

단순 급수관로계내의 에어챔버 및 어레스터의 수격방지효과에 관한 실험적연구

An Experimental Study on the Effect of Water Hammer Arresters and Air Chambers in a Simple Water Piping System

한 화 택*, 김 중 만**
H. Han, J. M. Kim

Key words : Water hammer(수격), Arrester(어레스터), Air chamber(에어챔버), Experiment(실험), Piping(관로), Valve(밸브)

Abstract

Water hammer pressure waves were measured in a simplified water piping system with and without arresters and air chambers by the operations of the solenoid valve. Experiments were performed to investigate the effects of the location of the arresters and the effects of the volume of the air chambers on maximum and minimum water hammer pressures and wave frequency for various flow rates.

1. 서 론

배관내의 정상적인 유체 흐름이 급격한 밸브 개폐나 펌프의 가동 및 정지등에 의하여 운동상태에 갑작스러운 변화가 발생하면 유체의 운동에너지가 압력에너지로 변화하여 배관내에 급격한 압력상승이 일어나고 이때 발생하는 상승압력은 압력파가 되어 관로 사이를 왕복하면서 점차 감쇠되어 간다. 이러한 현상을 수격(water hammer)현상이라 하고 이때의 상승된 압력을 수격압이라고 한다.⁽¹⁾ 수격현상은 주로 대형 송유관이나 지역급수 관로 그리고 대형 플랜트 설비내에서 전력공급 중단에 의한 펌프의 급작스러운 정지등에 의하여 발생하는

과도현상을 예측하고 해석하기 위하여 연구되기 시작하였고 요즘에도 이에 대한 연구가 계속 진행되고 있다.⁽²⁾ 최근 건축물이 대형화되고 고층화됨에 따라 전체적인 건축배관의 길이가 상당히 길어지고 있으며, 배관내의 자동 또는 수동 밸브들이 빠른 작동 속도를 갖는 것이 많이 사용되고 있기 때문에 건축물배관내에서도 수격현상이 빈발하고 있어 이에 따른 진동이나 소음문제가 매우 심각한 것으로 보고되고 있다.⁽³⁾

관로 말단의 밸브를 급폐쇄 할 경우 압력파가 왕복함에 따른 배관계의 변화는 관과 관이음쇠 접합부를 파손시키거나 누수를 발생시키는 외에도 배관계통의 각종 밸브류, 계량기, 계기류 및 장비류를 조기에 파손시키거나 수명을 단축시키며 배관에 진동과 소음을 발생시킨다. 이러한 수격작용을 방지하기 위하여 급수관로계에 있어서 보다 합리적인

* 정희원, 국민대학교 기계공학부

** 한국전력

관로설계와 수격방지 장치의 사용이 요구되고 있다. 현재 PDI나 ANSI등의 권장규격에 따라 급수, 급탕관에서 수격발생원 인접한 곳에 에어챔버나 어레스터를 설치하고 있다.^{(4), (5)} 건축배관에서 수격현상에 관한 연구로는 高橋紀行⁽⁶⁾에 의한 중력식 급수배관에서 수격방지를 위한 해석적 연구가 있다. 국내에서는 강신행등⁽⁷⁾에 의하여 수충격 완화를 위한 공기챔버의 설계 및 성능예측을 위한 해석적 연구가 수행된 바 있다. 그러한 이러한 수격방지 장치의 배관내 설치에 따른 실제적인 효과에 관한 실험적 연구는 그리 많지 않다.⁽⁸⁾ 따라서 본 연구에서는 공기실 체적과 노즐의 단면적이 다르게 제작된 에어챔버와 이미 표준화 되어 있는 워터햄머 어레스터를 단순화된 급수관로 실험장치에 도입하여 수격방지의 설치 전후와 설치방법 및 설치개소에 따른 최대수격압 및 수격파형에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 실험장치는 고가수조를 이용하는 중력식 급수관로계를 모델로 하여 설계 제작되었다. 실험장치는 Fig.1에서와 같이 수조, 일반배관부, 계측장비

부 및 수격방지장치등으로 구성되어 있다.

