

유압 관로망에서의 압력 맥동 해석

이 일 영* · 정 용 길** · 양 경 옥***

(97년 10월 13일 접수)

Analysis of Pressure Fluctuations in Oil Hydraulic Pipe Network

Ill-Yeong Lee* · Yong-Gil Jung** · Kyong-Uk Yang***

Key Words : Pressure Fluctuations(압력 맥동), Oil Hydraulic Pipeline (유압 관로), 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 steel tubes, flexible hoses. Also, accumulators, orifices and lumped oil volume components are attached on it. Transfer matrix method, in other words impedance method, was used for the analysis. The reliability and usefulness of the analyzing method were confirmed by investigating computed results and experimental results got in this study.

1. 서 론

종래에는 유압 시스템이 주로 산업기계 구동용으로 사용되었으나, 최근에는 인간의 편의 시설(예를 들면, 승용차, 홈 엘리베이터) 등으로 용도가 매우 다양화되고 있다.¹⁾

유압 시스템에서는 유압 펌프와 각종 유압 기구들이 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 시설에서는 진동, 소음 등 인간의 안락성을 저해하는 현상이 특히 문제시되므로, 유압 관로계에서 압력 맥동 저감 문제는 최근 중요한 기술적 과제로 부각되고 있다.

* 부경대학교 자동차공학과

** 경상대학교 선박기계공학과

*** 부경대학교 산학연협동연구센터

유압 관로계의 압력 맥동 해석법으로는 종래부터 전달 매트릭스법²⁾이 사용되어 왔으나, 종래의 연구 보고에서는 경계조건이 매우 단순한 관로계(예: 펌프와 강관, 관로 출구측 부하용 밸브로 구성된 관로계 등)을 대상으로 하고 있으며, 어큐물레이터, 고압호스와 같은 비선형 특성이 현저한 관로요소를 포함한 관로망을 대상으로 한 해석법에 관한 연구는 찾아보기 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 유압 관로망을 통한 맥동 압력의 전파 특성을 체계적인 이론 해석 및 실험을 통하여 보다 명백히 함으로써 실제 유압 관로망 설계에 활용할 수 있는 신뢰성이 우수한 압력 맥동 해석법을 개발하고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 유압 관로 내의 동적 유체 유동 해석

유압 관로망 동특성 해석 수법으로는 주파수 영역에서의 해석법과 시간 영역에서의 해석법이 있다. 주파수 영역에서의 해석법은 넓은 주파수 범위에 걸친 계의 특성 파악이 용이한 이점이 있으며, 본 이론 해석에서는 주파수 영역에서의 해석법을 사용하기로 한다.

(1) 금속계 관로 요소의 전달 매트릭스 표시

본 연구에서 대상으로 하는 유압 관로내 유동은 층류이며, 층류 유동인 경우 Fig.1과 같은 단일 관로의 단면 I과 단면 II에서의 압력 및 유량 사이의 관계는 식(1)과 같이 전달 매트릭스를 사용하여 표시할 수 있다.³⁾

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

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

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

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, ρ 는 유체의 밀도, R 과 A 는 관로의 반경 및 단면적, s 는 라플라스 연산자. $s_1 = j\sqrt{(s/\nu)}$, J_0, J_1 은 0차 및 1차의 제1종 Bessel함수이고, $\hat{}$ 표시는 해당 변수가 라플라스 영역의 변수임을 나타낸다. 또, λ 는 관로의 전파계수[식(2)], Z_c 는 관로의 특성 임피던스[식(3)]이다.

식(2), (3)을 직접 사용한 계산은 매우 번잡하므로, 여기서는 식(4)와 같은 λ 에 대한 Brown⁴⁾의 근사식을 사용하기로 한다.

