

## 유압관로에서 비정상유동의 압력전파특성

유영태<sup>†</sup> · 나기대\* · 김지환\*\*  
(2000년 8월 7일 접수, 2001년 10월 19일 심사완료)

### Propagation Characteristics of Pressure Pulse of Unsteady Flow in a Hydraulic Pipeline

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

**Key Words:** Fluid Power Systems(유압시스템), Dynamic Response of Hydraulic Pipeline(유압관로의 동특성), Pressure Measurement(압력계측) Unsteady Flow(비정상유동)

#### Abstract

Flow of fluid has been studied in various fields of fluid engineering. To hydraulic engineers, the unsteady flow such as pulsation and liquid hammering in pipes has been considered as a serious trouble. So we are supposed to approach the formalized mathematical model by using more exact momentum equation for fluid transmission lines. Most of recent studies for pipe line have been studied without considerations of variation of viscosity and temperature, which are the main factors of pressure loss causing the friction of fluid inside pipe line. Frequency response experiments are carried out with use of a rotary sinusoidal flow generator to investigate wave equation take into account viscosity and temperature. But we observed that measured value of gains are reduced as temperature increased. And it was respectively observed that the measured value of gains are reduced and line width of gain is broadened out, when temperature was high in the same condition. As we confessed, pressure loss and phase delay are closely related with the length, diameter and temperature of pipe line. In addition, they are the most important factors, when we decide the momentum energy of working fluid.

#### 기호설명

- $I(s)$  : 전파상수
- $Z_0(s)$  : 특성임피던스
- $J_0, J_1$  : 베셀함수
- $a$  : 관의 반경
- $c$  : 음속
- $s$  : 라플라스 연산자
- $j$  : 허수부
- $\nu$  : 동점성계수

#### 1. 서론

유압 시스템은 현대의 생산 플랜트와 제조 설비에서 많이 사용되고 있고 생산설비 이외의 분야에는 선박, 산업기계, 자동차 비행기 등에 이용되고 있다. 자동차의 조향장치 및 공작기계의 테이블 이송장치에서 유압시스템은 다른 어떤 곳보다도 안전도와 정밀도가 중요하기 때문에 높은 신뢰성이 요구된다. 유압기계에서 동력을 전달하는 유압펌프는 왕복동 운동과 회전운동에 의해 동력을 전달 하기 때문에 유압관로 내의 유동은 시간에 따라 변화하는 비정상 유동이 된다. 그러므로 유압기계의 설계나 정확한 운전을 위해서는 유압관로 내의 동특성 해석 및 유압시스템 전체의 유동특성을 해석해야 하는 것은 물론, 유압기계를 구성하고 있는 각종 유압요소의 유동특성을

---

† 책임저자, 회원, 조선대학교 기계공학부  
E-mail : ytyou@chosun.ac.kr  
TEL : (062)230-7019 FAX : (062)227-6329  
\* 조선대학교 기계공학부  
\*\* 조선대학교 대학원

정확히 해석해야 한다<sup>(1,5)</sup> 이는 시스템을 구성하는 연결 관로내의 유동해석 뿐만 아니라 유체제어 장치의 전체 효율 및 안정성, 경제성의 산출 등을 위해, 유압관로에 대한 유동의 동적 유동해석이 필요하다. 유압기계에서 대표적으로 사용하는 액추에이터는 유압실린더인데, 반복운동 영향 때문에 유압관로내의 유동형태가 매우 복잡하게 되어 이론적 접근이 쉽지 않다.

관로내의 유체가 주기적으로 변화하는 유압 관로를 이용하여 유압기계를 제어할 경우, 이 맥동 유동의 진동수에 따른 정확한 에너지 전달현상을 연구해야만 오작동을 제거할 수 있다. 이와 같이 유체기계와 유압기계에 포함되어있는 관로계, 열 또는 물질전달을 포함하는 화학공장 등 산업현장의 복잡한 관로계에서의 맥동 유동의 기본적인 특성 분석이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 원형관 내에서의 층류, 맥동 유동의 파동전파계수, 임피던스 및 압력, 유량을 이론적으로 연구하였다. 압력이 상승하면 온도도 동반하여 상승하기 때문에 온도와 맥동유동의 주파수를 변수로 하여 유압관로에서 전파특성을 연구한다.

본 연구의 목적은 지금까지 온도와 점성 변화를 무시하고 모든 실험을 해 온 것과는 달리 점성을 고려하여 관로 내에서 압력파와 전달함수를 유도하였다. 유압관로 내에서 압력이 상승하면 온도가 상승하여 매질의 밀도에 따라 변하기 때문에 전파되는 음속과 전파계수가 변화한다. 작동유가 관방향에 따라 하류로 흐를 때 관로내에서 맥동유동의 유량과 압력을 분석하기 위해 주파수를 변화시키면서 압력전파 특성을 실험과 이론으로 연구 하였다.

## 2. 이론 해석

Fig. 1과 같은 관로계의 유동영역에서 시간과 온도에 따라 변화하는 비정상유동의 동특성을 해석하기 위해 관로의 물리적 모델을 제시하고 동특성의 이론해석을 하였다. 관로의 상류(upstream) 평균압력과 평균유량의 Laplace 변환을 각각  $\overline{P_1}(s)$ ,  $\overline{Q_1}(s) = \pi a^2 U_1(s)$ 라 하고, 하류에서 평균압력과 평균유량의 Laplace 변환을  $\overline{P_2}(s)$ 와  $\overline{Q_2}(s) = \pi a^2 U_2(s)$ 로 정리할 때, 상, 하류 사이의 압력, 유량간 동특성식은 식 (1)로 주어진다.<sup>(3,4,6)</sup>

$$\begin{bmatrix} \overline{P_1}(s) \\ \overline{Q_1}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\{\Gamma(s)l\} & Z_0(s) \sinh\{\Gamma(s)l\} \\ \frac{1}{Z_0(s)} \sinh\{\Gamma(s)l\} & \cosh\{\Gamma(s)l\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{P_2}(s) \\ \overline{Q_2}(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\Gamma(s)$ ,  $Z_0(s)$ 는 비정상 점성 저항을 고려한 관로의 전파 상수(propagation constant)와 특성 임피던스(characteristic impedance)이며 다음 식으로 주어진다.<sup>(3,4,6)</sup>

$$\Gamma(s) = \frac{s}{c} \left[ 1 - \frac{2J_1(ja\sqrt{s/\nu})}{ja\sqrt{s/\nu}J_0(ja\sqrt{s/\nu})} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

$$Z_0(s) = \frac{\rho c}{\pi a^2} \left\{ \frac{1}{1 - \frac{2J_1(ja\sqrt{s/\nu})}{ja\sqrt{s/\nu}J_0(ja\sqrt{s/\nu})}} \right\} \quad (3)$$

