

〈論 文〉

건축배관시스템 내에서의 수격현상에 관한 실험적 연구

한화택* · 김종만** · 김종필***

(1993년 8월 23일 접수)

A Study on Water Hammer Phenomena in Piping Systems of Buildings

H. T. Han, J. M. Kim and J. P. Kim

Key Words : Water Hammer(수격), Piping System(배관계), Valve(밸브), Experiment(실험)

Abstract

An experimental study was conducted on water hammer phenomena generated by quick valve operations in piping systems of buildings. Transient water hammer pressure waves were measured for three different types of valves, i. e. a ball valve, a solenoid valve, and an one-touch valve. The effects of flow rate and valve closing time on the maximum water hammer pressure were investigated. Based on the experimental results, general design recommendations were provided to prevent water hammer phenomena in piping systems of high-rise apartment buildings.

1. 서 론

배관내의 유체흐름이 급격한 밸브작동 등에 의하여 운동상태에 갑작스러운 변화가 발생하면 유체의 운동에너지가 압력에너지로 변화하여 급격한 압력 상승이 일어나고 이때 발생하는 상승압력은 압력파가 되어 관로를 왕복하면서 점차 감소되어 간다. 이러한 현상을 수격작용(water hammer)이라 하고 이때의 상승된 압력을 수격압이라고 한다.⁽¹⁾ 이러한 수격현상으로 인하여 배관의 진동과 그로 인한 소음이 발생하며 심한 경우 배관이나 부속기기류가 파손되는 등 배관계의 내구연한이 감소될 수 있다. 최근 건축물이 고층화되고 대형화됨에 따라 건물의 배관시스템(냉, 난방 및 급수배관)에서의 수격현상 발생가능성이 높아지고 있으며 특히 초고층 아파트에서의 소음과 진동문제는 더 이상 방치해서는 안 될 수준에 이르고 있어⁽²⁾ 수격현상에 관한 보다

근본적인 이해와 아울러 적절한 방지대책이 강구되어야 한다.

수격현상에 관한 연구는 1878년에 수격현상이 발생하는 원인이 규명된 이후 고전적인 연구단계, 이론 및 실험결과 확인단계, 실용공식 출현단계 및 1960년대초의 표준규격 제정단계^(3,4)를 거쳐 현재에 이르고 있다. 또한 최근에는 배관내의 캐비테이션 발생시의 수격현상 해석모델의 개발,⁽⁵⁾ 또는 탄성체가 아닌 관 재질에 따른 수격현상에 미치는 영향⁽⁶⁾ 및 불완전 배관지지에 따른 배관내의 수격현상의 해석⁽⁷⁾ 등에 관한 수치해석 모델들이 제시되는 등 이론적인 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 국내에서도 건설이나 플랜트설비 분야에서 수격현상에 관한 경험을 축적해 왔으나 그에 대한 이론적인 연구는 간헐적으로 진행되었을 뿐,⁽⁸⁾ 수격현상에 대한 체계적인 연구는 아직도 미미한 상태이다. 특히 건물 배관내에서의 수격현상에 관하여서는 최근에 건축물이 대형화, 고층화됨에 따라 문제점으로 부각되기 시작했으므로 아직까지 이에 관한 실험적 연구는 전무한 상태라 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 아파트 배관계의 일부를

*정회원, 국민대학교 기계공학과

**한국전력 주

***대우건설 주 기술연구소

모사하기 위하여 실험실 내에 비교적 짧은 배관길이를 갖는 수격실험장치를 설계 제작하였고 밸브의 급폐쇄 및 급개방에 의한 수격현상에 관하여 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 배관내의 유량, 밸브의 폐쇄속도, 밸브종류에 따른 최대 수격압 및 수격파형에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 아울러 실험결과를 토대로 아파트 배관에서의 밸브작동에 의한 과도한 수격압을 방지하기 위한 일반적인 방법들을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험은 고층아파트의 중력식 급수배관 형태를 모사하여 밸브 개폐조작에 따른 배관내의 수격현상을 고찰하기 위한 것으로 실험장치는 Fig. 1에서와 같이 수조, 일반배관부 및 계측장비부 등으로 구성되어 있다.

