◎ 논 문

DOI: http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2012.15.6.070
ISSN (Print): 1226-9883

에어챔버가 설치된 인라인 취수펌프장에서 수격현상

김경엽*†· 안철홍** · 김범준**

Waterhammer for the In-Line Intake Pumping Station with Air Chamber

Kyung-Yup Kim*†, Cheoul-Hong Ahn**, Bum-Jun Kim**

Key Words : Intake Pumping Station(취수펌프장), Waterhammer(수격현상), Air Chamber(에어챔버), Field Test(현장시험), Normal Start(정상기동), Normal Stop(정상정지), Emergency Stop(긴급정지)

ABSTRACT

Recently, because people are taking a great interest in the water supply system and the related facilities are getting larger, the surge suppression is very important problem. The waterhammer occurs when the pumps are started or stoped for operation or tripped due to the power failure. As the waterhammer problems as a result of the pump power failure were very serious, these situations were carefully investigated. Accordingly, we carried out both numerical simulations and field tests to confirm the safety of Juam intake pumping station in which had the in-line pumps. In this paper, it was reviewed that the water supply system has the reliability on the pressure surge, in case the air chambers were installed at both the inlet and the oulet of the in-line pumping station. From the numerical simulations, we found that negative pressure occurred at the inlet disappeared and high pressure occurred at the outlet reduced due to the air chambers. And these results of numerical simulations verified by the field tests. The field tests carried out in case of normal start, normal stop, one and two of pumps emergency stop. By results of simulations and field tests, we are sure that Juam intake pumping station in which have the air chambers is safe for the waterhammer. In addition, we suggested the operation methods of facilities for safe maintenance of the pumping station.

1. 서 론

주암댐 계통 광역상수도 사업은 자체 수원 확보가 어려운 광주광역시와 전남 목포시, 나주시, 화순군 등 4개 시·군에 생활용수를 공급하기 위하여 단계별로 완공되었다. 주암댐 광역상수도 1단계 사업은 1987년 9월 타당성 조사 및 기본계획에 착수하여 1989년 12월 시설 공사에 들어가 1994년 7월 용수를 공급하기 시작하였으며 1996년 7월 준공되었다. 1980년대 우리나라 주요 상수도 사업은 개발 도상 국가에 지원되는 해외 차관 사업에 주로 의존하였는데, 수도권 광역상수도 3단계 사업은 UN의 국제부흥개발은행(IBRD), 대청댐 광역상수도 사업과 울산시를 비롯한 9개 중소도시 상수도 사업은 아시아개발은행(ADB), 부산시 상수도 5차 확장사업은 일본 해외경제협력기금(OECF)의 차관 융자를 받아 추진된 바 있다. 이처럼 해외 차관에 의해 진행된 상수도 사업은 자본뿐만 아니라 핵심 설계까지도 선진국에 의존하는 실정이었다. 주암댐 계통 광역상수도 사업 역시 총사업비 860억원 중 3,400만불은 세계은행의 차관으로 충당되었으나, 설계 및 시공이 순수 우리기술로 이루어져 상수도 분야의 자립화를 앞당긴 초석으로 평가할 수 있다.[1]

한편, 한국시설안전공단은 1994년 10월 성수대교 붕괴 사고 후 『시설물의안전관리에관한특별법』(이하 "시특법"이라 함)에 의하여 삼풍 백화점 붕괴 사고가 발생한 해인 1995년 설립되었다. 공단은 교량, 터널, 댐, 항만, 상하수도, 건축물 등 주요 시설물의 정밀안전진단과 안전점검으로 시설물 안전을 확보하여 국민의 생명과 재산을 보호하고 국가경제의 지속적인 발전에 기여하는데 그 설립목적이 있다. 이에 따라 공단은 시특법 제7조 및 동법 시행령 제9조에 의해 주암댐 계통 1단계 광역상수도 시설물을 대상으로 제1회 정밀안전진단을 2008년도에 실시하였다.[2,3,4]

