

과도수리현상 해석과 실증을 통한 펌프장 안정성 확보방안

라병필* · 김진만* · 박종호** · 김경엽***

The Plan of Safety for Pump Station through Hydraulic Transient Analysis & Demonstration

Beyong-pil Ra, Jin-man Kim, Jong-ho Park, Kyung-yup Kim

Key Words : Water-hammer(수격작용), Vapor cavity(증기공동), Surge suppression device(수격완화설비), Surge wave(압력파), Normal start(정상기동), Emergency stop(비상정지)

ABSTRACT

Water supply facilities are recently getting larger according as domestic waterworks become multi - regional water supply system. Large water supply facilities generally consist of the intake pumping station, water treatment station and water supply & distribution facilities. Although pumping stations and pipeline systems are used to pump up water, it often happens pipeline damage and flooding accident by the water hammer. As a result of this study, a pumping station is guaranteed by the computer simulation and field test analysis. Therefore these are contributed safety operation in pumping station through adjustment of the pumping station safety plan, air valve and valve closing time.

1. 서 론

최근 국내 상수도시설은 인구집중 현상과 생활수준의 향상으로 산업발달에 따라 야기될 수 있는 급수난, 즉 물 부족을 해소하기 위하여 광역상수도 사업을 지속적으로 추진 중에 있으며, 따라서 대형화된 수도시설 전반에 걸쳐 안정성을 확보하는 것이 중요하다 할 수 있다.¹⁾

펌프 관로계의 수격작용(water-hammer)은 펌프를 기동하거나 정지시킬 때, 운전 중 정전으로 인하여 갑자기 동력을 잃게 될 때 또는 밸브의 개도를 빠르게 변화시킬 때, 그 순간 관로 내의 유속이 급격히 변하면 압력이 크게 상승하거나 강하하게 되어 심한 수격작용을 일으키게 된다. 관로 내의 갑작스런 유속변화로 압력파(pressure wave)가 펌프장과 배수지 사이를 왕복할 때, 관로 내의 압력은 관로 형상에 따라 물의 포화증기압 이하로 떨어져 증기공동(vapor cavity)이 형성되며, 결국 수주분리(column separation) 현상이 발생한다. 관로 내의 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴(collapse)이 일어날 수 있으며, 증기공동으로

분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 관로가 파손될 염려가 있다. 물이 역류하는 동안에는 펌프장 구내 배관의 압력이 비정상적으로 상승하여 펌프나 밸브류, 배관 및 부대시설 등이 파열되어 펌프장 침수 사고가 발생하기도 한다. 이러한 수격작용을 피하거나 경감시키기 위한 적절한 방법을 취하는 것은 펌프설비 계획상 중요한 일이다.²⁾

본 논문은 자양 취수장에서 일산 정수장까지의 계통에서 현 취수용량을 기준으로 현장시험을 실시하고 이 결과에 의해 최대용량에 따른 안정성을 추정코자 한다. 특히 무인으로 운영되고 있는 취수펌프장의 안전설비로 설치되어 있는 안전변(pressure relief valve)과 공기밸브의 역할, 펌프 토출 밸브의 폐쇄시간³⁾ 등을 전산모의해석(computer simulation)과 현장실증을 통해 비교, 분석하므로써 펌프장과 관로의 안정성을 확보하는 데 있다.

* 한국수자원공사 수도시설처
rbp@kowaco.or.kr

** 충남대학교 기계공학과

*** 한국산업기술대학교 기계공학과

2 전산모의시험(Computer Simulation)

2.1 기초자료 조사 및 위험도 평가

2.1.1 기초자료

본 대상 사업장은 취수펌프장에서 정수장 착수정까지 대구경(ψ 1,500 mm) 장거리(35.4 km) 관로로 원수를 송수하는 계통이며, 취수펌프의 기동, 정지 시 소음 발생과 배관의 진동, 부압으로 인한 문제가 제기되었다. 특히 정전으로 인하여 갑자기 동력을 잃게 될 때 또는 밸브의 개도를 급폐쇄 할 때 도수관로 내의 유속이 급격히 변하면 압력이 크게 상승하거나 강하하게 되어 심한 수격작용을 일으키고 있다. 이와 같은 수격현상을 분석하기 위해서는 펌프 및 전동기 자료, 관로 및 밸브 제원, 수격완화설비(surge suppression device)의 유무 및 시방등이 필요하다.⁴⁾

펌프 관로계통의 수격작용으로 발생할 수 있는 경우에는 1) 펌프의 정상적인 기동(normal start) 2) 펌프의 정상적인 정지(normal stop) 및 비상 정지(emergency stop) 3) 긴 송수관로 말단에서의 밸브 차단(valve stroking)등이 있지만 이 중에서 동력차단에 의한 펌프의 비상정지(emergency stop)가 가장 위험도가 높아 우선적으로 고려해야 한다.

2.1.2 위험도 평가

본 연구대상인 자양취수장은 한강 잠실 수중보에서 약 1 km 상류에 위치하였는데, 이는 일산 신도시 및 고양시에 용수를 공급하기 위한 시설물로서 취수펌프장은 시설용량인 250,000 m³/day이며, 현재 일일 평균 취수량은 200,000 m³/day 정도이다.

