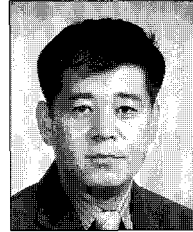
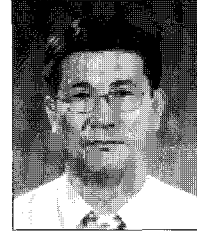


# 수충격 해석과 실증을 통한 펌프장 안정성 분석

A Safety Plan for the Pumping Station by Hydraulic Transient Analysis and Demonstration



박진훈\*



라병필\*\*

\* 한국수자원공사 K-water 연구원 녹색기술연구소 차장  
 \*\* 한국수자원공사 충청운영처 차장

## 1. 서론

한국수자원공사는 인구 집중 현상과 생활 수준의 향상으로 산업이 발달함에 따라 야기될 수 있는 급수난 즉, 물 부족을 해소하기 위하여 광역상수도 사업을 지속적으로 추진 중에 있으며, 이에 따라 대형화된 수도시설 전반에 걸쳐 안정성을 확보하고자 다각적인 노력을 기울이고 있다.

최근에 경기도 파주시 LG-필립스 첨단산업단지 개발이 본격화됨에 따라 한국수자원공사에서는 산업단지에 필요한 공업용수의 공급시기를 앞당기기 위하여 한강 하류권 급수체계 구축사업에 박차를 가하고 있다.

이 사업이 완공되기 전까지는 기존의 자양취수장과 일산정수장을 통해 용수 공급을 한시적으로 증설하는 방안에도 검토하고 있다. 이러한 상황에서 기존 자양 취수장의 펌프설비 현황과 도수관로의 통수 능력이 매우 중요한 변수가 되었으며, 용수 공급 증가에 따른 수격현상이 보다 심각한 문제로 대두되었다<sup>1)</sup>.

이에 따라 본 기사는 자양취수장에서 일산정수장까지의 계통에 대하여 현 취수용량을 기준으로 현장시험을 실시하고, 최대용량 운영 시 안정성을 수치계산을 통하여 추정코자 한다. 특히, 무인으로 운영되고 있는 취수펌프장의 안전설비로 설치되어 있는 압력릴리프밸브와 공기밸브의 역할,

펌프 토출밸브의 폐쇄시간 등을 전산모의해석과 현장실증을 통해 비교·분석함으로써 펌프장과 관로의 안정성을 확보하는데 그 목적이 있다.

## 2. 현장시험 및 수치해석 방법

### 2.1 시스템 구성

본 연구 대상인 자양취수장은 한강 잠실 수중보에서 약 1km 상류에 위치하였는데, 이는 일산 신도시와 고양시에 용수를 공급하기 위한 시설물로서 일산정수장의 시설용량은 250,000m<sup>3</sup>/d이며, 2004년 말 현재 일일 평균 취수량은 200,000m<sup>3</sup>/d정도이다. Fig. 1은 취수펌프장에서 정수장까지의 관로 형상을 나타내고 있는데, 총 관로 길이는 35.4km이고, 관경은 1,500mm이다. Table 1은 자양 취수장의 펌프 현황을 보여주고 있다. 본 사업장의 경우, 취수펌프의 기동·정지 시 소음 발생과 배관의 진동 및 부압으로 인한 문제가 제기되었다. 특히, 정전으로 인하여 갑자기 동력을 잃게 될 때 또는 밸브의 개도를 급 폐쇄할 때 도수관로 내의 유속이 급격히 변하면 압력도 크게 상승하거나 강하게 되어 심한 수격작용을 일으키는 것으로 조사되었다<sup>2)</sup>.

