

에어챔버가 설치된 송수관로에서의 수격현상

김 경 업*

(2000년 11월 2일 접수, 2001년 12월 3일 심사완료)

Waterhammer in the Transmission Pipeline with an Air Chamber

Kyung-Yup Kim

Key Words: Waterhammer(수격현상), Pump Pipeline System(펌프관로계), Air Chamber(에어챔버), Design Parameter(설계인자), Field Test(현장시험)

Abstract

The field tests on the waterhammer were carried out in the pump pipeline system with an air chamber. The effects of the input variables and the design parameters for the air chamber were investigated by both the numerical calculations and the experiments. Because the waterhammer problems as a result of the pump power failure were the most important, these situations were carefully studied. Among the input variables used in the waterhammer analysis, the polytropic exponent, the discharge coefficient and the wavespeed had influence on the simulated results in that order, and were calibrated in comparison with the experimental results. As the initial air volume in a vessel increased, the period of waterhammer increased and the pressure variation decreased, resulting from the reduction of the rate of pressure change in the air chamber. Using smaller orifice in the bypass pipe, the pressure rise was suppressed in some degree and the pressure surge was dissipated more rapidly as time passed. The simulations were in fairly good agreement with the measured values until 1~2 periods of waterhammer. Not only the maximum and minimum pressures in the pipeline but also those occurring times were reasonably predicted. The computer program developed in this study will be useful in designing the optimum parameters of an air chamber for the real pump pipeline system.

기호설명

a : 압력과 전파속도[m/s]
 C_d : 유량계수
 D : 관 직경[m]
 D_{orf} : 오리피스 내경[mm]
 f : Darcy의 마찰계수
 H_o : 펌프 양정[m]
 L : 관로 길이[m]
 N : 펌프 회전수[rpm]
 n : 폴리트로프 지수

Q_o : 펌프 유량[m³/s]
 V_t : 에어챔버의 총체적[m³]
 V_{air}^{*} : 에어챔버내 초기공기체적[m³]
 WR² : 펌프, 모터의 관성모멘트[kg·m²]

1. 서론

최근에는 펌프장이 대형화되고 대구경 장거리 관로로 유체를 수송하는 계통이 점차 복잡해짐에 따라 수격현상이 보다 심각한 문제가 되고 있다. 정지하고 있는 펌프를 기동시키거나 정상운전 중 정전으로 인하여 갑자기 동력을 잃게 될 때 또는 밸브의 개도를 빠르게 변화시킬 때 그 순간 송수관로내의 유속이 급격히 변하면 압력도 크게 상

* 회원, 한국산업기술대학교 기계공학과
 E-mail : kykim@kpu.ac.kr
 TEL : (031)496-8205 FAX : (031)496-8219

승하거나 강하하게 되어 심한 수격작용을 일으키게 된다. 관로내의 갑작스런 유속변화로 압력과 펌프장과 배수지 사이를 왕복할 때 송수관로내의 압력은 관로형상에 따라 물의 포화증기압 이하로 떨어져 증기공동(vapor cavity)이 형성되며, 결국 수주분리현상(column separation)이 발생한다. 관로내의 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴(collapse)이 일어날 수 있으며, 증기공동으로 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 송수관로가 파손될 염려가 있다. 물이 역류하는 동안에는 펌프장 구내 배관의 압력이 비정상적으로 상승하여 펌프나 밸브류, 배관 및 부대시설 등이 파열되어 펌프장 침수사고가 발생하기도 한다.⁽¹⁾

펌프관로계에서 수격작용을 완화시키는 장치로는 주로 에어챔버, 서지탱크, 서지릴리프밸브, 공기밸브, 펌프제어밸브 등이 사용되는데, 이러한 설비들은 용수량, 관로 길이 및 형상, 설치장소 등에 따라 경제성과 신뢰성을 고려하여 적절히 설계되어야 한다.⁽²⁾ 에어챔버는 압력용기내에 적절한 양의 액체와 그 위에 가압된 공기나 기체를 저장해 두어 관로내의 압력이 떨어질 때 관로에 액체를 공급하여 수주분리현상이 발생하지 않도록 하고, 압력이 급격히 상승하는 것도 효과적으로 억제해준다. 또한 에어챔버는 압력파에 대한 속응성이 뛰어나 어떠한 압력변동에도 즉시 반응하며, 시스템의 안정성을 크게 향상시키는 장치이다. 이러한 이유로 에어챔버는 펌프장의 수격 완화장치로서 그 사용이 점차 증가하는 추세에 있다.⁽³⁻⁵⁾

