

단순 급수관로에서의 워터 햄머 현상에 관한 연구

이 용 화[†], 유 지 오^{*}, 박 효 석^{**}, 김 영 호^{***}

유한대학 건축설비과, ^{*}신홍대학 건축설비과, ^{**}강남구청 건축과, ^{***}씨엔티 코퍼레이션

The Experimental Study of Water Hammer by Valve Closure in Water Supply Piping System

Yong-Hwa Lee[†], Ji-Oh Yoo^{*}, Hyo-Seok Park^{**}, Young-Ho Kim^{***}

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

^{*}Department of Building Equipment Engineering, ShinHeung College, Kyunggi, 117, Korea

^{**}Kangnam Office, Seoul, 135-091, Korea

^{***}C&T Corp., Seoul, 135-100, Korea

(Received January 15, 2000; revision received June 6, 2000)

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 copper piping system. Experiments were conducted under the following conditions : initial pressure 1~5 bar, flow velocity 0.6~3.0 m/s and water temperature 20°C. Results indicated that the peak pressure generated by quick valve closure reached Joukowsky's value. And we also found that the maximum pressure rise and the pressure history were depended on not only closing time but also flow velocity.

Key words: Water hammer(수격현상), Valve closure(밸브폐쇄), Pressure wave propagation speed(압력과 전파속도), Pressure rise(압력상승)

기 호 설 명

a : 압력파의 전파속도 [m/s]
 D : 동관의 내경 [mm]
 E : 동관의 종탄성계수 [N/m²]
 e : 동관의 두께 [mm]
 K : 물의 체적팽창계수 [N/m²]
 P : 밸브중심으로부터 0.5m 떨어진 위치에서의 게이지 압력 [bar]

P_0 : 시스템의 초기 게이지 압력 [bar]
 P_{max} : 수격에 의해 발생된 최대 게이지 압력 [bar]
 t, T : 시간 [sec]
 V : 배관내 유속 [m/s]

그리스 문자

ρ : 물의 밀도 [kg/m³]
 ν : 동관의 프와송 비

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-2-2610-0780; fax: +82-2-686-9537
 E-mail address: lyh@yuhan.ac.kr

1. 서론

배관내에서 급수전이나 밸브 등을 급폐쇄하면, 유체가 갖고 있던 운동에너지가 순간적으로 압력 에너지로 변환되고 수전 또는 밸브의 상류에서 압력이 급격히 상승하여 배관내의 전수압이 일정하게 될 때까지 압력파가 왕복하게 되는데, 이와 같이 배관내에서 유체의 에너지가 급변하여 압력 변화를 일으키는 것을 수격작용(water hammer)이라고 한다⁽¹⁻⁹⁾.

말단 밸브나 펌프에 의해 발생하는 수격현상에 관해서는 과거부터 많은 연구가 수행되어 왔으며, 여러 가지 해법이 제시되어 왔다. 그러나 말단밸브나 체크밸브 등과 같이 경계조건이 명확한 경우에는 복잡한 관로일지라도 수치해법에 의한 예측이 가능하지만, 경계조건이 불명확한 것에 대해서는 계산치와 실험치가 잘 일치하지 않는다. 건축설비분야에서도 이 경계조건이 불명확하기 때문에 예측이 쉽지 않지만, 타 설비분야와 비교하였을 때 관경이 작고, 유량이 적으며, 또한 공급수압이 작았기 때문에 그동안 크게 문제시하지 않았다. 그러나 건축물이 고층화되면서, 건축물내의 수직배관의 길이가 길어지게 되고, 이로 인한 배관내의 수압 증대 때문에 물소비량 증대, 소음 및 진동, 그리고 누수와 같은 배관계에 발생하는 제문제를 해결하고자 실제 설계시에는 조닝(zoning)을 통해 압력을 조정하고 있다. 그러나 건축물의 배관계를 정밀하게 조정하기가 쉽지 않기 때문에 각 존(zone)의 저층 부분은 압력이 높아지게 되고, 또한 1개 레버식 수전의 사용으로 인한 수전의 개폐속도가 빠르게 되면서 급수배관계에서도 수격현상에 의한 폐해에 관심을 갖게 되었다.

이에 본 연구에서는 효과적인 수격현상의 방지 및 제어를 위해, 실제 급수배관으로 사용되고 있는 동관으로 시험부를 구성하고 밸브폐쇄시에 발생하는 압력특성에 대해 실험적으로 구명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 시험배관부, 상류측에 서지 탱크(전체적 0.5 m³) ③ 및 헤더 ④, 항온수조 ①, 공기탱크(전

체적 0.5 m³) ⑨, 압축기 ⑧, 배관시험부의 하류측 말단에 설치한 폐쇄 밸브 ⑤로 구성되어 있다.

