

## 가압펌프장의 수격완화설비에 대한 보수·보강 사례

김상균\* · 이동근\* · 이계복\*\* · 김경엽\*\*\*

### Case Study of Repair Works on Surge Suppression Device for Booster Pumping Station

Sang-gyun Kim\*, Dong-keun Lee\*, Gye-bok Lee\*\* and Kyung-yup Kim\*\*\*

*Key Words:* Waterhammer(수격현상), Pump control valve(펌프제어밸브), Surge relief valve(서지릴리프밸브), Surge tank(조압수조), Slam surge(슬램서지), Air chamber(에어챔버), Field test(현장시험)

#### ABSTRACT

When the pumps are started or stopped for the operation or tripped due to the power failure, the hydraulic transients occur as a result of the sudden change in velocity. The field tests on the waterhammer were carried out for Pangyo booster pumping station in which had six booster pumps and two in-line pumps with the motor of output 1,700 kW, respectively. The booster pumping station was equipped with the pump control valve as the main surge suppression device, and the surge relief valve as auxiliary one. But the pump control valve had not early controlled in the planned closing mode, the slamming occurred to the valve of which abruptly closed during the large reverse flow. Because the positive pressure wave caused by the pump failure was superposed on the slam surge, the upsurge increased so extremely that the pump control valve was damaged. After the air chambers were additionally installed in the booster pumping station, it was proved that the water supply system acquire the safety and reliability on the pressure surge.

#### 1. 서론

우리나라는 1960년대 제3공화국 시대에 국토개발이 본격화되면서 건설부의 신설과 함께 수자원 개발이 본격적으로 추진되었다. 1965년, 수자원개발 10개년 계획을 수립하고, 1966년 특정 다목적댐법 제정과 함께 이 법의 시행기구로서 한국수자원공사가 설립되었다<sup>(1)</sup>.

1962년 시작된 제1차 경제개발 5개년 계획 이후 개발 사업에 필요한 용수를 원활하게 공급하기 위하여 다목적댐과 큰 하천 등 유량이 풍부한 수원에서 일괄 취수하여 광범위한 지역으로 필요한 용수를 동시에 공급하는 국가 주도형 상수도 건설이 본격적으로 추진되었다. 1973년 수도권 광역상수도 건설을 필두로 1976년 금강 광역상수도, 1979년에는 낙동강 광역상수도를 각각 착공함으로써 대단위 상수도 개발의 시대가 전개되었다. 이에 따라 1966년 당시 우리나라 상수도 보급율은 약 22%에서 2002년 88.7%로 급격히 증가하였으며, 2002년말 현재 우리나라 수도물 생산시설 용량은 하루 2,856만톤, 급수량은 하루 1,559만톤이

\* 한국수자원공사

\*\* 충북대학교 기계공학과

\*\*\* 한국산업기술대학교 기계공학과

책임저자 E-mail : ksgy@kowaco.or.kr

고, 이 중 한국수자원공사가 관리하는 광역상수도는 시설용량 기준으로 52.8%, 급수량 기준으로 46.5%를 차지하고 있다<sup>(2)</sup>.

한편, 수도권 광역상수는 1979년 7월 1단계 사업의 통수에 이어서 1999년 11월 5단계 사업의 준공에 이르기까지 팔당댐의 물을 취수하여 수도권 전역에 생활 및 공업용수를 원활히 공급하기 위하여 단계별로 추진되었다. 2002년말 현재 수도권 광역상수의 시설용량은 765만톤/일이고, 급수량은 348만톤/일에 이르고 있다. 이처럼 수도권 광역상수는 대규모 장거리 도·송수관로를 통하여 용수를 공급해야 하기 때문에 안정적인 용수 공급을 위해서는 수격현상에 대한 철저한 분석과 그 대비책을 확실히 갖추는 것이 매우 중요하다.

