

유압 호스에서의 주파수 계열 음속 계측법 개발

A Method for Measuring the Frequency Series Wave Speed in Hydraulic Hose

강만곤 · 이일영
M. K. Kang and I. Y. Lee

Key Words : Wave Speed(음속), Viscoelastic Pipe(점탄성 관로), Frequency Series(주파수 계열), Pressure Pulsation(압력 맥동), Transfer Matrix(전달 매트릭스)

Abstract: With the increasing concerns on noise and vibration in hydraulic fluid power systems, it is important to find better way to reduce noise and vibration. In this study, the authors survey former researches on hose(viscoelastic tube) modeling in advance. And a summary of several existing methods for measuring the speed of sound in the fluid in pipes is presented. Their basic principles, advantages and limitations are compared. And The authors suggest a far simple identification procedure to obtain wave speed in hose by just using an experimental pressure data for the object tube with hose. In the new procedure, flow in hose is basically modeled by transfer matrix method, and wave speed in hose is obtained as data in frequency series. The wave speed in hose as data in frequency series will be used to compute the pressure pulsation attenuation in hydraulic pipe systems. The computed results are compared with the experimental ones, and the validity of the new procedure to obtain wave speed in hose is confirmed

1. 서 론

유압장치 소음의 대부분은 유압 관로 내에 발생하는 압력맥동에 기인한 유체 전파 소음이다. 이러한 유체 전파 소음의 효과적인 저감을 위해서는 압력맥동의 기진원인 유압펌프의 토출 유량맥동과 유체 진동·소음의 전달체인 유압관로 구성장치의 유체·음향 특성을 파악하고 모델화하는 것이 선행되어야 한다. 만약, 유압관로 구성장치의 정확한 수학적 모델이 확립된다면, 설계변수의 변경에 따른 압력맥동의 저감화 효과를 정확하게 시뮬레이션 할 수 있고, 유압기기의 저소음화 설계에 많은 도움이 될 것이다. 그러나 금속 관로 이외의 고압호스와 같은 점탄성 관로에 대해서는 정확한 수학적 모델을 이론적으로 구하는 것은 매우 어렵고, 점탄성 관로에서의 음속 등 물리 파라미터의 측정 또한 매우

어렵다.

본 논문에서는 유압관로의 동특성을 파악하는데 중요한 물리변수인 유체의 음속 계측법에 관해 선행연구자들의 방법을 고찰하고, 그 장단점을 살펴본다. 또한 기존의 음속 계측법이 음속을 계측하는데 비교적 오랜 시간이 걸리는 시험법이므로 본 논문에서는 이러한 단점을 해결하기 위해 한번의 실험으로 넓은 주파수 대역의 음속을 데이터로 얻어내는 새로운 음속 계측법을 제안한다.

2. 점탄성 관로 내 음속의 모델링

2.1 관로 벽의 반경 방향 변형을 고려한 모델

유압용 고압호스의 관로 벽은 탄성뿐만 아니라 점성을 갖는 물질로 알려져 있다. 고압호스 내부 압력변화에 따른 고압호스의 반경 방향 변형에 관한 동특성을 기술하는 대표적인 점탄성 모델을 Table 1에 나타낸다.¹⁾

Table 1의 (a)에 나타난 3인자 모델을 이용하여 근사되는 점탄성 관로 내에서의 파동전파 속도 c_h 는 다음과 같이 표시된다.

접수일 : 2006년 4월 19일

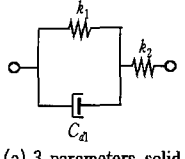
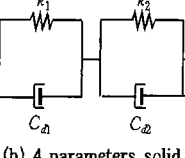
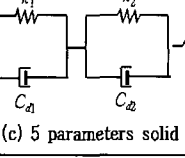
강만곤(책임저자) : 부경대학교 기계공학부

