Transactions of KSAE, Vol. 15, No. 6, pp.177-182 (2007)

Copyright Ⓒ 2007 KSAE
1225-6382/2007/090-25

자동차용 유압관로의 주파수 응답 특성

김 도 태*

경일대학교 기계자동차학부

Frequency Response Characteristics of Automotive Hydraulic Pipelines

Dotae Kim*

School of Mechanical Automotive Engineering, Kyungil University, Gyeongbuk 712-701, Korea
(Received 31 May 2007 / Accepted 9 July 2007)

Abstract : In this paper, automotive hydraulic pipeline systems are modeled in which a straight blocked pipe, two pipes with sudden expansion or contraction are connected in series and terminated with a chamber. The frequency response characteristics of these composite pipeline systems are investigated experimentally. The theoretical analysis for various pipe configurations is base on transfer matrix method with frequency dependent viscous friction distributed parameter pipeline model. The gain and phase of transfer functions are included for comparison with experimental results. There is close agreement between the results of experimental and theoretical determination of pressure response in automotive hydraulic pipeline systems.

Key words : Fluid power systems(유공압 시스템), Automotive hydraulic pipelines(자동차용 유압관로), Frequency response characteristics(주파수응답 특성), Distributed parameter pipeline model(분포정수계 관로모델), Frequency dependent viscous friction(주파수 의존 점성마찰)

Nomenclature

a : inner radius of the pipeline, m
c : sonic velocity, m/s
$J_0(x)$, $J_1(x)$: Bessel functions of first kind
j : imaginary unit
L : length of the pipeline, m
K : bulk modulus, MPa
p : pressure, Pa
q : flow rate, m^3/s
s : Laplace operator
t : time, s
V : volume, m^3
$\lambda(s)$: propagation constant
ν : kinematic viscosity of the oil, m^2/s
ρ : density of the oil, kg/m^3
$Z_0(s)$: characteristic impedance

*Corresponding author, E-mail: dtkim@kiu.ac.kr

1. 서 론

전자제어·유압시스템은 차량의 주행성능과 승차감을 향상하기 위해 많이 장착한다. 차량 탑재용 유압시스템은 출력/중량비가 크고, 소형·경량, 고속 응답성 및 제어성이 양호한 장점을 활용하여, 동력조향, 자동변속기, 4륜 구동 및 능동현가장치 등에 응용하고 있다.

차량용 유압시스템이 저소음화·고속화·고성능화됨에 따라 제어밸브, 액추에이터의 성능뿐만 아니라 이러한 부품을 연결하는 관로의 동특성 해석이 중요한 과제이다. 유압식 능동현가장치의 피스

톤펌프에서 발생하는 압력맥동, ABS(anti-lock brake system)에서와 같이 밸브 작동에 따른 서지압력(surge pressure) 발생, 동력조향용 베인펌프에서 발생하는 압력맥동 등은 차량의 저소음화와 승차감 향상에 나쁜 영향을 준다.[1-4] 또한 차량용 유압시스템에서 관로의 동특성은 관이 연결된 부품뿐만 아니라 시스템 전체의 동특성과 안정성에 영향을 미치기 때문에 차량용 유압관로의 형상과 재질, 입구와 출구의 경계조건 변화에 따른 정특성과 동특성 해석에 관련된 설계 자료가 필요하다.

본 연구에서는 차량용 유압관로를 기하학적 형상과 입·출구의 경계조건 변화에 따라 분포정수계 관로모델을 적용하여 모델링하고, 시뮬레이션과 주파수 응답 실험을 통하여 그 타당성을 비교·검토하였다.

2. 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이며, 유압발생부, 유압관로계 및 계측·신호처리부로 구성되어 있다. 유압발생부는 3.7kW 3상 유도 전동기로 구동되는 사판식 액시얼 피스톤 펌프(배제용적 8cc/rev)이며, 펌프 송출구 매니폴드에 축압기를 설치하여, 피스톤 펌프에서 발생하는 압력맥동을 제거하였다. 또한 실험조건에 따라 축압기를 용이하게 설치·제거할 수 있도록 매니폴드를 설계·제작하였다.