실제로 5단계 사업의 일환으로 완공된 판교 가압펌프장에서는 수격현상에 관한 현장 시험이 여러 차례 이루어졌는데, 준공 초기에 제어용 밸브의 슬래밍이 심각하여 밸브의 구동장치가 파손되는 피해가 발생하였다. 이후 다각적인 검토 끝에 에어챔버가 가압펌프장에 보완설치되었고, 수격현상에 대한 현장 시험이 2003년 11월에 다시 수행되었다. 본 연구는 수격작용에 관한 수치해석과 현장시험 등을 통해 판교 가압장에서 발생한 사고 원인을 조사·분석하고, 가압펌프장의 신뢰성 및 안전성 여부를 판단하는 것을 목적으로 한다<sup>(3)</sup>.

## 2. 수격현상 실험

### 2.1 시스템 구성

판교 가압장은 5단계 사업에서 746,550 m<sup>3</sup>/d의 용수를 공급하고, 6단계에서 504,450 m<sup>3</sup>/d(총 1,251,000 m<sup>3</sup>/d)의 시설용량이 확장되도록 계획·설계되었다. 판교 가압장에서 수지 정수장까지의 관로 형상은 Fig. 1에 나타내었는데, 도수관로의 총 길이는 11.3 km이다. 5단계 사업에서 2,300 mm 도수관로 1열을 사용하고, 6단계에서는 1,800 mm 1열을 5단계 관로와 나란히 부설할 예정이다. 이 용수량을 공급하기 위해서 양쪽흡입 원심펌프는 5단계에서 6대, 6단계에서 9대씩 병렬로 운전되는데, 이 펌프가 갑작스런 정전 등으로 비상 정지되었을 때 발생하는 수격작용이 일반적으로 가장 심각하다.

도수관로 도중에는 2.6 m×1열의 강관이 존재하는

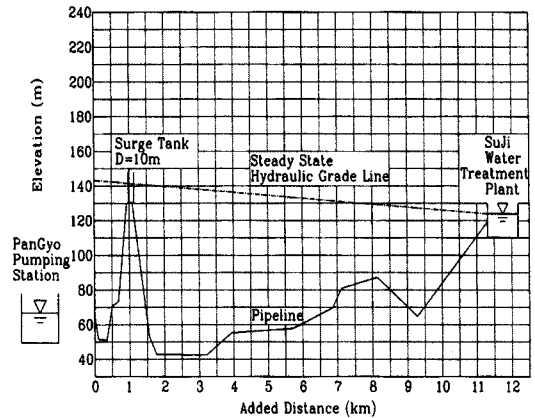


Fig. 1 Longitudinal pipeline profile of the pumping station

데, 이 구간은 관로의 형상이 급격히 상승하여 그 위치가 정상상태 수력구배선에 매우 근접해진다. 정상운전 중인 펌프로의 동력이 갑자기 차단될 때, 이 구간은 관 내 압력이 물의 포화증기압 이하로 낮아져 증기공동이 형성되며 결국 수주분리현상이 발생한다. 관 내 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴이 일어날 수 있으며, 증기공동에 의해 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 도수관로 및 부대설비에 손상을 입힐 우려가 있다. 이러한 수격작용을 완충시켜주기 위하여 도수관로 정점부에는 직경 10 m의 조압수조를 설치하였다. 5단계 시설용량 기준의 펌프 설비 및 수격완화설비의 제원은 다음과 같다.

#### 1) 펌프 설비

- 펌프 설치대수 = 8 sets (예비용 2대 포함)
- 규정 양정 = 79 m
- 규정 유량 = 96.5 m<sup>3</sup>/min
- 규정 회전속도 = 710 rpm (10 pole)
- 전동기 출력 = 1,700 kW
- 관성 모멘트 = 255 kg·m<sup>2</sup>

