

## 펌프제어밸브를 사용한 취수펌프장에서의 수격현상

김경엽\* · 오상현\*\*

### Waterhammer for the Intake Pumping Station with the Pump Control Valve

Kyung-Yup Kim\*, Sang-Hyun Oh\*

*Key Words* : Waterhammer(수격현상), Intake Pumping Station(취수펌프장), Pump Control Valve(펌프제어밸브), Slam Surge(슬램서지), Surge Relief Valve(서지릴리프밸브), Field Test(현장시험)

#### ABSTRACT

The field tests on the waterhammer were carried out for PalDang intake pumping station of the metropolitan water supply 5th stage project. The pumping station was equipped with the pump control valve as the main surge suppression device and the surge relief valve as auxiliary. However, the pump control valve had not been early controlled in the planned closing mode, and the slamming occurred to the valve which abruptly closed during the large reverse flow. Because the pressure wave caused by the pump failure was superposed on the slam surge, the upsurge increased so extremely that the shaft of the valve was damaged. It was desirable that the surge relief valve was installed in the pumping station or near the pump exit for the delay of response. After reforming the oil dashpot of the pump control valve, the slamming disappeared and the measured pressure was in fairly good agreement with the results of simulation. In case of three pumps for  $\phi 2,600$  pipeline being simultaneously tripped, the pressure head in the pumping station increased to 95.6m, and the upsurge caused by the emergency stop of four pumps for  $\phi 2,800$  pipeline was 89.6m. We concluded that the pumping station acquired the safety and reliability for the pressure surge.

#### 1. 서 론

수도권 광역상수도 5단계 사업은 최근 4년 6개월 동안 모두 1조2백90억원이 투입되어 1999. 11 준공되었으며, 이번 사업으로 인천과 경기 용인 등 수도권 19개 시군에 하루 2백20만톤의 물이 추가로 공급 가능하여 수도권 광역상수도의 하루 공급량이 5백45만5천톤에서 7백65만5천톤으로 크게 늘어나고 수도권 지역 수

도 보급률은 90%에서 95%로 높아지게 되었다. 특히 물 부족에 시달리던 경기 용인 수원 의정부시 일부 지역 등 수도권 주민 9백80만명에게 하루 총 1백48만톤의 생활용수가 추가 공급돼 주민들의 물 걱정이 크게 줄어들 것으로 기대되며, 인천국제공항과 인천남동공단 안산반월공단 등 1천8백만평의 공업단지에도 하루 72만톤의 공업용수가 공급될 수 있게 되었다. 이처럼 수도권 광역상수도는 수자원을 종합적으로 관리하여 급증하는 용수 수요에 비해 도시별 자체 수자원 확보가 곤란한 한강 하류의 서울, 인천, 성남, 수원, 안양시 등 수도권 전역에 수질이 양호한 팔당댐의 물을 취수