수조는 실험시 일반배관부에 상시 일정수두의 물을 공급하고 실제 건축배관의 급수탱크역할을 하는 것으로 지름 1.05m, 높이 1.24m의 FRP(Fiber glass Reinforced Polyester) 재질의 원통형 탱크이다. 일반배관부는 그림에서와 같이 수격현상을 발생하게 하는 단순한 형태를 갖추고 있으며 건물 옥상에 설치된 수조와 수직배관 및 수평배관, 그리고 말단 밸브 등으로 구성되어 있다. 실험장치에 사용된 수평배관은 외경 34.0mm, 두께 3.25mm의 강관으로서 배관의 길이는 32.3m이다. 수직배관은 외경 60.5mm, 두께 3.65mm의 강관으로서 배관의 길이는 10.2m이다. 관내 유량의 조절은 수평배관 말단에 설치된 글로브밸브(globe valve; $\phi 25$ mm)를 사용하였다. 수격현상의 발생을 위하여 개폐속도가 일정하고 빠른 솔레노이드 밸브(solenoid valve; $\phi 25$ mm)를 사용하였다. 전기동작에 의한 솔레노이드 밸브의 개폐 속도는 0.05초로서 수격파가 관로의 양단을 왕복하는 시간보다 빠르다. 계측장비부는 압력센서(pressure transducer; PDCR 922), 용적식 수량계(water flow meter), 그리고 디지털 멀티미터와 HP-IB 카드로 인터페이스된 퍼스널 컴퓨터로 구성되었다. 실험의 주 목적인 수격상승압을 측정하기 위하여 반응속도가 1ms 이하

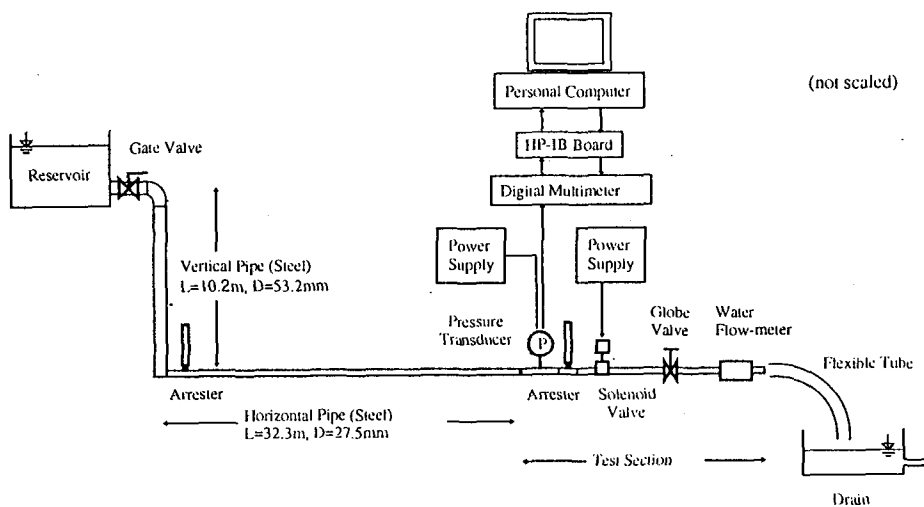


Fig.1 Schematic diagram for water hammer experimental setup

로 빠른 응답시간을 갖는 실리콘 스트레인 게이지 브리지 타입(silicon strain gauge bridge type)의 압력센서를 사용하였고 솔레노이드 밸브 직전 0.05m 이내에 설치하였다. 압력센서의 측정범위는 20기압이며 공급전압 10V에 대하여 압력에 비례하는 전압을 출력한다. 압력계의 보정결과를 최소자승법으로 직선적합하면 단위 기압당 4.993mV의 기울기를 보였다. 본 보정식에 의한 압력수두의 측정 오차는 전압범위에 대하여 0.1m 이내이다. 압력센서의 출력볼트는 IEEE-488 HP-IB 카드를 통해 퍼스널 컴퓨터로 부터 원격조정되는 디지털 멀티미터에 의해 100Hz로 샘플링 되고 A/D 변환되어 데이터 파일로 저장된다. 관로내의 유량은 일반수도관에서 주로 사용되는 용적식적산 수량계(ϕ 25mm)를 사용하여 측정하였으며 적산수량계의 측정오차는 5%이내로 알려져 있다. 솔레노이드 밸브의 개폐조작에 의한 상승수격압의 제어 효과를 확인하기 위하여 밸브 직전에 수격흡수장치로서 공기챔버(air chamber)와 수격 흡수기(arrester)를 설치 하였다. 공기챔버는 표준형(standard type)으로서 공기실 체적과 접속구의 단면적 변화에 중점을 두어 제작하였고 실험에 사용된 공기챔버의 형상과 규격은 Fig.2와 Table 1에 나타나 있다.