#### 2) 펌프제어밸브(pump control valve; PCV)

- 구경 = 700 mm
- 설치 대수 = 펌프마다 1 set

#### 3) 서지릴리프밸브(surge relief valve)

- 노즐 구경 = 125 mm
- 설치 대수 = 4 sets
- 개방 압력 수두 = 99 m

#### 4) 에어챔버(air chamber)

- 설치 대수 = 2 sets

- 압력용기 체적 = 30 m<sup>3</sup>
  - 연결관 직경 = 0.5 m
  - 측관 직경 = 0.35 m
  - 오리피스 내경 = 0.3 m
- 5) 공기밸브(slow closing air/vacuum valve)
- 설치 위치 = 가압장과 조압수조 사이 3지점
  - 구경 = 300 mm
- 6) 조압수조(surge tank)
- 설치 위치 = 관로 정점부
  - 직경 = 10.0 m
  - 바닥 표고 = 131.6 m
  - 상단 표고 = 148.0 m
  - 연결관 직경 = 2.6 m
- 7) 저수조 수위
- 펌프장 흡수정 평균수위(M.W.L) = 66.85 m
  - 정수장 착수정 고수위(H.W.L) = 124.0 m

## 2.2 실험 장치

Fig. 2는 수격현상에 대한 현장시험을 수행하기 위해 구성된 계측기의 배치도이다. Fig. 3은 아날로그-디지털 변환장치(analog-to-digital converter, DaqBook/ 100)의 블록선도를 나타내었다. 압력전송기와 수위전송기 등에서 측정된 전기적인 신호 값은 검사기(signal conditioner, DBK11A)를 거쳐 아날로그-디지털 변환장치로 전송되고, 수집된 데이터는 프로그램(DaqView)을 사용하여 현장에서 실시간으로 확인·분석된 후 저장된다. 한편, 현장시험에 사용된 측정 기기는 본 시스템의 수격현상에 대한 수치해

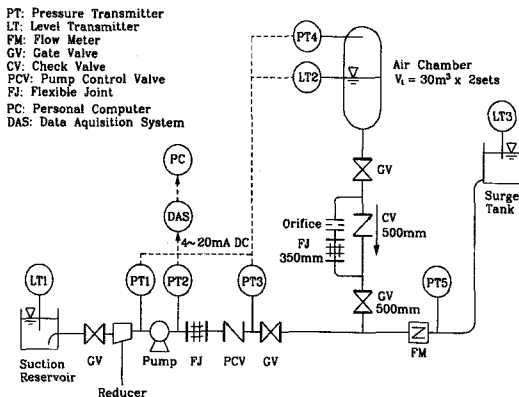


Fig. 2 Schematic diagram of the measuring layout

석 결과를 토대로 그 측정 범위가 정해지고, 시간에 따른 반응 속도가 빠른 기기들로 선정되었다<sup>(4)</sup>.

## 2.3 수치해석 방법

관내의 비정상 유동을 1차원으로 가정할 때 지배방정식은 운동방정식과 연속방정식이며, 편미분으로 표시되는 지배방정식은 특성곡선법을 사용하여 유한차분방정식으로 변환시킬 수 있다. 경계조건으로는 펌프, 밸브, 에어챔버, 조압수조, 저수지 등이 관로 중에 연결되어 있는 경우에 대하여 관계식들을 구성하고, 초기조건으로 펌프-관로계의 정상상태 변수 값을 구한 후 수치해석의 안정성이 만족되도록 시간 증분,  $\Delta t$ 과 관 분할 간격,  $\Delta x$ 을 정하여 수치계산을 수행하였다. 가압펌프의 정상운전 시 현장에서 측정된 조건들을 수치계산의 초기 조건과 일치시켰으며, 전용 전산프로그램인 WHAP<sup>(5)</sup>를 사용하였다.

## 3. 결과 및 검토

### 3.1 제어용 밸브를 사용한 경우

수도권 광역상수도 5단계 사업의 실시설계<sup>(6)</sup> 시 관교 가압펌프장을 수격작용으로부터 보호하기 위한 주 설비로는 팔당 취수펌프장<sup>(7),(8)</sup>과 마찬가지로 펌프 제어밸브가 선정되었고, 서지릴리프밸브는 펌프제어밸브가 잘못 동작했을 경우를 대비한 보조설비로서 설치되도록 계획하였다. 에어챔버가 보완설치되기 전 수도권 수도건설단에서는 나홀(2001.4.16~19)간에 걸

