

# SEAMLESS 관의 마찰손실에 따른 작동유체의 임피던스 특성

모양우\* 유영태\* 최병재\*\*

Yang-Woo Mo\* Young-Tae Yoo,\* Byeong-Jae Choi\*\*

Impedance Characteristics of operate fluid about  
Frictional loss in seamless pipeline

## Abstract

Flow pulsation often causes vibration and noise in piping systems and therefore has been a troublesome concern for fluid system engineers. According to frequency increase in this paper under the influence wave form of velocity in springly flow and viscosity are drop coefficient of viscosity become increase so that impedance and resistance. The transient variations of flow rate are measured by a modified impedance tube method which is realized by virtue of the present analytical technique. At pipe line in order to eliminate vibration, confirm happened intermittently impedance characteristics. We make a test and frequency analysis and have to minimize obstructive component at hydraulic circuit.

key words: Impedance characteristics(임피던스특성) Frequency analysis (주파수분석)  
Coefficient (계수)

## I. 緒 論

산업현장에서 사용되고 있는 여러 가지 기계설비 요소요소에 유압장치가 설치되어 있다. 유압은 비교적 소형장치에서도 큰힘과 큰동력을 얻을수 있고 회전과 직선운동이 가능하며 정밀하고 신속한 속도와 힘을 원격조작 또는 집중제어가 가능하다. 반면에 기름의 사용 온도에 따른 성능변화 와 설치비용이 고가 인점이 단점이다. 각 기기에서 유압을 이용해 동력으로 작동하는 기계들이 많다. 이 동력은 관로로 통해 전달되는데 이 전달 과정에 많은 맥동이 발생하므로 우리는 이 맥동에 대한 유동을 이해할 필요가 있다. 유압장치의 반복적인 운동, 관로의 직경변화 나 순간힘을 요구 할때 관로에는 유격과 피로를 받아 기계부품의 성능을 저하시키는 경우가 많다. 유압관로의 유동특성을 연구 분석하여 유압장치의 수명을 연장시키고 작업

현장의 소음과 진동을 최소화 하여 경제적인 운전과 쾌적한 환경을 만들 수 있도록 해야한다. 공장 자동화를 위한 시스템을 설계 할 경우 관로 내에 흐르는 작동유체인 기름의 유동특성을 정확하게 이해하지 않으면 경제적 운전과 안전한 작업을 위한 자동화 해석에 많은 문제점이 발생 할 수 있다. 유압을 이용해서 동력을 발생시키는 많은 유압기기들의 관로내 유동이 많은 작동체의 왕복운동 때문에 유동이 시간에 따라 변화하는 비정상유동 특성을 가지게 된다. 임피던스의 특성은 유압관로 내의 관 진동 및 반사파로 인한 맥동 현상이 나타나 점성 마찰 부하 때문에 발생한 관로 손실이 크다고 볼수 있다. 연구 동양은 Young F.J.와 Young B.H.<sup>(1)</sup>, Brown<sup>(2)(3)</sup>은 유체 관로에서 Laplace 영역 2차원 점성유동 파동방정식을 역변환시켜, 반 무한 관로에서 Step 전파해석과 과도응답특성을 Impedance 함수를 사용하여 이론적으로 해석하였다. Gerlach와 Parker<sup>(4)</sup>는 점성유체 관로에서 모

드수가 높은 유동의 전파계수에 영향을 무차원 진동수를 변수로 하여 연구하였다. 또 市川<sup>(5)</sup>는 유압관로에서 주파수 변화에 대한 유동특성을 연구하였다. Brown 등<sup>(6)</sup>은 점성이 주파수 영향을 받을 경우 관로에서 파도특성을 이론적으로 연구하였다. 유영태 등<sup>(7)</sup>의 이론해석을 바탕으로 동력전달의 안전성에 큰 영향을 미치는 맥동 유동의 압력파를 이론적 실험적으로 비교 검토하였다. 그러나 아직까지도 관로에 대한 많은 연구가 관로 내에서 유체의 마찰 때문에 발생하는 압력손실을 유발하는데도 점성을 무시하고 연구한 경우가 많다.