수조는 지름 1.05 m, 높이 1.24 m의 FRP (fiber-glass reinforced polyester) 원통형 탱크를 사용하였다. 탱크의 상부는 대기중에 노출되어 있고 오버플로(overflow)를 통하여 과잉수량은 흘러 넘치도록 하여 실험시 배관에 일정 수두의 물이 공급될 수 있도록 하였다.

일반배관부는 수격현상을 발생하게 하는 단순하고 일반적인 형태를 갖추고 있으며 건물의 옥상에 설치된 수조와 수직배관, 수평배관, 그리고 말단밸브

등으로 구성되어 있다. 수직배관은 내경 53.2 mm, 두께 3.65 mm의 강관으로서 수조토출구 중심으로부터 수평배관이 연결된 이경티까지의 거리는 10.2 m이다. 수평배관은 외경 27.5 mm, 두께 3.25 mm의 강관으로서 수직배관이 연결된 이경티로부터 압력센서가 설치된 지점까지의 거리는 32.3 m이다. 관내 유량의 조절은 수평배관의 말단에 설치된 글로브밸브(globe valve: $\phi 25$ mm)를 사용하였다.

수격현상의 발생을 위하여 개폐속도가 일정하고 빠른 전자밸브(solenoid valve: $\phi 25$ mm)과 수동조작에 의해 폐쇄속도가 가변적인 범용 볼밸브(ball valve: $\phi 25$ mm)와 원터치밸브(one-touch combination faucet valve)를 사용하였다. 전기동작에 의한 솔레노이드밸브의 개폐속도는 약 0.05초이며 볼밸브와 원터치밸브의 경우는 사람의 수동작에 의존한다.

계측장비부는 압력센서, IBM 퍼스널컴퓨터와 인터페이스되어 있는 디지털멀티미터, 그리고 용적식수량계로 구성되었다. 실험의 주 목적인 수격상승압을 측정하기 위하여 사용된 압력센서는 변환기이며 작동밸브의 직전에 설치하였다. 압력센서는 0~20 kg/cm²gage의 압력범위를 가지며 공급전압 10볼트에 대하여 99.86밀리볼트의 출력을 나타내고 반응시간은 0.001초 이내이다. 압력센서의 출력볼트는 HP-IB (IEEE-488) 카드를 통하여 퍼스널 컴퓨터로부터 원격조정되는 디지털멀티미터에 의해

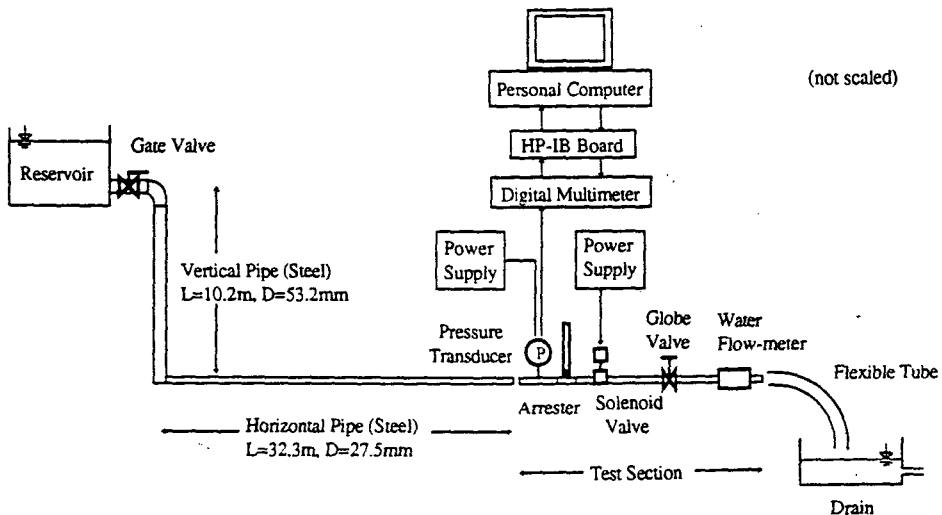


Fig. 1 Schematic diagram for water hammer experimental setup

100.0 Hz로 샘플링되고 A/D변환되어 데이터 파일로 저장된다. 유량은 일반수도관에서 사용되는 용적식수량계 (water flowmeter : $\phi 25$ mm)을 보정하여 사용하였다.

배관의 지지는 급격한 압력변화에 따른 압력파의 전달현상으로 충격에 견딜수 있도록 앵글로 특별히 제작하여 수직배관에 2개소 및 수평배관에 12개소를 두어 수격발생시 배관의 진동을 최소화하도록 하였다.