관로의 온도변화에 따른 정확한 동특성 해석을 위해 전파상수  $\Gamma(s)$ 는 온도변수를 고려한 전파상수가 필요하다. 온도를  $T$ , 정압비열을  $C_p$ , 열전달계수를  $\lambda$ 라고 하여 원통좌표에서 열전달 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] \quad (4)$$

식 (4)를 Laplace 변환하고 초기조건  $t(s)=0$ ,  $P(s)=0$ 을 이용해서정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 T(s)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(s)}{\partial r} - \frac{\rho C_p s}{\lambda} T(s) = -\frac{s}{\lambda} P(s) \quad (5)$$

식 (5)는 제 1종 Bessel 함수이므로 해는 다음과 같다.

$$T(s) = C_1 J_0 \left( jn \sqrt{\frac{\rho C_p s}{\lambda}} \right) + C_2 Y_0 \left( jn \sqrt{\frac{\rho C_p s}{\lambda}} \right) + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{s}{\lambda} P(s) \quad (6)$$

식 (6)에서 온도는 관로내에서 유한해야 하므로  $C_2=0$ 이기 때문에 다음과 같다.

$$T(s) = C_1 J_0 \left( jn \sqrt{\frac{\rho C_p s}{\lambda}} \right) + \frac{1}{\rho C_p} P(s) \quad (7)$$

식 (7)에서 경계조건을 단열과정으로 하면  $r=a$ 에서  $T(s)=0$  이므로 압력항으로 쓰면 다음과 같다.

$$P(s) = -\rho C_p C_1 J_0 \left( ja \sqrt{\frac{\rho C_p s}{\lambda}} \right) \quad (8)$$

식 (8)을 (7)에 대입하고  $C_1$ 은 초기온도와 관계 있으므로  $T_b$ 로 하여 정리하면 온도 분포식은 다음과 같다.

$$T(s) = T_b \left\{ J_0 \left( jn \sqrt{\frac{\rho C_p s}{\lambda}} \right) - J_0 \left( ja \sqrt{\frac{\rho C_p s}{\lambda}} \right) \right\} \quad (9)$$

관의 단면평균온도 식 (9)를 이용하여 다음과 같이 정리한다.

$$\bar{T}(s) = \frac{\int_0^a rT(s)dr}{\int_0^a r dr} \quad (10)$$

식 (10)과 (9)를 이용하여 관단면평균온도를 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{T}(s) = \frac{T_s \{ 2J_1(ja\sqrt{\rho C_p s / \lambda}) + J_0(ja\sqrt{\rho C_p s / \lambda}) \} (ja\sqrt{\rho C_p s / \lambda})}{ja\sqrt{\rho C_p s / \lambda}} \quad (11)$$

식 (4)에서 온도에 대한 변수를 속도에 대한 변수로 하여 속도에 대한 일반해  $U(x, s)$ 로 정리하면 다음과 같다.

$$U(x, s) = f(x, s) \left\{ J_0\left(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right) - J_0\left(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right) \right\} \quad (12)$$

여기에서  $f(x, s)$ 는 상수이고 경계조건으로 구해진다. 관로 내에서 질량유량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M(s) = \rho Q(s) = \rho A U(s) = 2\pi\rho \int_0^a r U(s) dr \quad (13)$$

관 단면 평균상의 질량유량은 식 (12)를 이용하여 정리한 다음 식을 이용했다.<sup>(8)</sup>

$$M(s) = \pi a^2 \rho U_s \left[ \frac{2J_1(ja\sqrt{s/\nu})}{ja\sqrt{s/\nu}} - J_0\left(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right) \left(1 + \frac{1}{a^2} \frac{s}{\nu}\right) \right] \quad (14)$$

직관의 단위 길이 당 직렬 임피던스는 압력 구배에 대한 질량유량의 영향을 나타내며, 단위 길이 당 직렬 임피던스와 shunt 임피던스는 아래와 같이 정의된다.

$$Z(s)M(s) = \frac{\partial P(s)}{\partial x} \quad (15)$$

$$Y(s)P(s) = \frac{\partial M(s)}{\partial x} \quad (16)$$

압력항은 식 (5)를 이용하고 질량유량은 식 (14)을 식 (15)에 대입하면 다음과 같다.

$$Z(s) = \frac{s}{\pi a^2} \left[ \frac{J_0\left(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right)}{\frac{2}{ja\sqrt{s/\nu}} J_1\left(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right) - J_0\left(ja\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right) \left(1 + \frac{1}{a^2} \frac{s}{\nu}\right)} \right] \quad (17)$$

그러므로 직렬 임피던스  $Z(s)$ 는 식 (17)과 같이 정리 할 수 있고, shunt 임피던스를 나타내는 식 (16)를 정리하기 위하여 식 (8)과 (14)를 (16)에 대입하면 shunt 임피던스는 다음과 같다.<sup>(8)</sup>

$$Y(s) = \pi a^2 \frac{\rho_0}{kP_0} s \left[ 1 + \frac{2(k-1)J_1\left(ja\sqrt{\frac{\rho C_p s}{\lambda}}\right)}{ja\sqrt{\frac{\rho C_p s}{\lambda}} J_0\left(ja\sqrt{\frac{\rho C_p s}{\lambda}}\right)} \right] \quad (18)$$