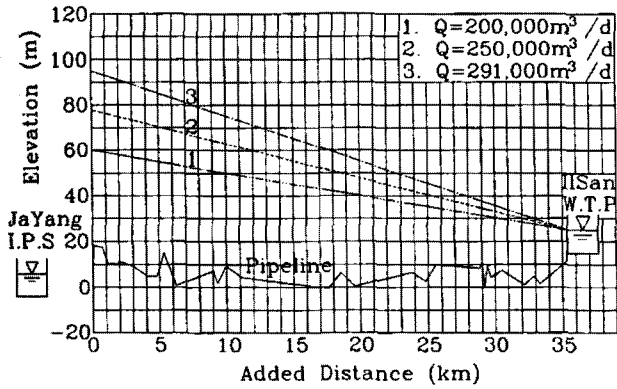


Fig. 1 Hydraulic grade line in the raw water pipeline

Table 1 Pump conditions of intake pumping station

구분	호기	유량 (m <sup>3</sup> /min)	유량 (m <sup>3</sup> /d)	양정 (m)	효율 (%)	동력 (hp)
정속펌프	1,3,4,6	46.3	66,672	82	80	1,200
변속펌프	2,5	46.3	66,672	82	80	1,200

## 2.2 시험 장치

현장 시험을 수행하기 위하여 구성된 측정 장비의 개략적인 배치도를 Fig. 2에 나타내었는데, 압력전송기 및 밸브개도 지시계에서 측정된 전기적인 신호 값은 검사기(signal conditioner)를 거쳐 아날로그-디지털 변환 장치로 전송되고 수집된 데이터는 프로그램(Daq View)을 사용하여 현장에서 실시간으로 확인된 후 저장된다. 또한, 현장 시험에 사용된 측정기기는 수격해석 결과를 토대로 그 측정범위가 정해지고 시간에 따른 반응속도가 빠른 기기들로 선정되었다<sup>3)</sup>.

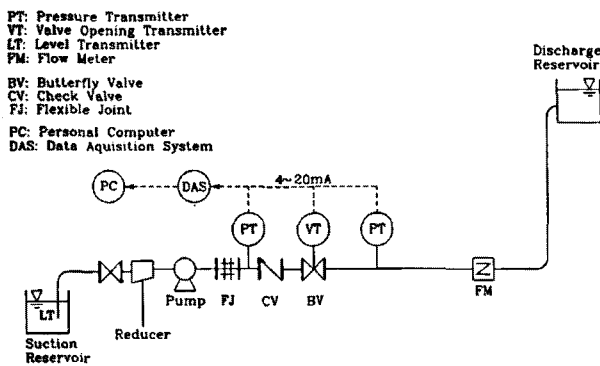


Fig. 2 Schematic diagram of the measuring equipment

## 2.3 시험 방법

자양 취수장에서 현재 취수용량을 기준으로 현장 시험을 수행한 후 수치해석 결과와 비교·검토함으로써 수격작용

해석 프로그램의 신뢰성을 검증하고자 한다. 현장 시험 기간 동안 자양취수장 흡수정(한강)의 수위는 약 6.4m로 일정하게 유지되었고, 정수장 착수정(gauging well)의 수위도 웨어(weir)가 설치되어 바닥으로부터 4.15m로 비교적 일정하였다. 현장 시험 방법은 다음과 같다<sup>4)</sup>.

- 1) 펌프의 기동에 따른 수격현상
  - 토출밸브를 급격히 개방한 경우
  - 토출밸브를 서서히 개방한 경우
- 2) 펌프의 운전 정지에 따른 수격현상
  - 토출밸브를 급폐쇄한 후 펌프를 정지한 경우
  - 토출밸브를 서서히 닫은 후 펌프를 정지한 경우
- 3) 펌프의 비상 정지에 따른 수격현상
  - 펌프 단독운전 중 비상 정지한 경우
  - 펌프 3대 병렬운전 중 3대가 비상 정지된 경우

## 2.4 수치해석 방법

수격현상을 해석하는 상용 코드는 여러 종류가 있지만, 본 연구에서는 WHAP 전산수격해석 프로그램(Water Hammer Analysis Program)을 사용하였다<sup>5)</sup>. 수치해석은 Fig. 3에 나타난 흐름도에 따라 기초자료 조사로부터 수격작용에 의한 부압 발생 여부 확인, 수격완화설비의 종류 및 용량 선정, 해석결과출력 등의 순으로 진행하였다<sup>6,7)</sup>.