E-mail : ezekiel2@hanmail.net, Tel : 051) 620-1612

이일영 : 부경대학교 기계공학부

E-mail : iylee@pknu.ac.kr, Tel : 051) 620-1612

Table 1 Wall model of flexible hose

model	dynamic elasticity modulus
 <p>(a) 3 parameters solid</p>	$k^*(j\omega) = \frac{k(1 + j\omega T_1)}{1 + j\omega T_2}$
 <p>(b) 4 parameters solid</p>	$k^*(j\omega) = \frac{k(1 + j\omega T_1)(1 + j\omega T_2)}{1 + j\omega T_3}$
 <p>(c) 5 parameters solid</p>	$k^*(j\omega) = \frac{k(1 + j\omega T_1)(1 + j\omega T_2)}{1 + j\omega T_3 - \omega^2 T_4^2}$

$$c_h = c_h' \sqrt{\frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}}, \quad c_h' = \sqrt{\frac{Rk}{2\rho}} \quad (1)$$

2.2 관로 벽의 반경·축 방향 변형을 고려한 모델
 고압호스 내부의 압력변화에 따른 고압호스의 반경 방향 및 축 방향 변형에 관한 동특성을 기술하는 점탄성 모델을 Fig. 1에 나타내었다.²⁾

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ Q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\lambda_2 l) & Z_0 \sinh(\lambda_2 l) \\ 1/Z_0 \sinh(\lambda_2 l) & \cosh(\lambda_2 l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\lambda_2 = \frac{s}{C_{ve}} \{1 - B_r(ja\sqrt{s/\nu})\}^{-1/2}$$

$$Z_0 = \frac{\rho \lambda_2 C_{ve}^2}{\pi a^2 s}$$

$$C_{ve} = \sqrt{\frac{K_l/\rho}{1 + (K_l/E_\theta^*)(2b/h)}}$$

$$E_\theta^* = E_\theta \frac{(1 + \tau_{e\theta,t,1} \cdot s + \tau_{e\theta,t,2} \cdot s^2)}{(1 + \tau_{e\theta,l,1} \cdot s)}$$

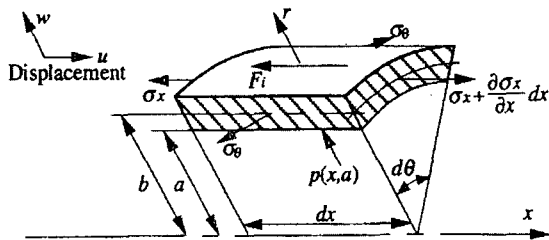


Fig. 1 Forces acting on a hose wall element

3. 종래의 음속 계측법에 대한 고찰

유압관로의 동특성을 평가하는 중요한 물리 파라미터인 유체 전송 관로 내 유체 음속의 계측법이 몇몇 선행연구자들에 의해 연구되었다. 이러한 음속 계측법들 가운데 비교적 정확하다고 판단되는 음속 계측법을 아래에 나타내었으며 이러한 계측법의 장·단점을 간단히 기술하였다.

3.1 3 압력변환기 법(Three transducer method)

Fig. 2에서와 같이 관로상의 3위치에서 압력을 측정하고 연산과정을 거쳐서 금속 관로 내의 유체 음속을 계측하는 방법이다. 이 방법은 Johnston과 Edge에 의해 제안되었고, 현재 ISO/CD 15086-2에 채택된 유체 음속 계측법 중 하나이다.³⁾ 측정 관로의 압력 전파 특성에 대한 전달 매트릭스는 아래와 같이 기술된다.

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(L) & A_{12}(L) \\ A_{21}(L) & A_{22}(L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(L') & A_{12}(L') \\ A_{21}(L') & A_{22}(L') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_{11}(x) = -j \frac{\pi r^2}{\rho \xi(\omega) c} \cot\left(\frac{\xi(\omega) \omega}{c} x\right) = -A_{22}(x) \quad (5)$$

$$A_{12}(x) = -j \frac{\pi r^2}{\rho \xi(\omega) c \sin\left(\frac{\xi(\omega) \omega}{c} x\right)} = -A_{21}(x) \quad (6)$$

$$\frac{P_1}{P_2} \sin\left(\frac{\xi(\omega) \omega}{c} L'\right) + \frac{P_3}{P_2} \sin\left(\frac{\xi(\omega) \omega}{c} L\right) - \sin\left(\frac{\xi(\omega) \omega}{c} (L + L')\right) = 0 \quad (7)$$

3.1.1 장점

ISO/CD 15086-2에서는 측정관로 L과 L'의 길이를 330 mm, 470 mm로 제한하고 있지만 이론적으로, 측정 관로의 길이 L과 L'의 선택에는 특별한 제한이 없다. 이 방법은 금속 관로의 음속을 계측하기 위한 편리한 on-line 계측법이다.

