

PB 배관에서의 유체압력에 관한 연구

이 용 화[†]

유한대학 건축설비과

The Analysis of Fluid Pressure in Polybutylene Piping System

Yong-Hwa Lee[†]

Department of Building Services, Yuhan College, Kyunggi 422-749, Korea

(Received July 5, 2005; revision received November 7, 2005)

ABSTRACT: This study is to investigate the pressure wave characteristics and the maximum pressure rise generated by instantaneous valve closure at the end of the straightening polybutylene piping system. Experiments were conducted under the following conditions: initial pressure 1~5 bar, flow velocity 0.5~3.0 m/s and water temperature 25°C. Results indicated that the peak pressure generated by quick valve closure reached Joukowsky's value. We also found that the maximum pressure rise and the pressure history depended on not only initial pressure but also flow velocity.

Key words: Water hammer(수격현상), Valve closure(밸브폐쇄), Pressure wave propagation speed(압력파 전파속도), Pressure rise(압력상승), Polybutylene pipe(폴리부틸렌관)

기 호 설 명

- a : 압력파의 전파속도 [m/s]
- D : 폴리부틸렌관의 내경 [mm]
- E : 폴리부틸렌관의 종탄성계수[N/m²]
- e : 폴리부틸렌관의 두께 [mm]
- K : 물의 체적팽창계수 [N/m²]
- L : 헤더로부터 전자밸브 중심까지의 거리 [m]
- P : 밸브 중심으로부터 0.5 m 떨어진 위치에서의 게이지 압력 [bar]
- P_{max} : 수격에 의해 발생된 최대 게이지 압력 [bar]
- P_0 : 시스템의 초기 게이지 압력 [bar]
- T : 시간 [sec]
- V : 배관 내 유속 [m/s]

그리스 문자

- ρ : 물의 밀도 [kg/m³]

1. 서 론

최근 건축물이 고층화되면서 급수 배관계 내의 정수두 증가로 인한 물 소비량의 증대, 소음 및 진동, 그리고 누수와 같은 배관계에 발생되는 각종 폐해를 방지하기 위한 노력이 설계에 반영되고 있다. 즉, 급수 배관계의 조닝(zoning)을 통해 저층부의 압력을 약 3~5 bar 정도로 조정하거나, 관경 설계시 유속의 제한 등과 같은 방법을 사용하고 있다. 그러나 이와 같은 최고 압력 및 유속의 조정에도 불구하고 전기세탁기 및 식기세척기의 사용증대와 1개 레버식 수전의 사용으로 인한 급수전의 개폐속도가 빨라져서 배관 말단부에서 물의 차단속도가 증가하고 있는 실정이

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-2610-0780; fax: +82-2-686-9537

E-mail address: lyh@yuhan.ac.kr

다. 그런데 배관계 말단의 물의 차단속도가 빠르게 되면, 수격작용이 발생한다는 사실은 이미 많은 연구결과에 의해 밝혀지고 있다.⁽¹⁻⁶⁾

즉, 건축물 내에서의 급수 배관계 등에서 급수 전이나 밸브 등이 급폐쇄되면, 유체가 갖고 있던 운동에너지가 순간적으로 압력에너지로 변환되고 수전 또는 밸브의 상류에서 압력이 급격히 상승하여 배관 내의 전수압이 일정하게 될 때까지 압력파가 왕복하게 되는데, 이와 같이 배관 내에서 유체의 에너지가 급변하여 압력변화를 일으키는 것을 수격작용(water hammer)이라고 한다.

그런데 동관과 같은 급속관의 경우, 수격작용에 의해 발생하는 충격파는 발생점과 완충 또는 반사점간을 약 1,000~1,400 m/s로 배관 내를 왕복하게 되며, 이 현상이 발생하는 동안 압력에너지가 관 벽이나 배관상의 밸브나 수전 등에 작용하여 관을 순간적으로 신축시켜 진동을 발생시키고 소음을 일으키며 여기에 접속된 기기류에 손상을 주게 되며, 심한 경우에는 배관설비의 파손 및 누수 등의 사고원인이 된다.⁽¹⁻⁷⁾

따라서 수격작용에 의해 발생하는 압력을 제어하기 위한 방법으로는 상기에서도 언급한 바와 같이 조닝에 의한 정수두의 조정, 배관경의 설계시의 유속제한 등과 같은 방법을 들 수 있지만, 이와 같은 방법만으로는 수격작용에 의해 발생하는 충격파를 완전히 방지할 수는 없기 때문에 워터햄머 흡수기를 설치하여 수격작용에 의해 발생하는 충격압력을 완화하고, 또한 발생된 이상 압력을 배관 내의 압력 발생부위로 한정하는 방법⁽³⁻⁶⁾

을 사용하고 있다.

