

원심펌프의 시동 및 정지에 따른 수격현상

김경엽* · 김점배**

Waterhammer Caused by Startup and Stoppage of a Centrifugal Pump

Kyung-Yup Kim*, Joum-Bea Kim**

Key Words: Waterhammer (수격현상), Centrifugal Pump (원심펌프), Ball Valve (볼밸브), Normal Start (정상시동), Normal Stop (정상정지), Emergency Stop (긴급정지), Field Test (현장시험)

ABSTRACT

The waterhammer has recently become more important because the pumping stations were big and the systems conveying the fluid through the large and long transmission pipelines were complex. 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. As the pressure waves are propagating between the pumping station and the distributing reservoir, the pressure inside the pipe drops to the liquid vapor pressure with the pipeline profile, at which time a vapor cavity forms, and finally the column separation occurs. If the pressure in the pipe is less than the atmospheric pressure, the pipe can be collapsed and destroyed after the water columns separated by the vapor cavity rejoin. During the reverse flow, the pressure is so abnormally increased at the pumping station that the accident of flooding may happen due to the failure of system. In this paper, the field tests on the waterhammer by the startup, stoppage, and power failure of a centrifugal pump were carried out for Yongma transmission pumping station in Seoul. The experimental results were compared with that of the numerical calculations, in which results the procedure of controlled pump normal shut-down and the two-step closing mode of controlling the ball valve for pump emergency stop are proposed to reduce the pressure surge.

1. 서론

세계 최초의 상수도시설 (waterworks)은 BC 1,450년경 이집트에서 사용한 시설로서 물을 침전시킨 후 사이폰을 이용하는 방식이었다. 그러나 고대의 대표적인

상수도시설로는 BC 300년경 로마의 시설을 들 수 있는데, 멀리 산중의 청수를 578 km에 이르는 수로를 통하여 공급하였다. 근대식 상수도시설은 프랑스에서 1746년경 최초로 소규모 여과장치를 이용한 방식이다⁽¹⁾. 우리나라 서울의 수도물은 미국인 콜브란도와 보스워이 고종황제로부터 상수도시설 운영허가를 받아 1906년 8월부터 뚝섬에 수도물을 만드는 정수장을 건설하여 1908년 9월부터 서울 4대문안과 지금의 용산지역에 살고

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

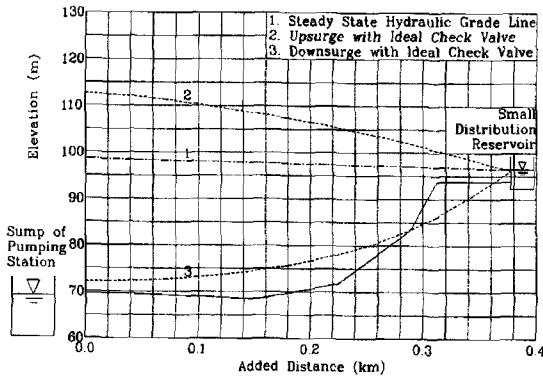


Fig. 1 Longitudinal pipeline profile of Y pumping station

있는 사람들에게 공동수도의 형태로 수도물을 공급했으며, 그 당시에는 하루에 12,500톤의 물을 125,000명이 마셨다고 한다. 2002년 현재 서울시 수도물 생산시설 용량은 하루 652만톤이고, 급수인구도 1,028만명에 이르니 수도물 양은 520배 그리고 급수인구수는 약 82배나 증가하였다⁽²⁾.

이와 같이 인구의 도시집중과 산업의 급속한 발전은 필연적으로 생활 및 공업용수의 수요를 급격히 증가시킨다. 1990년 이전 서울에서는 주로 송수펌프장에서 각 가정까지 직접 급수함으로써 수격현상이 크게 문제되지 않았으나, 1990년 이후 상수도시설 기본계획은 시민에게 수도물을 안정적으로 공급하기 위하여 대규모의 배수지를 급수지역 내의 높은 곳에 둬으로써 수격현상에 대한 관심이 고조되었다. 즉, 무단수(無斷水) 급수 체계를 구축하기 위하여 정수장에서 생산된 용수를 송수펌프와 송수관로를 통하여 여러 배수지로 공급하게 되었는데, 이에 따라 대규모 장거리 송수관로에서 발생하는 수격현상이 중요한 문제로 대두된 것이다^(3,4).