Table 2.1 The pump condition of Jayang intake pumping station

구분	호기	유량 (m ³ /min)	유량 (m ³ /d)	양정 (m)	효율 (%)	동력 (hp)	비고
정속 펌프	1, 3, 4, 6	46.3	66,672	82	80	1,200	
변속 펌프	2, 5	46.3	66,672	82	80	1,200	

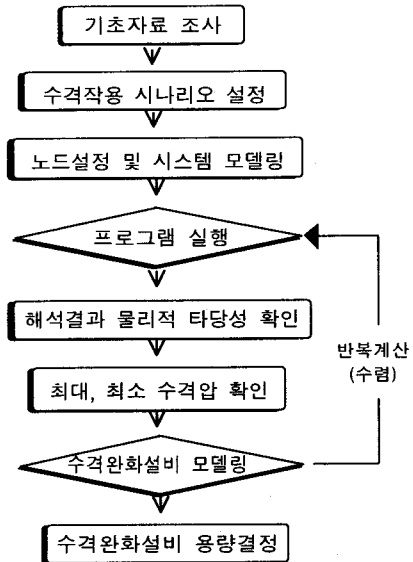
수격작용에 의한 위험요소를 분석시는 다음의 5가지 경우로 1) 취수펌프의 병렬 운전 시 한 대의 펌프를 기동·정지 시 계통에 미치는 영향, 2) 긴 관로(35.4 km)이므로 펌프 토출 밸브의 개폐시간인 상대적으로 짧다. 3) 밸브개폐시간은 10 L/a (L:관로길이, a:압력과 전파속도) 이상 유지하여야 하므로 취수펌프의 토

출밸브 개폐시간을 충분히 늘려야 하며 4) 기동·정지 시 수격작용을 신속히 안정시킬 수 있는 설비가 필요하고 5) 취수펌프장의 운영에 대한 개선방안이 검토되어야 할 것이다.

다음으로 펌프의 정상가동 중에 비상정지 가능성을 고찰해 보면 1) 도수관로 주요지점의 구경 250 mm 쌍구형 공기밸브와 200mm 급속 공기밸브가 제대로 작동되지 않는 경우 도수관로 구역에 부압(negative pressure)이 형성되는 것으로 예측되었으며 2) 부압발생에 따른 관로 내 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴이 일어날 수 있으며, 증기공동에 의해 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 심한 수격현상이 일어나 도수관로에 파손을 입힐 우려가 있다. 또한 3) 도수관로를 사전 점검한 결과 일부 공기밸브실의 침수와 외부로 공기출입을 자유롭게 하기 위한 통기관(ventilation pipe)이 거의 설치되지 않아 공기밸브로서의 역할이 원활치 않을 것으로 예상되었고 4) 취수펌프장 토출측에 안전변(pressure relief valve, ψ 350mm×2sets)이 설치되어 있으나 설정압력이 12.0 kgf/cm²로 상승압에 의한 동작가능성이 낮아 보였으며, 5) 도수관로에서 발생하는 수주분리현상을 방지할 수 있는 수격완화 설비가 없었다.

2.1.3 전산 모의시험

수격해석에 대한 상용 코드가 몇 가지 있지만 수치 해석에는 WHAP (Water Hammer Analysis Program)를 사용하였다.



수치해석을 위한 절차는 위 순서도(flow-chart)에 따라 기초자료부터 수격작용에 의한 부압발생 여부, 수격완화설비 종류 및 용량 선정, 해석결과 출력 등의 순으로 진행한다.

2.1.4 사업장 시스템 구성

현재 최대공급량(220,000 m³/day)을 기준으로 취수펌프장에서 정수장의 착수정까지 도수관로계에 대한 수격현상을 수치해석하였다. 이 물량을 공급하기 위해서는 양흡입 원심펌프 3대가 취수장에서 병렬로 운전되며, 운전되고 있는 펌프 3대가 갑작스런 정전으로 긴급 정지되었을 때 수격작용이 가장 심각하다. 수치계산은 기존 설치되어 있는 설비와 해석 후 안전대책이 필요할 경우를 대비하여 설비설치가 가능한 위주로 행하였으며 수치계산에 사용된 입력 자료는 Table 2.2와 같고 자양취수장에서 일산 정수장 착수정까지 관로형상(pipeline profile)은 Fig. 2.1에 나타내었다.

Table 2.2 Numerical calculation input data

펌프 운전 대수	규정 양정	규정 유량	회전 속도	관성모멘트(GD ²)		흡수정 (LWL)	착수정 (HWL)
				펌프	전동기		
3 sets	82 m	46.3 m ³ /min	880 rpm	150 kgsm ²	343 kgf · m ²	6 m	25 m

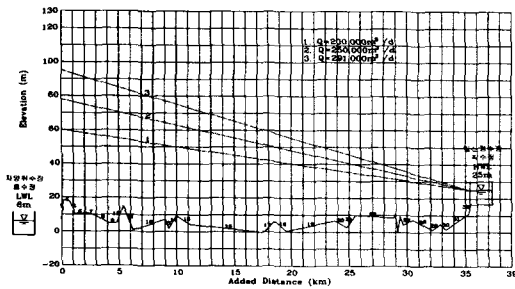


Fig. 2.1 Hydraulic longitudinal plan from intake pumping station to water treatment station

