

직결식 펌프의 수격현상

김상균* · 이계복** · 김경엽***

Waterhammer For In-line Booster Pump

S. G. Kim*, K. B. Lee**, K. Y. Kim***

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

ABSTRACT

The waterhammer occurred 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 of the waterhammer were carried out for PanGyo booster pumping station. The PanGyo pumping station was installed booster pump of 6 sets and in-line pump of 2 sets. The main surge suppression device was equipped with the pump control valve and the surge relief valve as auxiliary. However, the pump control valve had not early controlled in the planned closing mode, and the slamming occurred to the valve of 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. After the addition surge suppression device was equipped with air chamber. Further more in-line pump is needed surge suppression device that the pumping station acquired the safety and reliability for the pressure surge.

1. 서론

현대사회의 도시발달로 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 정상운전 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 압력파가 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 부대 시설이 파손되어 손상을 입기도 하며, 관로 내의 압력 상승 및 강하에 의해 관로가 붕괴되거나 수주 분리가 발생하여 관로가 파열되기도 한다. 또한 관로 내의 주기적인 압력 변동 때문에 자동제어 계통에서 압력 제어를 정확히 하기 어렵고, 심지어 구조물이 파손되는 사례가 발생하기도 한다.

펌프관로계에서 수격작용을 완화시키는 장치로는 Fig. 1과 같이 주로 에어챔버, 서지탱크, 서지릴리프밸브, 공기밸브, 펌프제어밸브 등이 사용되는데, 이러한 설비들은 용수량, 관로 길이 및 형상, 설치장소 등에 따라 경제성과 신뢰성을 고려하여 적절히 설계되어야 한다.^(2,3) 에어챔버는 압력용기 내에 적

* 한국수자원공사
ksgy@kowaco.or.kr
** 충북대학교 기계공학과
*** 한국산업기술대학교 기계공학과

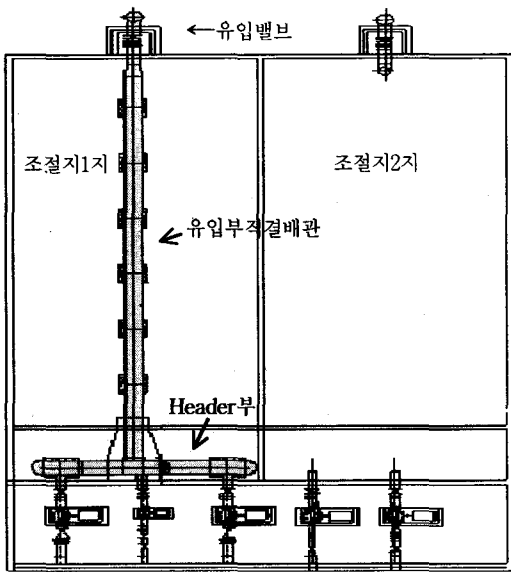


Fig. 3 개선후 평면도

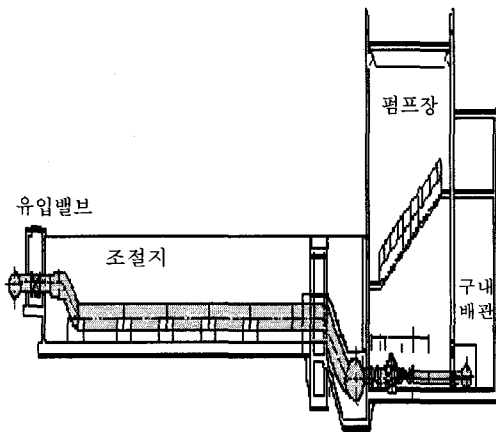


Fig. 4 개선후 단면도



Fig. 5 유입배관 설치전경

2.2. 수지정수장 도수관로

관교가압장에서 수지정수장까지의 관로형상(Pipeline - Profile)을 Fig 6에 나타내었다. 관교가압장에서 수지정수장까지의 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 양흡입 원심펌프가 5단계에서 6대, 6단계에서 9대씩 병렬로 운전되며, 관교가압장에서 병렬로 운전되고 있는 펌프들이 갑작스런 정전으로 Run-down 되었을 때 발생하는 수격작용이 가장 심각하다.

