

# 유압 관로망에서 고압호스의 압력 맥동 감쇠 특성 해석법 개발

## Development of Analyzing Method for Pressure Fluctuations in Oil Hydraulic Pipe Network Including Flexible Hose Element

이일영 · 송상훈 · 정용길 · 양경욱

I. Y. Lee, S. H. Song, Y. G. Jung and K. W. Yang

**Key Words** : Pressure Fluctuations(압력 맥동), Oil Hydraulic Pipeline(유압 관로), Flexible Hose(고압 호스), Transfer Matrix Method(전달 매트릭스법)

**Abstract** : An analyzing method for pressure fluctuations in oil hydraulic pipe network was developed in this study. The object pipe network has multi-branch configuration, and the pipelines of it are composed of metal tubes and flexible hoses. Transfer matrix method, in other words impedance method, was used for the analysis. Values of physical parameters describing the characteristics of flexible hose were measured by experiments and reflected to the analysing procedure. The reliability and usefulness of the analyzing method were confirmed by investigating computed results and experimental results got in this study.

### 1. 서론

최근에 들어와서 유압 시스템의 사용 범위가 여러 분야로 확대되고 있다. 다시 말해서, 종래에는 유압 시스템이 주로 산업기계 구동용으로만 사용되었으나, 최근에는 승용차, 홈 엘리베이터와 같은 인간의 편의 시설에서의 활용 등으로 용도가 매우 다양화되고 있다<sup>1,2)</sup>.

유압 시스템에서는 유압 펌프와 각종 유압 기기가 관로에 의하여 접속되며, 유압 펌프에서 발생하는 압력 맥동은 관로를 통하여 전파되면서 진동과 소음을 유발한다. 유압 시스템이 산업용 기계 구동용으로 사용될 때는 유압 관로계를 통하여 전파되는 유압펌프로부터의 압력 맥동 현상은 그다지 중요한 기술적 과제가 되지 못하였으며, 압력 맥동이 특히 문제시되는 경우에는 충분히 큰 용량의 어큐뮬레이터를 펌프 직후에 설치함으로써 대체적으로 해결할 수가 있었다. 그러나, 승용차와 같은 인간의 편의 시설에서 사용되는 유압장치에

서는 진동, 소음 등 인간의 안락성을 저해하는 현상이 특히 문제시되므로, 유압 관로계에서 압력 맥동 저감 문제는 최근 중요한 기술적 과제로 부각되고 있다.

현재 승용차에서 사용되는 유압장치로는 유압식 동력 조향장치, ABS, 4륜조향장치, 유압식 능동 현가장치 등이 있으며, 이들 유압 장치에서는 펌프로부터의 압력 맥동을 저감할 목적으로 관로의 일부를 고압 호스(flexible hose)로 제작하여 사용하는 경우가 많다<sup>3,4)</sup>. 고압 호스가 압력 맥동을 감쇠시키는 효과가 있음은 경험적으로 알려져 있으나, 이에 관한 연구 보고는 매우 드문 편이며, 압력 맥동 감쇠를 목적으로 관로계에 고압 호스를 사용하는 경우의 설계는 주로 기술자들의 경험과 감각만에 의존하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 전달 매트릭스법<sup>5,6)</sup>으로 관로내 압력 맥동 전파 특성 해석시에 고압 호스의 점탄성 특성을 넓은 주파수 영역에 걸쳐서 정밀하게 계산해주는 해석 기법을 확립함으로써, 고압 호스를 포함하는 유압 관로망에서의 압력 맥동 감쇠 특성 해석법을 개발하고자 한다.

### 2. 이론 해석

본 연구에서 대상으로 하는 유압 관로망은 다수

접수일 : 1998년 5월 29일

이일영 : 부경대학교 기계·자동차공학부

송상훈 : 부경대학교 대학원

정용길 : 경상대학교 해양산업연구소

양경욱 : 부경대학교 산학협동연구센터

의 Y자형 분기부를 갖는 임의의 관로망이며, 이 관로망은 금속제 관로 요소, 고압 호스 요소들로 구성되는 것으로 상정한다. 이러한 관로망 내에서의 압력 맥동 전파 특성 해석법으로는 넓은 주파수 영역에서 특성 해석이 용이한 전달 매트릭스법 또는 임피던스법(transfer matrix method or impedance method)<sup>5,7)</sup>이 있으며, 본 연구에서도 이 해석법을 사용하기로 한다.