본 논문의 연구대상으로는 서울시 구의정수장 수계 용마배수지의 송수펌프장에서 용마 소배수지까지의 송수관로를 선정하였는데, 송수펌프는 소배수지의 수위에 따라 자동으로 온오프(on-off)되게끔 계획 운영되었다. 그러나 송수펌프가 운전 정지될 때 평음 및 배관의 진동이 심각하게 발생하여, 이에 대한 안전대책으로서 압력릴리프밸브(pressure relief valve)를 추가로 설치하였으나 수격작용을 근본적으로 해결해 주지는 못하였다. 그러므로 본 연구에서는 용마 소배수지 방면의 송수펌프장에서 수격현상에 대한 현장시험을 수행하고, 수치해석결과와 비교·분석함으로써 송수펌프장과 송수관로의 신뢰성 및 안전성을 확보하기 위한 검토 자료를 제공함을 목적으로 한다.

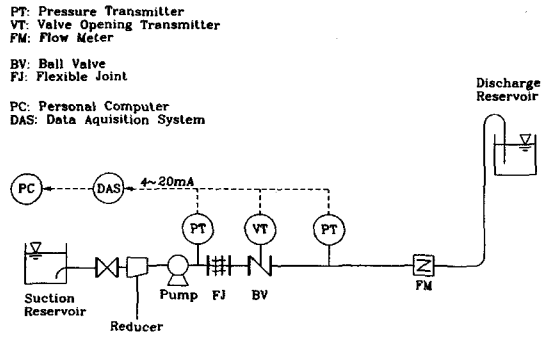


Fig. 2 Schematic diagram of the measuring layout

2. 수격현상 실험

2.1 시스템 구성

용마 배수지 송수펌프장에서 용마 소배수지로 공급하는 용수의 계획설계유량을 18,000 m³/d으로 설정함에 따라 송수펌프장에서 용마 소배수지까지의 펌프-관로 계에 대한 수격현상을 분석하였다. Fig. 1은 펌프장에서 소배수지까지의 관로형상(pipeline profile)을 나타내었는데, 관로 길이는 377m이고, 관경은 0.45m이다. 이 용수량을 공급하기 위해서는 한쪽 흡입 원심펌프 1대가 송수펌프장에서 단독으로 운전되며, 이 펌프가 갑작스런 정전 등으로 긴급 정지되었을 때 발생하는 수격작용이 일반적으로 가장 심각하다. 한편, 펌프장은 설치공간이 협소한 관계로 펌프 토출배관에 제수밸브와 체크밸브를 각각 설치하지 못하고 유압으로 작동하는 제어용 볼밸브(ball valve)만을 설치하였다. 여기서, 본 연구에 사용된 펌프 자료 및 배수지 수위는 다음과 같다.

1) 펌프 설비

- 펌프 설치대수 = 2 sets (1대 예비)
- 정격 양정 = 33m
- 정격 유량 = 12.5m³/min
- 정격 회전속도 = 1,160 rpm (6 pole)
- 전동기 출력 = 110 kW