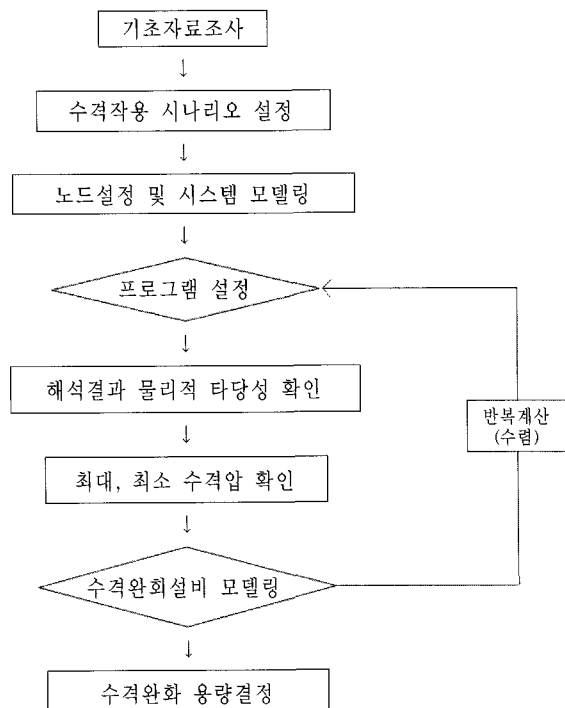


Fig. 3 Flow-chart of the computer simulation

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 펌프 기동에 따른 수격현상

펌프 2대가 병렬로 운전(#2, #4) 중 3호기 1대를 추가로 가동하였다. Fig. 4는 3호기의 밸브개도, 펌프 출구측 압력수두, 주 관로 내 압력수두를 나타내었다. 취수펌프 2대 병렬운전 시 펌프는 토출측 밸브가 약 33% 개방된 상태이고, 펌프 토출측 #2호기 압력수두는 67m, #4호기는 68m, 관로 내 유량은 7,671m<sup>3</sup>/h(184,000m<sup>3</sup>/d)로 측정 되었다. 펌프가동 후 곧바로 규정 회전속도에 도달하고, 토출밸브가 열리기 전까지 차단점(shut-off point)에서 운전하게 된다. 차단점에서 운전될 때 펌프 출구측 압력수두는 약 88.7m로 측정되었다. 토출밸브가 열림에 따라 관로로 물이 공급되면서 펌프 출구측 압력은 떨어지고 주 관로 내 압력은 상승하게 되는데, 이러한 과정에서 발생하는 과도현상은 밸브개도가 고정된 후 짧은 시간 안에 안정되고 있으므로, 펌프 가동에 따른 수격작용은 그다지 우려가 없는 것으로 분석되었다. 취수펌프 3대가 병렬로 운전함으로써 관로 내 유량은 9,219m<sup>3</sup>/h(221,000m<sup>3</sup>/d)로 증가하였고, 이에 따라 주 관로 내 압력수두도 53m에서 69m로 증가된 것으로 측정되었다.

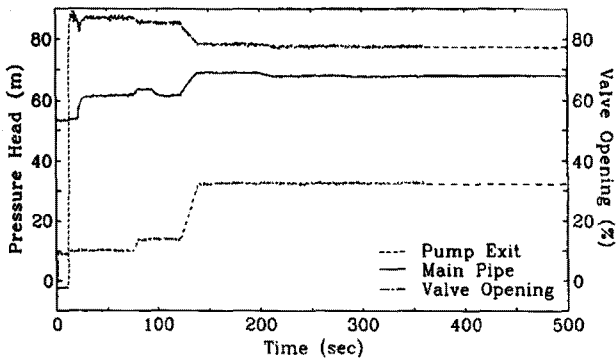


Fig. 4 Field test result from a pump start

#### 3.2 펌프의 운전 정지에 따른 수격현상

##### 3.2.1 토출밸브를 급폐쇄한 후 펌프를 정지한 경우

펌프 #2, 3, 6호기 3대가 병렬로 운전되고 있을 때 3호기 펌프를 정상적으로 정지하는 시험을 하였다. 펌프 3대가 병렬운전 시 토출측 밸브는 약 33% 개방된 상태로 운전되었고, 유량은 9,223m<sup>3</sup>/h(221,000m<sup>3</sup>/d)로 측정되었다. 펌프 토출밸브(Ø700mm)의 개폐시간은 95초로 조사되었다. 따라서, 밸브의 개도가 33%인 상태에서 운영되는 도중 펌프를 정지시키는 경우 밸브의 폐쇄시간이 32초(=95/3)로 매우 빨라 심각한 수격작용을 유발하는 것으로 분석되었다. Fig. 5

