

팔당 취수펌프장의 수격현상에 관한 수치해석적 연구

김경엽* · 유택인*

Numerical Study on the Waterhammer of PalDang Intake Pumping Station

Kyung-Yup Kim*, Teak-In Yu*

Key Words: Waterhammer(수격현상), Intake Pumping Station(취수펌프장), Moment of Inertia(관성모멘트), Pump Control Valve(펌프제어밸브), Slam Surge(슬램서지)

ABSTRACT

The numerical study on the waterhammer was carried out for the intake pumping station of the metropolitan water supply 6th stage project. Because the waterhammer problems as a result of the pump power failure were the most important, these situations were carefully investigated. The surge tank and the stand pipes effectively protected the tunnels and the downstream region of pipeline from the pressure surge. In case the moment of inertia of the pump and motor was above $5080 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, the column separation did not occur in the pipeline between the pumping station and the inlet of 1st tunnel. As the moment of inertia increased, the pressure surges decreased in the pipeline conveying raw water. The pump control valve was chosen as the main surge suppression device for the intake pumping station. After power failure, the valve disc should be rapidly closed in 2.5 seconds and controlled the final closure to 15 seconds by the oil dashpot. If the slamming happened to the pump control valve, there was some danger of this system damaging. As the reverse flow through the valve increased, the upsurge extremely increased.

1. 서 론

상수도 시설의 사고는 일반적으로 복합적인 원인에 의해 발생되지만, 특히 펌프를 기동시키거나 정상운전 중 정전으로 인하여 갑자기 동력을 잃게 될 때 또는 밸브의 개도를 빠르게 변화시킬 때 그 순간 관로내의 유속이 급격히 변하면 압력도 크게 상승하거나 강하하게 되어 수격현상(waterhammer)으로 인한 사고가 유발될 수 있다. 이러한 수격작용으로 압력파가 상류단

과 하류단 사이를 왕복할 때 관로내의 압력은 관로 형상에 따라 물의 포화증기압 이하로 떨어질 수 있으며, 이 경우 증기공동(vapor cavity)이 형성되고 이것이 심화될 경우 수주분리현상(column separation)이 발생한다. 관로내의 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 열거하면, 펌프의 동력이 갑자기 차단될 때 송수 유량의 역류로 인하여 펌프·모터가 역회전으로 가속되어 사고가 발생할 우려가 있고, 압력 상승으로 인하여 펌프, 밸브, 관로 및

* 한국산업기술대학교 기계공학과
E-mail : kykim@kpu.ac.kr

부대 시설이 파손되어 손상을 입기도 하며, 관로내의 압력 상승 및 강하에 의해 관로가 붕괴되거나 수주 분리가 발생하여 관로가 파열되기도 한다. 또한 관로내의 주기적인 압력 변동 때문에 자동제어계통에서 압력 제어를 정확히 하기 어렵고, 심지어 구조물이 파손되는 사례가 발생하기도 한다. 한국수자원공사에서 운영·관리하고 있는 펌프장 61개소, 시설 용량 약 15,290,000 m³/일에 대하여 1990년 이후 현장에서 발생한 고장 및 사고 사례를 조사·분석한 결과, 수충격에 의한 파손 27%, 밸브 부속 기기류의 고장 13.5%, 진동에 의한 축정렬 불량 13.5%, 기계 마모 13.5%, 모터 소손 10.9%, 기타 8건 21.6%로 나타났다.⁽²⁾