* 한국산업기술대학교 기계공학과
** 한국시설안전공단 진단본부 상하수도팀
† 교신저자, E-mail : kykim@kpu.ac.kr

주암댐 계통 광역상수도 1단계 사업은 주암호를 수원으로 주암 취수장에서 520,000 ㎥/d의 원수(raw water)를 취수하여 화순 정수장, 덕남 정수장 및 몽탄 정수장에 공급하고, 정수장에서 생산한 수돗물을 광주시, 목포시, 나주시, 화순군 일원에 공급하기 위해 계획 설계되었다. 이 수도 시설물 중 주암 취수장은 유입관로에 작용하는 주암댐의 자연수압을 최대한 활용하기 위하여 흡수정(sump)을 사용하지 않고 취수펌프가 관로 도중에 직접 설치되는 인라인 펌프장(in-line pumping station)의 형태로 설계되었다. 또한, 주암 취수장에는 수격작용(waterhammer)을 완화시키기 위하여 펌프장 유입측과 유출측에 에어챔버(air chamber)가 각각 설치되었다. 본 연구는 주암 취수장에서 발생하는 수격현상에 관한 수치해석과 현장시험(field test)을 통하여 펌프장 및 관로 시스템의 안전성을 확인함에 목적이 있다. 이를 위하여 주암 취수장을 대상으로 수격현상에 관한 수치해석을 실시한 후 그 결과를 현장시험을 통해 검증하였고, 수치해석 및 현장시험 결과를 바탕으로 에어챔버 유무에 따른 효과를 분석하였으며, 수치해석을 통해 설계유량 공급 시 수도 시스템의 안전성을 평가하고, 현장시험을 통한 유지관리 방안을 제시하였다.

2. 수치해석

2.1 시스템 구성

주암댐 계통 1단계 광역상수도 관로시설은 광주 및 목포 계통의 도수관로와 나주 계통의 송수관로로 구성되었으며, 총 연장은 약 102 ㎞이다. Fig. 1은 본 연구대상 구간인 주암 취수장에서 덕남 정수장까지의 관로형상(pipeline profile)을 나타내었으며, 도수관로 길이는 약 37 km이다. 도수관로는 강관 1열(D=2.2m, 2.0m, 1.8m)과 도수터널 1열(D=2.8m, 2.6m)을 근간으로 구성되었다. 관로 도중에는 직경 2.8m의 장대터널, 읍애터널, 장동터널, 오성터널과 직경 2.6m의 땀재터널, 덕남터널이 존재하는데, 이곳은 관로의 형상이 급격히 상승하여 터널의 위치가 정상상태 동수구배선(hydraulic grade line)에 매우 근접해진다. 정상운전 중인 펌프로의 동력이 갑자기 차단될 때 이곳에서 관로 내 압력은 물의 포화증기압 이하로 낮아져 증기공동이 형성되며 결국 수주분리 현상이 발생한다. 관로 내 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴이 일어날 수 있으며 증기공동에 의해 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 도수관로 및 터널과 부대설비 등에 손상을 입힐 우려가 있다. 이러한 수격작용을 완충시켜주기 위하여 도수터널에는 직경 0.5~2.2m의 스탠드파이프(stand pipe)가 설치되었다.

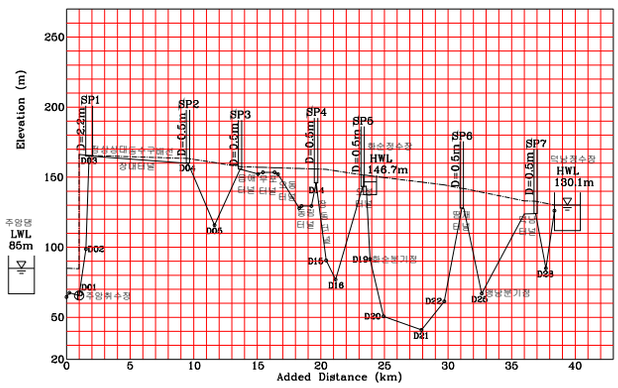

Fig. 1 Pipeline profile for Juam dam water supply project

Fig. 2 Picture of Juam intake pumping station(1st stage)

Table 1 Input data for the numerical simulations

Pump Specifications					
Pump	Number of Pumps (set)	Rated Discharge (㎥/min)	Rated Head (m)	Rated Speed (rpm)	Motor Power (kW)
Large	#1~#4	102	87	1,160	2,100
Small	#5, #6	56	87	1,160	1,350
Water Level (m)					
Water Level	Juam Dam	Water Treatment Plant			
		Hwasun	Deoknam		
Low	85.0	-	-		
High	108.5	146.7	130.1		
Air Chamber(Inlet) Specifications					
Total Volume (㎥)	Initial Air Volume (㎥)	Initial Air Pressure (bar)	Connection Pipe Diameter (m)		
50	25	1.869	0.5		
Air Chamber(Outlet) Specifications					
Total Volume (㎥)	Initial Air Volume (㎥)	Initial Air Pressure (bar)	Connection Pipe Diameter (m)		
30	15	9.869	0.4		