유압관로에서 동력을 전달할 때 관로내의 작동 유체의 임피던스특성이 변화하게 되는데 Seamless 관내의 간헐적인 임피던스 특성을 예측하고자 한다. 수학적인 방법으로는 Laplace 역변환을 이용했고, 압력을 해석적으로 접근하는 방법을 이용하여 과도 유량변화를 임피던스 관을 이용해서 측정했다. 유압관로의 하류부에 생기는 부하는 orifice를 이용해서 부하단에 임피던스 값이 급격하게 상승하게 했다. 임피던스의 급격한 상승은 유압관로에서 많은 손실이 주어지기 때문에 관로의 유동만을 고려하는 경우는 바람직한 현상은 아니다. 유압관로에서 손실이 있는 경우 파의 진폭은 감소하고 파장은 길어지면서 유동장에 흡수된다. 임피던스의 최대한의 감소를 위해 관로의 상류 임피던스와 하류의 임피던스가 서로 정합이 된다면 반사파가 발생되지 않고 진폭이 점점 갈수록 감소할 것이다. 이러한 유압 관로에서의 동력손실의 연구가 지속되어야 할 것이고, 관로해석을 통해 나후된 우리의 유압기술이 한단계 진보되어졌으면 한다.

## II. 理論解析

실린더의 길이방향으로 원형관에 원통 좌표계를 두고 유체유동 해석을 위한 조건을 제시하였다. 탄성계수는 압축성에 의해 무시 하였고 관로내의 압력과 온도의 변화도 작고, 유체의 밀도와 점성계수 변화가 거의 없다고 가정하고, 축 대칭이기 때문에 체적력을 무시하였고, 평균 유체 속도는 유체 내에서 음속에 비하여 작고, 반경 방향으로의 속도는 무시될 때 Navier-Stokes 방정식 과 연속 방정식을 이용 검토 하였다.

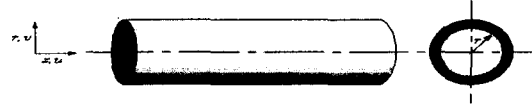


Fig. 1 Cylindrical coordinate and velocity components

본 연구에 적용하는 운동 방정식과 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$\frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

위 방정식을 정리하면 전달함수를 관로에 대한 전파 연산자  $\Gamma(s)$ 와 특성 임피던스  $Z_c(s)$ 인 다음 식으로 정리된다.

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

$$e^{-\Gamma(s) \cdot L} = \exp \left[ -\frac{s \cdot L}{c} \left[ \frac{1}{1 - \frac{2J_1(ja \sqrt{s/\nu})}{ja \sqrt{s/\nu} \cdot J_0(ja \sqrt{s/\nu})}} \right]^{1/2} \right] \quad (4)$$

위 식에서  $L$ 은 관 길이,  $c$ 는 유체에서 음속 ( $\sqrt{\frac{K}{\rho}}$ ),  $a$ 는 관의 반지름,  $\nu$ 는 유체의 동점성계수,  $J_0$ 는 제 1종 0차 Bessel 함수,  $J_1$ 는 제 1종 1차 Bessel 함수이다.

관로에 부착되어 있는 밸브가 갑자기 닫혀졌을 때 소위 유격(oil hammering)현상이 발생하게 된다. 이때 밸브에서의 유량을  $Q_2$  이때 압력을  $p_2$  라하고 관로 끝단에 부착되어 있는 저장조 압력과 유량을  $P_1, Q_1$ 으로 해서 정리하면 식(5)과 같다.

$$\begin{aligned} [P_1(s) + Z_c(s)Q_1(s)]e^{-\Gamma(s) \cdot L} &= [P_2(s) + Z_c(s)Q_2(s)] \\ [P_1(s) - Z_c(s)Q_1(s)] &= [P_2(s) - Z_c(s)Q_2(s)]e^{-\Gamma(s) \cdot L} \end{aligned} \quad (5)$$

밸브가 닫혀졌을 때 밸브 근처의 유량  $Q_2$ 는  $q_0$ 의 음(-)의 단위 계단변화량 (step change)과 같다.

$$Q_2(s) = -\frac{q_0}{s} \quad (6)$$

저장조(reservoir)에서 압력의 변화는 없기 때문에

$$P_1(s) = 0 \quad (7)$$

식(6)과 (7)을 이용해서 식(5)에 대입하여 유량  $Q_1(s)$ 로 정리하면 다음과 같다.