최근에는 펌프장이 대형화되고 대구경 장거리 관로로 유체를 수송하는 계통이 점차 복잡해짐에 따라 수격현상이 보다 심각한 문제가 되고 있다. 다른 사고 원인에 의한 것과는 달리 수충격에 의한 사고는 펌프장의 침수 및 관로의 파손으로 인하여 사회적인 문제, 즉 단수로 인한 일상 생활의 불편과 침수로 인한 재산 피해 그리고 교통 장애로 인한 도시 기능의 저하 등 커다란 문제를 야기할 수 있기 때문에 이에 대한 근본적인 대책이 절실히 요구되고 있다. 이러한 수격작용을 완화시키거나 시스템을 보호하기 위하여 수격완화설비에 대한 검토가 필요하며,^(3,4) 이는 수격현상 해석을 통하여 펌프장의 실시설계 단계에서부터 유용하게 반영될 수 있다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 광역 상수도 사업의 일환으로 건설되는 수도권 광역 상수도 6단계 사업의 펌프-관로계에 대한 수격현상을 수치해석하고, 이를 통하여 수격완화설비에 대한 합리적인 설계 자료를 제공하여 이 시스템의 안전성을 확보하는데 그 목적이 있다.

2. 시스템 구성

2.1 도수 관로

팔당 취수펌프장에서 공급하는 원수(raw water)의 설계 유량을 3,308,000 m³/일(5단계=2,100,000 m³/일, 6단계=1,208,000 m³/일)으로 설정함에 따라 팔당 취수장에서 관교 가압장까지의 도수관로계에 대한 수격현상을 수치해석하였다. 취수장에서 가압장까지의 관로 종단도를 Fig. 1에 나타내었는데, 관로 길이는 25.9km이고, 6단계 도수관로는 강관 3열로서 구경 2,600 mm 2열 및 구경 2,800 mm 1열과 3개소의 직경 4,300 mm 도수터널로

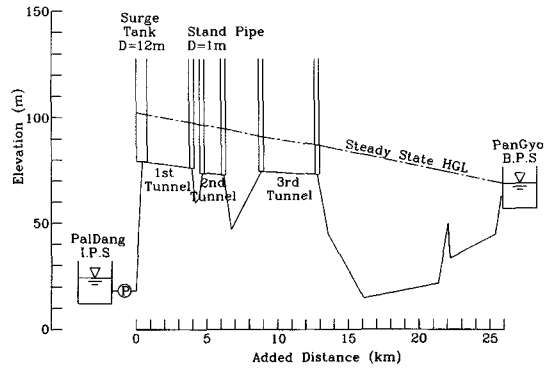


Fig. 1 Longitudinal pipeline profile for the metropolitan water supply project(6th stage)

구성되었다. 이 용수량을 공급하기 위해서는 양쪽흡입 원심펌프 10대가 팔당 취수펌프장에서 병렬로 조합·운전된다. 병렬로 운전되고 있는 펌프 10대가 갑작스런 정전으로 트립(trip) 되었을 때 발생하는 수격작용이 가장 심각하므로, 이에 대한 수격현상은 범용/전용 전산프로그램인 SIMDRU⁽⁶⁾와 WHAP^(7,8)를 사용하여 검토하였다.

도수관로 도중에는 직경 4,300 mm의 제 1, 2, 3 터널이 있는데, 이 구간은 관로의 형상이 급격히 상승하여 터널의 위치가 정상상태 수력구배선(hydraulic grade line)에 매우 근접해 있다. 정상운전 중인 펌프로의 동력이 갑자기 차단될 때, 이 구간은 관로내의 압력이 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 도수터널과 부대설비 등에 손상을 입힐 우려가 있다. 이러한 수격작용을 완충시켜주기 위하여 제 1터널 입구부에는 용량이 5,400 m³인 대형 조압수조(surge tank)를 설치하고, 그 밖의 도수터널 입·출구부에는 직경 1.0~2.6 m의 스탠드파이프(stand pipe)를 설치하였다. 제 1터널 입구부에는 취수펌프의 정상운전 중 터널 내부가 항상 만수(滿水) 상태가 되어 제 1터널이 개수로(open channel)가 아닌 압력수로 유지될 수 있도록 스탠드파이프보다 저류 용량이 훨씬 큰 조압수조를 설치하였다. 이 조압수조는 수격완화설비로서의 기능을 수행할 뿐만 아니라, 조압수조내의 수위를 측정하여 펌프의 운전과 운용 계획 수립에 참고하고, 도수터널내의 압력상태를 감시하는 등 유지관리 부분에서도 활용이 가능한 설비이다.