2) 저수조 수위

- 펌프장 흡수정 저수위(L.W.L) = 69.2m
- 용마 소배수지 고수위(H.W.L) = 96.5m

2.2 실험 장치

수격현상에 대한 현장시험을 수행하기 위하여 구성

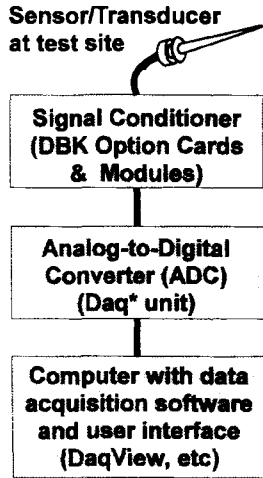


Fig. 3 Block diagram of the data acquisition system

한 계측기의 배치도를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 3은 아날로그-디지털 변환장치(analog-to-digital converter, DaqBook/100)의 블록선도를 나타내었다. 압력전송기 및 밸브개도지시계에서 측정된 전기적인 신호 값은 검사기 (signal conditioner, DBK11A)를 거쳐 아날로그-디지털 변환장치로 전송되고, 수집된 데이터는 노트북 PC에 설치된 DaqView 프로그램을 사용하여 현장에서 실시간으로 확인·분석된 후 저장된다. 한편, 현장시험에 사용된 측정 기기는 본 시스템의 수격현상에 대한 수치해석 결과를 토대로 그 측정 범위가 정해지고, 시간에 따른 반응 속도가 빠른 기기들로 선정되었다. 현장시험은 송수펌프가 정상적으로 기동되는 경우와 정상 또는 비정상 그리고 긴급 정지되는 경우에 대하여 여러 차례 수행되었으며, 이에 대한 수격현상은 전용 전산프로그램인 WHAP⁽⁶⁻⁷⁾를 사용하여 수치해석하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 원심펌프의 정상적인 시동에 따른 수격현상

원심펌프의 정상적인 시동은 전동기의 기동 전류를 최소화하기 위하여 펌프 출구측 밸브를 완전히 닫은 상태에서 펌프를 기동시킨 후 밸브를 서서히 개방하는 방법이 일반적이다^(8,9). 본 시스템의 경우에도 펌프 출구측 볼밸브를 완전히 닫은 상태에서 펌프를 기동시키고, 약 6초 후 볼밸브를 열기 시작하여 4.8초 정도에 밸브를 완전 개방 (full open)하는 기동 방식을 취하였다. 이와 같이 원심펌프가 정상적으로 기동되는 경우

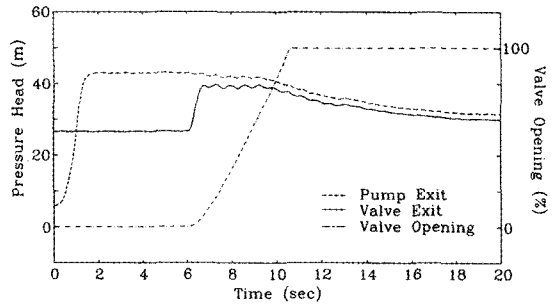


Fig. 4 Waterhammer test results for pump normal start

송수펌프장에서 측정된 압력 변동 및 밸브개도 (valve opening) 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 송수펌프를 기동시키기 전 펌프 흡입구에는 용마 배수지의 수위에 의해 5.97 m의 정압수두 (static pressure head)가, 그리고 송수관에는 용마 소비수지에 의해 26.57 m의 정압수두가 각각 작용하였다. 즉, 펌프 실양정 (static head)을 나타내는 두 배수지의 수위 차는 20.6 m (= 26.57 - 5.97)이다. 펌프·모터를 기동시킨 후 밸브를 개방하기 전까지 원심펌프는 정격양정 (= 33 m)보다 약간 높은 체질양정 (= 37.1 m)에서 운전되었고, 볼밸브를 열기 시작하는 순간 송수관에서 압력수두는 39.2 m까지 상승하였다가 곧바로 30 m로 안정되었으며, 송수펌프도 약 25.4 m에서 운전점이 형성된 것으로 측정되었다. 현장 시험 결과에서 알 수 있듯이 원심펌프의 정상적인 기동 시 송수관로에서의 수격작용은 그다지 우려할 정도가 아닌 것으로 판단된다.