주암댐 계통 1단계 광역상수도 사업으로 완공된 취수장의 전경을 Fig. 2에 나타내었다. 1단계 계획설계유량인 520,000 ㎥/d의 용수를 공급하기 위하여 양쪽흡입 원심펌프 4대(대용량 3대, 소용량 1대)가 주암 취수장에서 병렬로 운전된다. 취수장에서 병렬로 운전되고 있는 펌프 4대가 갑작스런 정전 등으로 긴급정지(emergency stop) 되었을 때 발생하는 수격작용이 가장 심각하므로 이에 대한 수격현상은 1989년 실시설계 당시 사용된 범용 전산 프로그램인 SIMDRU[5]를 사용하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석에 사용된 입력자료 및 에어챔버의 제원은 Table 1과 같다. 주암 취수장 유입부와 유출측에 설치된 에어챔버의 수격 완화 효과를 분석하기 위하여 에어챔버가 설치되었을 경우와 설치되지 않았을 경우에 대한 수치해석을 각각 수행하였다.

2.2 펌프 긴급정지에 따른 수격현상

취수장에 에어챔버가 설치되지 않았을 경우 펌프 유입 및 유출부에서의 피에조수두(piezometric head = 압력수두 + 위치수두) 변동을 Fig. 3에 나타내었다. 취수장에서 발생한 압력파는 주암댐 방면의 유입관로와 정수장 방면의 유출관로로 동시에 전파되고, 취수장에서 역류는 펌프 긴급정지 후 약 4.2초에 발생하는 것으로 예측되었다. 이때부터 유출관로 내 압력은 점차로 상승하여 수격압은 비교적 높게 상승하고, 펌프 유입부에서는 부압이 발생하고 있음을 알 수 있다.

유입관로의 부압 발생을 방지하고 유출관로의 수격압을 완충시켜주기 위하여 취수장의 유입 · 유출 양측에 에어챔버가 설치되었다. 수치해석결과 얻어진 유입 · 유출부에서의 피에조 수두 변동은 Fig. 4에, 에어챔버로부터 관로로 유출되는 유량 변동은 Fig. 5에 각각 나타내었다. 펌프 긴급정지 후 펌프 출구측 체크밸브는 약 3.8초에 닫히며, 유입관로 상류 쪽으로 업서지(upsurge)와 유출관로 하류 쪽으로 다운서지(down-surge)가 발생하여 각자 전파된다. 이에 따라 유입관로 내 압력은 상승하며, 유출관로 내 압력은 점차로 떨어지기 시작한다. 이러한 수격작용은 펌프 유입 · 유출측에 설치된 에어챔버에 의해 매우 효과적으로 완화되고 있으며, 유입관로와 유출관로에서 증기공동이나 수주분리현상은 발생하지 않는 것으로 예측되었다. Table 2는 취수장에 에어챔버를 설치했을 경우와 설치하지 않았을 경우 펌프 유입 · 유출측에서 최대 · 최소 압력을 서로 비교하여 나타내었다. 수치해석결과 예측된 에어챔버 내 과도특성은 Table 3에 나타내었다.

한편, 주암 취수장에서 약 800m 떨어진 장대터널의 위치는 바닥 표고가 165m로 매우 높아 펌프가 긴급 정지된 후에도 터널 하류 지역에서는 자연유하에 의한 유동이 계속 형성된다. 이때 여러 지점의 도수터널 입 · 출구부에 설치된 스탠드파이프에 의해 터널 및 도수관로는 수격작용으로부터 적절히 보호되는 것으로 분석되었다.

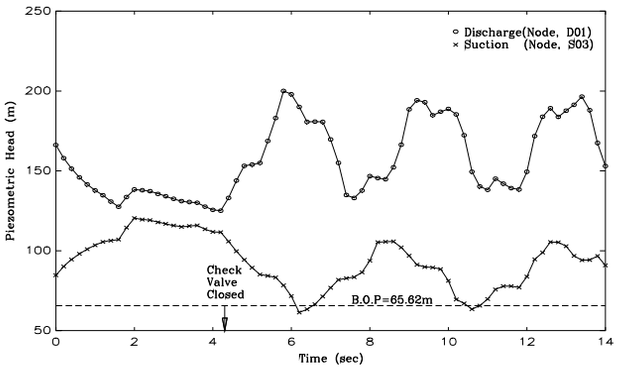

Fig. 3 Piezometric head vs. time at the inlet and the outlet of the pumping station without the air chamber

