

탄성관을 삽입한 관로에서의 비정상류에 관한 연구

김 영준* ·塚本 寛**

Study on Transient Flow in Pipeline with Flexible Tube

Young-Joon Kim*, Hiroshi Tsukamoto**

Key Words : Transient flow(비정상류), Flexible tube(탄성관), Viscoelasticity(점탄성), Pipeline(관로)

ABSTRACT

Experimental and numerical study was done to confirm the effect of the flexible tube in pipeline on transient flow oscillation. Experiment was made for a pipeline with and without deformable flexible tube using a single pumping system of main stainless pipe. The wave speeds of main pipe and flexible tube were calculated from the pipe material properties, structures, and boundary conditions. Time dependent pressure fluctuations were calculated for the pipeline using the simple and the Kelvin-Voigt viscoelastic models for the deformation of main pipe and flexible tube. Pressure calculated by the Kelvin-Voigt viscoelastic model showed better agreement with measured one than pressure by the simple model. Experimental and numerical results show that the maximum pressure as well as amplitude of pressure oscillation was decreased by inserting short flexible tube in pipeline. Hence, inserted short flexible tube to pipeline was found to be effective for the suppression of strong pressure oscillation. Moreover, the wave speed in pipe was discussed based on numerical and experimental results.

1. 서론

산업현장에서 비정상류에 의해 발생한 압력파로 인해 유체 수송시스템이 손상을 입는 문제가 발생하고 있다. 이 압력파는 정전에 따른 펌프 정지, 밸브 조작 등에 의해 유체 흐름이 급변할 경우, 그 운동량 변화는 압력파가 되어 관로의 상하류로 전파되는 것이다⁽¹⁾.

이 압력파를 완화하기 위해 다양한 방법이 이용되어 왔으나, 현실적으로 적용이 곤란하거나, 막대한 비용이 소요되는 경우도 있다. 따라서, 그 대안으로 탄성관을 주관의 일부에 투입하여 압력 변동을 완화시키는 방법에 관한 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 탄성관을 삽입하여 얻어지는 압력 완화 효과와 그 메커니즘을 실험과 수치해석으로 규명하는 것을 그 목적으로 하고 있다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 실험 장치를 보여주고 있다. 유체 공급은 설계 유량 21 l/min, 양정이 16 m인 원심펌프를 이용하였다. 일정 압력을 유지시키기 위해 압력탱크가 펌프의 토출측에 설치되었다. 비정상류는 하류측에 설치된 20 mm의 전자 밸브를 이용하여 발생시켰다. 유량과 압력은 하류의 20 mm 볼 밸브로 조절하였고, 압력은 0 ~ 1 MPa의 측정범위를 갖는 압력 센서를 상, 하류측에 각각 설치하여 측정하였다. 압력 신호는 A/D 변환기를 통해 컴퓨터에 인식시켰고, 샘플링 주파수는 1 kHz이었다.

* 큐슈공업대학 대학원 생명체공학연구과

** 큐슈공업대학

E-mail : kimuchan0810@hotmail.com

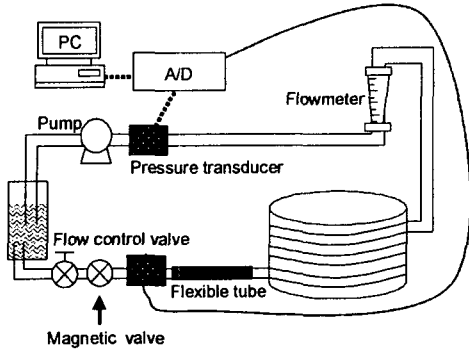


Fig. 1 Experimental apparatus

주관로와 탄성관의 주요 재원 및 특성은 Table 1에서 설명하고 있다. Table 1에서 알 수 있듯이 벨로우즈관이 주관로로 선택되었는데, 이는 벨로우즈관이 감을 수 있는 성질로 인해, 좁은 장소에서도 실험장치를 구성할 수 있었기 때문이었다. 주관로의 재질은 SUS 316L로, 그 탄성계수는 193 GPa, 프와송의 비는 0.26이다. 탄성관의 경우는 고탄성 PVC로 탄성계수는 69.8 MPa, 프와송의 비는 0.5이었다⁽²⁾.