\* 한국산업기술대학교 기계공학과

\*\* 한국수자원공사 수도설비처

E-mail : kykim@kpu.ac.kr

## 펌프제어밸브를 사용한 취수펌프장에서의 수격현상

하여 생활 및 공업용수를 원활히 공급하고 시설을 개선함으로써 국민생활의 향상과 공공복리 증진에 기여하고 있다.<sup>(1),(2)</sup>

안정적인 용수 공급을 목표로 하는 광역상수도에서 수격현상은 매우 중요한 문제이며, 이는 설계단계에서부터 충분히 검토되어야 할 사항이다.<sup>(3),(4)</sup> 김과 유<sup>(5)</sup>는 팔당 취수펌프장의 수격현상에 관한 수치해석적 연구를 수행하였으며, 펌프제어밸브가 슬래밍을 일으키는 경우 펌프장에는 매우 높은 수격압이 작용하여 사고 발생의 위험성이 있음을 지적하였다. Thorley<sup>(6)</sup>는 여러 종류의 체크밸브에 대하여 동적 응답 실험을 하였고, Valibouse와 Verry<sup>(7)</sup>는 체크밸브에서 발생하는 슬래밍에 관한 연구를 수행한 바 있다. 실제로 수도권 광역상수도 5단계 사업의 일환으로 완공된 팔당 취수펌프장에서는 수격현상에 대한 현장 시험이 1999. 2 실시되었으며, 그 결과 펌프제어밸브의 슬래밍이 심각하여 밸브 축이 파손되는 피해가 발생하였다. 이후 펌프제어밸브의 유압 실린더에 대한 개선 작업이 이루어졌고, 아울러 수격현상에 대한 현장 시험이 2000. 12 다시 수행되었다. 본 연구에서는 팔당 취수장에서 실시되었던 실험 결과가 당초 설계에서 예측한 수격압 보다 높게 나타난 원인을 조사·분석하고, 취수펌프장의 신뢰성 및 안전성 여부를 판단함을 목적으로 한다.

## 2. 실험 및 수치해석 방법

수도권 5단계 당초 설계 시 수격작용으로부터 팔당 취수펌프장을 보호하기 위한 주 설비로는 펌프제어밸브가 선정되었고, 서지릴리프밸브는 펌프제어밸브가 잘못 동작했을 경우를 대비한 보조설비로서 설치하도록 계획되었다. 김과 유<sup>(5)</sup>는 팔당 취수펌프장의 수격현상에 관한 수치해석적 연구를 수행하였는데, 실제로 펌프·모터의 관성모멘트,  $GD^2$ 는  $7,058\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 이며, 도수관로에서 다운서지(downsurge)에 의한 부압은 발생하지 않는 것으로 예측되었다. 본 연구를 위한 시스템 및 설비의 제원은 김과 유<sup>(5)</sup>에서 설명한 바와 같다.

### 2.1 실험 장치

수격현상에 대한 현장 시험을 수행하기 위하여 구성한 계측기의 위치 및 취수펌프의 배치도를 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다. Fig. 3은 아날로그-디지털 변환장치(analog-to-digital converter, DaqBook/100)의

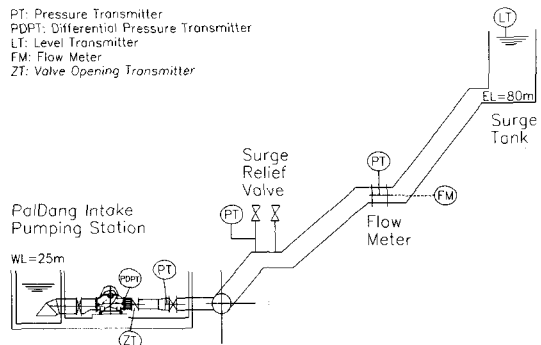


Fig. 1 Schematic drawing from PalDang intake pumping station to the surge tank at the inlet of tunnel

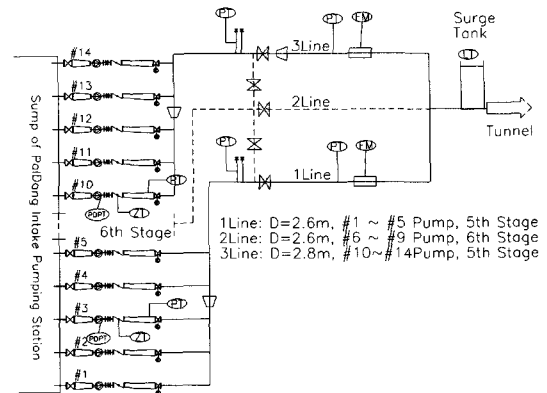


Fig. 2 Layout of the mechanical and experimental equipments for PalDang intake pumping station

