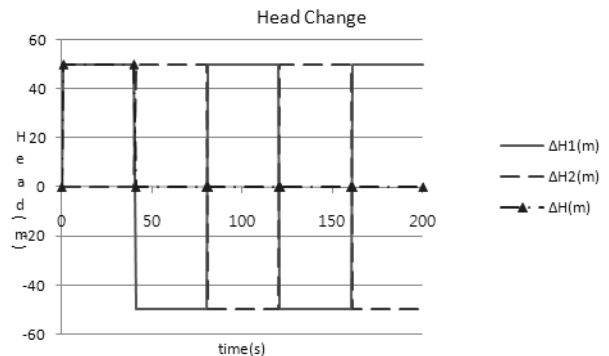


Fig. 4 Head change resulting from 2nd step valve closing

4. 적용사례

상기 이론적 고찰은 관로가 동일한 직경, 동일한 재질이 고, 밸브를 1단 및 2단까지 급폐쇄하는 것으로 가정하였다. 그러나 배관 및 밸브가 설치된 실제 조건들은 상기 가정과는 확연히 다르므로 상기 이론을 그대로 적용할 수는 없다.

그러나 Fig. 1의 수충격현상의 주기를 이해하면 밸브 작동기의 시퀀스를 간단히 수정하여(상기 예에서 밸브 폐쇄 40초 후 정지, 40초 동안 개도 유지, 이후 밸브 완전폐쇄) 현장에서 밸브 폐쇄에 따른 수충격현상을 완화시킬 수 있는 이론을 제시하였다.

K-water에서 운영하고 있는 동산가압장의 유입 관로에 설치된 게이트밸브의 폐쇄에 따른 수충격현상을 이와 같은 기법을 적용하여 완화시킨 사례를 제시한다.

4.1 송수관로계통도

Fig. 5는 석성정수장으로부터 물을 공급받는 계통도를 보여준다. 동산가압장은 석성정수장으로부터 물을 공급받아 흡수정에 저장한 후 마산배수지로 펌핑하는 가압장으로서 펌핑하지 않을 때는 동산가압장 유입밸브를 폐쇄하여야 한다. 유입밸브의 상세한 자료는 Table 4와 같다.

4.2 압력파 형상 예측

상기 계통도에서 동산가압장의 유입밸브를 폐쇄하면 밸브 상류측에서 먼저 상승서지가 발생하여 D=1.5 m의 주 관로에 도달한 후 반사되어 유입밸브에 도달하고, 밸브에서 반사된 압력파는 하강서지가 되어 다시 주 관로에 진행한다. Fig. 5에서 관로는 주 관로와 동산가압장 중간에서 논산가압

장으로 유출되므로 단순관로가 아니기 때문에 Fig. 3 및 4와 같이 깨끗한 서지가 발생하지 않을 것으로 예측할 수 있다.

즉, 동산가압장 유입밸브 폐쇄시 발생한 서지는 논산가압장 유출부와 주 관로부에서 영향을 받아 단봉(uni-modal)이 양봉(twin-modal)이 될 가능성이 있다.

4.3 수충격 주기 예측

Fig. 5의 주 관로로부터 동산가압장까지 배관의 특성을 고려하여 계산한 파속 $a[m/s]$ 은 다음과 같고, 관로 길이는 $L=9,076 m$ 이므로

$$a = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1 + \frac{K D}{E e} C}} = 1,100$$

예상되는 수충격주기 $t[s]$ 는 다음과 같다.

$$t = \frac{4L}{a} = \frac{4 \times 9076}{1100} = 33$$

4.4 수두변화 예측

시험시 동산가압장 흡수정으로 유입되는 조건은 다음과 같다.

- 유량 $Q=390m^3/hr$
- 배관 직경 $D=0.4m$

상기 조건으로부터 동산가압장 유입관로에서의 유속은 $V=1.1 m/s$ 이므로 식 (1)에 따라 다음과 같이 밸브 폐쇄에 따른 수두변화 $\Delta H[m]$ 를 예상할 수 있다.

$$\Delta H = \pm a \frac{\Delta V}{g} = 1100 \frac{1.1}{9.8} = 124$$

Table 4 Inlet valve data

Valve Type	Dia.(mm)	Closing time (s)	Loss Coe. (K)	Elevation (m)
Gate	400	70	0.27	24.5