2.2 실험방법

실험은 일정유량으로 초기화된 정상 유동상태하에서 밸브의 작동형태가 각기 다른 세가지 형식의 밸브를 이용하여 급작폐쇄하여 일시적으로 발생하는 압력상승분을 압력센서 및 고속의 데이터 입출력 변환장치에 의하여 획득하는 과정을 반복하였다. 따라서 데이터전송 중에 주변기기에 의한 다량의 잡음이 혼입될 수 있으므로 디지털필터 등의 신호처리기법을 적용하여 획득한 데이터를 주파수로 분해하여 불필요한 잡음을 제거하였다. 볼밸브나 원터치 밸브의 경우에는 밸브 폐쇄속도가 사람의 수동작에 의존하는 관계로 정확한 폐쇄시간을 미리 설정할 수는 없으나 출력된 수격상승 압력의 파형을 분석함으로써 폐쇄속도를 유추할 수 있다. 본 실험장치의 최대 공급유량은 63 l/min이나 예비실험에서의 압력계 측정범위를 고려하여 30 l/min의 유량범위내에서의 실험을 수행하였다. 작동유체로는 상온에서의 물이 이용되었다.

3. 실험결과

관로 내의 유량이 5 l/min의 정상상태로 유지되다가 솔레노이드밸브의 급작스런 폐쇄에 의한 관로내 압력변화 형태가 Fig. 2에 나타나 있다.

밸브의 급폐쇄에 의해서 발생한 수격압이 관로를 따라 왕복하는 것과 시간이 지나감에 따라 관로내의 마찰 등의 영향으로 최대 수격압이 점차 감소되는 과정이 잘 나타나 있다. 수격작용에 의해 발생한 최대 압력수도는 29.13 m이고 최저 압력수도는 1.44 m로 나타났다. 이때의 정상상태에서의 관로내 압력수도는 11.9 m이다. 또한 압력파의 한 주기가 약 0.13초인데 이는 압력파의 전달속도는 10 10 m/s로 계산된다. 이렇게 측정된 값은 관로내의 압력과 전달속도의 이론식으로 구한 값에 비하여

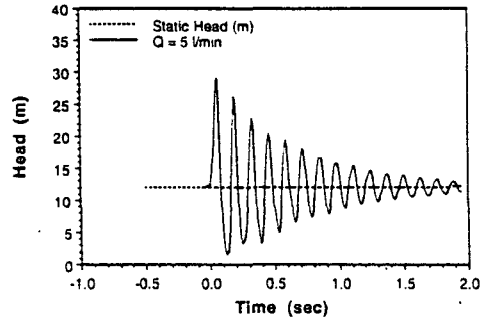


Fig. 2 Water hammer pressure wave by quick valve closing (Solenoid valve)

다소 작게 나타나는데 이는 물에 용해되어 있는 작은 기포와 불순물에 의하여 물의 탄성계수가 감소하기 때문인 것으로 추정된다. 관로내의 압력과 전달속도는 다음의 식으로 구하여 진다.⁽¹⁾

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

여기서, E 는 관재의 탄성계수이고, ρ 와 K 는 각각 물의 밀도와 물의 체적 탄성계수이며, D 와 t 는 관내경과 관두께에 해당된다. 또 C_1 은 관의 지지형태와 관이음의 유무에 따라 결정되는 상수값이며 몇가지 관지지 형태에 대하여 다음과 같은 값을 갖는다.

- 상단고정 : $C_1 = 5/4 - \mu$
- 양단고정 : $C_1 = 1 - \mu^2$
- 양단고정(관이음) : $C_1 = 1 - \mu/2$

여기서, μ 는 관재의 Poisson상수이며 그 값은 약 0.33이다.