3.2 원심펌프의 운전 정지에 따른 수격현상

3.2.1 펌프를 끈 후 밸브를 닫은 경우

현장시험 당시 송수펌프를 정지시키기 위하여 펌프와 밸브는 제어반에 의해 연동되도록 구성되었는데, 펌프·모터의 전원을 차단하면 약 6초 후 볼밸브가 닫히기 시작하여 8초 동안에 밸브가 완전 폐쇄 (full close) 되는 펌프 정지방법을 택하고 있었다. 이는 다소 비정상적인 방법이며, 원심펌프의 일반적인 운전 정지방법으로 개선할 필요가 있는 것으로 판단된다. 본 시스템의 경우 펌프가 꺼지면 약 3.3초 후 송수펌프장에서 역류 (reverse flow)가 발생하기 시작하는 것으로 예측되었는데, 볼밸브가 완전히 닫히는 시간동안까지 이 역류는 매우 커지게 된다. 이러한 역류에 의해 펌프는 매우 위험한 속도로 역회전을 하게 되며, 볼밸브가 역류를

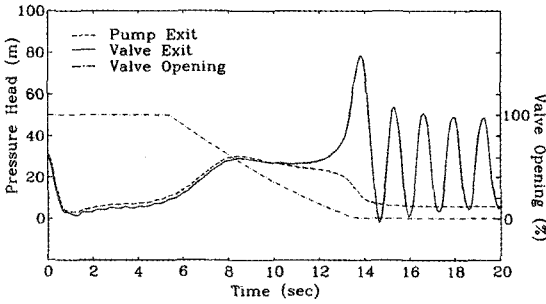


Fig. 5 Waterhammer test results for pump abnormal stop

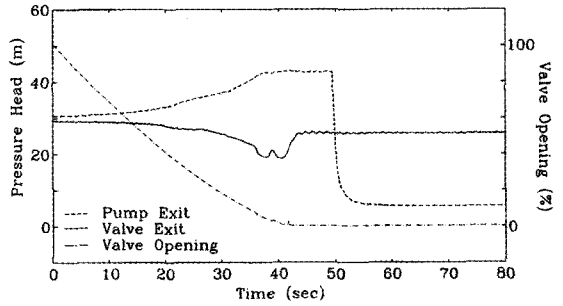


Fig. 7 Waterhammer test results for pump normal stop

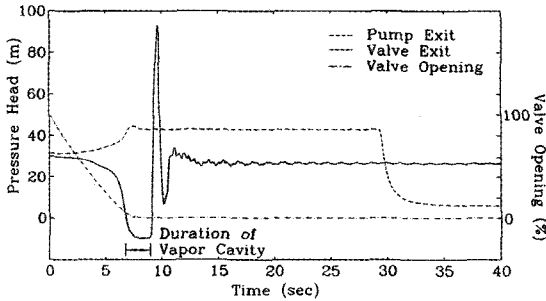


Fig. 6 Waterhammer test results for rapid valve closure

차단하는 과정에서 송수관로에는 과도한 수격작용이 발생할 수 있다. Fig. 5는 당초 운동 방식에 의해 펌프를 정지시킨 경우 송수펌프장에서 측정된 압력 변동 및 밸브개도 변화를 나타내었다. 실제로 송수펌프는 역류에 의해 매우 빠른 속도로 역회전하는 것이 관측되었고, 불밸브가 역류를 완전 차단한 후 송수관내 압력수두는 86m까지 급격히 상승하였다가 -3.8m까지 급강하하는 것으로 측정되었다. 불밸브가 완전 폐쇄된 후 밸브와 소배수지 사이의 송수관로 내 유체는 마치 액체 스프링과 같이 약 1.5초 주기로 서징(surging)을 하고 있으며, 시간이 지남에 따라 압력파는 관로 내 마찰손실에 의해 점차로 소산(dissipation)되고 있음을 알 수 있다.

3.2.2 밸브를 급폐쇄한 후 펌프를 끈 경우

원심펌프의 정상적인 정지방법은 시동방법의 역순으로 진행하는 것이다. 즉, 펌프 출구측 밸브를 서서히 차단한 후 밸브가 완전히 닫힌 상태에서 펌프·모터의 전원을 끄는 것이 일반적인 방법이다. 이 때 밸브를 서서히 차단하는 목적은 관로 내 유속 변화를 가급적 적게 하여, 송수관로에서의 수격작용을 최소화하는데 있다. 본 장에서는 유압기구로 작동되는 불밸브를 비