도수관로 도중에 2.6m×1열의 강관이 존재하는데, 이 곳은 관로의 형상이 급격히 상승하여 그 위치가 정상상태 동수구배선(Hydraulic Grade Line)에 매우 근접해진다. 정상운전중인 펌프로의 동력이 갑자기 차단될 때, 이 곳에서 관로내의 압력은 물의 포화증기압 이하로 낮아져 증기공동이 형성되며 결국, 수주분리현상이 발생한다. 관로내 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 10m의 조압수조를 설치하였다. 또한, 수도권 5단계 당초 설계시 수격작용으로부터 관교가압장을 보호하기 위한 주철비는 펌프제어밸브(또는 제어용 체크밸브)가 선정되었고, 압력 릴리프밸브는 펌프제어밸브가 오동작했을 경우를 대비한 보조설비로서 설치하도록 계획되었다. 그리고, 수도권 6단계 실시계획시 조압수조 상류의 도수관로 정점부에서 부압이 발생하는 것으로 검토되어, 이 지점에는 수격방지용 공기밸브가 보완·설치되었다. 여기서, 수칙계산에 사용된 입력자료 및 수격완화설비의 제원은 각각 다음과 같다.

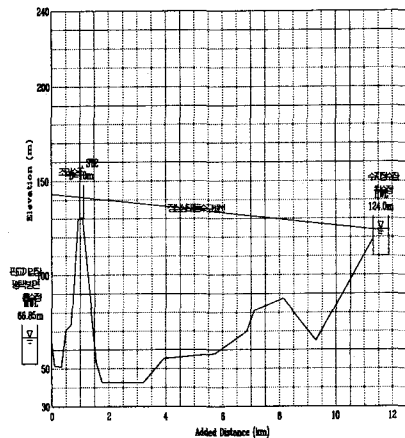


Fig. 6. Longitudinal pipeline profile and simulated nodes from PanGyo booster pumping station to the gauging well of Suji water treatment plant.

3. 수치해석

3.1. 입력자료

(1) 펌프 자료:

펌프 운전 대수	= 6 sets
규정 양정	= 79 m
규정 토출량	= 96.5 m ³ /min
규정 회전수	= 710 rpm (10 pole)
펌프 · 모터 GD ²	= 1,020 kg · 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) Pressure Relief Valve:

노즐 구경	= 125 mm
설치대수	= 4 sets
개방 압력 수두	= 99 m

(5) 수격방지용 공기밸브:

형식	= Slow Closing Air and Vacuum Valve
설치 위치	= P03, P08, P09
구경	= 300 mm (5단계 관로)

(6) 조압수조(Surge Tank, ST2):

설치위치	= 관로 정점부
직경	= 10.0 m
Bottom Elevation	= 131.6 m
Top Elevation	= 146.5 m
연결관 직경	= 2.6 m

관교가압장에서 병렬로 운전되고 있는 펌프들이 갑작스런 정전으로 Run-down 되었을 때 발생하는 수격작용이 가장 심각한데, 이에 대한 수격현상은 전용 전산프로그램인 WHAP (WaterHammer Analysis Program)^(8,9)를 사용하여 수치해석하였다.

3.2. 관교가압장 수격현상

정상운전 중인 펌프가 갑작스런 정전으로 트립(Trip)되었을 때 가압장에서 발생한 압력파는 조압수조 위치에서 대부분이 반사되고, 나머지는 수지정수장 쪽으로 계속 전파된다(Fig. 6). ø2,600 도수관로의 위치(관저고=130.5m)는 전체 관로 구간에서 가장 높아 펌프가 꺼진 후에도 조압수조 하류지역에서는 자연유하(Gravity Flow)에 의한 유동이 계속적으로 형성되고, 조압수조내의 물은 모두 유출되며 결국 하류지역의 관로로 공기가 유입된다. 관로정점부에 설치된 조압수조에 의해 하류지역의 도수관로는 수격작용으로부터 효과적으로 보호받을 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 관교가압장과 조압수조 사이를 양복하는 짧은 주기의 압력파를 고찰하기 위하여 상세한 관로 조건을 살펴보면,

조압수조의 설치위치가 ø2,600 도수관로 시점에서 약 80m 하류 지점에 있고 펌프출구로부터 1,140m 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. 또한 본 검토의 목적이 관교가압장 구내에서 부압이 발생할 가능성의 여부를 조사하는데 있으므로, 5단계 설계유량(=746,550m³/일)보다 다소 많은 833,760m³/일(= 펌프정격유량 96.5m³/min × 6대)의 용수가 2,300mm 도수관로로 가압되는 보다 악조건의 상황에 대하여 분석하였다.