밸브폐쇄에 의한 수격압의 시간에 따른 변화를 고속 푸리에변환(fast fourier transform)하여 주파수영역에서의 해당 주파수에 대한 성분의 크기를 구하면 Fig. 3과 같이 구하여 진다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 약 7.8 Hz에서 최대치를 보이는데 이것은 관로내에서 압력파의 두차례 왕복주기를 나타낸다. 또 약 40 Hz에서 피크가 발생되는데 이것은 60 Hz의 교류전원 성분이 50 Hz를 중심으로 대칭으로 나타난 것이다. 높은 진동수의 잡음성분을 제거하기 위하여 대역폭이 17.5 Hz인 저역통과 필터(lowpass filter)를 적용하여 역변환(inverse FFT)한 결과, 이미 보인 Fig. 2와 같이 불필요한 잡음성분이 제거된 출력전압의 형태를 얻을 수 있었다. 본 실험에서 취급한 데이터는 모

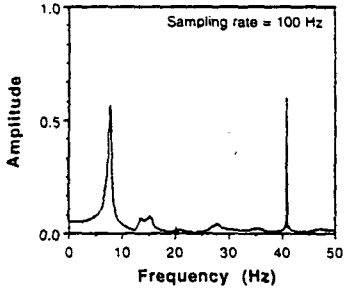


Fig. 3 Spectrum of the water hammer pressure wave

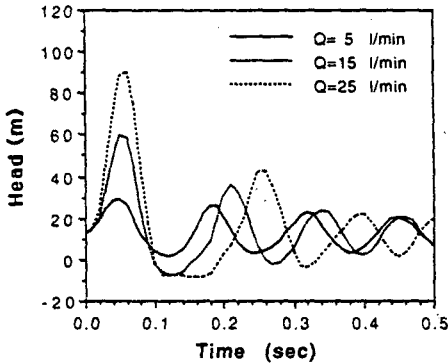


Fig. 4 Water hammer waves for various flow rates (Solenoid valve closing)

두 위와 같은 디지털필터에 의한 신호처리방법을 적용하여 구하였다.

Fig. 4는 솔레노이드밸브의 급작스런 폐쇄에 의한 실험결과를 여러가지 유량에 대하여 중첩한 결과이다. 예상할 수 있는 바와같이 유량이 증가할수록 수격압은 크게 나타난다. 또 음압일 때는 최저 수격압이 관로내 물의 온도에 해당하는 포화수증기압 이하로 내려가지 않는다. 배관출구에서 측정된 물의 온도는 전 실험에 걸쳐 약 13~17°C의 범위를 보였다. 물의 온도가 15°C일때 포화수증기압은 열역학 테이블에서 0.17m이다. 압력파가 관로를 왕복하는데 걸리는 시간은 유량이 증가할수록 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 유량이 증가하면 수격음압에 의한 관로내에 기포발생이 증가하여 압력파의 전달속도가 감소하기 때문인 것으로 유추된다. 급폐쇄의 경우, 즉 밸브의 폐쇄시간은 압력파의 관로내 왕복시간 $2L/a$ 보다 작은 경우의 이론적인 압력상승 수두 H_R 은 다음의 Joukowsky식으로 표시할 수 있다.

$$H_R = aV/g \quad (2)$$

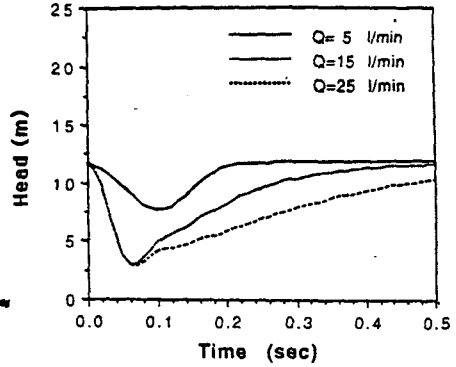


Fig. 5 Water hammer waves for various flow rates (Solenoid valve open)

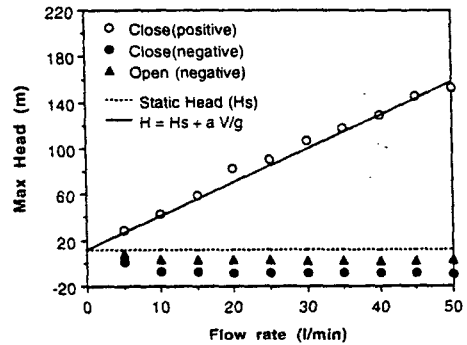


Fig. 6 Effect of water flow rate on maximum and minimum water hammer pressures (Solenoid valve)

여기서, a 는 관로내 압력파의 전달속도이며 V 는 유체의 평균유속, 그리고 g 는 중력가속도이다. 그림에 중첩된 직선은 위의 이론식으로 구한 최대 수격압을 나타내며 관내의 유속증가에 따라 최대수격압은 직선적으로 증가한다. 일반적으로 급폐쇄의 경우 주어진 유량에 대하여 관경을 크게 하여 평균 유속을 줄임으로써 최대 수격압을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 유량변화에 따른 솔레노이드밸브의 급작개방에 의한 수격파의 형태를 보여준다. 급작스런 밸브개방에 의하여 음압이 발생하며 음압의 절대 크기가 작은 관계로 급작스런 밸브폐쇄 때와 같은 수격압의 왕복은 관찰되지 않는다.