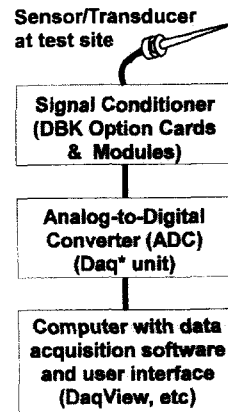


Fig. 3 Block diagram of the data acquisition system

블록선도를 나타내었다. 입력 및 수위 전송기 등에서 측정된 전기적인 신호 값은 검사기(signal conditioner, DBK11A)를 거쳐 아날로그-디지털 변환장치로 전송되고, 수집된 데이터는 노트북 PC에 설치된 DaqView

프로그램을 사용하여 현장에서 실시간으로 확인·분석된 후 저장된다. 한편, 현장 시험에 사용된 측정 기기는 본 시스템의 수격현상에 대한 수치해석 결과를 토대로 그 측정 범위가 정해지고, 시간에 따른 반응 속도가 빠른 기기들로 선정되었다.

## 2.2 수치해석 방법

관내의 비정상 유동을 1차원으로 가정할 때 지배방정식은 운동방정식과 연속방정식이며, 편미분으로 표시되는 지배방정식은 특성곡선법을 사용하여 유한차분방정식으로 변환시킬 수 있다.<sup>(6)</sup> 경계조건으로는 펌프, 밸브, 조압수조, 저수지 등이 관로 중에 연결되어 있는 경우에 대하여 관계식들을 구성하고, 초기조건으로서 펌프-관로계의 정상상태 변수 값을 구한 후 수치해석의 안정성이 만족되도록 시간증분,  $\Delta t$ 과 관 분할간격,  $\Delta x$ 을 정하여 수치계산하였다. 취수펌프의 정상운전시 현장에서 측정된 조건들을 수치계산의 초기조건과 일치시켰으며, 전용 전산프로그램인 WHAP<sup>(9)</sup>를 사용하였다.

## 3. 결과 및 검토

### 3.1 펌프 기동 및 정지에 따른 수격현상

펌프가 정상적으로 기동·정지되는 경우에도 관로에서는 수격현상이 발생하게 되는데, 이 때 토출밸브는 수격작용이 최소화되도록 적절히 운영되어야 한다.  $\phi 2,600$  도수관로에 연결된 취수펌프 1대가 단독으로 운전되고 있을 때 펌프 1대가 추가로 정상 기동(normal start)된 경우 주요 지점(펌프제어밸브 후단, 서지릴리프밸브실, 유량계실)에서 측정된 압력변동을 Fig. 4에 나타내었다.

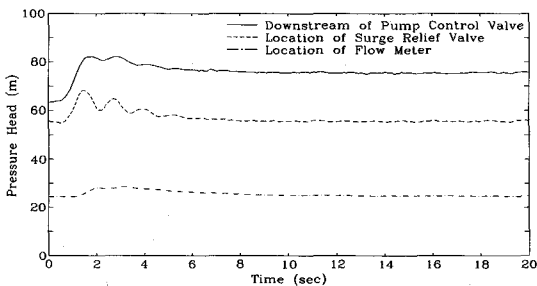


Fig. 4 Waterhammer test results for 1 pump start during 1 pump operation

취수장에서 압력수두는 약 82.2m까지 상승하고 있으나 이는 그다지 우려할 정도는 아니며, 관로 전체에 걸쳐 압력은 곧바로 안정되고 있음을 알 수 있다. 또한, 펌프의 정상적인 정지(normal stop) 시 토출밸브는 약 30초 동안 서서히 차단하여 수격작용을 경감시키도록 계획되었다.