유압관로의 길이는 490cm, 290cm, 지름은 1.6cm, 0.953cm이다. 용량(chamber) 요소의 체적은 관로 체적의 약 1.2배로 설계하여 718.8cm^3, 870.1cm^{3}이며, 유압배관 끝부분에 부착하였다.

주파수 응답 실험에서, 정현파는 전기·유압서보밸브(이하 서보밸브)에서 발생시켰다. 압력은 관로 상류·중간·하류에 설치된 고속응답형 압력변환기로 측정하여 고정밀도 증폭기와 저역통과필터를 거쳐 16bit A/D변환기(샘플링 주파수 10kHz)에서 이산화되어 마이크로컴퓨터(CPU 80686)에 입력된다. 평균유량은 터빈형 유량계로 계측하였으며, 서미스트형 온도계로 작동유의 온도를 측정하였다.

실험에서, 유압 작동유는 동점도 0.46cSt(40°C)를 사용하였고, 온도는 40±1°C로 일정하게 유지하였다. 또한 서보밸브의 공급압력은 70bar, 입력 주파수는 5～200Hz까지 단계적으로 변화시켰다.

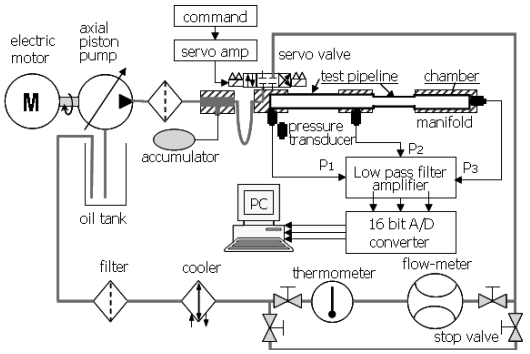

Fig. 1 Experimental apparatus

3. 관로 모델링 및 주파수 응답 실험

3.1 분포정수계 관로모델

Fig. 2에 도시한 유압관로에서, 원관 속의 흐름상태가 층류이고, 작동유의 압축성과 비점성 점성저항을 고려한 분포정수계 관로모델을 고려하면, 관길이 L에 따른 압력과 유량 사이의 동특성은 다음의 전달행렬(transfer matrix)로 주어진다.[5]

$$\begin{pmatrix} P_1(s) \\ Q_1(s) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_2(s) \\ Q_2(s) \end{pmatrix} \tag{1}$$

식 (1)의 행렬 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_{11}(s) &= G_{22}(s) = \cosh[\lambda(s)L] \\ G_{12}(s) &= Z_0(s)\sinh[\lambda(s)L] \\ G_{21}(s) &= \sinh[\lambda(s)L]/Z_0(s) \end{aligned} \tag{2}$$

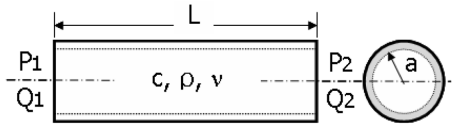

Fig. 2 Hydraulic pipeline

식 (1), (2)에서, P(s), Q(s)는 압력p(t), 유량q(t)의 라플라스 변환형, $\lambda(s)$, $Z_0(s)$는 주파수에 의존하는 비정상 점성저항을 고려한 관로의 전파상수와 특성 임피던스이며, 다음과 같다.[6,7]

$$\lambda(s) = \frac{s}{c}\left\{1 - \frac{2J_1\left(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right)}{ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\,J_0\left(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right)}\right\}^{-\frac{1}{2}} \tag{3}$$

$$Z_0(s)=\frac{\rho c}{\pi a^2}\left\{1-\frac{2J_1(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}})}{ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\,J_0(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}})}\right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