## 2.1 관로 요소의 전달 매트릭스 표시

### 2.1.1 금속제 관로 요소

본 연구에서 취급하는 유압 관로내 유동은 층류이며, 층류 유동인 경우에는 Fig. 1과 같은 단일 관로의 단면 I 과 단면 II에서의 압력 및 유량 사이의 관계는 식(1)과 같이 전달 매트릭스를 사용하여 나타낼 수 있다<sup>6)</sup>.

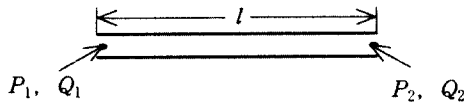


Fig. 1 Single pipe model

$$\begin{bmatrix} \widehat{P}_1 \\ \widehat{Q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\lambda l) & Z_c \sinh(\lambda l) \\ (1/Z_c) \sinh(\lambda l) & \cosh(\lambda l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{P}_2 \\ \widehat{Q}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $\lambda$ 와  $Z_c$ 는 아래와 같다.

$$\lambda = \frac{s}{c} \left[ 1 - \frac{2J_1(s_1 R)}{(s_1 R) J_0(s_1 R)} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

$$Z_c = \frac{\rho c}{A} \left[ 1 - \frac{2J_1(s_1 R)}{(s_1 R) J_0(s_1 R)} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

식(1), (2), (3)에서,  $P_1$ 과  $Q_1$ 은 관로 입구부에서의 압력 및 유량,  $P_2$ 와  $Q_2$ 는 관로 출구부에서의 압력 및 유량,  $l$ 은 관로 길이,  $c$ 는 관로내 파동 전파속도,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $R$ 과  $A$ 는 관로의 반경 및 단면적,  $s$ 는 라플라스 연산자,  $s_1 = j\sqrt{s/\nu}$ ,  $\nu$ 는 유압 작동유의 동점성계수,  $J_0$ 와  $J_1$ 은 0차 및 1차의 제1종 Bessel함수이고,  $\widehat{\phantom{x}}$  표시는 해당 변수가 라플라스 영역의 변수임을 나타낸다. 또,  $\lambda$ 는 관로의 전파계수[식(2)],  $Z_c$ 는 관로의 특성 임

피던스[식(3)]이다.

식(2), (3)을 직접 사용한 계산은 Bessel 함수의 무한 급수해의 계산을 필요로 하는 관계로 계산이 매우 번잡하므로, 식(4)와 같은 Brown<sup>8)</sup>의 근사식이 일반적으로 널리 사용되고 있다.

$$\lambda \approx \frac{s}{c} \left[ 1 + \left( \frac{\nu}{R^2 s} \right)^{0.5} + \left( \frac{\nu}{R^2 s} \right) + \frac{7}{8} \left( \frac{\nu}{R^2 s} \right)^{1.5} \right] \quad (4)$$

### 2.1.2 고압 호스 요소

고압 호스인 경우에도, Fig.1과 같은 단일 고압 호스의 단면 I, II에서의 압력 및 유량 사이의 관계는 식(1)과 동일한 형태인 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \widehat{P}_1 \\ \widehat{Q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\lambda_h l) & Z_{ch} \sinh(\lambda_h l) \\ 1/Z_{ch} \sinh(\lambda_h l) & \cosh(\lambda_h l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{P}_2 \\ \widehat{Q}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $\lambda_h$ ,  $Z_{ch}$ 는 다음과 같다.

$$\lambda_h = \frac{s}{c_h} \left[ 1 - \frac{2J_1(s_1 R)}{(s_1 R) J_0(s_1 R)} \right]^{-1/2} \quad (6)$$

$$Z_{ch} = \frac{\rho c_h}{A} \left[ 1 - \frac{2J_1(s_1 R)}{(s_1 R) J_0(s_1 R)} \right]^{-1/2} \quad (7)$$

식(6) 및 (7)에 대해서도 Brown<sup>8)</sup>의 근사식을 사용할 수 있다.

식(2), (3)에서의 금속제 관로내의 파동 전파 속도  $c$ 와 식(6), (7)에서의 고압 호스내의 파동 전파 속도  $c_h$ 의 차이점은,  $c$ 는 상수로 취급할 수 있음에 비하여  $c_h$ 는 압력 맥동의 주파수 변화에 따라 변한다는 점이다.  $c_h$ 에 대해서는 고압 호스의 점탄성(visco-elastic) 특성을 고려한 표시법<sup>9)</sup>이 알려져 있으며, 본 연구에서는  $c_h$  표시식에 포함된 물리인자들을 실험적으로 구하여 사용한다.

