

광역 상수도 펌프 관로 시스템에 대한 수격현상의 수치해석

김경엽(한국산업기술대학교), 오상현(한국수자원공사), 이영범(시설안전기술공단)

1. 서론

상수도 시설의 사고는 일반적으로 복합적인 원인에 의해 발생되지만, 특히 펌프를 기동시키거나 정상 운전 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 상류단과 하류단 사이를 왕복할 때 관로내의 압력은 관로 형상에 따라 물의 포화 증기압 이하로 떨어질 수 있으며, 이 경우 증기 공동이 형성되고, 이것이 심화될 경우 수주분리 현상이 발생한다. 관로내의 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴이 일어날 수 있으며, 증기 공동으로 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 관로가 파손될 염려가 있다.

이와 같은 수격작용에 의한 피해를 없애려면, 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, 관로내의 압력 상승 및 강하에 의해 관로가 붕괴되거나 수주분리가 발생하여 관로가 파열되기도 한다. 또한 관로내의 주기적인 압력 변동 때문에 자동제어 계통에서 압력 제어를 정확히 하기 어렵고, 심지어 구조물이 파손되는 사례가 발생하기도 한다. 한국수자원공사에서 운영·관리하고 있는 펌프장 61개소, 시설 용량 약 15,290,000m³/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 축심 불량 13.5%, 기계 마모 13.5%, 모터 소손 10.9%, 기타 8건 21.6%로 나타났다.

최근에는 펌프장이 대형화되고, 대구경 장

거리 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 수격완화 설비에 대한 검토가 필요하며, 이는 수격현상 해석을 통하여 펌프장의 실시설계 단계에서부터 유용하게 반영될 수 있다. 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 및 입력 자료

2.1 시스템 구성

팔당 취수펌프장에서 공급하는 원수(raw water)의 유량을 3,308,000m³/일(5단계 유량=2,100,000m³/일, 6단계 유량=1,208,000m³/일)으로 설정함에 따라 팔당 취수장에서 판교 가압장까지의 도수관로계에 대한 수격현상을 수치해석하였다. 취수펌프장에서 가압펌프장까지의 관로 종단도를 Fig.1에 나타내었다. 취수펌프장에서 가압펌프장까지의 도수관로 길이는 25.9km이고, 6단계 도수관로는 강관 3열로서 구경 2,600mm 2열 및 구경 2,800mm 1열과 3개소의 직경 4,300mm 도수터널로 구성되어 있다. 이 용수량을 공급하기 위해서는 양읍 입원심 펌프 10대가 팔당 취수펌프장에서 병

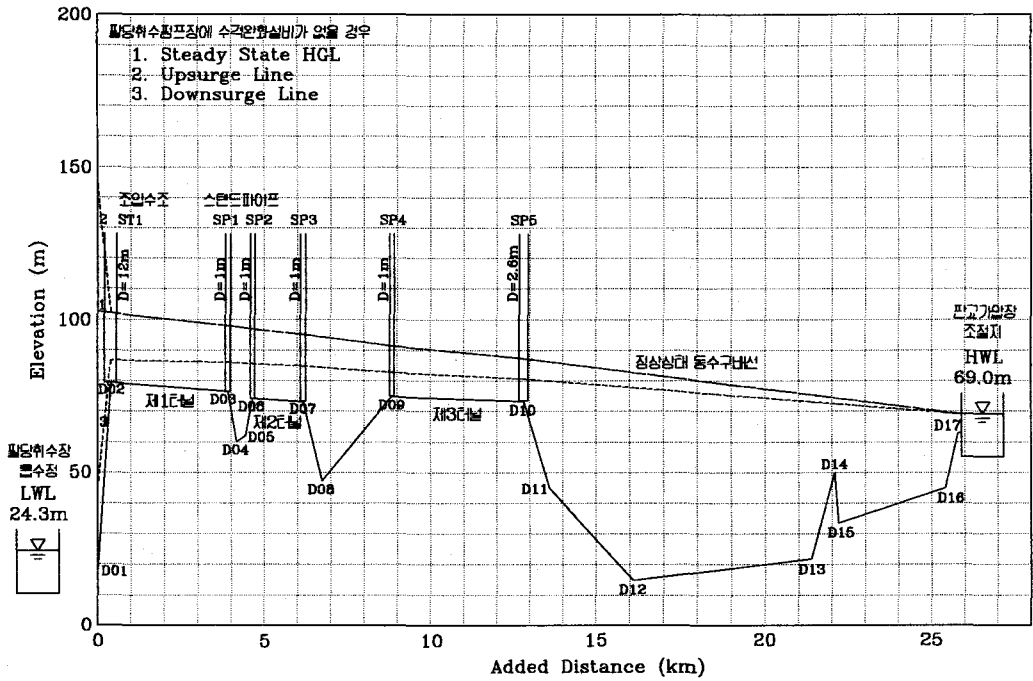


Fig.1 Extreme pressures at the pipeline from PalDang intake pump station to PhanKyo booster pump station when all pumps of PalDang IPS are tripped.

렬로 조합·운전된다. 병렬로 운전되고 있는 펌프 10대가 갑작스런 정전으로 트립(trip) 되었을 때 발생하는 수격작용이 가장 심각하므로, 이에 대한 수격현상은 범용 전산 프로그램인 SIMDRU(Simulation of Pressure Oscillation in Pipe Networks)를 사용하여 수치 해석하였다.