2.1.5 전산 모의시험결과 및 검토

1) 수격완화 설비가 없을 때

수격완화 설비가 없는 경우 도수관로에서의 최대, 최소압력(upsurge, downsurge)을 Fig. 2.2에, 펌프출구에서의 피에조수두(piezometric head = 압력수두 + 위치수두) 변동을 Fig. 2.3에 각각 나타내었다. 도수관로상의 전 구간에 걸쳐 관로 내 압력이 물의 포화증기압 이하로 낮아져 증기공동이 형성되며 결국 수주분리현

상이 발생하고, 다운서지에 의한 부압 발생시간도 비교적 오랫동안 지속되는 것으로 예측되었다. Table 2.3은 수치해석결과 얻어진 과도특성을 요약하여 나타내었다.

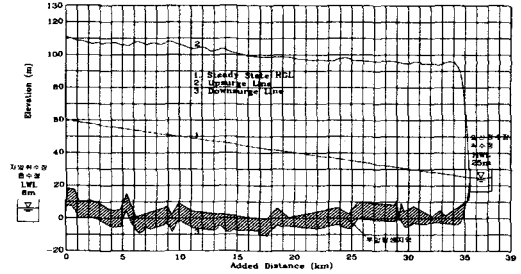


Fig. 2.2 Upsurge & downsurge line by 3 pumps emergency stop

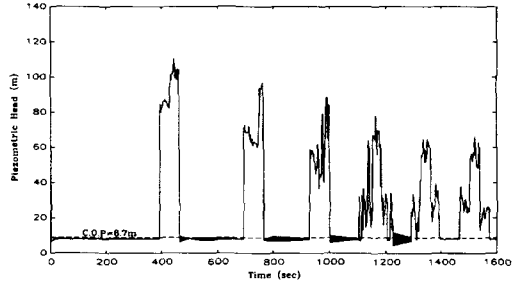


Fig. 2.3 Piezometric head change by 3 pumps emergency stop

Table 2.3 Air-chamber input data

취수장에서의 정상상태 압력수두 (m)	취수장에서의 최대압력수두 (m)	파이프에서의 최소압력수두 (m)	취수장에서 역류가 발생하는 시간 (sec)
51.31	102.11	-10.36*	9.19

주) * 증기공동(vapor cavity)이 발생함.

2) 도수관로상 공기밸브가 작동했을 경우

도수관로에는 19개 지점에 250 mm 쌍구형 공기밸브가 설치되어 있으며, 일부지점의 공기밸브는 200mm 급속 공기밸브로 교체된 상태이다. 본 검토에서는 과도현상 중 작동될 수 있는 14개 지점에 설치된 공기밸브의 영향을 고려하여 수치계산을 수행하였다. 해석결과 얻어진 도수관로에서의 최대, 최소압력은 Fig. 2.4에, 펌프출구에서의 피에조수두 변동은 Fig. 2.5에 각각 나타내었다. 도수관로 주요 지점에 설치된 공기밸브에 의해 부압 발생은 상당히 해소되고 있으나, 공기

밸브가 설치된 구간 사이에서는 부압이 여전히 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 2.6는 취수장 근처의 관로 정점부에 설치된 공기밸브를 통하여 관로로 유입된 공기의 체적이며, 이 공기밸브를 통하여 약 286 m³ 정도 관로로 공기가 유입되는 데 일산 정수장에서 자양 취수장 쪽으로 물이 역류되어 유입된 공기가 모두 빠져 나가는 약 950초 후에는 압력이 비교적 높게 상승하고 있음을 알 수 있다. Table 2.4는 수치해석결과 얻어진 과도특성을 요약하여 나타내었다.

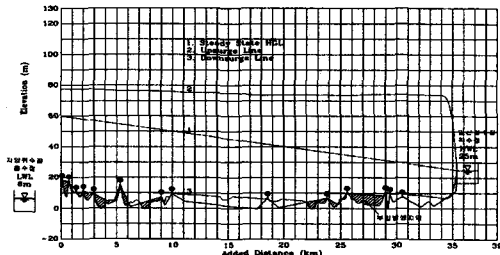


Fig. 2.4 Upsurge & downsurge line in the pipeline when air valves work

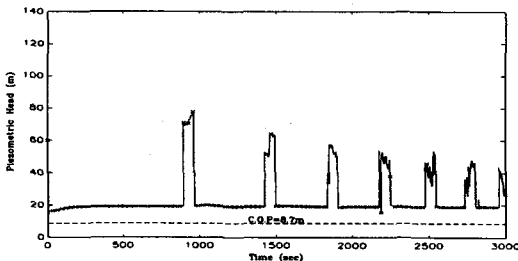


Fig. 2.5 Piezometric head change in the intake pumping station when air valves work

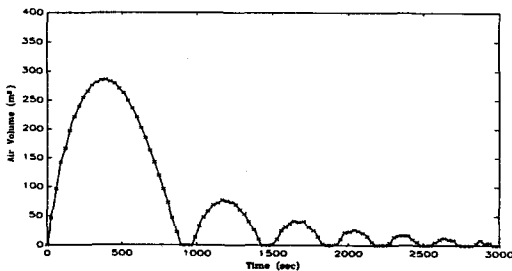


Fig. 2.6 Air volume in the pipeline through air valve near the intake pumping station

Table 2.4 Transient specificity with air valve working

취수장에서의 정상상태 압력수두 (m)	취수장에서의 최대압력수두 (m)	파이프에서의 최소압력수두 (m)	취수장에서 역류가 발생하는 시간 (sec)
51.31	68.97	-10.36*	2.80

주) * 증기공동(vapor cavity)이 발생함.

