

# 배관 압력을 이용한 방향제어밸브 위상각 대역폭 주파수 측정에 관한 연구 A Study on the Phase Bandwidth Frequency of a Directional Control Valve Based on the Hydraulic Line Pressure

김성동<sup>1\*</sup> · 이정은<sup>2</sup> · 신대영<sup>3</sup>

Sungdong Kim, Jung-eun Lee and Daeyoung Shin

Received: 26 Jul. 2018, Accepted: 18 Sep. 2018

**Key Words** : Frequency Response(주파수 응답), Bandwidth Frequency(대역폭 주파수), Metering Hydraulic Line(미터링 유압 배관), Phase Angle(위상각), Directional Control Valve(방향제어밸브)

**Abstract:** Spool displacement of a direction control valve is the standard signal to measure the bandwidth frequency of the direction control valve. When the spool displacement signal is not available, it is suggested in this study to use the metering hydraulic line as an alternative way to measure - 90 degree phase bandwidth frequency of the hydraulic direction control valve. Dynamics of the hydraulic line is composed of inertia, capacitance, and friction effects. The effect of oil inertia is dominant in common hydraulic line dynamics and the line dynamics is close to a derivative action in a range of high frequency; such as a range of bandwidth frequency of common directional control valves. Phase difference between spool displacement and line load pressure is nearly constant as a valve close to 90 degree. If phase difference is compensated from the phase between valve input and pressure, compensated phase may be almost same as the phase of spool displacement that is a standard signal to measure phase bandwidth frequency of the directional control valve. A series of experiments were conducted to examine the possibility of using line pressure in to measure phase bandwidth frequency of a directional control valve. Phase bandwidth frequency could be measured with relatively high precision based on metering hydraulic line technique and it reveals consistent results even when valve input, oil temperature, and supply pressure change.

## 기호 설명

$C$  : capacitance of a hydraulic line,  $m^3/Pa$

$C_d$  : discharge coefficient of orifice, no dimension

$D$  : inner diameter of hydraulic line, m

$f$  : friction factor of hydraulic line, no dimension

$i_v$  : valve input, V

$I$  : oil mass inertia of a hydraulic line,  $kg/m^4$

$K_{q0}$  : null spool displacement-flow gain,  $m^3/s/m$

$L$  : half length of the metering hydraulic line, m

$p_{1p}, p_{2p}$  : upstream and downstream pressure for friction losses of hydraulic line, bar(0.1 MPa)

$p_s$  : supply pressure, bar

$p_t$  : return line pressure, bar

$p_{1v}, p_{2v}$  : outlet pressures of a valve, bar

$p_{Lv}$  : load pressure of a valve,  $p_{1v} - p_{2v}$ , bar

$q_{1v}, q_{2v}$  : flow rate of valve ports,  $m^3/s$

\* Corresponding author: sdkim@kumoh.ac.kr

1 Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Gyeongbuk 39177, Korea

2 Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Graduate School of Industry, Gumi, Gyeongbuk 39177, Korea

3 Heat Treatment R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gyeonggi 15014, Korea

Copyright © 2018, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- $q_{Lv}$  : load flow rate of a valve,  $m^3/s$
- $R$  : friction resistance coefficient of hydraulic line,  $Pa \cdot s/m^3$
- $Re$  : Reynolds number, no dimension
- $s$  : Laplas variable, no dimension
- $t$  : time, s
- $v$  : fluid velocity, m/s
- $w_v$  : width of valve orifices, m
- $x_v$  : spool displacement of a valve, m
- $\beta_{ev}$ : effective bulk modulus of line oil, Pa
- $\mu$  : oil viscosity,  $N \cdot s/m^2$
- $\rho$  : oil density,  $kg/m^3$
- $\omega$  : frequency, rad/s
- $\omega_{bp}$  : bandwidth frequency based on the pressure, Hz
- $\omega_{bx}$  : bandwidth frequency based on the spool displacement, Hz
- $\angle$  : phase angle of a transfer function or a complex variable

### 1. 서 론

광의의 의미에서 방향제어밸브는 비례방향제어밸브와 서보밸브를 포함한다. 비례방향제어밸브와 서보밸브는 유체 흐름의 방향을 제어하는 기능에 추가하여 유량을 제어하는 기능을 가진다. 이제까지 방향제어밸브의 응답시간 혹은 대역폭 주파수를 측정하기 위하여 유량 신호와 함께 스톨 변위 신호가 사용되어 왔다<sup>1-4)</sup>. 유량 신호를 측정하는 목적으로 시중에 상용화된 유량 감지기(sensor)의 적용을 고려할 수 있다. 하지만 시중에 상용화된 유량 감지기는 기어 모터나 터빈의 구조를 가지는데, 수십 Hz에서 수백 Hz 영역의 서보밸브 대역폭 주파수를 측정하는 목적으로 적용하기 어렵다.