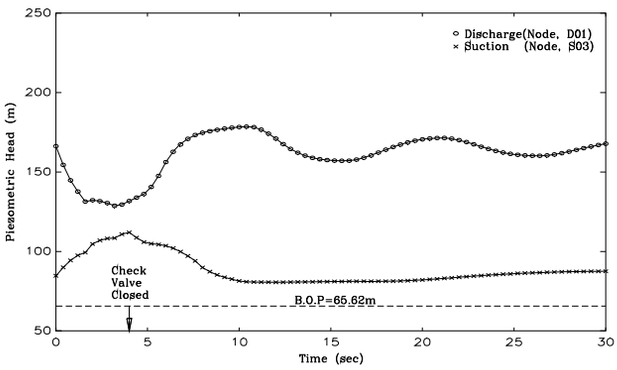

Fig. 4 Piezometric head vs. time at the inlet and the outlet of the pumping station with the air chamber

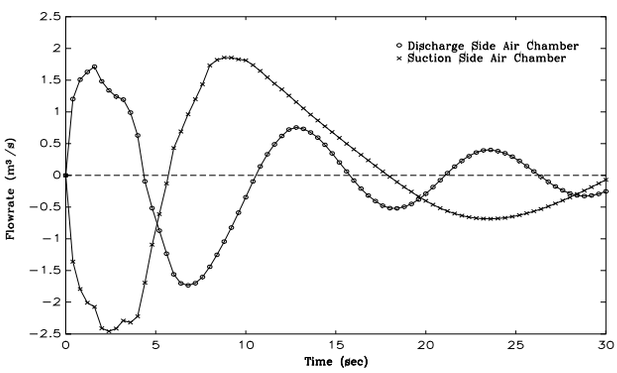

Fig. 5 Flowrate vs. time from the air chambers at the inlet and the outlet of the pumping station

Table 2 Predicted extreme pressures in intake pumping station

Air Chamber	Inlet of IPS		Outlet of IPS	
	Max. Pressure (bar)	Min. Pressure (bar)	Max. Pressure (bar)	Min. Pressure (bar)
without	5.377	-0.422*	13.187	5.832
with	4.558	1.469	11.074	6.189

* Negative pressure is occurred in the inlet of pumping station

Table 3 Predicted transient characteristics in the air chambers

Location of Air Chamber		Inlet	Outlet
Steady State	Air Volume (㎥)	25.0	15.0
	Air Pressure (bar)	1.869	9.869
Down-surge	Max. Air Volume (㎥)	27.94	20.24
	Min. Air Pressure (bar)	1.469	6.189
	Occurring Time (sec)	17.8	4.4
Upsurge	Min. Air Volume (㎥)	14.99	13.59
	Max. Air Pressure (bar)	4.558	11.074
	Occurring Time (sec)	5.6	10.6

3. 현장시험과 수치해석결과의 비교 및 검토

3.1 실험장치

현장 시험을 수행하기 위하여 구성한 측정 장비의 개략적인 배치도를 Fig. 6에 나타내었다. 압력 전송기와 수위 전송기 등에서 측정된 전기적인 신호 값은 검사기를 거쳐 아날로그-디지털 변환장치(analog-to-digital converter, DaqBook/100)로 전송되고, 수집된 데이터는 현장에서 실시간으로 확인·분석된 후 저장된다. 현장 시험에 사용된 측정 기기는 본 시스템의 수격현상에 대한 수치해석 결과를 토대로 그 측정 범위가 정해지고, 시간에 따른 반응 속도가 빠른 기기들로 선정되었다.[6,7] 한편, 현장시험기간(2008. 7.24) 동안 용수공급의 중단 우려와 수전용량 그리고 안전성 등의 제약조건으로 인하여 데이터 취득에 상당한 어려움이 있었으나 비교적 다양한 실험이 이루어졌다. 현장 시험 시 주암댐 수위는 약 101m를 유지하였다.

3.2 취수펌프의 기동에 따른 수격현상

원심펌프의 정상적인 기동(normal start)은 전동기의 기동 전류를 최소화하기 위해 펌프 출구 측 밸브를 완전히 닫은 상태에서 펌프를 기동시키고 펌프가 정격 회전수에 도달하였을 때 밸브를 개방하는 것이 일반적이므로 주암 취수장도 이러한 기동 방식을 채택하였다. 취수장의 모든 펌프가 정지된 상태에서 3호기 주 펌프 1대가 정상적으로 기동되는 경우 현장시험결과 측정된 에어챔버 내 압력 변동을 Fig. 7에 나타내었다. 주암댐의 수위가 101m이고 펌프 유입측 에어챔버 내 정압은 압력수두로 29m이므로 압력 측정지점의 위치수두는 약 72m(=101-29)임을 알 수 있다. 전동 버터플라이밸브가 열림에 따라 도수관로로 물이 공급되면서 펌프 유입측 압력은 떨어지고, 유출관로 내 압력은 상승하게 된다. 이에 따라 펌프 유입측 에어챔버 내 수위는 약간 떨어지고 유출측 수위는 조금 상승하게 된다. 3호기 펌프가 단독으로 운전되었을 때 전동 버터플라이밸브는 완전히 개방되었기 때문에 펌프의 운전유량은 129.5㎥/min로 측정되었는데, 이는 규정유량(102㎥/min)의 127%로 과다하게 증가한 사실 또한 확인할 수 있었다.