3) 에어챔버(Air-chamber)를 설치했을 경우

관로 내 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴이 일어날 수 있으며, 증기공동에 의해 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 심한 수격작용이 발생되어 관로 및 취수장에 파손을 입힐 우려가 있다. 이러한 수격작용을 완화시켜주기 위하여 펌프출구 주관로상에 에어챔버를 설치하는 방안에 대하여 검토하였다.⁵⁾

Table 2.5 Transient specificity with air valve working

설치갯수	대당 체적 (m ³)	초기압축 공기량(m ³)	초기상태공기 압력(kgf/cm ²)	연결관의 직경 (m)
4	60.0	15.5	5.1	0.3

에어챔버를 설치하였을 경우 수치계산결과 얻어진 도수관로에서의 최대, 최소 압력선을 Fig. 2.7에, 펌프출구에서의 피에조수두 변동을 Fig. 2.8에 각각 나타내었다. 또한, Fig. 2.9는 에어챔버를 통한 유량변동을 나타내었다. 여기서, 취수장 근처의 공기밸브는 에어챔버와 조합하여 사용하는 것으로 계획하였는데, Fig. 2.10은 이 공기밸브를 통하여 관로로 유입된 공기의 체적을 나타내었다. 취수장의 에어챔버와 공기밸브에 의해 도수관로에서는 증기공동이나 수주분리현상이 발생하지 않고, 업서지에 의한 압력상승도 정상상태 압력을 거의 넘지 않는 것으로 분석되었다. Table 2.6은 수치해석결과 얻어진 취수장에서의 과도특성을 각각 요약하여 나타내었다.

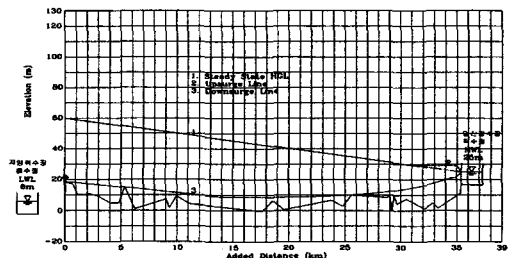


Fig. 2.7 Upsurge & downsurge line with air-chamber

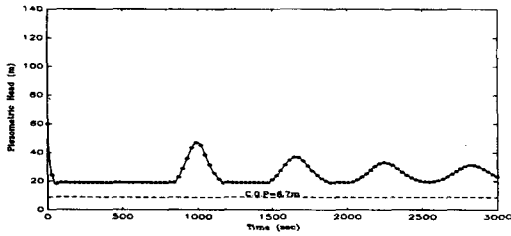


Fig. 2.8 Piezometric head change by air-chamber in the intake pumping station

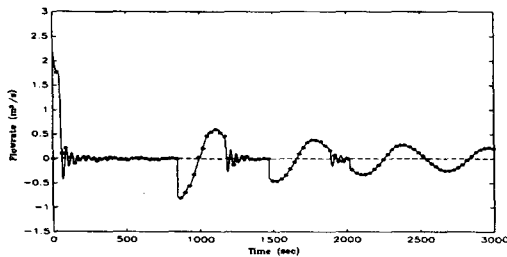


Fig. 2.9 Flux change through air-chamber

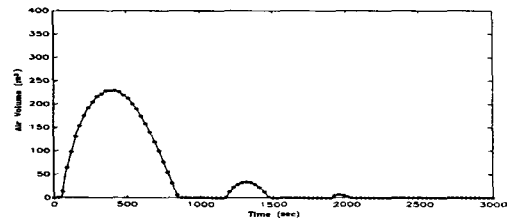


Fig. 2.10 Air volume in the pipeline through air valve near the intake pumping station

Table 2.6 Transient specificity with air-chamber

취수장에서의 정상상태 압력수두 (m)	취수장에서의 최대압력수두 (m)	파이프에서의 최소압력수두 (m)	취수장에서 역류가 발생하는 시간 (sec)
51.31	51.31	0.49	0.30

3 수격현상 현장시험 결과

3.1 시험장치 및 방법

3.1.1. 시험장치

현장시험을 수행하기 위하여 구성된 측정 장비의 개략적인 배치도를 Fig. 3.1에 나타내었으며, 압력전송기

및 밸브개도 지시계에서 측정된 전기적인 신호 값은 검사기(signal conditioner)를 거쳐 아날로그-디지털 변환장치로 전송되고 수집된 데이터는 Daq View 프로그램을 사용하여 현장에서 실시간으로 확인된 후 저장된다. 또한 현장시험에 사용된 측정기기는 수격해석 결과를 토대로 그 측정범위가 정해지고 시간에 따른 반응속도가 빠른 기기들로 선정되었다.