3.2 관로 한쪽 끝단이 폐쇄된 경우

Fig. 3(a)의 직선관로에서 한쪽 끝단이 폐쇄된 경우, 관로 하류를 통과하는 유량은 $Q_2=0$이다. 따라서 전달행렬 식 (1)에서 상·하류의 압력에 대한 전달함수는 식 (5)와 같다.

$$G_1(s)=\frac{P_2(s)}{P_1(s)}=\frac{1}{\cosh\lambda(s)L} \quad (5)$$

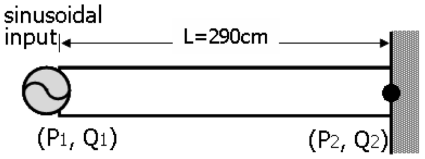

Fig. 3 (a) Blocked pipe

Fig. 3(a)에서, 서보밸브를 사용하여 관로 상류에 정현파의 압력 변동을 입력하고 관로 상류와 하류 압력변동의 진폭과 위상을 계측하여 주파수 응답 특성을 조사하였다.

Fig. 3(b)는 서보밸브에 공급압력 70bar, 관 길이 290cm, 정현파 50Hz를 입력하였을 때 계측 파형이다. 그림에서, 첫 번째 파형은 서보밸브 증폭기에 입력신호, 두 번째(pressure 1)는 관로 상류의 압력 변동 계측파형이며, 식 (5)의 전달함수에서 입력에 해당한다. Pressure 2는 관로가 폐쇄된 하류부의 압력 파형이며, 출력파형에 해당된다. 하단에는 입력과 출력파형의 진폭과 위상을 비교하기 위하여 같은 좌표계에 중첩하여 도시하였다.

Fig. 3(c)는 Fig. 3(a)에서 도시한 직선관로계의 주파수 응답 특성이며, 횡축은 주파수, 종축은 이득(gain)과 위상(phase)을 나타낸다. 그림에서 실선은 전달함수인 식 (5)에서 계산한 값이며, 기호(○)는 입력 주파수 변화에 대한 이득과 위상특성의 실험결과이다. 압력계측 파형과 보드선도를 비교해 보면, 입력 주파수가 200Hz 정도까지 실험결과와 이론값이 잘 일치함을 볼 수 있다.

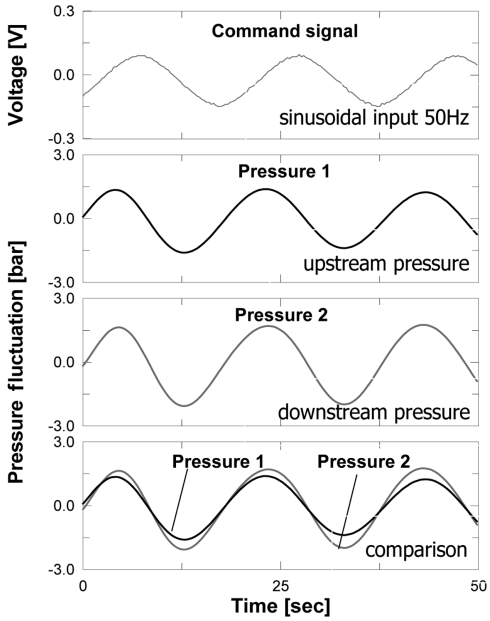

Fig. 3 (b) Measured wave forms for blocked pipe(L=290cm)

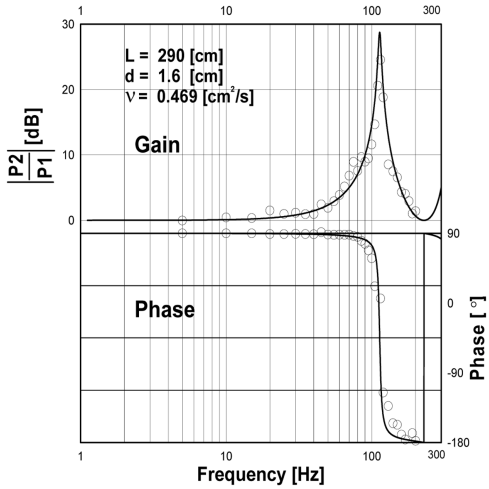

Fig. 3 (c) Bode plot for blocked pipe(L=290cm)