교적 빠르게 폐쇄시킨 후 펌프·모터의 전원을 차단한 경우 송수관로에서 발생하는 수격현상에 대하여 검토하였다. 펌프 출구측 불밸브가 완전 개방 상태에서 완전히 폐쇄되기까지 걸린 시간이 8초 일 때 현장시험결과 측정된 압력 변동 및 밸브개도 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 펌프가 운전되고 있는 동안 불밸브가 급격히 닫혔기 때문에 펌프 운전양정은 채질점(shut-off point)까지 곧바로 상승하였으나, 송수관내 압력수두는 30m에서 -10m까지 급격히 떨어진 것으로 측정되었다. 즉, 불밸브 하류에서 압력은 물의 포화증기압까지 떨어져 증기 공동(vapor cavity)이 형성되었으며, 부압 발생 시간도 2초 동안이나 지속된 것으로 나타났다. 불밸브가 완전히 닫힌 후 밸브와 소배수지 사이의 송수관로 내 유체는 서징을 하게 되는데, 밸브 하류에 형성되었던 증기공동은 양압력과(positive pressure wave)에 의해 순간적으로 소멸되면서 수격압이 93.2m까지 높게 상승한 것으로 측정되었다. 이러한 과도한 수격압에 의해 실제로 송수관에 설치되었던 압력릴리프밸브가 개방된 점을 고려한다면 수주분리현상(water column separation)에 의한 수격압은 매우 위험한 정도까지 상승하였을 것이라는 사실은 쉽게 짐작할 수 있다.

3.2.3 밸브를 서서히 닫은 후 펌프를 끈 경우

원심펌프를 정상적으로 정지시키기 위해 불밸브의 유압기구를 현장에서 조절하여 밸브가 완전 개방에서 완전 폐쇄까지 걸린 시간을 40초 정도로 조정한 후 수격현상에 관한 실험을 다시 수행하였다. Fig. 7은 펌프를 정상적으로 정지시킨 경우 송수펌프장에서 측정된 압력 변동 및 밸브개도 변화를 나타내었다. 펌프가 운전되고 있는 동안 불밸브가 서서히 닫혔기 때문에 송수관로 내 유속 변화는 완만해졌으며, 이로 인하여 송수관내 압력수두는 29.1m에서 18.9m까지 떨어진 것

로 측정되었다. 볼밸브 하류에서 부압은 발생하지 않았고, 밸브가 완전히 닫힌 후에도 송수관내 압력수두는 26.1m로 소배수지의 정압 정도가 작용하고 있음을 알 수 있다. 볼밸브가 완전히 닫힌 후 유량을 보내지 못하는 펌프는 곧바로 정지시키는 것이 바람직하다. 원심펌프를 정상적으로 정지시킨 경우가 앞의 두 경우보다 수격작용 관점에서 훨씬 유리하기 때문에 향후 중앙제어실 (또는 현장제어반)에서 송수펌프 정지 시 펌프와 밸브의 연동운전은 본 장에서 제시한 방법으로 개선하는 것이 합리적이다.

3.3 원심펌프의 긴급 정지에 따른 수격현상

3.3.1 이상적인 체크밸브를 사용한 경우

정상운전 중인 펌프가 갑작스런 정전 등으로 긴급 정지된 경우 수치해석결과 얻어진 송수관로에서의 업서지 (upsurge)와 다운서지 (downsurge)를 Fig. 1에, 밸브 후단에서의 압력 변동을 Fig. 8에 각각 나타내었다. 여기서 펌프 출구측에는 역류가 발생하는 순간 곧바로 닫히는 이상적인 체크밸브 (ideal check valve)가 설치된 것으로 가정하였다. 펌프는 동력 공급이 중단되어도 아직 펌프와 전동기 회전부의 관성에 의해 계속 돌려고 하나, 그 보유하는 에너지는 물을 보내는데 필요한 에너지로 시간이 지남에 따라 점점 소비되어 펌프의 회전수나 양정 그리고 송출량은 급속히 감소된다. 펌프가 감속해서 발생하는 압력이 송출측의 관로 압력과 일치된 순간에 펌프는 정방향으로 회전하면서 물을 보내지 못하게 되며, 흐름은 약 3.3초 후 일단 정지된다. 유동이 정지한 순간에 이상적인 체크밸브는 닫히므로 펌프는 차단된 물 속에서 회전을 계속하나 차차 에너지를 잃고 나중에는 정지한다. 체크밸브가 닫