3.3. 펌프 · 모터의 관성 모멘트

관교가압장에 펌프제어밸브가 아닌 직폐형 체크밸브(또는 Ideal Check Valve)가 사용된 경우 펌프 · 모터의 관성모멘트, GD²가 680~1,500 kg · m² 사이에서 변할 때 가압장과 조압수조 사이의 도수관로상에서 최대, 최소압력선을 나타낼 수 있다. 펌프 · 모터의 GD²가 작을수록 도수관로상에서의 압력 변동은 약간씩 커지며, GD²가 680kg · m²일 때 펌프장 구내에는 -1 kg/cm²의 부압이 발생(수도시설설계지침⁽¹⁰⁾에서는 -7.0m까지 부압을 허용함)하는 것으로 예측되었다. Table 1은 펌프 · 모터 GD²에 따른 펌프장 구내에서의 최대 · 최소압력수두를 나타내었다. 본 시스템의 경우 펌프장 구내에서 부압 발생을 방지하기 위해서는 수도권 6단계 실시 설계시 제시된 바와 같이 펌프 · 모터의 GD²가 1,020 kg · m² 이상이어야 한다. 관교가압장은 팔당 취수펌프장과 마찬가지로 도수관로나 펌프장에서의 부압 발생을 주로 펌프 · 모터의 GD²에 의해 방지하고 있기 때문에 실제로 펌프 · 모터의 공급업체에 의해 설치된 펌프 · 모터의 관성모멘트가 얼마나 정확히 산정 또는 보증되었는지를 확인하는 것이 매우 중요한 사항이다.

Table 1 펌프 · 모터 GD²에 따른 최대, 최소압력수두

펌프 · 모터 GD ² (kg · m ²)	1,500	850	680
펌프출구측 최소압력수두(m)	4.93	-2.62	-10.36
펌프출구측 최대압력수두(m)	134.4	137.3	148.4

관교가압장에서 -1 kg/cm²의 부압이 발생할 조건은 여러 가지 원인이 있을 수 있으나 다운서지(Downsurge)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 조압수조내 수위가 낮을수록 다운서지가 커져 관로에서 수주분리현상이 발생할 가능성은 더욱 커진다. 또한, 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 300mm 공기밸브(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

관교가압장을 보호하기 위한 주설비로는 역류방지 및 유량제어를 동시에 수행할 수 있는 펌프제어밸브가 선정⁽¹¹⁾되었고, 서지릴리프밸브는 펌프제어밸브가 오동작 했을 경우와 과도한 이상 압력에 대비한 안전설비로서 계획되었다. 이는 관로상에서 수주분리현상이 발생하지 않을 때 압력 상승만을 억제할 목적으로 사용되는 경우 매우 유용한 방안이라 할 수 있다. 일반적으로 펌프 출구측에 어떠한 밸브(불밸브, 체크밸브 등)를 설치하였을 때 이것들을 인위적으로 제어하면 과도현상은 변한다. 수격작용의 제어목표는 될수록 짧은 시간 내에 최소의 압력 변화로 가급적 적은 역류, 역전으로 유동을 차단하는데 있다. 제1단계(펌프특성범위: 正轉, 正流)의 압력저하는 관로와 펌프에 의해 자동적으로 정해지므로, 밸브제어의 목적은 주로 제2단계(제동특성범위: 正轉, 逆流) 이후의 역류를 심하게 증가시키지 않고 천천히 멈추는데 있다. 따라서 이는 관로가 짧고 실양정이 큰 경우에 주로 사용되는 방법이다.

펌프제어밸브는 Fig 7.과 같이 제1단계에서 대부분을 폐쇄하고 제2단계에서 나머지 밸브개도(valve opening)를 서서히 닫는 것이 합리적이므로, 밸브제어형태를 이와 같이 작동하는 밸브를 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 관경에 따라 달라진다. 펌프·모터의 GD^2 가 $850 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 이고, 도수유량이 $833,760 \text{ m}^3/\text{일}$ 경우 $2,300\text{mm}$ 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 다운서지(downsurge)를 제어할 수 없으므로 밸브의 종류와는 무관하게 관로내 최저압력이 되고 있다. 관로내의 상승압은 펌프제어밸브의 폐쇄시간을 길게 할수록 더욱 완화됨을 알 수 있다.

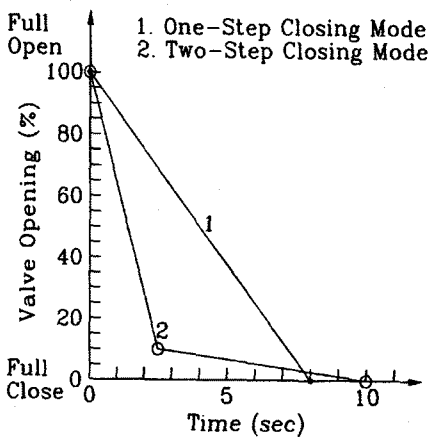


Fig 7. Closing modes of the control valve after pump trip

Table 2 펌프제어밸브의 폐쇄시간에 따른 펌프출구측 과도 특성의 비교.

