

유압 관로망에서의 압력 맥동 해석법 개발

이 일 영 (부산수산대학교 자동차공학과)

정 용 길 (경상대학교 선박기계공학과)

윤 영 환 (반도기계 중앙연구소)

ABSTRACT

An analyzing method for pressure fluctuation in oil hydraulic pipe network was developed in this study. The object pipe network has multi-branch configuration, and the pipeline of it is 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 was confirmed by comparing and investigating computed results and experimental results got in this study.

1. 서론

종래에는 유압 시스템이 주로 산업기계 구동용으로만 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 어큐물레이터를 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.

유압 관로계의 압력 맥동 해석법으로는 종래부터 전달 매트릭스법이 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 활용될 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) 鋼管 요소의 전달함수 표시

본 연구에서 대상으로 하는 유압 관로내 유동은 층류이며, 층류 유동인 경우 Fig.1과 같은 단일 관로의 단면 I 과 단면 II에서의 압력 및 유량 사이의 관계는 식(1)과 같이 전달 매트릭스를 사용하여 표시할 수 있다.²⁾

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

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

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

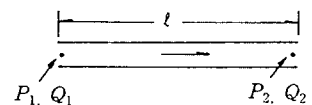


Fig. 1 단일 관로

식(2)의 λ 계산에는 Brown³⁾의 근사식을 사용하기로 한다.

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

(2) 고압 호스 요소의 전달함수 표시

유압용 고압 호스의 관로 벽은 탄성 뿐만 아니라 점성을 갖는 물질로 알려져 있다. 이러한 고압 호스의 동특성을 기술하는 粘彈性 모델⁴⁾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. 2에 나타내었다.

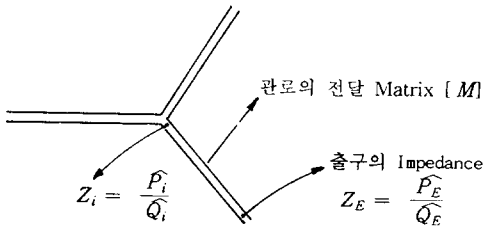


Fig. 2 작동유의 압축성을 고려한 3인자 모델 위의 Fig. 2의 3인자 모델에서 점탄성관로내 압력의

미소 변화분 P_w 와 관벽의 반경 방향 미소 변화 y_w 사이의 관계는 다음 식으로 표시된다.

$$P_w(s, x) = \frac{k(T_1 s + 1)}{T_2 s + 1} \cdot Y(s, x) \quad (5)$$

여기서 k , T_1 , T_2 는 실험적으로부터 구할 수 있는 상수이다.

점탄성관에서의 음속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_h = c_h \sqrt{\frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}}, \quad c_h = \sqrt{\frac{RK}{2\rho}} \quad (6)$$

여기서 T_1 , T_2 는 식 (5)에 정의되어 있다.

식(6)의 c_h 는 $s (=j\omega)$ 가 영(zero) 부근일 때의 점탄성 관로내 파동 전파 속도를 의미한다.

점탄성 관로 요소의 전달 매트릭스 식은 위의 식(1)을 적용할 수 있으며, λ , Z_c 에 관한 식도 위의 식(2) 및 (3)을 적용할 수 있다. 단, 관로가 점탄성 관로일 때는 식 (2) 및 (3)에 내포된 c 값으로 식(6)을 사용하는 것이 특징이다.

2.2 유체 임피던스(impedance)

전기 공학에서는 전압과 전류사이의 동적인 비율을 임피던스라 부른다. 이와 마찬가지로 유체 관로에서도 압력과 유량 사이의 관계를 유체 임피던스라 부르며, 다음과

같이 정의한다.

$$Z = \frac{\hat{P}}{\hat{Q}} \quad (5)$$

2.3 관로 경계부의 전달함수 표시

Fig.3과 같은 관로 分岐部에서는 입구측과 제 k 번째 분기 관로 입구부사이의 관계를 나타내는 식은 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_0 \\ \hat{Q}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Z_i} \right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P}_k \\ \hat{Q}_k \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 Z_i 는 i 번째 분기 관로 입구부에서의 유체 임피던스를 나타낸다.