여기에서  $k$ 는 비열비 이다. 압력파의 전파속도를 해석하기 위해 식 (15)를 다음과 같이 정리하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \{ Z(s)M(s) \} = -\frac{\partial^2 P(s)}{\partial x^2} \quad (19)$$

위 식 (19)를 식 (16)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 P(s)}{\partial x^2} - [Z(s)Y(s)]P(s) = 0 \quad (20)$$

위 식 (20)은  $P(s)$ 에 대한 제차 방정식이므로 그 일반 해는 다음과 같다.

$$P(s) = C_1 e^{-\Gamma(s)x} + C_2 e^{\Gamma(s)x} \quad (21)$$

위 식에서 식 (17)과 (18)을 이용한 전파계수  $\Gamma(s)$ 는  $\Gamma(s) = \sqrt{Z(s)Y(s)}$  이다.

$$\Gamma(s) = \frac{s}{c} \left[ \frac{1 + \frac{2(k-1)J_1(ja\sqrt{\sigma s/\nu})}{ja\sqrt{\sigma s/\nu} J_0(ja\sqrt{\sigma s/\nu})}}{1 - \frac{2J_1(ja\sqrt{s/\nu})}{ja\sqrt{s/\nu} J_0(ja\sqrt{s/\nu})}} \right]^{1/2} \quad (22)$$

식 (22)에서  $\sigma$ 는 Prandtl수로  $\sigma = \frac{\mu C_p}{\lambda}$  이고, 단

열과정에서  $c = \sqrt{kRT}$ ,  $C_p = \frac{k}{k-1} R$  이다.

공기와 기름은 밀도와 질량이 다르기 때문에 관성력의 크기가 다르다 관성력 크기 차이 때문에 응답시간의 차이가 있을것으로 예측되며 결과 확인을 위해 식 (22)를 유압과 공기압의 전달특성을 이론적으로 비교하기 위해 이용하였다. 식 (22)에서 기체인 경우는 비열비를 1.4로 하고 기름인 경우에는 비열비를 공기의 밀도와 물의 밀도를 고려하여 보간법으로 해석한 다음 기름과 기체인 경우를 이론적으로 비교했다.

여기서 식 (1)의 관로 모델을 기초로 하여, 관로를 통과하는 관로입구의  $P_1(s)$ ,  $Q_1(s)$ 와 출구의  $P_2(s)$ ,  $Q_2(s)$ 의 사이에는 식 (1)의 관계가 있으므로 다음의 전달함수가 이용된다.

$$\frac{P_2(s)}{P_1(s)} = \frac{1}{\cosh \Gamma(s)L + \frac{Q_2(s)}{P_2(s)} Z(s) \sinh \Gamma(s)L} \quad (23)$$

식 (23)의  $\frac{Q_2(s)}{P_2(s)}$ 는 관로 하단의 경계조건에 의해 결정된다. 다음 Fig. 1과 같이  $V$ 의 체적과 유압 관로에 부하를 걸어주기 위해 단면  $a_0$ 의 교축이 있는 경우에는 식 (24)가 성립한다.

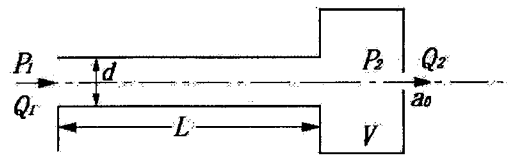


Fig. 1 Schematic diagram of pipe area choked

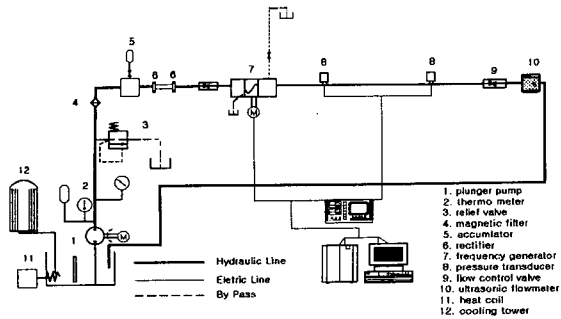


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

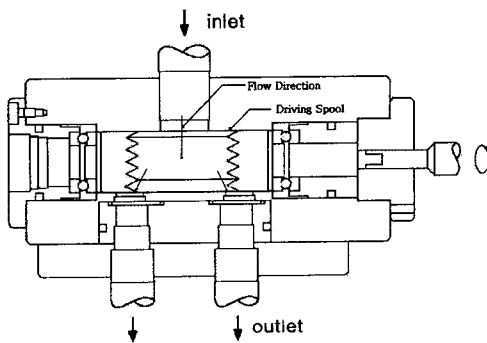


Fig. 3 Rotary type sinusoidal wave generator

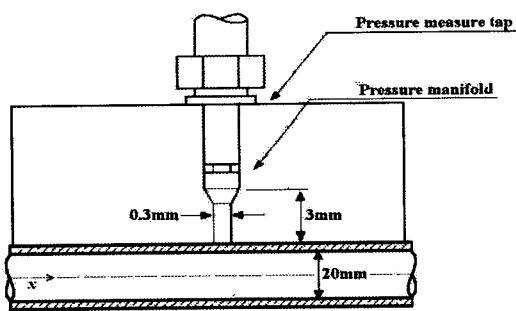


Fig. 4 Test section and pressure measurement manifold

$$Q_2 = c_0 a_0 \sqrt{\frac{2P_2}{\rho} + \frac{V}{K} \frac{dP_2}{dt}} \quad (24)$$

위 식의  $c_0$ 는 오리피스 유량계수이고  $V$ 는 관로 끝단의 체적,  $K$ 는 관로의 탄성계수이다.