## 2.2 관로 경계부의 전달 매트릭스 표시

### 2.2.1 관로 분기부(分岐部)

Fig.2와 같은 관로 분기부에서는 입구측과 제  $k$  번째 분기측 사이에 아래 식과 같은 관계가 성립한다<sup>10)</sup>.

$$\begin{bmatrix} \widehat{P}_0 \\ \widehat{Q}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sum_{i=1}^k \left( \frac{1}{Z_i} \right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{P}_k \\ \widehat{Q}_k \end{bmatrix} \quad (8)$$

일반적으로 유체 관로내 동일 지점에서의 압력과 유량 사이의 관계를 유체 임피던스( $Z = \hat{P} / \hat{Q}$ )라 부르며, 식 (8)에서  $Z_i$ 는  $i$ 번째 분기부 입구에서의 유체 임피던스( $Z_i = \hat{P}_i / \hat{Q}_i$ )이다.

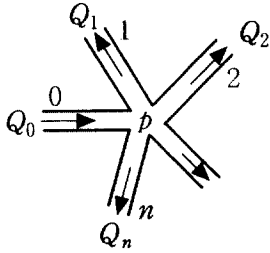


Fig. 2 Pipe branches

2.2.2 교축기구(밸브, 오리피스)

관로 끝 또는 관로 도중에 위치한 교축기구의 입구측과 출구측에서의 압력과 유량사이의 관계식은 아래와 같이 표시된다<sup>7)</sup>.

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_1 \\ \hat{Q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/K_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P}_2 \\ \hat{Q}_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서,  $K_0$ 는 난류인 경우에는  $\frac{Q_{10}}{2(P_{10} - P_{20})}$ , 층류인 경우는  $\frac{Q_{10}}{P_{10} - P_{20}}$ 이다.

2.3 관로망의 동특성 해석

2.3.1 전체 관로계의 전달 매트릭스식 표시

이상에서 관로, 관로 분기부, 관로 끝의 경계조건 등이 모두 전달 매트릭스로 표시될 수 있음을 알았다. 지금 임의 유압 관로망내의 관로 요소 분할점  $i$ 로부터 분할점  $j$ 까지의 경로에  $j-i$ 개의 관로 요소가 걸쳐져 있을 때, 제  $n$ 번째 관로의 전달 매트릭스를  $I_n$ 으로 나타내면 각 관로 요소에 대하여 다음 식들이 성립한다.

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_i \\ \hat{Q}_i \end{bmatrix} = I_1 \times \begin{bmatrix} \hat{P}_{i+1} \\ \hat{Q}_{i+1} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \hat{P}_{i+1} \\ \hat{Q}_{i+1} \end{bmatrix} = I_2 \times \begin{bmatrix} \hat{P}_{i+2} \\ \hat{Q}_{i+2} \end{bmatrix},$$

$$\dots, \quad \begin{bmatrix} \hat{P}_{j-1} \\ \hat{Q}_{j-1} \end{bmatrix} = I_{j-i} \times \begin{bmatrix} \hat{P}_j \\ \hat{Q}_j \end{bmatrix}$$

따라서, 전 관로계에 대하여 다음 식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_i \\ \hat{Q}_i \end{bmatrix} = I_1 \times I_2 \times I_3 \dots I_{j-i} \times \begin{bmatrix} \hat{P}_j \\ \hat{Q}_j \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 \\ T_3 & T_4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \hat{P}_j \\ \hat{Q}_j \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,  $T_1, T_2, T_3, T_4$ 는 각 성분 매트릭스들을 곱셈하여 얻어진 최종 매트릭스의 요소들이다.

2.3.2 동특성 해석법

실제 해석을 수행할 때는 식(10) 우변 계수 매트릭스의 결과식을 구할 필요는 없으며, 각 개별 매트릭스를 계산해 둔 다음 이들을 곱셈하여  $T_1, T_2, T_3, T_4$ 의 수치를 구하기만 하면 된다.

그리고, 각 관로 분기부 끝의 임피던스  $Z_{E1}, Z_{E2}, \dots$ 이 주어졌을 때, 관로망 내의 임의의 위치  $j$ 에서의  $Z_j (= \hat{P}_j / \hat{Q}_j)$ 가 정해지고, 따라서 식(10)으로부터  $\hat{P}_j / \hat{P}_i, \hat{P}_j / \hat{Q}_i, \hat{P}_i / \hat{Q}_i$  등 전달함수의 계산이 가능하며, 또한  $\hat{P}_i, \hat{Q}_i, \hat{P}_j, \hat{Q}_j$  중 어느 하나에 대한 정보가 주어지면 나머지 변화량에 대한 정보도 계산이 가능하다.