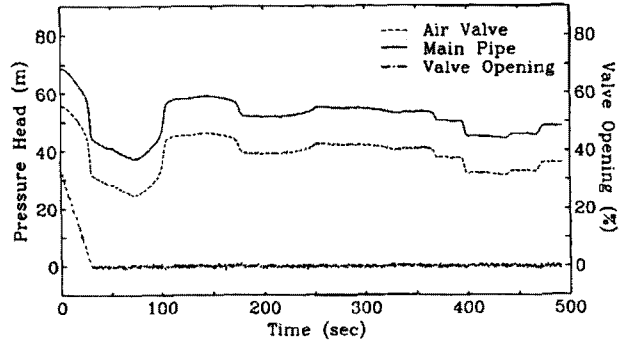


Fig. 5 Test result fro, quick closing of discharge valve

를 참조하면 펌프 3대가 병렬로 운전될 때 주관로 내 압력수두는 69m로 유지된 상태에서 3호기 펌프 토출밸브가 닫힌 후 37.5m까지 급격히 떨어졌다가 압력이 다시 회복하면서 점차 안정되어 가는 것을 알 수 있다. 이러한 과도현상 중 계속 운전되고 있던 나머지 펌프들 즉, 2호기와 6호기 펌프의 운전점은 심하게 변하게 되며, 이에 따라 2차적인 피해가 우려된다.

##### 3.2.2 토출밸브를 서서히 닫은 후 펌프를 정지한 경우

펌프의 정상적인 정지 시 발생하는 수격작용을 완화시켜 주기 위하여 밸브의 폐쇄시간을 인위적으로 변경시켜 현장 시험을 수행하였다. 취수장의 경우 밸브를 스텝 제어 형태로 수동 조작하여 6분 동안 밸브를 서서히 닫으면서 과도현상을 측정하였으며, #2, 3, 4호기 3대가 병렬로 운전되고 있을 때 3호기를 정상적으로 정지하였다. 초기 조건에서 토출측 밸브는 약 33% 개방된 상태로 운전되었고, 유량은 9,071m<sup>3</sup>/h(218,000m<sup>3</sup>/d), 압력수두는 68m로 각각 측정되었다. Fig. 6으로부터 밸브의 개도가 스텝 제어 형태로 변함에 따라 관로 내 압력도 계단식으로 변하고 있음을 알 수 있다. 3호기 밸브가 완전히 닫힌 후, 주 관로 내 압력수두는 약 47m까지 떨어졌다가 압력이 다시 회복되면서 곧바로 안정되는 것으로 측정되었다. 이 결과는 밸브를 급폐쇄한 경우와 비교한다면 상당히 개선된 상태이다. 또한, 밸브개

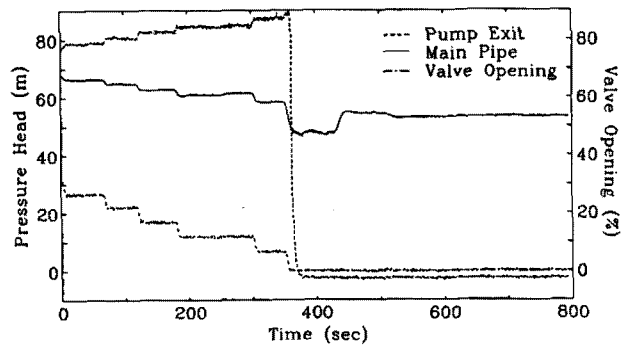


Fig. 6 Test result from slow closing of discharge valve

폐시간은  $10L/a$  ( $L$ : 관로길이,  $a$ : 압력과 전파속도) 이상 유지하는 것이 바람직하므로 취수펌프의 토출밸브 개폐시간은 충분히 늘려 운영하여야 한다<sup>8)</sup>.