방향제어밸브의 응답시간 혹은 대역폭 주파수를 측정하는 방법이 ISO 10770-1 규격에서 표준화되어 있다<sup>1)</sup>. ISO 10770-1 규격에서 동적인 유량신호를 측정하는 방법으로서 작은 마찰과 작은 관성의 실린더(미터링 실린더로 호칭됨)를 설치하고, 미터링 실린더의 피스톤 속도 신호를 동적인 유량신호로 사용하도록 추천하고 있다. 하지만 미터링 실린더 시스템은 장치의 구성이 복잡하고, 실린더의 동적 거동이 방향제어밸브 동적 거동에 간섭되어 나타날 가능성이 존재하며, 동특성이 왜곡될 수 있다.

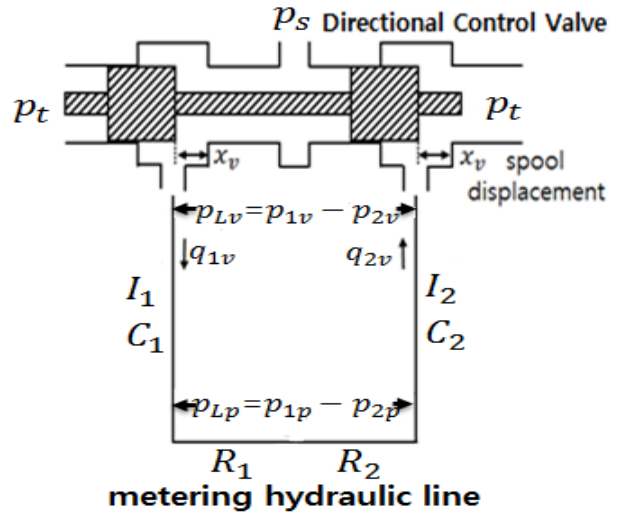


Fig. 1 Schematic view to use the metering hydraulic line for measurement of the bandwidth frequency of a directional control valve

유량 신호 대신에 방향제어밸브의 동특성 혹은 대역폭 주파수를 측정할 목적으로 사용될 수 있는 스톨변위 신호는 시스템 배관부 용적과 공급압력 등의 주변 환경의 영향을 받지 않는다. 그러므로 스톨변위 신호를 이용하여 측정된 대역폭 주파수가 방향제어밸브의 표준 대역폭 주파수로 간주할 수 있다. 하지만 많은 비례방향제어밸브와 서보밸브에는 스톨변위 신호 감지기가 내장되어 있지 않으며, 방향제어밸브 외부에 스톨변위 감지기를 설치하는 것도 매우 복잡하여 적용에 한계를 가진다.

Kim 외 2인<sup>5)</sup>은 장치 구성과 측정이 편리한 압력신호를 이용하여 방향제어밸브의 주파수 응답과 대역폭 주파수를 측정하는 방법을 제안하였다. 미터링 실린더 대신에 미터링 오리피스스의 부하압력을 이용하였는데, 정적 비선형 보정법과 동적 보정법을 적용하여 -3 dB 진폭비 대역폭 주파수를 구하는 방법을 제안하였다. 또 방향제어밸브 부하압력의 위상각이 스톨변위의 위상각과 일치하도록 미터링 오리피스를 설정한 후에 압력신호를 이용하여 -90 degree 위상각 대역폭 주파수를 측정하는 방법을 제안하였다. 하지만 미터링 오리피스스의 위상각 일치상태가 불안정하여 측정된 위상각 대역폭 주파수에 오차가 크게 발생할 수 있는 단점이 존재하였다<sup>6)</sup>.