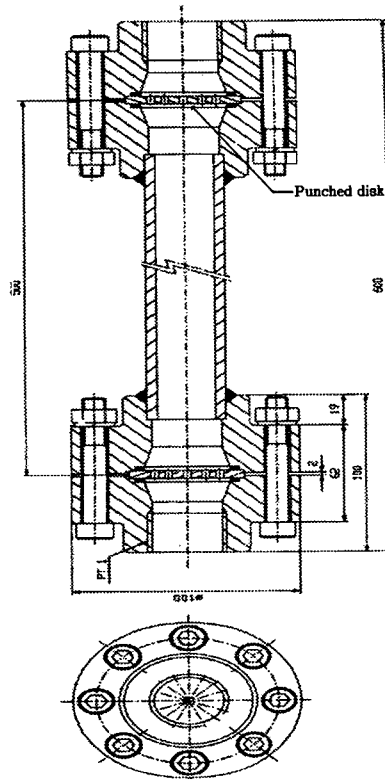


Fig. 5 Rectifier

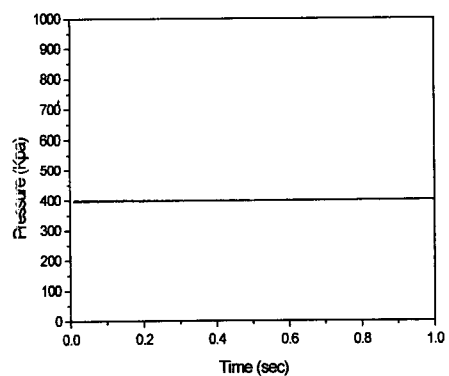


Fig. 6 Pressure wave forms of steady condition

위 식을 변동량으로 나타내어 라플라스변환하면 다음 식을 얻는다.

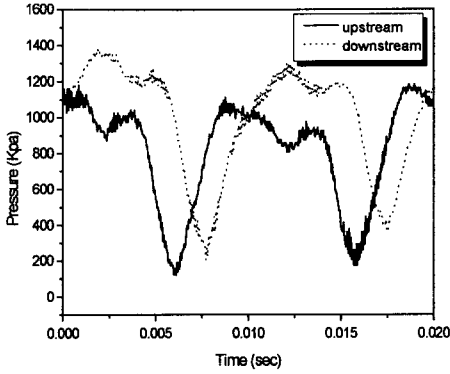


Fig. 7 Pressure wave forms  
(Temp. 40°C Frequency 100Hz)

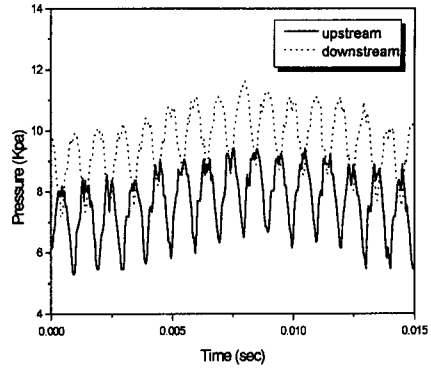


Fig. 9 Pressure wave forms  
(Temp. 40°C Frequency 1000Hz)

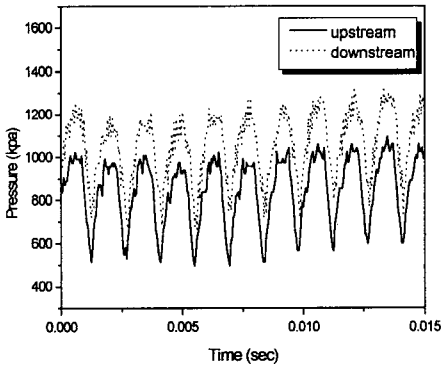


Fig. 8 Pressure wave forms  
(Temp. 40°C Frequency 700Hz)

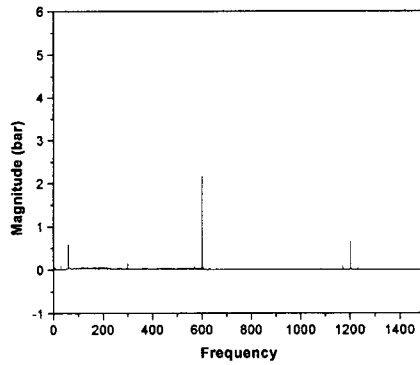


Fig. 10 Fast fourier transform (600Hz)

$$\frac{Q_2(s)}{P_2(s)} = K_0 + K_v s \quad (25)$$

$$K_0 = \frac{c_0 a_0}{\sqrt{2\rho P_{20}}} = \frac{Q_{20}}{2P_{20}}, \quad K_v = \frac{V}{K} \quad (26)$$

위 식에서의  $P_{20}$ ,  $Q_{20}$ 은  $P_2$ ,  $Q_2$ 의 정상유동에서의 값이다.

본연구의 경계조건인 관로끝단에 피복만 있을 때 경우에는  $K_v = 0$ 이 되므로 식 (25)는  $K_0$ 만 남게 된다. 따라서 본연구의 경계조건을 고려한 전달함수는 식 (25)를 식 (23)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{P_2(s)}{P_1(s)} = \frac{1}{\cosh \Gamma(s)L + K_0 Z(s) \sinh \Gamma(s)L} \quad (27)$$

### 3. 실험

본 논문에서 이용한 실험장치의 회로도도 Fig. 2에 나타내었다. 플런저펌프(HAWE Co. V30D)로부터 발생하는 주파수 성분을 감소시키기 위해 유압펌프의 출구 바로 앞에 축압기(BOSCH Co.)를 설치하였고, 유압관로앞에도 직렬로 2개의 축압기를 설치하여 서지(surge)압을 크게 감소시켰다. 축압기에 의해 제거되지 않는 고주파수 성분은 Fig. 5와 같이 제작한 정류기(Rectifier)를 시험관로에 500 mm 간격으로 2개를 삽입하여 외란을 최소화하였다. 임의의 주파수 대역의 진동유동을 발생시키기 위해 스펴의 원주에 정현파형