Table 1에서 장치번호(unit number)는 실험상 장치의 구분을 위해 임의로 명명한 것이며 접속구의 크기 및 오리피스의 구경등은 모두 mm로 표시하였다.

어레스터는 미국 PDI(Plumbing and Drainage Institute)가 보증하는 규격품으로서 PDI의 선정 기준에 따라 공기실 압력(air charge) 수두가 60 m(65 PSIG)인 "C" 타입을 선정 하였다.^{(4),(5)} 참

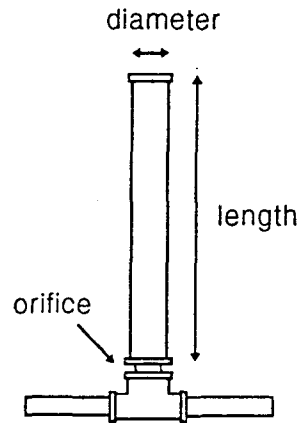


Fig.2 Configuration of the air chamber.

Table 1. Specifications of the air chambers used

(dimensions in mm)

UNIT NUMBER	SAME DIAMETER		LARGE DIAMETER			
	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Specificaton (diameter × length)	250 × 330	250 × 550	500 × 330	500 × 330	500 × 600	500 × 660
Connection Diameter	250	250	200	250	200	250
Orifice Diameter	200	200	150	200	150	200
Volume(mm ³)	232 × 10 ³	332 × 10 ³	790 × 10 ³	768 × 10 ³	1,476 × 10 ³	1,498 × 10 ³

Table 2. Water hammer arrester standards

Type	A	B	C	D	E	F
Fixture Unit (FU)	1-11	12-32	33-60	61-113	114-154	155-330
Connection Diameter(mm)	12.7 (1/2")	19.1 (3/4")	25.4 (1")	31.8 (1 1/4")	38.1 (1 1/2")	50.8 (2")

고로 Table 2는 PDI에서 정한 워터햄머 어레스터의 규격에 따른 용량(Fixture Unit)과 접속구경을 보여주고 있다.

2.2 실험방법

실험은 일정유량으로 초기화된 정상유동 상태에서 솔레노이드 밸브를 급폐쇄하는 경우(close)와 관로내 유체가 정지상태에서 솔레노이드 밸브를 급개방하는 경우(open)에 발생하는 수격 압력의 변화를 압력센서 및 고속의 데이터 입출력 변환장치에 의하여 획득하였다. 수격어레스터를 관로내의 하류 말단과 상류 말단 그리고 양단에 설치하고 어레스터 설치 위치에 따른 최대 수격압 및 압력파의 왕복주기를 관찰하였고 수격어레스터가 설치되지 않은 경우와 비교하였다 또 여러가지 규격으로 제작된 에어챔버를 솔레노이드 직전에 설치하고 공기실의 체적에 따른 영향도 관찰하였다. 위의 실험을 여러가지 유량에 대하여 수행하였다. 본 실험 장치의 최대유량은 63.16 l/min이나 압력계의 측정범위를 고려하여 유량범위를 50 l/min 이하로 제한하였다 취득된 압력파의 주파수성분을 분석하기 위해서 고속푸리에변환(Fast Fourier Transform)을 수행하였으며 고주파수의 잡음성분을 제거하기 위해서 대역폭이 17.5Hz인 저역통과 필터(lowpass filter)를 적용하여 푸리에 역변환(Inverse FFT)을 수행하였다. 본 논문에 나타난 수격파신호는 모두 디지털 필터에 의하여 신호처리된 결과이다. 보다 상세한 것은 참고문헌 (9)에 잘 나타나 있다.