Fig. 6은 유량에 따른 최고 및 최저 수격압을 솔레노이드 밸브의 급개방 급폐쇄에 대하여 도시한 것이다. 최고 수격압이 유량증가와 함께 증가하는 것과 최저 수격압이 유량증가와 더불어 점차 감소하며 물의 온도에서의 포화 수증기압에 접근함을

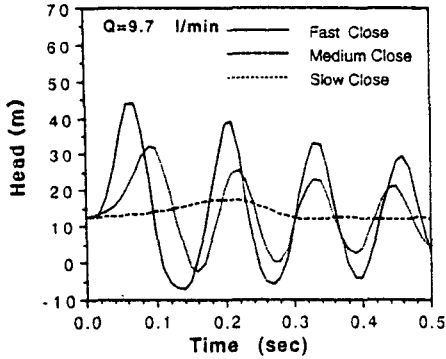


Fig. 7 Water hammer waves for various valve operation speed (Ball valve closing)

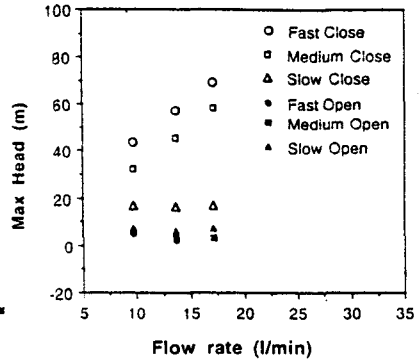


Fig. 9 Effect of valve operation speed on maximum water hammer pressure (Ball valve)

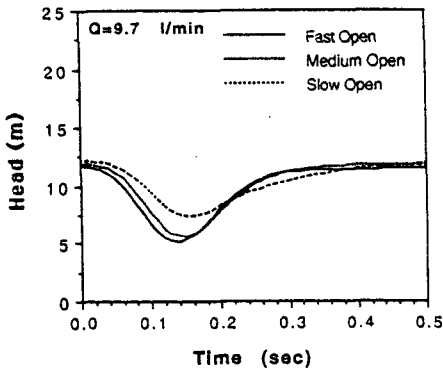


Fig. 8 Water hammer waves for various valve operation speed (Ball valve open)

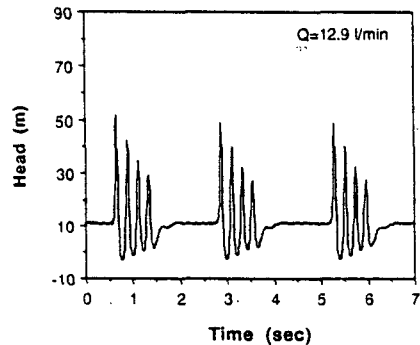


Fig. 10 Water hammer pressure waves by repeating operations of one touch valve

볼 수 있다. 급작스런 밸브열림에 의한 수격음압은 밸브폐쇄에 의한 최저 수격압보다 그 크기가 훨씬 작게 나타남을 알 수 있다.

볼밸브의 폐쇄 및 개방속도의 변화에 따른 수격압의 변화가 Fig. 7과 Fig. 8에 나타나 있다. 같은 유량의 슬레노이드밸브와 비교해 볼 때 볼밸브의 급폐쇄(fast)에 해당되는 폐쇄속도에서 보다 큰 압력상승이 나타나는 것을 볼 때 볼밸브의 급폐쇄(fast)에 해당되는 폐쇄속도에서 보다 큰 상승압력이 나타나는 것을 볼 수 있으며 폐쇄속도를 완폐쇄(slow)로 할 경우 압력상승이 매우 작은 폭으로 진행됨을 관찰할 수 있다. 밸브폐쇄 시간은 실험자의 손동작으로 인한 작동으로 정확한 속도범위를 규정하기는 어려우나 이를 기계적인 밸브폐쇄로 전환한다면, 밸브 단면형상의 최적화 설계에 응용할 수도 있으며 출력데이터의 수격파형을 분석함으로써 그 값을 유추해 낼 수도 있다. 본 실험에서는 볼밸브의 폐쇄속도를 임의의 3단계로 나누어 수행

하였으며 그로부터 출력된 데이터의 수격파형을 분석한 결과, Fig. 7에서와 같이 급폐쇄의 경우는 약 0.06초, 중간폐쇄(medium)의 경우는 약 0.1초, 완폐쇄(slow)의 경우는 약 0.2초로 나타났다.