3.1.2 단점

이 계측법은 금속 관로의 유체가 2차원, 층류 유동이라고 가정하기 때문에 금속 관로에서만 계측이 가능하며, 호스벽이 변형하는 고압호스 등에는 적용이 불가능하다. 또한 음속의 연산식이 음함수(implicit function)로 표현되므로 연산에 사용하기에 불편하다.

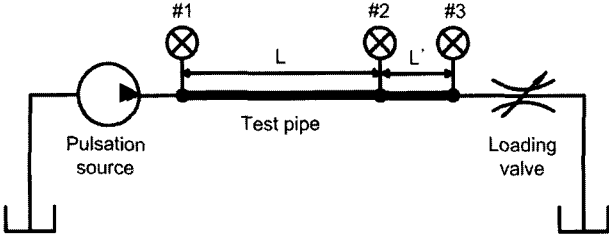


Fig. 2 Three transducer method

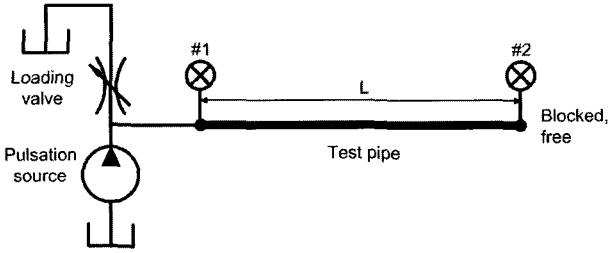


Fig. 3 Anti-resonance method

3.2 반공진법(Anti-resonance method)

반공진법은 복잡한 음속 연산의 방정식을 간단히 하기 위해 Fig. 3와 같이 측정관로의 끝을 막아서 출구유량 Q_2 를 0으로 만들어 음속을 계측하는 방법이다. 이 방법 또한 Johnston과 Edge에 의해 제안되었고 ISO/CD 15086-2에 채택된 또 하나의 유체 음속 계측법이다.³⁾ 음속 계측 관로의 끝이 막혀 있기 때문에 유체의 압력 전파 특성 매트릭스는 아래와 같이 간단해진다.

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ Q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(L) & A_{12}(L) \\ A_{21}(L) & A_{22}(L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$H_{21} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\xi(w)w}{c}L\right)} \quad (9)$$

$$|H_{21}| = 1/\sqrt{\cos^2\left(\frac{\xi_r w}{c}L\right) + \sinh^2\left(\frac{\xi_i w}{c}L\right)} \quad (10)$$

$$\frac{\xi_i}{\xi_r} \sinh\left(\frac{2\xi_i w_n}{c}L\right) - \sin\left(\frac{2\xi_r w_n}{c}L\right) = 0 \quad (11)$$

여기서, $w_n = 2\pi n f_n$, $n = 1, 3, 5, \dots$

3.2.1 장점

2개의 압력센서만으로 음속계측이 가능하고, 음속의 연산에 사용하는 식이 간단하다.

3.2.2 단점

3점 압력계측법과 마찬가지로 이 방법도 금속관

로의 유체가 2차원, 층류 유동이라고 가정하기 때문에 호스벽이 변형하는 고압호스 등에는 적용이 불가능하다. 또한 다양한 ω 값에서의 음속 계측이 곤란하며, 음속의 연산식이 음함수(implicit function)로 표현되므로 연산에 사용하기에 불편하다.

3.3 전달 매트릭스 법(Transfer matrix method)

전달 매트릭스 법은 금속 관로뿐만 아니라 고압호스의 음속계측에도 사용될 수 있는 방법이다.

Fig. 4와 같이 관로상의 4위치에서 압력을 계측,

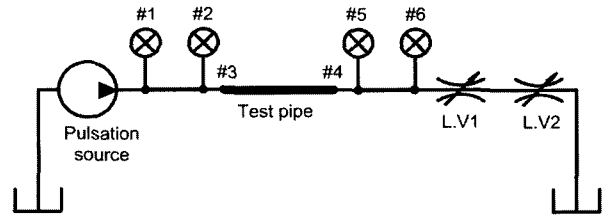


Fig. 4 Transfer matrix method

수치 연산 과정을 통하여 간접적으로 관로 내 유체의 음속을 계측하는 방법이다.⁴⁾

$$\begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ij} & B_{ij} \\ C_{ij} & D_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_j \\ Q_j \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, $i = 1, 2, 4, 5$, $j = 2, 3, 5, 6$ 이다.