본 연구에서는 에어챔버가 설치된 펌프관로계에서 수격현상에 대한 현장시험(field test)을 수행하고, 에어챔버의 입력변수 및 설계인자가 수격현상에 어떠한 영향을 미치는지 수치계산과 실험을 통하여 조사하였다. 수격현상 실험은 에어챔버의 설계인자인 초기공기체적과 오리피스 내경을 바꾸어 가며 수행하였고, 수치계산시 입력변수로 사용되는 폴리트로프 지수, 오리피스 유량계수 그리고 압력과 전파속도의 영향은 수치해석 결과와 측정값을 서로 비교·분석하여 조사하였다. 여기서 검증된 전산프로그램^(6,7)과 최적의 설계변수들은 추후 건설될 펌프장의 신뢰성 및 안정성 확보를 위한 에어챔버의 기본 또는 상세설계시 매우 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

2. 수격현상 실험

2.1 시스템 구성

본 연구를 위한 펌프관로계는 4단계 수도권 광역상수도 사업의 일환으로 완공된 가압펌프장을 선정하였는데, 이 송수시설 계통은 9,720 m³/일의 용수를 공급하도록 운영되고 있으나 펌프장 및 송수관로는 장래 확장을 고려하여 20,000 m³/일 시설용량에 맞추어 설치되었다. 용수는 양쪽흡입 원심펌프에 의해 관경 500mm, 총연장 3,880m의 단순관로를 거쳐 배수지로 공급된다. 정상운전 중인 펌프가 갑작스런 정전으로 트립(trip)되었을 때 발생하는 수격작용이 가장 심각하므로 이에 대한 수치계산을 에어챔버가 설치되어 있는 경우와 없는 경우 각각에 대하여 수행하였다. 이 때 송수관로에 작용하는 최대·최소압력을 Fig. 1에 가압장에서의 시간에 따른 압력변동을 Fig. 2에

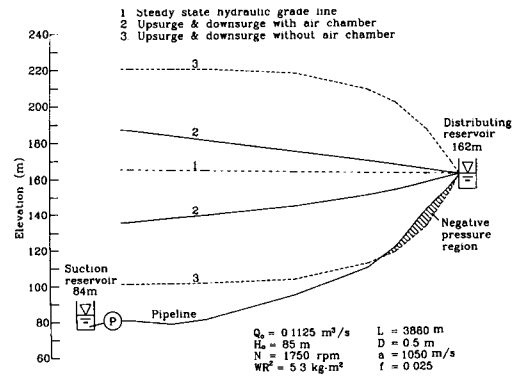


Fig. 1 Longitudinal pipeline profile of YongIn booster pump-pipeline system

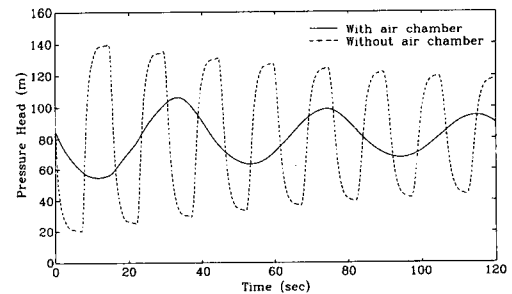


Fig. 2 Predicted pressure head vs. time at booster pumping station with and without air chamber after power failure