3. 고압 호스(점탄성 관로)내의 파동 전파 속도  $c_h$ 의 표시법

유압용 고압 호스의 관로 벽은 탄성 뿐만 아니라 점성을 갖는 물질로 알려져 있다. 이러한 고압 호스의 동특성을 기술하는 粘彈性 모델<sup>9)</sup>이 제안되어 있으며, 본 연구에서는 이들 모델 가운데서 실험적으로 因子 檢定이 비교적 용이한 3인자 모델을 사용하기로 한다.

여기서 작동유의 압축성까지를 고려한 3인자 모델을 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3의 3인자 모델로 근사되는 점탄성 관로내에서의 파동전파 속도  $c_h$ 는 다음과 같이 표시된다<sup>11,12)</sup>.

$$c_h = c_h' \sqrt{\frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}}, \quad c_h' = \sqrt{\frac{Rk}{2\rho}} \quad (11)$$

여기서,  $R$ 은 관로(고압 호스)의 반경,  $\rho$ 는 유압작동유의 밀도,  $c_h'$ 는  $s(=j\omega)$ 가 0 부근일 때의 파동전파속도를 의미한다. 식(12) 내에 포함된 물리인자  $T_1, T_2, k$ 와 관련하여, Fig. 3의 3인자 모델 점탄성 관로내에서 압력의 미소 변화분  $P_u$ 와 관벽의 반경 방향 미소 변화  $y_u$  사이의 관계는 다음 식으로 표시된다<sup>11)</sup>.

$$P_w(s, x) = \frac{k(T_1 s + 1)}{T_2 s + 1} \cdot Y_w(s, x) \quad (12)$$

$$\text{여기서 } T_1 = \frac{C_d}{k_2}, \quad T_2 = \frac{C_d}{k_2 + \frac{k_1 k_h}{k_1 + k_h}},$$

$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_h}$ 이며,  $k_1, k_2$ 는 고압 호스 재료의 탄성계수,  $C_d$ 는 관벽의 점성저항계수,  $k_h$ 는 호스내 기름의 유효 탄성계수로서  $k_h = 2K/R$  ( $K$ : 기름의 체적탄성계수)로 표시된다.

식(5), (6), (7) 및 (11)을 사용함으로써 고압 호스내 압력 맥동 전파 특성의 해석이 가능할 것으로 예상되나, 이를 위해서는 식(11)에 포함된  $c_h', T_1, T_2$ 를 실험적으로 정확하게 측정해야 하며, 본 연구에서는 北川이 제안한 실험법<sup>12)</sup>을 사용하여 계측하기로 한다.

본 연구의 실험에서 사용한 유압용 고압 호스는 한국산 1겹 철심형, 내경 105 mm, 정격압력 140 bar이며, 실험에서 측정된  $T_1, T_2, c_h'$  값은  $T_1 = 2.714 \times 10^{-3}$ ,  $T_2 = 1.384 \times 10^{-3}$ ,  $c_h' = 740$  m/s 였다.

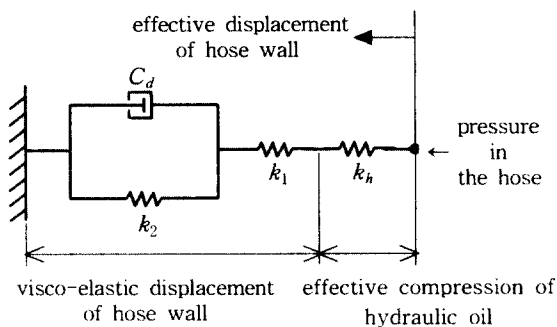


Fig. 3 Visco-elastic pipe model with 3 physical parameter(oil compressibility is considered)

력 맥동 전파 특성 실험 결과와 식(12)를 사용한

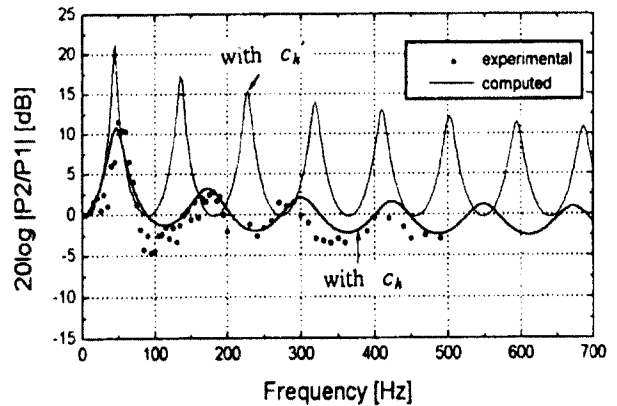


Fig. 4 Experimental & Analytical results of  $|\hat{P}_2/\hat{P}_1|$  in the flexible hose( $L=4$  m)