### 3.3 펌프의 비상 정지에 따른 수격현상

#### 3.3.1 펌프 단독운전 중 비상 정지한 경우

펌프 #3호기가 단독으로 운전되고 있을 때 비상 정지 시험을 수행하였다. 초기 조건에서 토출측 밸브가 약 22% 개방된 상태로 운전되었고, 유량은  $3,441\text{m}^3/\text{h}$  ( $82,600\text{m}^3/\text{d}$ ), 압력수두는 23m로 측정되었다. 펌프는 동력 공급이 중단되어도 아직 펌프와 전동기 회전부의 관성에 의해 계속 돌려고 하나, 보유하는 에너지는 물을 보내는데 시간이 지남에 따라 점점 소비되어 펌프의 회전속도나 양정, 유량은 급속히 감소된다. 취수장에서 발생한 음압력파(negative pressure wave)는 관로를 따라 하류로 전파되면서 관내 압력을 떨어뜨리는데, 관로 정점부에 설치된 공기밸브실에서 관내 압력이 대기압 이하로 떨어지면 외부의 공기가 관로로 유입된다. 취수장 근처에 설치된 공기밸브실의 위치가 도수관로에서 가장 높은 지점이기 때문에 이 공기밸브를 통하여 공기가 유입된 후 취수장 쪽으로 역류가 발생하고, 관로로 오랫동안 공기가 유입하게 된다. 이에 따라 펌프 출구측 체크밸브는 곧바로 닫히며, 취수장과 정수장 사이의 장거리 도수관로에서 유체는 매우 긴 주기로 서징(surging)을 하게 된다. 일산정수장 내 착수정에서 반사된 음압력파는 양압력파(positive pressure wave)로 바뀌어 도수관로 내 압력은

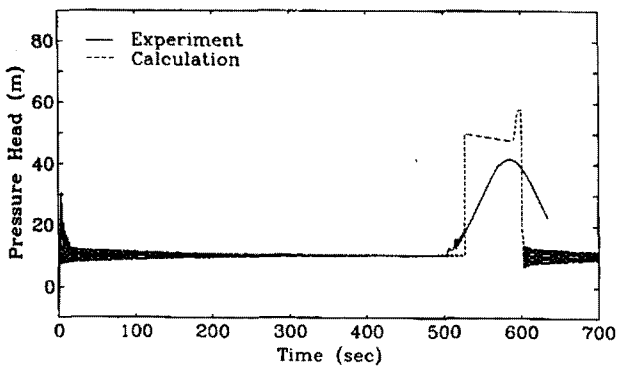


Fig. 7 Comparison of measured and predicted pressure heads for 1 pump emergency stop

Table 2 Predicted transients for 1 pump emergency stop

주 관로 내 정상상태 압력수두 (m)	주 관로 내 최대 압력수두 (m)	주 관로 내 최소 압력수두 (m)	취수장에서 역류가 발생하는 시간 (sec)
23.10	58.00	-7.51*	2.30

주) \* 부압(negative pressure)이 발생함.

서서히 상승하게 되는데, 이 주기에서 관로로 유입된 공기는 공기밸브를 통하여 외부로 빠져나간다<sup>9)</sup>. Fig. 7은 약 10분 동안 측정된 주 관로 내 압력변동을 나타내었는데, 이는 매우 긴 주기의 서징 현상을 잘 보여주고 있다.

수치해석결과 얻어진 주 관로 내 압력 변동을 측정값과 서로 비교하여 Fig. 7에 나타내었고, 과도특성을 Table 2에 나타내었다. 펌프 비상 정지 후 취수장으로 역류는 약 2.3초 후에 발생하고, 도수관로 상에 설치된 공기밸브들 중 취수장으로부터 280m와 600m 떨어져 있는 2지점의 공기밸브들만 작동된 것으로 수치계산결과 예측되었다. 특히, 취수장으로부터 280m 떨어진 관로 정점부의 공기밸브를 통하여는 외부의 공기가 약 223초 동안  $100\text{m}^3$  정도가 관로로 유입된 것으로 예측되었다. 수치해석결과 도수관로에서의 수주분리현상은 이 공기밸브에 의해 매우 효과적으로 방지될 수 있으나, 공기밸브 사이의 중간 구역에서는 약간의 부압이 발생하는 것으로 예측되었다.