$Z_c(s) Q_1(s) e^{-\Gamma(s) \cdot L} = P_2(s) + Z_c(s) \left(-\frac{q_0}{s}\right)$  에서  $Q_1(s)$ 로 정리하면

$$Q_1(s) = \frac{1}{Z_c(s)} \left\{ P_2(s) + Z_c(s) \left(-\frac{q_0}{s}\right) \right\} e^{\Gamma(s) \cdot L} \quad (8)$$

식(8)를 정리한 것처럼 식(5)을 이용해서 압력에 대한 식으로 정리하면 식(9)과 같이 정리된다.

$$\frac{P_2(s)}{q_0} = \frac{Z_c(s)}{s} \left[ \frac{1 - e^{-2\Gamma(s) \cdot L}}{1 + e^{-2\Gamma(s) \cdot L}} \right] \quad (9)$$

위의 식(9)에서 유압회로를 구성할 때 단면의 변화가 급격하게 선형성이 이탈할 경우에 유량의 변동 사항을 해석하는 것은 문제가 있으므로 Fig. 3과 같은 비선형 경계조건을 가진 유압회로에서의 유량을 측정하기 위해  $Z_c(s)$ 를 식(10)과 같이 쓸 수 있다.

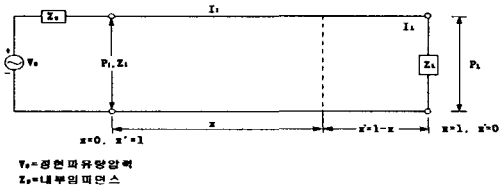


Fig. 2 Electric impedance circuit

거리  $X'$ 에서 유압관로의 부하를 고려하였을 때 임피던스는 다음과 같다.

$$Z(X') = \frac{P(X')}{Q(X')} = Z_0 \frac{(Z_i \cosh \Gamma X' + Z_0 \sinh \Gamma X')}{(Z_i \sinh \Gamma X' + Z_0 \cosh \Gamma X')} \quad (10)$$

$$= Z_0 \frac{Z_i + Z_0 \tanh \Gamma X'}{Z_0 + Z_i \tanh \Gamma X'}$$

유압관로의 상류부에서  $X' = l$ 에서 유압관로에서 펄스발생장치 측의 입력 임피던스  $Z_i$ 는 식(11)과 같이 정리된다.

$$Z_i = (Z)_{X'=l} = Z_0 \frac{Z_i + Z_0 \tanh \Gamma l}{Z_0 + Z_i \tanh \Gamma l} \quad (11)$$

여기서  $Z_0$ 는 특성 임피던스로 유압관로의 길이와는 무관하다.

$Z_0 = \frac{P_0}{Q_0}$  : 입력유량과 압력에 대한 특성임피던스

$Z_i = \frac{P_l}{Q_l}$  : 끝단에서의 압력과 유량에 대한 특성 임피던스이다. 유량과 압력에 대한 식은 아래와 같다.

$$P(X) = \frac{P(0)[Z_c \sinh \Gamma(l-X) + Z(l) \cosh \Gamma(l-X)]}{Z_c \sinh \Gamma l + Z(l) \cosh \Gamma l}$$

$$Q(X) = \frac{P(0)[Z_c \cosh \Gamma(l-X) + Z(l) \sinh \Gamma(l-X)]}{Z_c [Z_c \sinh \Gamma l + Z(l) \cosh \Gamma l]} \quad (12)$$

유압관로에서 특성 임피던스  $Z(l) = Z_c$  일 때 유압관로를 이용하는데 가장 효율적인 방법이다. 한편 개방회로  $Z(l) = 0$  과 단락회로(short circuit)  $Z(l) = \infty$  은 정합되지 않는다. 정합되지 않을 경우는 반사파가 발생되며 이때 정제파(standing wave)가 발생한다. 이때 정합되지 않으면 유압동력 전달 효율이 떨어지고, 진동이 발생하게 된다.