전달 매트릭스 계수 A, B, C, D 는 아래와 같이 표시된다.

$$A_{ij} = D_{ij} = \cosh\left(\frac{s\xi_{ij}}{c_0}L_{ij}\right) \quad (13)$$

$$B_{ij} = \frac{\rho c_0 \xi_{ij}}{\delta r_{ij}^2} \sinh\left(\frac{s\xi_{ij}}{c_0}L_{ij}\right) \quad (14)$$

$$C_{ij} = \frac{\delta r_{ij}^2}{\rho c_0 \xi_{ij}} \sinh\left(\frac{s\xi_{ij}}{c_0}L_{ij}\right) \quad (15)$$

3.3.1 장점

이 계측법은 4위치에서의 압력을 계측하여 간접적으로 대상관로의 음속을 계측하는 방법이며, 금속 관로뿐만 아니라 고압호스 등에도 적용이 가능한 방법이다.

3.3.2 단점

4개의 압력 센서를 필요로 하며, 음속을 연산하는 식이 매우 복잡하고, 또한 음속의 연산식이 음함수

(implicit function)로 표현되므로 연산에 사용하기에 불편하다.

4. 3점 압력계측-주파수 계열 음속 계측법을 이용한 음속 계측

본 논문에서 제안하는 음속 계측법인 “3점 압력 계측-주파수 계열 음속 계측법”은 Fig. 5와 같이 3 위치에서 압력을 측정하되 관로의 끝을 막아 방정식을 간단히 만든 방법이다. 이 방법을 이용하면 금속 관로뿐만 아니라 고압호스의 음속을 계측할 수 있고, 한차례 측정만으로도 다양한 주파수 범위의 음속을 계측하는 편리한 계측방법이다.

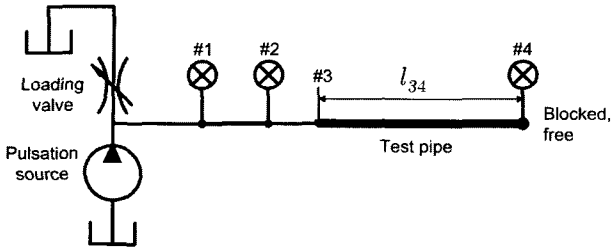


Fig. 5 New method for measuring wave speed proposed by the authors

4.1 실험장치

본 계측법에서는 Fig. 5에서와 같이 가변전동기와 가변용량·압력보상형 피스톤 펌프를 사용하여 맥동을 발생시켰다. 또한 금속 관로 및 고압호스의 음속을 계측하기 위해 압력 센서를 3위치에 설치하였다.

4.2 음속 연산을 위한 기초방정식

대상관로의 음속은 3위치에서 측정한 압력신호로부터 간접적으로 계산하여 구한다. 위치 1과 2에서 측정한 압력신호로부터 위치 3의 압력신호를 계산하기 위한 방법을 아래에 나타내었다. P_1, Q_1 과 P_2, Q_2 그리고 P_3, Q_3 사이의 전달함수는 각각 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\lambda l) & -Z_c \sinh(\lambda l) \\ -1/Z_c \sinh(\lambda l) & \cosh(\lambda l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ Q_1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} P_3 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\lambda l) & -Z_c \sinh(\lambda l) \\ -1/Z_c \sinh(\lambda l) & \cosh(\lambda l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

위의 식에 사용된 λ 는 다음과 같다.⁵⁾

$$\lambda \approx \frac{s}{c} \left[1 + \left(\frac{v}{R^2 s} \right)^{0.5} + \left(\frac{v}{R^2 s} \right) + \frac{7}{8} \left(\frac{v}{R^2 s} \right)^{1.5} \right] \quad (18)$$

식 (16)과 (17)에서 P_2, P_3, Q_2 에 대해 각각 정리하면 다음과 같이 표시된다.