한편, 도수관로 도중에 직경 4,300mm의 제 1, 2, 3 터널이 있으며, 이 구간은 관로의 형상이 급격히 상승하여 도수터널의 위치가 정상상태 동수구배선에 매우 근접해 있다. 정상 운전 중인 펌프로의 동력이 갑자기 차단될 때, 이 구간은 관로내의 압력이 물의 포화증기압 이하로 낮아져 증기 공동이 형성되며 결국, 수주분리 현상이 발생한다. 관로내 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴이 일어날 수 있으며, 증기 공동에 의해 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 도수관로 및 도수터널과 부대설비 등에 손상을 입힐 우려가 있다. 이러한 수격작용을 완충시켜주기 위하여 제1터널 입구부에는 용량이 5,400m³인 대형 조압수조(surge tank)를 설치

하고, 그 밖의 도수터널 입·출구부에는 직경 1.0~2.6m의 스탠드 파이프(stand pipe)를 설치하였다. 제1터널 입구부에는 취수 펌프의 정상 운전 중 터널 내부가 항상 만수(滿水) 상태가 되어 제1터널이 개수로(open channel)가 아닌 압력수로로 유지될 수 있도록 스탠드 파이프 보다 저류 용량이 훨씬 큰 조압수조를 설치하였다. 이 조압수조를 기준으로 도수관로는 상하로 분리되어 펌프측에서 발생하는 압력파를 반사시켜 수충격이 하류측으로 전달되는 것을 방지하므로 관로의 안전에 크게 기여하고, 수조내의 수위를 측정하여 펌프의 운전과 운용 계획 수립에 참고하며, 도수터널내의 압력 상태도 감시하는 등 유지관리 부분에도 이용이 가능하다.

2.2 입력 자료

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

- 1) 펌프 설비
 - 펌프 운전 대수 = 10sets

- 정격 양정 = 80m
 - 정격 유량 = 229.7m³/min
 - 정격 회전수 = 585rpm (12pole)
 - 전동기 출력 = 3,900kW
 - 펌프·모터 GD² = 5,080~8,750kg·m²
- 2) 저수조 수위
- 취수펌프장 흡수정 저수위(L.W.L)= 24.29m
 - 가압펌프장 조절지 고수위(H.W.L)= 69.00m
- 3) 제어용 체크밸브
- 구경 = 1,100mm
 - 설치 대수 = 취수펌프 1대당 1set
- 4) 압력 릴리프 밸브
- 노즐 구경 = 200mm
 - 설치 대수 = 6sets
 - 개방 압력 수두 = 89m
- 5) 조압수조(ST1)
- 설치 위치 = 제1터널 입구부
 - 직경 = 12.0m
 - 바닥 표고 = 80.0m
 - 상단 표고 = 128.0m
 - 연결관 직경 = 4.3m
- 6) 스탠드 파이프(SP1, SP2, SP3, SP4, SP5)
- 설치 위치 = 제1터널 출구부,
제2, 3터널 입·출구부
 - 직경 = 1.0m (단, 3터널 출구는 2.6m)
 - 상단 표고 = 126.4~127.5m

여기서, 조압수조(ST1)의 상단 높이는 어떠한 경우에도 월류(overflow)가 발생하지 않도록 충분히 높게 하는 것이 바람직하며, 원형 철근 콘크리트 구조물로 계획되었다. 스탠드 파이프는 지형 조건에 따라 수직 또는 경사지도록 설치할 수 있으며, 상단 높이는 월류를 허용하지 않을 만큼 충분히 높게 하거나 가까운 지점에 방류가 가능한 하천 등이 있다면 비상시를 위한 월류 대책으로서 배수로를 갖추고 어느 적절한 높이로 제한할 수도 있다. 조압수조 및 스탠드 파이프의 상단 높이를 월류가 발생하지 않도록 결정하기 위한 관계식은 다음과 같다.

$$\text{스탠드 파이프의 상단높이} = \text{흡수정 F.W.L} + \text{펌프의 체절운전수두} + \text{여유율}$$

3. 수치해석 결과 및 검토

3.1 펌프 트립에 의한 수격현상

취수펌프장에 수격완화설비가 없는 경우, 수치계산 결과 얻어진 도수관로에서의 최대, 최소 압력선(upsurge, downsurge line)을 Fig. 1에 나타내었다. 취수펌프장에서 발생한 압력파는 제1터널 입구의 조압수조 위치에서 대부분이 반사되고, 나머지는 판교 가압장 조절지 쪽으로 계속 전파된다. 취수펌프장에 수격완화설비를 설치하지 않았을 경우, 취수장과 조압수조 사이의 도수관로에서는 수충압이 비교적 높게 상승하고 있다(Fig.6 참조). 한편, 제1터널 위치 수두(관저고=79.4m)는 이 구간에서 가장 높아 펌프가 트립된 후에도 조압수조 하류 지역에서는 자연 유하에 의한 유동이 계속적으로 형성되어 약 1분 후에는 조압수조내의 물이 모두 유출되고, 터널 내부로 공기가 유입된다. 도수터널 입·출구부에 설치된 스탠드 파이프에 의해 터널과 도수관로에서는 수주분리 현상이 발생하지 않으며 수충압으로부터 적절히 보호되고 있음을 알 수 있다.