### III. 實 驗

#### III-1. 實 驗 方 法

실험에 이용한 유압장치에는 동력발생 장치인 모터 100마력 이고, 모터와 피스톤 펌프 사이에 축과 간극을 유격없이 원활한 회전과 소음을 줄이기 위해 커플링 타입으로 체결되었다. 유압펌프에서 유출되는 유동의 맥동을 줄이기 위해 1차 축압기를 설치 하였고 라인필터로 작동유의 청결을 유지 하였다. 다시 2차 축압기를 설치하여 서지압을 최대한 감쇠 하였고 고주파수 성분은 2개의 Rectifier를 제작하여 관로에 삽입하여 정상유동이 흐르도록 했다. 이 정상유동에 진동파형을 발생시키기 위해 회전형 정현파 발생기 (Rotary sinusoidal flow generator)를 제작하여 파형을 발생시켜 압력펄스를 관로에 전달하였다. 이 펄스발생기는 DC 모터로 속도를 조절하고 주파수 대역이 1000HZ 까지의 고주파수 발생기이다. 관로의 높은압력과 점성에 의해 발생하는 열은 냉각탑을 설치하여 항상온도가 일정하게 유지하도록 하였고, 관로내의 온도 검출기를 장착하여 수냉식 냉각방식으로 조절하였다. 높은 순간압력을 측정하기 위하여 압전형(Piezoelectric.type) 압력 검출기를 이용해서 압력을 측정 하였다. 관로에 직접배관이 곤란하므로 메니폴드를 제작하여 부착하고, 공기 빼기밸브도 같이 장착하여 관로내의 공기를 제거 하도록 하였다.

실험장치에 사용된관의 내경을 10mm인 Seamless 관을 이용하였다. 압력측정은 상류와 하류를 거리 2000mm로 설치하여 동시 압력을 측정하여 모니터에 기록 하였다. 임피던스는 관로의 길이에 따라 증가하기 때문에 유압관로를 길이 변화가 가능하도록 메니폴드에 볼트체결형 프렌지를 장착하여 Seamless관의 상부와 하부의 길이를 조정하였다.

동력이 전달될 때 관의 진동으로 인해 맥동발생을 최소화 하기위해 관 클램프를 이용해 지지하고 바닥에 고정하였다.

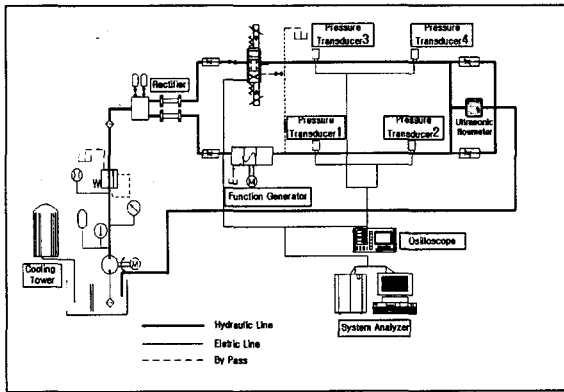


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus



Photo. 1 Experimental apparatus

#### IV. 結果 및 考察

회로에 대한 유동 특성을 해석하기 위해 이론과 실험을 병행하여 고찰하였다. 이론적인 방법은 정상유동에서 주로 사용하는 압력강하 값 대신 비정상 유동에서의 임피던스 특성을 중심으로 하여 유압회로의 동특성을 고찰 하고자 한다.

동력을 전달하는 많은 저해 요소는 임피던스와 관련 되어 있고 이 임피던스는 리지스턴스, 캐피턴스와 인덕턴스의 합으로 구성되어 있다.

관로의 길이가 길어짐에 따라 리지스턴스와 같은 임피던스가 증가하고, 맥동 유동의 작동유체가 가속하거나 감속될때, 유도성 임피던스가 발생된다.

이런 각종 임피던스는 작동유체의 종류, 압축성, 관의 재질 등에 따라 동력을 전달하는 시스템을 해석하는데 중요한 변수로 작용하게 된다.

Fig. 4~8는 거리  $X'$ 에서 유압관로의 부하가 작용할 때 임피던스를 거리  $X'$ 에 대한 값으로 도시하였고, 주파수가  $100\text{Hz} - 500\text{Hz}$ 일 때의 임피던스 변화 그래프이다. 본 그래프를 통해 임피던스의 값은 입구에서 출구 쪽으로 진행하면서 임피던스 값이 증가하고 있다. 이것은 정상유동의 압력강하값이 축방향으로 진행 되어감에 따라 증가되는 사실은 물리적 특성과 비슷하다. 유압회로에서 캐피턴스는 압력을 상승시키어 유체의 체적유량을 실험적으로 측정하여 결정한다.