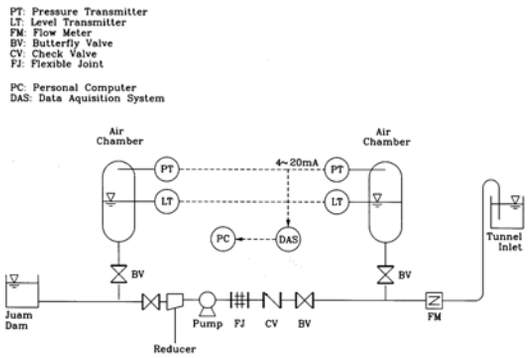

Fig. 6 Schematic diagram of the measuring layout

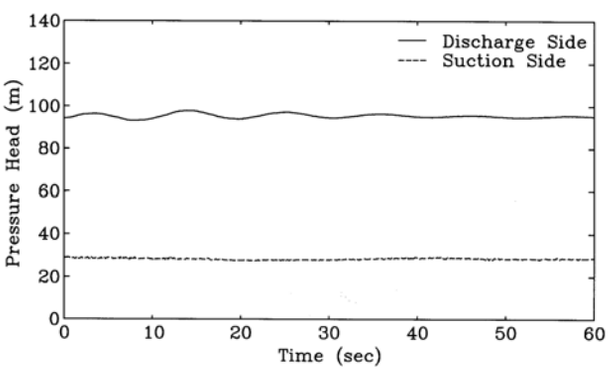

Fig. 7 Measured pressure heads in the air chambers for a pump normal start during none pump running

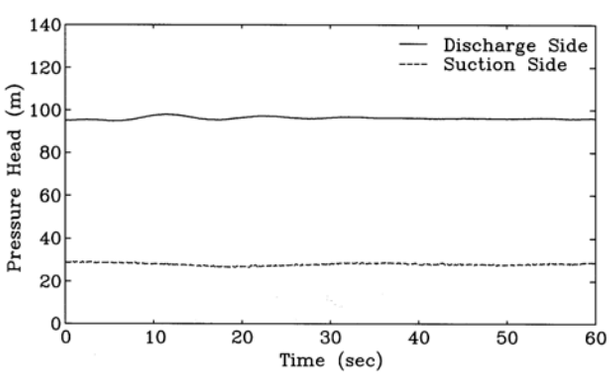

Fig. 8 Measured pressure heads in the air chambers for a pump normal start during one pump running

연속 실험으로서 3호기 펌프가 단독으로 운전되고 있을 때 1호기 펌프를 추가로 기동시킨 경우에 대한 현장시험결과를 Fig. 8에 나타내었다. 1호기 펌프가 정상적으로 기동된 후 관로 내 유량이 증가함에 따라 유동 손실도 커지기 때문에 펌프 유입측 압력은 떨어지고 유출측 압력은 상승한다. 따라서 펌프 유입측 에어챔버 내 수위는 떨어지고 유출측 수위는 상승하게 된다. 이와 같이 취수펌프가 정상적으로 기동될 때 발생하는 과도현상은 전동 버터플라이밸브의 개도가 고정된 후 짧은 시간 안에 안정되고, 이 과정의 수격압도 펌

프 유입·유출측에 설치된 에어챔버에 의해 효과적으로 완화되고 있음을 알 수 있다.

3.3 취수펌프의 운전정지에 따른 수격현상

원심펌프의 정상적인 정지(normal stop) 방법은 펌프 유출측 밸브를 서서히 차단한 후 밸브가 완전히 닫힌 상태에서 펌프·모터의 전원을 끄는 것이 일반적인 방법이다. 이때 밸브를 서서히 차단하는 목적은 관로 내 유속변화를 작게 하여 도수관로에서의 수격작용을 최소화하는데 있다.[8,9]