실험은 탄성관이 없는 경우와 탄성관을 1, 2, 3 m 삽입한 경우로 실시되었으며, 유량에 대해서는 8, 9, 10 및 16 l/min의 경우로 나누어서 실시되었다.

3. 수치계산

원관내의 유체의 흐름을 통상적인 가정 하에서, 1차 원으로 해석할 경우 다음과 같은 운동 및 연속 방정식을 얻을 수 있다.

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f|V|V}{2D} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho A) + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} = V \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \quad (3)$$

만약, 마하수가 작고, 유체의 압축성을 무시할 수 있다면, 식 (2)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

Table 1 Property of main pipe and flexible tube

| | Diameter | | t(mm) | L(m) | Schematic |
|---------------|----------|-------|-------|------|-----------|
| | d_o | d_i | | | |
| Main pipe | 24 | 19.8 | 0.3 | 86 | |
| Flexible tube | 19 | | 2 | 1-3 | |

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

그리고, 여기에서 음속 c 는 다음과 같다.

$$c^2 = \frac{K/\rho}{1 + (K/A)/(\Delta A/\Delta p)} \quad (5)$$

탄성관에서의 변형률은 단순 모델은 순간 탄성 성분(ϵ^i)만을, 점탄성 모델에서는 순간 및 지연 탄성 성분($\epsilon^i + \epsilon^r$)을 함께 감안하였다.

$$\frac{dH}{dt} \pm \frac{c}{g} \frac{dV}{dt} \pm \frac{c}{g} \frac{f|V|V}{2D} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{dH}{dt} \pm \frac{c}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{2c^2}{g} \frac{d\epsilon^r}{dt} \pm \frac{c}{g} \frac{f|V|V}{2D} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dx}{dt} = \pm c \quad (8)$$

여기에서, x : 길이 방향의 거리, t : 시간, H : 수두, V : 속도, D : 관 직경, g : 중력 가속도, K : 체적 탄성률, ρ : 물의 밀도, A : 관 단면적, p : 압력, f : 저항 계수이다.

여기에서, 지연 탄성 성분은 다음의 식을 통해 얻을 수 있다.

$$\frac{d\epsilon^r}{dt} = \frac{1}{\tau_1} \left(-\frac{pr}{E_1 t} - \epsilon^r \right) \quad (9)$$

식 (6)은 단순 모델을 위한 것이고, 식 (7)은 점탄성 모델의 경우에 적용된다. 점탄성 모델은 Fig. 2와 같은 Kelvin-Voigt 모델을 적용하였다. 주관이 벨로우즈관은 압력에 의해 스프링과 같이 길이 방향으로 변화하는 특성을 가지고 있어, 이것이 음속에 반영되었다.

4. 실험 및 계산 결과

4.1. 탄성관의 효과

Fig. 3은 유량 10 l/min에 대한 탄성관이 없는 경우와 탄성관을 삽입한 경우의 압력파의 변동을 보여주고 있다. 탄성관을 삽입함으로써 최대압력은 저감되고, 압력파의 간격은 넓어진 것을 알 수 있다. 이 결과로 탄성관이 비정상류에 의한 압력 상승을 완화시키는 효과가 있다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 3 m의 탄성관을 삽입하여 10 l/min의 유량에서 측정된 실험 결과와 단순 및 점탄성 모델의 계산 결과를 보여주고 있다. 점탄성 모델이 실험 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이것은 점탄성 모델은 압력의 변화에 따른 관의 단면 변화를 고려하였기에 실제 현상과 근사한 결과를 예측하였다고 생각되어진다.

4.2. 벨로우즈관의 영향

주관으로 벨로우즈관을 사용하여, 그 형상에 따른 특성을 고려하였다. Fig. 5는 유량을 8, 9, 10 및 16 l/min로 조절하면서 그 압력 변동을 측정된 결과이다. 이 그림에서 유량의 증가에 따라 압력파의 주기가 길어지는 것을 확인할 수 있다.