힌 순간부터 관로 내 압력수두는 43m까지 상승하고, 밸브와 소배수지 사이의 송수관로 내 유체는 마치 액체 스프링과 같이 약 1.5초 주기($= 4L/a = 4 \times 377m \div 1000 m/s = 1.5s$)로 서징하고 있으며, 시간이 지남에 따라 압력과는 관로 내 마찰손실에 의해 점차 소산된다.

3.3.2 1-스텝 제어용 볼밸브를 사용한 경우

본 시스템을 보호하기 위한 주 설비로는 역류방지 및 유량제어를 동시에 수행할 수 있는 제어용 볼밸브가 선정되었고, 압력릴리프밸브는 제어용 밸브가 잘못 작동했을 경우와 과도한 이상 압력에 대비한 안전설비로서 계획·설치되었다. 이는 관로상에서 수주분리현상이 발생하지 않을 때 압력 상승만을 억제할 목적으로 사용되는 경우 매우 유용한 방안이라 할 수 있다. 일반적으로 펌프 출구측에 어떠한 밸브 (볼밸브, 버터플라이밸브 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 압력 저하는 관로와 펌프에 의해 자동적으로 정해지므로, 밸브제어의 목적은 주로 제2단계 (제동특성범위: 正轉, 逆流) 이 후의 역류를 심하게 증가시키지 않고 천천히 멈추는데 있다.

따라서 이는 관로가 짧고 실양정이 큰 경우에 주로 사용되는 방법이다. Fig. 9는 송수펌프가 긴급 정지된 경우 당초 계획·설치된 유압작동식 볼밸브의 개도변화를 나타내었다. 1-스텝 제어형태로 작동되는 볼밸브는 펌프의 긴급 정지 시 8초 동안 선형적으로 닫히