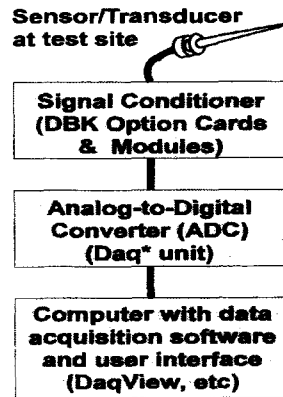


Fig. 3 Block diagram of the data acquisition system

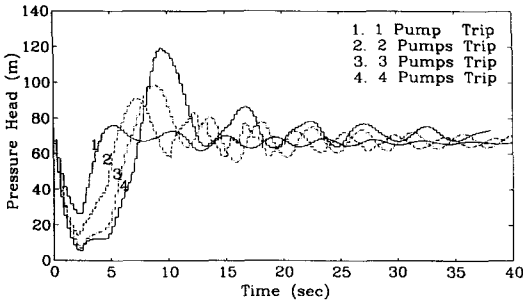


Fig. 4 Variations of the measured pressure head at the exit of PCV with the number of pumps

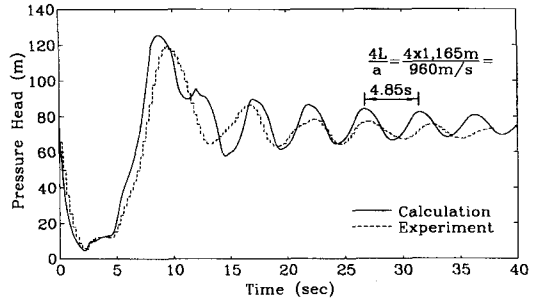


Fig. 6 Comparison of measured and predicted pressure heads for 4 pumps trip without the air chamber

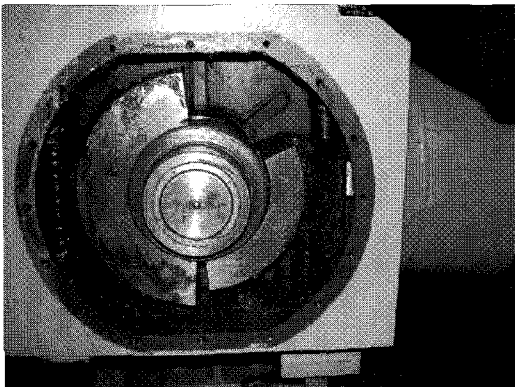


Fig. 5 Damage of the pump control valve

처 판교 가압장에서 수격현상에 관한 현장시험을 수행한 바 있는데, 이 때 측정된 실험결과를 요약하여 Fig. 4에 나타내었다. 준공 초기에 밸브 하류에서 최저압력수두는 펌프 4대 트립 시 5.6m로 거의 대기압 가까이 떨어졌으며, 최대압력수두는 119m까지 상승한 것으로 측정되었다.

이 때 펌프제어밸브는 당초 계획된 제어 모드로 닫히지 못하였고, 이에 따라 큰 역류를 허용하면서 순간적으로 밸브가 닫히는 슬래밍 현상을 일으킨 것으로 관측되었다. 여기서 펌프 트립에 의한 압력파와 역류 차단에 의해 발생한 압력파와 서로 중첩되면서 수격작용이 심화되었기 때문에 수격압은 더욱 상승하였고, 이로 인하여 밸브의 구동장치가 Fig. 5와 같이 파손되는 사고가 발생하였다. 이에 대한 대책으로 밸브의 유압기구(dashpot)를 보완하려는 시도도 있었으나 여의치 않았고, 펌프의 운전대수가 6대로 증가하는 경우 가압장에서는 부압이 발생할 우려가 있어 다운서지 및 업서지를 동시에 제어할 수 있는 에어챔버를 보완 설치하는 것으로 의견이 모아졌다.