3. 실험결과

Fig.3은 유량이 5 l/min일때 관로 말단에 설치된 솔레노이드 밸브의 급폐쇄에 의한 수격압이 관로를 따라 왕복하며 시간경과에 따라 관로내 마찰에 의하여 압력파가 감쇠되어 가는 과정을 보여주고 있다. 이 수격압력파 신호에 대한 주파수 영역에서의 주파수 성분을 분석한 결과가 Fig.4에 나타나 있다. 주파수 성분은 7.81Hz에서 최대값을 보이며 이것의 역수 0.128초는 관로를 따른 압력파의 두차례 왕복주기에 해당한다.

관로내에서의 압력파 전달속도는 이론적으로 다

음의 식으로 구할 수 있다.

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho(1 + KD/Et)C_1}} \quad (1)$$

여기서 E 는 관재의 탄성계수이며 ρ 와 K 는 각각 물의 밀도와 체적탄성계수이다. 또한 D/t 는 관의 내경이 두께의 비이며 C_1 은 관의 지지형태와 관이음의 유무에 따라 결정되는 상수값이다. 상단고정의 경우 위의 관경 및 관두께에 대한 강관내에서의 전달속도를 계산하면 약 1,100m/s로 계산된다. 측정된 압력파의 전달속도는 이론식에서 구한 값에

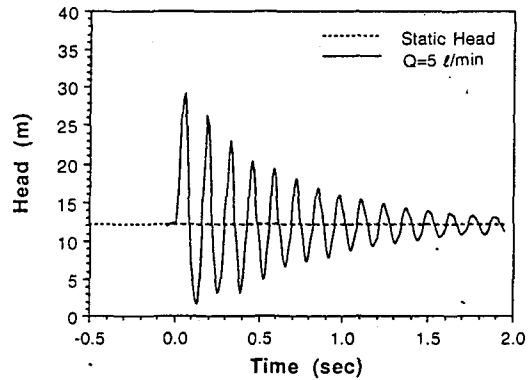


Fig.3 Water hammer pressure wave by quick valve closure.

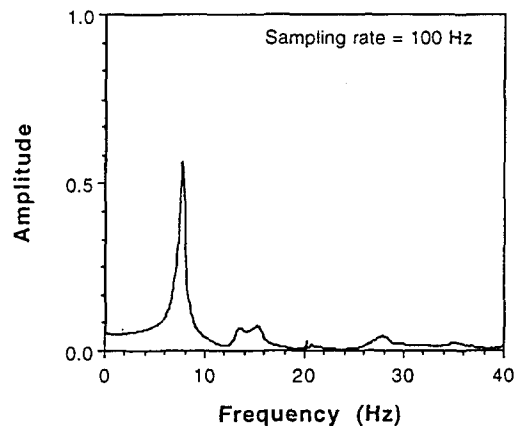


Fig.4 Frequency distribution of the water hammer pressure wave.

비하여 다소 작게 나타나는데 이는 물에 용해되어 있는 작은 기포와 불순물에 의하여 물의 탄성계수가 감소하기 때문인 것으로 추정된다.

Fig.5는 유량증가에 따라 밸브의 급폐쇄에 의한 최대수격압(max : valve close) 및 최저 수격압(min : valve close)을 보여주고 있다. 밸브의 폐쇄시간이 압력파의 관로왕복시간(2L/a)보다 긴 경우를 완폐쇄, 그리고 작은 경우를 급폐쇄라고 하는데 밸브 급폐쇄시의 최대수격압은 다음의 Joukowski의 이론식으로 구할 수 있다.

$$H_R = a \ V/g \quad (2)$$

여기서 a는 압력파의 전달속도이며 V는 관로내 평균유속, 그리고 g는 중력가속도이다. 그림에서 보는 바와 같이 최대수격압의 측정값이 이론식과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한 밸브의 급폐쇄에 의한 최저수격압은 유량이 증가함에 따라 점차 감소하여 10 l/min 이상에서는 포화증기압에 접근하였다.