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

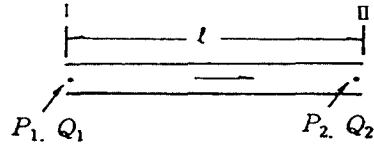


Fig. 1 Single pipeline model

(2) 고압 호스 요소의 전달 매트릭스 표시

유압용 고압 호스의 관로 벽은 탄성 뿐만 아니라 점성을 갖는 물질로 알려져 있다. 이러한 고압 호스 내의 유체 유동 특성식으로, 본 연구에서는 위의 식(1), (2), (3)을 그대로 사용하되, 압력과 전파속도 c 대신에 고압 호스 내의 압력과 전파속도 c_h 사용하기로 한다. 고압 호스 내에서의 압력과 전파속도 c_h 는 주파수 의존적인 특성을 가지고 있으며, 본 연구에서는 단일 고압호스 동특성 실험 결과로부터 구한 c_h 의 실험치를 사용한다.

2.2 관로 경계부의 전달 매트릭스 표시

Fig.2와 같은 관로 분岐部에서는 입구측과 제 k 번째 분기 관로 입구부사이의 관계를 나타내는 식은 아래와 같이 표시할 수 있다.⁶⁾

$$\begin{bmatrix} \widehat{P}_0 \\ \widehat{Q}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sum_{(i \neq k)} (\frac{1}{Z_i}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{P}_k \\ \widehat{Q}_k \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 Z_i 는 i 번째 분기 관로 입구부에서의 유체 임피던스 ($Z_i = \widehat{P}_i / \widehat{Q}_i$)를 나타낸다.

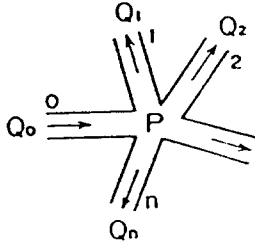


Fig. 2 Pipe branches

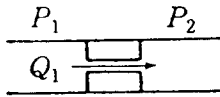


Fig. 3 Throttle mechanism

또한, Fig.3에 나타난 오리피스, 밸브와 같은 교축기구 입구측과 출구측에서의 압력과 유량 사이의 관계식은 아래와 같이 표시된다.⁶⁾

$$\begin{bmatrix} \widehat{P}_1 \\ \widehat{Q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/K_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{P}_2 \\ \widehat{Q}_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, K_0 는 근사적으로 난류인 경우에는 $\frac{Q_{20}}{2(P_{10} - P_{20})}$, 층류인 경우에는 $\frac{Q_{20}}{P_{10} - P_{20}}$ 로 나타낼 수 있다.⁷⁾

Fig. 4와 같이 관로상에 피스톤식 어큐뮬레이터(accumulator, 이후로는 acc.로 표기함)가 설치된 경우, acc. 접속부에서의 압력 및 유량 \widehat{P} , \widehat{Q} 와 \widehat{P}' , \widehat{Q}' 사이에는 다음 식이 성립한다.⁷⁾

$$\begin{bmatrix} \widehat{P} \\ \widehat{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \beta_g V_{gs} / Kaccb & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{P}' \\ \widehat{Q}' \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, $Kaccb = \left(\frac{m_{tp}}{A_p^2} + \frac{m_n}{A_n^2} \right) \cdot \beta_g V_{gs}^2 + (F_p + F_n) \beta_g V_{gs} + 1$, $F_p = f_p / A_p^2$, $F_n = f_n / A_n^2$, f_p 는 피스톤의 마찰계수, A_p 는 피스톤의 단면적, $f_n = 32 \nu l_n A_n \rho / d_n^2$, l_n , A_n 은 acc. 접속 관로의 길이 및 단면적, $m_{tp} = m_o$ (acc.내 기름 질량) + m_f (피스톤 질량), ρ , ν 는 작동유의 밀도 및 동점도이며, β_o , β_g 는 각각 유압 작동유 및 acc.내 질소 가스의 압축율, P_g , V_g 는 acc.내 가스의 압력 및 체적, P_o , V_o 는 acc.내 작동유의 압력 및 체적을 나타낸다.