한편, 당시 작성된 시험보고서를 토대로 초기조건을 유추한 후 펌프 4대가 비상 정지된 경우에 대하여 수치계산을 수행하였다. Fig. 6은 밸브 하류에서의 압력 변동을 계산 결과와 측정 값을 서로 비교하여 나타내었는데, 수치계산결과 밸브에서 슬래밍이 발생한 사실이 재차 확인되었다. 밸브가 완전히 닫힌 후 밸브와 조압수조 사이의 도수관로 내 유체는 마치 액체 스프링과 같이 약 4.85초 주기로 서징(surging)하고 있으며, 시간이 지남에 따라 압력파는 관로 내 마찰 손실에 의해 점차 소산되고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 에어챔버를 보완 설치한 경우

#### 3.2.1 펌프의 정상적인 기동에 따른 수격현상

원심펌프의 정상적인 기동(normal start)은 전동기의 기동 전류를 최소화하기 위하여 펌프 출구측 밸브를 완전히 닫은 상태에서 펌프를 기동시킨 후 밸브를 서서히 개방하는 방법이 일반적이다. 본 시스템의 경우, 펌프 출구측 제어밸브를 완전히 닫은 상태에서 펌프를 기동시키고, 펌프가 규정 회전속도에 도달하였을 때 밸브를 열기 시작하여 약 5초 후 밸브디스크가 43%까지 개방되는 기동 방식을 취하였다. 이와 같이 펌프 1대(3호기)가 기동되는 경우 가압펌프장에서 측정된 압력 변동을 Fig. 7에 나타내었다. 제어밸브 하류에서 압력수두는 초기에 65.1m의 정수압이 작용하고 있는데, 밸브가 열리는 과정 중에 83.3m까지 상승하였다가 곧바로 65.7m 정도에서 안정되고 있음을 알 수 있다. 이처럼 펌프의 기동 시 제어용 밸브가 비교적 빨리 열렸음에도 불구하고 수격작용이 그다지 심각하지 않았던 원인은 펌프 출구측에 보완설치된 에어챔버 때문인 것으로 판단된다<sup>9)</sup>.

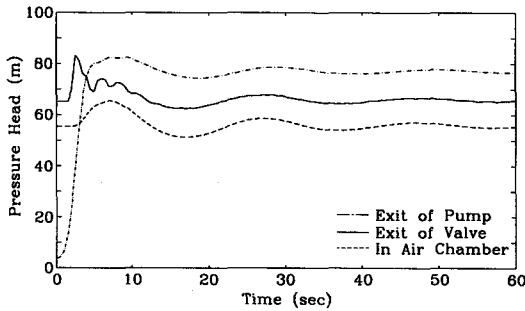


Fig. 7 Measured pressure heads for a pump normal start with the air chamber

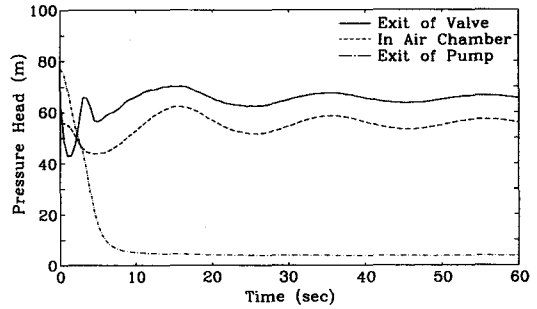


Fig. 8 Measured pressure heads for 1 pump trip with the air chamber

### 3.2.2 펌프 1대 긴급 정지에 따른 수격현상

3호기 펌프가 단독으로 운전되고 있을 때 비상 정지 시험을 수행하였다.  $\phi 2,300$  mm 도수관로에 연결된 가압펌프 1대를 단독으로 운전하면서 측정된 주요 지점에서의 정상상태 값을 Table 1에 나타내었다. 펌프제어밸브는 슬래밍 현상을 줄이기 위하여 유압실린더가 밸브개도 15%에서 쿠션(cushion) 작용을 일으킬 수 있도록 유압기구의 스톱 밸브를 조정하였다. 또한, 모터의 과부하 및 조압수조를 통한 역류를 사전에 방지하기 위하여 밸브는 42.9%로 반쯤만 열었다. Fig. 8은 가압펌프 1대가 긴급 정지되었을 때 측정된 실험결과를 나타내었다. 펌프제어밸브에서는 여전히 슬래밍 현상이 발생하였으나, 밸브디스크는 상당히 부드럽게 닫혔고, 충격음 및 채터링(chattering) 역시 현격히 감소한 것으로 관측되었다.