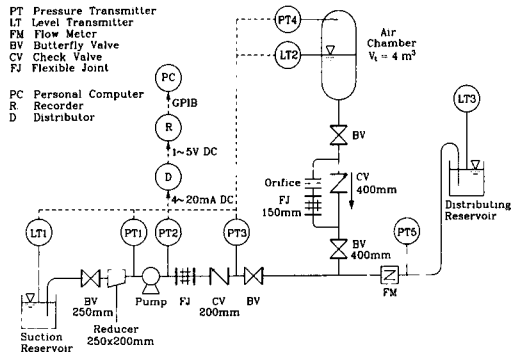


Fig. 3 Schematic diagram of booster pumping station and measuring layout

각각 나타내었다. 가압장에 에어 챔버가 설치되어 있지 않은 경우 송수관로 말단 지역에서 부압(負壓)이 발생하며, 압력상승도 상당히 높다. 이러한 수격작용을 완화시켜주기 위하여 가압장에 에어 챔버를 설치하였다.

2.2 실험장치 및 방법

본 수격현상 실험은 4단계 가압펌프 2대 중 1대만을 대상으로 실시하였으며, 각 측정기기는 Fig. 3과 같이 설치하였다. 각각의 압력계 및 수위계의 신호는 케이블을 통하여 분배기(distributor)에 도달되며, 분배기를 통한 신호는 기록계(pen-recorder)에 기록됨과 동시에 기록계의 입력자료는 GPIB를 통하여 컴퓨터에 전송된다. 컴퓨터에 전송된 신호는 디지털 변환기(digital converter)에 의해서 미리 짜여진 프로그램에 의해 1초에 한번씩 디지털 데이터로 자동 저장되어 실험 완료 후 수격현상 분석용 자료로서 활용하였다.

수격현상 실험은 에어 챔버의 설계인자인 초기 공기체적과 오리피스 내경을 바꾸어가며 수행하였는데, 우선 에어 챔버 측관(bypass pipe, 직경: 150mm)에 설치된 오리피스의 내경을 110mm로 고정시키고, 에어 챔버내 초기공기체적을 각각 1.4, 2.0, 2.6m³(정확한 값은 1.349, 1.973, 2.585m³임)로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 그리고 에어 챔버내 초기공기체적이 2.0m³일 때, 오리피스 내경을 90, 110, 125mm 3단계로 바꾸어가며 실험하였다.

에어 챔버의 기능을 유지시켜주기 위한 압축기 제어 주요 부위를 Fig. 4에 나타내었다. 정상상태 운전시 에어 챔버내 압축공기는 적당한 양이 유지

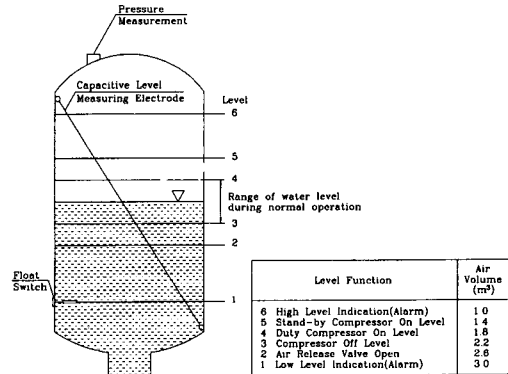


Fig. 4 Principal arrangement of an air chamber

될 수 있도록 제어반에 의해 자동 제어된다. 초기상태의 공기의 양이 부족하면 압력강하율이 지나치게 빨라서 에어 챔버의 역할을 제대로 못하게 되며, 초기공기체적이 너무 크면 압축공기가 과다 팽창하여 관로로 유입될 염려가 있다. 또한 본 시스템에서는 송수관로상에서의 부압 발생을 보다 효과적으로 방지하고 이차적인 상승압을 더욱 줄이기 위하여 에어 챔버와 주관로 사이의 연결관에 체크밸브를 설치하고 측관과 오리피스를 부착하였다.