그런데 최근 들어 급수 및 급탕 배관재로 플라스틱 배관재인 폴리부틸렌관⁽⁸⁾이 많이 사용되고 있다. 이 관은 수격현상의 발생양상이나 최대발생압력이 급속관과는 다를 것이기 때문에 급속관에서와 같은 동일한 용량의 흡수기를 사용하여서는 안될 것이다.

이에 본 연구에서는 폴리부틸렌관에서의 효과적인 수격현상의 방지 및 제어를 위한 기초연구로서, 급수관로 내 수온 25°C, 정수압 1~5 bar, 유속 0.5~3 m/s 하에서 밸브 폐쇄시에 발생하는 압력특성에 대해 실험적으로 구명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 실험장치는 시험 배관부, 상류측에 서지탱크(전체적 0.5 m³) 및 헤더, 항온수조, 공기탱크(전체적 0.5 m³), 압축기, 배관시험부의 하류측 말단에 설치한 전자밸브로 구성되어 있다.

시험부는 폴리부틸렌관(KS M 3363, 내경 12.68 mm, 두께 1.6 mm)⁽⁸⁾으로 하였으며, 시험부의 길이는 전자밸브의 중심으로부터 헤더의 출구까지의 거리가 20 m가 되게 구성하였다. 압력측정을 위해 설치한 압력계의 위치는 전자밸브 중심으로부터 0.5 m되는 위치에 설치하여 압력을 측정하였다. 배관 내의 초기압력을 변화시키거나 일정하게 유지하기 위하여 공기압축기와 공기탱크를 이용하였으며, 배관 내의 사용유체는 급수설비용

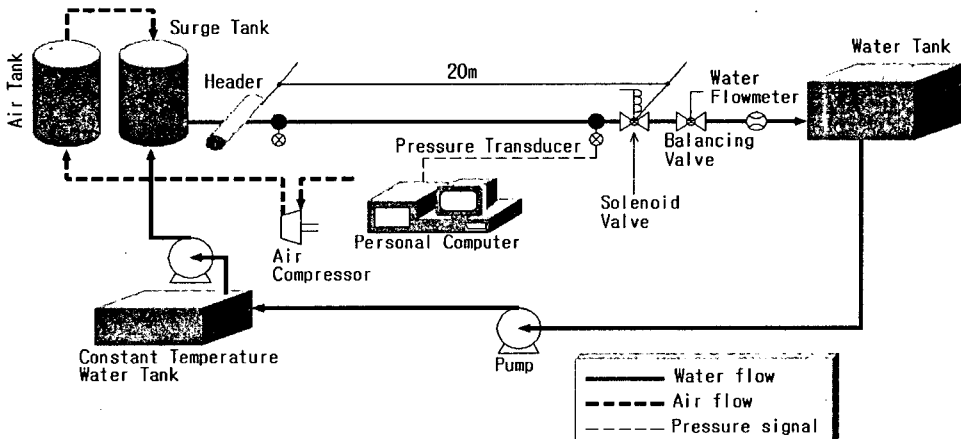


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

으로 상정하여 일반 수도물을 사용하였다. 또한 배관 내의 수온을 25℃로 일정하게 유지시키기 위하여 항온수조를 이용하였다. 그리고 펌프에 의해 서지탱크에 물을 보낸 후, 배관 말단에 설치된 밸런싱 밸브와 유량계에 의해 적정유량을 측정 후, 하류측 수조로 방류시킨 후, 순환펌프에 의해 항온수조로 순환시켰다.