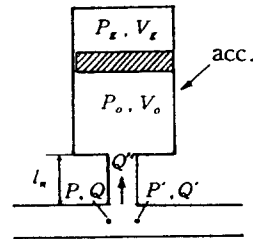


Fig. 4 Pipe branch with a piston type accumulator

관로상에 벨로즈(bellows)식 acc.가 설치된 경우, acc. 접속부에서의 압력 및 유량 \widehat{P} , \widehat{Q} , \widehat{P}' , \widehat{Q}' 사이에는 다음 식이 성립한다.⁷⁾

$$\begin{bmatrix} \widehat{P} \\ \widehat{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \beta_g V_{gs} / Kaccb & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{P}' \\ \widehat{Q}' \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,

$Kaccb = \left(\frac{m_{tb}}{A_b^2} + \frac{m_n}{A_n^2} \right) \beta_g V_{gs}^2 + (F_b + F_n) \beta_g V_{gs} + \frac{k_b}{A_b^2} \beta_g V_g + 1$, $F_b = f_b / A_b^2$, f_b 는 벨로즈와 실린더 벽면 사이의 마찰계수, A_b 는 벨로즈의 단면적, $f_n = 32 \nu l_n A_n \rho / d_n^2$, $m_{tb} = m_o$ (acc.내 기름 질량) + m_b (벨로즈의 가동부 상당 질량), k_b 는 벨로즈의 탄성계수를 나타낸다.

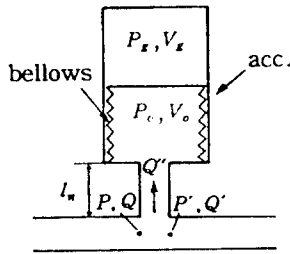


Fig. 5 Pipe branch with a bellows type accumulator

2.3 관로망의 동특성 해석

이상에서 관로, 관로 분기부, 관로단의 경계조건 등이 모두 전달 매트릭스로 표시될 수 있음을 알았다. 따라서 관로망 내의 임의의 두 단면 i, j 에서의 압력과 유량 사이의 관계는 두 단면 사이에 포함된 각 요소의 전달 매트릭스의 곱으로서 식(9)와 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_i \\ \hat{Q}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 \\ T_3 & T_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P}_j \\ \hat{Q}_j \end{bmatrix} \quad (9)$$

실제 해석을 수행할 때는 식(9) 우변의 계수 매트릭스 결과식을 미리 구해둘 필요는 없으며, 각 개별 요소의 매트릭스를 계산해 둔 다음 이들을 곱셈하여 T_1, T_2, T_3, T_4 의 수치를 구하기만 하면 된다.

그리고, 각 분기 관로 끝의 임피던스 Z_{E1}, Z_{E2}, \dots 이 주어졌을 때, 관로망 내의 임의의 위치 j 에서의 임피던스 $Z_E (= \hat{P}_j / \hat{Q}_j)$ 가 정해지고, 따라서 식(9)로부터 $\hat{P}_i / \hat{P}_j, \hat{P}_j / \hat{Q}_j, \hat{P}_i / \hat{Q}_i$ 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.

2.4 피스톤식 유압 펌프의 특성 표시

피스톤식 유압 펌프의 송출 유량 Q_p 는 다음과 같은 형태의 식으로 근사화하였다.

$$Q_p = \eta_v \frac{Z_{ps} A_{ps} l_{ps} \omega}{2\pi} + (K_1 + \omega K_2) \cdot \sin Z_{ps} \omega t \quad (10)$$

여기서, η_v 는 펌프의 체적 효율, Z_{ps}, A_{ps}, l_{ps} 는 각각 펌프의 피스톤 수, 피스톤 단면적 및 피스톤 행정을 나타내며, K_1, K_2 는 실험으로부터 구해야 할 상수이다.

3. 유압 관로계의 동특성 실험

실험 및 해석 대상 유압관로망의 일예를 Fig.6에 나타낸다.