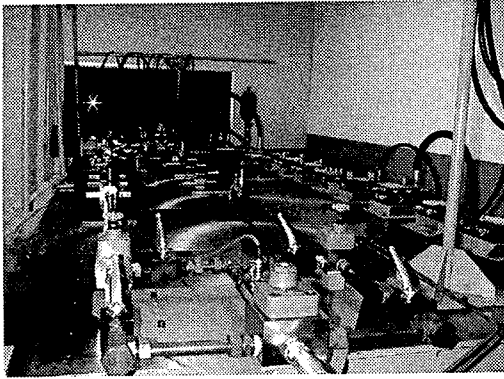


Photo. 1 Experimental apparatus

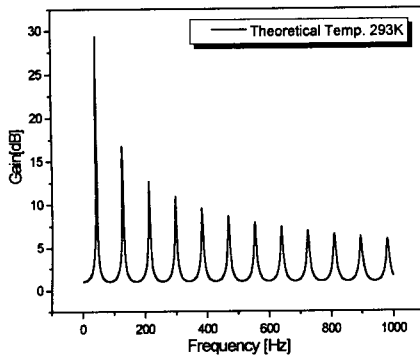


Fig. 11 Frequency characteristics air (Temp. 20°C)

의 흡을 만들어 1000 Hz까지 주파수 제어가 가능한 진동유동 발생기를 Fig. 3과 같이 제작하였다. 정상유동을 할 때에는 이 진동유동 발생기를 구동시키지 않는 상태에서 기름이 관로 내에 흐르도록 하였다. 본 실험에서 사용된 작동유는 유압용 작동유(ISO VG46)를 작동유체로 사용하였으며, 작동유의 온도범위는 20~60°C였고 정상상태의 압력  $P=4000$  kPa 이다. 유량은 초음파유량계(Controtron Co. 990PF M-2F)를 이용하여 측정한다. 다음 기름탱크로 재순환 할 수 있도록 시스템을 구성하였으며, 기름탱크에 가열코일과 냉각탑을 설치하여 작동유체가 일정한 온도를 유지하도록 하였다. 순간적으로 변화하는 압력을 측정하기 위해 압력 검출기(SENSOTEC Co. AP131)를 이용해서 상류와 하류에서 동시에 압력을 측정했다. 관로에서 직접 압력을 측정할 수 없으므로

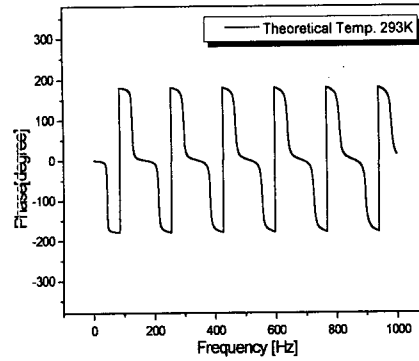


Fig. 12 Frequency characteristics air (Temp. 20°C)

매니폴드(Fig. 4)를 제작하여 압력을 측정하였다. 시험에 이용한 관은 내경이 15 mm인 고압배관용 탄소 강관(SPPH)이며, 압력 측정부위는 주파수 발생장치로부터 충분히 발달된 영역을 상류부로 하였고 상류부와 하류부의 거리는 2000 mm로 하였다. 유체가 관내를 흐르는 동안 맥동유동주파수 변화에 따른 전파특성과 위상 지연 등을 측정하기 위해 압력 검출기의 전기신호를 상·하류부의 압력을 동시에 측정하여 PKE 983시리즈의 시스템분석기를 이용해 저장 분석하였다. 실험 주파수 범위는  $10 \leq f \leq 1000$  Hz이고, Reynolds수는 초음파 유량계로 측정된 결과  $Re \leq 2,000$  범위였다. 유체가 관내를 흐르는 동안 맥동유동주파수 변화에 따른 전파특성과 위상 지연 등을 측정하기 위해 압력 검출기의 전기신호를 오실로스코프(LeCroy Co. 9354A)를 이용해서 상류와 하류의 압력을 동시에 측정하여 비교 분석하였다. 주기적으로 발생하는 주파수 성분 특성을 비교 분석하기 위해 FFT를 실시하여 주파수 성분을 Fig. 10과 같이 비교 분석하였고 본 실험에 이용한 전경은 Photo. 1에 나타내었다.

#### 4. 결과 및 고찰

실험에서는 진동 발생기를 이용하여 발생한 압력 맥동을 계측하여, 이론식의 타당성과 유효성에 대하여 검토하였다. Fig. 6은 실험관로의 정상유동의 파형을 계측한 것이며 Fig. 7~Fig. 9는 작

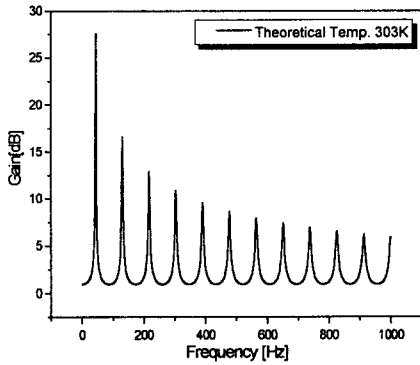


Fig. 13 Frequency characteristics air (Temp. 30°C)

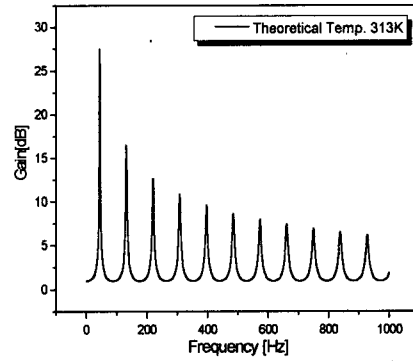


Fig. 15 Frequency characteristics air (Temp. 40°C)

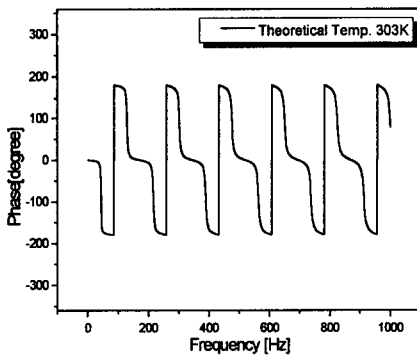


Fig. 14 Frequency characteristics air (Temp. 30°C)