3. 수치해석과 실험결과의 비교·검토

관내의 비정상 유동을 1차원으로 가정할 때 지배방정식은 운동방정식과 연속방정식이며, 편미분으로 표시되는 지배방정식은 특성곡선법을 사용하여 유한차분방정식으로 변환시킬 수 있다.⁽⁸⁾ 경계조건으로는 펌프, 밸브, 에어 챔버, 저수지 등이 관로 중에 연결되어 있는 경우에 대하여 관계식들을 구성하고, 초기조건으로 펌프관로계의 정상상태 변수값을 구한 후 수치해석의 안정성이 만족되도록 시간증분, Δt 과 관 분할간격, Δx 을 정하여 수치계산하였다. 가압펌프의 정상운전시 현장에서 측정된 조건들을 수치계산의 초기조건과 일치시켰으며, 수격현상 실험에서 얻어진 측정값들을 다음과 같이 수치계산 결과와 비교·검토하였다.

3.1 폴리트로프 지수의 영향

에어 챔버내 압축공기는 팽창·수축에 따라 폴리트로프 과정을 겪는다.⁽⁹⁾ 일반적으로 폴리트로프

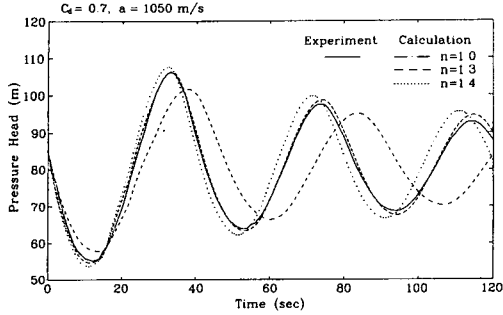


Fig. 5 Effect of varying polytropic exponent on pressure head at pump exit for $V_{air}^*=2.0 \text{ m}^3$, $D_{orf}=110\text{mm}$

지수는 1.2로 가정하여 수치계산에 사용되는데, 이를 1.0(등온)에서 1.4(단열)로 변화시켜가며 실험결과와 비교하였다. 에어챔버내 초기공기체적은 2.0m^3 이고, 오리피스 내경은 110mm이며, 오리피스 유량계수는 0.7, 압력과 전파속도는 1050m/s로 하였다. 펌프출구측 체크밸브 직후(PT3)에서의 압력변동을 측정값과 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 에어챔버로부터 관로로 물이 유출될 때 등온과정을 겪는 압축공기는 단열과정보다 과다 팽창되어 물이 더욱 많이 유출되지만 압력강하율은 더욱 낮아져 결국 수격현상의 주기는 증가하고 압력변화는 감소한다. 수치계산에 사용된 폴리트로프 지수는 시간에 관계없이 단열과정에 가까운 1.3으로 하였을 때 측정된 압력변동을 잘 묘사해 주고 있다.

3.2 오리피스 유량계수의 영향

관로내 압력이 떨어질 때 에어챔버로부터 구경 400mm의 체크밸브를 통하여 충분한 양의 물이 관로로 공급되고, 압력상승시 역류되는 물은 직경 150mm의 측관을 통하여 에어챔버로 유입된다. 물의 역류시 상승압을 완화시켜주기 위하여 측관에 내경 110mm의 오리피스를 설치하였다. 이러한 연결관은 에어챔버의 작동에 중요한 역할을 하는데, 연결관의 유량계수를 각각 0.5, 0.7, 0.9(손실계수 3.0, 1.0, 0.2에 해당함)로 변화시켜가면서 수치계산을 수행하여 실험결과와 비교하였다. 이 때 에어챔버내 초기공기체적은 2.0m^3 , 폴리트로프 지수는 1.3 그리고 압력과 전파속도는 1050m/s로 하였다. 펌프 출구측에서의 압력변동을 Fig. 6에 나타내었는데, 첫번째 주기의 압력

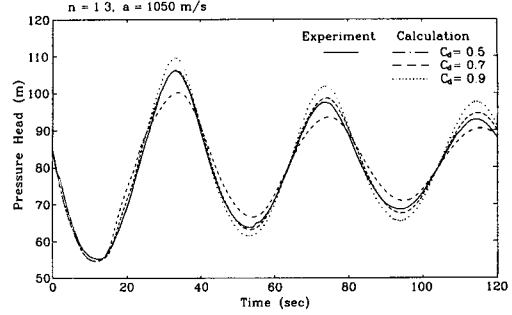


Fig. 6 Effect of varying discharge coefficient of orifice on pressure head at pump exit for $V_{air}^*=2.0\text{m}^3$, $D_{orf}=110\text{mm}$