### 3.2.3 펌프 5대 긴급 정지에 따른 수격현상

현장 시험 당시, 평택 계통의 용수 수요가 공급 목

표량에 크게 미치지 못하여 판교 가압장의 펌프 8대 중 2대(#1, 5호기)는 저장정 펌프(규정 양정 72 m)로, 또 다른 2대(#7, 8호기)는 인라인 펌프의 형태로 변경되어 운영되었다. 그리고 #6, 7호기 펌프는 수리 중에 있어 당시 상황에서 가동 가능한 범위 내로 현장 시험을 수행하였다. 이에 따라 펌프 5대(#2, 3, 4, 5, 8호기)가 병렬로 운전되고 있을 때 비상 정지 스위치를 동시에 눌러 펌프들이 긴급 정지되는 상황을 재현하여 현장 시험을 수행하였다. Table 2는 주요 지점에서 측정된 정상상태 값을 보여주고 있다. 초기에 수지 정수장 쪽으로  $\phi 2,300$  mm 도수관로를 통해 5단계 시설용량의 91.1%에 상당하는 680,000 m<sup>3</sup>/d의 용수가 공급된 것으로 측정되었다. Fig. 9는 가압펌프 5대가 긴급 정지되었을 때 제어용 밸브 하류와 에어챔버 내에서 측정된 압력수두 변동을 나타내고 있다. 펌프 트립 후 제어용 밸브(버터플라이형 체크밸브)는 밸브디스크의 구조 및 관성으로 인하여 역류가 발생하는 순간에 닫히지 못하고 약간의 역류를 허용하면서 닫히므로 슬래밍 현상이 여전히 발생하였다<sup>(10)</sup>. 이 슬램 서지는 에어챔버가 설치됨으로써 주기

Table 1 Measured value of steady state conditions for 1 pump operation

Channel Number	계측 명칭	단위	정상상태 측정값
CH1	펌프 흡입측 압력수두	m	2.8
CH2	펌프 토출측 압력수두	m	77.1
CH3	펌프제어밸브의 개도	%	42.9
CH4	펌프제어밸브 하류측 압력수두	m	66.0
CH5	에어챔버 내 압력수두	m	56.0
CH6	에어챔버 내 수위	%	54.7
중앙 제어실	주 관로 압력수두	m	74.7
	조압수조 내 수위	m	128.4
	주 관로를 통한 유량	m <sup>3</sup> /h	5,500

Table 2 Measured value of steady state conditions for 5 pumps operation

Channel Number	계측 명칭	단위	정상상태 측정값
CH1	펌프 흡입측 압력수두	m	3.5
CH2	펌프 토출측 압력수두	m	80.4
CH3	펌프제어밸브의 개도	%	42.7
CH4	펌프제어밸브 하류측 압력수두	m	69.9
CH5	에어챔버 내 압력수두	m	59.3
CH6	에어챔버 내 수위	%	55.3
중앙 제어실	주 관로 압력수두	m	77.3
	조압수조 내 수위	m	129.6
	주 관로를 통한 유량	m <sup>3</sup> /h	28,340

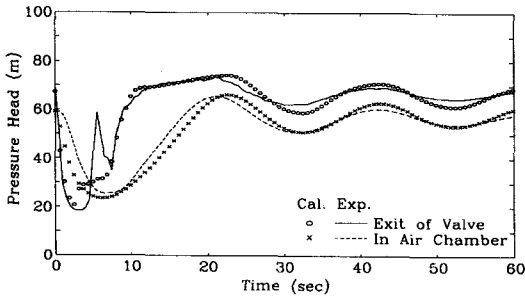


Fig. 9 Comparison of measured and predicted pressure heads for 5 pumps trip with the air chamber

가 매우 길어진 다운서지(압력이 떨어지는) 과정 중에 발생하였기 때문에 그다지 우려할 상황은 아닌 것으로 분석되었다. 제어용 밸브가 닫힌 후 밸브 하류에서 최대 압력수두는 73.6 m까지 상승하였고, 수격현상의 주기는 약 21.5초로 측정되었다. 또한, 가압펌프는 에어챔버를 설치하기 전과는 달리 역회전을 일으키지 않았고, 서지릴리프밸브 역시 작동되지 않았음이 현장시험결과 확인되었다.

