

직결식 펌프의 수격현상

김상균* · 이계복** · 김경엽***

Waterhammer for In-line Booster Pump

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

Key Words: Waterhammer(수격현상), In-line Pumping Station(직결식 펌프장), Slam Surge(슬랩서지) Air Chamber(에어 챔버), Field Test(현장시험)

ABSTRACT

The waterhammer occur when the pumps are started or stopped for the operation or tripped due to the power failure, and the hydraulic transients take place as a result of the sudden change in velocity. Several times, the field tests of the waterhammer were carried out for Pangyo booster pumping station. Pangyo pumping station was installed with the booster pumps of 6 sets and the in-line pumps of 2 sets. The in-line pumps are additionally needed to the surge suppression device so that the pumping station acquire the safety and reliability for the pressure surge.

1. 서론

현대 사회의 도시 발달과 깨끗하고 안정적인 물 수요 증가로 수도시설의 일부인 도·송수관로는 대구경에 장거리로 설치되는데 이에 따른 사고로 수격현상(waterhammer)에 매우 취약하게 되며, 수도시설의 다른 사고 원인에 의한 것과는 달리 수격현상에 의한 사고는 펌프장의 침수 및 관로의 파손으로 인하여 사회적인 문제, 즉 단수 및 침수로 인한 재산 피해 등 커다란 문제를 야기할 수 있어 근본적인 대책이 절실히 요구되고 있다. 수격현상은 펌프를 기동시키거나 정지운전 중 정전으로 동력을 잃게 될 때 또는 도·송수관로상에 설치된 밸브의 개도를 빠르게 변화시킬 때 그 순간 관로 내의 유속이 급격히 변하면 압력도 크게 상승, 강하하며 발생한다. 이러한 수격작용으로 압력

가 상류단과 하류단 사이를 왕복할 때 관로 내의 압력은 관로 형상에 따라 물의 포화증기압 이하로 떨어질 수 있으며, 이 경우 증기공동(vapor cavity)이 형성되고 이것이 심화될 경우 수주분리현상(column separation)이 생긴다. 관로 내의 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴이 일어날 수 있으며, 증기공동으로 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 관로가 파손될 염려가 있다⁽¹⁾. 이와 같은 수격작용에 의한 피해를 살펴보면, 펌프의 동력이 갑자기 차단될 때 송수 유량의 역류로 인하여 펌프·모터가 역회전으로 가속되어 사고가 발생할 우려가 있고, 압력 상승으로 인하여 펌프, 밸브, 관로 및 부대시설이 파손되어 손상을 입기도 하며, 관로 내의 압력 상승 및 강하에 의해 관로가 붕괴되거나 수주 분리가 발생하여 관로가 파열되기도 한다. 또, 관로 내의 주기적인 압력 변동 때문에 자동제어 계통에서 압력 제어를 정확히 하기 어렵고, 심지어 구조물이 파손되는 사례가 발생하기도 한다.

펌프관로계에서 수격작용을 완화시키는 장치로는

* 한국수자원공사

** 충북대학교 기계공학과

*** 한국산업기술대학교 기계공학과

책임저자 E-mail : ksgy@kowaco.or.kr

주로 에어챔버, 서지탱크, 서지릴리프밸브, 공기밸브, 펌프제어밸브 등이 사용되는데, 이러한 설비들은 용수량, 관로길이 및 형상, 설치장소 등에 따라 경제성과 신뢰성을 고려하여 적절히 설계되어야 한다^{(2),(3)}. 본 연구에서는 수도권 광역상수도 5단계 사업의 일환으로 완공된 판교가압장이 용수 수요가 공급목표에 크게 미치지 못해 도수관로 손실수두가 작아 조절지 유입부의 잔류 수두를 이용하기 위해 흡수정 가압방식에서 직결식 펌프장(in-line pumping station)으로 운영되고 있어 이에 따른 수격현상에 대한 수치해석 및 현장시험 결과를 분석하여 직결식 가압장의 안전설비에 대한 재검토의 필요성 등 펌프장 및 도수관로의 안전성을 확보하기 위하여 몇 가지 보완되어야 할 사항들을 제시함을 목적으로 한다.

또한, 최근에 건설되는 가압장 추세는 흡수정의 공사비를 절감하기 위해 직결식 형식을 많이 채용하므로 판교가압장의 흡수정 방식과 직결식 펌프장의 운영자료 분석 및 현장시험 결과에서 도출된 직결식 펌프장 및 도수관로의 안전 방안이 모델로 사용될 수 있다.