계산치를 나타내었다. 그림에서  $P_1, P_2$ 는 각각 관로 입구부 압력 진폭과 관로 출구부 압력 진폭을 나타낸다. Fig. 4의 점들은 서보밸브를 사용하여 고압호스 입구측에 다양한 주파수의 압력 맥동을 가했을 때의 압력 신호  $P_1, P_2$ 를 계측하고 이를 FFT 분석하여 구한 압력 진폭비  $|\hat{P}_1/\hat{P}_2|$ 를 dB 단위로 나타내었으며, Fig. 4 실선은 식(11) 및 실험에서 구한  $T_1, T_2, c_h'$  값을 사용하여 얻은 압력 진폭비 계산치(「with  $c_h'$ 」로 표시)를 나타내었다. 또한, Fig. 4 실선은 비교 고찰을 목적으로, 파동 전파 속도가  $c_h'$ 로 불변이라고 가정하여 계산한 압력 진폭비의 계산치(「with  $c_h'$ 」으로 표시)도 나타내었다. 그림에서 제1차 공진 주파수가 약 50 Hz인데 비하여 제 2차 이후의 공진 주파수는 1차 공진 주파수의 정수배로 되지 않으며(급속제 관로내에서는 정수배로 됨), 이로부터 주파수 증가에 따라 파동 전파 속도가 증가함을 알 수 있다. 또, 실험치와 계산치를 비교해보면 200 Hz 이하의 저주파 영역에서는 양자가 비교적 잘 일치하는데 비하여, 그 이상의 고주파 영역에서는 다소 차이가 발생함을 알 수 있다. 이러한 차이는 본 연구에서 고압 호스의 모델링에 3인자 모델을 사용했기 때문에 발생하는 것으로 생각되며, 더욱 고주파 영역에서도 고압 호스의 동특성을 정확하게 나타낼 수 있으려면 4인자 이상의 모델<sup>9)</sup>을 사용할 필요가 있을 것으로 생각한다.

Fig. 4에는 길이 4 m인 고압 호스 내에서의 압

#### 4. 관로망 내에서의 압력 맥동 전파 특성 실험 및 해석

##### 4.1 실험장치 및 실험방법

실험 장치 구성의 한가지 예를 Fig. 5에 나타낸다. 유압 펌프 구동용 전동기는 4극 유도전동기이다. 유압펌프는 피스톤 수 9 개, 배제용적 11.5 cm<sup>3</sup>/rev인 사판식 피스톤 펌프이다. 실험용 관로망은 1종류의 금속제 관로(재질:銅, 내경:0.008 m, 관벽 두께: 0.001 m)와 1종류의 고압 호스(재질은 앞의 3장에서 설명)를 조합하여 구성한다.