유압회로에서 유동특성을 해석할 때 중요한 변수 중에 하나인 고유진동수는 캐피턴스와 인덕턴스를 곱한 값의 제곱근에 역비례 한다. 유압관로에서 전달되는 에너지는 액체의 압축성이나 유압실린더 유압관로 재질의 탄성계수 등에 따라서 변화하게 된다. 유압관로에서 신호를 가진 작동유체의 입사파가 하나의 매질에서 진행하다가 다른 특성 임피던스를 갖고 있는 다른 매질로 들어갈 때는 반사파가 발생한다. 두 번째 매질로 완전하게 반사파로 전달되지 않으면, 입사된 유압동력의 일부는 두 번째 매질로 전달된다. 이 때 주파수에 대한 위상속도 변화가 발생하고 이것 때문에 신호의 왜곡현상인 분산(dispersion)이 발생한다. 유압회로에서는 가능한 한 임피던스의 증가를 억제해야 하고, 임피던스를 최적상태로 조절하는 것을 임피던스 정합(Impedance match)이라고 한다. 상류에서 압력과 유량을 기준으로한 상류 임피던스( $Z_0$ )와 하류에서 임피던스  $Z_1$ 가 같을 때를 임피던스 정합이라고 한다. 임피던스가 정합되면 유압관로에서 흐르는 신호는 입사파가 분산에 의해 반사파가 발생하지 않는다. 임피던스 정합조건을 고찰하기 위해 개방형 유압회로 하류부에서 임피던스는  $Z_1 \rightarrow \infty$ 이면 유압관로의 입력임피던스는 리액턴스 성분이 되는 조건을 이용한다.

단락 유압회로에서  $Z_1=0$ 는  $\tan \Gamma l$ 이  $-\infty$ 에서  $+\infty$ 의 범위이기 때문에 손실이 없는 단락 유압회로의 입력 임피던스는  $\Gamma l$ 의 값에 따라 유도성 또는 용량성을 알수 있다.

$\Gamma l = \pi/2$  또는  $l = \lambda/4$  이면 무한 유압선로가 되고, 단락 유압회로  $\lambda/4$  파장 전달 유압선로는 매우 좋은 개방 유압회로가 되는 조건이 된다. 이때 주파

수를 분석한 다음 적절한 파장을 발생시켜 신호를 전달시키는 것이 바람직하다. Fig. 9은 부하단에서 압력 신호원을 주었을 때 임피던스 특성이다. 하류 방향으로 유압신호가 진행하지 않는 그래프의 결과이다.

개방형 유압회로와 단락형 유압회로 조건 하에서 선로 구간의 입력 임피던스를 측정하면 유압전달회로의 특성임피던스와 전파상수를 결정할 수 있다. 종단의 특성임피던스에는 유압관로의 길이에 관계없이 입력 임피던스와 같다.

하류단이 길어질수록 부하단에서 유압원이 고주파 성분으로 보이는 것을 Fig.9~11로 도시하였으며 고주파성분이 되면서 파장과 진폭이 짧아지고 있다. 이 그림에서 최적의 정합 조건이 될 수 있는  $\lambda/4$ 의 길이를 해석적으로 분석하여 계산할 수 있다고 본다 Fig. 12 의하면 순식간에 증가하는 압력파의 과도특성을 명확하게 알수가 없다. 그러므로 이 그래프를 주파수의 변화에 따른 과도응답특성을 나타내어 Fig. 13로 나타내었다.

유압관로에 설치된 각종 밸브가 갑작스럽게 닫혔을 경우 특성을 해석하기 위해 과도 특성을 분석하였다. 순간적으로 변화하는 과도기간을  $t < T$  와  $t > T$ 로 구분하여 해석하였다. 여기에서  $T = 1$  초로 하였다. 압력강하 양이 과도특성일 경우에는 순간적으로 압력값이 증가하는 형태를 나타나고 있다.

Fig.13에 의하면 순간적으로 변화하는 임펄스(Impulse)의 형태가 아니라 라플라스 변환의 대합적분(Convolution integral)의 형태로 나타났다.