유압 펌프 구동용 전동기는 인버터 구동 방식으로 0~3600 rpm 가변 속도형이며, 유압 펌프는 행정용적 11.5 cm³/rev, 피스톤 수 9개인 사판식 피스톤 펌프이다. 실험에 사용한 관로망은 1종류의 금속 파이프(재질:銅, 내경: 0.008 m, 관벽 두께: 0.001 m, 관로 길이: 각종)와 2종류의 고압 호스(내경: 0.01 m, 길이: 각종), 각종 acc. 등으로 구성하였다.

계측하는 물리 인자로는 관로 각부의 압력(F) 및 유량(Q)이다. 압력 및 유량 계측에는 스트레인 게이지식 압력변환기와 터빈미터식 유량계를 사용하였으며, 계측된 압력 신호 및 유량 신호는 동적(dynamic) 스트레인 증폭기 및 주파수/전압(F/V) 변환기를 거쳐 데이터 로거(486 PC)에서 데이터 파일로 저장되고, 실험 종료 후 계측 파형으로부터 관로의 동특성(압력 맥동 감쇠 특성)을 구하게 된다.

실험에는 2종의 관로계를 사용하였으며, 그 구성을 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다.

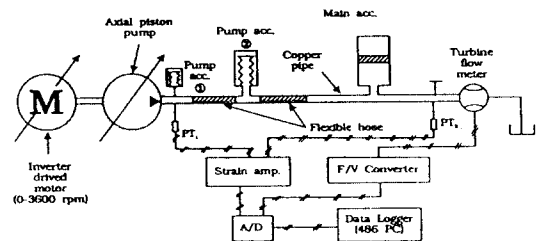
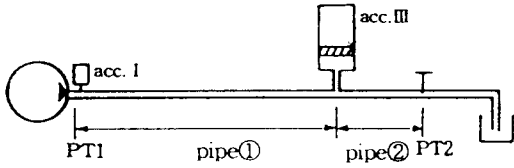


Fig. 6 An example of test pipe system



<Test conditions> pipe(dia. 0.008m) length: pipe① 1.28m, pipe② 0.365m, acc. I: bellows type, 8.5cm³, 61bar abs. (charge press.), acc.III: piston type, 780 cm³, 75 bar abs. (charge press.), PT1, PT2: Pressure Transducers

Fig. 7 Test pipe system (1)

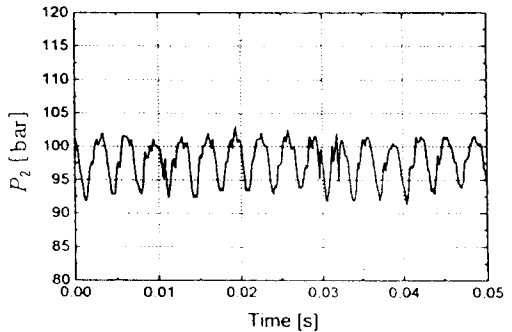
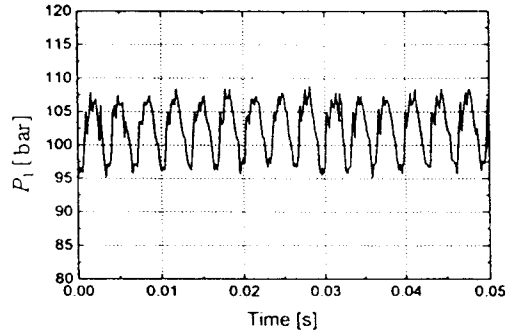
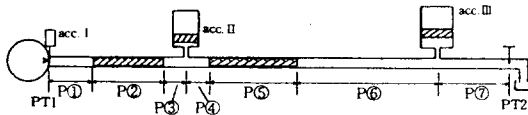


Fig. 9 Pressure records at pipe system (1)
[acc. I: no use, acc. II: no use]



<Test conditions> metal pipe(dia.0.008m) length: P① 0.12m, P③ 0.08m, P④ 0.12m, P⑥ 1.365m, P⑦ 0.24 m, flexible hose(dia. 0.01m) length: P② 0.035m, P⑤ 0.11m acc. I & acc.III: same as the pipe system (1) acc. II: bellows type, 200cm³, 71bar abs.(charge press.) PT1, PT2: Pressure Transducers

