

직경이 작은 유압관로에서의 동특성

나기대*, 유영태*, 김지환**

Dynamic Response of Hydraulic Pipe Lines with a Relative Small Diameter

Gee-Dae Na*, Young-Tae Yoo*, Ji-Hwan Kim**

Abstract

This paper is primarily directed toward analyzing the frequency response in hydraulic pipe lines with a small diameter. The exact solution to the frequency response is obtained by using the complicated transfer function. The discrepancy with the exact and the approximate is small, so the approximation solution is adopted to compare the experimental result with the theoretical analysis.

In this experiment, the input frequency was generated by the frequency generator with the ball valve and speed controller. In order to compare the theoretical wave forms with the experimental ones, the trace obtained from the oscilloscope is photographed. The diameter, the length of lines, and input pressure amplitude are varied to investigate their effects. The experiment results show that the values of dimensionless parameter are very affected to the phase delay and guide response time in the design of pressure manifold to measure the pressure of hydraulic pipelines.

Keyword : Fluid Power Systems(유압시스템), Hydraulic Pipeline Dynamics (유압관로의 동특성), Pressure Measurement (압력계측) Unsteady Flow(비정상유동)

1. 서 론

산업현장에서 사용하고 있는 공작기계는 고속화, 정밀화, 자동화분야에 관심이 집중 되고 있고, 특히 자동화분야의 많은 부분에 다양한 방법으로 유압장치가 필요하게 되었다. 그 예로서 초정밀 가공기의 주축용 베어링으로 공기베어링이 대부분 사용되고 있는데, 이⁽¹⁾ 등은 공기의

유량을 제어하여 연삭깊이를 제어하는 유량특성을 나타내어 자려진동 등을 방지하는 방법을 소개하였다. 대형공작기계에서는 작업이송 테이블의 조절이나 공작기구의 이송장치등을 효율적으로 운전하기 위해서 유압장치를 이용하고 있다. 유압을 이용하는 많은 공작기계 및 산업기계는 대부분 동력을 발생하는 장치와 동력을 전달하는 장치 및 일을 하는 액추에이터로 구별되는 데, 이들 대부분은 관로

* 조선대학교 기계공학부

** 조선대학교 대학원

로 연결되어 있다. 이 관로로 연결되어 있는 각종 액추에이터의 특성을 조절하여 동력을 제어하기 위해 각종유압 밸브를 이용하게 되는데, 이 때 동력을 전달하는 관로에서의 동특성 해석이 반드시 필요하게 된다.

작동유체로서 기름을 이용할 경우 공기나 물과는 달리 점성에 의한 영향을 받게 되고, 유압장치는 각기 다른 크기의 축소 확대 부분과 초크부분이 있고, 기어펌프나 베인 펌프 및 로터리 펌프와 같은 회전체로부터 기름을 수송하게 되는데, 이들은 시스템을 구성하는 고유한 재질 때문에 발생하는 고유진동수와 외부에서 주기적으로 주어지는 주파수 때문에 발생하는 맥동현상이 나타나게 된다.^{2,3)} 이 두 주파수는 주파수 대역에서 보강 상쇄간섭을 하면서 공진현상을 발생 할 수 있다.

이와 같은 이유로 공작기계에서 사용하고 있는 각종 유압시스템을 구성하고 있는 회전체에서 주파수변화 때문에 발생하는 동특성 해석이 필요하다. 유압장치에 의해 전달되는 동력을 해석하는 방법으로는 유량을 결정하는 속도특성과 압력특성을 주파수의 변화에 따라 해석해야 한다^{4,5)}. 이와 같은 동특성을 해석하기 위해 관로에 직접 각종 검출기를 부착하여 직접 측정할 수가 없기 때문에 간접적으로 측정하게 되는데, 가장 일반적으로 사용하는 방법은 유압관로에 스테틱링이나 매니폴드를 만들어 부착한 다음 응답특성이 좋은 검출기로부터 측정하여 물리적 성질을 해석하게 된다. 그러나 유압관로에 부착되어 있는 스테틱링이나 매니폴드로부터 검출기로 전달하는 각종 유체유동의 특성은 모세관처럼 아주 작은 관로부터 검출로까지 각종 신호를 전달하기 때문에, 직경이 작은 관로에서의 동특성을 해석할 필요가 있다. 관로로부터 검출기까지 전달하는 각종 유동특성은 관로의 직경 길이 및 수압부의 크기 등에 영향을 받게 된다. 그러므로 이 직경이 작은 관로에서 전달하는 유체의 유량과 관로의 형태 및 길이, 수압부의 크기에 따른 동특성을 전기회로의 전류 저항 및 용량성을 해석할 때 이용하는 Kirchhoff 회로도나 등가회로 연구했다. 또한 전기에서 사용하는 인덕턴스 캐피시턴스 및 임피던스의 개념을 도입하여 압력측정용 매니폴드부의 직경이 작은 유압관로의 주파수 변화에 따른 동특성을 해석하였다.