$$P_2 = \cosh(\lambda l) P_1 - Z_c \sinh(\lambda l) Q_1 \quad (19)$$

$$P_3 = \cosh(\lambda l) P_2 - Z_c \sinh(\lambda l) Q_2 \quad (20)$$

$$Q_2 = \cosh(\lambda l) Q_1 - 1/Z_c \sinh(\lambda l) P_1 \quad (21)$$

식 (19)~(21)에서 P_1 과 P_2 를 이용하여 P_3 를 계산하는 식을 다음에 나타낸다.

$$P_3 = 2 \cosh(\lambda l) P_2 - P_1 \quad (22)$$

또한 위치 5에서 측정한 압력신호를 이용하여 위치 4의 압력신호를 계산하는 방법을 아래에 나타내었다. 관로의 끝이 막혀있어 출구유량 $Q_5 = 0$ 이므로 전달함수는 다음과 같이 간단해지고 위치 4에서의 압력 P_4 도 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_4 \\ Q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\lambda l) & Z_c \sinh(\lambda l) \\ 1/Z_c \sinh(\lambda l) & \cosh(\lambda l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$P_4 = \cosh(\lambda l) P_5 \quad (24)$$

위치 4에서의 유량 Q_4 가 무시할 만큼 작다면 P_3 와 P_4 사이의 전달함수는 식 (25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{1}{\cosh[\lambda l]} \quad (25)$$

식 (18)의 []안을 $f(jw)$ 라고 표시하면 계측하고자 하는 음속 c 는 아래와 같이 표시된다.

$$c = \frac{s \cdot f(jw) \cdot l}{\cosh^{-1} \frac{P_3}{P_4}} \quad (26)$$

4.3 금속 관로에서의 계측결과

시험관로(직경 6mm, 길이 1m인 동관)를 Fig. 5의 계측시스템에 적용하여 주파수 계열 파속을 계측하였다. 시험에 사용한 유압펌프는 최대 행정용적 14 cc/rev, 피스톤 수 9개인 가변용량형 피스톤 펌프(일정압력 유지 제어 방식)이며, 서보모터 회전속도를 약 10초 동안에 0으로부터 3000rpm까지 연속적으로 변화시키면서 주파수 계열 파속을 계측하였다. Fig. 6에 금속 관로내의 압력맥동을 시간영역에서 나타내었고, Fig. 7에 금속 관로의 음속을 주파수 계열 데이터로 나타내었다.

계측결과 약 1kHz의 영역에서 1360m/s의 파속이 계측되었으며, 단시간동안에 매우 간편하게 광범위한 주파수 대역의 주파수 계열 파속 계측이 가능함을 확인하였다.

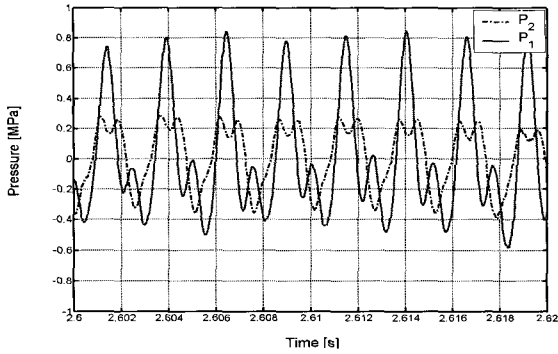


Fig. 6 Pressure wave recorded in a rigid pipe ($L_p = 1\text{m}$, time domain)

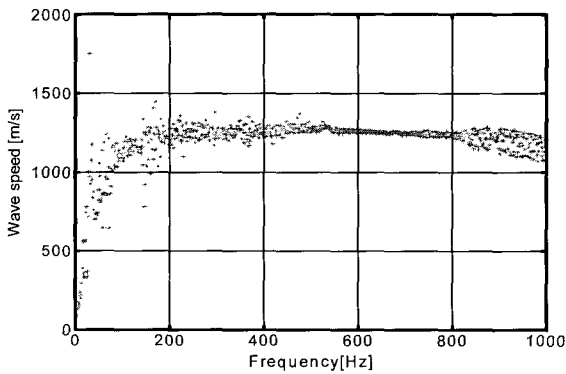


Fig. 7 Wave speed in a rigid pipe ($L_p = 1\text{m}$)

4.4 고압호스에서의 계측결과

시험관로(직경 10mm, 길이 0.2m인 NBR/CR 고압호스)를 Fig. 5의 계측시스템에 적용하여 주파수 계열 파속을 계측하였다. 시험에 사용한 유압펌프는 앞의 4.3절에서 사용한 것과 동일하다. 파속의 계측 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

계측결과 150Hz 부근부터 800Hz까지의 영역에서는 약 390m/s의 파속이 계측되었으며, 800Hz 이상의 주파수 영역에서는 390m/s 이상으로 증가함을 보였다. 이로부터, 단시간동안에 매우 간편하게 광범위한 주파수 대역의 주파수 계열 파속 계측이 가능함을 확인하였다.