Fig. 8 Test pipe system (2)

4. 결과 및 고찰

본 연구에서 주로 관심을 갖는 물리량은 관로상의 임의 위치에서의 압력 진폭치 $|P_i|$, $|P_i|$ 인데, 이론 해석에서는 이러한 압력 진폭치 계산을 위하여 먼저 유량 진폭치 $|Q_i|$ 를 근사식 (10)을 사용하여 계산하였으며, 이 값을 $|\hat{P}_i / \hat{Q}_i|$ 에 곱하여 $|P_i|$ 를 구하고, 다시 $|P_i|$ 를 $|\hat{P}_i / \hat{P}_i|$ 에 곱하여 $|P_i|$ 를 구하는 방법을 사용하였다.

Fig. 9는 관로계가 금속제 관로만으로 구성된 경우인 실험관로계(1)[Fig. 7에서 acc.들을 모두 제거한 경우]의 실험 결과의 일예이다. 펌프 회전속도가 비교적 낮은 경우는 압력 파형이 툭니 모양이었으며, 펌프 회전속도가 1500 rpm 이상이 되면 비교적 정현파에 가까운 압력파가 측정되었다.

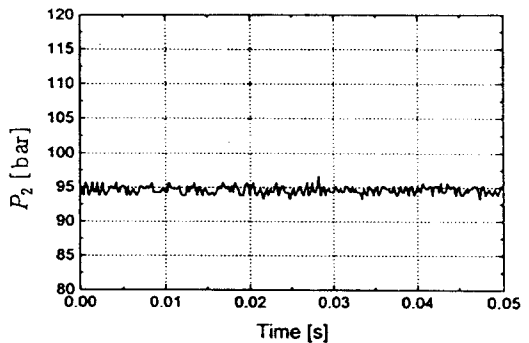
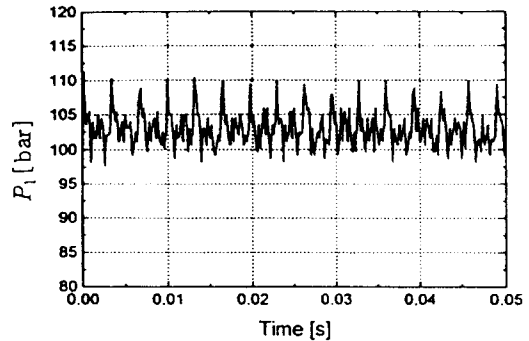
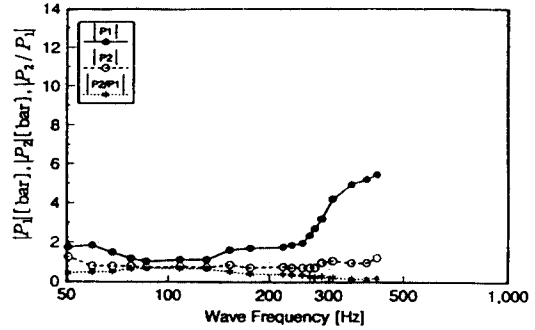


Fig. 10 Pressure records at pipe system (2)

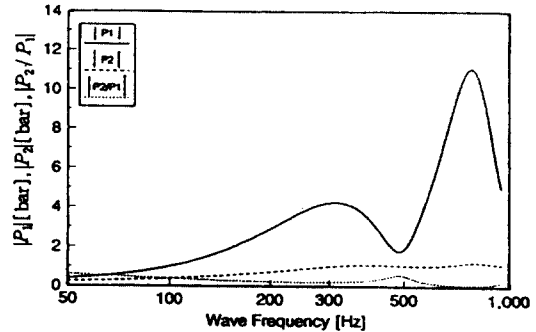
Fig. 10은 실험관로계(2)에서의 실험 결과의 일 예이다. 관로상의 각종 acc.의 작용으로 압력 계측치 P_2 의 진폭이 매우 감쇠되었음을 알 수 있다.