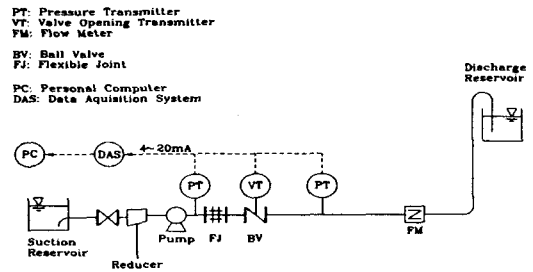


Fig. 3.1 A block plan of measuring equipment

3.1.2. 시험방법

자양 취수장의 현장시험(field test)을 수행한 후 수치해석 결과와 비교·검토함으로써 현재 취수용량을 기준으로 수격작용 프로그램 해석결과의 신뢰성을 검증하고자 하였다. 현장시험 기간 동안 자양 취수장 흡수정의 수위(한강)는 약 6.4 m로 일정하게 유지되었으며, 정수장 착수정(gauging well)의 수위도 웨어(weir)가 설치되어 바닥으로부터 4.15 m로 비교적 일정하였다.

현장 시험방법으로는 다음과 같다.

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

3.2 현장시험 결과

3.2.1. 펌프 기동에 따른 수격현상

- 1) 펌프 토출밸브를 급격히 개방한 경우
 - 펌프 2대가 병렬로 운전(# 2, 4)중 3호기 1대를 추가

로 가동하였다. Fig. 3.2는 3호기의 밸브개도, 펌프 출구측 압력, 주 관로 내 압력을 나타내었다. 취수펌프 2대 병렬운전 시 펌프는 토출측 밸브가 약 33% 개방된 상태이고, 펌프 토출측 #2호기 압력은 6.7 kgf/cm², #4호기는 6.8 kgf/cm², 관로 내 유량은 7,671 m³/h (184,000 m³/day)으로 측정되었다. 펌프가동 후 곧바로 규정 회전속도에 도달하고, 토출밸브가 열리기 전까지 체절점(shut-off point)에서 운전하게 된다. 체절점에서 운전될 때 펌프 출구측 압력은 약 8.87 kgf/cm²로 측정되었다. 토출밸브가 열림에 따라 관로로 물이 공급되면서 펌프 출구측 압력은 떨어지고 주 관로 내 압력은 상승하게 되는데, 이러한 과정에서 발생하는 과도 현상은 밸브개도가 고정된 후 짧은 시간 안에 안정되고 있으며, 이 때 작용하는 수격작용도 그다지 우려가 없는 것으로 분석되었다. 취수펌프 3대가 병렬로 운전함으로써 관로 내 유량은 9,219 m³/h(221,000 m³/day)으로 증가하였고, 이에 따라 주 관로 내 압력도 5.3 kgf/cm²에서 6.9 kgf/cm²로 증가된 것으로 측정되었다.

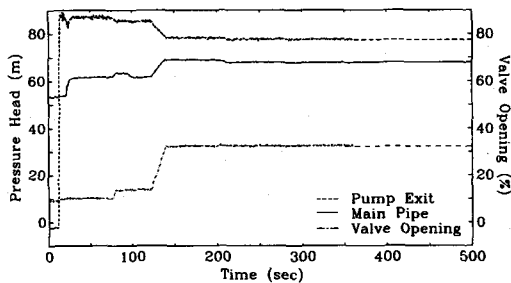


Fig. 3.2 Field test result from the case of discharge valve sudden open

2) 펌프 토출밸브를 서서히 개방하는 경우

원심펌프의 정상적인 기동(normal start)은 전동기의 기동 전류를 최소화하기 위하여 펌프 출구측 밸브를 완전히 닫은 상태에서 펌프를 기동시킨 후 밸브를 서서히 개방하는 방법이 일반적이다. 여기서 밸브를 서서히 개방하는 이유는 펌프의 유량을 천천히 증가시킴으로써 관로 내 수격작용을 최소화하는데 있다. 자양 취수장의 경우 밸브의 구동장치가 전동식이기 때문에 이를 스텝제어(step control) 형태로 수동 조작하여 6분 동안 밸브를 서서히 개방하면서 측정된 값을 Fig. 3.3에 정리하여 나타내었다. 밸브의 개도가 변화에 따라 관로 내 압력도 곧바로 안정되므로 펌프의 기동 시 문제가 발생치 않음을 알 수 있다.