한편, 벨로우즈관의 응력에 대한 길이 방향의 변형률 ϵ_1^{total} 은 다음과 같이 계산 가능하다.

$$\epsilon_1^{total} = \frac{1}{E} \times (\sigma_1 - \nu \sigma_2) + \frac{\Delta L}{L} \quad (10)$$

여기서, E는 탄성계수, ν 는 프와송의 비, σ_1 및 σ_2 는 축 방향 및 원주 방향 응력, $\Delta L/L$ 은 벨로우즈관의 탄성에 의한 변형률이다. 이것은 후크의 법칙, $\Delta L = F/R$ 에서 구해진다. 여기에서 F는 힘, R은 스프링 계수이다. 벨로우즈관의 이론 스프링 계수는 다음 식에 의해서 구해질 수 있다⁽³⁾.

$$R = \frac{4.3 \times E \times (D_o + D_i) \times t^3}{3 \times (D_o - D_i - t)^3 \times N} \quad (11)$$

유량의 변동에 의해 음속이 변화하는 것은 벨로우즈관의 스프링 계수가 최초의 정상 압력에 의해 변화되어, 탄성이 변하는 것이 그 원인이라고 생각된다.

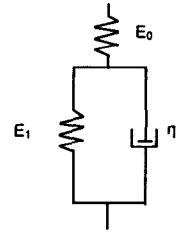


Fig. 4 Kelvin-Voigt model

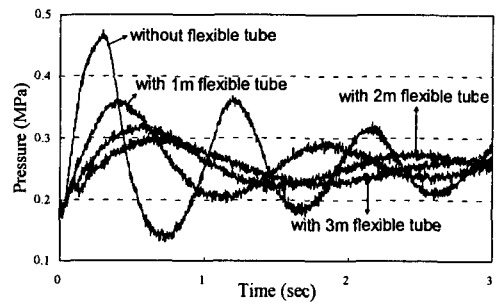


Fig. 5 Time histories of pressure in pipeline with and without flexible tube

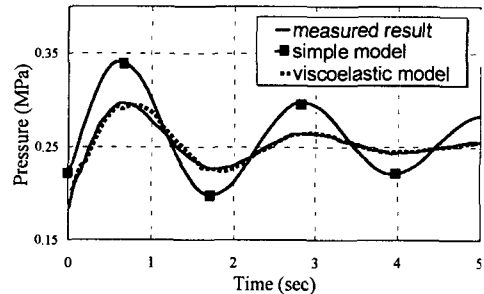


Fig. 6 Comparison between measured pressure and calculated results

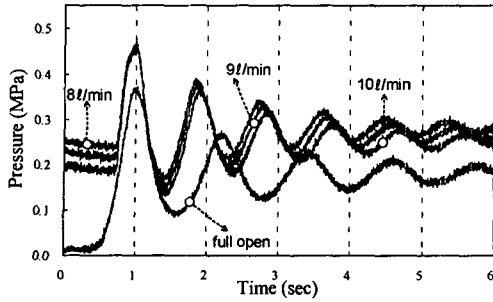


Fig. 7 Pressure fluctuations for various flow rates

참고문헌

- (1) Wylie, E. Benjamin and Streeter, L. Victor, "Fluid transients in systems", Prentice Hall, 1993
- (2) Ghilardi, P. and Paoletti, A, "Additional viscoelastic pipes as pressure surges suppressors", Proc., 5th Int. Conf. on Pressure Surge BHRA, 1986, pp. 113~121.
- (3) Seal Tech. INC. Web page, http://www.sealtech.co.jp/servometer/d_method.html

5. 결론

실험 및 수치해석에 의해, 탄성관을 일부 삽입하는 것으로 관로에서의 비정상 흐름에 의한 압력 상승을 완화하는 효과를 확인하였다. 주관 길이의 1.2 %인 탄성관을 삽입하여 최대 압력을 23 % 저감하였다.

주관 및 탄성관의 음속은 관의 재질과 경계 조건을 이용하여 계산하였다. 주관의 음속은 272 m/s로부터 368 m/s까지 유량의 변화에 의해 변화하였고, 이 음속의 각 유량 조건에서의 정상 압력에 비례하였다. 이것은 벨로우즈관의 특성에 의한 결과라고 판단된다.