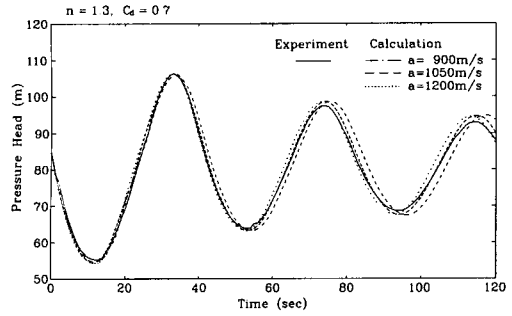


Fig. 7 Effect of varying wavespeed on pressure head at pump exit for $V_{air}^*=2.0\text{m}^3$, $D_{orf}=110\text{mm}$

강하시 유량계수에 따른 압력변동은 별 차이가 없으나, 역류에 의한 최대압력은 유량계수가 커짐에 따라 증가하고 있다. 수격현상의 주기는 유량계수에 관계없이 일정하고, 계산된 압력변동은 유량계수가 0.7일 때 측정값과 가장 잘 일치한다.

3.3 압력과 전파속도의 영향

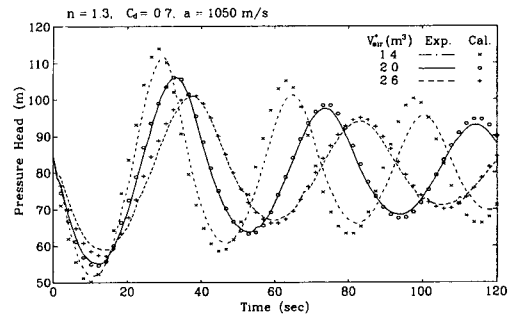
압력파의 전파속도는 유체의 체적탄성계수, 유체의 밀도, 관재질의 종탄성계수, 관의 내경, 관벽의 두께 그리고 관로의 구속계수에 대한 식으로 표시된다.⁽¹⁰⁾ 일반적으로 관의 내경이 클수록 관두께에 대한 내경의 비가 커지므로 압력파의 전파속도는 느려진다. 또한 관로내에 국부적으로 갇힌 공기나 펌프 흡입구를 통해 유입된 공기 그리고 액체로부터 방출된 공기 등은 압력파의 전파속도를 크게 감소시킨다. 이론식으로부터 얻어진 압력파의 전파속도는 1050m/s이며, 이를 $\pm 15\%$ 범위에서 변화시켜 수치계산을 수행하였다. Fig.7

은 PT3에서의 압력변동을 계산된 결과와 측정값을 서로 비교하여 나타내었는데, 압력과 전파속도가 커질수록 수격현상의 주기는 감소하나 펌프 출구측에서의 최대·최소압력은 거의 일정함을 알 수 있다. 한편, 수격작용의 주기가 계속됨에 따라서 계산된 압력변동은 측정값보다 더욱 천천히 감쇄하는데 이는 과도상태의 수치계산시 관로의 마찰손실계수를 정상상태의 값으로 일정하게 가정하였기 때문이다. 그러나 수격현상의 1~2 주기까지는 두 결과가 비교적 잘 일치하며, 수치계산은 펌프관로계에 작용하는 최대·최소압력 및 과도특성을 합리적으로 예측하고 있다.