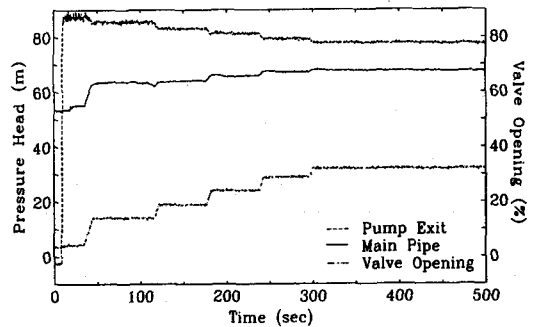


Fig. 3.3 Field test result from the case of discharge valve slow open

3.2.2 펌프 운전중 정지에 따른 수격현상

1) 펌프 토출밸브를 급폐쇄한 후 펌프를 정지한 경우
 펌프 #2, 3, 6호기 3대가 병렬로 운전되고 있을 때 3호기 펌프를 정상적으로 정지하는 시험을 하였다. 펌프 3대를 병렬운전 시 토출측 밸브는 약 33% 개방된 상태로 운전되었고, 유량은 9,223 m³/h(221,000 m³/day)으로 측정되었다. 펌프 토출밸브(φ700mm)의 개폐시간은 95초로 조사되었다. 이에 따라 밸브의 개도가 33%인 상태에서 운영되다 펌프를 정지시키는 경우 밸브의 폐쇄시간이 32초(95/3)로 매우 빨라 심각한 수격작용을 유발하는 것으로 분석되었다. Fig. 3.4는 펌프 3대가 병렬로 운전될 때 주 관로 내 압력은 6.9 kgf/cm²로 유지된 상태에서 #3호기 펌프 토출밸브가 닫힌 후 3.75 kgf/cm²까지 급격히 떨어졌다가 압력이 다시 회복되면서 점차 안정화되어 가는 것으로 측정되었다. 이러한 과도현상 중 계속 운전되고 있던 나머지 펌프들 즉, 2호기와 6호기 펌프의 운전점은 심하게 변하게 되며 이에 따라 2차적인 피해가 우려된다.

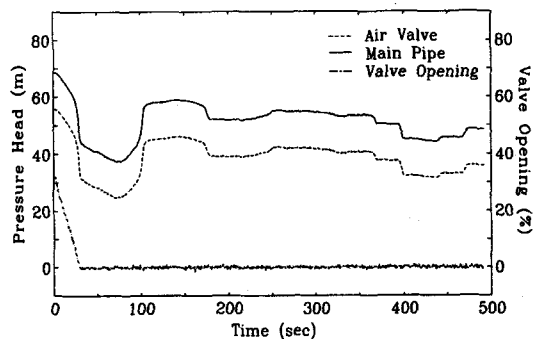


Fig. 3.4 Field test result from discharge valve sudden close

2) 펌프 토출밸브를 서서히 닫은 후 정지한 경우

펌프의 정상적인 정지 시 발생하는 수격작용을 완화시켜주기 위하여 밸브의 폐쇄시간을 인위적으로 변경시켜 현장시험을 수행하였다. 취수장의 경우 밸브를 스텝 제어 형태로 수동 조작하여 6분 동안 밸브를 서서히 닫으면서 측정하였으며, #2, 3, 4호기 3대가 병렬로 운전되고 있을 때 3호기를 정상적으로 정지하였다. 초기 조건에서 토출측 밸브가 약 33% 개방된 상태로 운전되었고, 유량은 $9,071 \text{ m}^3/\text{h}$ ($218,000 \text{ m}^3/\text{day}$), 압력 6.8 kgf/cm^2 로 각각 측정되었다. Fig. 3.5는 밸브의 개도가 스텝 제어 형태로 변환에 따라 관로 내 압력도 계단식으로 변하고 있음을 알 수 있다. 3호기 밸브가 완전히 닫힌 후 주 관로 내 압력은 약 4.7 kgf/cm^2 까지 약간 떨어졌다가 압력이 다시 회복되면서 곧바로 안정화되는 것으로 측정되었다. 이 결과는 급폐쇄 한 경우와 비교한다면 상당히 개선된 상태이다.

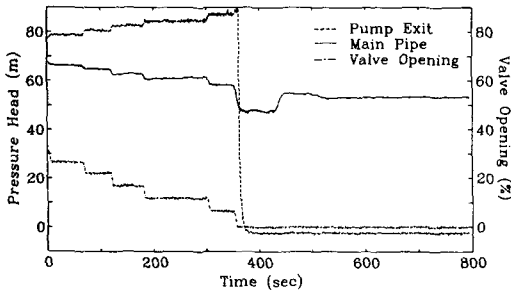


Fig. 3.5 Field test result from discharge valve slow close

3.2.3 취수펌프의 비상정지에 따른 수격현상

1) 펌프 단독운전 중 비상정지 한 경우

펌프 #3호기를 단독으로 운전되고 있을 때 비상 정지 시험을 수행하였다. 초기 조건에서 토출측 밸브가 약 22% 개방된 상태로 운전되었고, 유량은 $3,441 \text{ m}^3/\text{h}$ ($82,600 \text{ m}^3/\text{day}$), 압력은 2.3 kgf/cm^2 로 측정되었다. 펌프는 동력 공급이 중단되어도 아직 펌프와 전동기 회전부의 관성에 의해 계속 돌리고 하나, 보유하는 에너지는 물을 보내는데 시간이 지남에 따라 점점 소비되어 펌프의 회전속도가 양정, 유량은 급속히 감소된다. 취수장에서 발생한 음압력파(negative pressure wave)는 관로를 따라 하류로 전파되면서 관 내 압력을 떨어뜨리는데, 관로 정점부에 설치된 공기 밸브실에서 관 내 압력이 대기압 이하로 떨어지면 외부의 공기가 관로로 유입된다. 취수장 근처에 설치된 공기밸브