3.2 펌프·모터의 관성 모멘트

취수펌프장과 조압수조 사이를 왕복하는 짧은 주기의 압력파를 고찰하기 위하여 Fig.2와 같은 상세한 관로 조건을 준비하였다. 조압수조의 설치 위치가 터널 입구에서 약 50m 하류 지점에 있고, 취수펌프장에서부터 600m 떨어져 있으며, 이 곳까지의 관로 구배가 매우 급격히 상승하고 있다. 관로의 형상은 수주분리 현상이 발생하기 쉬운 형태를 띠고 있으므로 관 상단부를 기준으로 검토하였으며, 전용 전산 프로그램인 WHAP(WaterHammer Analysis Program)를 사용하여 수치해석하였다. 수치계산은 수격작용의 여러 차례 주기를 검토하기 위하여 펌프 트립 후 30초까지로 하였다. 팔당 취수장에 제어용 체크밸브가 아닌 직폐형 체크밸브가 사용된 경우, 펌프·모터의 관성 모멘트(GD²)가 5,080~8,750kg·m² 사이에서 변할 때 취수장과 조압수조 사이의 도수관로상에서 최대, 최소 압력선을 Fig.2에 나타내었다. 펌프·모터의 GD²가 작을수록 도수관로상에서의 압력 변동은 약간씩 커지며, GD²가 5,080kg·m²일 때 도수관로 정점부

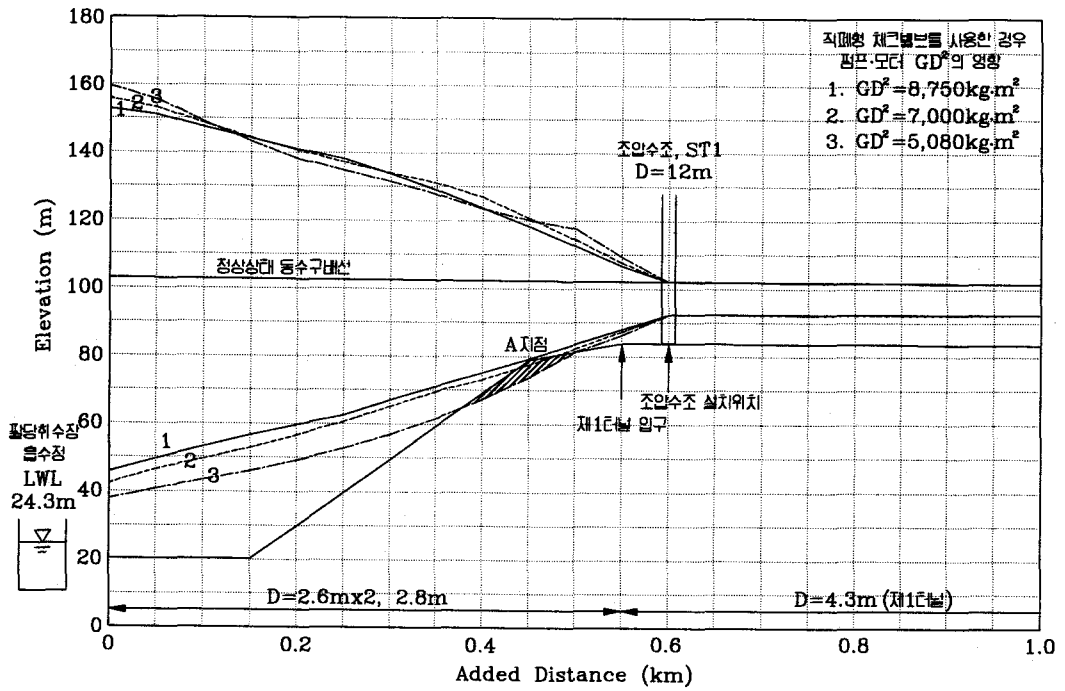


Fig.2 Extreme pressures at the pipeline from PalDang intake pump station to 1st tunnel inlet when GD^2 of pump-motor is varying.