5. 음속 계측법의 응용 예

5.1 관로 조건 및 응용 방법

먼저 Fig. 9와 같이 금속 관로와 고압호스로 조합

된 관로 양단의 위치 3과 위치 4의 압력맥동 비를 실험을 통해 구한다. 실험에 사용한 금속 관로 및 고압호스의 치수는 Table 2에 나타내었다. 금속 관로와 고압호스에서 계측한 음속을 이용하여 각각의 샘플에 대한 압력 전달 특성을 시뮬레이션 하고 실험과 시뮬레이션을 비교·검토한다.

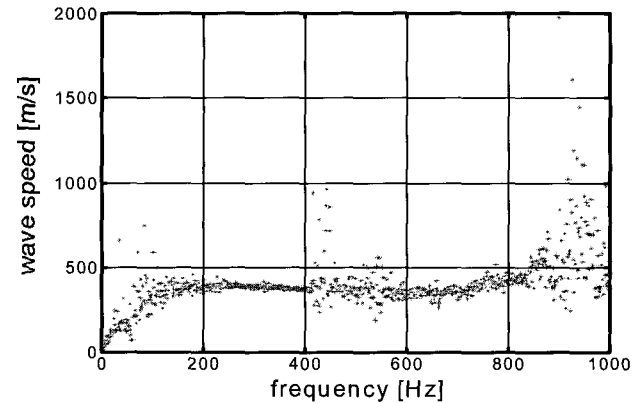


Fig. 8 Wave speed in a hydraulic hose ($L_h = 0.2\text{m}$)

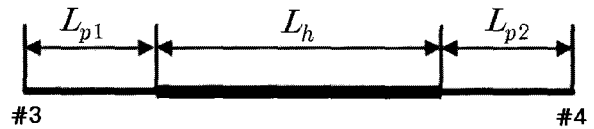


Fig. 9 Combination pipe with rigid pipe and hydraulic hose

Table 2 Dimensions of sample pipe systems

	L_{p1} (m)	L_h (m)	L_{p2} (m)
Sample I	0.35	0.20	0.38
Sample II	0.35	0.40	0.38

5.2 실험 및 시뮬레이션 결과

Fig. 10~13에 각각의 샘플 조합관로에 대한 실험과 시뮬레이션 결과를 0~1 kHz 주파수 범위에서 나타내었다. 400 Hz 이하의 주파수에서 실험과 시뮬레이션이 정도가 높게 일치함을 보였다. 400 Hz 이상의 시뮬레이션 결과에서 실험과 오차가 발생하는 것은 단일 고압호스의 계측 음속 자체의 오차에 의한 것으로 판단되어진다. 본 계측법에 의해 계측된 음속으로 인해 400 Hz 이하의 주파수에서 신뢰할 만한 결과를 얻었다.

6. 결론

본 논문에서는 먼저 종래의 음속 계측법들에 대해 고찰하였고, 각각의 계측법에 대한 장·단점을 요약하였다. 그리고 금속 관로 및 고압호스에 적용 가능한 새로운 음속 계측법을 제안했다. 본 논문에서 제안한 음속 계측법으로 금속 관로와 고압호스에서의 음속을 계측하고 그 결과를 제시하였다. 마지막으로 금속 관로와 고압호스로 조합된 관로의 실험결과와, 금속 관로와 고압호스에서 각각 계측한 음속을 사용하여 조합 관로를 시뮬레이션한 결과를 비교하여 400 Hz 이하의 주파수에서 그 신뢰성을 검증했다. 또한 기존의 음속 계측법에서는 넓은 주파수 대역에서의 음속을 구하기 위해서 많은 횟수의 실험이 불가피 했지만 본 논문에서 제안한 음속 계측법은 한번의 압력 측정으로 매우 넓은 주파수 대역에서의 음속 계측이 가능해졌으며, 실험시간을 대폭 줄일 수 있었다.