2.2 설비 제원

본 연구의 수치계산에 사용된 입력 자료 및 수격완화설비의 제원은 다음과 같다.

- 1) 펌프 설비
 - 펌프 운전 대수 = 10 sets
 - 정격 양정 = 80 m
 - 정격 유량 = 229.7 m³/min
 - 정격 회전수 = 585 rpm (12pole)
 - 전동기 출력 = 3,900 kW
 - 펌프 · 모터 GD² = 5,080~8,750 kg · m²
- 2) 저수조 수위
 - 취수펌프장 흡수정 저수위(L.W.L) = 24.29 m
 - 가압펌프장 조절지 고수위(H.W.L) = 69.00 m
- 3) 펌프제어밸브(pump control valve)
 - 구경 = 1,100 mm
 - 설치 대수 = 취수펌프 1대당 1set
- 4) 서지릴리프밸브(surge relief valve)
 - 노즐 구경 = 200 mm
 - 설치 대수 = 6 sets
 - 개방 압력 수두 = 89 m
- 5) 조압수조
 - 설치 위치 = 제1터널 입구부
 - 직경 = 12.0 m
 - 바닥 표고 = 80.0 m
 - 상단 표고 = 128.0 m
 - 연결관 직경 = 4.3 m
- 6) 스탠드파이프
 - 설치 위치 = 제1터널 출구부, 제2, 3터널 입 · 출구부
 - 직경 = 1.0 m (단, 3터널 출구는 2.6 m)
 - 상단 표고 = 126.4~127.5 m

여기서 조압수조의 상단 높이는 어떠한 경우에도 오버플로(overflow)가 발생하지 않도록 충분히 높게 하는 것이 바람직하며, 원형 철근 콘크리트 구조물로 계획되었다. 스탠드파이프는 지형 조건에 따라 수직 또는 경사지도록 설치할 수 있으며, 상단 높이는 오버플로를 허용하지 않을 만큼 충분히 높게 하거나 가까운 지점에 방류가 가능한 하천 등이 있다면 비상시를 위한 오버플로 대책으로서 배수로를 갖추고 어느 적절한 높이로 제한할 수도 있다.

3. 수치 해석 결과 및 검토

3.1 펌프 · 모터의 관성 모멘트

정상운전 중인 펌프가 갑작스런 정전으로 트립되었을 때 취수장에서 발생한 압력파는 제 1터널 입구의 조압수조 위치에서 대부분이 반사되고, 나머지는 관로 가압장 조절지 쪽으로 계속 전파된다(Fig. 1 참조). 제 1터널의 위치(관저고=79.4 m)는 전체 관로 구간에서 가장 높아 펌프가 꺼진 후에도 조압수조 하류지역에서는 자연유하(gravity flow)에 의한 유동이 계속적으로 형성되어 약 1분 후에는 조압수조내의 물이 모두 유출되고 터널 내부로 공기가 유입된다. 터널 입 · 출구부에 설치된 조압수조 및 스탠드파이프에 의해 하류지역의 도수관로는 수격작용으로부터 효과적으로 보호받을 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 취수펌프장과 조압수조 사이를 왕복하는 짧은 주기의 압력파를 고찰하기 위하여 Fig. 2와 같은 상세한 관로 조건을 준비하였다. 조압수조의 설치위치가 터널 입구에서 약 50 m 하류 지점에 있고 취수장으로부터 600 m 떨어져 있으며, 이 곳까지의 관로형상이 매우 급격히 상승하고 있다. 관로의 형상은 수주분리 현상이 발생하기 쉬운 형태를 띠고 있으므로 관 상단부를 기준으로 검토하였으며, 수치계산은 수격작용의 여러 차례 주기를 검토하기 위하여 펌프 트립 후 30초까지로 하였다. 취수장에 펌프제어밸브가 아닌 직폐형 체크밸브(또는 ideal check valve)가 사용된 경우 펌프 · 모터의 관성모멘트, GD²가 5,080~8,750 kg · m² 사이에서 변할 때 취수장과 조압수조 사이의 도수관로상에서 최대, 최소 압력선을 Fig. 2에 나타내었다. 펌프 · 모터의 GD²가 작을수록 도수관로상에서의 압력 변동은 약