Fig.5는 밸브의 급개방에 의한 최저 수격압(min : valve open)도 아울러 나타내고 있다. 밸브 개방시의 최초 발생 수격파는 음압으로 나타나는데 이 최저 수격음압은 급폐쇄에 의한 수격압에 비하여 절대값이 매우 작으며 급폐쇄시의 반동 수격음압에 비하여도 작다. 수격파의 관로왕복이 관찰되지 않았으며 수격파의 반동 양압의 크기는 무시할 만한 것으로 측정되었다. Fig.6은 밸브 급개방에 의한 수격파형을 보여주고 있다. 밸브 개방시의 수격효과는 매우 작으므로 본 연구에서는 주로 밸브 폐쇄에 관하여 수격흡수기의 효과에 관하여 실험하였다.

Fig.7은 유량 10 l/min에 대하여 관로의 말단에 설치된 슬레노이드 밸브를 폐쇄할 경우 표준 어레스터의 설치유무와 설치위치에 따른 수격파형을 비교하여 나타낸 것이다. 어레스터를 수격압이 발생하는 하류측의 말단 밸브 직전에 설치한 경우 (valve)가 어레스터를 설치하지 않은 경우 (none)에 비하여 최대수격압이 크게 감소하였으며, 수평관 상류측 말단 (junction)에 설치할 경우에는 최대수격압의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 어레스터를 밸브의 직전과 상류측 양단에 2개 설

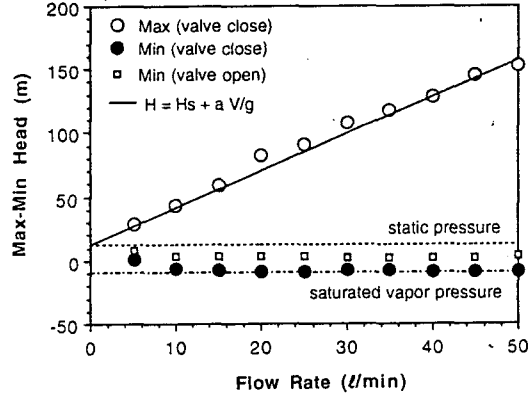


Fig.5 Effect of water flow rate on maximum and minimum water hammer pressures.

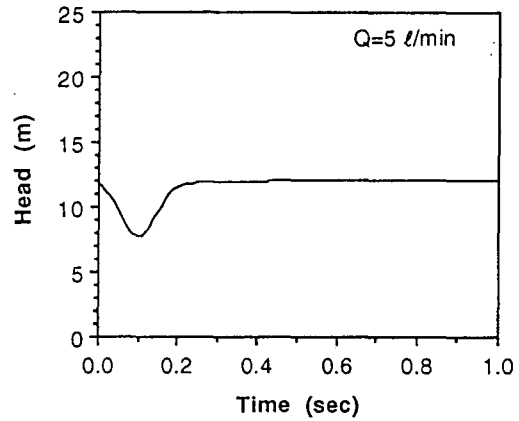


Fig.6 Water hammer pressure wave by quick valve opening.

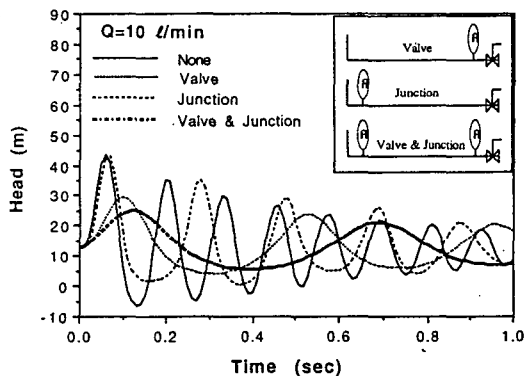


Fig.7 Water hammer waves for various arrester installations.

치한 경우(valve & junction)에는 더욱 좋은 효과가 나타났으나 밸브 직전에 설치한 경우(valve)에 비하여 그리 큰 효과는 없었다. 어레스터를 설치한 경우 압력파의 왕복주기는 어레스터가 없을 때에 비하여 길어지며 양단에 두개를 설치할 경우에는 왕복주기가 더욱 길어진다. 이는 어레스터내에서의 수격과 흡수과정에 의한 것으로 관로 자체내에서의 압력과 전달속도와는 무관하다. 수격어레스터의 효과가 클수록 최대수격압은 감소하고 압력파의 왕복주기는 길어진다. 또한 어레스터가 최대수격압력의 강하에는 큰 효과를 발휘하나 시간에 따른 수격압 감쇠에는 별 영향을 주지 않고 있음을 관찰할 수 있다.