	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

펌프출구에서의 피에조수두(piezometric head = 압력수두 + 위치수두)변동을 살펴보면 보다 명확해지고 체크밸브가 닫힌 후 수충압은 약 5초의 주기로 매우 빈번히 작용하고 있으며 펌프를 통한 유량 변동, 펌프 회전수 변화를 나타낼 수 있다. 단순히 역류방지 역할만 하는 이상적인 체크밸브는 유동손실 및 디스크 관성이 작아 관내의 유동이 정지하는 순간에 닫히게 되나, 펌프제어밸브(PCV)는 밸브디스크를 제어하기 위해 유압기구를 사용하며 일정한 개도 범위에서 닫히는 속도를 제어함으로써 역류를 허용하고 이 역류량을 점차 감소시켜 수충압을 완화시킨다. 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 슬램서지(Slam Surge)가 유발되어 압력상승이 매우 커지기 때문에 펌프제어밸브를 사용할 때에는 이러한 사항을 신중히 검토하여야 한다.

즉, 펌프제어밸브를 통해서 물이 역류하는 동안에 밸브디스크(Disk)는 유동의 저항과 카운터웨이트의 하중 그리고 수충압 등에 의해 막대한 힘($F = p_{\text{max}} \times A = 9.49 \text{ kg}/\text{cm}^2 \times \pi 70^2/4 \text{ cm}^2 = 36,522 \text{ kg} \approx 37\text{톤}$)을 받게 되는데, 밸브디스크를 조절하는 유압기구가 불량한 경우 이 역류가 갑자기 차단되면 과도한 수충압이 발생하여 사고 발생의 위험성이 있으므로 각별히 유의하여야 한다. 수도권 6단계 실시체계시 슬램서지에 의한 사고발생의 우려가 이미 제기되었다.

실제로 5단계 팔당 취수펌프장에는 이러한 문제가 발생하였으며, 현재는 펌프제어밸브의 유압기구를 대폭 보강하여 정상 운영 중에 있다.

3.5. 슬램서지에 대한 검토

펌프제어밸브가 역류에 의해 갑자기 닫힌 경우 발생하는 슬램서지 현상에 대하여 검토하였다. 밸브폐쇄시간이 4.75, 5.00, 5.25초일 때 수치계산결과 얻어진 도수관로상에서 최대, 최소압력선을 표시할 수 있다. Table 3은 슬램서지에 의한 펌프출구측 과도특성을 요약하였다.

펌프제어밸브가 슬래밍을 일으키는 경우 관교가압장에는 매우 위험한 수충압이 작용하게 되고, 역류를 많이 허용할수록 압력변동은 더욱 커지고 있음을 알 수 있다. 따라서 펌프제어밸브의 상태가 불량한 경우 예기치 못한 사고를 초래할 수도 있으므로 펌프제어밸브의 성능은 확실히 보장될 수 있는 형태의 것을 사용하여야 할 것이다.

Table 3 슬램서지에 의한 펌프출구측 과도특성.

	직폐형 체크밸브	펌프제어밸브의 슬래밍(Slamming) 시간		
		4.75초	5.00초	5.25초
최대허용역류량 (m ³ /s)	0.0 ^(주)	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.

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 사항들을 다음과 같다.

(1) 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 680kg·m² 이하일 때 펌프장 구내에는 -1 kg/cm²의 부압이 발생하는 것으로 예측되었다. 또한, 펌프장 흡수정의 수위와 조압수조내 수위가 낮을수록 다운서지가 커져 관로에서 수주분리현상이 발생할 가능성은 더욱 커지며, 도수관로 상류에 설치된 300mm 공기밸브가 제대로 작동되지 않는 경우 부압은 더욱 심화될 수 있는 것으로 예측되었다.

(2) 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.

(3) 판교 가압펌프장 구내에서 부압 발생 및 슬램서지 현상을 방지하기 위해서는 에어챔버(Air Chamber)를 보완·설치하는 것이 합리적이며 상수도 시설의 안전을 위하여 판교가압장의 수격완화설비로서 에어챔버를 제시되었다. 그리고 판교가압장과 조압수조 사이의 도수관로상에서는 수주분리현상이 발생하는 것으로 예측되어 이를 해결하기 위하여 판교가압장의 에어챔버(Air Chamber)와 도수관로 정점부에 공기밸브를 조합·설치하면 해결될 수 있다. 에어챔버는 압력용기내에 적절한 양의 액체와 그 위에 가압된 공기나 기체를 저장해 두어 관로내의 압력이 떨어질 때 관로에 액체를 공급하여 수주분리현상이 발생하지 않도록 하고, 압력이 급격히 상승하는 것도 효과적으로 억제해준다. 또한, 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 30m³×2sets를, 6단계에 30m³×1set를 보완·설치하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