### 3.2 슬램 서지

$\phi 2,600$  제1관로에 연결된 취수펌프 1대가 단독으로 운전되다가 갑자기 긴급 정지(emergency stop)된 경우 주요 지점에서 측정된 압력변동을 Fig. 5에 나타내었다. 취수펌프는 제1터널 입구부를 살짝 넘는 저장정·대유량( $70\text{m} \times 4.89\text{m}^3/\text{s}$ )으로 운전되었으며, 펌프 트립(trip) 후 관로 내 압력은 약 2.3초의 주기로 빈번하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 펌프제어밸브 후단에서 측정된 최저압력은 수격작용의 두 번째 주기 이후에 발생하였고, 측정된 최대압력수두는 103.2m로 수치계산에 의해 예측된 것(이상적인 체크밸브의 경우 91.4m)보다 높게 상승하였다. 일반적으로 펌프 트립 후 관로 내 최저압력과 최고압력은 첫 번째 주기에서 발생되는데, 본 시스템의 경우에는 펌프 트립에 의한 압력파(pressure wave)가 펌프제어밸브의 역류 차단에 의해 발생한 압력파와 중첩(superposition)되면서 수격작용이 더욱 심화되었기 때문인 것으로 판단된다.

펌프의 운전 대수가 증가할 경우 관로 내 유량과 압력이 증가하기 때문에 수격현상은 더욱 심각해짐을 쉽게 예측할 수 있으며, 이 때 역류의 발생 시간도 달라지는데 펌프제어밸브는 이러한 수리적인 조건(hydraulic condition)과는 무관하게 일정한 형태로 밸브개도를 조절할 수 있어야만 한다.

Fig. 6은  $\phi 2,600$  도수관로에 연결된 펌프 3대가 병렬로 운전(취수량= $10.14\text{m}^3/\text{s}$ )되다가 동시에 트립된 경우 주요 지점에서 측정된 압력변동을 나타내었다.

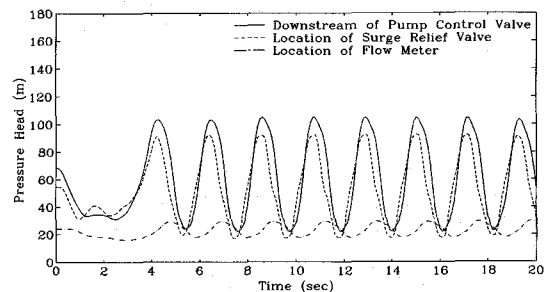


Fig. 5 Measured pressure heads after 1 pump trip

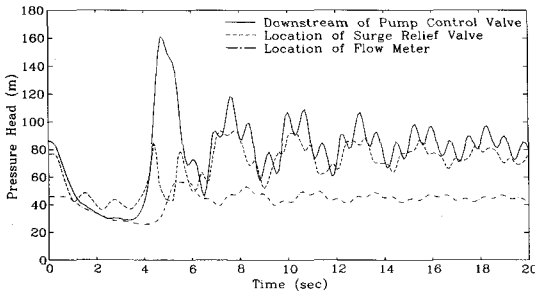


Fig. 6 Measured pressure heads after 3 pumps trip

펌프의 운전대수가 2대 및 3대로 증가한 경우 펌프 제어밸브 후단에서 첫 번째 주기의 최저압력수두는 각각 34.3m와 29.0m로 작용하였고, 수주(water column)의 관성효과로 그 발생시간(이는 역류가 발생한 시점으로 볼 수 있음)은 2.4초에서 3.4초로 증가하였음을 알 수 있다. 또한 밸브 후단에서 최대압력수두는 각각 152m와 161m까지 상승한 것으로 측정되었는데, 이는 당초 설계시 예측된 값(이상적인 체크밸브의 경우 142.2m)보다 다소 높은 수치이다. 밸브 후단에서 최저압력이 발생한 시점으로부터 수격압이 최대로 상승한 순간까지 걸린 시간은 취수펌프가 1대, 2대, 3대 트립된 경우 각각 1.7초, 1.6초, 1.3초로 점차 짧아지고 있는데, 이는 펌프제어밸브의 슬래밍 상태가 운전대수의 증가에 따라서 더욱 심각해지고 있음을 의미한다. 이러한 압력상승으로 인하여 도수관로 도중에 설치된 서지릴리프밸브는 취수펌프 2대 이상이 트립된 경우 Fig. 7과 같이 작동하였으며, 이 때 압력수를 도수관로 밖으로 방출함으로써 두 번째 주기 이후의 수격작용은 상당히 완화되었음을 알 수 있다.