이상과 같이 2개의 실험 관로계를 대상으로, 관로계상의 부가 요소들을 취사 선택함에 따른 다양한 관로 경계조건하에서의 실험 및 이론 해석을 수행하였으며, 그 결과를 정리한 몇가지 예를 Fig. 11~Fig. 13에 나타내었다. 이들 그림에서 횡축에는 압력 맥동의 주파수, 종축에는 관로 상류단 및 하류단의 압력 맥동 진폭치 $|P_1|$, $|P_2|$ 와 압력 진폭비 $|\widehat{P}_2|/|\widehat{P}_1|$ 을 나타내었다. 실제로 계측된 압력 파형에는 다양한 주파수 성분의 신호가 혼재되어 있으며, Fig. 11~Fig. 13에는 계측된 압력 신호를 FFT분석에 의하여 압력 맥동의 제 1차성분(펌프 회전속도×피스톤수로 표시되는 주파수에서의 신호)을 구하여 표시하였다.

Fig. 11은 실험 관로계(1)에서 acc.들을 모두 제거한 관로계를 대상으로 한 실험 및 수치해석 결과로서, 50~450 Hz의 주파수 영역에서 $|P_1|$, $|P_2|$ 모두 2 bar 이상의 압력 맥동이 나타났다.



(a) experiment



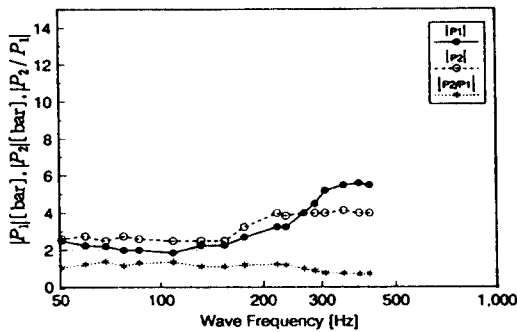
(b) simulation

$$[c = 1300\text{m/s}, f_{b1} = 4000 \text{ N} \cdot \text{s/m}, \\ f_b = 170000 \text{ N} \cdot \text{s/m}]$$

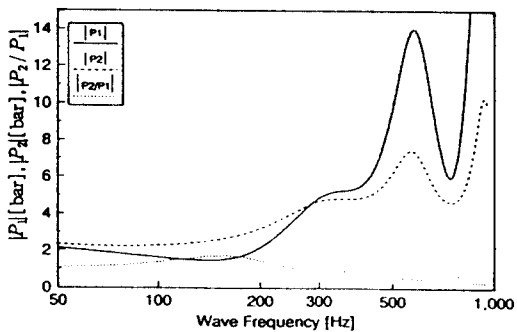
Fig. 12 Results at test pipe system (1)

Fig. 12는 실험 관로계(1)[2개의 acc.가 부착된 상태]을 대상으로 한 실험 및 수치해석 결과이며, P_1 진폭치는 앞의 Fig.11의 결과와 유사하나 P_2 진폭치는 300Hz 이상의 주파수 영역에서도 매우 낮은 진폭치로 감쇠됨을 알 수 있다.

Fig. 13은 관로계(2)를 대상으로 한 실험 및 수치해석 결과이다. 이 때는 비교적 대용량의 벨로즈형 acc.를 포함한 2개의 acc.를 펌프 출구측에 설치하고,



(a) experiment



(b) simulation

$$[c : 1300 \text{ m/s}, \text{acc. I : no use}, \text{acc. II : no use}]$$

Fig. 11 Results at test pipe system (1)

고압 호스를 2개소에 설치한 경우로서, P_1 , P_2 의 절대치는 Fig. 11 및 Fig. 12에 비하여 전 주파수 영역에 걸쳐서 대폭 감소되었음을 알 수 있다.

식(5)에 의한 분기부 전달 매트릭스로 표시한 후 직렬 접속함에 따라서 손쉽게 확장하여 수치해석용 프로그램을 작성할 수 있다.