4. 현장시험 결과 및 검토

4.1. 시험장치 및 방법

수격현상에 대한 현장 시험을 수행하기 위하여 구성된 측정 장비의 개략적인 배치도를 Fig 8와 같고, 수격작용 발생 시 관내 압력 및 Air Chamber내 수위 변동 등을 측정하기 위하여 Data Aquisition System(DAS)을 사용하였고 Analog-to-Digital Converter(Model: DaqBook/100)와 컴퓨터 및 프린터와 연결한다. 압력전송기(Pressure Transmitter) 및 수위전송기(Level Transmitter) 등에서 측정된 전기적인 신호 값은 Signal Conditioner (Model: DBK11A)를 거쳐 Analog-to-Digital Converter로 전송되고, 수집된 데이터는 Notebook 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.

PT: Pressure Transmitter
VT: Valve Opening Transmitter
FM: Flow Meter

BV: Ball Valve
FJ: Flexible Joint

PC: Personal Computer
DAS: Data Aquisition System

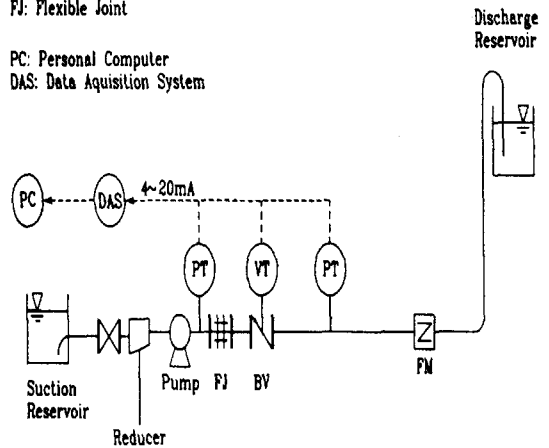


Fig 8. Schematic diagram of the measuring layout

Table 3 주요 지점에서의 정상상태 측정값(#3)

Channel Number	측정 명칭	단위	정상상태 측정값
CH1	펌프 흡입측 압력	kg/cm ²	0.28
CH2	펌프 토출측 압력	kg/cm ²	7.71
CH3	펌프제어밸브의 개도	%	42.9
CH4	펌프제어밸브 하류측 압력	kg/cm ²	6.60
CH5	Air Chamber 내 압력	kg/cm ²	5.60
CH6	Air Chamber 내 수위	%	54.7
중앙제이 실	주 관로 압력	kg/cm ²	7.47
	조압수조 내 수위	m	128.4
	주 관로를 통한 유량	m ³ /h	5,500

4.2. 펌프 1대 긴급 정지에 따른 수격현상

제 1 관로 3호기 펌프의 흡·토출배관에 압력전송기와 밸브개도 지시계를 설치한 후 실험을 수행하였다. ø2,300 mm 도수관로에 연결된 가압펌프 1대(1관로 3호기)를 단독으로 운

제 1 관로 3호기 펌프의 흡·토출배관에 압력전송기와 밸브개도 지시계를 설치한 후 실험을 수행하였다. ø2,300 mm 도수관로에 연결된 가압펌프 1대(1관로 3호기)를 단독으로 운전하면서 Data Acquisition System을 사용하여 측정된 주요

지점에서의 정상상태 값을 Table 3에 나타내었다. 펌프제어밸브는 슬래밍 현상을 줄이기 위하여 유압실린더가 밸브개도 15%에서 쿠션(Cushion) 작용을 일으킬 수 있도록 유압기구의 스톱을 밸브를 재조정하였다.

이 때 펌프제어밸브는 42.9%로 반쯤 열렸는데, 이는 모터의 과부하 및 조압수조를 통한 유틸리티 사전에 예방하고 저장정 펌프와의 병렬운전을 미리 염두에 둔 조치인 것으로 사료된다. 이에 따라 펌프제어밸브에서는 약 11.1 m(=77.1- 66.0)의 손실수두가 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig 9은 정격양정의 가압펌프 1대가 긴급 정지되었을 때 측정된 실험결과를 나타내었다. 펌프제어밸브에서는 여전히 슬래밍 현상이 발생하였으나, 밸브디스크는 앞의 경우에 비해 상당히 부드럽게 닫혔으며 충격음 및 채터링(Chattering) 역시 현격히 감소한 것으로 관측되었다.