2. 시설물 현황

2.1 판교가압장

판교가압장은 팔당댐 상류에 위치한 팔당3취수장에서 원수를 취수하여 평택 계통에 5단계 746,550 m³/d, 6단계 504,450 m³/d(총 1,251,000 m³/d)의 설계유량이 공급되도록 계획·설계되었고, 인천 계통은 사업 초기에는 바이패스(by-pass) 배관이 연결되어 가압없이 자연유하로 공급하며 평택 계통은 유입관로를 통해 조절지에 일단 방류하여 흡수정을 거쳐 가압펌프에 의해 수치 정수장으로 공급된다⁽⁴⁾.

2.2 평택계통 펌프

평택 계통의 펌프는 8대가 설치되었으나 일정 기간 용수 수요가 공급목표에 미달되고 관로 초기사용에 따른 마찰손실이 적어 유입관로에 잔류수두가 약 20 m 정도가 발생하여 이를 이용하기 위해 Fig. 1과 같이 조절지에 1,500 mm 유입관로를 설치한 후 1,100 mm의 펌프 흡입관을 연결하여 펌프 1대는 임펠러 외경 가공하고, 1대는 토출량을 변경하였고 모터는 당초대로 사용하여 직결식 펌프로 공급토록 시설을 개선하여

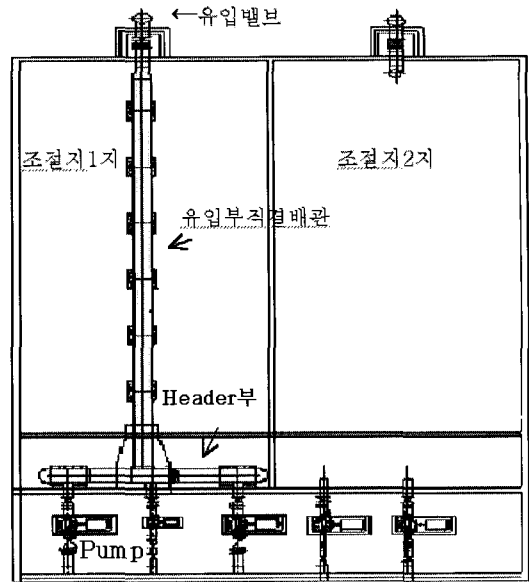


Fig. 1 Schematic sketch of sump tank

운영하고 있다.

펌프 운전 대수 = 6 sets (1~6호기)
 규정 양정 = 79 m
 규정 유량 = 96.5 m³/min
 규정 회전속도 = 710 rpm (10 pole)
 전동기 동력 = 1,700 kW

펌프 운전 대수 = 1 set (8호기)
 규정 양정 = 47 m
 규정 유량 = 96.5 m³/min

펌프 운전 대수 = 1 set (7호기)
 규정 양정 = 47 m
 규정 유량 = 152 m³/min

2.3 수치정수장 도수관로

판교가압장에서 수치정수장까지의 도수관로 길이는 11.3 km이며, 5단계 사업에서는 2,300 mm 도수관로 1열을 사용하고, 6단계에서 1,800 mm 1열을 5단계 관로와 나란히 부설할 예정이다. 이 용수량을 공급하기 위해서는 양쪽흡입 원심펌프가 5단계에서 6대, 6단계에서 9대가 병렬로 운전되며, 판교가압장에서 병렬로 운전되고 있는 펌프들이 갑작스런 정전

으로 비상 정지되었을 때 발생하는 수격작용이 가장 심각하다.

도수관로 도중에 2.6 m×1열의 강관이 존재하는데, 이곳은 관로의 형상이 급격히 상승하여 그 위치가 정상상태 동수구배선(hydraulic grade line)에 매우 근접해진다. 정상운전 중인 펌프의 동력이 갑자기 차단될 때, 이곳에서 관로 내의 압력은 물의 포화 증기압 이하로 낮아져 증기공동이 형성되며 결국, 수주분리현상이 발생한다. 관로 내 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴이 일어날 수 있으며, 증기공동에 의해 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 도수관로 및 부대설비 등에 손상을 입힐 우려가 있다. 이러한 수격작용을 완충시켜주기 위하여 도수관로 정상부에는 직경 10 m의 조압수조를 설치하였다. 또한, 수도권 5단계 당초 설계시 수격작용으로부터 판교가압장을 보호하기 위한 주설비로는 펌프 제어밸브(또는 제어용 체크밸브)가 선정되었고, 압력 릴리프밸브는 펌프제어밸브가 오동작했을 경우를 대비한 보조설비로서 설치하도록 계획되었다. 그리고, 수도권 6단계 실시설계시 조압수조 상류의 도수관로 정점부에서 부압이 발생하는 것으로 검토되었기 때문에, 이 지점에는 수격방지용 공기밸브가 보완·설치되었다⁽⁴⁾.