과도현상에 의한 수격현상은 초기부터 급격하게 압력이 상승하는 것이 아니라 아주 짧은 시간주기를 지난뒤 급격하게 압력상승이 발생함을 알수 있다

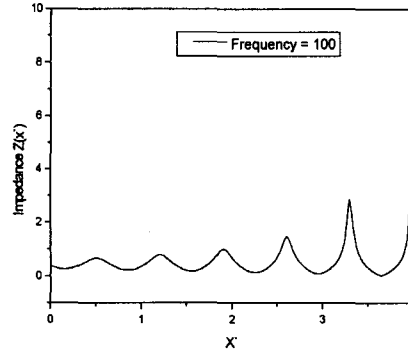


Fig. 4 Impedance characteristics in a hydraulic pipeline at Frequency 100Hz

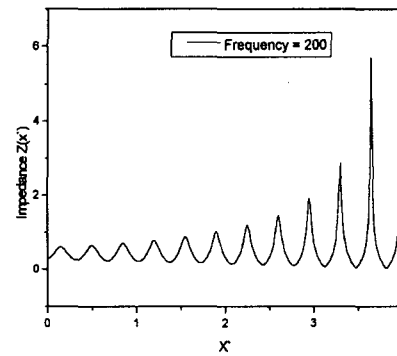


Fig. 5 Impedance characteristics in a hydraulic pipeline at Frequency 200Hz

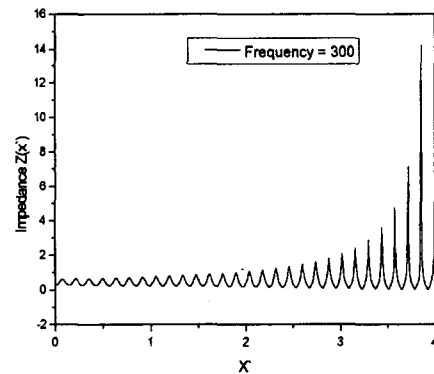


Fig. 6 Impedance characteristics in a hydraulic pipeline at Frequency 300Hz

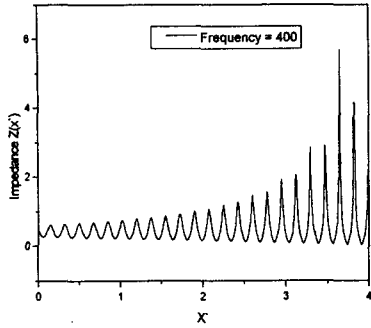


Fig. 7 Impedance characteristics in a hydraulic pipeline at Frequency 400Hz

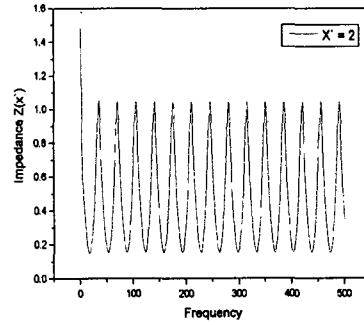


Fig. 10 Impedance characteristic from load to source part at 2m length

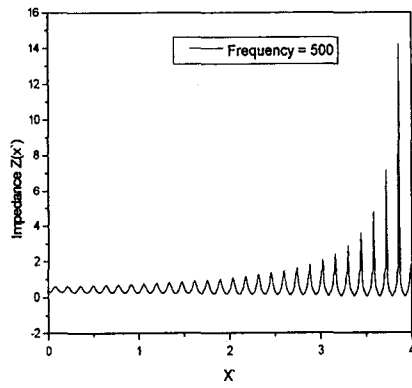


Fig. 8 Impedance characteristics in a hydraulic pipeline at Frequency 500Hz

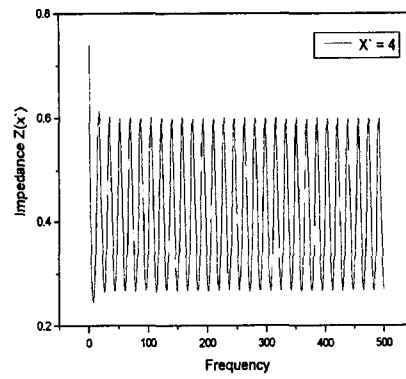


Fig. 11 Impedance characteristic from load to source part at 4m length

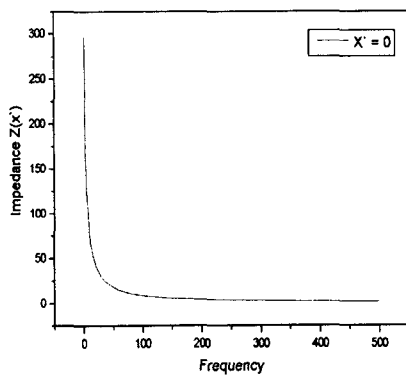


Fig. 9 Impedance characteristic from load to source part at 0m length

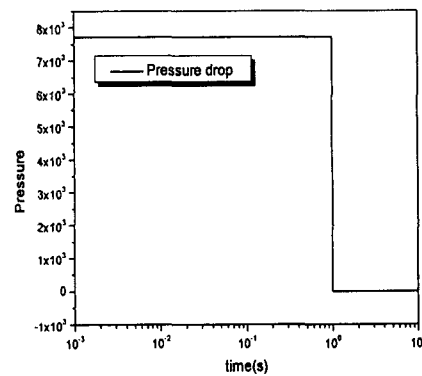


Fig. 12 Pressure transient characteristic in time domain

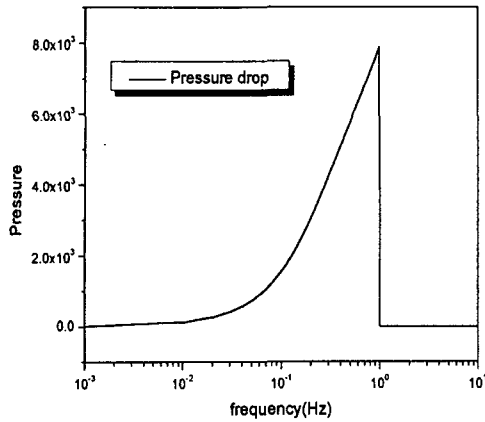


Fig. 13 Pressure transient characteristic in frequency domain

본 연구는 사단법인 부품산업 테크노센터 장비를 이용하여 수행하였으므로 이에 감사드립니다.

## V. 結 論

유압관로 해석에 있어 동력을 전달하는 많은 저해 요소는 임피던스와 관련 있다. 이러한 간헐적인 임피던스의 특성을 고찰한 결과는 다음과 같다.