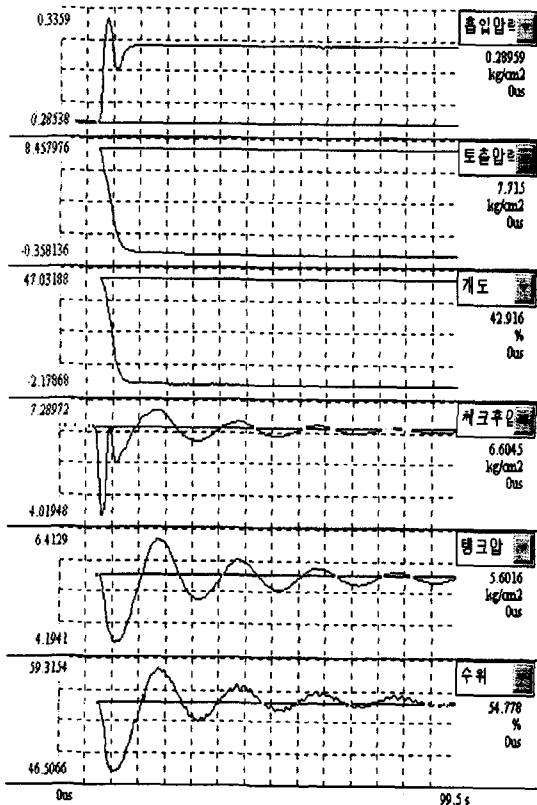


Fig 9. Waterhammer test results for 1 pump trip(#3).

4.3. 인라인 펌프 1대 긴급 정지에 따른 수격현상

ø2,300 mm 도수관로에 연결된 인라인 가압펌프 1대(2관로 8호기)를 단독으로 운전하면서 Data Acquisition System을 사용하여 측정된 주요 지점에서의 정상상태 값을 Table 4에 나타내었다. 인라인 가압펌프의 흡입측에는 초기에 2.22 kg/cm²의 수압이, 토출측에는 6.45 kg/cm²의 압력이 작용하므로 펌프운전양정은 약 42.3 m임을 알 수 있다. 또한, 수지정수장 방면으로의 유량은 5,450 m³/h(130,800 m³/일)으로, 바이패스 파이프를 통하여 인천 계통으로 공급되는 유량은 초기에 37,400 m³/h인 것으로 측정되었다. Fig 10.는 ø2,300 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 상승하였고 버터플라이형 체크밸브는 7초 정도에 완전 폐쇄되었다.

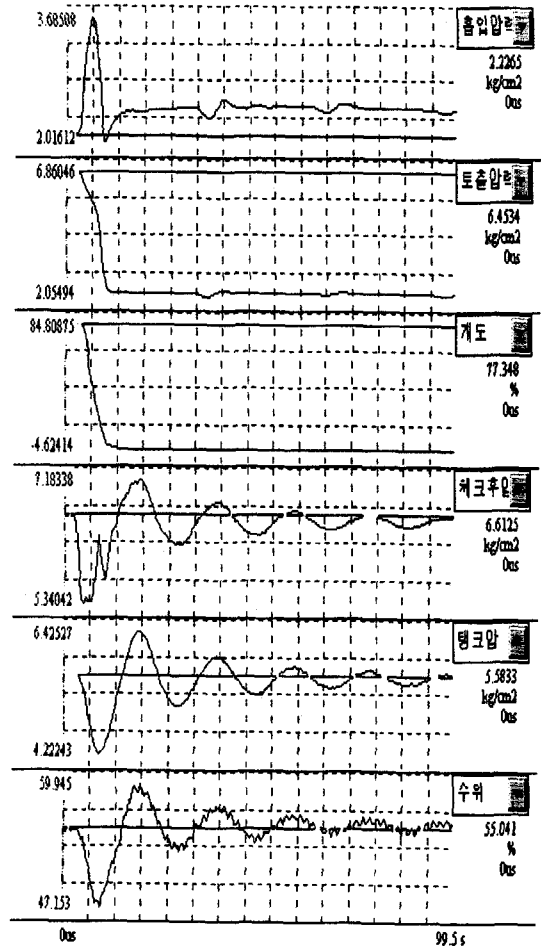


Fig 10. Waterhammer test results for an in-line pump trip(#8).