3. 수치해석

3.1 입력자료

- (1) 펌프 자료:
 $\text{펌프} \cdot \text{모터 관성모멘트} = 1,020 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- (2) 저수조 수위:
 흡수정 저수위(L.W.L) = 64.7 m
 조압수조 고수위(H.W.L) = 140.5 m
- (3) 펌프제어밸브(pump control valve):
 구경 = 700 mm
 설치대수 = 가압펌프 1기당 1 set
- (4) 압력릴리프밸브(pressure relief valve):
 노즐 구경 = 125 mm
 설치 대수 = 4 sets
 개방 압력 수두 = 99 m
- (5) 공기밸브(slow closing air and vacuum valve):
 구경 = 300 mm (5단계 관로)

- (6) 조압수조(surge tank, ST2):

설치위치 = 관로 정점부
 직경 = 10.0 m
 바닥 표고 = 131.6 m
 상단 표고 = 146.5 m
 연결관 직경 = 2.6 m

판교가압장에서 병렬로 운전되고 있는 펌프들이 갑작스런 정전으로 긴급 정지되었을 때 발생하는 수격작용이 가장 심각한데, 이에 대한 수격현상은 전용 전산 프로그램인 WHAP (WaterHammer Analysis Program)^{(5),(6)}를 사용하여 수치해석하였다.

3.2 판교가압장 수격현상

정상운전 중인 펌프가 갑작스런 정전으로 트립(trip)되었을 때 가압장에서 발생한 압력파는 조압수조 위치에서 대부분이 반사되고, 나머지는 수지 정수장 쪽으로 계속 전파된다.

∅2,600 도수관로의 위치(관저고=130.5 m)는 전체 관로 구간에서 가장 높아 펌프가 꺼진 후에도 조압수조 하류 지역에서는 자연유하(gravity flow)에 의한 유동이 계속적으로 형성되고, 조압수조 내의 물은 모두 유출되며 결국 하류 지역의 관로로 공기가 유입된다. 관로 정점부에 설치된 조압수조에 의해 하류 지역의 도수관로는 수격작용으로부터 효과적으로 보호받을 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 판교가압장과 조압수조 사이를 왕복하는 짧은 주기의 압력파를 고찰하기 위하여 상세한 관로 조건을 살펴보면, 조압수조의 설치위치가 ∅2,600 도수관로 시점에서 약 80 m 하류 지점에 있고 펌프출구로부터 1,140 m 떨어져 있으며, 이곳까지의 관로형상이 매우 급격히 상승하고 있다. 관로의 형상은 수주분리현상이 발생하기 쉬운 형태를 띠고 있으므로 관 상단부를 기준으로 검토하였으며, 수치계산은 수격작용의 여러 차례 주기를 검토하기 위하여 펌프 트립 후 40초까지로 하였다.

3.3 펌프·모터의 관성 모멘트

판교가압장에 펌프제어밸브가 아닌 직폐형 체크밸브(또는 ideal check valve)가 사용된 경우 펌프·모터의 관성모멘트, GD^2 가 680~1,590 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 사

Table 1 Predicted maximum and minimum pressure heads with moment of inertia for the pump · motor

펌프 · 모터 $GD^2(kg \cdot m^2)$	1,590	850	680
펌프출구측 최소압력수두(m)	4.93	-2.62	-10.36
펌프출구측 최대압력수두(m)	134.4	137.3	148.4

이에서 변할 때 가압장과 조압수조 사이의 도수 관로 상에서 최대, 최소압력은 Table 1과 같고, 펌프 · 모터의 GD^2 가 작을수록 도수 관로상에서의 압력 변동은 약간씩 커지며, GD^2 가 $680kg \cdot m^2$ 일 때 펌프장 구내에는 $-1 kg/cm^2$ 의 부압이 발생(수도시설설계지침⁷⁾에서는 $-7.0m$ 까지 부압을 허용함)하는 것으로 예측되었다. 펌프장 구내에서 부압 발생을 방지하기 위해서는 수도권 6단계 실시설계시 제시된 바와 같이 펌프 · 모터의 GD^2 가 $1,020 kg \cdot m^2$ 이상이어야 한다.