2. 이론해석

Fig. 1에 제시한 직경과 길이가 짧은 압력측정공의 ㉠부분을 교축부가 비교적 긴 오리피스라고 할 때, 이부분의 유체를 油柱로 가정할 경우, 관성력, 저항등을 고려하면 압력차와 유량간의 관계는 다음과 같은 식으로 표현 할

수 있다.

$$L \frac{dq}{dt} + Rq = p_1 - p_2 \quad (1)$$

$$q = C \frac{dp}{dt} \quad (2)$$

여기에서 L 는 검출부의 임피던스, C 는 수압실의 캐피시턴스 이고 각기 다음과 같이 표시된다⁶⁾.

$$L = \frac{\rho_0 l_1}{A_1} \left(1 + \frac{8}{3\pi} \frac{d_1}{l_1} \right) \equiv \frac{\rho_0 l_1 k}{A_1} \quad (3)$$

$$C = \frac{V_2}{\gamma p_0} \equiv \frac{V_2}{\rho_0 c_0^2} \cdot k = 1 + \frac{8}{3\pi} \frac{d_1}{l_1} \quad (4)$$

위식에서 사용한 기호 ρ_0 는 유체의 평균밀도, p_0 는 평균절대압력, c_0 는 음속, γ 는 비열비이다.

d_1, l_1, A_1 은 각각 측압공의 직경, 길이, 단면적이고, V_2 는 수압실의 체적이다.

본 연구에 사용한 압력측정부의 수압실의 길이와 체적의 모양은 Fig. 1과 같으며 Fig. 2는 등가회로 이다.

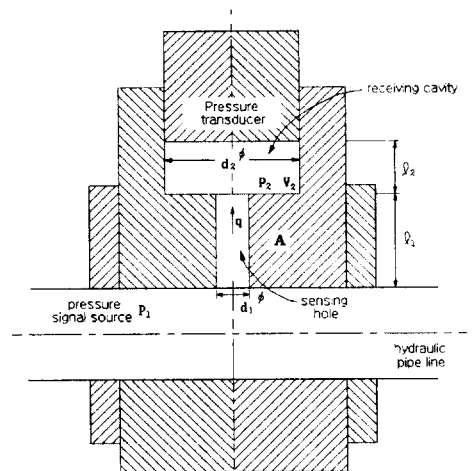


Fig. 1 Configuration of cavity-mounted

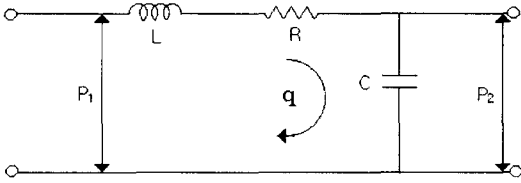


Fig. 2 Equivalent circuit pressure sensing section

측압공을 만들어 비정상유동의 변화하는 압력을 측정할 때 주파수 변화에 따라 압력에 대한 유량의 변화가 발생한다. 즉 직접압력을 측정할 수가 없기 때문에 측정오차와 측압공을 만드는 것에 따라서 측정하고자 하는 유동특성이 변화한다. 이런 현상을 보다 정확하게 측정하기 위해 압력파의 특성해석이 필요하다. 왜냐하면 유압관로에 의해 전달하는 동력은 압력과 유량의 곱으로 표시하기 때문에 압력과 유량을 정확하게 해석한다는 것은 최적의 설계조건을 제공해주기 때문이다. 그러므로 보다 정확하게 유동특성을 해석하기 위해서는 측압공의 응답특성과 부하특성(입력 임피던스)을 정확하게 해석할 필요가 있으므로 Fig. 1과 같이 압력측정공을 만들어 압력검출부의 d_1 , d_2 및 l_1 , l_2 의 변화에 따른 영향을 연구하기 위하여 다음 식을 적용하였다.