유압유의 온도와 혼입기포 함유량 등의 특성이 변화하더라도 측정된 위상각 대역폭 주파수 값이 일정하게 안정된 특성을 보이는 위상각 대역폭 주파수 측정 방법으로서 Fig. 1의 배관 부하 압력을 이용한

방법을 제시하고 이 방법의 효율성을 실험적으로 검증하려함이 본 연구의 목적이다. 단순히 방향제어밸브의 양쪽 포트를 연결하는 배관을 대역폭 주파수를 측정하는 목적의 미터링 유압 배관으로 설치하고, 밸브 양쪽 포트의 압력 차이 혹은 유압 배관의 부하 압력을 이용하는 방법을 고려한다.

방향제어밸브 대역폭 주파수 측정에 미터링 유압 배관 압력의 위상각을 적용하기 위하여 이론 분석을 수행하여 개념을 정립하고, 실험을 통하여 확인한다.

## 2. 이론 배경

### 2.1 직렬 신호 주파수 응답의 중첩 원리

방향제어밸브의 두 출력 포트를 유압 배관으로 연결한 Fig. 1에서 밸브에 입력신호  $i_v$ 가 인가되면 밸브 출력신호로 스펴변위  $x_v$ 가 변화하고, 스펴변위에 의하여 형성되는 오리피스를 통하여 유량이 흐르고, 유량이 흐름에 따라 배관 양단의 차압력이 변화하는 직렬적 거동을 가진다. 이러한 직렬 거동은 Fig. 2와 같이 표현된다.

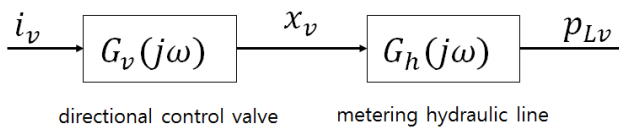


Fig. 2 Serial structure transfer function system

Fig. 2에서  $i_v, x_v, p_{Lv}$  신호를 푸리에 변환(Fourier transform)된 복소수 변수  $I_v, X_v, P_{Lv}$ 의 위상각 사이에 다음 식 (2)의 중첩원리가 성립할 것이다.

$$\angle \frac{P_{Lv}}{I_v} = \angle \left( \frac{X_v}{I_v} \cdot \frac{P_{Lv}}{X_v} \right) \quad (1)$$

$$\angle \frac{P_{Lv}}{I_v} = \angle \frac{X_v}{I_v} + \angle \frac{P_{Lv}}{X_v} \quad (2)$$

궁극적으로 밸브입력  $I_v$ 에 대한 방향제어밸브 거동의 표준 신호인 스펴변위  $X_v$ 의 위상각을 구하는 것이 이상적이지만, 스펴변위 감지기가 내장되어 있지 않은 경우에 압력 신호  $P_{Lv}$ 를 이용하는 방법을 모색하는 것이 본 연구의 목적이다. 만약 주어진 미터링 유압 배관에 대하여 스펴변위  $X_v$ 와 부하압력

$P_{Lv}$  사이의 보정 위상각  $\angle \frac{P_{Lv}}{X_v}|_{comp}$ 을 미리 구할 수 있으며, 이 보정 위상각이 유량(혹은 밸브 종류에 따라 주어지는 정격 유량), 압력, 온도 등의 다양한 조건에 무관하게 일정하게 주어질 수 있다면, 식 (2)에서 밸브입력  $I_v$ 에 대한 스펴변위  $X_v$ 의 위상각은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\angle \frac{X_v}{I_v} = \angle \frac{P_{Lv}}{I_v} - \angle \frac{P_{Lv}}{X_v}|_{comp} \quad (3)$$

### 2.2 미터링 유압배관 전달함수

미터링 유압 배관에 대하여 스펴변위  $X_v$ 와 부하 압력  $P_{Lv}$  사이의 전달함수를 유도하고,  $X_v$ 와  $P_{Lv}$  사이의 보정 위상각이 유량, 압력, 온도 등의 다양한 조건에 무관하며 일정하게 주어질 수 있는 가능성에 대하여 검토한다.