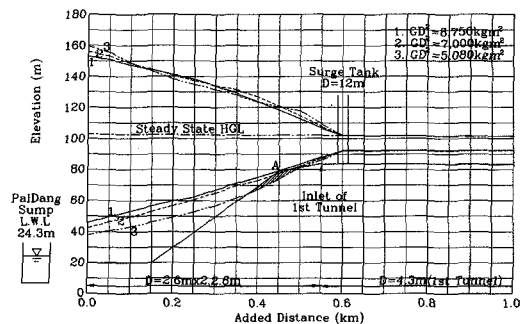


Fig. 2 Extreme pressures in the pipeline with moment of inertia of the pump · motor

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

Moment of Inertia, GD^2 ($kg \cdot m^2$)	8,750	7,000	5,080
Min. Pressure Head at Location A (m)	0.25	-1.45	-5.18
Max. Pressure Head at PalDang IPS (m)	132.7	135.7	139.3

간씩 커지며, GD^2 가 5,080 $kg \cdot m^2$ 일 때 도수관로 정점부(A지점)에는 부압이 발생하나 수주분리현상은 발생하지 않는 것으로 예측되었다. Table 1은 펌프·모터 GD^2 에 따른 A지점에서의 최저압력수두 및 펌프 출구측 최대압력수두를 나타내었다.

실제로 취수장에 설치될 펌프·모터의 GD^2 가 5,080 $kg \cdot m^2$ 인 경우 도수관로 정점부(A지점)에서 부압이 발생하나, 이는 그다지 우려할 정도는 아닌 것으로 판단된다. 즉, A지점의 부압은 -5.18m 정도로서 허용 범위(수도시설설계지침⁹⁾에서는 -7.0m까지 부압을 허용함을 만족하고 있으며, 이 부압도 수격현상의 첫번째 주기에서 0.5초 이내의 매우 짧은 시간 동안만 작용하기 때문에 관로에 좌굴 현상은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

3.2 펌프 제어 밸브

취수펌프장을 보호하기 위한 주설비로는 역류방지 및 유량제어를 동시에 수행할 수 있는 펌프제어밸브가 선정되었고, 서지릴리프밸브는 펌프제어밸브가 자동작했을 경우와 과도한 이상 압력에 대비한 안전설비로서 계획되었다.¹⁰⁾ 이는 관로상에서 수주분리현상이 발생하지 않을 때 압력 상승단을 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 시간 내에 최소의 압력 변화로 가급적 적은 역류, 역전으로 유동을 차단하는데 있다. 제 1단계(펌프특성범위: 正轉, 正流)의 압력 저하는 관로와 펌프에 의해 자동적으로 정해지므로, 밸브제어의 목적은 주로 제 2단계(제동특성 범위: 正轉, 逆流) 이후의 역류를 심하게 증가시키지 않고 천천히 멈추는데 있다. 따라서 이는 관로가 짧고 실양정이 큰 경우에 주로 사용되는 방법이다.