또한, 정수장 내 착수정에서 반사되어 되돌아온 양압력파에 의해 관로로 유입된 공기가 외부로 모두 빠져나갔을 때 취수장에서 압력은 급격히 상승하는 것으로 예측되었으나, 실제로 압력은 서서히 그리고 완만하게 상승하는 것으로 측정되었다. 이는 도수관로 하류 지역의 월드킵공원과 호수공원 분기점에서 밸브가 실제로 개방되어 물이 계속 유출되었기 때문에 현장시험 시 수격압이 더욱 완화될 수 있었던 것으로 판단된다. 이에 따라 수치계산은 주 관로 내 최대압력수두를 58m로 예측된 값(42m)보다 다소 높게 예측하고 있으나, 이러한 장거리 도수관로에서 발생하는 긴 주기의 서징 현상을 비교적 양호하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

#### 3.3.2 펌프 3대 병렬운전 중 3대가 비상 정지된 경우

펌프 #2, 3, 4호기 3대가 병렬로 운전되고 있을 때 비상 정지 스위치를 동시에 눌러 펌프가 긴급 정지된 상황을 재현하여 현장 시험을 수행하였다. 취수펌프 3대가 병렬로 운전되고 있을 때 토출측 밸브가 약 40% 개방되어 운전되었고, 관로 내 유량은  $9,249\text{m}^3/\text{h}$  ( $222,000\text{m}^3/\text{d}$ ), 압력수두는 71m로 측정되었다. Fig. 8은 주 관로 내 압력을 26분 40초 동안 측정하여 나타내었다. 또한, 취수장과 공기밸브실 사이의 관로에서 왕복하는 짧은 주기의 압력파를 관찰하기 위하여 1분 동안의 압력변동을 Fig. 9에 나타내었다. 취수장에서 공급하는 유량이 증가할수록 수격작용은 더욱 심해지기 때문에 펌프 출구측 체크 밸브는 슬래밍(slamming) 현상을 일으키면서 닫히고 있음을 알 수 있다. 정수장 쪽으로 전파된 압력파는 매우 긴 주기로 서징 현상을 일으키면서 닫히고 있음을 알 수 있다. 정수장 쪽으로 전파된 압력파는

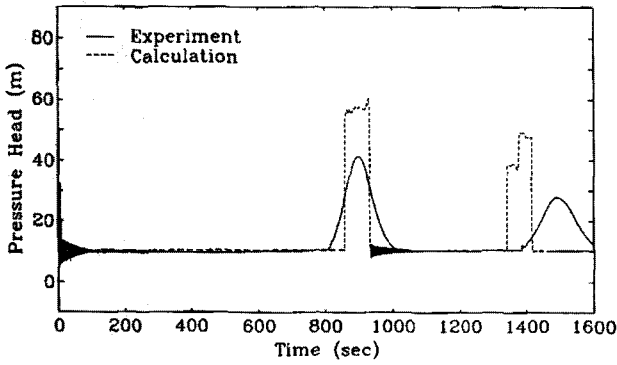


Fig. 8 Comparison of measured and predicted pressure heads for 3 pumps emergency stop

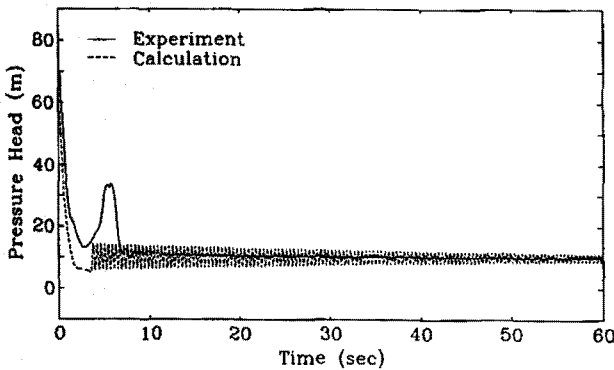


Fig. 9 Variations of the pressure head at downstream of the check valve in 60 seconds