실험에 사용된 관로계를 Fig. 6에 나타낸다. Fig 6(i)은 대상 관로계를 금속제 관로만으로 구

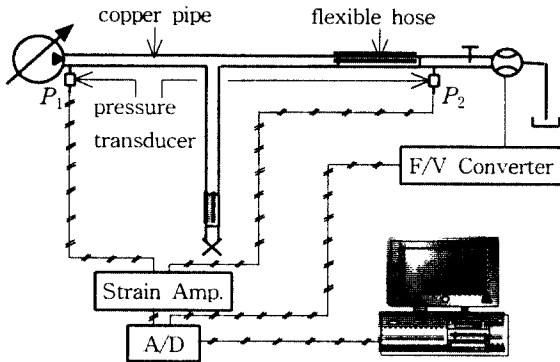


Fig. 5 Experimental apparatus for the test

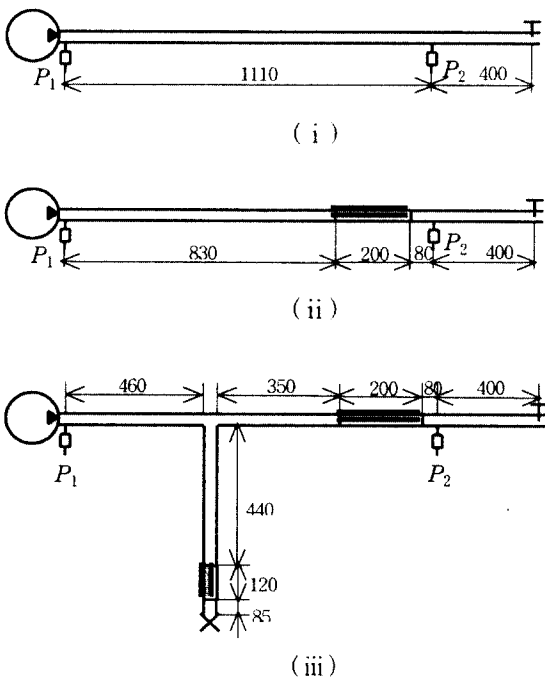


Fig. 6 Experimental pipelines used for the test (unit of pipe length : mm)

성한 경우이고, (ii) 및 (iii)은 금속 관로와 고압 호스를 조합하여 구성한 경우이다. 각 관로계의 출구에는 교축밸브를 설치하여 관로 출구부의 평균 압력을 설정하게 되며, 그림 (iii)에서는 관로계 분기 관로의 한쪽 끝에는 교축밸브, 다른 한쪽 끝에는 폐쇄밸브가 설치된 구조로 하였다.

계측하는 물리 인자로는 관로 입구 압력( $P_1$ ), 관로 출구 압력( $P_2$ ) 및 평균유량( $Q_{mean}$ )이다. 압력 및 유량 계측에는 스트레인 게이지식 압력변환기와 터빈미터식 유량계를 사용하였다. 계측된 압력 신호 및 유량 신호는 동적(dynamic) 스트레인 증폭기 및 F/V 변환기를 거쳐 데이터 로거(586 PC)에서 데이터 파일로 저장되며, 이와 동시에 FFT 분석기에서 계측 압력과의 파워 스펙트럼(power spectra)가 구해진다.

##### 4.2 압력 맥동 전파 특성 실험 결과 및 해석 결과

Fig. 7은 계측된 압력 맥동 파형의 일 예로서 Fig. 6의 관로계(i)을 대상으로 한 실험에서 계측된 것이다.

Fig 8은 계측된 압력 맥동 파형을 FFT 분석하여 얻은 각 주파수별 압력 진폭을 나타낸 것이다. 각 그림에서 「 $|\hat{P}_1|$ 」, 「 $|\hat{P}_2|$ 」는 Fig. 6(i), (ii), (iii)에 표시한 관로상의 위치에서 계측된  $P_1, P_2$ 의 FFT 결과이고, 「 $|\hat{P}_2|, \text{computed}$ 」는 식(10)에서 구해지는 전달함수  $|\hat{P}_2/\hat{P}_1|$ 에 실험치  $|\hat{P}_1|$ 을 곱하여 구한 계산치를 나타낸 것이다.

Fig. 8에서 압력 맥동의 제1차 성분 주파수는 약 263 Hz로서, 이는 펌프 회전속도×피스톤 수에 해당하는 값이고, 2차 성분 이후의 주파수는 1차 성분의 정수배에 해당하는 값이다. 또한, 실험에 사용한 펌프 및 관로계에서의 압력 맥동은 1 kHz 이상의 고주파 영역에서는 그 진폭이 1 bar 미만으로 낮게 나타남을 알 수 있다.

실험에서 계측된 압력 맥동 진폭의 절대치는 관로계(i)의 경우에는  $|\hat{P}_1| = 4.2 \text{ bar}$ ,  $|\hat{P}_2| = 6.2 \text{ bar}$  정도였으나, 관로계의 일부를 고압호스로 대체한 관로계(ii)의 경우는 고압호스의 작용으로  $|\hat{P}_2|$ 는 4.8 bar 정도로 저하한 반면에  $|\hat{P}_1|$ 은 5.2 bar 정도로 상승하였다. 이와 같은 결과는 관로 중간에 설치된 고압 호스의 팽창 및 수축에 따라 고압 호스부에서는 비교적 낮은 주파수 영역에서 맥동 유량 증가 및 맥동 압력 감소 현상이 발