관교가압장은 팔당 취수펌프장과 마찬가지로 도수 관로나 펌프장에서 부압 발생을 주로 펌프 · 모터의 GD^2 에 의해 방지하고 있기 때문에 실제로 펌프 · 모터의 공급업체에 의해 설치된 펌프 · 모터의 관성모멘트가 얼마나 정확히 산정 또는 보증되었는지를 확인하는 것이 매우 중요한 사항이다.

관교가압장에서 $-1 kg/cm^2$ 부압이 발생할 조건은 여러가지 원인이 있을 수 있으나 다운서지(down-surge)를 제어할 수 있는 가장 중요한 메커니즘은 펌프 · 모터의 관성모멘트이다.

펌프장 구내에서 부압 발생을 유발시킬 수 있는 또 다른 원인으로 수리적인 조건(hydraulic condition)을 들 수 있다. 일반적으로 펌프장 흡수정의 수위와 조압수조 내 수위가 낮을수록 다운서지가 커져 관로에서 수주분리현상이 발생할 가능성은 더욱 커진다. 또, 가압펌프의 유량이 증가할수록 관로내 유속이 더 커지기 때문에 수격작용은 심각해진다. 아울러, 펌프장 구내에서 펌프제어밸브나 기타 요인 등으로 손실수두가 예상보다 커지면 펌프장에서 부압이 발생하기 쉬운 조건이 된다. 펌프장에서 부압은 매우 짧은 시간 동안 작용하므로, 도수관로 상류에 설치된 300 mm 공기 밸브(slow closing air and vacuum valve)가 이 순간에 제대로 작동되지 않는 경우 부압은 더욱 심화될 수 있는 것으로 예측되었다.

3.4 펌프제어밸브에 대한 검토

관교 가압장을 보호하기 위한 주설비로는 역류방지 및 유량제어를 동시에 수행할 수 있는 펌프제어밸브가 선정⁴⁾되었고, 서지릴리프밸브는 펌프제어밸브가 오동작 했을 경우와 과도한 이상 압력에 대비한 안전 설비로서 계획되었다. 이는 관로상에서 수주분리현상이 발생하지 않을 때 압력 상승만을 억제할 목적으로 사용되는 경우 매우 유용한 방안이라 할 수 있다. 일반적으로 펌프 출구측에 어떠한 밸브(볼밸브, 체크밸브 등)를 설치하였을 때 이것들을 인위적으로 제어하면 과도현상은 변한다. 수격작용의 제어목표는 될수록 짧은 시간내에 최소의 압력 변화로 가급적 적은 역류, 역전으로 유동을 차단하는데 있다. 펌프제어밸브는 Fig. 2와 같이 제1단계에서 대부분을 폐쇄하고 제2단계에서 나머지 밸브개도(valve opening)를 서서히 닫는 것이 합리적이므로, 밸브제어형태를 이와 같이 작동하는 밸브로 선정하였다. 즉, 1단계에서 밸브를 t_i 초 이내에 90%까지 급속히 폐쇄하고, 나머지 10% 개도를 $t_c(=n \times t_i)$ 초에 완전히 폐쇄했을 경우의 전형적인 예를 나타내었다. 도수관로상에서의 역류발생시간은 펌프운전대수와 환경에 따라 달라진다. 펌프 · 모터의 GD^2 가 $850 kg \cdot m^2$ 이고, 도수유량이 $833,760 m^3/d$ 경우 2,300mm 관로상에서 역류는 4.4초에 발생하는 것으로 예측되었으므로, 제1단계 밸브폐쇄시간(t_i)은 4초로 결정하였다. 수치계산은 펌프제어밸브가 완전히 폐쇄되는데 걸리는 시간이 각각 12, 16, 20초($n=3, 4, 5$ 에 해당함)일 경우에 대하여 수행하였다.