전자밸브는 A/D 콘버터에 의해서 개폐할 수 있도록 하며, 밸브의 개폐시 발생하는 수격작용에 의한 압력파의 측정은 압력변동이 심하므로, 응답특성이 빠른 pressure transducer로 측정하여 A/D 콘버터를 통해 변환하고 측정된 압력값은 PC에 저장할 수 있도록 하였다.

압력 데이터의 1초당 샘플링수는 1,500개로 하였다. 전자밸브는 통전시 개방되는 형태의 솔레노이드 밸브(CKD사, ADK11)로서 급수압 및 유량에 따라 폐쇄시간이 변하게 된다.

탱크 내의 압력은 급수배관의 조닝시 압력을 약 2~4 bar로 조정하는 것을 고려하여, 1~5 bar로 변화시켰으며, 배관내 유속은 0.5~3.0 m/s 범위 하에서 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 배관 시험부의 전자밸브를 폐쇄하였을 때, 밸브 중심으로부터 0.5 m 떨어진 위치에서 측정된 압력을 시간변화에 대해 나타낸 것으로서, 배관 내의 초기압력이 3 bar이고 유속이 1 m/s인 경우이다. 시간 $t=0$ s는 압력 측정치를 기록하기 시작한 임의의 시간을 나타낸다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 시간변화에 따른 압력 측정치로부터 밸브 폐쇄시간 (T_c) 및 안정화된 이후, 수 개의 파장 (T_n)을 평균하여 1파장의 시간 (T_f)을 구

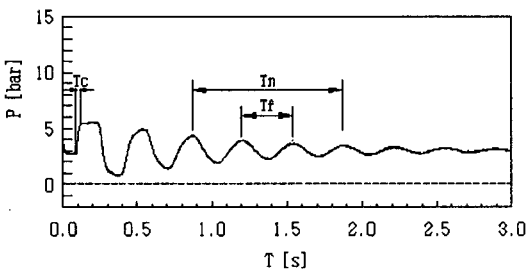


Fig. 2 Pressure variations generated by quick valve closure ($P_o=3$ bar, $V=1$ m/s).

할 수 있다. 본 연구에 사용된 솔레노이드 밸브는 통전시 개방되는 형태의 밸브이기 때문에 유량에 따라 밸브 폐쇄속도가 달라질 것으로 생각되어, 밸브 폐쇄속도를 다음과 같이 구하였다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 밸브로부터 상류측으로 0.5 m 떨어진 위치에서의 압력치를 시간경과에 따라 측정하여 배관 내의 압력이 급상승하는 시간부터 압력이 최대치가 되는 시간과의 차 T_c 를 밸브 폐쇄시간으로 하였다.⁽⁷⁾ Fig. 2의 경우에는 밸브 폐쇄시간이 0.022 s로 나타났으며, 본 실험범위 하에서의 밸브 폐쇄시간은 약 0.021~0.04 s로 측정되었다.

Fig. 3은 압력파의 전파속도를 유속변화에 대해 나타낸 것이다. 압력파의 전파속도는 1파장의 시간 (T_f)를 구하여, 식(1)을 이용하여 구하였다.^(1-2,7)

$$a = \frac{4L}{T_f} \tag{1}$$

이때, 1파장의 시간을 구하는 방법으로는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 압력파가 맥동상태가 되었을 때, 수 개 파장을 평균하여 구하였다.⁽⁷⁾

또한 배관 내의 압력파의 전파속도는 식(2)와 같이 표현된다.⁽¹⁻⁵⁾

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{DK}{Ee}} \cdot C} \tag{2}$$

여기서, C 는 배관의 지지상태에 의해 결정되는 값으로 $C=1$ 로 계산하는 경우가 많으며, 이때의

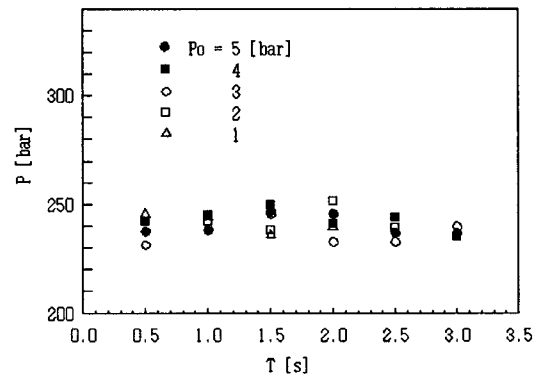


Fig. 3 Pressure wave propagation speed generated by valve closure.