Fig.8은 유량의 변화에 따른 최대 압력치를 설치 위치에 따라 도시한 것이다. 다른 유량에 대해서도 어레스터를 말단밸브의 직전에 설치한 경우가 최대 압력상승의 방지에 효과적임을 알 수 있다. 또 밸브로부터 상류측에 설치한 경우에는 최대압력이 유량증가에 따라 계속 증가하나 밸브 직전에 설치한 경우와 양단에 2개를 설치한 경우에는 일정 유량 범위 이상에서 비교적 일정한 최대수격압을 보이며 사용된 어레스터의 허용압력수두(60mH₂O) 범위 내에 머문다.

Fig.9는 슬레노이드 밸브를 폐쇄할 경우 발생하는 최저수격압의 변화를 보여주고 있다. 최저수격압은 관로내의 캐비테이션과 직접적으로 관련되는데 최대 양압인 경우와 마찬가지로 어레스터를 말단밸브 직전(valve)에 설치한 경우가 최저 수격압 방지에 있어서도 가장 효과적인 것으로 나타났다. 상류측 설치(junction)의 경우 유량의 증가에 따라 어느정도 효과를 기대할 수 있었으나 유량 30 l/min 이상부터는 설치하지 않은 경우와 거의 일정하게 유지되었다.

Fig.10은 어레스터의 각 설치위치에 대하여 유량 변화에 따른 압력파의 주파수의 변화를 도시한 것이다. 어레스터의 설치유무와 설치위치에 따라 압력파의 주파수가 바뀌나 유량의 변화에는 영향을 거의 받지 않는다. 어레스터를 상류측(junction)에 설치할 때 보다는 밸브의 직전(valve)에 설치하거나 양단에 2개(valve & junction)를 설치할 경우가 압력파의 주파수가 작게(왕복주기가 크게) 나

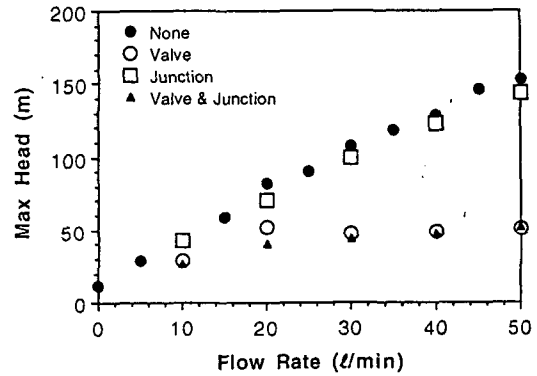


Fig.8 Effect of arrester installation on maximum water hammer pressures.

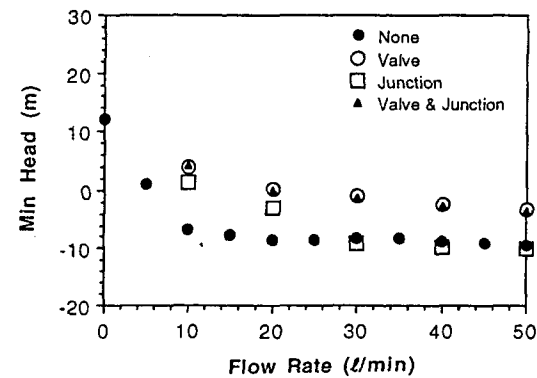


Fig.9 Effect of arrester installation on minimum water hammer pressures.

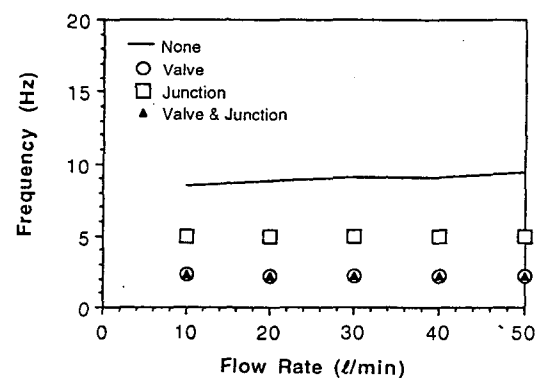


Fig.10 Effect of arrester installation on frequency of pressure waves.