현장 시험 시 계측된 값을 토대로 초기 조건을 작성한 후 가압펌프 5대가 긴급 정지된 경우에 대하여 수치계산을 수행하였다. 수치해석결과 얻어진 밸브 하류 및 에어챔버 내 압력 변동을 측정값과 서로 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 수치계산에서는 밸브의 슬래밍을 고려하지 않았기 때문에 밸브 하류의 압력은 첫 번째 다운서지 과정에서 실험결과와 다소 차이를 보이고 있으나, 긴 주기의 압력파에 의한 수격현상은 합리적으로 모사하고 있음을 알 수 있다. Table 3은 펌프 운전대수에 따른 에어챔버 내 최대·최소 압력과 그 발생시간을 서로 비교하여 나타내었다. 펌프 운전대수가 증가할수록 수주의 관성이 커져 수격현상의 주기는 조금씩 길어지고, 다운서지와 업서지에 의한 압력 변동도 점차 증가하고 있다. 그리고, 수치계산결과는 수격현상의 1~2주기까지 측정값과 잘 일치하며, 펌프-관로계에 작용하는 최대·최소압력 및 그 발생시간도 합리적으로 예측하고 있다.

### 3.3 에어챔버 설치 전후의 비교·검토

에어챔버의 설치 효과를 알아보기 위해 펌프 운전대수에 따라 밸브 하류에서 측정된 최대·최소 압력과 그 발생시간을 서로 비교하여 Table 4에 나타내었다. 에어챔버가 보완설치된 후 밸브 하류에서 최저 압

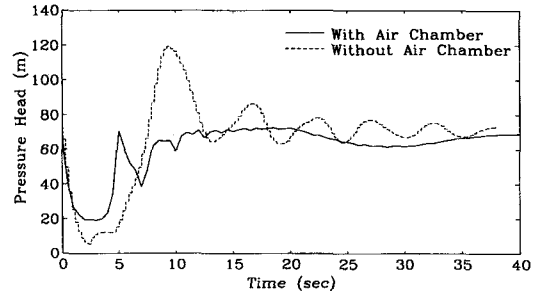


Fig. 10 Comparison of measured pressure head for 4 pumps trip before and after supplementation

력수두는 펌프 5대 트립 시 18.4 m까지 떨어졌고, 최대 압력수두는 73.6 m까지 상승한 것으로 측정되었다. 이는 준공 초기의 상황과 비교하면 현격한 차이를 보이고 있다. Fig. 10은 가압펌프 4대가 긴급 정

Table 3 Comparison of measured and predicted pressure heads in the air chamber with the number of pumps

	Number of Pumps (set)	Minimum Pressure Head (m)	Occurring Time (sec)	Maximum Pressure Head (m)	Occurring Time (sec)
Exp.	1	43.8	4.5	62.3	15.5
	2	36.2	5.0	64.7	16.5
	3	30.8	5.5	64.7	18.0
	4	26.9	5.5	64.9	19.5
	5	25.4	6.5	65.5	21.0
Cal.	1	46.2	4.3	63.5	14.1
	2	37.3	4.7	64.8	15.8
	3	31.7	5.1	64.5	18.0
	4	27.3	5.4	64.5	19.7
	5	24.6	5.9	64.2	21.3

Table 4 Comparison of measured pressure heads at the exit of PCV before and after supplementation

	Number of Pumps (set)	Minimum Pressure Head (m)	Occurring Time (sec)	Maximum Pressure Head (m)	Occurring Time (sec)
With Air Chamber (2003/11/27)	1	42.9	1.0	70.2	14.5
	2	30.7	2.0	72.0	16.0
	3	22.7	2.0	72.0	16.5
	4	19.2	3.0	72.7	18.5
	5	18.4	3.5	73.6	21.0
Without Air Chamber (2001/4/18)	1	28.5	2.0	78.3	5.1
	2	14.3	2.2	91.2	7.3
	3	7.1	2.5	98.6	9.0
	4	5.6	2.5	119.3	9.6