1호기와 3호기 펌프 2대가 병렬로 운전되고 있을 때 3호기 펌프를 정상적으로 정지시킨 경우 현장시험결과 측정된 에어챔버 내 압력 변동을 Fig. 9에 나타내었다. 주 펌프 2대가 병렬로 운전될 때 전동 버터플라이밸브는 완전히 개방되었기 때문에 펌프 한 대당 운전유량은 129.3㎥/min로 측정되었고, 이 또한 과다한 유량임을 알 수 있다. 3호기 펌프가 정상적으로 정지된 후 관로 내 유량이 감소함에 따라 유동손실이 작아지기 때문에 펌프 유입측 압력은 상승하고 유출측 압력은 감소한다. 따라서 펌프 유입측 에어챔버 내 수위는 올라가고 유출측 수위는 내려간다. 이처럼 취수펌프가 정상적으로 정지될 때 발생하는 과도현상은 짧은 시간 안에 안정되며, 이 과정의 수격압도 펌프 유입·유출측에 설치된 에어챔버에 의해 효과적으로 완화되는 것으로 분석되었다.

3.4 취수펌프의 긴급 정지에 따른 수격현상

3.4.1 취수펌프 1대가 긴급 정지된 경우

1호기 펌프가 단독으로 운전되다 정전 등에 의해 갑자기 정지되었을 때 발생하는 수격현상에 관하여 현장에서 이를 재현하여 실험하였다. 취수펌프 1대가 단독으로 운전되고 있을 때 펌프유출밸브의 개도는 100%로 완전히 개방된 상태로 운전되었으며, 취수펌프를 통한 유량은 약 131.2㎥/min인 것으로 측정되었다. 현장시험 시 계측된 값을 토대로 초기조건을 작성한 후 펌프 1대가 긴급 정지된 경우에 대하여 수치계산을 수행하였으며, 에어챔버 내 압력 변동을 측정값과 서로 비교하여 Fig. 10과 Table 4에 나타내었다. 펌프 유출측 에어챔버 내 최대·최소압력과 그 발생시간은 측정값과 비교적 잘 일치하고 있으나, 펌프 유입측에서 수격현상의 주기는 차이를 보이고 있다. 이는 주암댐 본체 내의 유입터널(D=10m) 및 유입관로를 통한 방류수 등이 유입관로에서의 과도현상에 영향을 끼쳤기 때문인 것으로 판단된다.

3.4.2 취수펌프 2대가 긴급 정지된 경우

1호기와 3호기 펌프가 병렬로 운전되다 정전 등에 의해 갑자기 정지되었을 때 발생하는 수격현상에 관하여 현장에서 이를 재현하여 실험하였다. 취수펌프 2대가 병렬로 운전되고 있을 때 초기 펌프유출밸브의 개도는 100%로 완전히 개방된

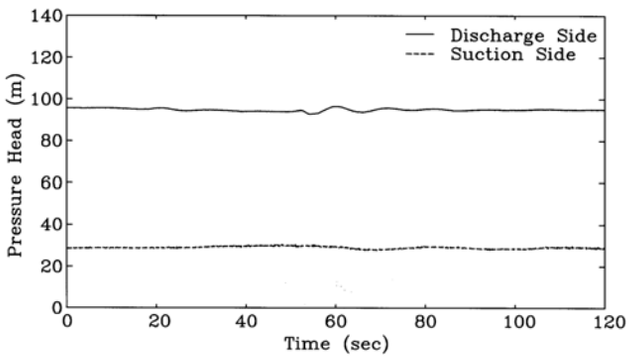

Fig. 9 Measured pressure heads in the air chambers for a pump normal stop during two pumps running

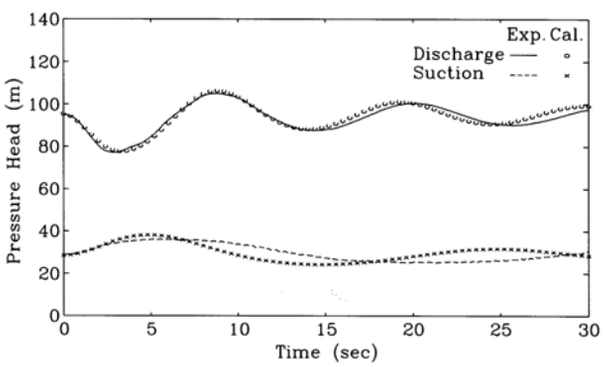

Fig. 10 Comparison of measured and predicted pressure heads in the air chambers for one pump emergency stop