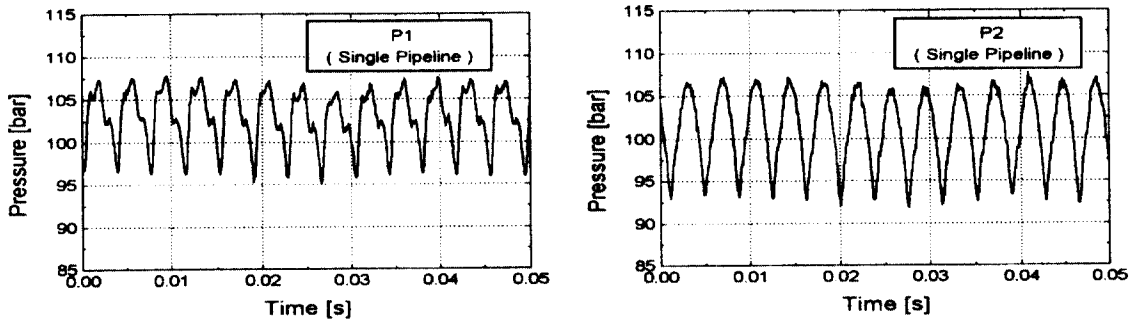
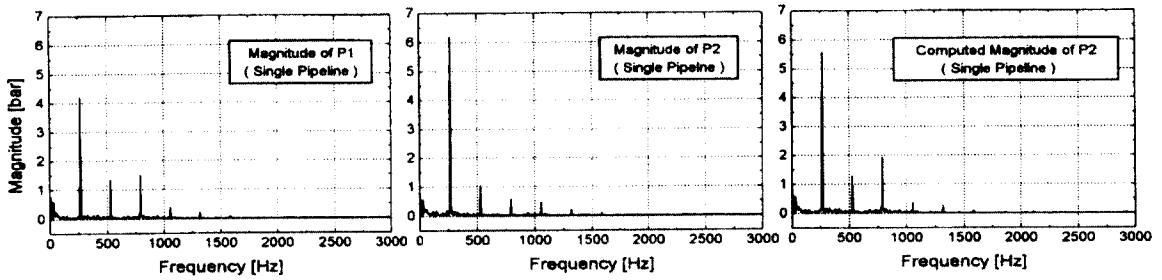
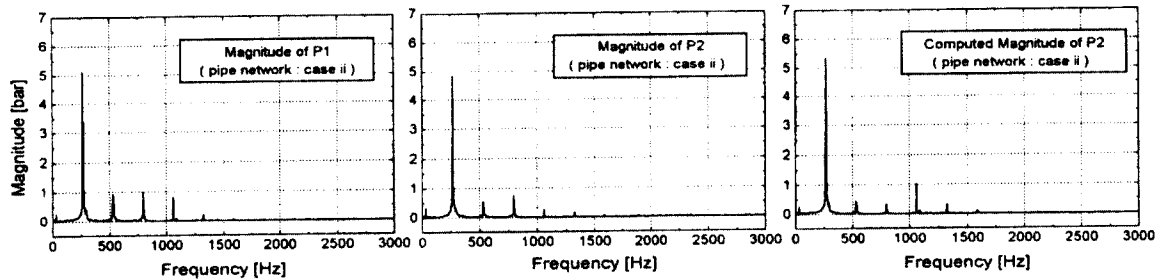


Fig. 7 Pressure records at pipe system (i)



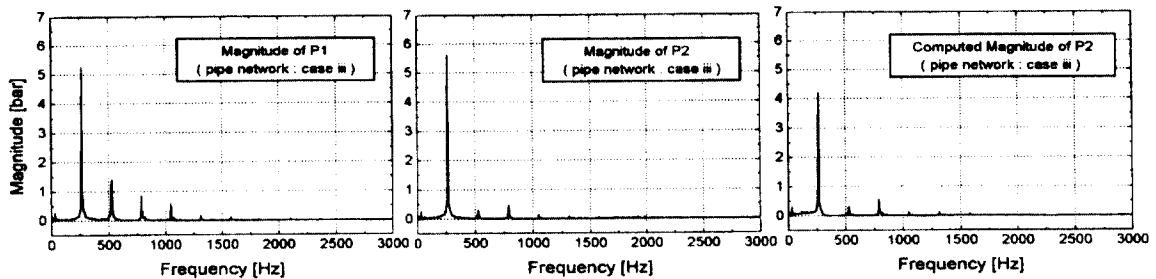
$|\hat{P}_1|$                        $|\hat{P}_2|$                        $|\hat{P}_2|$ , computed

(a) pipeline system (i)



$|\hat{P}_1|$                        $|\hat{P}_2|$                        $|\hat{P}_2|$ , computed

(b) pipeline system (ii)



$|\hat{P}_1|$                        $|\hat{P}_2|$                        $|\hat{P}_2|$ , computed

(c) pipeline system (iii)

Fig. 8 Experimental and analytical results

생하고, 이러한 관로 하류측에서의 맥동 유량의 증가로 인하여 관로 상류측에서의 맥동 유량도 증가하게 되므로 관로 입구부 주위에서는 오히려 압력 맥동이 증가하는 효과가 발생하기 때문인 것으로 해석된다. 즉, 고압 호스의 사용에 따라서 고압 호스 설치 위치를 중심으로 하여 압력 맥동의 진폭은 감소함을 알 수 있다.