$$P_1 - P_2 = \left\{ \frac{\rho_0 l_1}{A_1} \left(\frac{3\pi\nu_0}{A_1} + \sqrt{\frac{2\pi\nu_0\omega}{A_1}} + j\omega \right) + \left(\frac{\rho_0\omega^2}{\pi c_0} + j\omega \frac{8}{3\pi} \frac{\rho_0 d_1}{A_1} \right) + \frac{4}{3\pi} \frac{\rho_0 q_m}{C_d^2 A_1^2} \right\} Q \quad (5)$$

여기에서 P_1 , P_2 , Q 는 각각 신호원압력 p_1 , 신호를 받는 측의 압력 p_2 , 측압공을 통과하는 체적유량, q 의 푸리에 변환이다. 각각의 진폭은 p_{1m} , p_{2m} , q_m 이라고 하고 ν_0 는 동점성계수, j 는 허수, C_d 는 오리피스 유량계수이다.

식(5)의 { } 내의 제1항은 검출구멍의 관로 임피던스를 표시하고, 제2항은 구멍 양단의 방사임피던스를 표시한다. 보통 크기의 형상을 갖는 측압구에서 문제가 되는

주파수범위에서 $\frac{\nu_0}{d_1^2 \omega}$, $\frac{d_1 \omega}{c_0}$ 가 충분히 작은 경우의 근사형태이다.

제3항은 비선형 오리피스 저항으로 검출 오리피스 전후의 압력차가 유량의 2승 ($q \cdot |q|$)에 비례한다고 가정할 경우에, 압력차의 기본파 성분만을 고려했기 때문이다.

압력을 받는 부분의 체적 V_2 에 유입되는 유량과 그 진폭은

$$Q = j\omega \frac{P_2 V_2}{\gamma p_0} = j\omega \frac{P_2 V_2}{\rho_0 c_0^2} \quad (6)$$

$$q_m = |Q| = \frac{V_2 \omega p_{2m}}{\rho_0 c_0^2} \quad (7)$$

여기에서 p_0 는 평균절대압력이다.

(5), (6), (7)식에서 P_2 의 P_1 에 대한 주파수 전달 함수, 진폭비, 위상차는 각각

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{(1 - \omega^2 LC) + j\omega RC} \quad (8)$$

$$M = \frac{p_{2m}}{p_{1m}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 R^2 C^2}} \quad (9)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega RC}{(1 - \omega^2 LC)} \quad (10)$$

여기에서 L , R , C 는 각각 유체인덕턴스, 유체저항, 유체캐퍼시턴스를 표시⁷⁾하고

$$R = R_p + R_r + R_n \quad (11)$$

$$R_p = \frac{\rho_0 l_1}{A_1} \left(\frac{2\pi\nu_0}{A_1} + \sqrt{\frac{2\pi\nu_0\omega}{A_1}} \right)$$

$$R_r = \frac{\rho_0 \omega^2}{\pi c_0}$$

$$R_n = \frac{4 \rho_0 q_m}{3 \pi C_d^2 A_1^2} = \frac{4 V_2 \omega p_{1m} M}{3 \pi c_0^2 C_d^2 A_1^2}$$

R_p 는 관로저항, R_r 은 방사저항, R_n 은 오리피스 저항이다.

위에서 사용한 유압관로에서 주파수변화에 대한 유동특성을 해석하여 사용하는 각종 저항중 오리피스 저항은 관의 길이를 직경에 비해 상대적으로 길고 점성을 무시할 수 없을 경우의 저주파수 영역에서는 Hagen-Poiseuille 저항을 이용하여 해석하였다.