실의 위치가 도수관로에서 가장 높은 지점이기 때문에 이 공기밸브를 통하여 공기가 유입된 후 취수장 쪽으로 역류가 발생하고, 도수관로 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. 일산 정수장내 착수정에서 반사된 음압력파는 양압력파(positive pressure wave)로 바뀌어 도수관로 내 압력은 서서히 상승하게 되는데, 이 주기에서 관로로 유입된 공기는 공기밸브를 통하여 외부로 빠져나간다. Fig. 3.6은 약 10분 동안 측정된 주 관로 내 압력과 공기밸브실의 관내 압력을 각각 나타내었는데, 이는 매우 긴 주기의 서징 현상을 잘 보여주고 있다.

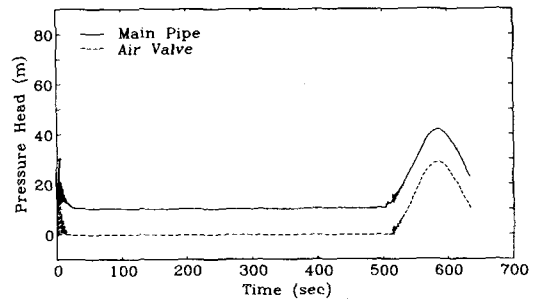


Fig. 3.6 Field test result from one pump emergency stop

수치해석결과 얻어진 주 관로 내 압력 변동을 측정값과 서로 비교하여 Fig. 3.7에 나타내었고, 도수관로에서의 최대, 최소압력을 Fig. 3.8에, 과도특성을 Table 3.1에 나타내었다. 펌프 비상 정지 후 취수장으로 역류는 약 2.3초에 발생하고, 도수관로 상에 설치된 공기밸브들 중 취수장 근처에 있는 2지점의 공기밸브들만 작동된 것으로 수치계산결과 예측되었다. 특히, 관로 정점부(St. No.6+37)에 설치된 공기밸브를 통하여는 외부의 공기가 약 223초 동안 100 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 정수장내 착수정에서 반사되어 되돌아온 양압력파에 의해 관로로 유입된 공기가 외부로 모두 빠져나갔을 때 취수장에서 압력은 급격히 상승하는 것으로 예측되고 있으나, 실제로 압력은 서서히 그리고 완만하게 상승하는 것으로 측정되었다. 이는 관로 정점부의 공기밸브를 통하여 공기가 외부로 유출될 때 관로

내 수면 변동(fluctuation)과 2상 유동(two phase flow) 등의 원인에 의해 차이를 보이는 것으로 판단된다. 이에 따라 수치계산은 주 관로 내 최대압력을 5.8 kgf/cm²로 예측된 값(4.2 kgf/cm²) 보다 다소 높게 예측하고 있으나, 이러한 장거리 도수관로에서 발생하는 긴 주기의 서징 현상을 비교적 양호하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

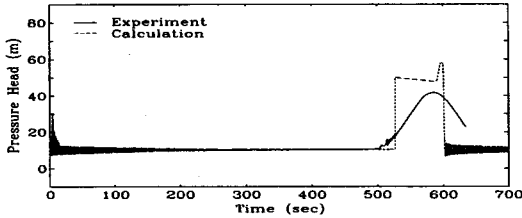


Fig. 3.7 Pressure change in the main pipeline by one pump emergency stop

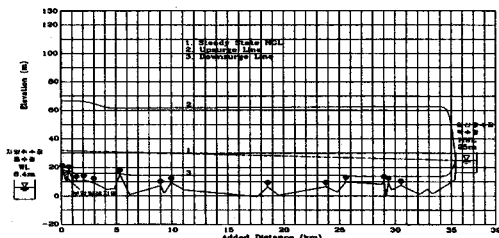


Fig. 3.8 Predicted upsurge & downsurge line by one pump emergency stop

Table 3.1 Predicted transient specificity by one pump emergency stop

주 관로 내 정상상태 압력수두 (m)	주 관로 내 최대압력수두 (m)	파이프에서의 최소압력수두 (m)	취수장에서 역류가 발생하는 시간 (sec)
23.10	58.00	-7.51*	2.30

주) * 부압(negative pressure)이 발생함.

2) 펌프 3대 병렬운전 중 3대를 비상정지 한 경우

펌프 #2, 3, 4호기 3대가 병렬로 운전되고 있을 때 비상정지 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 m³/h (222,000 m³/d), 압력은 7.1 kgf/cm²로 측정되었다. Fig. 3.9는 펌프 출구측 압력, 주 관로 내 압력, 공기밸브실의 관내 압력을 측정하였으며, 수집시간은 26분 40초

로 하였다. 취수장에서 공급하는 물량이 증가할수록 수격작용은 더욱 심해지기 때문에 펌프 출구측 체크밸브는 슬래밍(slamming, damping)⁶⁾ 현상을 일으키면서 닫히고 있음을 알 수 있다. 정수장 쪽으로 전파된 압력파는 매우 긴 주기로 서징(surging)현상을 일으키는데 유량이 증가할수록 주기는 점점 길어지는 것으로 측정되었다.