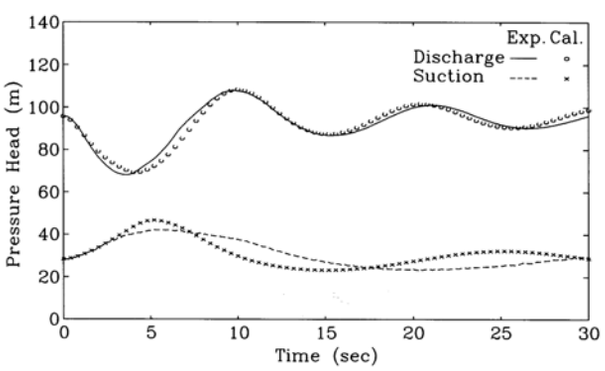

Fig. 11 Comparison of measured and predicted pressure heads in the air chambers for two pumps emergency stop

상태로 운전되었고, 취수펌프를 통한 총 유량은 약 372,300㎥/일(=258.5㎥/min)인 것으로 측정되었다. 현장시험 시 계측된 값을 토대로 초기조건을 작성한 후 펌프 2대가 긴급 정지된 경우에 대하여 수치계산을 수행하였으며, 에어챔버 내 압력 변동은 측정값과 서로 비교하여 Fig. 11과 Table 4에 나타내었다. 수치계산은 수격현상의 2~3 주기까지 측정값과 비교적 잘 일치하고 있으며, 펌프-관로계에 작용하는 최대·최소압력과 그 발생시간도 합리적으로 예측하고 있음을 알 수 있다.

Table 4 Comparison of measured and predicted pressure heads and its occurring time in the air chambers for pump emergency stop

		In Air Chamber at Pump Suction				In Air Chamber at Pump Discharge			
		Maximum Pressure Head(m)	Occurring Time(sec)	Minimum Pressure Head(m)	Occurring Time(sec)	Minimum Pressure Head(m)	Occurring Time(sec)	Maximum Pressure Head(m)	Occurring Time(sec)
One Pump Trip	Experiment	36.26	5.1	25.13	21.3	77.21	2.8	105.06	8.8
	Calculation	38.25	4.8	24.36	14.8	77.79	3.4	106.42	8.8
Two Pumps Trip	Experiment	42.28	5.2	23.19	20.3	68.13	3.6	108.06	9.8
	Calculation	46.78	5.2	23.33	15.0	69.31	4.2	108.45	10.0

현장시험을 통해 에어챔버의 수격압 완화효과를 확인할 수 있었으며, 현장시험의 측정치와 수치해석을 통한 해석치는 잘 일치하는 것으로 분석되었다. 이에 따라 현장시험의 위험성으로 인해 실시할 수 없었던 설계유량 520,000㎥/일에 대한 수치해석결과는 신뢰성을 갖는 것으로 판단된다.

4. 정밀안전진단에 따른 개선사례

주암댐 계통 광역상수도는 2010년 기준으로 하루 최대 334,000㎥을 공급하였으며, 가동률은 56% 수준이다. 제1터널인 장대터널(직경=2.8m, 길이=7.8km)은 하루 용수 공급량이 880,000㎥(2단계 기준)까지로 건설되었으나 2010년 현재 280,000㎥/일 수준으로, 1994년 최초 용수공급 이후 압력관이 아닌 개수로 형태로 운영되었다. 그동안 비상시나 수질 사고 시 단수의 영향을 최소화 할 수 있는 조절지가 없어 주암 취수장은 펌프 출구측 유량조절밸브의 교축을 통해 35~100%까지 유량을 조절했으며, 대용량 펌프의 잦은 기동·정지, 밸브 교축으로 인한 밸브 내구성 저하, 유량조절밸브 교축으로 인한 에너지 손실 등은 수돗물 원가를 증가시키는 주요 원인으로 작용했다. 또한, 주암댐 계통 광역상수도는 수요량 변화 및 비상시 완충 역할을 할 수 있는 조절지의 부재로 인해 취수장 설비사고 등이 발생할 경우 바로 용수공급이 중단되거나 통수시에도 관압 복구시간이 2시간 이상 소요되는 등 문제점이 있었다. 이에 따라 개수로 형태로 운영되던 도수터널을 조절지화 하기 위해 터널 출구 측에 설치된 수동밸브를 전동화시키고 저수위 164.0m부터 고수위 165.9m 구간을 조절지로 활용하였다. 펌프운영 패턴은 주 펌프(2,100kW)는 24시간 가동하고, 보조펌프(1,350kW)는 수위 변동에 따라 기동·정지를 반복해 22,000㎥ 이상의 물을 상시 저류시킬 수 있도록 하였다. 2011년 1월부터 6월까지 6개월간 장대터널을 조절지화 해 얻어진 운영효과를 분석해보면 유형효과 측면에서는 펌프 출구측 밸브 교축을 조절 없이 100%로 운영해 전력비를 연간 약 1억1천만원 절감했다. 무형효과로는 장대터널에 22,000~41,000㎥(2~3.7시간 공급물량)을 상시 확보해 단수시간을 최소화함으로써 중단 없는 용수공급 등의 효과를 보고 있다. 이는 최소 2만㎥의 조절지를 신설하는 것으로 환산한다면 약 130억원의 건설비 대체효과가 있다.[10]