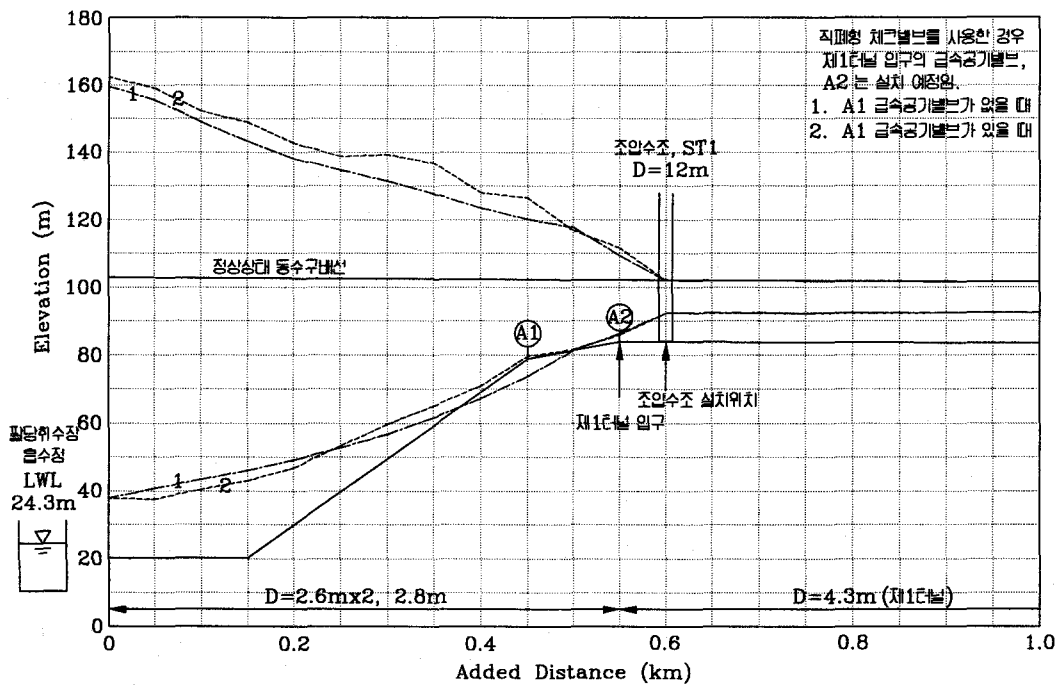


Fig.3 Extreme pressures at the pipeline from PalDang intake pump station to 1st tunnel inlet with the air valves (A1 & A2).

(A지점)에는 부압이 발생하나 수주분리 현상은 발생하지 않고 있음을 알 수 있다. Table 1은 펌프·모터 GD²에 따른 A지점에서의 최저 압력수두 및 펌프 출구측 최대 압력수두를 나타내었다.

Table 1 펌프·모터의 관성 모멘트에 따른 최대, 최저 압력수두

펌프·모터 GD ² (kg·m ²)	8,750	7,000	5,080
A 지점 최저압력수두(m)	0.25	-1.45	-5.18
펌프출구측 최대압력수두(m)	132.7	135.7	139.3

실제로 팔당 취수장에 설치될 펌프·모터의 GD²가 5,080kg·m²인 경우, 도수관로 정점부(A지점)에서는 부압이 발생하나 그다지 우려할 정도는 아닌 것으로 판단된다. 즉, A지점의 부압은 -5.18m 정도로서 허용 범위(일본수도협회, 1990, '수도시설 설계지침·해설'에서는 -7.0m까지 부압을 허용함)를 만족하고 있으며, 이 부압도 수격현상의 첫번째 주기에서 0.5초 이내의 매우 짧은 시간 동안만 작용하기 때문에 관로에 좌굴 현상은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

Table 2 공기밸브를 A1 지점에 설치할 때의 최대, 최저 압력수두 (단위: m)

구분	A1 공기밸브가 없을 때	A1 공기밸브가 있을 때
A 지점 최저압력수두	-5.18	0.66
펌프출구측 최대압력수두	139.3	142.2

한편, 도수관로 정점부의 부압 발생을 방지하기 위해서는 A지점에 100~200mm 정도의 급속 공기밸브(A1)를 추가로 설치하는 것이 바람직한 것으로 분석되었다. Fig.3은 급속 공기밸브(A1)가 추가로 설치된 경우 도수관로상에서 최대, 최소 압력선을 나타내었다. 제1터널 입구부에 설치 계획인 급속 공기밸브(A2)와 A지점의 공기밸브(A1)에 의해 도수관로상의 부압은 대부분 해소되고 있음을 알 수 있다. Table 2는 급속 공기밸브(A1) 설치에

따른 A지점에서의 최저 압력수두 및 펌프 출구측 최대 압력수두를 나타내었다.

3.3 제어용 체크밸브의 역할

취수펌프장을 보호하기 위한 주 설비로는 역류 방지 및 유량 제어를 동시에 수행할 수 있는 제어용 체크밸브(control check valve)가 선정되었고, 압력릴리프밸브는 제어용 체크밸브가 오동작했을 경우와 과도한 이상 압력에 대비한 안전 설비로서 설치하도록 계획되었다. 이는 관로상에서 수주분리 현상이 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 제어 목표는 될수록 짧은 시간내에 최소의 압력 변화로 가급적 작은 역류, 역전으로 물 흐름을 차단하는데 있다. 제1단계(펌프특성범위: 正轉, 正流)의 압력 저하는 관로와 펌프에 의해 자동적으로 정해지므로, 밸브 제어의 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.

펌프 출구측 제어용 체크밸브는 제1단계에서 대부분을 폐쇄하고, 제2단계에서 나머지 밸브 개도를 서서히 닫는 것이 합리적이므로, Fig.4와 같은 밸브 제어 형태를 선정하였다. 즉, 1단계에서 밸브를 Δt초 이내에 90%까지 폐쇄하고, 나머지 10% 개도를 n×Δt초에 완전히 폐쇄했을 경우의 전형적인 예를 나타내었다. 도수관로상에서의 역류 발생 시간은 펌프 운전 대수와 환경에 따라 달라진다. 설계 유량을 기준으로 했을 때 구경 2,600mm와 구경 2,800mm 관로상에서 역류는 각각 2.64, 2.74초에 발생하는 것으로 예측되었으므로, 제1단계 밸브폐쇄시간(Δt)은 2.5초로 결정하였다. 수치계산은 제어용 체크밸브가 완전히 폐쇄되는데 걸리는 시간이 각각 10, 15, 20초(n=4, 6, 8에 해당함)일 경우에 대하여 수행하였다.