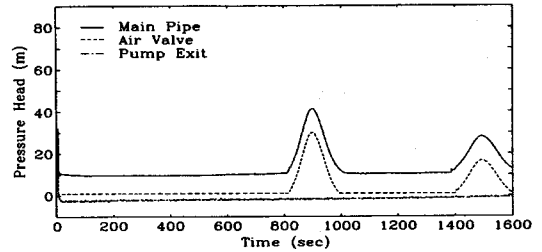


Fig. 3.9 Field test result from 3 pumps emergency stop

수치해석결과 얻어진 주 관로 내 압력 변동을 측정 값과 서로 비교하여 Fig. 3.10에, 도수관로에서의 최대, 최소압력을 Fig. 3.11에, 과도특성을 Table 3.2에 나타내었다. 펌프 비상정지 후 취수장에서 역류는 약 3.7초에 발생하고, 도수관로 상에 설치된 공기밸브 모두가 작동된 것으로 수치계산결과 예측되었다. 관로 정점부(St. No.6+37)에 설치된 공기밸브를 통하여는 외부의 공기가 약 333초 동안 261 m³ 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 압력 파에 의해 주 관로 내 압력은 4.13 kgf/cm² 까지 상승하는 것으로 측정되었으나, 수치계산은 6 kgf/cm²로 실제보다 다소 높게 예측하였다.

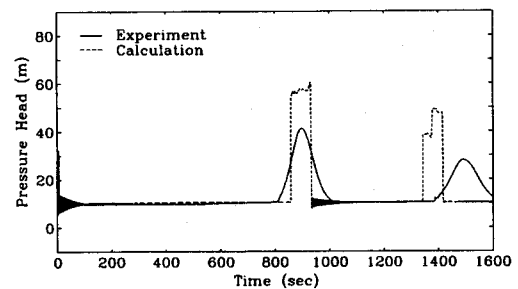


Fig. 3.10 The pressure change by 3 pumps emergency stop in the main pipeline

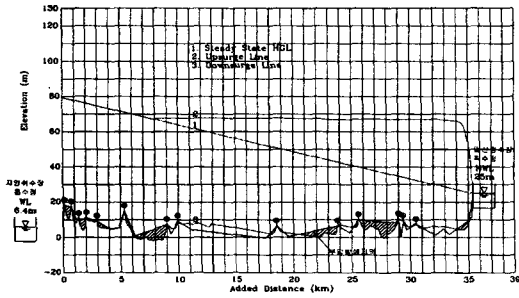


Fig. 3.11 Predicted upsurge & downsurge line by 3 pumps emergency stop

Table 3.2 Predicted transient specificity by 3 pumps emergency stop

주 관로 내 정상상태 압력수두 (m)	주 관로 내 최대압력수두 (m)	파이프에서의 최소압력수두 (m)	취수장에서 역류가 발생하는 시간 (sec)
70.68	70.68	-7.57	3.66

주) * 부압(negative pressure)이 발생함.

4. 결론 및 고찰

펌프장 안정성 평가를 위한 수치해석 결과와 수격 작용에 대한 현장 시험을 실시하여 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 펌프 3대를 병렬로 운전중 펌프 1대를 정상적으로 정지할 때 펌프 토출 밸브를 급폐쇄(32초)하는 경우 가동중인 펌프 2대에 영향을 미치게 되므로 토출밸브 폐쇄시간을 최소 6분 이상 연장하는 것이 수격 작용으로 인한 영향을 최소화 할 수 있다.
- 2) 가동중인 펌프 3대가 비상정지 시 최초 가동되는 펌프는 약 30분 이상 대기한 후 재가동하므로써 수격에 의한 피해를 줄일 수 있다.

- 3) 공기 밸브실에는 공기의 유·출입이 자유로울 수 있도록 반드시 통기관을 설치해야 하고 배수펌프 설치 등 침수방지 시설도 갖춰야 한다.
- 4) 긴 관로 시스템에서는 압력파가 관마찰 손실에 의해 소산되기 때문에 상승압력보다는 부압발생을 효과적으로 방지할 수 있는 수격완화 설비가 필요하다.

후 기

본 연구를 위해 현장 시험 시 적극 협조해 주신 고양관리단의 소장님과 관계직원 여러분께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김경엽, 김점배, 2004. 2 “원심펌프의 시동 및 정지에 따른 수격현상” (사) 유체기계공업학회, pp. 51~52
- (2) 한국수자원공사, 1994. 12 “펌프장 신뢰성 향상방안 연구” pp. 20~24
- (3) 한국수자원공사(박한영), 2004. 8 “그림으로 푸는 수충격 해석” 동명사, pp. 276~287
- (4) A.R.D. Thorey, 2004, “Fluid Transients in Pipe-line System(Second Edition), Professional Engineering Publishing Limited(UK), pp. 25~38
- (5) 김경엽, 1986, “수격현상 계산에 의한 펌프장 에어챔버의 설계도표 개선 및 응용” 서울대학교 석사학위논문
- (6) E. Benjamin Whlie/Victor L. Streeter/Lisheng Suo, 1993, “Fluid Transients in System, Englewood Cliffs(USA), pp. 133~136