펌프제어밸브는 제 1단계에서 대부분을 폐쇄하고 제 2

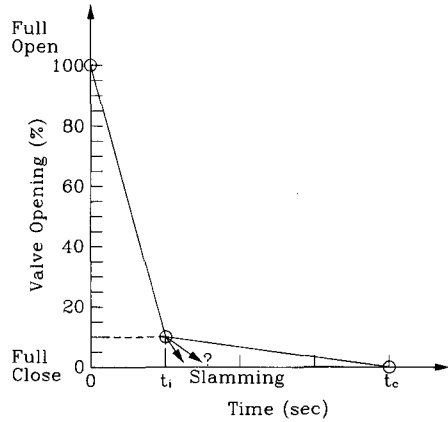


Fig. 3 Closing modes of the pump control valve after power failure

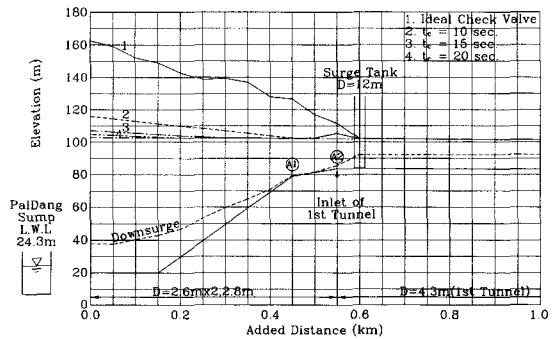


Fig. 4 Extreme pressures in the pipeline with closing time of the pump control valve

단계에서 나머지 밸브개도(valve opening)를 서서히 닫는 것이 합리적이므로, Fig. 3과 같은 밸브제어형태를 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. 설계유량을 기준으로 했을 때 구경 2,600 mm와 구경 2,800 mm 관로상에서 역류는 각각 2.64초와 2.74초에 발생하는 것으로 예측되었으므로, 제 1단계 밸브폐쇄시간(t_i)은 2.5초로 결정하였다. 수치 계산은 펌프제어밸브가 완전히 폐쇄되는데 걸리는 시간이 각각 10, 15, 20초($n=4, 6, 8$ 에 해당함)일 경우에 대하여 수행하였다.

Fig. 4는 펌프제어밸브의 폐쇄시간(t_c)이 각각 10, 15, 20초일 때 취수장과 조압수조 사이의 도수관로상에서 최대, 최소 압력선을 나타내었다. 여기에는 펌프제어밸브가 아닌 이상적인 체크밸브가 사용된 경우에 대해서도

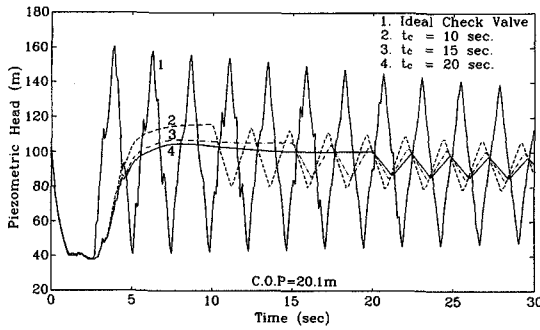


Fig. 5 Variations of the piezometric head at PalDang IPS with the closing time of PCV

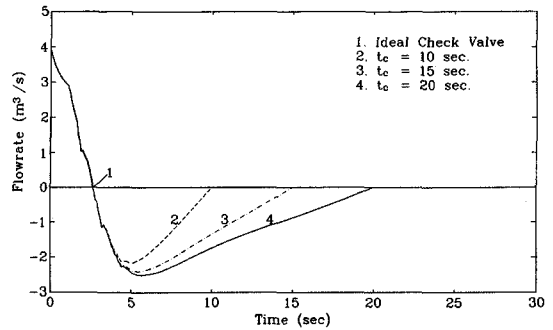


Fig. 6 Variations of the flowrate through one pump at PalDang IPS with the closing time of PCV

Table 2 Predicted maximum pressure head at PalDang IPS with the closing time of PCV

	Ideal Check Valve	Closing Time of PCV, t_c		
		10 sec	15 sec	20 sec
Max. Pressure Head (m)	142.2	95.6	86.8	84.6
Occuring Time(sec)	3.8	9.6	7.9	7.9