3. 실험

관로의 벽면에 작용하는 압력맥동을 주파수변화에 따라 순간적으로 변화하는 순간압력맥동을 측정하기 위하여 유압관로에 압력변환기를 직접 부착하여 측정한 압력값과 Fig.1 과 같이 메니폴드를 제작하여 측정한 압력값을 측정하여 비교 보정하는 실험을 실시하였다. 이론적으로 구해진 측압공 내에서의 주파수특성을 규명하기 위하여 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 작동유체는 오일을 사용하였으며 오일의 점도는 공업용 윤활유 ISO점도 등급에 의하여 ISO VG 22 [22[cSt)(mm^2/sec)]이며, 오일을 흐르게 한 후 관로 내를 흐르는 유량을 유량제어 밸브를 이용하여 송출된 오일의 압력과 유량을 일정하게 하여 관의 중심 축상의 靜壓이 일정하게 하였다. 주파수발생장치(Frequency Generator)를 설치하여 진동유동을 발생시켜 유량과 압력을 제어하여 입력전류진폭이 일정한 정제파(Standing Wave) 유동이 되도록 하였다.

실험에 사용한 관로는 20A seamless 강관을 사용하여 수평으로 설치하였고, 주파수 발생기의 주기적인 개폐에 의해 압력유량이 전달되었을 때 측압공의 형상에 따른 그 특성을 이론과 실험으로 비교하였다. 이 때 메니폴드에서 l_1 은 각각, 1mm, 5mm, 10mm로 변화 시켰으며, 측압공의 직경 d_1 은 각각 0.5mm, 1mm, 2mm로 변화

시켜 가면서 실험을 수행하였다. 측압공에서의 압력과 주파수변화에 따른 압력파는 오실로스코프와 압력변환기를 이용하여 측정하였다.

측정공에서 압력을 측정하기 위하여 압력의 변화에 대한 응답특성이 좋고, 정밀도가 높은 압력변환기를 사용하였는데, 이 압력변환기는 미국 (SENSOTEC) 제품으로 정밀도가 $\pm 0.01\%$ 인 것을 이용하였다. 원관의 입구길이를 지나서 완전히 발달된 유동영역의 관 단면의 중심축상 압력차는 압력변환기에서 얻어진 전기적인 압력값을 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. 압력변환기의 보정은 압력보정기(Druck DPI 420)를 사용하였다. 이 측정공에서 압력 변환기를 압력의 미소변화를 전압값으로 변화시켜서 오실로스코프에 연결하여 진동유동의 파형을 관찰 후 압력파를 가시적으로 확인하였다. 오일의 점성계수를 일정하게 유지하기 위하여 관로의 하류부분에 열전대를 설치하여 온도변화를 측정하였으며 온도상승시 냉각핀트를 사용하여 일정하게 유지하였다.

본 연구에 사용한 전체적인 실험 계통도는 Fig. 3과 같다. 유압관로에서 압력을 측정하기 위해 앞에 있는 압력 변환기와 같이 직접 관로에 부착할 경우, 관로의 직경이 작으면 불가능하기 때문에, 뒤에 있는 압력변환기처럼 측압공을 만들어 측정한다. 측압공 형상변화에 따른 동특성을 해석하기 위한 실험범위는 주파수의 경우 $10 \leq f \leq 1000\text{Hz}$ 이다. 오일은 다시 저장탱크로 보내어져 재순환할 수 있도록 하였으며, 순간적인 압력변화에 대한 응답특성이 좋은 초음파유량계를 이용하여 순간 순간의 압력 변화에 대한 유량의 변화를 오실로스코프에서 처리하였다. 위상지연이나 위상각 차이는 측정공의 형상에 따라 압력 게이지에서 읽어들이는 압력값을 받아들여 각각 위상에 따른 압력값을 비교하여 측정하였다.