타났다. 어레스터가 설치되지 않은 경우의 주파수로 부터 계산된 관로내의 압력파 전달속도는 1090에서 1180m/s의 범위로 계산되었다. 어레스터가 설치되지 않은 경우, 유량이 큰 경우에는 초기에 관로내에 기포가 발생하여 수격파의 전달속도가 변화하므로 여기서 계산된 주기는 밸프폐쇄 이후의 최초 3~4회의 수격파를 제외하고 그 이후의 수격파에 대한 왕복주기를 계산한 것이다.

표준 어레스터 대신 여러가지 규격의 에어챔버를 말단밸브 직전에 설치한 경우 에어챔버의 공기실체적에 따른 최대 수격압과 최저 수격압이 Fig.11에 나타나 있다. 일정 유량 30 l/min에 대하여 슬레노이드 밸브를 급개방 또는 급폐쇄하였을 때의 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 공기챔버의 체적이 증가할수록 최대압력이 감소하고 최저 압력은 증가하고 있으며 관로의 정상상태의 수두로 접근함을 볼 수 있다. 허용 최대수격압에 따라 에어챔버의 체적이 결정되어야 한다.

Fig.12는 공기챔버의 체적증가에 따른 압력파의 주파수 변화를 도시한 것이다. 공기챔버의 체적 증가에 따라 주파수가 감소하여 왕복주기가 증가함을 알 수 있다. 이는 에어챔버내의 공기의 압축팽창 과정에 소요되는 시간으로 관로내 자체의 압력파 전달속도와는 무관하다. 접속구나 오리피스 단면적에 따른 효과는 실험데이터가 충분치 않아 일반

적 결론을 유추하기는 어려우나 본 실험에서 수행한 접속구 및 오리피스의 단면적의 범위에 대해서는 최대수격압의 흡수 및 주파수에 있어서 그리 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 오리피스의 유량계수에 따른 수격압의 흡수 효과에 관해서 강신형등⁽⁷⁾이 수치해석을 수행하였는데 그 결과에 의하면 일정 유량계수 범위에 대해서는 그 영향이 거의 없고 유량계수가 지나치게 감소하면 오리피스를 통한 보충수의 유출입시 압력강하가 커져서 공기챔버의 기능을 충분히 발휘하지 못하는 것으로 나타난 바 있다. 정성적으로는 유량계수가 작을수록 보충수가 오리피스를 통하여 유입되거나 유출되는데에 많은 시간이 소요되기 때문에 수격파의 왕복주기가 길어지며 수격압의 방지 효과는 줄어들 것으로 예측할 수 있다. 유량계수는 오리피스의 구조에 따라서도 다소 다르므로 오리피스를 통한 유량계수나 단면적에 따른 수격방지효과에 관한 실험적 연구는 차후 연구과제로 미루겠다.

4. 결 론

중력식 급수배관시스템을 모사한 단순관로를 구성하여 관로 말단에 설치된 슬레노이드 밸브의 급개폐에 따른 관로내의 수격현상에 관하여 실험하였다. 관로내에 수격방지장치의 설치유무와 설치위치

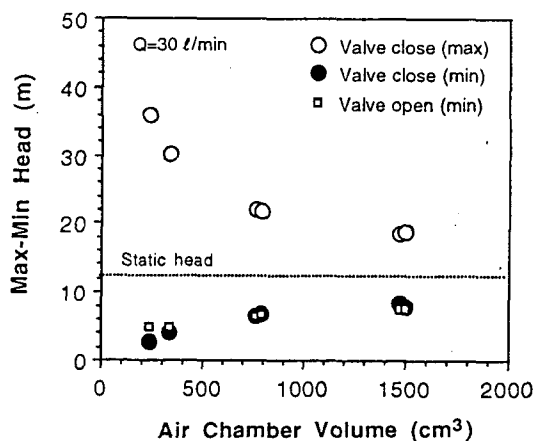


Fig.11 Effect of air chamber volume on maximum water hammer pressures.