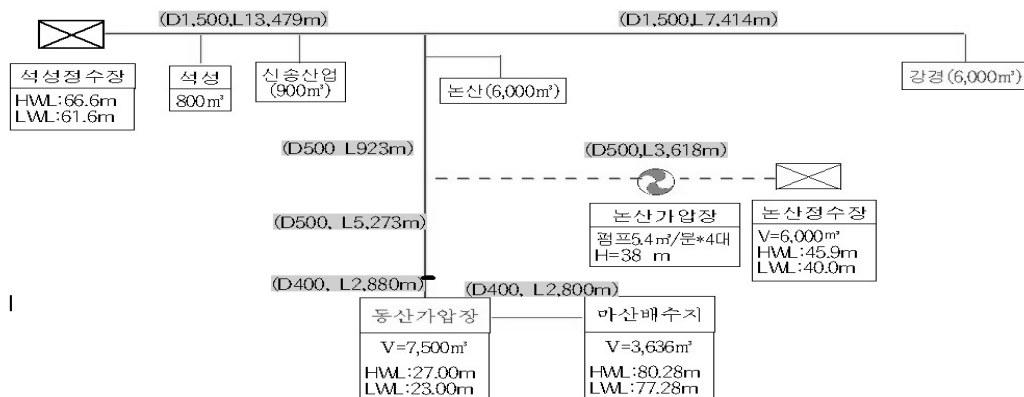


Fig. 5 Water supply system for Suksung water treatment plant

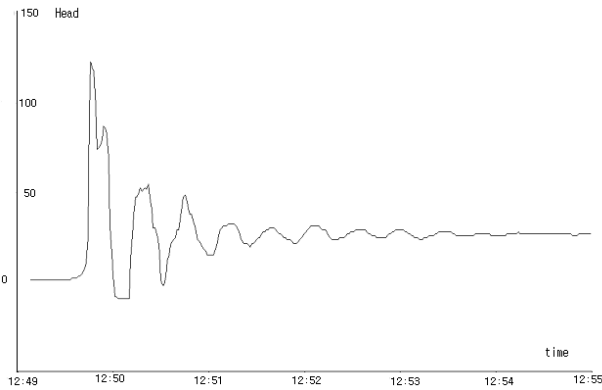


Fig. 6 Head change due to inlet valve closing(experiment)

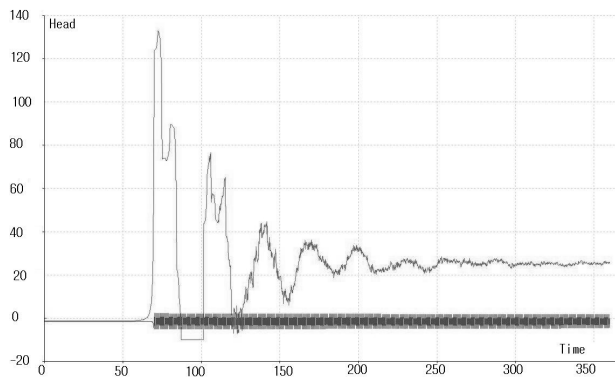


Fig. 7 Head change due to inlet valve closing(simulation)

4.5 실험 및 모의 결과

Fig. 6과 7은 유입밸브를 완전개방에서 완전폐쇄시킬 때 유입밸브 상류측에 설치된 압력센서를 이용해 측정된 수두 변화와 Surge2010으로 모의한 결과로서 서로 잘 일치하는 것을 보여준다. Fig. 6과 7에서 밸브 폐쇄 약 66.5초 후에 수두가 상승하기 시작하여 최대 125m로 도달하여 4.4절의 수두변화 예측과 거의 완벽하게 일치한다. 또한 약 33초 주기로 수두 25m를 중심으로 수두상승과 수두저하가 반복되는 것을 알 수 있다.

밸브 작동기 작동 개시 후 66.5초가 경과시 선형관계식을 이용하면 이때의 밸브 개도는 다음과 같다.

$$Opening = \frac{70 - 66.5}{70} \times 100 = 5 \%$$

이와 같이 밸브가 거의 폐쇄된 개도에서 수두변화가 발생하는 이유는 Fig. 2와 같이 관로의 손실수두에 따른 밸브의 고유용량계수가 유효용량계수로 변화되어 최종 개도 10% 구간에서 유속변화가 발생하고, 특히 이 현장에 설치된 밸브 형식은 게이트밸브로서 이 밸브의 유효용량계수는 Fig. 2 버터플라이밸브의 유효용량계수의 곡선보다 더욱 좌측 상단으로 급격한 곡선으로 변화하여 유량제어 밸브개도범위가 감소하기 때문에 개도 약 5%에서 급속한 유속변화가 발생하

Table 5 Two step valve closing condition

Valve Type	1'st Closing		Holding time (s)	2'nd Closing	
	Closing time(s)	Opening		Closing time(s)	Opening
Gate	66.5	1→0.05	66.5~87	87~90.5	0.05→0

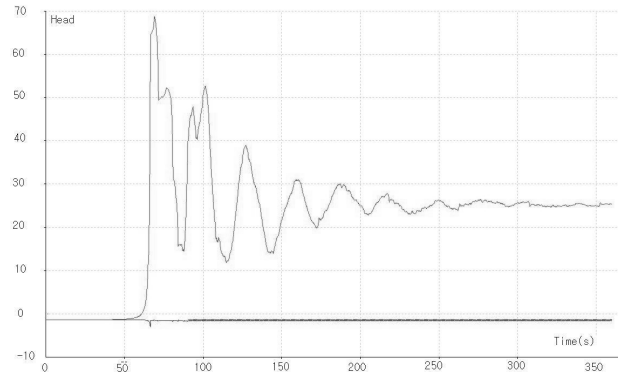


Fig. 8 Transient simulation result due to inlet valve's 2'nd closing

는 것을 알 수 있다. 단 본 연구에서는 게이트밸브 특성상 밸브작동기 작동시간으로 밸브개도를 유추하였으나, 유입유량을 측정할 자료가 없어 제시하지 못하였다.