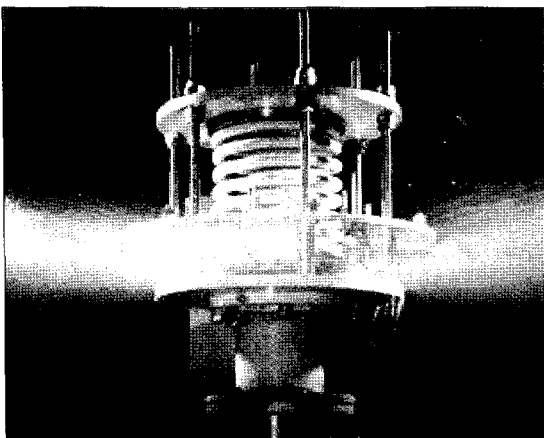


Fig. 7 Opening of the surge relief valve

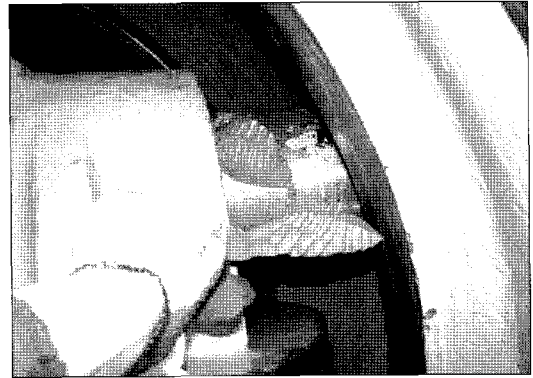


Fig. 8 Damage of the pump control valve

한편, 펌프제어밸브의 상태가 나빠서 역류가 상당히 커진 후 갑자기 물에 유도되어 밸브가 닫히면 슬램 서지(slam surge)가 유발되어 압력 상승이 매우 커지기 때문에 펌프제어밸브를 사용할 때에는 이러한 사항을 신중히 검토하여야 한다. 즉, 펌프제어밸브를 통해서 물이 역류하는 동안에 밸브 디스크(disk)는 유동의 저항과 카운터 웨이트의 하중 그리고 수압 등에 의해 막대한 힘을 받게 되는데, 밸브 디스크를 조절하는 유압 기구가 불량한 경우 이 역류가 갑자기 차단되면 과도한 수격압이 발생하므로 각별한 주의가 필요하다. 실제로  $\phi 2,600$  관로의 펌프 4대가 트립된 경우 밸브 후단에서 압력수두는 178m까지 상승하였고, 이러한 슬래밍에 의해 펌프제어밸브의 축은 Fig. 8과 같이 손상을 입은 바 있다. 또한, 서지릴리프밸브실의 압력은 펌프장과 약 0.2초의 위상차를 나타내고 있는데, 이는 서지릴리프밸브실이 펌프제어밸브의 후단으로부터 약 200m (=위상차 $\times$ 압력파전파속도=0.2s $\times$ 960m/s=192m) 떨어져 있다는 사실을 증명해주고 있다. 펌프제어밸브에 의한 슬래밍이 발생한 경우 압력파는 릴리프실 쪽으로 전파되며, 서지릴리프밸브는 이러한 위상차(설치위치)에 의한 시간동안 지연되어 작동되기 때문에 밸브후단에서의 수격압을 더욱 효과적으로 완화시켜주지 못하고 있다. 따라서 서지릴리프밸브는 취수펌프장의 구내 배관이나 밸브 후단으로부터 가까운 지점에 설치하는 것이 바람직하다.

### 3.3 펌프 제어 밸브

팔당 취수펌프장의 신뢰성 및 안전성을 확보하기 위하여 펌프제어밸브의 축을 진량 교체한 후 밸브의 유압 실린더에 대한 개선 작업이 약 2년여에 걸쳐 이루어졌다.