또 관 길이가 290cm일 때, 관로의 1차 공진점이 약 120Hz 근방에서 나타나며, 관로 공진 주파수에 근접함에 따라 진폭이 커짐을 알 수 있다.

3.3 직선관로-용량계인 경우

Fig. 4(a)와 같이 직선관로에 일정한 체적을 가진 용량(chamber) 요소가 부착된 경우, 용량요소에서 탄성의 영향은 작동유의 압축성에 비교하여 무시할

수 있으므로 유량 $q_2(t)$는 다음 식과 같다.

$$q_2(t) = \frac{V}{K}\frac{dp_2}{dt}, \quad Q_2(s) = \frac{V}{K} s P_2(s) \tag{6}$$

식 (1), (2)와 식 (6)에서, 직선관로-용량계의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_2(s) = \frac{P_2(s)}{P_1(s)} = \frac{1}{G_c(s)}$$
$$G_c(s) = \cosh \lambda(s)L + \frac{V \cdot s}{K} \cdot Z_0(s) \sinh \lambda(s)L \tag{7}$$

Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)에서 직선관로 길이 290cm, 체적 718.8cm^{3}인 용량요소가 부착된 경우, 서보밸브에 115Hz 정현파를 입력하였을 때의 계측파형이며, Fig. 4(c)는 주파수 특성을 나타낸다. 보드선도에서 실선은 식 (7)의 계산값을 나타낸다. 직선관로에 용량요소를 부착하면, Fig. 3(c)의 직선관로에서 한쪽 끝단이 폐쇄된 경우의 주파수 특성과는 큰 차이를 보인다. 특히 1차 공진주파수가 급격하게 작아지며,