5. 결 론

복잡한 유압 관로망에서의 압력 맥동 전파 특성을 전달 매트릭스법을 사용하여 해석하는 프로그램을 개발하였으며, 수치 해석 결과와 실험 결과를 비교 검토함으로써 본 이론 해석법의 신뢰성을 확인하였다.

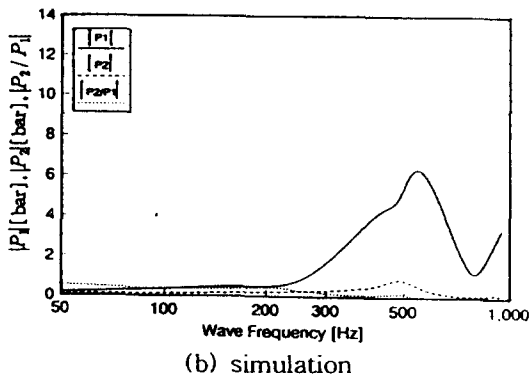
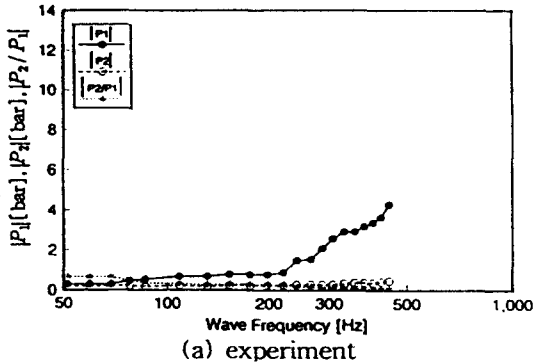
본 연구에서 개발한 수치 해석 프로그램을 사용함으로써 복잡한 유압 관로망에서의 압력 맥동 감쇠 특성을 비교적 정확히 예측할 수 있게 되었으며, 유압 회로망 설계 및 유압장치 요소의 용량 결정을 매우 손쉽게 수행할 수 있게 되었다.

후 기

이 연구는 교육부 학술연구조성비(기계공학분야)에 의한 연구(과제번호: ME95-D-07)이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

<참 고 문 헌>

- 1) Y. Kawasaki 외 5인 “日産 油壓 Active Suspension開發”, 自動車技術, Vol. 44 No.1, pp.120-127, 1989
- 2) E. B. Wylie and V. L. Streeter, “Fluid Transient”, Prentice Hall, pp.287-362, 1993
- 3) 竹中利夫, 浦田暎三, “油壓制御”, 丸善(株), p.112-137, 1967
- 4) F.T. Brown, “The Transient Response of Fluid Lines”, Trans. ASME, Ser. D, Vol.84, No.4, pp.547-553, 1962
- 5) 日本油空壓學會, “油空壓便覽”, オーム社, pp.234-237, 1989
- 6) 鷲尾誠一, “管路系内波動現象の解析(その2-脈動現象)”, 日本機械學會 第567會 講習會 教材, pp.55-66, 1983
- 7) 이일영, 정용길, 윤영환, “유압관로계 고압부 압력 맥동 및 저압부 서지압력 저감기술”, 만도기계(주)중앙연구소, pp.12-44, 1995



$$[f_{b1}=4000 \text{ N} \cdot \text{s/m}, f_{b2}=22 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s/m}, f_f=170 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s/m}, c_h=320 \text{ m/s}]$$

Fig. 13 Results at test pipe system (2)

Fig. 11 ~ Fig. 13에서 수치해석 결과는 어느 경우나 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있으며, 따라서 본 연구에서 개발한 유압 관로계 압력 맥동 해석 프로그램을 사용함으로써, 유압 관로계에서의 압력 맥동 감쇠 특성을 비교적 정확히 예측할 수 있게 되었으며, 유압 관로계 설계 및 유압 관로 요소의 용량 결정을 매우 손쉽게 수행할 수 있게 되었다. 또한, 대상 유압 관로계 요소들의 수가 많은 복잡한 유압관로망에 대해서는 해당 관로 요소의 전달 매트릭스들을 직렬 접속(병렬 요소는