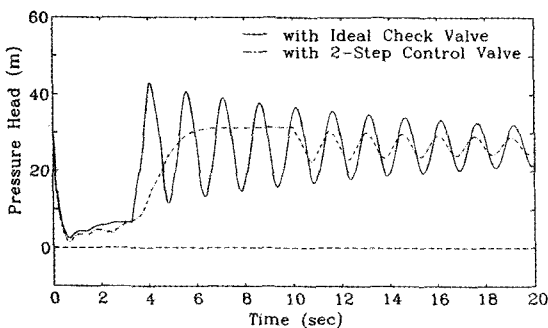


Fig. 8 Predicted pressure head at the exit of valve

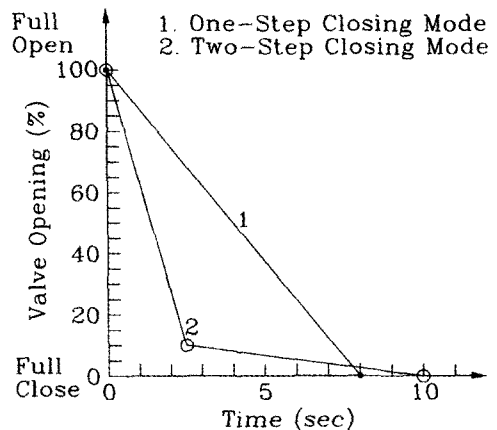


Fig. 9 Closing modes of the control valve after pump trip

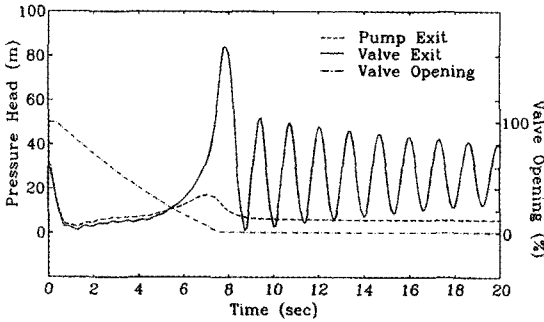


Fig. 10 Waterhammer test results for pump emergency stop

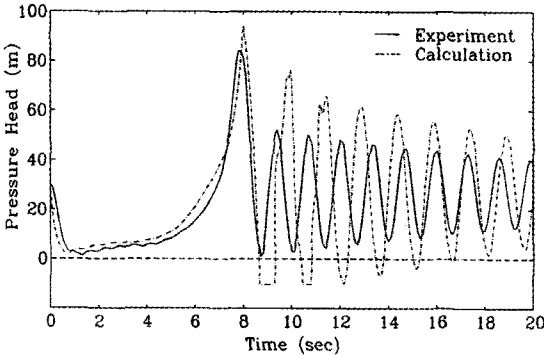


Fig. 11 Comparison of measured and predicted pressure heads for pump emergency stop

도록 이미 세팅된 바 있다. Fig. 10은 펌프가 긴급 정지된 경우 송수펌프장에서 측정된 압력 변동 및 밸브 개도 변화를 나타내었다.

현장시험 시 예측된 값을 토대로 초기조건을 작성한 후 송수펌프가 긴급 정지된 경우에 대하여 수치계산을 수행하였다. 수치해석결과 얻어진 밸브 후단에서의 압력 변동을 측정값과 서로 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 불밸브가 완전히 닫히기 전까지는 수치해석결과와 측정값이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 송수펌프장에서 역류가 발생하는 3.3초 후에도 불밸브는 50% 이상 개방된 상태이기 때문에 이 후 역류는 상당히 커졌고 이에 따라 펌프도 매우 빠른 속도로 역회전을 일으킨 것이 관측되었다. 이렇게 발달된 역류를 급격히 차단함으로써 송수관에서 압력수두는 84.2m까지 상승한 것으로 측정되었는데, 수치계산결과는 측정값보다 더욱 높게 수격압을 예측하고 있다. 또한, 밸브가 완전히 닫힌 후 송수관내 압력은 대기압 가까이 떨어진 것으로 측정되었으나, 수치계산은 증기공동이 발생하는 정도까지 저하된 것으로 나타났다. 이는 송수펌프장의 안전설비로서 설치한 압력릴리프밸브가

실제로 개방되어, 업서지 및 다운서지가 어느 정도 감소한데 기인된 것으로 판단된다. 그리고 수치계산결과는 밸브가 닫힌 후 밸브 하류에서 증기공동이 발생하였기 때문에 수격현상의 주기도 실제보다 약간 길어진 형태를 보이고 있다.

3.3.3 2-스텝 제어용 불밸브를 사용한 경우

제어용 밸브는 제 1 단계에서 대부분을 폐쇄하고 제 2 단계에서 나머지 밸브개도를 서서히 닫는 것이 합리적이므로, Fig. 9에 나타낸 바와 같은 2-스텝 제어형태를 제시하였다. 즉, 1단계에서 밸브개도를 2.5초 이내에 10%까지 급속히 폐쇄하고, 나머지 10% 개도를 10초에 완전히 닫았을 경우의 전형적인 예를 나타내었다. 송수관로상에서 역류발생시간은 배수지의 수위와 펌프의 운전유량 등에 따라 달라진다. 현장시험조건을 기준으로 했을 때 역류는 3.3초에 발생하는 것으로 예측되었으므로, 제 1 단계 밸브폐쇄시간은 2.5초로 결정하였다. 수치계산결과 얻어진 밸브 출구에서의 압력 변동을 Fig. 8에 나타내었다. 제어용 밸브는 밸브개도를 제어하기 위해 유압기구를 사용하며 일정한 개도 범위에서 닫히는 속도를 제어함으로써 역류를 허용하고 이 역류량을 점차 감소시켜 수격압을 완화시킨다. 불밸브의 유압기구를 본 연구에서 제시한 2-스텝 제어 형태로 변경하는 경우 송수펌프의 긴급 정지 시에도 수격압은 정상상태 압력을 약간 상회하는 정도 즉, 31.7m까지 상승하는 것으로 예측되었으므로, 향후 이를 개선한다면 시스템의 안전성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