서로 비교하여 나타내었다. 펌프제어밸브와 체크밸브는 다운서지(downsurge)를 제어할 수 없으므로 밸브의 종류와는 무관하게 관로내 최저압력이 결정되고 있다. 그런데 펌프·모터의 GD^2 가 $5,080 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 이상으로 회전부의 관성이 비교적 크고 관로 정점부(A1) 및 터널 입구부(A2)에는 200 mm 급속공기밸브를 계획 설치하였기 때문에 도수관로상에서는 수주분리현상이 발생하지 않는다. 관로내의 상승압은 펌프제어밸브의 폐쇄시간을 길게 할수록 더욱 완화됨을 알 수 있다. 이는 펌프출구에서의 피에조수두(piezometric head) 변동을 나타낸 Fig. 5를 살펴보면 보다 명확해진다. 체크밸브가 닫힌 후 수충압은 약 2.4초의 주기로 매우 빈번히 작용하고 있다. Fig. 6은 펌프를 통한 유량 변동을 나타내었다. 단순히 역류방지 역할만 하는 이상적인 체크밸브는 유동 손실 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 펌프 제어밸브의 폐쇄시간에 따른 펌프 출구측 과도특성을 요약하여 나타내었다.

3.3. 슬래م 서지

앞의 수치계산 결과로부터 펌프제어밸브는 15초 정도에 완전 폐쇄시키는 것이 바람직함을 알 수 있다. 이 때 도수관로상에서의 최대 압력은 정상상태 압력을 거의 넘지 않는다. 그러나 만일 펌프제어밸브의 상태가 나빠서 역류가 상당히 커진 후 갑자기 물에 유도되어 밸브가 닫히면 슬래머지(slam surge)가 유발되어 압력 상승이 매우 커지기 때문에 펌프제어밸브를 사용할 때에는 이러한 상황을 신중히 검토하여야 한다. 즉, 밸브를 통해서 물이 역류하는 동안에 밸브디스크는 유동의 저항과 카운터 웨이트의 하중 그리고 수충압 등에 의해 막대한 힘($F = P_{\text{max}} \times A = 1,000 \times 9.8 \times 86.8 \times \pi \times 1.1^2 / 4 = 808 \text{ kN} \approx 80 \text{ ton}$)을 받게 되는데, 밸브디스크를 조절하는 유압기구가 불량한 경우 이 역류가 갑자기 차단되면 과도한 수충압이 발생하여 사고 발생의 위험성이 있으므로 각별한 주의가 필요하다. 밸브의 구경이 큰 경우 이러한 과도한 힘을 받는 유압 시스템을 적절히 설계하기 위하여 바이패스 완폐식 체크밸브를 사용하기도 한다. 펌프제어밸브가 역류에 의해 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 갑자기 닫힌 경우 발생하는 슬래머지 현상에 대하여 검토하였다. 밸브폐쇄시간이 3.0, 3.25, 3.5초일 때 수치계산결과 얻어진 도수관로상에서의 최대, 최소 압력선을 Fig. 8에, 펌프출구측 과도특성을 Table 3에 각각 나타내었다.

펌프제어밸브가 슬래밍을 일으키는 경우 취수펌프장에는 매우 위험한 수충압이 작용하게 되고, 역류를 많이 허용할수록 압력 변동은 더욱 커지고 있음을 알 수 있다. 한편, 취수펌프장의 구내 배관 및 밸브류 등의 설계압력(또는 사용압력)은 16~20 K 범위로 결정한다.

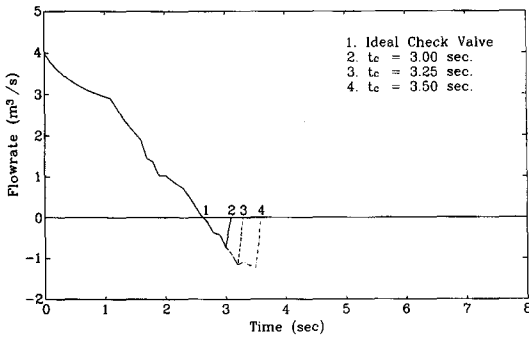


Fig. 7 Flowrate through one pump when the pump control valve is suddenly closed during reverse flow