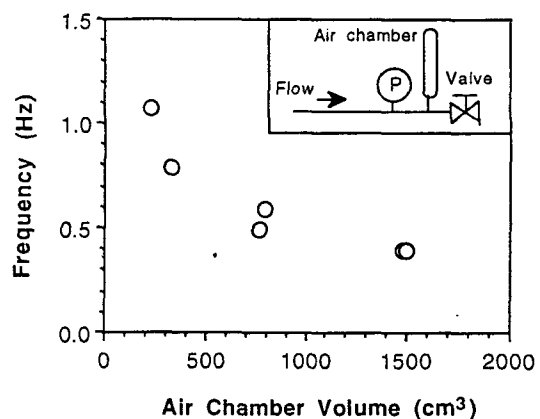


Fig.12 Effect of air chamber volume on frequency of pressure waves.

에 따른 밸브 개폐에 따른 압력파의 형태로 부터 최대수격압과 최저수격압, 그리고 압력파의 관로왕복 주파수를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 수격흡수기가 설치되지 않았을 때 측정된 밸브 급폐쇄에 의한 최대수격압은 Joukowsky의 이론식 결과와 잘 일치하였다. 또한 밸브 급개방(open)에 의한 최저 수격압은 밸브 급폐쇄(close)에 의한 반동 최저수격압보다도 그 절대값이 작았다.

2) 어레스터의 설치 위치 변화에 따른 수격파형을 분석한 결과, 관로 상단(junction)에 설치한 경우에 비하여 말단 밸브의 직전(valve)에 설치하였을 때가 최대수격압과 최저수격압 억제에 보다 효과적인 것으로 나타났다. 관로상단에 추가로 설치된 어레스터는 최대수격압 억제에는 큰 영향을 미치지 못하였으나 관로내 압력파의 왕복주기는 증가시켰다.

3) 공기챔버의 체적증가에 따라 수격압의 흡수 효과가 좋은 것으로 나타났으며 본 실험 범위내의 오리피스 단면적에 대해서는 최대수격압의 변화가 거의 없었다. 또한 공기챔버의 체적이 증가함에 따라 보충수 유출입에 소요되는 시간이 증가하여 압력파의 주파수가 감소하였다.

일반적으로 급수배관계에서 수격작용을 방지하기 위해서는 밸브의 폐쇄시간이 가능한 한 긴 밸브를 선정하고 관로의 길이를 최소화하도록 전체 관로망을 설계하여야 하며 수격현상을 최대 억제하도록 하여야 하며 수격방지장치를 설치하는 경우에는 적절한 수격방지기의 용량과 설치 위치를 선정하여 효과적으로 수격압을 흡수할 수 있도록 하여야 하겠다.

참 고 문 헌

1. Wylie, E. B. and Streeter, V. L., 1978, 'Fluid Transients,' McGraw-Hill.
2. 이영범, 1989, "대형 펌프관로계에서의 수격현상에 관한 연구", 한양대학교 산업대학원, 석사학위논문.
3. 김영호, 1992, "급수 급탕 배관에서의 Water Hammer 방지 기술", Water Hammer 방지 기술 강연회, 공기조화 냉동공학회 위생분과 위원회.
4. PDI WH 201, Water Hammer Arresters—Certification, Sizing, Placement and Reference Data-6. ASSE. Standard No, 1010. Water Hammer Arresters.
5. ANSI, A112. 26. 1. Water Hammer Arresters.
6. 高橋紀行, "건축급수 관로내에 있어서의 수격현상의 방지", 일본 공기조화 위생공학 56(9), pp. 45~53.
7. 강신형, 류해성, 박민서, 1992, "수충격 완화용 챔버의 설계 및 성능 예측에 관한 연구", 공기조화 냉동공학회 논문집, 제4권, 제1호, pp. 57~64.
8. 과학기술처, 1991, "신주택 기술개발—초고층 아파트 최적 설비시스템의 개발 (I, II)," 제 1, 2차년도 연차보고서, 한국기술연구소 122-1.
9. 김종만, 1992, "중력식 급수관로계에서의 수격현상에 관한 실험적 연구", 국민대학교, 석사학위논문.