펌프제어밸브와 체크밸브는 다운서지를 제어할 수

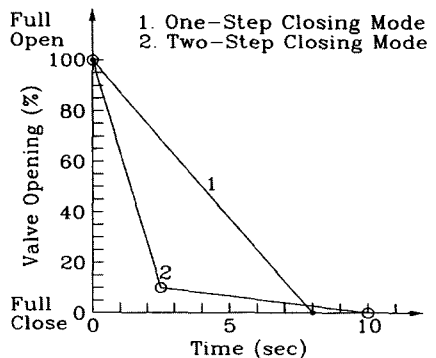


Fig 2. Closing modes of the pump control valve after power failure

Table 2 Predicted maximum pressure head with the closing time of pump control valve

	직폐형 체크밸브	펌프제어밸브의 폐쇄시간		
		12초	16초	20초
최대 압력(kg/cm ²)	13.73	11.75	10.05	9.49
발생 시간(초)	6.7	9.1	16.1	9.5

없으므로 밸브의 종류와는 무관하게 관로 내 최저압력이 결정되고 있다. 관로 내의 상승압은 펌프제어밸브의 폐쇄시간을 길게 할수록 더욱 완화됨을 알 수 있다.

Table 2는 펌프제어밸브의 폐쇄시간에 따른 펌프 출구측 과도특성을 요약하여 나타내었다. 수치계산 결과로부터 펌프제어밸브는 20초 정도에 완전 폐쇄시키는 것이 바람직함을 알 수 있다. 이 때, 도수관로상에서의 최대압력은 정상상태 압력을 약간 상회하는 것으로 예측되었다. 그러나, 실제로 펌프제어밸브의 상태가 나빠서 역류가 상당히 커진 후 갑자기 물에 유도되어 밸브디스크가 닫히면 슬래머지(slam surge)가 유발되어 압력상승이 매우 커지기 때문에 펌프제어밸브를 사용할 때에는 이러한 사항을 신중히 검토하여야 한다.

3.5 슬래머지에 대한 검토

펌프제어밸브가 역류에 의해 갑자기 닫힌 경우 발생하는 슬래머지 현상에 대하여 검토하였다. 밸브폐쇄 시간이 4.75, 5.00, 5.25초일 때 수치계산결과 얻어진 도수관로상에서 최대, 최소압력선은 참고문헌⁽⁴⁾에 나타내었다. Table 3은 슬래머지에 의한 펌프출구측 과도특성을 요약하였다.

펌프제어밸브가 슬래밍을 일으키는 경우 판교가압장에서는 매우 위험한 수충압이 작용하게 되고, 역류를 많이 허용할수록 압력변동은 더욱 커지고 있음을 알

Table 3 Predicted maximum pressure head with the slamming time of pump control valve

	직폐형 체크밸브	펌프제어밸브의 슬래밍 (Slamming) 시간		
		4.75초	5.00초	5.25초
최대허용역류량(m ³ /s)	0.0주)	0.286	0.401	0.471
최대 압력(kg/cm ²)	13.73	17.66	19.72	24.51

주) 직폐형 체크밸브가 이상적(ideal)으로 작동하는 경우임.

수 있다. 따라서 펌프제어밸브의 상태가 불량한 경우 예기치 못한 사고를 초래할 수도 있으므로 펌프제어밸브의 성능은 확실히 보장될 수 있는 형태의 것을 사용하여야 할 것이다.

3.6 수치해석 결과

수격현상에 대한 수치해석결과, 펌프장 구내에서 부압이 발생할 가능성과 관로 및 펌프설비의 안전성에 대한 재검토의 필요성에 따라 이에 대한 펌프장 및 도수관로의 안전성을 확보하기 위하여 보완되어야 할 사항들은 아래와 같이 요약하였다.

판교가압장에서 -1 kg/cm²의 부압이 발생할 조건은 여러 가지 원인이 있을 수 있으나 다운서지를 제어할 수 있는 가장 중요한 메커니즘은 펌프·모터의 관성모멘트이고, 펌프·모터의 GD²가 680 kg·m² 이하일 때 펌프장 구내에는 -1 kg/cm²의 부압이 발생하는 것으로 예측되었다. 또한, 펌프장 흡수정의 수위와 조압수조 내 수위가 낮을수록 다운서지가 커져 관로에서 수주분리현상이 발생할 가능성은 더욱 커지며, 도수관로 상류에 설치된 300 m 공기밸브가 제대로 작동되지 않는 경우 부압은 더욱 심화될 수 있는 것으로 예측되었다.