Fig. 9는 유량변화에 따른 볼밸브의 개폐속도에 대한 최대 압력상승치를 도식한 것이다. 개폐속도가 빨라짐에 따라서 최대 양압의 크기는 증가하며 최대 음압의 크기는 감소됨을 알 수 있다.

원터치밸브의 개폐에 의한 수격파형도 그 절대값만이 다를뿐 볼밸브나 슬레노이드밸브의 수격파형과 대동소이하였다. Fig. 10에는 원터치밸브의 반복적인 개폐에 따른 최대 수격압과 수격음압 등의 수격파형이 나타나 있다. 급폐쇄에 의한 파형과 급개방에 의한 파형이 반복되어 잘 나타나 있다.

4. 결 론

배관시스템에서의 수격현상에 관한 보다 정확한

현상파악을 위하여 실험실 내에서의 비교적 짧은 배관 길이를 갖는 수격실험장치를 설계제작하여 실험을 수행하였으며 밸브개폐에 따른 수격파형 및 최대 수격압을 측정하였다.

(1) 최대 수격압은 관로내의 유량증가에 따라서 증가하였고 밸브의 폐쇄속도가 빨라짐에 따라 최대 수격압은 증가하였다.

(2) 밸브의 급폐쇄 및 급개방시의 수격압을 비교한 결과 급폐쇄의 경우가 급개방의 경우보다 수격압이 훨씬 크게 나타났다.

(3) 수격파형 및 최대 수격압은 밸브의 종류보다 밸브의 폐쇄속도에 크게 의존한다.

위의 결과로부터 고층아파트 배관에서의 수격방지를 위해서는 밸브의 폐쇄시간을 가능한 한 긴 밸브를 선정하고 관로의 길이를 최소화하도록 전체 관로망을 설계하여야 하며, 또 관경을 크게하여 주어진 유량에 대해서 유속을 최소화하도록 설계하여야 한다.

실험실 내에서의 수격실험은 고속의 압력측정을 요하며 데이터의 잡음 제거 및 고속의 데이터 전송 및 처리가 요구된다. 추후 연구로서 본 연구에서 제작된 실험장치를 일부 개조하면 수격흡수기(arrester)나 에어챔버(air chamber)의 효과 등에 관한 실험의 수행이 가능하다. 또한 수격에 관한 보다 정확한 예측을 위하여서는 관로내의 증기포켓 발생시의 이론적 모델이나 관지지의 영향 등에 관한 연구도 수행되어야 한다.

참고문헌

- (1) Wylie, E. B. and Streeter, V. L., 1978, *Fluid Transients*, McGraw-Hill.
- (2) 과학기술처, 1991, "신주택 기술개발-초고층 아파트 최적 설비시스템의 개발(1)," 제1차년도 연차보고서, 한국건설기술연구소 90 F122-1.
- (3) ASSE Standard No. 1010, "Water Hammer Arresters."
- (4) ANSI, A112.26.1, "Water Hammer Arresters."
- (5) Provoost, G. A., 1976, "Investigation into Cavitation in a Prototype Pipeline caused by Water Hammer," Presented at the Second International Conference on Pressure Surges, London, Sep. 22~24.
- (6) Contractor, D. N., 1965, "The Reflection of Waterhammer Pressure Waves from Minor Losses," *J. Basic Engineering, AME*, pp. 445~452.
- (7) Williams, D. J., 1977, "Waterhammer in Non-Rigid Pipes: Precursor Waves and Mechanical Damping," *J. Mechanical Engineering Science*, Vol. 19, No. 6, pp. 237~242.
- (8) 강신형, 유해성, 박민서, 1992, "가압급수 시스템의 펌프 서지 댐프너의 설계와 응용," 공기조화 냉동공학, 4(1), pp. 57~64.