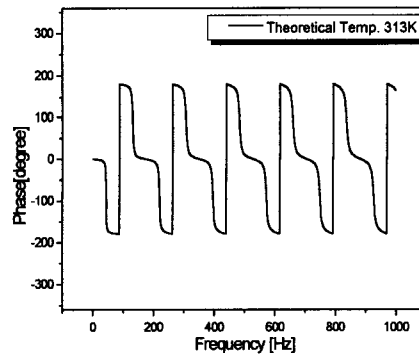


Fig. 16 Frequency characteristics air (Temp. 40°C)

동유의 온도가 40°C일 때 맥동압력 계측파형의 일례를 나타낸 것이다. 횡축은 시간 종축은 동작점에서 압력변동분포며 실선은 상류 압력 점선은 하류부의 압력을 나타낸다. Fig. 7~Fig. 9에서 보면 주파수가 증가함에 따라 진폭이 줄어들고 있다. 저주파수 영역에서는 진폭은 크고 파장은 길지만 주파수가 증가할수록 진폭은 작아지고 파장도 짧아지는 성질을 잘 나타내고 있어 주파수 발생장치가 비교적 잘 제작되었다고 판단된다. 즉 주파수가 증가할수록 파장은 짧아지고, 압력진폭은 작아지는 현상이 일관성 있게 나타나고 있다. 상류와 하류에서 압력값의 차이가 나타나는 것은 유량변화가 압력파와 같은 위상이 될 수 없게 되어 유체입자가 관로를 흐를 때 마찰력에 의한 감쇠 현상이 야기되는데 이때 감쇠력을

이기기 위해 압력손실이 생김으로 인한 현상이다. 이것 때문에 외부에서 주파수 발생기에 의해 전달되는 유체입자의 관성력은 점성력의 영향을 받아 감소된다. 또한 고주파수 영역으로 주파수가 증가함에 따라 하류 압력파의 진폭이 현저하게 줄어드는 것을 보이고 있다. 이는 임피던스 증가에 따른 압력의 손실을 의미하고 이 손실을 극복하기 위해 열이 발생하게 된다. 유압관로에서 주파수가 증가함에 따라 리지스텐스와 같은 임피던스가 증가하고 맥동유동의 작동유체가 가속하거나 감속하면서 유도성 임피던스가 증가한다. 이런 각종 임피던스는 유체의 동력을 전달하는 특성을 방해하는 요소로 작용하게 된다. Fig. 10은 실험주파수중 600Hz의 성분을 FFT한 결과를 도시하였다.

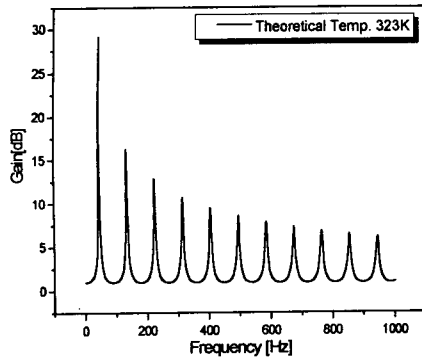


Fig. 17 Frequency characteristics air (Temp. 50°C)

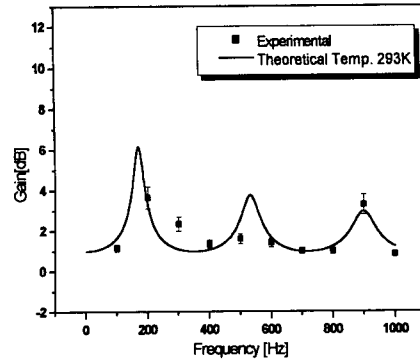


Fig. 19 Frequency characteristics oil (Temp. 20°C)

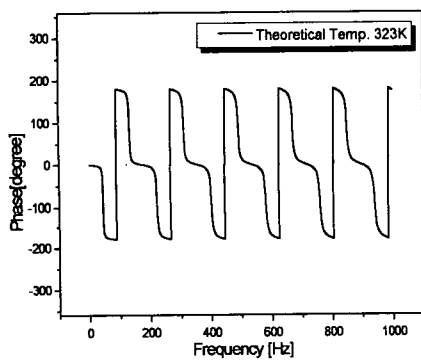


Fig. 18 Frequency characteristics air (Temp. 50°C)

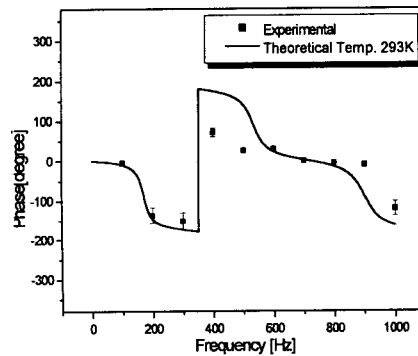


Fig. 20 Frequency characteristics oil (Temp. 20°C)

전달함수식 (22)를 대입하여 식 (27)을 이용한 공기의 전달특성 그래프는 Fig. 11~Fig. 18에 나타났었다. 공기의 응답특성은 주파수가 증가에 따라 공진현상이 자주 발생하면서 관로 내의 작동유체의 밀도가 변화하게 된다. 이것은 주파수가 증가하면서 공진주파수에 가까워지면 공진주파수가 되어 작동유체의 에너지를 흡수하게 된다. 에너지가 흡수된 작동유체는 밀도가 변화하게 되어 주파수가 증가하면서 또다른 공진주파수가 형성된다. 이와 같은 일련의 역학관계 때문에 여러 개의 공진주파수가 반복적으로 발생하게 된다. 이와 같이 반복되는 공명 때문에 발생하는 진폭에 의해 에너지가 작동유체로 흡수되면서 작동유체의 포텐셜 에너지로 흡수되어 작동유체의 온도상승으로 이어진다. 이는 역으로 작동유체의