수도권 5단계 당초 설계시 수격작용으로부터 판교가압장을 보호하기 위한 주설비로는 펌프제어밸브가 선정되었고, 압력릴리프밸브는 펌프제어밸브가 오동작했을 경우를 대비한 보조설비로서 설치하도록 계획되었다. 펌프제어밸브가 슬래밍을 일으키는 경우 판교가압장에서는 매우 위험한 수충압이 작용하고, 상황에 따라서는 뜻하지 않은 사고를 초래할 수 있는 것으로 분석되었다.

판교 가압펌프장 구내에서 부압 발생 및 슬래머지 현상을 방지하기 위해서는 에어챔버(air chamber)를 보완·설치하는 것이 합리적이며 상수도 시설의 안전을 위하여 판교가압장의 수격완화설비로서 에어챔버를 제시한다. 그리고 판교가압장과 조압수조 사이의 도수관로상에서는 수주분리현상이 발생하는 것으로 예측되어 이를 해결하기 위하여 판교가압장의 에어챔버^{(8),(9)}와 도수관로 정점부에 공기밸브를 조합·설치하면 해결될 수 있다. 에어챔버는 압력용기 내에 적절한 양의 액체와 그 위에 가압된 공기나 기체를 저장해 두어 관로 내 압력이 떨어질 때 관로에 액체를 공급하여 수주분리현상이 발생하지 않도록 하고, 압력이 급격히

상승하는 것도 효과적으로 억제해준다. 또, 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. 에어챔버는 단계별로 증설할 수 있으므로 5단계 시설에 30 m³×2 sets를, 6단계에 30 m³×1 set를 보완·설치하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

4. 현장시험 결과 및 검토

4.1 시험장치 및 방법

수격작용 발생 시 관 내 압력 및 에어챔버 내 수위 변동 등을 측정하기 위하여 자료수집장치(data acquisition system)를 사용하였고 아날로그-디지털 변환장치(analog-to-digital converter, DaqBook/100)와 컴퓨터를 연결한다. 압력전송기(pressure transmitter) 및 수위전송기(level transmitter) 등에서 측정된 전기적인 신호 값은 검사기(signal conditioner, DBK11A)를 거쳐 아날로그-디지털 변환장치로 전송되고, 수집된 데이터는 노트북에 설치된 프로그램(DaqView)을 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.

4.2 펌프 1대 긴급 정지에 따른 수격현상

제2관로 5호기 펌프의 흡·토출배관에 압력전송기와 밸브개도 지시계를 설치한 후 실험을 수행하였다. $\phi 2,300$ mm 도수관로에 연결된 저장정 가압펌프 1대(2관로 5호기)를 단독으로 운전하면서 펌프 1대를 긴급 정지시킨 후 자료수집장치를 사용하여 측정한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이 때 펌프제어밸브는 84.4%로 거의 개방되었으며, 유압실린더는 쿠션이 작용하지 않도록 유압기구의 스톱을 밸브(throttle valve)로 조절된 상태였다. 펌프제어밸브는 도수관로에서 발생하는 역류를 허용하면서 슬래밍(slamming) 현상이 발생하였고, 이로 인해 밸브디스크가 닫히면서 상당히 큰 충격음이 났으며 정상상태 압력을 상회하는

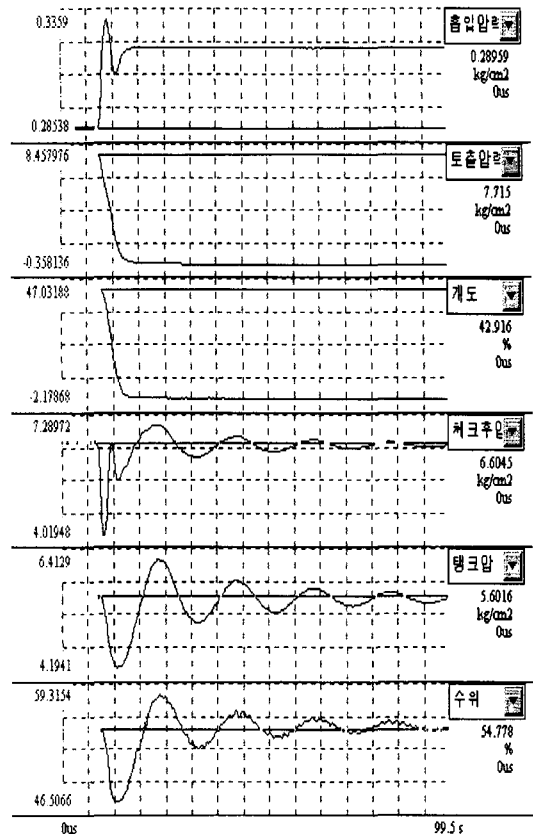


Fig 3. Waterhammer test results for 1 pump trip (#3)

슬램 서지가 작용하였음이 실측결과 확인되었다.