4.6 수충격현상 완화기법 적용

수두가 125 m까지 상승하는 것을 방지하기 위해 밸브를 1단이 아닌 2단으로 폐쇄시킬 필요가 있다. 즉, 게이트밸브 마지막 개도 5%에서 수두가 상승하므로 이 개도의 중간 지점까지 1차 폐쇄하고 압력파가 1왕복하는데 소요되는 시간 이상으로 밸브를 중지시킨 후 하강서지가 밸브에 도달하여 수두상승을 감소시킨 후 밸브를 완전 폐쇄시키도록 시퀀스를 변경시킨다.

본 연구에서는 이 방법에 대한 증명차원에서 Table 5와 같은 밸브 폐쇄 스케줄로 시퀀스를 변경하여 모의한 결과는 Fig. 8과 같다. 즉, 1차 폐쇄시 수두상승 68 m가 되도록 밸브개도 5%까지 폐쇄한 후 하강서지가 발생할 때까지 소요되는 시간을 충분히 고려하여 약 20.5 초 동안 밸브개도 5%를 유지한 후 나머지 개도를 완전폐쇄하면 수두상승을 당초 125 m에서 68 m로 감소시킬 수 있을 것으로 예측된다.

5. 결 론

본 연구에서는 송수관로에 설치된 밸브를 완전개방에서 완전폐쇄까지 1단으로 폐쇄할 경우 발생하는 수충격현상을 단순하게 밸브 작동기의 시퀀스를 개선하여 완화시키는 기법에 대해 고찰하였다. 즉, 밸브 1차 폐쇄시 발생하는 상승서지의 크기를 원하는 범위로 제어하고, 이 상승서지가 되돌아

와 반사되어 하강서지가 되어 수두저하가 발생할 때까지 이 개도를 유지한 후 나머지 개도를 2단으로 폐쇄하여 상승서지와 하강서지가 조합되어 수충격현상을 완화시킬 수 있는 기법에 대한 이론을 제시하였하였다. 그리고 석성정수장 송수관로 말단에서 밸브를 폐쇄시킬 때 발생하는 수격압을 현장에서 측정한 결과와 전산 프로그램을 사용한 수치해석결과와 서로 비교하였는데, 두 결과가 정성적으로 잘 일치하였다.

또한 본 연구결과를 토대로 현장 실무자가 단순하게 밸브 작동기의 시퀀스를 변경하여 수충격현상을 완화시킬 수 있도록 충분한 이론을 제시하였다.

그러나 본 연구결과를 적용시에는 반드시 밸브 폐쇄시 상승서지가 발생하는 조건임을 명시하여야 한다. 즉, 펌프장 정전시 펌프 토출밸브에서는 하강서지가 먼저 발생하므로 본 연구결과를 적용할 수 없다.

참고문헌

- (1) Bruce E. Larock, Roland W. Jeppson and Gary Z. Watters, 2000, "Hydraulics of Pipeline Systems," CRC, Boca Raton London New York Washington, D.C., pp. 305~307.
- (2) Bruce E. Larock, Roland W. Jeppson and Gary Z. Watters, 2000, "Hydraulics of Pipeline Systems," CRC, Boca Raton London New York Washington, D.C., pp. 308~311.
- (3) 박한영, 박진훈, 노선민, 신동기, 2010, "전산기로 푸는 수충격해석 입문," 홍릉과학출판사, pp. 69~72.
- (4) 박한영, 정태희, 2005, "밸브핸드북," 홍릉과학출판사, pp. 279~285.
- (5) 박한영, 정태희, 2005, "밸브핸드북," 홍릉과학출판사, pp. 277.
- (6) 윤준용, 2009, "관로용 밸브 설계기준 수립용역보고서," pp. 93~98.
- (7) 김상균, 이계복, 김경엽, 2005, "직결식 펌프의 수격현상," 유체기계저널, 8권 6호, pp. 7~14.
- (8) 라병필, 김진만, 이동근, 박종호, 김경엽, 2005, "과도수리 현상 해석과 실증을 통한 펌프장 안정성 확보 방안," 유체기계저널, 8권 5호, pp. 22~28.
- (9) 김상균, 이동근, 이계복, 김경엽, 2005, "가압펌프장의 수격완화설비에 대한 보수.보강 사례," 유체기계저널, 8권 4호, pp. 20~26.