폴리부틸렌관 내의 전파속도는 약 220 m/s로 된다. 본 연구에서 측정된 압력과 전파속도의 평균치는 약 240.6 m/s로 측정되었다.

그리고 Fig. 2의 조건에서 구한 밸브의 폐쇄속도가 약 0.022 sec이므로, 수격현상의 급폐쇄 영역에 해당되는 것을 식(3)^(1,2)으로부터 확인할 수 있다.

$$T_c < 2L/a = 2 \times 20/240.6 \approx 0.166 \text{ [sec]} \quad (3)$$

본 실험범위에서의 밸브 폐쇄시간은 0.021 ~ 0.04 sec로 나타났기 때문에, 급폐쇄 영역에 해당한다. 그런데 식(3)에서 알 수 있듯이 폴리부틸렌관의 압력파의 전파속도가 동관의 1,150.34 m/s에 비해 상당히 느린 약 240.6 m/s이기 때문에 이에 의한 급폐쇄 영역의 조건이 0.166 s로 길기 때문에, 실제 현장에서 사용되고 있는 각종 일반수전에서도 급폐쇄에 의한 수격현상이 발생될 것으로 생각된다.

Fig. 4는 각각 동관 및 폴리부틸렌관에서, 탱크 내 초기압력이 4 bar, 유속이 1.5 m/s일 때, 시간에 따른 배관 내의 압력변동을 나타낸 것이다. 밸브의 급폐쇄에 의해 밸브 직전의 상류측 배관 내의 압력은 동관 및 폴리부틸렌관 모두에서 급상승하게 되며, 압력의 최대 상승치는 동관에서 약 23.3 bar, 폴리부틸렌관에서는 7.75 bar로 나타

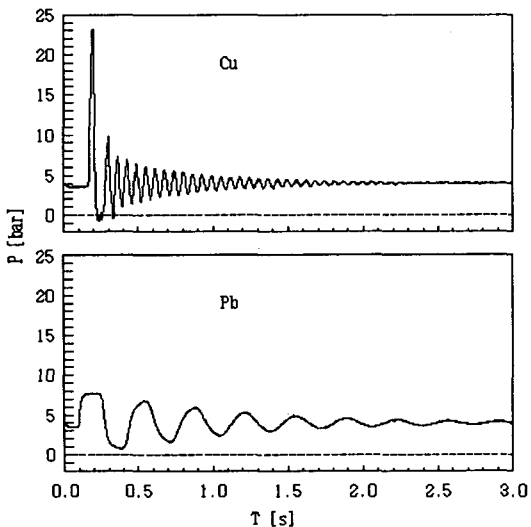


Fig. 4 Effect of pipe material on pressure histories ($P_o=4$ bar).

난다. 이것은 동관과 폴리부틸렌관에서의 탄성계수가 각각 약 135 GN/m^2 및 0.4 GN/m^2 으로서 다르고, 폴리부틸렌관이 유연하기 때문에 배관 벽면으로 팽창과 수축을 허용하면서 에너지를 흡수하기 때문이다. 그리고 압력파의 전파속도가 동관에서는 1,150.3 m/s, 폴리부틸렌관에서는 240.6 m/s로서 차이가 나기 때문에 동관에서 파장이 짧아지며, 폴리부틸렌관에서보다 일찍 소멸하게 된다. 또한 제 1 파의 파형도 다르게 나타나고 있다. 밸브 폐쇄 후 압력의 상승형태는 폴리부틸렌관의 경우, 압력의 상승이 있은 후 약 몇 초간 평탄한 압력의 상승이 있게 된다.