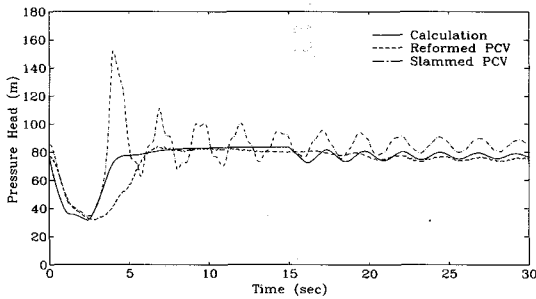


Fig. 9 Comparison of measured and predicted pressure heads at downstream of PCV for 2 pumps trip

Fig. 9는 펌프 2대가 트립된 경우 밸브 후단에서의 압력변동에 대하여 펌프제어밸브 개선 전후를 서로 비교하여 나타내었다. 유압기구를 개선한 후 펌프제어밸브의 폐쇄형태(closing mode)는 상당히 달라졌고, 취수펌프장에서 측정된 압력변동은 수치해석으로 예측한 결과와 정성적으로 매우 유사하게 나타났으며, 슬래밍 현상은 완전히 사라진 것으로 판단된다. 보다 정확한 수치계산을 위해서는 시간에 따른 펌프제어밸브의 개구면적(opening area)과 개구면적에 따른 손실계수 등의 자료가 확보되어야 할 것으로 사료된다.  $\phi 2,600$  mm 도수관로에 연결된 취수펌프 1대~4대가 트립되었을 때 측정된 값을 Fig. 10에 각각 나타내었다.

Table 1과 Table 2는 펌프제어밸브 개선에 따른 팔당취수장에서의 최대·최소압력수두를 요약하여 나타내었다. 펌프운전대수가 증가할수록 취수펌프장에서 최대압력은 증가하고 최저압력은 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 압력상승량은 그다지 크지 않아 어느 경우에도 서지릴리프밸브는 작동하지 않았으며, 펌프제어밸브를 통한 역류에 의해 취수펌프는 한참 역회전을 일으킨 것으로 관측되었다. 또한, 관로 내 수격작용은 유속과 밀접한 관련이 있어  $\phi 2,800$ 보다  $\phi 2,600$ 도 수관로에서 수격작용이 더욱 심각한 것으로 나타났다.

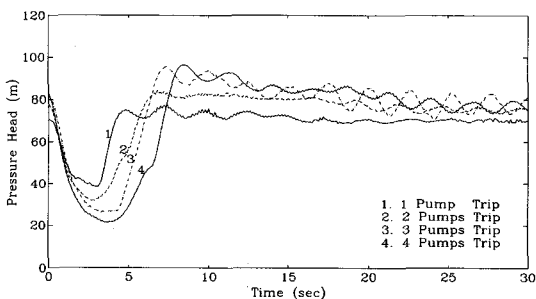


Fig. 10 Variations of the measured pressure head at downstream of PCV with the number of pumps

Table 1 Measured maximum pressure head at PalDang IPS with the pump control valve

| Number of Pumps                       | 1     | 2     | 3     | 4     |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Slammed PCV $\phi 2,600$ (1999/2/3)   | 103.2 | 152.0 | 161.4 | 178.0 |
| Reformed PCV $\phi 2,600$ (2000/12/4) | 76.8  | 83.6  | 95.6  | 96.5  |
| Reformed PCV $\phi 2,800$ (2000/12/5) | 72.9  | 74.6  | 81.1  | 89.6  |

Table 2 Measured minimum pressure head at PalDang IPS with the pump control valve

| Number of Pumps                       | 1    | 2    | 3    | 4    |
|---------------------------------------|------|------|------|------|
| Slammed PCV $\phi 2,600$ (1999/2/3)   | 17.0 | 34.3 | 29.0 | 24.3 |
| Reformed PCV $\phi 2,600$ (2000/12/4) | 38.5 | 30.2 | 26.1 | 21.4 |
| Reformed PCV $\phi 2,800$ (2000/12/5) | 42.0 | 31.4 | 27.2 | 30.4 |

당초 설계시 도수관로는  $\phi 2,600 \times 2$ 열과  $\phi 2,800 \times 1$ 열을 통합·운영하도록 계획되었기 때문에 각각의 관로를 독립적으로 운영할 경우에는 취수펌프의 운전대수는  $\phi 2,600$ 에서 3대( $\times 2$ 열),  $\phi 2,800$ 에서 4대로 제한하여 총 10대를 운영하도록 계획하는 것이 바람직하다.