시험부는 동관(KS D 5301 L type, 내경 19.96 mm, 두께 1.14 mm)으로 하였으며, 시험부의 길이는 전자밸브의 중심으로부터 헤더의 출구까지의 거리가 18 m가 되게 구성하였다. 압력측정을 위해 설치한 압력계의 위치는 전자밸브 중심으로부터 0.5 m되는 위치에 설치하여 압력을 측정하였다. 배관내의 초기압력을 변화시키거나 일정하게 유지하기 위하여 공기압축기와 공기탱크를 이용하였다. 배관내의 사용유체는 급수설비용으로 상정하여 일반 수도물을 사용하였으며, 배관내의 유체의 온도를 20℃로 일정하게 유지시키기 위하여 항온수조를 이용하였다. 그리고 펌프(7.5 kW, 120 ℓ/min)에 의해 서지탱크에 물을 보낸 후, 유량측정용 오리피스를 거쳐 하류측 수조로 방류시킨 후, 순환펌프에 의해 항온수조로 순환시켰다.

폐쇄밸브는 A/D컨버터에 의해서 개폐할 수 있도록 하며, 밸브의 개폐시 발생하는 수격현상에 의한 압력파의 측정은 압력 변동이 심하므로, 응답특성이 빠른 pressure transducer(PMP 4070)로 측정하여 A/D컨버터를 통해 변환하고 측정된 압력값은 PC에 저장할 수 있도록 하였다.

압력 데이터의 1초당 샘플링수는 1,500개로 하였다. 폐쇄밸브는 통전시 개방되는 형태의 솔레노이드 밸브(CKD사, ADK11)로서 급수압 및 유량에 따라 폐쇄 시간이 변하며, 본 실험에 사용한 밸브의 폐쇄시간은 약 0.025~0.04 sec였다.

탱크내의 압력은 급수배관의 조닝시 압력을 약 3~5 bar까지 조정하는 것을 고려하여, 1~5 bar로 변화시켰으며, 배관내 유속은 0.6~3.0 m/s 범위하에서 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 밸브 폐쇄속도와 압력파의 전파속도

Fig. 2는 배관 시험부의 솔레노이드 밸브를 폐쇄하였을 때, 밸브 중심으로부터 0.5 m 떨어진 위치에서 측정한 압력을 시간 변화에 대해 나타낸 것으로서, 배관내의 초기압력이 4 bar이고 유속이 약 0.8 m/s인 경우이다. 시간 $t=0$ sec는 압

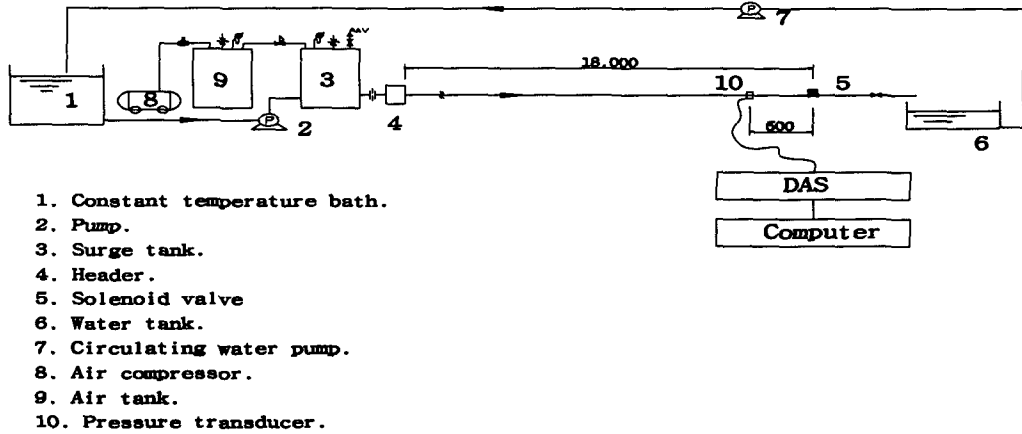


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

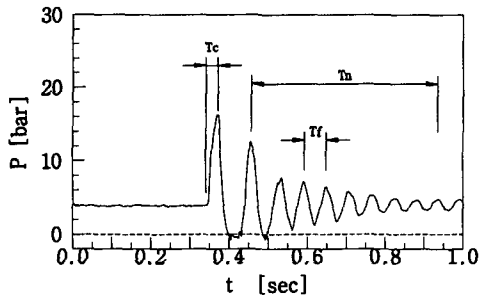


Fig. 2 Pressure variations generated by quick valve closure ($P_0=4$ bar, $V=0.8$ m/s).