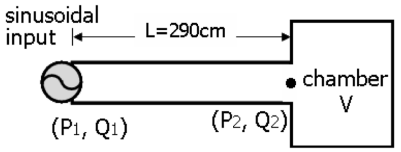

Fig. 4 (a) Pipe terminated with a chamber

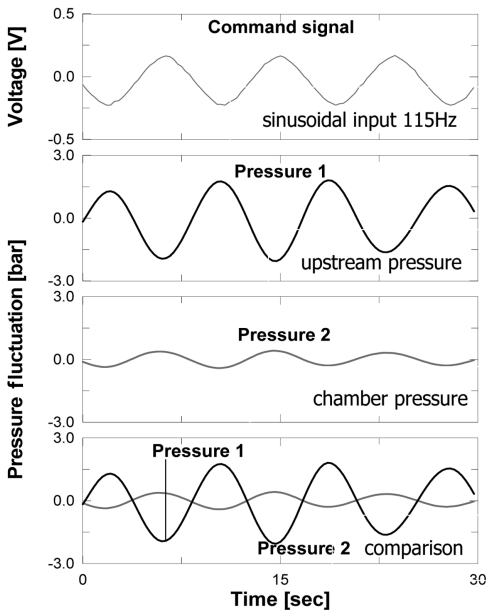

Fig. 4 (b) Measured wave forms for L=290cm, V=718.8cm^3

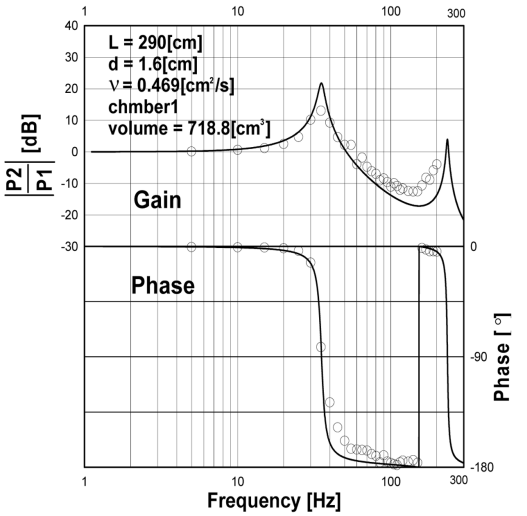

Fig. 4 (c) Bode plot for pipe terminated a chamber

전달함수 식 (7)에서 V = 0이면 식 (5)와 같아진다. 따라서 용량요소를 부착하면, 식 (7)의 $V \cdot Z_0(s)/K$에서 관 길이L과 관 반지름a에서 구한 관로 체적과 용량요소의 체적 V값의 변화에 따라 영향을 받는다. 특히 용량요소의 체적이 커지면 $V \cdot Z_0(s)/K$ 값의 영향이 커지므로 관로의 공진 주파수는 감소한다. 이 결과에서 보듯이, 유압회로에 축압기나 맥동저감용 필터나 소음기를 설치할 때는 관로와 용량요소의 동특성을 고려하여 시스템을 설계해야 함을 알 수 있다.

3.4 이경관로계인 경우

Fig. 5(a)와 같이 이경관로는 지름이 다른 두 직선관로를 직렬로 연결한 것이다. Fig. 5(a)에서, 이경관로 끝단이 폐쇄되어 있기 때문에 유량 $Q_3 = 0$이다. 식 (1), (2)를 확대관 지름 1.6cm, 길이 290cm, 축소관 지름 0.95cm, 길이 200cm인 직선관로로 고려하여 압력 P_1, P_3에 대한 전달함수를 구하면, 식 (8)과 같다.

$$G_3(s) = \frac{P_3(s)}{P_1(s)} = \frac{1}{G_1(s) \cdot H_a(s) + G_2(s) \cdot H_b(s)} \tag{8}$$

$$G_1(s) = \cosh\lambda_1(s)L_1, G_2(s) = Z_{01}(s)\sinh\lambda_1(s)L_1$$

$$H_a(s) = \cosh\lambda_2(s)L_2, H_b(s) \equiv \frac{1}{Z_{02}(s)} sinh\lambda_2(s)L_2$$