또한, 취수펌프장의 구내 배관 및 밸브류 등의 설계 압력(또는 사용압력)은 16~20 K로 결정되었고, 현장시험결과  $\phi 2,600$  제1관로에 연결된 취수펌프 3대가 긴급 정지될 때와  $\phi 2,800$  제3관로의 펌프 4대가 긴급 정지된 경우 취수장에는 각각 9.56, 8.96 K의 수격압이 작용하므로 팔당 취수펌프장의 안전성에는 별다른 문제가 없는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

수도권 광역상수도 5단계 사업의 일환으로 완공된 팔당 취수펌프장에서 수격현상에 대한 현장 시험을 수행하고, 수치해석결과와 비교·분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초기에 펌프제어밸브는 당초 계획된 제어 모드로 단히지 못하였고, 이에 따라 큰 역류를 허용하면서 순간적으로 밸브가 닫히는 슬래밍 현상을 일으킨 것으로 사료된다. 이 때 펌프 트립에 의한 압력파가 역류 차단에 의해 발생한 압력파와 중첩되면서

수격작용이 심화되었기 때문에 수격압은 더욱 상승하였고, 이로 인하여 펌프제어밸브의 축이 파손된 것으로 판단된다. 또한, 서지릴리프밸브는 설치 위치에 따라서 작동이 지연될 수 있으므로 가급적 펌프장의 구내 배관이나 펌프 출구로부터 가까운 지점에 설치하는 것이 바람직하다.

- (2) 펌프제어밸브의 유압기구를 개선한 후 밸브의 폐쇄 형태는 상당히 달라졌으며, 취수펌프장에서 측정된 압력변동은 수치해석으로 예측한 결과와 정성적으로 매우 유사하였고, 슬래밍 현상은 완전히 사라진 것으로 나타났다. 현장시험결과  $\phi 2,600$  제1관로에 연결된 취수펌프 3대가 긴급 정지될 때와  $\phi 2,800$  제3관로의 펌프 4대가 긴급 정지된 경우 취수장에는 각각 9.56, 8.96 K의 수격압이 작용하므로 팔당 취수펌프장의 안전성에는 별다른 문제가 없는 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 효성에바라(주)의 지원 및 한국수자원공사의 도움으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 한국수자원공사, 1995, 수도권 광역상수도 5단계 사업, 실시설계 보고서.
- (2) 환경부, 1997, 상수도 시설기준, 한국수도협회.
- (3) 日本水道協會, 1997, 수도용 밸브 핸드북.
- (4) Sanks, R. L., 1998, Pumping Station Design, 2nd ed., Butterworth-Heinemann.
- (5) 김경엽, 유택인, 2000, "팔당 취수펌프장의 수격현상에 관한 수치해석적 연구," 유체기계저널, 제3권, 제4호, pp. 52~58.
- (6) Thorley, A. R. D., 1983, "Dynamic Response of Check Valves," *4th International Conference on Pressure Surges*, BHRA Fluid Engineering, Bath, England, pp. 231~242.
- (7) Valibouse, B. S. and Verry, Ph. H., 1983, "Modeling Check Valve Slamming," *4th International Conference on Pressure Surges*, BHRA Fluid Engineering, Bath, England, pp. 263~273.
- (8) Wylie, E. B. and Streeter, V. L., 1993, *Fluid Transients in Systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- (9) 김경엽, 2001, "에어 챔버가 설치된 송수관로에서의 수격현상," 대한기계학회 논문집(accepted).