력측정치를 기록하기 시작한 임의의 시간을 나타낸다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 시간 변화에 따른 압력 측정치로부터 밸브 폐쇄시간(T_c) 및 1파장의 시간(T_f)을 구할 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 나타난 바와 같이 밸브로부터 상류측으로 0.5 m 떨어진 위치에서의 압력치를 시간경과에 따라 측정하여 배관내의 압력이 급상승하는 시간부터 압력이 최대치가 되는 시간과의 차 T_c 를 밸브 폐쇄시간으로 하였으며⁽⁹⁾, 이 방법의 타당성은 Fig. 7로 확인하였다. Fig. 2의

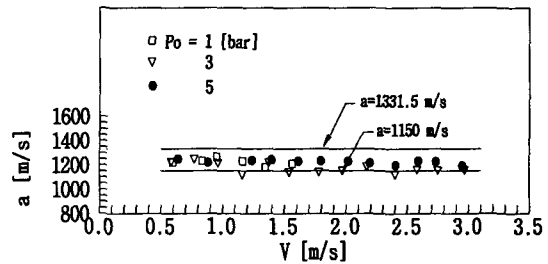


Fig. 3 Pressure wave propagation speed generated by valve closure.

경우에는 밸브폐쇄시간이 0.026 sec로 나타났으며, 본 실험 범위하에서의 밸브폐쇄시간은 약 0.025~0.04 sec로 측정되었다.

Fig. 3은 압력파의 전파속도를 유속변화에 대해 나타낸 것이다. 압력파의 전파속도는 1파장의 시간(T_f)를 구하여, 식 (1)을 이용하여 구하였다⁽¹⁻⁹⁾.

$$a = 4L / T_f \quad (1)$$

이 때, 1파장의 시간을 구하는 방법으로는 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 압력파가 맥동상태가 되었을 때, 수 개 파장을 평균하여 구하였다⁽⁹⁾.

또한 배관내의 압력파의 전파속도는 식 (2)와

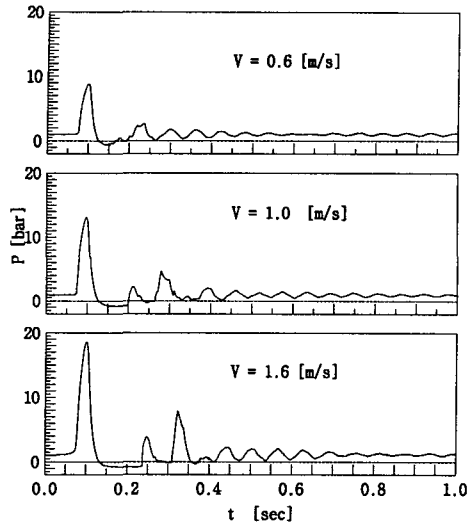


Fig. 4 Effect of flow velocity on pressure histories ($P_0=1$ bar).

같이 표현된다.⁽³⁻⁸⁾

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

여기서, C 는 배관의 지지상태에 의해 결정되는 값으로 $C=(5/4 - \nu)$ 으로⁽⁶⁾ 계산하였을 때의 압력파의 전파속도는 약 1,331.5 m/s 정도로 계산되지만, 실제의 전파속도는 이 값보다 작아지기 때문에 $C=1$ 로 계산하는 경우가 많으며, 이때의 동관내의 전파속도는 1150.34 m/s로 된다. 본 연구에서 압력파 전파속도의 평균치는 1,204 m/s로 측정되었으며, 1331.5 m/s보다는 작지만 $C=1$ 로 하는 경우보다는 크다.