Table 4 주요 지점에서의 정상상태 측정값(#8)

Channel Number	계측 명칭	단위	정상상태 측정값
CH1	펌프 흡입측 압력	kg/cm ²	2.22
CH2	펌프 토출측 압력	kg/cm ²	6.45
CH3	펌프제어밸브의 개도	%	77.3
CH4	펌프제어밸브 하류측 압력	kg/cm ²	6.61
CH5	Air Chamber 내 압력	kg/cm ²	5.58
CH6	Air Chamber 내 수위	%	55.0
중앙계 어실	주 관로 압력	kg/cm ²	7.46
	조압수조 내 수위	m	128.3
	주 관로를 통한 유량	m ³ /h	5,450

4.4. 수치해석과 실험결과의 비교

정상상태 측정값을 토대로 수치계산을 위한 입력자료를 작성한 후 수치해석을 수행하였다. Fig 11. ~ Fig 12.은 펌프운전대수가 1대 및 5대까지의 경우에 대해 주요 지점에서의 실험결과와 해석결과를 서로 비교하여 나타내었다. 수치계산에서는 밸브의 슬래밍을 고려하지 않았기 때문에 밸브 하류에서 압력변동은 첫 번째 다운서지 과정에서의 실험결과와 차이를 나타내고 있으나, 장주기의 압력파(Long Pressure Surge)에 의한 수격현상은 합리적으로 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. 또한, 펌프가 트립된 순간 밸브 하류에서 압력이 떨어지는 기울기 즉, 압력구배(Pressure Gradient)는 실험결과가 수치계산결과에 비해 훨씬 크며, 이러한 차이는 펌프 운전대수가 감소할수록 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다. 이는 수치계산에 사용된 펌프·모터의 관성모멘트($GD^2 = 1,020 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)가 실제 값보다 크게 사용되었을 때 나타날 수 있다. 펌프운전대수가 증가할수록 수주의 관성이 커져 수격현상의 주기는 조금씩 길어지고, 다운서지와 업서지에 의한 압력변동도 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 수치계산결과는 수격현상의 1~2 주기까지 측정값과 비교적 잘 일치하며, 펌프-관로계에 작용하는 최대·최소압력 및 그 발생시간도 합리적으로 예측하고 있다. 관교가압장에 보완 설치된 Air Chamber는 5단계 시설용량에 대하여 도수관로에서 발생하는 수격작용을 매우 효과적으로 완화시키고 있음이 현장시험 및 수치해석을 통하여 확인되었다.

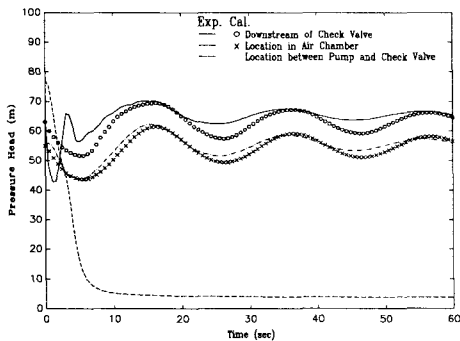


Fig 11. Comparison of measured and predicted results for 1 pump trip.

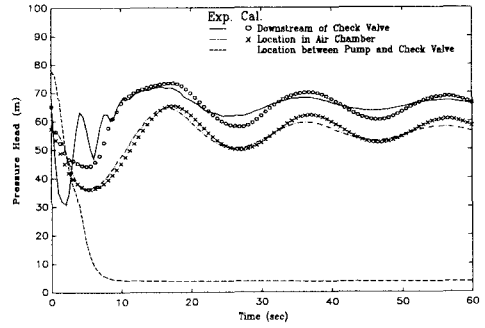


Fig 12. Comparison of measured and predicted results for 2 pumps trip.

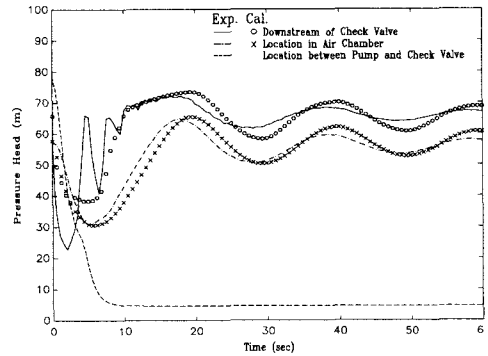


Fig 13. Comparison of measured and predicted results for 3 pumps trip.

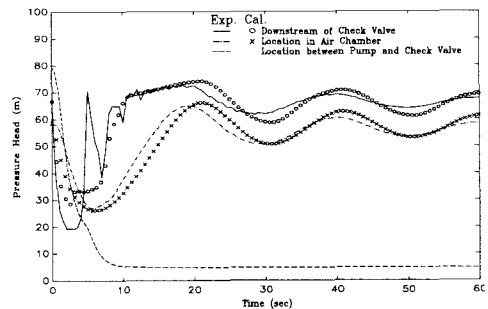


Fig 14. Comparison of measured and predicted results for 4 pumps trip.