온도를 상승시켰을 때 공진주기가 짧아지는 현상도 나타난다. 이처럼 운동에너지와 유동장을 구성하는 작동유체 사이의 포텐셜 에너지와 운동에너지 상호작용에 의해 진동이 유체 속에 완전히 흡수되어 사라질 때까지 반복하게 된다. 이때의 위상지연은 공명을 일으키는 주파수 영역에서 위상변화가 급격하게 일어나 유압관로 내에 유동하고 있는 작동유체의 진동방향이 바뀌어짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상 때문에 유압관로 내의 작동유체의 유동특성은 변화시키지 않고 진폭만 감소시키는 효과를 나타낸다. 공기와 기름의 경우 위상지연 현상을 나타내는 결과는 Fig. 12와 Fig. 20에 비교하기 위해 나타내었다. Fig. 12에서는 위상변화가 급격하게 일어나는데 비해 Fig. 20은 완만하게 변화하고 있다. 이와 같은 현상은 점성의



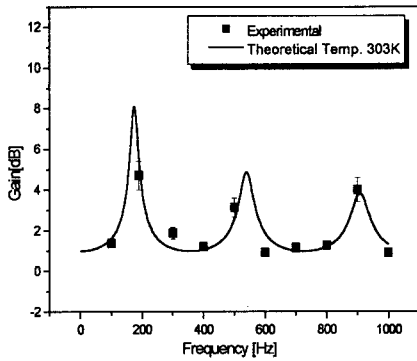


Fig. 21 Frequency characteristics oil (Temp. 30°C)

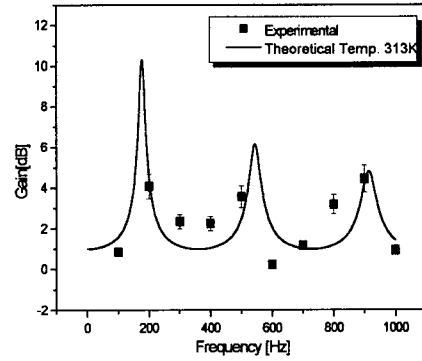


Fig. 23 Frequency characteristics oil (Temp. 40°C)

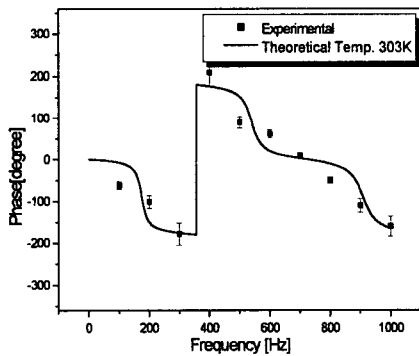


Fig. 22 Frequency characteristics oil (Temp. 30°C)

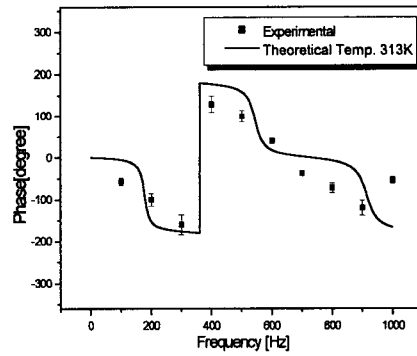


Fig. 24 Frequency characteristics oil (Temp. 40°C)

영향 때문에 저항의 요소가 증가하여 공명을 나타내는 주파수에서도 위상변화를 나타내는 곡선이 완만하게 변화하는 것으로, 점성의 영향을 받고 있음을 나타내고 있다.

이론식 (27)을 이용하여 이론적으로 그래프를 출력하여 실험주파수 범위 100~1000Hz에서 온도를 20°C~50°C로 변화시킨 결과를 Fig. 19~Fig. 26에 실험치와 비교하여 도시하였다. 0~50Hz의 저주파수 영역에서는 유체입자들 간의 충돌에 의한 운동량 손실이 작기 때문에 위상 지연이 거의 발생하지 않았다. 그러나 이후 공진주파수 영역에서 입자간의 충돌성분이 많아져 운동량 전달이 많아지고 이것을 이기기 위한 저항으로 점성력이 작용한다. 이것 때문에 점성에 의한 마찰 손실로 위상의 변화가 심하게 나타남을 보

이고 있고, 공진주파수가 지나면서 지속적인 위상변화가 발생함을 알 수 있다. 주파수가 증가하면서 입사파의 전파계수가 커지면 에너지 흡수가 커지기 때문에 작동유체의 밀도가 변화하게 된다. 주파수가 계속적으로 증가되면 입사파로부터 공진주파수일 때 에너지흡수가 일어나 작동유체의 밀도가 변하게 되고 주파수가 더 커지면서 공명 현상이 공기에서와 같이 일어나는 과정을 반복하게 된다. 주파수 특성 분석에서 진폭비가 커지면 유압관로에서는 동력손실을 유발시키는 캐피스턴스, 인덕턴스, 리액턴스의 양으로 표현되는 임피던스가 증가되기 때문에 보다 많은 일을 하게 되고, 이것은 유압관로에서 동력손실과 밀접한 관계가 있다. 유압관로에서 손실이 있는 경우 압력파의 진폭은 감소하고 파장이 길어지면서 유동장에

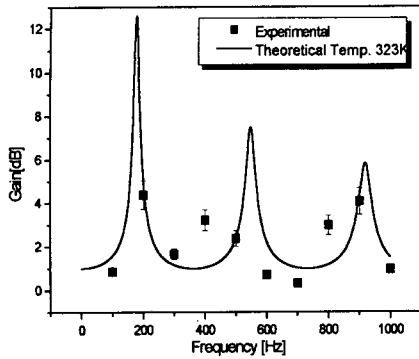


Fig. 25 Frequency characteristics oil (Temp. 50°C)