4.3 인라인 펌프 1대 긴급 정지에 따른 수격현상

$\phi 2,300$ mm 도수관로에 연결된 인라인 가압펌프 1대(2관로 8호기)를 단독으로 운전하면서 자료수집장치를 사용하여 측정하였다. 인라인 가압펌프의 흡입측에는 초기에 2.22 kg/cm²의 수압이, 토출측에는 6.45 kg/cm²의 압력이 작용하므로 펌프운전양정은 약 42.3 m임을 알 수 있다. 또, 수지 정수장 방면으로의 유량은 5,450 m³/h(130,800 m³/d)로, 바이패스 파이프를 통하여 인천 계통으로 공급되는 유량은 초기에 37,400 m³/h인 것으로 측정되었다.

Fig. 4는 $\phi 2,300$ mm 도수관로에 연결된 인라인 가압펌프 1대가 긴급 정지되었을 때 측정된 실험결과를 나타내었다. 펌프 트립 후 토출관로에서의 수격현상은 흡수정 방식의 경우와 별다른 차이가 없으나, 흡입관로에서의 수격압은 약 3초 후 3.55 kg/cm²까지

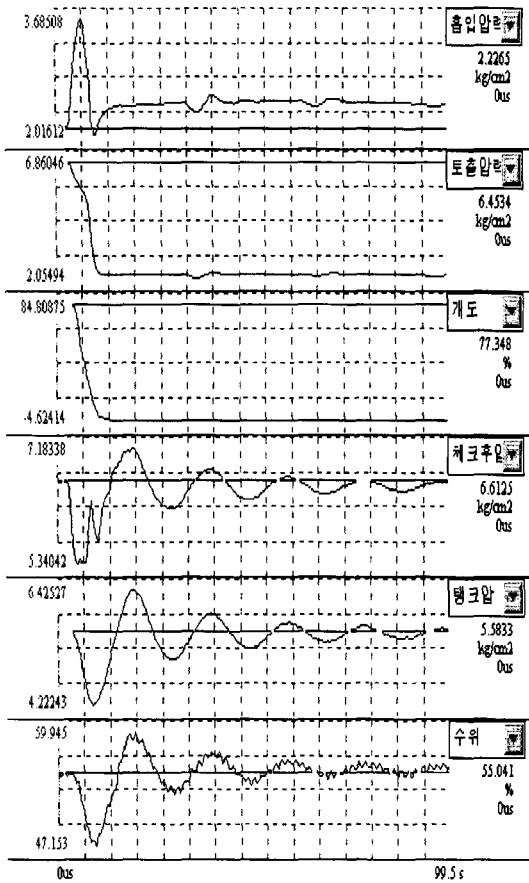


Fig 4. Waterhammer test results for an in-line pump trip(#8)

상승하였고 버터플라이형 체크밸브는 7초 정도에 완전 폐쇄되었다.

5. 결론

관교 가압펌프장의 흡수정 방식과 직결식 펌프장에서 수격현상에 대한 현장 시험을 1대~3대의 경우에 수행하였으나 패턴이 비슷하여 1대의 경우 내용만을 수치해석 결과와 비교·분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다. 또, 흡수정 방식은 1대부터 5대까지 긴급 정지와 정상 기동을 실시하였으나⁽¹⁰⁾, 본문에서 시험결과는 주로 직결식 가압장을 위주로 정리하였다.