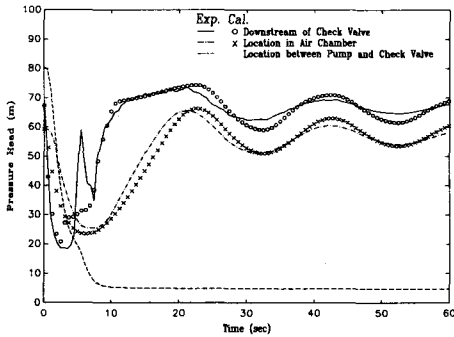


Fig 14. Comparison of measured and predicted results for 5 pumps trip.

5. 결론

판교가압펌프장의 흡수정방식과 직결식 펌프장에서 수격현상에 대한 현장 시험(Field Test)을 수행하여 수치해석 결과와 비교·분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 용수수요가 공급목표에 도달할때까지는 흡수정 방식의 저양정 펌프와 직결식 펌프를 병렬로 조합 운영하는 경우 이 때 토출관로에서의 수격현상은 흡수정 방식의 경우와 별다른 차이가 없었으나, 흡입관로에서의 수격압은 3.25 kg/cm²까지 상승하는 것으로 측정되었다. 이처럼 직결식 펌프장의 형태로 수도시설을 운영하는 경우에는 압력과 흡입관로를 통하여 상류로 전파될 수 있으며, 이러한 수격현상에 대한 이해가 부족한 경우에는 판교가압장의 흡입관로 및 팔당에서 판교가압장까지의 도수터널 등에서 사고가 발생할 우려가 있으므로 주의하여야 한다. 그러므로 직결식 가압펌프를 운영하는 경우에는 바이패스 파이프를 통하여 인전 계통으로 용수가 계속 공급되거나, 판교가압장 흡수정으로 원수가 유입되어 직결식 펌프 쪽에서 유량이 급속히 차단되더라도 흡입관로에서 수격압이 급격히 상승하는 일이 없도록 유의하여야 한다.
- (2) 용수공급의 상황에서 가능성은 낮지만 인전계통이 단수작업 등으로 용수공급이 중단하고 평택계통은 직결식 펌프만 가동하는 경우에 정전 등으로 직결식펌프가 급차단되면 상지에서 제기된 사고가 발생할 수 있고, 도수터널시설 중 Stand Pipe의 월류되어 주변지역이 침수되는 등 사고사례도 있어 유입관로상에 서지탈리프밸브 등 안전설비를 보완하여 어떠한 상황에서도 안전하게 용수공급될 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 슬랩 서지는 Air Chamber가 설치됨으로써 주기가 매우 길어진 다운서지(압력이 떨어지는) 과정 중에 발생하였기 때문에 그다지 우려할 상황이 아닌 것으로 분석되었

다. 또한, 펌프제어밸브의 슬래밍 현상을 줄이기 위하여 유압실린더가 밸브개도 15%에서 쿠션 작용을 일으킬 수 있도록 조절하였을 때 밸브디스크는 매우 부드럽게 닫혔으며, 충격음 및 채터링 역시 현격히 감소한 것으로 관측되었다.

- (4) 판교 가압장에 보완 설치된 Air Chamber는 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 판교 가압장에서 보다 신속한 용수공급을 위하여 펌프의 기동 시 비교적 빠른 속도로 밸브를 개방하더라도 수격작용은 Air Chamber에 의해 효과적으로 완화되었다. 이러한 결과들을 종합적으로 검토해 볼 때 판교 가압장에 Air Chamber가 보완 설치됨으로써 시스템의 안전성이 크게 향상된 것으로 판단된다.

후 기

본 연구를 위해 현장시험에서 최대전력부하를 피해 한겨울의 새벽까지 수고를 아끼지 않으신 김경엽 교수님, 이계복 교수님, 수도권건설단 및 성남권관리단의 관계직원 여러분께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Wylie, E. B., Streeter, V. L., 1993, Fluid Transients in Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- 2) 환경부, 1997, 상수도 시설기준, 한국수도협회.
- 3) Sanks, R.L., 1998, Pumping Station Design, 2nd ed., Butterworth-Heinemann.
- 4) 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.
- 5) Sanks, R.L., 1998, Pumping Station Design, 2nd ed., Butterworth-Heinemann.
- 6) 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.
- 7) Sanks, R.L., 1998, Pumping Station Design, 2nd ed., Butterworth-Heinemann.
- 8) 김경엽, 2002, "에어챔버가 설치된 송수관로에서의 수격현상," 대한기계학회논문집 B권, 제26권, 제2호, pp.177~183.
- 9) 이택식, 강신형, 1985, 유체과도현상의 해석, 서울대학교 생산기술연구소 보고서.
- 10) 日本水道協會, 2000, 水道施設設計指針.
- 11) 한국수자원공사, 1995~8, 수도권 광역상수도 5, 6단계 사업 실시설계 보고서.