Fig.5는 제어용 체크밸브 폐쇄시간이 각각 10, 15, 20초일 때, 팔당 취수장과 조압수조

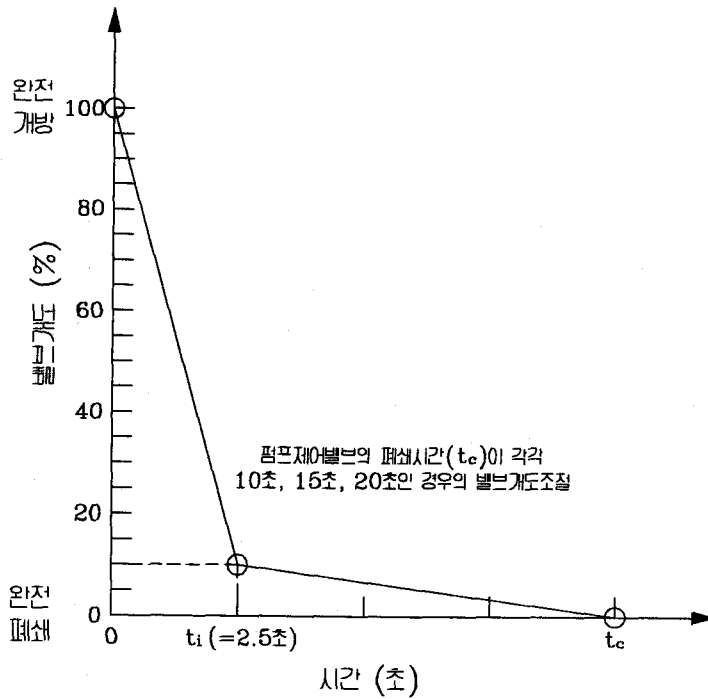


Fig.4 Closing modes of the pump control valve(or check valve) at pump exit after power failure.

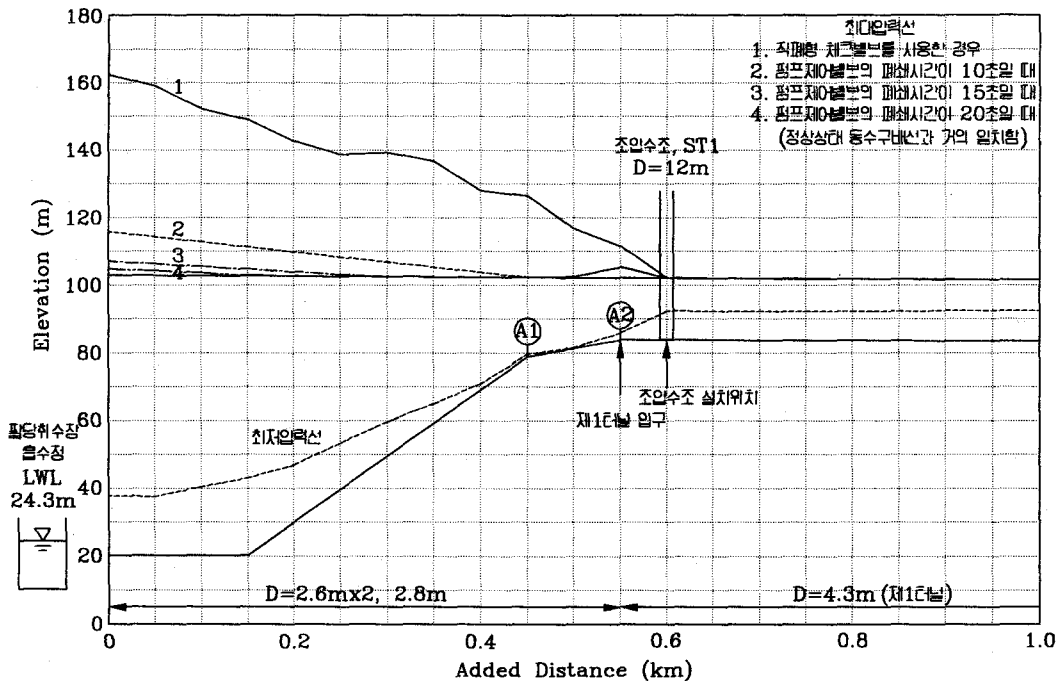


Fig.5 Extreme pressures at the pipeline from PalDang intake pump station to 1st tunnel inlet when the closing times of check valve are varying.