- (1) 용수 수요가 공급 목표에 도달할 때까지는 흡수정 방식의 저양정 펌프와 직결식 펌프를 병렬로 조합 운영하는 경우 토출관로에서의 수격

현상은 흡수정 방식의 경우와 별다른 차이가 없었으나, 흡입관로에서의 수격압은 3.25 kg/cm² 까지 상승하는 것으로 측정되었다. 이처럼 직결식 펌프장의 형태로 수도시설을 운영하는 경우에는 압력파가 흡입관로를 통하여 상류로 전파될 수 있으며, 이러한 수격현상에 대한 이해가 부족한 경우에는 관교가압장의 흡입관로 및 팔당에서 관교가압장까지의 도수터널 등에서 사고가 발생할 우려가 있으므로 주의하여야 한다. 즉, 직결식 가압펌프를 운영하는 경우에는 바이패스 파이프를 통하여 인천 계통으로 용수가 계속 공급되거나, 관교가압장 흡수정으로 원수가 유입되어 직결식 펌프 쪽에서 유량이 급속히 차단되더라도 흡입관로에서 수격압이 급격히 상승하는 일이 없도록 유의하여야 한다.

- (2) 용수 공급의 상황에서 가능성은 낮지만 인천 계통이 단수작업 등으로 용수 공급을 중단하고 평택 계통은 직결식 펌프만 가동하는 경우에 정전 등으로 직결식 펌프가 긴급 정지되면 상기에서 제기된 사고가 발생할 수 있고, 도수터널 시설 중 스탠드 파이프가 월류되어 주변 지역이 침수될 수 있다. 그러므로, 유입 관로 상에 서지릴리프밸브 등 안전설비를 보완하여 어떠한 상황에서도 안전하게 용수가 공급될 수 있어야 한다.
- (3) 펌프 트립 후 버터플라이형 체크밸브(또는 펌프제어밸브)는 밸브디스크의 구조 및 관성으로 인하여 역류가 발생하는 순간에 닫히지 못하고 약간의 역류를 허용하면서 닫히기 때문에 여전히 슬래밍 현상이 발생하였으나, 이 슬램 서지는 에어챔버가 설치됨으로써 주기가 매우 길어진 다운서지(압력이 떨어지는) 과정 중에 발생하였기 때문에 그다지 우려할 상황이 아닌 것으로 분석되었다. 또한, 펌프제어밸브의 슬래밍 현상을 줄이기 위하여 유압실린더의 밸브 개도를 변화시켜 쿠션 작용을 일으킬 수 있도록 조절하였을 때 밸브디스크는 매우 부드럽게 닫혔으며, 충격음 및 채터링 역시 현격히 감소한 것으로 관측되었다.
- (4) 관교 가압장에 보완 설치된 에어챔버는 5단계 시설용량에 대하여 도수관로에서 발생하는 수격작용을 매우 효과적으로 완화시키고 있음이 현장시험 및 수치해석을 통하여 확인되었다.

흡수정 방식 및 인라인 펌프장의 서로 다른 형태로 운영될 수 있는 관교 가압장에서 보다 신속한 용수 공급을 위하여 펌프의 기동 시 비교적 빠른 속도로 밸브를 개방하더라도 수격작용은 에어챔버에 의해 효과적으로 완화되었다. 이러한 결과들을 종합적으로 검토해 볼 때 관교 가압장에 에어챔버가 보완 설치됨으로써 시스템의 안전성이 크게 향상된 것으로 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Wylie, E. B., Streeter, V. L., 1993, Fluid Transients in Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- (2) 환경부, 2004, 상수도 시설기준, 한국수도협회.
- (3) Sanks, R.L., 1998, Pumping Station Design, 2nd ed., Butterworth-Heinemann.
- (4) 한국수자원공사, 1995~8, 수도권 광역상수도 5, 6단계 사업 실시설계 보고서
- (5) 김경엽, 2002, "에어챔버가 설치된 송수관로에서의 수격현상," 대한기계학회논문집 B권, 제26권, 제2호, pp.177~183.
- (6) 이택식, 강신형, 1985, 유체과도현상의 해석, 서울대학교 생산기술연구소 보고서.
- (7) 日本水道協會, 2000, 水道施設設計指針.
- (8) Falconer, R. H., Banks, W., and Ellis, J., 1983, "Surge Pressures at Riding Mill Pumping Station: Actual Values and Theoretical Predictions," 4th International Conference on Pressure Surges, BHRA Fluid Engineering, Bath, England.
- (9) Kim, K. Y., Oh, S. Y., and Lee, Y. B., 1997, "Waterhammer in the Pump Pipeline System with an Air Chamber," the 5th Asian Int. Conf. on Fluid Machinery, Seoul, Korea, pp. 569~576.
- (10) 김상균, 이동근, 이계복, 김경엽, 2005, "가압 펌프장의 수격완화설비에 대한 보수·보강 사례", 유체기계저널, 제8권, 제4호, pp. 20~26.