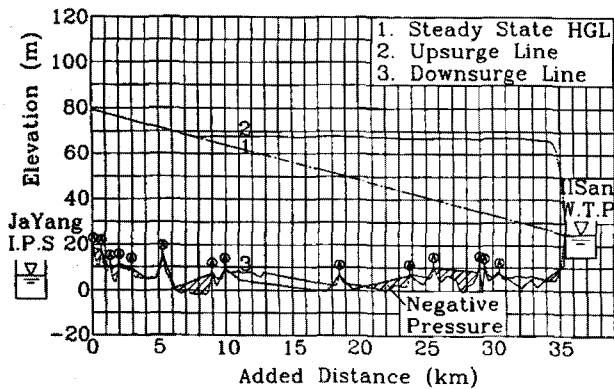


Fig. 10 Predicted upsurge and downsurge in the raw water pipeline for 3 pumps emergency stop

매우 긴 주기로 서징 현상을 일으키는데, 유량이 증가할수록 주기는 점점 길어지는 것으로 측정되었다.

수치해석결과 얻어진 주 관로 내 압력 변동을 측정값과 서로 비교하여 Fig. 8과 9에, 도수관로에서의 최대·최소 압력을 Fig. 10에, 과도특성을 Table 3에 각각 나타내었다. 수치계산결과, 펌프 비상 정지 후에 설치된 공기밸브 모두가 작동된 것으로 예측되었다. 취수장으로부터 280m 떨어진 관로 정점부의 공기밸브를 통하여 외부의 공기가 약

Table 3 Predicted transients for 3 pump emergency stop

주 관로 내 정상상태 압력수두 (m)	주 관로 내 최대 압력수두 (m)	주 관로 내 최소 압력수두 (m)	취수장에서 역류가 발생하는 시간 (sec)
70.68	70.68	-7.57 *	3.66

주) \* 부압(negative pressure)이 발생함.

333초 동안 261m<sup>3</sup>정도가 관로로 유입된 것으로 예측되었다. 도수관로에서의 수주분리현상은 이 공기밸브들에 의해 매우 효과적으로 방지될 수 있으나, 공기밸브 사이의 중간 구역에서는 약간의 부압이 발생하는 것으로 예측되었다. 또한, 긴 주기의 압력파에 의해 주 관로 내 압력수두는 41.3m까지 상승하는 것으로 측정되었으며, 수치계산은 60m로 실제보다 다소 높게 예측되었다. 이는 앞장에서 검토한 원인으로부터 기인된 것으로 판단된다.

### 3.4 위험도 평가

자양 취수장에서 일산 정수장까지 약 35.4km의 도수관로에는 19개 지점에 250mm 쌍구형 공기밸브가 주로 설치되어 있으며, 몇 지점의 공기밸브는 200mm 급속 공기밸브로 이미 교체된 바 있다. 한 일부 공기밸브실의 침수와 외부로 공기출입을 자유롭게 하기 위한 통기관(ventilation pipe)이 거의 설치되지 않아 공기밸브로서의 역할이 원활치 않을 것으로 예상되었다. 또, 취수펌프장 토출측에 압력릴리프밸브(pressure relief valve,  $\varnothing 350 \text{ mm} \times 2 \text{ sets}$ )가 설치되어 있으나 설정압력이 12kgf/cm<sup>2</sup>로 상승압에 의한 동작 가능성이 낮아 보였으며, 도수관로에서 발생하는 수주분리현상을 방지할 수 있는 수격완화설비가 없었다.

시설용량 기준으로 현장시험과 수치계산을 수행한 결과 도수관로 주요 지점에 설치한 250mm 쌍구형 공기밸브와 200mm 급속 공기밸브가 제대로 작동되지 않는 경우 도수관로의 넓은 구역에 걸쳐 부압이 형성되는 것으로 예측되었다. 또한, 자양 취수장의 용수공급량이 당초 계획 시설용량을 초과하게 되면, 공기밸브들 사이의 많은 구간에서 관 내 압력은 물의 포화증기압 이하로 낮아져 증기공동이 형성되며, 결국 수주분리현상이 발생하고, 다운서지에 의한 부압 발생시간도 비교적 오랫동안 지속되는 것으로 예측되었다<sup>2)</sup>.

관 내 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴이 일어날 수 있으며, 증기공동에 의해 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 심한 수격현상이 일어나 기계설비와 도수관로 등에 파손을 입힐 우려가 있다. 이러한 장거리 도수관로 시스템에서는 압력파가 관로 마찰손실에 의해 효과적으로 소산되기 때문에 업서지(압력상승)에 의한

문제보다는 다운서지에 대한 대책 즉, 부압 발생을 방지할 수 있는 수격완화설비가 필요하다.