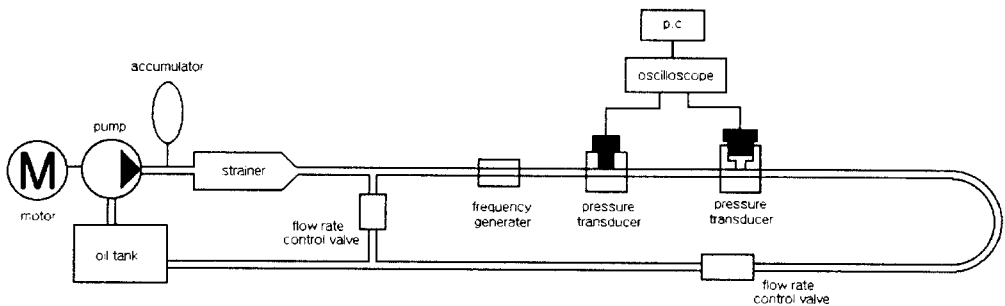


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

4. 결과 및 고찰

공작기계를 구성하고 있는 각종공작 테이블의 이송장치는 유압 시스템을 이용하고 있고, 이들 공작기계의 이송장치를 정확하게 이송하기 위해 유압시스템을 구성하고 있는 유압관로내의 유량과 압력을 정확하게 제어해야 한다. 정확한 제어를 위해서는 동력을 전달하는 관로내의 동특성 해석이 필요하고, 제어에 필요한 각종 입력값은 관로내에서의 압력파에 대한 변화를 압력변화기로부터 오는 신호를 해석하여 조절하게 된다. 공작기계 내에 구성되어 있는 유압관로의 서보밸브, 스플밸브, 왕복하는 실린더내의 피스톤이나 플런저는 주기적인 운동을 하게되고, 이 주기적인 운동의 변화 때문에 압력의 변화량이 순간순간 변화하게 된다.

이 순간순간 변화하는 압력맥동을 해석하기 위해 전기공학에서 사용하는 LRC Kirhhoff회로를 이용해서 관성력 저항에 대한 특성을 주파수를 변화시켜 가면서 실험과 이론으로 연구했다. 유압관로에서 전달하는 각종 신호를 받아들이기 위해 설치한 직경이 작은 관로의 형태에 따른 영향을 규명하기 위해 연구결과를 고찰하면 다음과 같다. 유압장치의 관로로부터 전달되는 동력을 해석하는 방법으로는 유량을 결정하는 속도특성과 압력특성을 주파수의 변화에 따라 해석해야 한다. 유압관로 내에서 흐르는 주파수 응답 특성을 규명하기 위하여 식(9)와 식(10)을 이용하여 주파수변화에 따른 응답특성인 압력 진폭비 M 과 위상각 φ 를 구한 결과를 Fig. 4~Fig. 6에 나타내었다. 이때, d_1 을 0.5mm, 1mm, 2mm로 l_1 을 1mm, 5mm, 10mm로 변화 시켜 가면서 주파수응답특성을 이론적으로 비교하였으며, d_1 이 1mm일 때 l_1 을 1mm, 5mm, 10mm로 변화시키면서 50Hz간격으로 실험을 수행하였다. Fig.4 의 결과 곡선을 고찰하면 직경이 작으면 상대적으로 작은 주파수 영역에서 공진 최고점이 발생한다. 이것은 직경이 작으면 매질의 고유한 물성치를 나타내는 고유진동수의 공진현상이 외부에서 가해지는 작은 주파수 영역에서도 쉽게 나타나지만 직경이 커지면 상대적으로 큰 영역에서 공진현상이 발생한다. 이 공진현상에 의한 에너지는 매질 내에 열로 흡수되기 때문에 직경이 작은 관로에서는 직경이 큰 관로에 비하여 온도 상승이 쉽게 나타나는 현상을 보이고 있다. 주파수 성분이 없는 정상상태의 관로 유동에 비하여 주기적으로 변화하는 비정