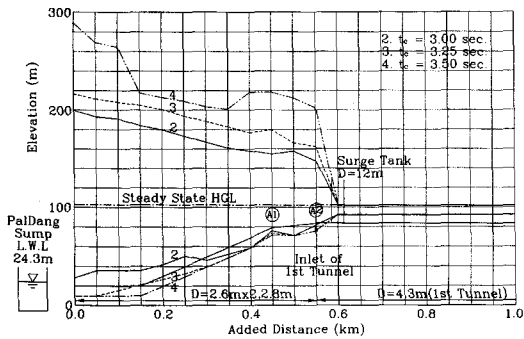


Fig. 8 Extreme pressures in the pipeline when the slamming is occurred at the pump control valve

Table 3 Predicted maximum pressure head at PalDang IPS with the slamming time of PCV

	Ideal Check Valve	Slamming Time, t_c		
		3.0 sec	3.25 sec	3.5 sec
Max. Reverse Flowrate (m^3/s)	0.0	0.68	1.15	1.20
Max. Pressure Head (m)	142.2	179.3	196.3	268.8

즉, 취수펌프장의 안전성을 감안하여 기계설비의 설계압력은 충분히 높게 설정되었으며, 이는 직폐형 체크밸브가 사용되었을 때 발생하는 수충압(=14.22K)에도 안전한 범위이다. 더욱이 펌프제어밸브를 사용함으로써 수충압을 더욱 완화시키도록 하였으나 밸브의 작동이 불량한 경우 예기치 못한 사고를 초래할 수도 있으므로 펌프제어밸브의 성능은 확실히 보장되어 충분한 안전성을 확보하여야 할 것이다.

4. 결론

수도권 광역상수도 6단계 사업의 도수관로 시스템에 대한 수격현상의 수치해석을 통하여 주 취수원인 팔당 취수펌프장을 수격작용으로부터 적절히 보호하고 안전성을 확보하기 위한 수격완화설비에 대하여 연구 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 펌프·모터의 관성모멘트가 작을수록 도수관로상에서의 압력 변동은 약간씩 커지며, 관성모멘트가 $5,080 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 일 때 도수관로 정점부에는 부압이 발생하나 수주분리현상은 발생하지 않는다.
- (2) 부압 발생을 방지하기 위해서는 도수관로 정점부에 공기밸브를 추가로 설치해야 하는 것으로 분석되었다. 제 1터널 하류지역의 도수관로는 조압수조 및 스탠드파이프에 의해 수격작용으로부터 적절히 보호될 것으로 판단된다.
- (3) 취수펌프장을 보호하기 위한 주설비는 밸브개도가 유압기구로 조절되는 펌프제어밸브이며, 펌프 트립 후 2.5초에 90%까지 급격히 폐쇄되고 나머지 10%의 개도는 15초 정도에 서서히 닫히는 2스텝 형태로 제어하는 것이 바람직하다. 이 때 도수관로상에서의 최대 압력은 정상상태 압력을 거의 넘지 않는 것으로 예측되었다.
- (4) 펌프제어밸브가 슬래밍을 일으키는 경우 취수펌프장에는 매우 위험한 수충압이 작용하게 되고, 역류를 많이 허용할수록 압력 변동은 더욱 커지는 것으로 나타났다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Wylie, E. B., Streeter, V. L., 1993, Fluid Transients in Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- (2) 한국수자원공사, 1994, 펌프장설비 신뢰성 향상방안 연구, 수자원연구소 보고서.
- (3) 환경부, 1997, 상수도 시설기준, 한국수도협회.

- (4) Sanks, R.L., 1998, Pumping Station Design, 2nd ed., Butterworth-Heinemann.
- (5) 김경엽, 오상현, 이영범, 1998, “광역상수도 펌프관로 시스템에 대한 수격현상의 수치해석,” 유체기계공업학회 1998 강연회 및 연구개발 발표회 논문집, pp. 193~202.
- (6) Zielke, D. W., 1980, Simulation of Unsteady Pipe Flows.
- (7) 이택식, 강신형, 1985, 유체과도현상의 해석, 서울대학교 생산기술연구소 보고서.
- (8) 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.
- (9) 日本水道協, 2000, 水道施設設計指針.
- (10) 한국수자원공사, 1995, 수도권 광역상수도 5단계 사업 실시설계 보고서.