에어챔버(air chamber)는 압력용기 내에 적절한 양의 액체와 그 위에 가압된 공기나 기체를 저장해 두어 관 내 압력이 떨어질 때 관로에 액체를 공급하여 수주분리현상이 발생하지 않도록 하고, 압력이 급격히 상승하는 것도 효과적으로 억제해준다. 그리고 에어챔버는 압력파에 대한 적응성이 뛰어나 어떠한 압력변동에도 즉시 반응하며, 시스템의 안정성을 크게 향상시키는 장치이다. 이러한 이유로 에어챔버는 펌프장의 수격완화장치로서 다른 설비들과 조합하여 그 사용이 점차 증가되는 추세에 있다. 에어챔버의 설치는 주로 압축기로부터 얻어야 하는 초기상태 압축공기의 압력과 체적 그리고 에어챔버의 전체 크기에 의해 결정되므로, 이들의 값이 적절하게 선택되어야 한다.

자양 취수장에 에어챔버를 보완 설치하는 경우 펌프의 긴급정지에 따른 부압 발생을 효과적으로 방지할 수 있을 뿐만 아니라 교대 운전 등에 따른 정상적인 펌프의 기동·정지 시 전동 버터플라이밸브의 개폐 시간을 매우 빠르게 조작할 수 있기 때문에 보다 원활한 용수 공급을 위한 수도시설의 운영 면에서도 매우 유리할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

펌프장 안정성 평가를 위하여 수치해석을 수행하고 수격작용에 관한 현장 시험을 실시하여 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 펌프 3대를 병렬로 운전 중 펌프 1대를 정상적으로 정지할 때 펌프 토출밸브를 32초로 급폐쇄하는 경우 가동중인 펌프 2대에 영향을 미치게 되므로 토출밸브의 폐쇄시간을 최소 6분 이상 연장하는 것이 수격작용으로 인한 영향을 최소화 할 수 있다.
- 2) 가동중인 펌프 3대가 비상정지 시 최초 가동되는 펌프는 약 30분 이상 대기한 후 재 가동함으로써 수격에 의한 피해를 줄일 수 있다.

- 3) 공기밸브실에는 공기의 유·출입이 자유로울 수 있도록 반드시 통기관을 설치해야 하고, 배수펌프의 설치 등 침수방지시설도 갖춰야 한다.
- 4) 긴 관로 시스템에서는 압력파가 관 마찰손실에 의해 소산되기 때문에 상승압력보다는 부압 발생을 효과적으로 방지할 수 있는 수격완화설비가 필요하다.

#### 참 고 문 헌

1. 한국수자원공사, “일산신도시 상수도 공급사업 시설공사,” 관로 준공도, 1992
2. 한국수자원공사, “수격작용 해석 및 실증을 통한 펌프장 안정성 확보방안,” 연구용역 보고서, 2004
3. 김경엽, 김점배, “원심펌프의 시동 및 정지에 따른 수격현상,” 유체기계저널, 제7권, 제1호, pp.51-57, 2004
4. 라병필, 김진만, 박중호, 김경엽, “과도수리현상 해석과 실증을 통한 펌프장 안정성 확보방안,” 유체가계연구개발발표회 논문집 pp.199-207, 2004
5. 김경엽, 오상현, “펌프제어밸브를 사용한 취수펌프장에서 수격현상,” 유체기계저널, 제4권, 제4호, pp.16-21, 2001
6. Wylie, E. B., and Streeter, V. L., Fluid Transients in System, Prentice Hall, USA., 1993
7. Thorley, A. R. D., Fluid Transients in Pipeline Systems, 2nd edition, Professional Engineering Publishing Limited, UK, 2004
8. Goldberg, D. E., and Karr, C. L., “Quick Stroking: Design of Time-Optimal Valve Motions,” Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 113, No. 6, pp.780-795, 1987
9. Stephenson, D., “Effects of Air Valves and Pipework on Water Hammer Pressures,” Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 123, No. 2, pp.101-106, 1997

[담당 : 최인길, 편집위원]