그리고, Fig. 2의 조건에서 구한 밸브의 폐쇄속도가 약 0.026 sec 이므로, 수격현상의 급폐쇄 영역에 해당되는 것을 식 (3)으로부터 확인할 수 있다.

$$T_c < 2L/a = 2 \times 18/1,330 \approx 0.03[\text{sec}] \quad (3)$$

본 실험범위에서의 밸브 폐쇄시간은 0.025~0.04 sec로 나타났기 때문에, 급폐쇄 영역과 완폐

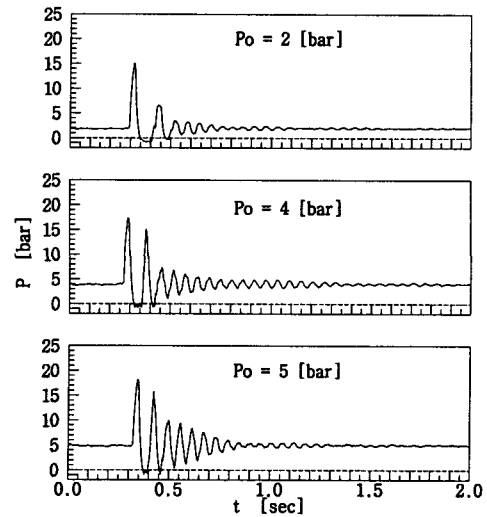


Fig. 5 Effect of initial steady pressure velocity on pressure histories ($V=1$ m/s).

쇄 영역이 동시에 존재하며, 이것에 대해서는 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

3.2. 수격작용에 의한 발생압력

Fig. 4는 탱크내 초기압력이 1 bar일 때, 시간에 따른 배관내의 압력변동을 배관내의 유속 0.6, 1.0 및 1.6 m/s에 대해 나타낸 것이다. 밸브의 급폐쇄에 의해 밸브직전의 상류측 배관내의 압력은 급상승하게 되며, 유속 증가에 따라 그 값은 약 8.9, 13.0 및 18.7 bar로 증가됨을 나타내고 있다. 그러나 유속이 증가할수록 부압(負壓)으로 되는 비율이 커지며, 또한 유속 1 m/s 이상에서는 포화증기압(20℃일 때의 물의 포화증기압은 -0.779 59 bar) 이하로까지 강하하여 밸브근처에서 증기의 발생이 커지기 때문에 두 번째 압력파의 상승은 보다 늦게 나타나고 있다.

Fig. 5는 배관내의 유속이 1 m/s 일 때, 탱크내 초기압력을 변화시킨 경우, 시간에 따른 압력변동을 나타낸 것이다. 밸브폐쇄 직후에 발생된 압력을 초기압력 변동에 따라 살펴보면, 초기압력 증가분 정도만 증가하게 됨을 알 수 있다. 밸브폐쇄 직후에 발생된 압력은 압력파의 전파속도 정도로 상류측으로 전파되며, 상류측 탱크로부터

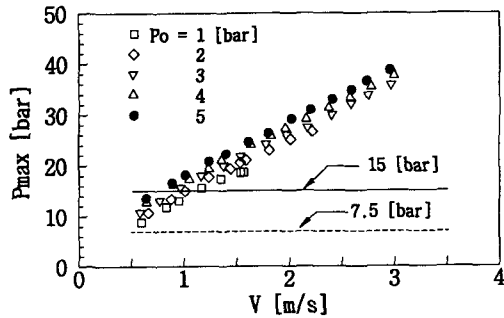


Fig. 6 Effect of initial pressure and flow velocity on peak pressure.

발생된 부압의 파는 폐쇄밸브에서 재반사되어 -1.013 bar 부근까지 강하되어, 기포의 발생을 동반한 압력완화가 생겨 거의 일정한 압력을 유지하고 있다고 생각된다. 5 bar인 경우와 같이 초기정상압력이 큰 경우에는 첫 번째 압력과 이후에도 압력변동이 크게 나타나고 있으며, 이와 같은 경향은 최초의 정상압력이 작을수록 두 번째 파 이후의 압력변동이 작게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6은 유속변화에 따른 폐쇄밸브 직전에서의 최대 발생압력을 나타낸 것이다. 탱크내 초기압력이 증가할수록 그리고 유속이 증가할수록 최대발생압력은 증가함을 나타낸다. 그런데, 일반적인 급수용 기구의 내압(耐壓)이 약 17.5 bar이고, 최고사용압력이 약 7.5 bar임을 고려할 때⁽¹⁰⁾, 급수관내의 수압이 1 bar, 배관내 유속이 0.6 m/s 일 때도 이 한계치를 넘기 때문에 실제 급수배관 시스템에서는 최대발생압력을 완화시킬 수 있는 방안을 강구하여야 할 것이다.