1. 유압관로에서 발생하는 주파수 성분이 상부에서 임피던스가 하부까지 진행 되었을 때 관로에 손실을 가져오고 이 임피던스의 증가는 길이가 길어질수록 더욱 더 증가하고 감속 또는 가속하면 유동성 임피던스가 발생한다.
2. 유압관로에서 유체가 이동할 때 고유진동수 때문에 공진이 발생하게 되고 물성이 달라지면 고유진동수가 바뀌게 되어 각 주파수에 따라 분산(Dispersion)이 생겨 위상차가 발생하며 시간이 갈수록 진폭은 작아지고 주파수 위상속도가 달라진다.
3. 유압회로에서는 가능한 한 임피던스의 증가를 억제해야 하고 임피던스를 최대한 최적상태로 조절 해야 하는데 이것을 임피던스 정합(Impedance match)이라 한다. 상류 임피던스 ( $Z_0$ )와 하부 임피던스가 같을 때 관로에 흐르는 신호를 가진 입사파가 분산에 의해 반사파가 발생하지 않는다.

## References

- (1) Young F. J. and Young B. H., "Impedance of tapered structures" J. of the Acoustical of America, Vol. 33, 1961, pp. 1206-1210.
- (2) Brown F. T., "The transient response of fluid lines", J. of Basic Engineering, December, 1962, pp. 547-553.
- (3) Brown F. T., "Step response of liquid lines with frequency-dependent effects of viscous", J. of Basic Engineering, 1965, pp. 504-510.
- (4) Gerlach C. R., Parker J. D., "Wave propagation in viscous fluid lines including higher mode effects", J. of Basic Engineering, December, 1967, pp. 782-788.
- (5) 市川, "油壓管路の 周波數特性", 機論(B), Vol 71, No 599, 1968, pp. 1702-1708.
- (6) Brown F. T., Margolis D. C. and SHAM R. P., "Small-amplitude frequency behavior of fluid line with turbulent flow, J. of Basic Engineering, 1969, pp. 678-693.
- (7) 나기대, 모양우, 유영태, 정지철, 김지환, "관로의 층류 맥동 유동에서 주파수 변화에 따른 응답특성에 관한 연구", 한국항공우주학회 논문집, 제 26권 제 8호, 1998, pp. 105-117.