Fig. 1과 같이 그려지는 미터링 유압 배관의 동적 거동을 표현하는 수식은 개념적으로 분류하여 방향제어밸브 오리피스의 유량관계식과 배관 오일의 관성 질량에 대한 운동방정식, 배관의 유체 흐름에 대한 연속 방정식, 압력손실 공식 등으로 구성된다.<sup>7)</sup>

방향제어밸브 내부에 두 개의 오리피스가 형성되며, 각각의 오리피스에 대하여 두 개의 유량 방정식이 주어진다. 두 오리피스의 형상이 서로 정합(matched)과 대칭(symmetrical)이며, 스펴과 슬리브가 제로랩(zero lap)인 경우에 방향제어밸브의 유량관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$q_{Lv} = C_d w_v x_v \sqrt{\frac{p_s - p_{Lv}}{\rho}} \quad (4)$$

전달함수를 구하기 위하여 식 (4)를 선형화하는 과정이 필요하다. 밸브 부하압력  $p_{Lv}$ 이 영(0)인 무부하와 스펴변위가 영(0)인 중립점(null)의 작동 조건에서는 하나의 선형 유량관계식으로 축약될 수 있다.

$$q_{Lv} = K_{q0} x_v \quad (5)$$

식 (4)과 식 (5)에서  $q_{Lv}$ 는 방향제어밸브에 형성되는 두 개의 오리피스 유량  $q_{1v}, q_{2v}$ 의 평균 유량이며, 영점에서의 유량 이득인  $K_{q0}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$K_{q0} = C_d w_v \sqrt{\frac{p_s}{\rho}} \quad (6)$$

식 (5)가 보여주는 바와 같이 스푼변위  $x_v$ 는 밸브 유량  $q_{Lv}$ 에 직접 비례하며, 유량을 표현하는 표준 신호로 사용될 수 있다. 여기서 표준이라는 의미는 방향제어밸브에 연결되는 배관의 종류와 특성, 오일 특성 등에 무관하게 항상 일정하게 주어진다는 의미이다.

Fig. 1에서 방향제어밸브의 두 제어 포트가 대칭이라는 조건에 맞추어 배관 부위도 두 부분으로 나누어 각각의 길이  $L_1$ 과  $L_2$ 이 대칭으로  $L$ 로 표현되고, 배관 용적  $V_{1v}$ 과  $V_{2v}$ 이 서로 대칭이라는 조건에서 전체 배관 용적의 절반에 해당하는 배관 용적  $V$ 에 존재하는 오일의 관성효과를  $I$ 로 표현한다. 배관의 총 길이  $2L$ 과 총 용적  $2V$ 에 대한 관성효과를 하나의 식으로 축약하여 표현하면 다음의 운동방정식이 된다.<sup>7)</sup>

$$p_{Lv} - p_{Lp} = 2I \frac{dq_{Lv}}{dt} \quad (7)$$

배관 유체 관성  $I$ 는 미터링 유압배관의 절반 길이  $L$ 의 오일에 대해 식 (8)와 같이 표현된다.

$$I = \frac{4\rho L}{\pi D^2} \quad (8)$$

식 (7)에서  $p_{Lp}$ 는 배관부의 유체마찰 부하 압력이며, 다시 방정식(Darcy's equation) (9)와 같이 주어진다.<sup>8)</sup>

$$p_{Lp} = p_{1p} - p_{2p} = f \frac{2L}{D} \frac{\rho v^2}{2} \quad (9)$$

여기서  $v$ 는 유체 속도이며, 관 마찰 손실 계수  $f$ 는 관로 내부의 유체 흐름이 층류이거나 난류인지에 따라 다음 식들과 같이 다르게 표현되며, 유체 속도와 유량의 크기에 따라 비선형(nonlinear) 특성을 가진다.<sup>8)</sup>

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{for } Re < 2000 \quad (10)$$

$$f = \frac{0.3164}{Re^{1/4}} \quad \text{for } 3000 < Re < 100000 \quad (11)$$

여기서  $Re$ 는 레이놀즈(Reynolds) 수이다. 층류의 계수 식 (10)에서 레이놀즈 수  $Re$ 가 유체 속도  $v$ 를 포함하며, 정리하면 다음 식의 선형 식으로 표현된다.<sup>7)</sup>

$$p_{Lp} = 2Rq_{Lp} \quad (12)$$

$$R = 128\mu L/\pi D^4 \quad \text{for } Re < 2000 \quad (13)$$

여기서  $R$ 은 배관 길이  $L$ 에 대한 저항계수이다.

배관 유체 흐름이 난류인 경우에는 식 (9)과 (11)을 선형화하는 과정이 필요하다. 선형화한 결과 식은 식 (12)와 유사한 비례 식이 될 것이다. 여기서 선형화의 기준 작동 조건으로 방향제어밸브 중립점(null)과 속도 ' $v = 0$ ' 조건을 적용하면 비례 값은 영이 된다. 그러므로 난류 흐름에서도 식 (12)를 그대로 사용하고 계수  $R$  값은 영으로 적용한다.