Fig. 7은 밸브 폐쇄시 발생하는 최대압력에서 탱크내의 초기압력을 뺀 순수한 압력상승치를 유속에 따라 나타낸 것이다. 배관내 유속이 증가함에 따라 최대 압력 상승치는 증가하지만, 탱크내의 초기압력변화에 따른 효과는 거의 없음을 알 수 있다. 또한 그림 중 실선은 식 (4)로 표시되는 Joukowsky에 의한 발생압력 ($P_{max} - P_0$)을 나타낸 것으로서, 유속이 약 2.4 m/s 이하인 영역에서는 Joukowsky의 결과와도 일치하고 있다.

$$P_{max} - P_0 = \rho \cdot a \cdot V_0 \cdot 10^{-5} \quad [\text{bar}] \quad (4)$$

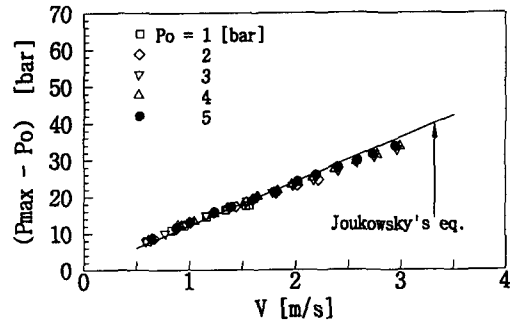


Fig. 7 Effect of initial pressure and flow velocity on peak pressure rise.

배관내 유속이 2.4 m/s 이상인 경우에는 Joukowsky의 값보다 약간 작게 나타나는데, 이것은 밸브폐쇄시간이 느려 완폐쇄 상태가 되기 때문이라고 생각된다. 따라서 Fig. 2에서의 밸브폐쇄시간에 대한 고찰은 정확하다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 밸브 급폐쇄에 의해 발생하는 압력을 효과적으로 제어하기 위한 기초 연구로서, 실제 급수배관으로 사용되고 있는 동관내에서 수온 20℃, 초기압력 1~5 bar, 유속 0.6~3 m/s의 범위하에서 밸브의 급폐쇄시 발생하는 압력에 대해 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 실험 조건하에서 압력파의 전파속도는 평균 1,204 m/s로 나타났다.

(2) 밸브폐쇄시 발생하는 최대 압력은 배관내 유속이 증가할수록 증가하며, 초기압력 1 bar인 조건에서 유속이 0.6 m/s에서 1.6 m/s로 증가하면 약 2.1배 정도 증가한다. 그리고 초기압력 1 bar인 조건에서 유속이 증가하면 부압의 크기가 증가되며, 또한 1 m/s 이상에서는 포화증기압 이하로 강하되어 증기의 발생으로 인해 두 번째 압력파의 상승이 늦게 나타나고 있다.

(3) 동일 유속하에서 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.

(4) 배관내에서의 최대 압력변동 $P_{max}-P_o$ 은 유속이 2.4 m/s 이하에서는 Joukowsky의 결과와 잘 일치하지만 2.4 m/s 이상에서는 약간 작은 값을 보이고 있는데, 그 이유는 밸브폐쇄가 완폐쇄 상태로 작동되었음을 나타낸다.

(5) 배관내의 정수두가 작고 유속이 작은 경우라도 급폐쇄에 의해 발생하는 최대압력을 완화시키기 위한 대책이 필요함을 알았다.

참고문헌

1. Ballanco, 1995, Water hammer control, ASSE 1995 E. J. Zimmer Technical Seminar, pp. 53-55.
2. ASME, 1975, Water hammer arresters (ANSI A112.26.1-1969 (R1975), The American Society of Mechanical Engineers.
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. Noriyuki Takahashi and Fumitoshi Kiya, 1977, A study on water hammer and prevention in water supply piping system of building, Transactions of the society of heating, air - conditioning the sanitary engineers of Japan, No. 4, pp. 51-59.(in Japanese)
5. Kuwahara Takumi et al, 1992, A fundamental study of the water hammering in hot water supply pipes, Proceedings of the society of heating, air- conditioning the sanitary engineers of Japan, pp. 865- 868.(in Japanese)
6. Kim, J. P., 1992, Development of optimum facility system for high-rise apartments(II), Report of KICT, 91 ME121-2.(in Korean)
7. SAREK, 1996, Handbook of air-conditioning, refrigeration and sanitary Engineering-plumbing fire protection environmental health, SAREK.(in Korean)
8. Noriyuki Takahashi, 1982, A study on prevention of water hammer in water supply piping system of building, Journal of the society of heating, air-conditioning the sanitary engineers of Japan, Vol. 56, No.9, pp. 45-53.(in Japanese)
9. SHASE, 1996, HASS 212, The society of heating, air-conditioning the sanitary engineers of Japan.(in Japanese)
10. KS B 2331, 1992, Faucets, Korean Standards Association.(in Korean)