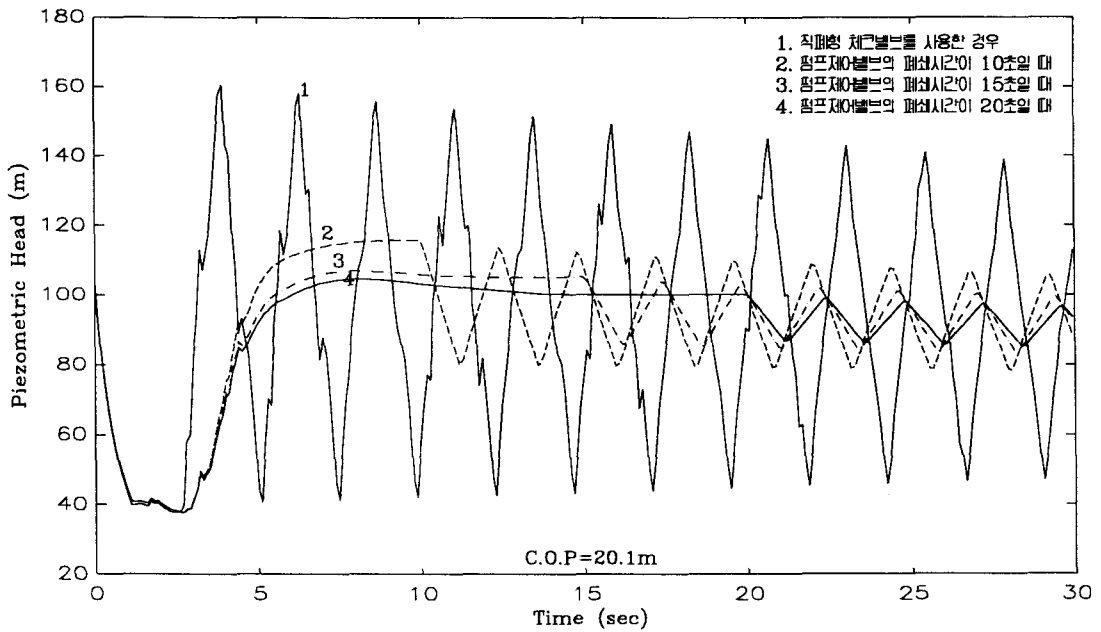


Fig.6 Piezometric head vs. time at PalDang intake pump station when the closing times of check valve are varying after power failure.

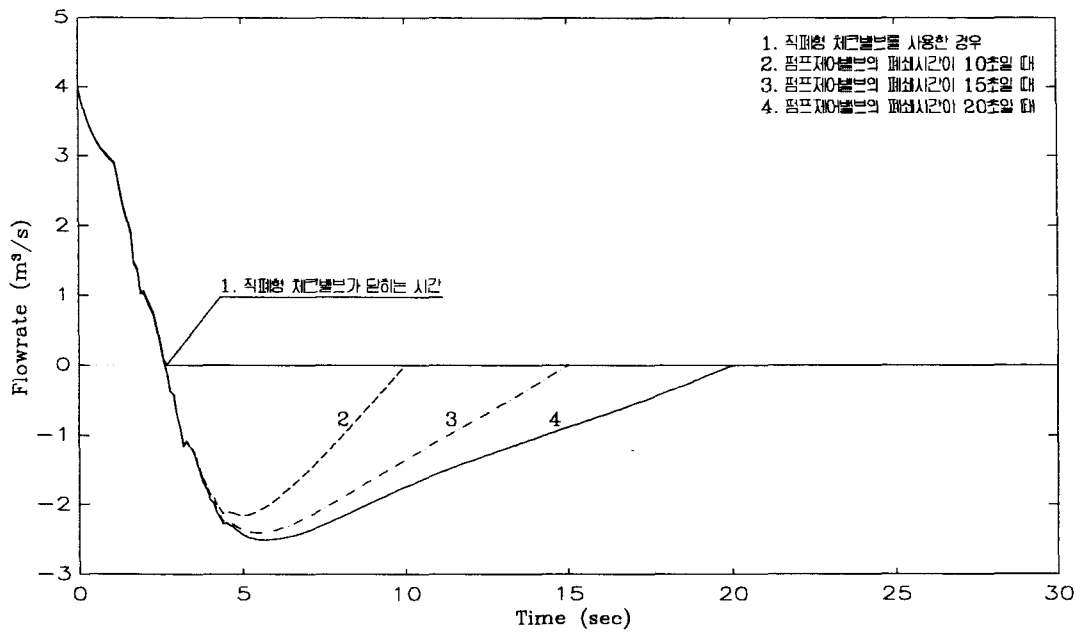


Fig.7 Flowrate through one pump at PalDang intake pump station when the closing times of check valve are varying after power failure.

사이의 도수관로상에서 최대, 최소 압력선을 나타내었다. 여기에는 제어용 체크밸브가 아닌 직폐형 체크밸브가 사용된 경우에도 서로 비교하여 나타내었다. 체크밸브는 다운서지(downsurge)를 제어할 수 없으므로, 체크밸브의 종류와는 무관하게 관로내의 최저 압력이 결정되고 있다. 그런데, 펌프·모터의 GD^2 가 $5,080\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 이상으로 회전부의 관성이 비교적 크기 때문에 도수관로상에서는 수주분리 현상이 발생하지 않는다. 관로내의 상승압은 제어용 체크밸브의 폐쇄시간을 길게 할수록 더욱 완화됨을 알 수 있다. 이는 펌프 출구에서의 피에조 수두 변동을 나타낸 Fig. 6을 살펴보면 보다 명확해진다. 체크밸브가 닫힌 후, 수충압은 약 2.4초의 주기로 매우 빈번히 작용하고 있다. Fig. 7은 펌프를 통한 유량 변동을 나타내었다. 단순히 역류방지 역할만 하는 이상적(ideal: 이하 직폐형이라 함)인 체크밸브는 유동 손실 및 디스크 관성이 작아 관내의 유동이 정지하는 순간에 닫히게 되나, 제어용 체크밸브는 밸브 디스크를 제어하기 위해 유압 기구를 사용하며, 일정한 개도 범위에서 닫히는 속도를 제어함으로써 역류를 허용하고, 이 역류량을 점차 감소시켜 수충압을 완화시킨다. Table 3은 체크밸브 폐쇄시간에 따른 펌프 출구측 과도특성을 요약하여 나타내었다.

Table 3 체크밸브 폐쇄시간에 따른 펌프 출구측 과도특성의 비교.