지된 경우 에어챔버 설치 유무에 따른 밸브 하류측 압력변동을 서로 비교하여 나타내고 있다. 본 시스템에서 에어챔버는 다운서지 뿐만 아니라 업서지도 매우 효과적으로 완화시켜주고 있음을 알 수 있다. 이를 종합적으로 검토해 볼 때 가압펌프장에 에어챔버가 보완설치됨으로써 시스템의 안전성이 크게 향상된 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

수도권 광역상수도 5단계 사업의 일환으로 완공된 판교 가압펌프장에서 수격현상에 관한 현장 시험을 수행하고, 수치해석 결과와 비교·분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제어용 밸브는 펌프 트립 후 밸브디스크의 구조 및 관성으로 인하여 역류가 발생하는 순간에 닫히지 못하고 약간의 역류를 허용하면서 닫히기 때문에 슬래밍 현상이 여전히 발생하였다. 그러나, 이 슬랩 서지는 에어챔버가 설치됨으로써 주기가 매우 길어진 다운서지 과정 중에 발생하므로 그다지 우려할 상황은 아닌 것으로 분석되었다.
- 2) 에어챔버가 보완설치된 후 밸브 하류에서 최저 압력수두는 펌프 5대 트립 시 18.4 m까지 떨어졌고, 최대 압력수두는 73.6 m까지 상승한 것으로 측정되었다. 가압펌프는 에어챔버를 설치하기 전과는 달리 역회전을 일으키지 않았고, 서지릴리프밸브 역시 작동되지 않았음이 현장시험 결과 확인되었다.
- 3) 펌프의 운전대수가 증가할수록 수주의 관성이 커져 수격현상의 주기는 조금씩 길어지고, 다운서지와 업서지에 의한 압력변동도 점차 증가하는 것으로 나타났다. 수치계산 결과는 수격현상의 1~2주기까지 측정값과 잘 일치하였고, 펌프-관로계에 작용하는 최대최소압력 및 그 발생시간도 합리적으로 예측하였다.
- 4) 가압펌프장에 보완설치된 에어챔버는 5단계 시설 용량에 대하여 도수관로에서 발생하는 수격작용을 매우 효과적으로 완화시키고 있음이 현장시험 및 수치해석을 통하여 확인되었다.

#### 후 기

본 연구는 한국수자원공사, 효성EBARA(주), (주)한창테크의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 건설교통부, 2001, 수자원 장기종합계획.
- (2) 한국수자원공사, 2004, 물과 미래.
- (3) 김상균, 이계복, 김경엽, 2004, "직결식 펌프의 수격현상," 유체기계연구개발발표회 논문집 pp. 208~216.
- (4) 한국수자원공사, 2004, "수격작용 해석 및 실증을 통한 펌프장 안정성 확보방안," 연구용역 보고서.
- (5) 김경엽, 2002, "에어챔버가 설치된 송수관로에서의 수격현상," 대한기계학회논문집 B권, 제26권, 제2호, pp. 177~183.
- (6) 한국수자원공사, 1995, "수도권 광역상수도 5단계 사업," 실시설계보고서.
- (7) 김경엽, 유택인, 2000, "팔당 취수펌프장의 수격현상에 관한 수치해석적 연구," 유체기계저널, 제3권, 제4호, pp. 52~58.
- (8) 김경엽, 오상현, 2001, "펌프제어밸브를 사용한 취수펌프장에서의 수격현상," 유체기계저널, 제4권, 제4호, pp. 16~21.
- (9) Stephenson, D., 2002, "Simple Guide for Design of Air Vessels for Water Hammer Protection of Pumping Lines," Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, No. 8, pp. 792~797.
- (10) Purcell, P. J., 1997, "Case Study of Check-Valve Slam in Rising Main Protected by Air Vessel," Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 123, No. 12, pp. 1166~1168.