용마 배수지 송수펌프장에서 고지대에 있는 용마소 배수지까지의 송수관로에 대한 수격현상 현장시험을 수행하고, 수치해석결과와 비교·분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 현장시험 당시 송수펌프를 정지시키기 위하여 펌프와 밸브는 제어반에 의해 연동되도록 구성되었는데, 펌프·모터의 전원을 차단하면 약 6초 후 불밸브가 닫히기 시작하여 8초 동안에 밸브가 완전 폐쇄되는 펌프 정지방법을 택하고 있었다. 이는 다소 비정상적인 방법이며, 원심펌프의 일반

적인 운전 정지방법으로 개선할 필요가 있는 것으로 판단된다. 즉, 펌프 출구측 밸브를 서서히 차단한 후 밸브가 완전히 닫힌 상태에서 펌프·모터의 전원을 끄는 것이 바람직하며, 이 때 밸브를 서서히 차단하는 목적은 관로 내 유속 변화를 가급적 적게 하여 송수관로에서의 수격작용을 최소화하는데 있음에 유의하여야 한다. 따라서 본 시스템의 경우 볼밸브 유압기구용 밸브가 완전 개방에서 완전 폐쇄까지 걸린 시간을 40초 정도로 현장에서 재조정하는 것이 합리적이다. 또한, 원심펌프의 정상적인 기동 시 송수관로에서의 수격작용은 그다지 우려할 정도가 아닌 것으로 실험결과 확인되었다.

- 2) 송수펌프의 긴급 정지 시 당초 설치된 볼밸브는 1-스텝 제어형태로 작동되어 8초 동안 선형적으로 닫히도록 이미 세팅되었다. 이에 따라 송수펌프장에서 역류가 발생하는 3.3초 후에도 볼밸브는 50% 이상 개방된 상태이기 때문에 이 후 역류는 상당히 커졌고 이에 따라 펌프도 매우 빠른 속도로 역회전을 일으킨 것이 관측되었다. 이렇게 발달된 역류를 급격히 차단함으로써 송수관에서 압력수두는 84.2m까지 매우 높게 상승한 것으로 측정되었다. 볼밸브의 유압기구를 본 연구에서 제안한 2-스텝 제어 형태로 변경하는 경우 송수펌프의 긴급 정지 시에도 수격압은 정상상태 압력을 약간 상회하는 정도 즉, 31.7m까지 상승하는 것으로 예측되었으므로, 향후 이를 개선한다면 시스템의 안전성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 서울특별시 상수도사업본부의 도움과 서광공업(주) 및 효성EBARA(주)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 한국수자원공사, 2003, 물과 미래.
- (2) 서울특별시 상수도사업본부, 2002, 서울시 상수도 통계연보.
- (3) 김점배, 2003, “상수도 펌프관로 수충격 완화대책에 관한 실험연구,” 서울시립대학교 산업대학원 석사학위논문.
- (4) 김문현, 2002, “에어챔버가 설치된 펌프장의 수격현상 현장시험,” 한국산업기술대학교 산업기술대학원 석사학위논문.
- (5) 김경엽, 유택인, 2000, “궤당 취수펌프장의 수격현상에 관한 수치해석적 연구,” 유체기계저널, 제3권, 제4호, pp. 52~58.
- (6) 김경엽, 오상현, 2001, “펌프제어밸브를 사용한 취수펌프장에서의 수격현상,” 유체기계저널, 제4권, 제4호, pp. 16~21.
- (7) 김경엽, 2002, “에어챔버가 설치된 송수관로에서의 수격현상,” 대한기계학회논문집 B권, 제26권, 제2호, pp. 177~183.
- (8) 김경엽, 박한영, 2003, 펌프핸드북, 동명사.
- (9) Sanks, R. L., 1998, Pumping Station Design, 2nd ed., Butterworth-Heinemann.