상 유동인 경우가 매질의 온도 상승이 쉽게 나타나는데, 이것은 각종 유압관로에서 사용하는 기름의 온도가 쉽게 상승하여, 점성이 떨어지면 압축률이 변화가 발생하며 동력은 유량과 압력의 곱으로 표시되기 때문에 오작동을 발생할 수도 있다. 그러나 직경은 작지만 길이를 증가시키면 공진현상에 의한 최고점이 사라지는데 이것은 외부에서 주어지는 진폭이 작은 관의 직경에 충돌하면서 운동에너지가 손실되는 현상으로 생각된다. 이러한 경우는 주파수의 영향을 작게 받기 때문에 정상유동의 특성에 비슷해지고, 직경을 0.5mm에서 1mm, 2mm로 증가 시켜도 최고점이 감소하고 있어 공진현상에 의한 열적 효과가 줄어들고 있음을 Fig. 5와 Fig. 6에서 관찰할 수 있다. 직경의 크기에 따른 위상 지연현상을 나타내기 위해 식(10)을 이용하여 Fig. 4, Fig. 5와 Fig. 6의 (b)에 나타내었다. 위상의 경우를 살펴보면 d_1 의 직경 0.5mm인 경우에는 측압공 입구의 길이 l_1 과 관계없이 비교적 저주파수 영역부터 위상지연이 일어나지만, d_1 의 직경 1mm 이상인 경우에는 1000Hz이상에서부터 위상지연이 일어남을 보이고 있다. 이는 측압공 입구단면 직경 d_1 이 작을수록 위상차가 빨리 나타남을 보이고 있다. 즉, l_1 길이의 증가보다는 직경 d_1 에 따른 영향이 큼을 알 수 있었다.

이들 결과에 의하면 직경이 작은 경우에는 점성에 의한 마찰의 영향 때문에 주파수가 작은 영역에서도 위상차가 발생함을 알 수 있다. 이 현상은 주파수에 따라 주기적으로 변화하면서 유입하는 유체가 벽면과 충돌함과 동시에 입자들끼리의 비탄성 충돌 때문에 운동에너지가 감소되면서 운동량 전달 지연에 의한 위상지연현상이라고 판단된다. 길이를 일정하게 하고 직경을 증가시키면 위상지연이 발생하는 주파수 영역이 급속히 감소하여 $l_1 = 1\text{mm}$, 인 경우 200Hz정도의 까지는 위상지연이 발생하고 있다.

그러나 길이를 증가시켜 $l_1 = 1\text{mm}$ 또는 5mm 이고 $l_1 = 10\text{mm}$ 일 경우에는 약 10Hz부터 위상지연이 발생하기 시작한다.

이와 같은 고찰결과로부터 유압관로로부터 전달되는 각종 신호를 받아들이기 위해 사용하는 관로의 직경은 1mm 이하에서는 작은 주파수 영역에서도 쉽게 위상지연이 발생하기 때문에 바람직하지 못한 것으로 판단된다. 유압을

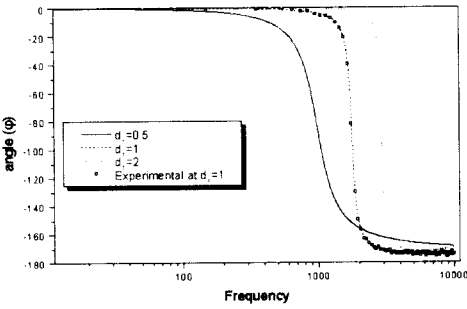
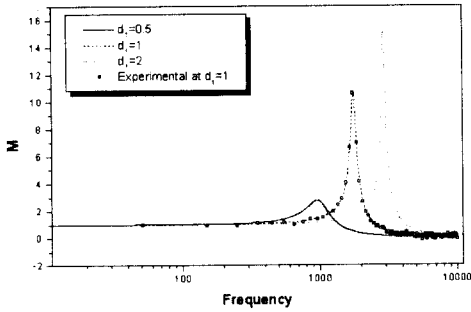


Fig. 4 Frequency response for various hole diameters d_1 at $l_1 = 1 \text{ mm}$, $l_2 = 8 \text{ mm}$

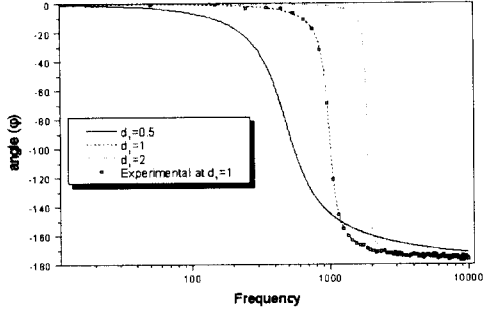
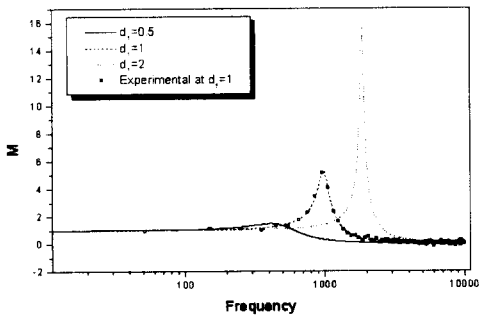