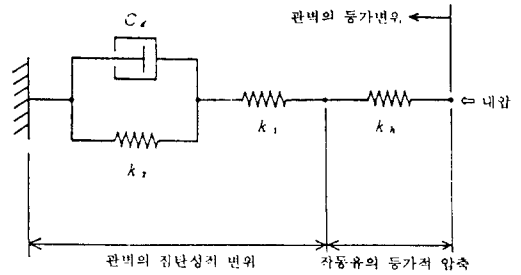


Fig. 3 관로 분기부

또한, 밸브와 같은 교차기구 입구측과 출구측에서의 압력과 유량의 관계식은 아래와 같이 표시된다.

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

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

관로상에 piston식 accumulator가 설치된 경우, accumulator 접속부에서의 압력 및 유량 \hat{P} , \hat{Q} , \hat{P} , \hat{Q} 사이에는 다음 식이 성립한다.

$$\begin{bmatrix} \hat{P}(s) \\ \hat{Q}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \beta_g V_g s / Kaccp & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P}'(s) \\ \hat{Q}'(s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서

$$Kaccp = \left(\frac{m_{tp}}{A_p^2} + \frac{m_n}{A_n^2} \right) \cdot \beta_g V_g s^2 + (F_p + F_n) \beta_g V_g s + 1$$

관로상에 bellows식 accumulator가 설치된 경우, accumulator 접속부에서의 압력 및 유량 \hat{P} , \hat{Q} , \hat{P} , \hat{Q} 사이에는 다음 식이 성립한다.

$$\begin{bmatrix} \hat{P}(s) \\ \hat{Q}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \beta_g V_g s / Kaccb & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P}'(s) \\ \hat{Q}'(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서

$$K_{accb} = \left(\frac{m_{ib}}{A_b^2} + \frac{m_n}{A_n^2} \right) \beta_g V_g s^2 + (F_b + F_n) \beta_g V_g s + \frac{k_b}{A_b^2} \beta_g V_g + 1 \quad (9)$$

2.4 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(10)과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_i \\ \hat{Q}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 \\ T_3 & T_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P}_j \\ \hat{Q}_j \end{bmatrix} \quad (10)$$

실제 해석을 수행할 때는 식(10) 우변의 계수 매트릭스 결과식을 구할 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_{Ej} ($= \hat{P}_j / \hat{Q}_j$)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.

2.5 피스톤식 유압 펌프의 특성 표시

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

$$Q_a = \eta_v \frac{Z A_p L \omega}{2\pi} - (K_1 + \omega K_2) \cdot \sin Z \omega t \quad (11)$$

위 식에서 K_1, K_2 는 실험으로부터 구해야 할 상수이다.

3. 유압 관로계의 동특성 실험

실험 및 해석 대상 유압관로망의 일예를 Fig.4에 나타낸다.

유압 펌프 구동용 전동기는 인버터 구동 방식으로 0 ~ 3600 rpm 가변 속도형이다. 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 accumulator 등으로 구성하였다.

계측하는 물리 인자로는 관로 가부의 압력(P) 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 F/V변환기를 거쳐 Data Logger(486 PC)에서 데이터 파일로 저장되고, 실험 종료 후 계측 과정으로부터 관로의 주파수 특성(압력 맥동 감쇠 특성)을 구하게 된다.

4. 해석 및 실험의 수행, 결과 고찰

프로그램에 포함된 각종 물리 변수들 가운데는 직접 계측이 가능한 것들(예 : 관로의 치수, 기름의 물성치 등)이 있는 반면에, 직접 계측이 곤란한 것들도 다수 포함되어 있다. 직접 계측이 난이한 물리 변수의 예로는 유압 펌프의 맥동 유량 진폭 Q_{1dev} (이것은 맥동 주파수 ω 의 함수로 표시됨), 각종 acc.의 점성 마찰 계수, 고압 호스의 특성치 (c_{M1}, T_1, T_2) 등이 있으며, 이들 물리 변수 들은 구하기 위한 기초 실험을 수행하였다.