흡수된다. 다른 주파수 성분들이 같은 속도로 진행하더라도 감쇄되는 정도가 주파수에 따라 다르면 압력과 왜곡이 생겨 위상차가 발생한다. 위상차가 발생하면 진폭의 상호작용이 산란(scattering)으로 되어, 시간이 진행됨에 따라 진폭이 작아지게 된다. 이것은 주파수에 따라 위상속도가 달라지기 때문이다. 어떤 다른 신호의 주파수 성분은 유압관로를 따라 다른 속도로 전파하기 때문에 신호의 왜곡 또는 분산 현상이 발생한다. 따라서 이 손실이 있는 작동 유체는 유압관로 내에서 분산성 매질이 된다. 저주파수 영역에서는 유압관로로 입사되는 압력파의 진동수로 전달되는 Rayleigh산란 특성이지만 고주파수 영역에서는 파장이 짧고 급격한 위상변위가 일어나는 Raman산란의 특성을 갖는 것처럼 생각된다. 이상과 같은 물리적 특성을 고려하여 작동유의 온도가 증가했을 때의 곡선을 살펴보면 온도가 증가함에 따라 이득값이 점점 증가함을 나타내고 있다. 이는 온도가 증가함에 따라 작동유체의 점도가 떨어져서 운동에너지가 상승하기 때문이다. 이상과 같은 결과로부터 온도가 낮을수록 이득값이 작으며, 온도가 높을수록 이득값은 커지는데, 비교적 높은 온도에서는 이득값은 커지고 이득값의 선폭은 줄어들고 있다. 이와 같은 고찰로부터 유압관로에서 이득값이나 위상지연은 작동유의 온도에 밀접한 관계를 가지고 있으며 이런 것들은 작동유체에 전달되는 운동에너지의 크기를 결정하는 요인으로 작용한다. 공기를 이용하는 공압기계의 관로유동에서 게인값과 위상지연을 이론적으로 나타낸 Fig. 11~18과 기름을 작동유체로 하여 이

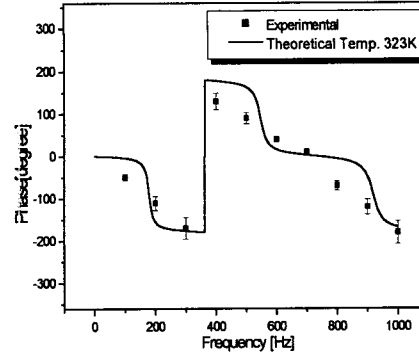


Fig. 26 Frequency characteristics oil (Temp. 50°C)

론해석을 비교하기 위해 나타낸 Fig. 19~26을 살펴보면 커다란 차이를 나타내고 있다. 공기를 작동유체로 하여 나타낸 게인값은 게인을 나타내는 선폭이 작동유체를 기름으로 하여 게인값을 나타낸 선폭에 비해 아주 좁게 나타났다. 이것은 공기가 기름에 비하여 운동량전달현상이 크다는 의미이고 그 만큼 응답속도가 빠르다는 의미이다. 위상지연 현상도 공기는 점성에 영향을 받지 않고 신속하게 방향이 바뀌는 반면에 기름의 경우는 점성의 영향 때문에 주파수가 변화함에 따라 완만하게 변화되고 있다. 전파계수식 (22)에서 기름인 경우 물과 공기의 비열비 사이를 보간법으로 하여 대입해서 이론적으로 계산한 결과  $k$  값을 1로 하여 대입했을 경우와 차이가 없었다. 그러므로 유압기계에서 사용하는 작동유체는  $k$  값을 1로 사용해도 커다란 문제는 발생하지 않을 것으로 판단한다.

## 5. 결론

총류 맥동 유동을 발생시킨 원형 관로에서 맥동 유동의 주파수 변화에 따른 응답특성을 이론적으로 연구한 후, 이를 실험을 통해서 얻은 결과와 비교하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 기름의 경우 온도변화를 고려한 주파수 응답특성은 작동유체의 온도가 높아짐에 따라 주파수와 이득값이 커짐을 알 수 있었다. 이는 온도가 상승함에 따라 점성이 작아져서 운동량 전달량이 커지고, 또한  $P_1$ 과  $P_2$ 의 거리가 상대적으로

작아지는 효과를 그래프를 통해 알 수 있었다.

(2) 공기를 작동유체로 사용했을 경우와 기름을 작동유체로 사용했을 경우의 이득을 나타낸 이론 결과곡선의 파형폭을 비교하면 기름의 파형폭이 커서 점성에 의한 손실이 상대적으로 크다는 것을 알았다.

(3) 작동유체가 공기인 경우 본연구의 온도범위내에서는 이득의 최고값이 작동유체가 기름인 경우와 달리 크게 변하지 않았다.

(4) 기름의 경우 위상 지연 현상을 나타내는 이론곡선과 실험값은 본 연구에서 저온영역은 저주파수 영역이 비교적 잘 일치하고 있으며 고온영역은 고주파수 영역이 비교적 잘 일치하고 있다.

### 후 기

- 1) 본 논문은 2000년도 조선대학교 교내연구비 지원을 받아 수행하였습니다.
- 2) 본 연구에 사용된 시험장비는 산업자원부지정 (사)부품산업테크노센터에서 제공한것임.

### 참고문헌

(1) 염만호, 1998, "원자력 발전소용 Tilting

Check Valve의 특성실험 2,"대한기계학회논문집 제22권 제6호 pp. 803~812.

(2) D'souza A. F., Oldenburger R., 1964, "Dynamic Response of Fluid Lines," *J. Basic Engineering*, pp. 589~598.

(3) 横田, 金道泰, 中和, 1990, "油壓管路の 動特性을 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.

(4) 나기대, 모양우, 유영태, 정지철, 김지환 1998, "관로의 층류맥동유동에서 주파수 변화에 따른 응답특성에 관한 연구," 韓國航空宇宙學會誌 제 26권 제8호, pp. 105~117.

(5) Ikuro Imura, Kenji Shoji, Seiichi Ishi and Hiroshi Hatanaka 1986, "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.

(6) 나기대, 유영태, 김지환, 1999, "직경이 작은 유압관로에서의 동특성," 한국공작기계학회지, pp. 38~44.

(7) 신필권, 신완순, 박종호, 심우건, 1998, "동특성 방법에 의한 수송관내에서 압축성 유체의 과도현상 분석," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B; 경성대학교, 부산; 24-25, pp. 450~455.

(8) 박지용, 2000, "유압관로 내에서 온도변화에 관한 연구," 조선대학교 석사학위논문.