Fig. 5는 탱크 내 초기압력이 3 bar일 때, 시간에 따른 폴리부틸렌관 내의 압력변동을 배관 내의 유속 1, 2 및 3 m/s에 대해 나타낸 것이다. 밸브의 급폐쇄에 의해 밸브 직전의 상류측 배관 내의 압력은 급상승하게 되며, 유속증가에 따라 그 값은 약 5.5, 8.0 및 10.2 bar로 증가됨을 나타내고 있다. 그리고 유속이 2 및 3 m/s일 때는 부압(負壓)도 발생하게 된다. 유속이 증가할수록 부압

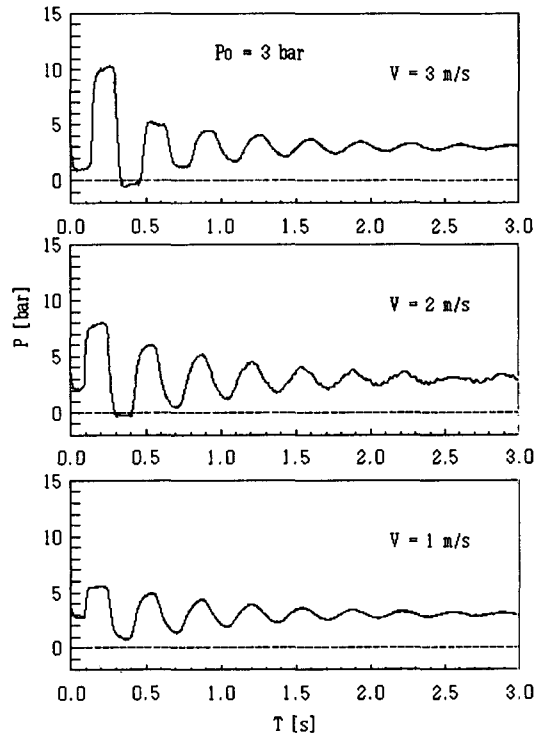


Fig. 5 Effect of flow velocity on pressure histories ($P_o=3$ bar).

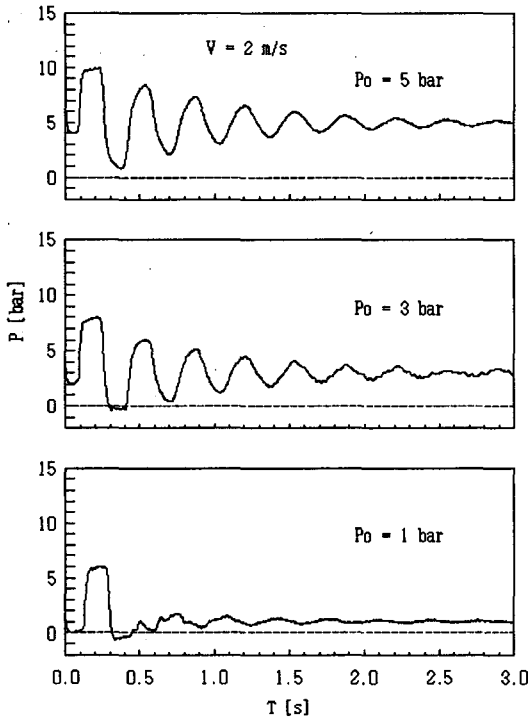


Fig. 6 Effect of initial steady pressure on pressure histories ($V=2\text{ m/s}$).

으로 되는 비율이 커짐을 나타내고 있다.

Fig. 6은 배관 내의 유속이 2 m/s일 때, 탱크 내 초기압력을 변화시킨 경우, 시간에 따른 압력 변동을 나타낸 것이다. 초기압력이 각각 1, 3 및 5 bar일 때 밸브폐쇄 직후에 발생된 최대압력은 6.03, 8.01 및 9.95 bar로서 초기압력 증가분 정도만 증가하게 됨을 알 수 있다. 밸브폐쇄 직후에 발생된 압력은 압력파의 전파속도 정도로 상류측으로 전파되며, 초기압력이 3 bar 이하에서는 부압도 발생하고 있다. 5 bar인 경우와 같이 초기정상압력이 큰 경우에는 첫번째 압력파 이후에도 압력변동이 크게 나타나고 있으며, 이와 같은 경향은 최초의 정상압력이 작을수록 두번째 파 이후의 압력변동이 작게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7은 초기압력 5 bar, 유속 3 m/s인 경우의 압력변동을 나타낸 것이다. 맥동압력의 최대치의 감쇄율을 시간의 함수로 나타내면 지수함수의 형태로 표현할 수 있다. 최대압력 상승치로부터 그 값의 95%까지 최대압력이 감쇄하는 데 걸리는 시간은 약 2.445 sec 걸린다.