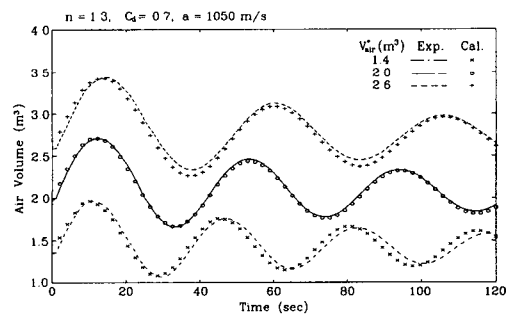
3.4 챔버내 초기공기체적에 따른 비교·검토

Fig. 4에 나타난 바와 같이 에어챔버내 수면이 Level 2와 Level 5 사이에서 변하는 경우, 수치계산을 수행하여 실험결과와 비교하였다. 이 때 에어챔버내 초기공기체적은 각각 1.4, 2.0, 2.6m³(정확한 값은 1.349, 1.973, 2.585m³임)이며, 주요 입력변수인 폴리트로프 지수, 오리피스 유량계수, 압력과 전파속도 그리고 오리피스 내경은 각각 1.3, 0.7, 1050m/s, 110mm로 하였다. 수치계산과 실험으로부터 얻어진 펌프출구측 압력변동을 Fig. 8(a)에, 에어챔버내 압축공기의 체적변화를 Fig. 8(b)에 각각 나타내었다. 에어챔버내 초기공기체적이 증가하면 압축공기의 압력변화율이 작아지기 때문에 에어챔버와 관로 사이의 물의 출입량은 더욱 증가한다. 따라서 수격현상의 주기는 길어지고, 관로내 압력변화는 감소한다. 최대·최소압력 및 공기체적 그리고 그 발생시간을 서로 비교하여 Table 1에 나타내었다. 수치계산결과 얻어

진 압축공기의 최대체적은 3.422m³이며, 에어챔버의 총체적은 안전율(15%)을 고려하여 4.0m³로 결정된 후 설치되었다. 수치계산은 과도특성값을 약 5% 이내의 오차로 잘 예측하고 있으며, 개발된 전산프로그램은 실제 펌프관로계에 대한 수격완화장치를 설계하는데 매우 유용하게 사용될 것



(a) pressure head at pump exit



(b) air volume in air chamber

Fig. 8 Comparison of measured and predicted results for D_{orif}=110mm with initial air volume

Table 1 Comparison of measured and predicted pressure head, air volume and its occurring time with initial air volume

	Initial Air Volume (m ³)	Min. Pressure Head (m)	Max. Air Volume (m ³)	Occurring Time (sec)	Max. Pressure Head (m)	Min. Air Volume (m ³)	Occurring Time (sec)
Exp.	1.4	51.9	1.965	11	111.6	1.067	30
	2.0	55.2	2.701	12	106.2	1.662	33
	2.6	59.1	3.437	14	101.0	2.335	38
Cal.	1.4	50.2	1.963	9.7	114.0	1.082	28.2
	2.0	54.6	2.704	11.6	106.3	1.666	33.4
	2.6	57.4	3.422	13.6	101.4	2.261	37.5

으로 판단된다.

3.5 오리피스 내경에 따른 비교·검토

수격작용에 의한 상승압을 줄이기 위해서는 관로에서 에어챔버로 유입되는 저항손실을 크게 해야 효과적이다. 그러나 유동 단면적을 너무 적게 하면 유입관에서의 유속이 매우 빨라져 배관의 진동 및 캐비테이션 발생의 위험성이 높아지므로 주의해야 만 한다. 직경 150mm의 측관에 설치된 오리피스 내경을 90, 110, 125mm로 바꾸어 가며 수치계산을 수행한 후 실험결과와 서로 비교·검토하였다. 펌프출구측 압력변동을 Fig. 9에 나타내었는데, 오리피스 내경을 줄임으로써 상승압은 상당히 완화되었으며 시간이 지남에 따라 수격작용도 보다 빨리 감쇄된다. Table 2는 최대·최소 압력 및 공기체적 그리고 그 발생시간을 서로 비교하여 나타내었다. 첫번째 주기의 최소압력과 수격현상의 주기는 그다지 변하고 있지 않으나,