5. 결 론

주암댐계통 1단계 광역상수도의 취수펌프장에 대한 수치해석과 수격압 현장시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 펌프장 유입측과 유출측에 에어챔버를 설치함으로써 유입측과 유출측 최고압력은 0.819bar, 2.113bar씩 감소되고, 최저압력은 1.891bar, 0.357bar씩 상승하는 것으로 수치해석결과 예측되었다.
2) 주암 취수장의 펌프가 정상적으로 기동 및 정지될 때 발생하는 과도현상과 취수펌프가 긴급정지 되었을 때 발생하는 수격압은 펌프 유입·유출측에 설치된 에어챔버에 의해 효과적으로 완화됨이 현장시험결과 확인되었다.
3) 주암 취수장의 펌프가 긴급 정지되었을 경우에 대한 수치계산 결과는 수격현상의 2~3 주기까지 현장시험 측정값과 잘 일치하였고, 에어챔버 내에 작용하는 최대·최소 압력과 그 발생시간도 합리적으로 예측하여 신뢰성을 가지는 것으로 판단된다.
4) 수격압에 대해 가장 악조건이면서 현장시험이 실시되지 못한 설계유량 520,000㎥/일 즉, 취수펌프 4대가 긴급 정지된 경우, 수치해석결과 펌프장에서 최고압력은 11.074bar, 최소압력은 1.469bar로 예측되었으며, 취수장과 관로시스템의 안전성에는 문제가 없는 것으로 검토되었다.
5) 주암 취수장의 펌프가 단독 또는 2대 병렬로 운전될 때 펌프 출구측 버터플라이밸브를 완전히 개방하면 펌프의 운전유량은 규정유량의 127%로 과다하게 증가하는 사실을 확인하였다. 취수펌프를 통하여 과다한 유량이 장시간 흐르면 캐비테이션에 의한 펌프의 손상이 우려되므로 이에 대한 대비책이 필요하다.
6) 주암 취수장의 펌프는 장대 터널의 위치 수두를 약간

상회하는 양정으로 운영되고 있어, 장대터널은 압력수로가 아닌 개수로의 형태로 유지되고 있는 것으로 판단된다. 따라서 장대터널 입구부에는 수위계를 설치하고 이 수위를 자동·측정함으로써 취수펌프의 운전점 및 장대터널 내 압력상태 그리고 펌프운용 계획에 참고토록 하는 것이 바람직하다.

7) 주암댐의 고수위와 저수위 차는 23.5m로 매우 커 취수펌프 전양정(87m)의 큰 부분을 차지한다. 이러한 시스템에서 에너지를 절감하기 위한 방안으로서 회전수 제어방식은 적합하지 않으며 저양정 펌프를 기존 펌프와 병행하여 사용하는 것이 합리적인 방안으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국수자원공사 전남지역본부의 도움으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 동아건설산업주식회사, 1993, 주암댐계통 광역상수도사업 T.B.M.공사 건설지.
(2) 건설교통부, 2006, 시설물의 안전관리에 관한 특별법.
(3) 한국시설안전공단, 2009, 주암댐계통 1단계 광역상수도 정밀안전진단 보고서.
(4) 한국시설안전공단, 2010, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침.
(5) Computer Program User's Manual of SIMDRU : Simulation of Fluid Transients in Piping and Channel Systems, Hannover University, Germany.
(6) 김경엽, 2002, "에어챔버가 설치된 송수관로에서의 수격현상," 대한기계학회논문집 B권, 제26권, 제2호, pp. 177~183.
(7) 김상균, 이동근, 이계복, 김경엽, 2005, "가압펌프장의 수격완화설비에 대한 보수·보강 사례," 유체기계저널, 제8권, 제4호, pp. 20~26.
(8) 김경엽, 김점배, 2004, "원심펌프의 시동 및 정지에 따른 수격현상," 유체기계저널, 제7권, 제1호, pp. 51~57.
(9) 김경엽, 박한영, 2003, 펌프핸드북, 동명사.
(10) 한국수자원공사 전남지역본부, 2011, "주암댐 광역상수도 취수·도수시설 개선사례," 워터저널, 8월호.