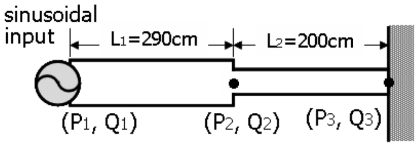

Fig. 5 (a) Pipe with cross section change

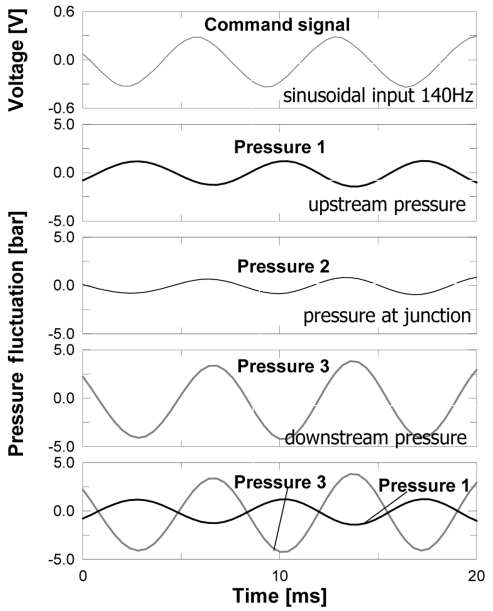

Fig. 5 (b) Measured wave forms for L_1=290cm, L_2=200cm

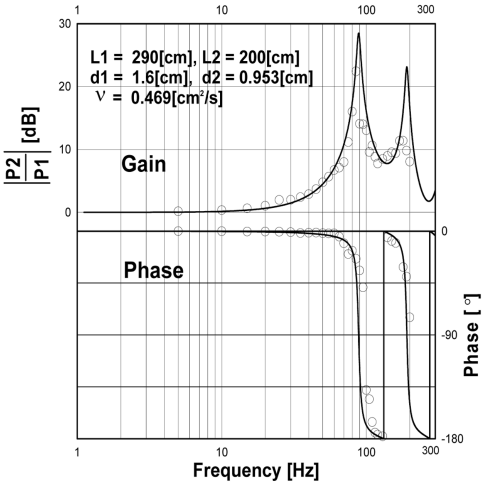

Fig. 5 (c) Bode plot for pipe with cross section change

Fig. 5(b)는 140Hz의 정현파를 입력한 경우에 대한 계측파형이다. 그림에서 압력파형 2(pressure 2)는 직경 1.6cm인 관로와 직경 0.95cm인 관로 연결부에서 압력파형이다.

Fig. 5(c)는 주파수 응답 특성 실험결과와 전달함수 식 (8)에서 계산한 값을 보드선도에 나타낸 것이다. 관 지름과 길이가 서로 다른 관로가 직렬 연결된 이경관로계 각각을 직선관로로 고려하여 해석하여도 이득과 위상에 큰 오차가 나타나지 않으며, 접합부는 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

3.5 이경관로-용량계의 전달함수

Fig. 6(a)는 실제 차량용 유압관로의 복잡한 기하학적 형상을 관로의 단면적 변화와 일정 체적을 가진 용량요소로 모델링한 것이며, 식 (1), (2), 식 (7), (8)을 고려하여 전달함수를 구하면, 식 (9)와 같다.

$$G_4(s) = \frac{P_3(s)}{P_1(s)} = \frac{1}{H_p(s)} \tag{9}$$

$$H_p(s) = \cosh\lambda_1(s)L_1 \cdot H_a(s) + \frac{1}{Z_{01}}(s) \cdot \sinh\lambda_1(s)L_1 \cdot H_b(s)$$

$$H_a(s) = \cosh\lambda_2(s)L_2 + k_\nu \cdot s \cdot Z_{02}(s) \cdot \sinh\lambda_2(s)L_2$$

$$H_b(s) = \frac{1}{Z_{02}(s)} sinh\lambda_2(s)L_2 + k_\nu \cdot s \cdot \cosh\lambda_2(s)L_2$$

$$k_\nu = V/K$$

Fig. 6(a)는 관 지름 1.6cm, 길이 290cm과 지름 0.95cm, 길이 200cm인 이경관로 끝단에 체적 870.1cm^{3}인 용량요소를 부착한 복합관로계이다.

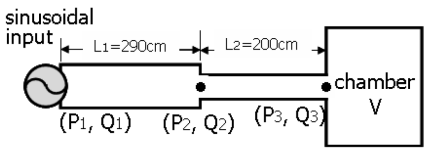

Fig. 6 (a) Composite pipe

Fig. 6(b)는 서보밸브에 50Hz 정현파를 입력한 경우에 대한 압력계측 파형이다. 그림에서 압력파형 2(pressure 2)는 지름 1.6cm인 관로와 지름 0.95cm인 관로 접합부의 압력계측 파형이다. 입력주파수 변동에 따라 압력계측 파형의 진폭과 위상이 크게 변동함을 볼 수 있다.