	직폐형 체크밸브	제어용 체크밸브 폐쇄시간		
		10초	15초	20초
최대압력 (kg/cm^2)	14.22	9.56	8.68	8.46
발생시간 (초)	3.8	9.6	7.9	7.9

수치계산 결과로부터 펌프 출구측 제어용 체크밸브는 15초 정도에 완전 폐쇄시키는 것이 바람직함을 알 수 있다. 이 때, 도수관로상에서의 최대 압력은 정상상태 압력을 거의 넘지 않는다. 그러나, 만일 제어용 체크밸브의 상태가 나빠서 역류가 상당히 커진 후 갑자기 물에 유도되어 체크밸브가 닫히면 슬램 서지(slam surge)가 유발되어 압력 상승이 때

우 커지기 때문에 제어용 체크밸브를 사용할 때에는 이러한 사항을 신중히 검토하여야 한다. 즉, 체크밸브를 통해서 물이 역류하는 동안에 밸브 디스크는 유동의 저항과 카운터웨이트의 하중 그리고 수충압 등에 의해 막대한 힘($F = p_{\text{max}} \times A = 9.56\text{kg}/\text{cm}^2 \times \pi 110^2/4\text{cm}^2 = 90,850\text{kgf} \approx 100\text{톤}$)을 받게 되는데, 밸브 디스크를 조절하는 유압 기구가 불량한 경우 이 역류가 갑자기 차단되면 과도한 수충압이 발생하여 사고 발생의 위험성이 있으므로 각별히 유의하여야 한다. 제어용 밸브의 구경이 커지면 이러한 과도한 힘을 받는 유압 시스템을 적절히 설계하기 위하여 바이패스 완폐식 체크밸브를 사용하기도 한다.

3.4 체크 밸브의 슬램 서지

제어용 체크밸브가 역류에 의해 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 갑자기 닫힌 경우 발생하는 슬램 서지 현상에 대하여 검토하였다. 밸브 폐쇄시간이 3.0, 3.25, 3.5초일 때 수치계산 결과 얻어진 도수관로상에서의 최대, 최소 압력선을 Fig. 9에 각각 나타내었다. Table 4는 슬램 서지에 의한 펌프 출구측 과도특성을 요약하여 나타내었다.

Table 4 슬램 서지에 의한 펌프 출구측 과도특성.

	직폐형 체크 밸브	체크밸브 폐쇄(Slamming) 시간		
		3.0초	3.25초	3.5초
최대허용 역류량(m^3/s)	0.0 ^{주)}	0.68	1.15	1.20
최대압력 (kg/cm^2)	14.22	17.93	19.63	26.88

주) 직폐형 체크밸브가 이상적(ideal)으로 작동하는 경우임.

제어용 체크밸브가 슬래밍을 일으키는 경우 팔당 취수장에는 매우 위험한 수충압이 작용하게 되고, 역류를 많이 허용할수록 압력 변동은 더욱 커지고 있음을 알 수 있다. 한편, 팔당 취수펌프장의 구내 배관 및 밸브류 등의 설계압력(또는 사용압력)은 $16\sim 20\text{kg}/\text{cm}^2$ 범위로 결정한다. 즉, 취수펌프장의 안전성을

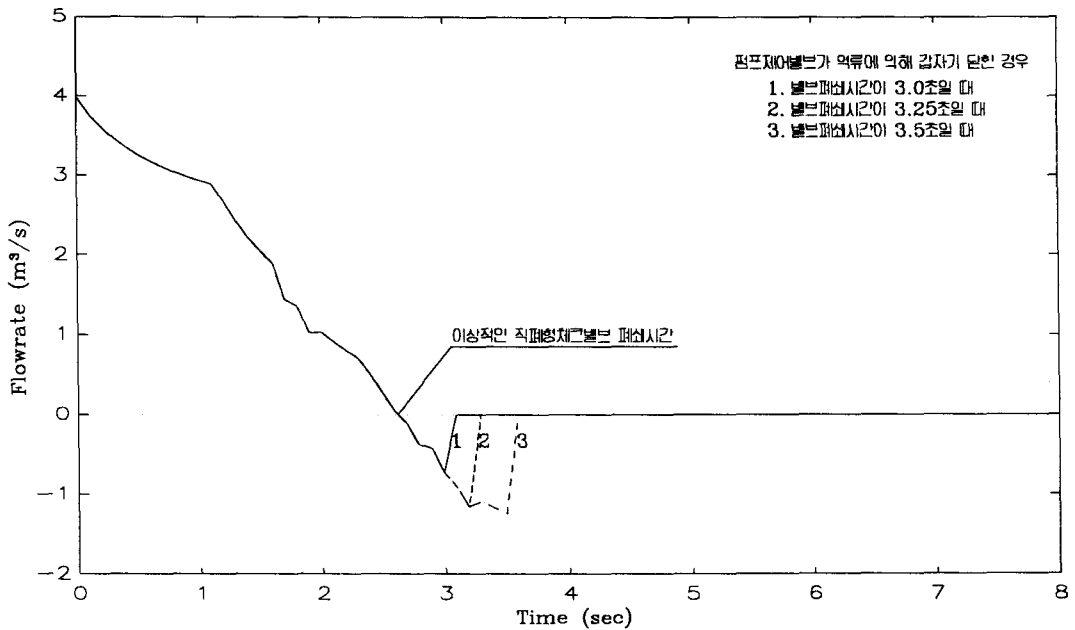


Fig.8 Flowrate through one pump at PalDang intake pump station when the control check valves are suddenly closed during reverse flow.