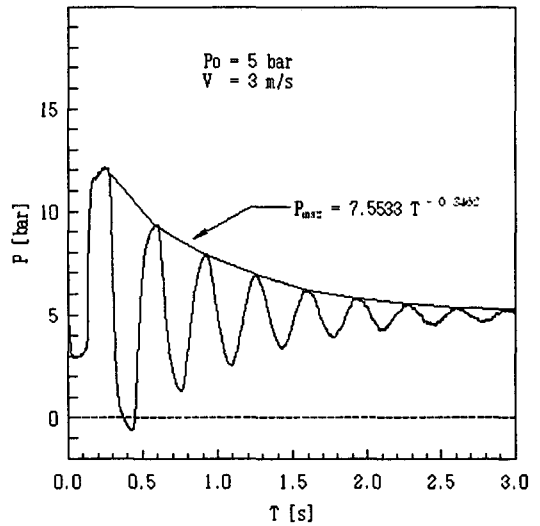


Fig. 7 Maximum pressure variations generated by quick valve closure ($P_o=5\text{ bar}$, $V=3\text{ m/s}$).

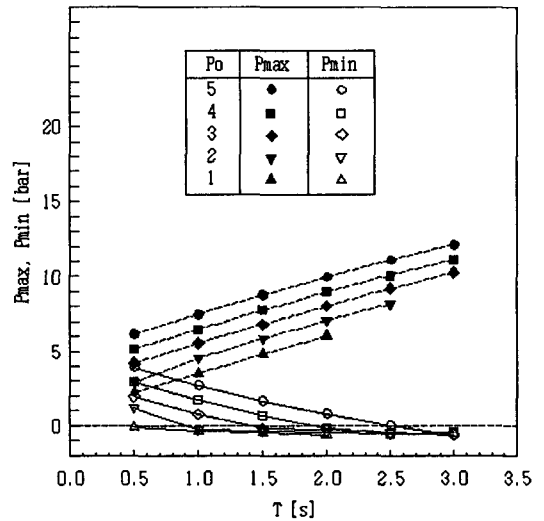


Fig. 8 Effect of initial pressure and flow velocity on peak and minimum pressure.

Fig. 8은 유속변화에 따른 전자밸브 직전에서의 최대발생압력 및 최소압력을 나타낸 것이다. 탱크 내 초기압력이 증가할수록 그리고 유속이 증가할수록 최대발생압력은 증가함을 나타낸다. 최소발생압력은 초기압력이 낮고, 유속이 빠를수록 낮은 압력을 나타내며, 대기압 이하의 부압이

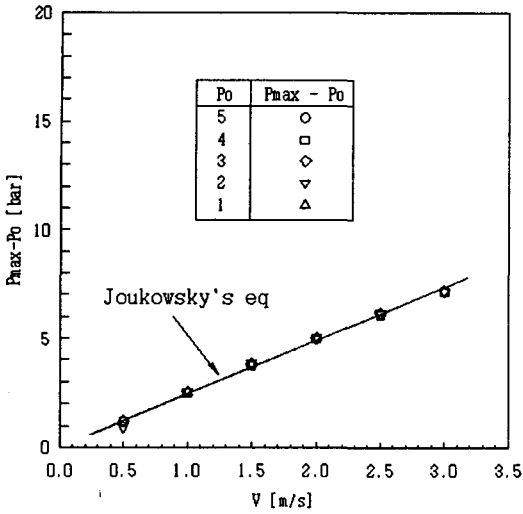


Fig. 9 Effect of initial pressure and flow velocity on peak pressure rise.