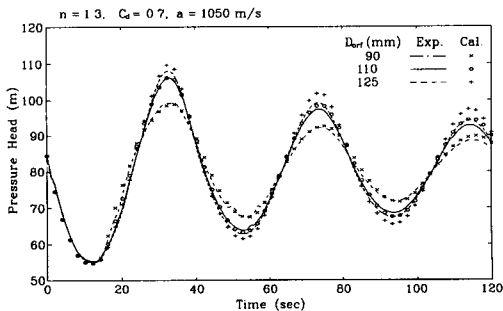


Fig. 9 Comparison of measured and predicted pressure head at pump exit for $V_{air}^* = 2.0 \text{ m}^3$ with orifice diameter

Table 2 Comparison of measured and predicted pressure head, air volume and its occurring time with orifice diameter

	Orifice Inner Dia. (mm)	Min. Pressure Head (m)	Max. Air Volume (m^3)	Occurring Time (sec)	Max. Pressure Head (m)	Min. Air Volume (m^3)	Occurring Time (sec)
Exp.	90	55.2	2.673	12	99.3	1.731	34
	110	55.2	2.701	12	106.2	1.662	33
	125	55.0	2.689	12	108.0	1.633	33
Cal.	90	54.6	2.704	11.6	99.0	1.757	34.2
	110	54.6	2.704	11.6	106.3	1.666	33.4
	125	54.6	2.704	11.6	109.8	1.627	33.1

오리피스 내경을 125mm에서 90mm로 줄임으로써 가압장에 작용하는 최대압력은 약 1.0 kg/cm^2 정도 감소하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 에어챔버가 설치된 펌프관로계에서 수격현상에 대한 현장 시험을 실시하고, 에어챔버의 입력변수 및 설계인자가 수격현상에 어떠한 영향을 미치는지 수치계산과 실험을 통하여 조사한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수치계산에 사용된 입력변수 중 폴리트로프 지수, 오리피스 유량계수, 압력과 전파속도 순으로 수격현상에 대한 영향이 크게 나타났으며, 수치계산은 이 변수값들이 각각 1.3, 0.7, 1050m/s일 때 측정된 압력변동 및 공기체적변화를 가장 잘 모사하였다.

(2) 에어챔버내 초기공기체적이 증가하면 압축공기의 압력변화율이 작아지기 때문에 수격현상의 주기는 길어지고, 관로내 압력변화는 감소하였다. 측관에 설치한 오리피스 내경을 줄임으로써 상승압은 상당히 완화되었으며, 시간이 지남에 따라 수격작용도 보다 빨리 감쇄되었다. 수치계산결과는 수격현상의 1~2 주기까지 측정값과 비교적 잘 일치하였으며, 펌프관로계에 작용하는 최대·최소압력 및 그 발생시간도 합리적으로 예측되었다.

(3) 수치계산은 측정된 과도특성 값들을 약 5% 이내의 오차로 예측하였으며, 개발된 전산프로그램은 펌프관로계에 대한 수격완화장치를 설계하는데 매우 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) 한국수자원공사, 1994, "펌프장설비 신뢰성 향상방안 연구," 수자원연구소 보고서.
- (2) 환경부, 1997, 상수도 시설기준, 한국수도협회.
- (3) Falconer, R. H., Banks, W., and Ellis, J., 1983, "Surge Pressures at Riding Mill Pumping Station: Actual Values and Theoretical Predictions," *4th International Conference on Pressure Surges*, BHRA Fluid Engineering, Bath, England.
- (4) Sanks, R.L., 1998, *Pumping Station Design*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann.
- (5) 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.
- (6) 김경엽, 1986, "수격현상 계산에 의한 펌프장 에어챔버의 설계도표 개선 및 응용," 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- (7) 김경엽, 오상현, 이영범, 1998, "광역상수도 펌프관로 시스템에 대한 수격현상의 수치해석," 유체기계공업학회 1998 강연회 및 연구개발 발표회 논문집, pp. 193~202.
- (8) Wylie, E. B., Streeter, V. L., 1993, *Fluid Transients in Systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- (9) Graze, H. R., 1971, "discussion of Pressure Surge Attenuation Utilizing an Air Chamber," by Wood, D. J., *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 97, pp.455~459.
- (10) Hodgson, J. E., 1983, "Pipeline Celerities," M.S. Thesis, University of Alberta, Alberta.