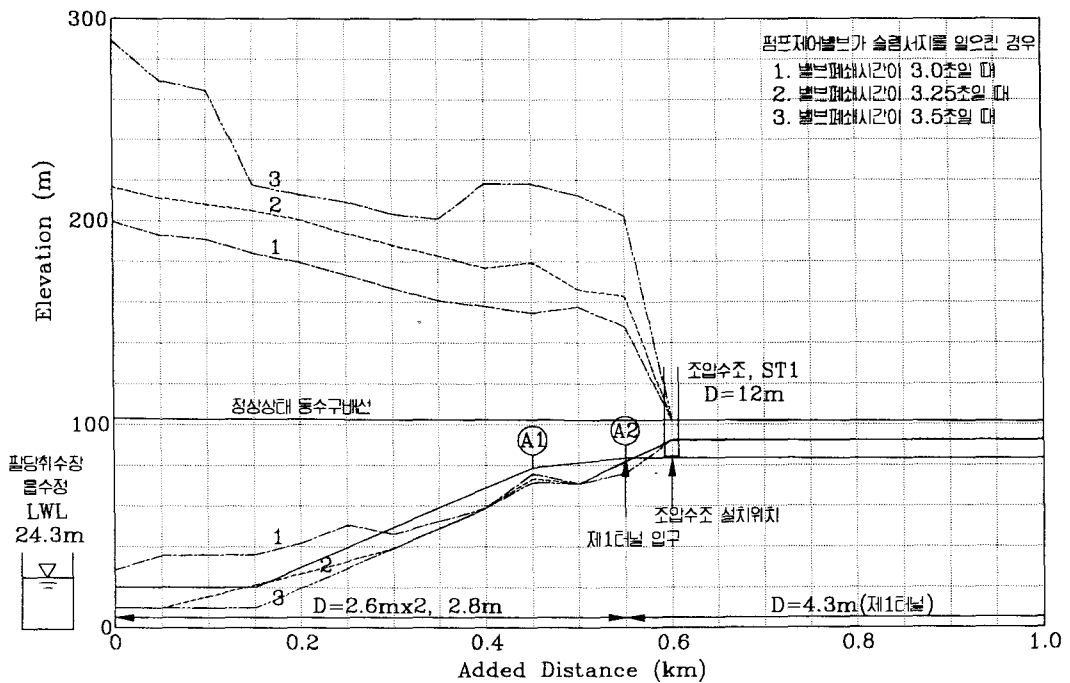


Fig.9 Extreme pressures at the pipeline from PalDang intake pump station to 1st tunnel inlet when the slam surge occurs at control check valve.

감안하여 기계 설비의 설계압력은 충분히 높게 설정되었으며, 이는 직폐형 체크밸브가 사용되었을 때 발생하는 수충압(14.22kg/cm^2)에도 안전한 범위이다. 더욱이 제어용 체크밸브를 사용함으로써 수충압을 더욱 완화시키도록 하였으나, 제어용 체크밸브의 작동이 불량한 경우 예기치 못한 사고를 초래할 수도 있으므로, 제어용 체크밸브의 성능은 확실히 보장되어 충분한 안전성을 확보하여야 할 것이다.

4. 결론

수도권 광역 상수도 6단계 사업의 펌프 관로 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 관성 모멘트(GD^2)가 작을수록 도수관로상에서의 압력 변동은 약간씩 커지며, GD^2 가 $5,080\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 일 때 도수관로 정점부(A지점)에는 부압이 발생하나 수주분리 현상은 발생하지 않는다.

(2) 부압 발생을 방지하기 위해서는 도수관로 정점부의 A지점에 공기밸브를 추가로 설치해야 하는 것으로 분석되었다. 제1터널 이후의 도수관로는 조압수조 및 스탠드 파이프에 의해 수격작용으로부터 적절히 보호되고 있다.

(3) 팔당 취수장을 보호하기 위한 주 설비는 밸브 개도가 유압 기구로 조절되는 제어용 체크밸브이며, 펌프 트립 후 2.5초에 90%까지 급폐되고 나머지 10%의 개도는 15초 정도에 완폐되는 2스텝 형태로 제어하는 것이 바람직한 것으로 예측되었다. 이 때, 도수관로상에서의 최대 압력은 정상상태 압력을 거의 넘지 않는다.

(4) 제어용 체크밸브가 슬래밍을 일으키는 경우 팔당 취수장에는 매우 위험한 수충압이 작용하게 되고, 역류를 많이 허용할수록 압력 변동은 더욱 커지는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 한국수도협회, 1997, 상수도 시설기준.
2. 일본수도협회, 1990, 수도시설 설계지침·해설.
3. 한국수자원공사, 1995, "수도권 광역상수도 5단계 사업," 실시설계 보고서.
4. 한국수자원공사, 1994, "펌프장 설비 신뢰성 향상 방안 연구," 수자원연구소 보고서.
5. 이택식, 강신형, 1985, "유체과도현상의 해석," 서울대학교 생산기술연구소 보고서.
6. 이영범, 1989, "대형 펌프관로계에서의 수격현상에 관한 연구," 한양대학교 산업대학원 석사학위논문.
7. 김경엽, 이영호, 1997, "펌프 관로계의 수격현상," 한국박용기관학회지, 21(4).
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.
9. Wylie, E. B., Streeter, V. L., 1993, "Fluid Transients in Systems," Prentice Hall, Englewood Cliffs.
10. Zielke, D. W., 1980, Simulation of Unsteady Pipe Flows.

감사의 글

본 연구는 수도권 광역상수도 6단계 사업의 실시설계 용역회사인 건화, 신우, 제일 엔지니어링의 협조로 이루어졌으며, 관계자 여러분들께 깊은 감사를 드립니다.