참고 문헌

- 1) 일본유공압학회, “유공압편람”, pp. 31~33, 1989.
- 2) J. Yu and E. Kojima, “Wave Propagation in Fluids Contained in Finite-Length Anisotropic Viscoelastic Pipes”, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 104, No. 6, pp. 3227~3228, 1998.
- 3) ISO/CD 15086-2, “Hydraulic Fluid Power - Determination of Fluid-borne Noise Characteristics of Components and Systems, Part2 : Measurement of Speed of Sound in a Fluid in a Pipe”, 2000.
- 4) J. Yu and E. Kojima, “Methods for Measuring the Speed of Sound in the Fluid in Fluid Transmission Pipes”, Society of Automotive Engineers, 2000.
- 5) F.T. Brown, Trans. ASME, Ser. D, 84-4, pp. 547~553, 1962.
- 6) E. Kojima and T. Ichiyanagi, “Experimental Investigation on the Accuracy of the “Measuring Method of the Speed of Sound in the Fluid in a Rigid Pipe” described in ISO/CD 15086-2, JFPS, Vol. 31, No. 2, pp. 50~57, 2000.

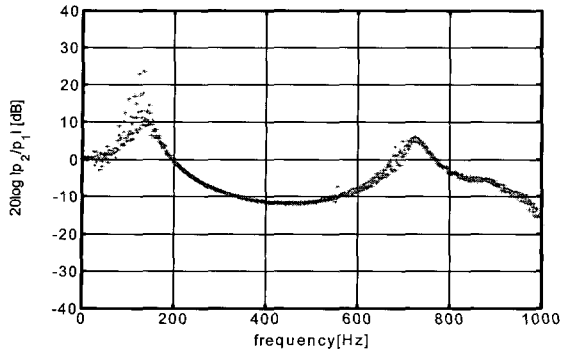


Fig. 10 Experimental result of $|P_2/P_1|$ in sample pipe system I

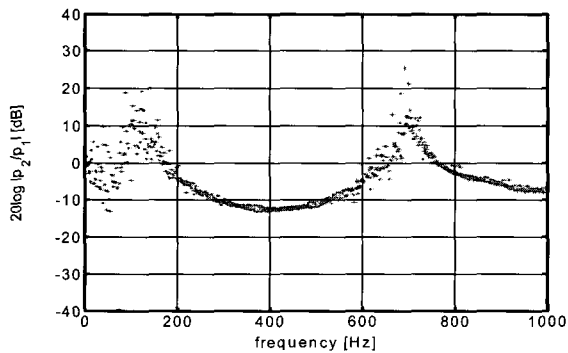


Fig. 11 Simulation result of $|P_2/P_1|$ in sample pipe system I

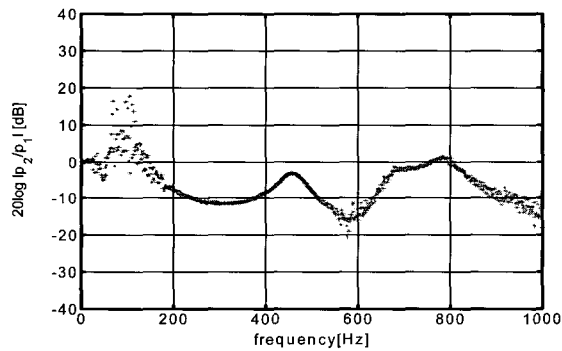


Fig. 12 Experimental result of $|P_2/P_1|$ in sample pipe system II

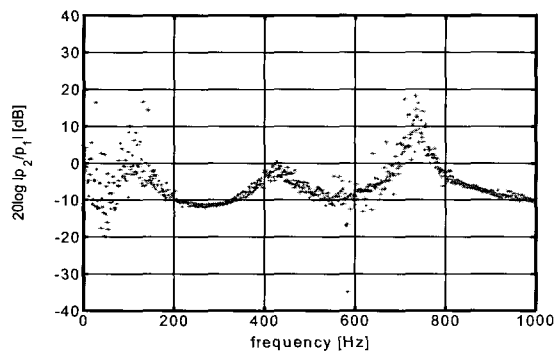


Fig. 13 Simulation result of $|P_2/P_1|$ in sample pipe system II