Fig. 5 Frequency response for various hole diameters d_1 at $l_1 = 5 \text{ mm}$, $l_2 = 8 \text{ mm}$

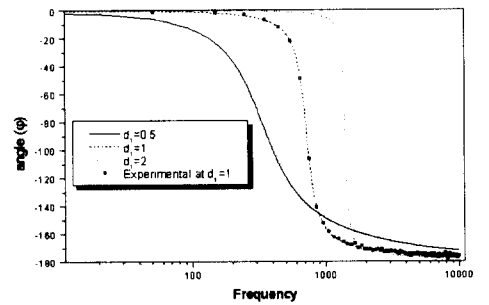
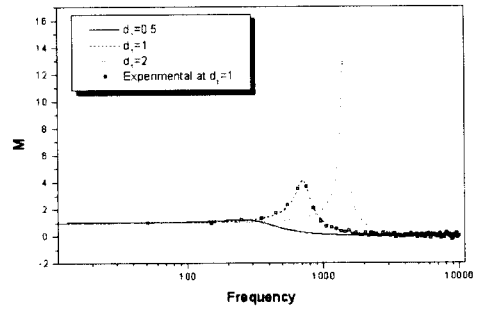


Fig. 6 Frequency response for various hole diameters d_1 at $l_1 = 10 \text{ mm}$, $l_2 = 8 \text{ mm}$

이용하는 기계의 설치여건에 따라 다르겠지만 직경에 대한 길이를 나타내는 무차원 길이 (l/D)을 고려하여 5 정도가 양호한 것으로 판단된다.

4. 결 론

유압관로에서 전달되는 주파수 변화에 따른 동특성을 해석하기 위해 설치한 직경이 작은 유압관로에서 동특성을 이론과 실험으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압력측정을 위한 메니폴드의 설계에 있어서 측압공 입구 단면에 대한 무차원길이 (l/D)는 5정도가 위상 지연 등을 고려하여 양호하다.
- 2) 압력을 측정하기 위한 측압공의 단면이 작을수록 외부에서 주어지는 주파수 때문에 야기되는 온도상승은 저주파수 영역에서도 발생한다.
- 3) 유압관로 시스템 내에 흐르는 비정상 유동의 진폭의 제곱은 에너지이며 이 에너지는 유체내 열로 흡수되기 때문에 관로 내의 온도상승은 무차원 길이 (l/D)가 증가할수록 크다.

후 기

본 연구는 1996년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소 과제 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 관계자께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 이찬홍, 박천홍 "차세대 공작기계를 위한 핵심기술 연구동향(한국기계연구원 공작기계실의 연구동향을 중심으로)" 한국공작기계학회지 제 8권 제 2호, pp. 17-26, 1999.
- (2) Brown F. T., "Step responses of liquid lines with frequency-dependent effects of viscosity", J. of Basic Engineering, pp. 504-510, 1965.
- (3) D'souza A. F., Oldenburger R., "Dynamic response of fluid lines", J. Basic Engineering, september, pp. 589-598, 1964.
- (4) 横田, 金道泰, 中和, "油壓管路の動特性を利用した遠隔瞬時流量計測手法", 油空論文集, 平成 2年, 第 21差 第 2号, pp. 81-87, 1990.
- (5) 나기대, 모양우, 유영태, 정지철, 김지환 "관로의 충류맥동유동에서 주파수 변화에 따른 응답특성에 관한 연구" 韓國航空宇宙學會誌 제 26권 제 8호, pp. 105-117, 1998.
- (6) Ikuro Imura, Kenji Shoji, Seiichi Ishi and Hiroshi Hatanaka "The transient Response of Cavity-Mounted Pressure Sensing Systems" 計測自動制御學會論文集 Vol 22, No 4, pp.417-422 1986. 4.
- (7) 서동진 "유압관로에서 압력측정부위의 주파수변화에 따른 응답특성", 朝鮮大學校 碩士學位 論文, 1998.