한편, Fig. 8 (a), (b), (c)에는 본 연구에서 확립한 유압 관로망 맥동 해석 기법을 실험 대상 관로계에 적용하여 구한  $|\hat{P}_2|$ 의 계산치와  $|\hat{P}_2|$ 의 실험치를 함께 나타내었으며,  $|\hat{P}_2|$ 의 계산치는 실험치와 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서 확립된 유압 관로망 해석법을 활용함으로써 유압 관로망을 통하여 전파되는 압력 맥동을 비교적 정확하게 예측할 수 있게 되었다.

유압 펌프에서 발생하는 넓은 주파수역에서의 맥동 유량을 예측하는 수법이 최근에 개발되었으며<sup>13,14)</sup>, 이러한 맥동 유량  $\hat{Q}_0$ 와 본 연구에서 제시된 방법으로 구한 유압 관로망의 전달함수 ( $\hat{P}_i/\hat{Q}_0$ )를 사용함으로써 관로상 임의 위치  $i$ 에서의 압력 맥동 스펙트리를 손쉽게 계산할 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 고압 호스를 포함하는 유압 관로망에서의 압력 맥동 전파 특성을 전달 매트릭스법으로 해석하는 기법을 확립하였다.

먼저, 유압용 고압 호스내에서의 압력 맥동 전파 특성을 조사하는 기초 실험을 통하여 고압 호스의 특성치들을 구하고, 이들을 반영한 전달 매트릭스식을 이용하여 유압 관로망에서의 압력 맥동 전파 특성을 비교적 정확하게 해석할 수 있음을 실험 결과와의 비교 고찰을 통하여 확인하였다.

본 연구에서 확립된 압력 맥동 해석 기법과 실험적으로 구한 유압 펌프로부터의 맥동 유량 스펙트리를 사용함으로써 임의의 형태로 구성된 유압 관로망내 임의 위치에서의 압력 맥동 스펙트리를 손쉽게 계산할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 연구는 교육부 학술 연구 조성비(기계공학분

야)에 의한 연구(과제번호: ME96-D-13)이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. S. Buma의 3인, "Development of the Toyota Active Control Suspension for the 1989 CELLICA", Toyota 技術, Vol. 40, No. 1, pp. 78~94, 1989
2. Toyota Co, "New Soarer 解説書", pp. 3/55~3/84, 1990
3. 이일영, "유압 서보 제어 기술의 동향", 한국동력기계공학회 '98춘계학술대회논문집, pp. 6~12, 1998
4. Y. Kawasaki의 5인 "日産 油壓 Active Suspension開發", 自動車技術, Vol. 44 No. 1, pp. 120~127.
5. A. F. Souza & R. Oldenburger, "Dynamic Response of Fluid Lines", Trans. ASME, Ser. D, 86-3, pp. 589~598, 1964
6. 竹中利夫, 浦田暎三, "油壓制御", 丸善(株), pp. 112~137, 1967
7. 이일영, 정용길, 양경욱, "유압 관로망에서의 압력 맥동 해석", 한국해양공학회지, 제 11권, 제 4호, pp. 152~158, 1997
8. F.T. Brown, Trans. ASME, Ser. D, 84-4, p. 57, 1962
9. 日本油空壓學會, "油空壓便覽", pp. 31~33, 1989
10. 鷲尾誠一, "管路系内波動現象の解析", 日本機械學會 567會 講習會教材, pp. 55~66, 1983
11. 中野和夫, 吉本正彦, "粘彈性管壁をもった油壓管路の動特性", 計測自動制御學會論文集, 6(3), pp. 201~207, 1970
12. 北川 能, "油壓回路の振動・騒音の減少化に関する研究" 日本機械振興協會技研究報告書 KSK-GHI-1·1, pp. 207~238, 1990
13. 小鳥英一, "油壓ポンプ流體傳ば振動特性の新しい測定法-第1, 2報-", 日本油空壓學會誌, 24(2), pp. 113~126, 1993
14. 이일영의 3인, "유압 펌프의 맥동 유량 예측법 개발", '98대한기계학회 동역학·제어부문 춘계학술대회논문집, pp. 213~220, 1998