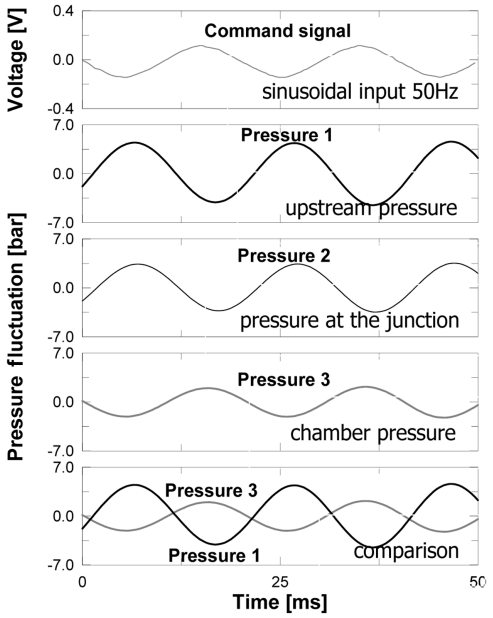

Fig. 6 (b) Measured wave forms for composite pipe

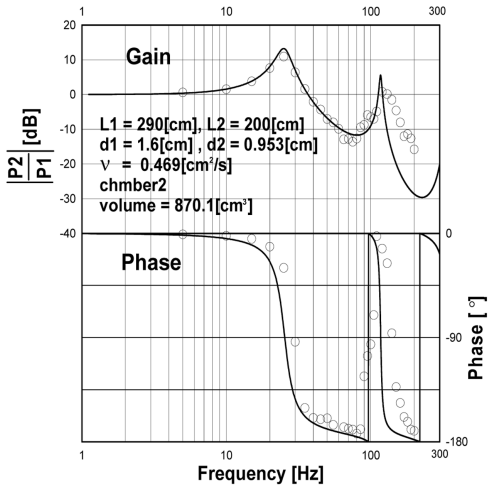

Fig. 6 (c) Bode plot for composite pipe

Fig. 6(c)는 이경관로계에 보드선도와 비교하여 보면, 용량요소를 부착함에 따라 관로 1차 공진 주파수가 현저하게 감소함을 볼 수 있다.

4. 결 론

1) 차량용 유압관로를 기하학적 형상과 관로 입·출구의 경계조건에 따라 모델링하여 전달함수를 구하고 주파수 응답 특성을 실험한 결과, 시뮬레이션과 실험결과가 잘 일치하였다.
2) 직선관로-용량계와 이경관로-용량계에서 1차 공진 주파수는 직선관로계와 이경관로계에 비교하여 아주 작아지며, 용량요소의 체적과 관로의 체적 변화에 큰 영향을 받는다.
3) 이경관로계와 이경관로-용량계에서 접합부의 영향은 무시할 수 있으며, 이경관로계는 직선관로의 직렬연결로 모델링하여도 실용상 큰 문제가 없음을 주파수 응답 실험으로 확인하였다.

Reference

1) S. Yokota, H. Somada and H. Yamaguchi, “A Study on an Active Accumulator,” Trans. JSME, Vol.60, No.570, pp.484-490, 1994.
2) B. W. Kim and C. S. Song, “A Study on the Pressure Surge of ABS Hydraulic System,” Transactions of KSAE, Vol.9, No.5, pp.140-147, 2001.
3) Y. H. Yoon and M. J. Choi, “A Study on the Characteristics of Damping Force in a Hydraulic Actuator for Vehicle Active Suspension System,” Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, pp.150-158, 2002.
4) D. T. Kim and J. Kim, “Measurement of Flow Ripple Generated by Balanced Vane Pumps in Automotive Power Steering Systems,” Transactions of KSAE, Vol.8, No.6, pp.70-78, 2000.
5) A. F. D'souza and R. Oldenburger, “Dynamic Response of Fluid Line,” Trans. ASME, J. of Basic Eng., Vol.86, No.3, pp.589-598, 1964.
6) R. E. Goodson and R. G. Leonarad, “A Survey of Modeling Techniques for Fluid Line Transients,” Trans. ASME, J. of Basic Eng., pp.474-482, 1972.
7) F. T. Brown, “The Transient Response of Fluid Line,” Trans. ASME, J. of Basic Eng., Vol.84, No.4, pp.547-553, 1962.