발생하기도 한다. 그런데, 일반적인 급수용 기구의 내압(耐壓)이 약 17.5 bar이고, 최고사용압력이 약 7.5 bar임을 고려할 때,⁽¹⁰⁾ 본 실험범위에서 발생한 최대압력이 17.5 bar를 넘지는 않고 있지만 수격현상에 의한 압력맥동의 발생 및 배관의 지지 정도에 따라 그리고 배관길이, 밸브 등과 같은 타재질의 사용 정도에 따라 최대발생압력 및 압력소멸에 걸리는 시간이 달라질 것으로 생각되기 때문에 실제 급수배관시스템에서는 수격에 의한 발생압력을 완화시킬 수 있는 방안을 강구하여야 할 것이다. 그리고 건물에 설치되는 폴리부틸렌관의 설계시, 수격작용에 의해 발생하는 압력 상승치가 작기 때문에 동관의 한계유속 1.5 m/s 보다는 빠르게 설계유속을 정할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 9는 밸브폐쇄시 발생하는 최대압력에서 탱크 내의 초기압력을 뺀 순수한 압력상승치를 유속에 따라 나타낸 것이다. 배관 내 유속이 증가함에 따라 최대압력상승치는 증가하지만, 탱크 내의 초기압력변화에 따른 효과는 거의 없음을 알 수 있다. 또한 그림 중 실선은 식(4)로 표시되는 Joukowski에 의한 발생압력 ($P_{max} - P_o$)을 나타낸 것으로서, Joukowski의 결과와도 일치하고 있다.

$$P_{max} - P_o = \rho \cdot a \cdot V_o \cdot 10^{-5} \text{ [bar]} \quad (4)$$

따라서 Fig. 2에서의 밸브폐쇄시간 및 압력과의 전파속도의 측정에 대한 고찰은 정확하다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 밸브 급폐쇄에 의해 발생하는 압력을 효과적으로 제어하기 위한 기초연구로서, 실제 급수배관으로 사용되고 있는 폴리부틸렌관 내에서 수온 25°C, 초기압력 1~5 bar, 유속 0.5~3 m/s의 범위 하에서 밸브의 급폐쇄시 발생하는 시간에 따른 압력변동에 대해 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 실험조건 하에서 압력과의 전파속도는 평균 240.6 m/s로 나타났다.
- (2) 배관 내에서의 최대압력상승치 $P_{max} - P_o$ 는 Joukowski의 결과와 잘 일치함을 나타낸다.
- (3) 밸브폐쇄시 발생하는 최대압력은 배관 내 유속이 증가할수록 증가하며, 초기압력 3 bar인 조건에서 유속이 1 m/s에서 3 m/s로 증가하면 약 2배 정도 증가한다. 그리고 초기압력 3 bar인 조건에서 유속이 2 및 3 m/s일 때는 부압(負壓)도 발생하게 된다. 유속이 증가할수록 부압으로 되는 비율이 커진다.
- (4) 동일 유속 하에서 발생하는 최대압력은 초기 정상압력이 증가할수록 초기압력 증가분 정도만 증가하는 것으로 나타나 초기압력이 최대압력에 미치는 영향은 작으나, 초기압력이 클수록 첫 번째 압력과 이후에도 압력변동이 크게 나타난다.

후 기

본 연구는 2004년도 유한대학 장기해외연수결과 논문으로서, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Zaruba, J., 1993, Water hammer in pipeline system, Elsevier.
2. Ballanco, 1995, Water hammer control, ASSE 1995 E. J. Zimmer Technical Seminar, pp. 53-55.
3. Han, H. T. and Kim, J. M., 1997, Effects of waterhammer arresters and air chambers in

- a simple water piping system of buildings, Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, SAREK, Vol. 5, pp. 13-20.
4. Lee, Y. H. and Yoo, J. O., 2000, A study of surge pressure absorption by water hammer arrester in water supply piping system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, SAREK, Vol. 12, No. 12, pp. 1066-1072.
 5. Kim, J. P., 1992, Development of optimum facility system for high-rise apartments (II), Report of KICT, 91 ME121-2 (in Korean).
 6. ASME, 1975, Water hammer arresters (ANSI A112.26.1-1969 (R1975)), The American Society of Mechanical Engineers.
 7. SHASE, 1996, HASS 212, The society of heating, air-conditioning the sanitary engineers of Japan (in Japanese).
 8. KS M 3363, 2003, Plastics piping systems for hot and cold water installations - Polybutylene pipes, Korean Standards Association.
 9. SAREK, 2001, Handbook of Air-conditioning, Refrigeration and Sanitary Engineering, SAREK, Vol. 4, pp. 24-28.
 10. KS B 2331, 1992, Faucets, Korean Standards Association.