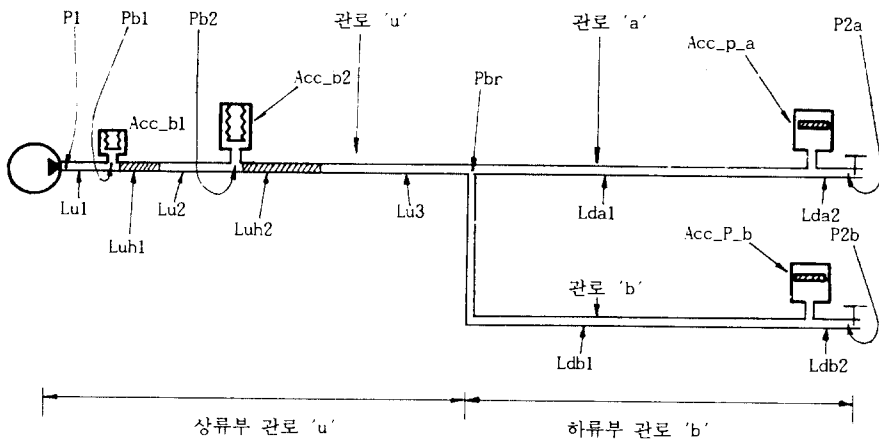
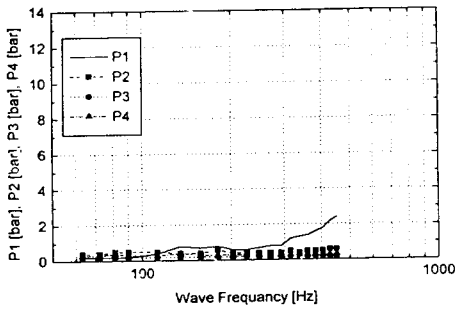
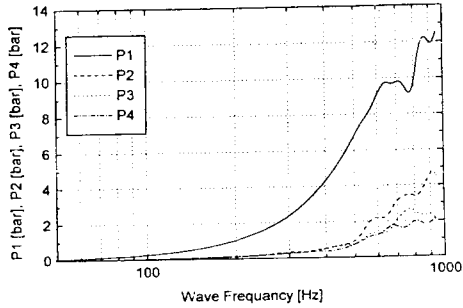


Fig. 4 대상 유압 관로계의 구성



(a) 실험



(b) 이론 해석

[$fb_{b1} = 4000 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, $fb_{b2} = 1000 \text{ N} \cdot \text{s/m}$,
 $fp_{pa} = fp_{pb} = 300,000 \text{ N} \cdot \text{s/m}$,]

Fig. 5 대상 유압 관로망에서의 압력 맥동 전파 특성

기초 실험에서 구해진 물리 변수값들을 사용하여, Fig. 4의 대상 실험 관로망에 대한 이론 해석을 수행하고, 그 결과를 실험 결과와 비교한 것이 Fig. 5이며, 이로부터 신뢰성있는 이론 해석 결과가 얻어짐을 확인하였다.

5. 결론

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

따라서, 본 이론 해석법을 사용함으로써 복잡한 유압 관로망에서의 압력 맥동 감쇠 특성을 정확히 예측할 수 있게 되었으며, 유압 회로망 설계 및 유압장치 요소의 용량 결정을 매우 손쉽게 수행할 수 있게 되었다.

<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, P.120-127.
2. 竹中利夫, 浦田暎三, “油壓制御”, 丸善(株)(1967), p.112-137.
3. F.T. Brown, Trans. ASME, Ser. D, 84-4(1962), p.57.
4. 日本油空壓學會, “油空壓便覽”, p.234-237.