배관 용적  $V_{1v}$ 과  $V_{2v}$ 이 서로 대칭이라는 조건을 유량의 연속 방정식에 적용하면 다음과 같이 정리된다.

$$q_{Lv} - q_{Lp} = \frac{C}{2} \frac{dp_{Lv}}{dt} \quad (14)$$

식 (14)에서  $C$ 는 방향제어밸브의 두 출력 포트를 연결하는 배관의 절반 길이에 대한 압축성을 표현하며 캐패시턴스(capacitance)로 호칭된다.<sup>7)</sup>

$$C = \frac{\pi D^2 L}{4\beta_{ev}} \quad (15)$$

식 (15)에서  $\beta_{ev}$ 는 배관부 오일의 유효 체적탄성계수이다.

식 (5), (7), (12)와 (14)를 라플라스 변환<sup>9)</sup>하면

$$Q_{Lv} = K_{q0} X_v \quad (16)$$

$$P_{Lv} - P_{Lp} = 2I Q_{Lv} s \quad (17)$$

$$P_{Lp} = 2R Q_{Lp} \quad (18)$$

$$Q_{Lv} - Q_{Lp} = \frac{C}{2} P_{Lp} s \quad (19)$$

식 (16)~(19)에서  $s$ 는 라플라스 변수이며, 대문자로 표기된 변수는 소문자로 표현된 시간영역 변수를 라플라스 변환한 복소수 변수를 의미한다.

식 (16)~(19)를 정리하여 입력변수  $X_v$ 에 대한 출력변수  $P_{L_v}$ 의 전달함수(transfer function)을 구한다. 또  $s$  변수에 주파수  $\omega j$  ( $j$ 는 허수)를 대입하여 주파수 전달함수를 구하면 다음 식과 같다.

$$\frac{P_{L_v}}{X_v} = 2K_{\phi_0} \frac{R + I\omega j}{1 + RC\omega j} \quad (20)$$

보통의 유압 배관에서 캐패시턴스  $C$  값은 지극히 작아서 분모의  $RC\omega j$  항은 무시할 수 있다. 통상 유압 배관의 저항  $R$ 과 관성  $I$ 의 값은 배관 직경  $D$  값에 따라 상대적 크기가 다르게 된다. 하지만 보통 방향제어밸브의 대역폭 주파수인 수 10 Hz ~ 수 100 Hz 인근 영역에서는  $I\omega$  값이  $R$  값보다 월등히 크게 작용하며, 식 (20)은 식 (21)과 같이 간단해진다. Table 1에 주어진 유압 배관과 유압유 물성치에 대하여  $I$ ,  $C$ ,  $R$  값들을 정량적 계산한 사례를 제시하였다. 예를 들어,  $\omega$  값 20 Hz( 125.7 rad/s)인 경우에  $RC\omega j$  항의 값은 0.00022 $j$ 이어서 분모 상수 항 1보다 무시할 정도로 작으며, 반면에  $\omega$  값 20 Hz에서  $I\omega j$  항은 4.017·10<sup>8</sup> $j$ 이며 상수 항  $R$ 보다 10 배 이상으로 크다.

$$\frac{P_{L_v}}{X_v} \approx 2K_{\phi_0} I\omega j \quad (21)$$

식 (21)의 전달함수는 미분기에 해당한다. 미분기의 위상각은 90 degree으로 일정하다. 미터링 배관의 직경과 길이의 조건이 변화하고, 유압유의 밀도, 온도, 압력 등의 특성 조건이 변화하더라도 이러한 조건 변화에 크게 영향 받지 않는다. 또 스폴변위에 대한 부하압력의 위상각이 90 degree 가까이 일정하게 위상 앞섬 현상이 나타날 것이다.

예를 들어 앞서 설명한 바와 같이 Table 1의 파라미터 값에 대해  $\omega$  값 20 Hz에서 계산한 식 (20)의 위상각은 1.4823 rad( 84.93 degree)이다. 이러한 위상각의 차이를 스폴변위 감지기 내장형 방향제어밸브를 교정용 밸브로 사용하여 측정한다. 스폴변위에 대한 부하압력의 보정 위상각을 측정한 후에 식 (3)을 이용하여 스폴변위의 위상각 주파수 응답과 대역폭 주파수를 측정할 수 있다.

Table 1 Parameters related to a hydraulic line and oil

Parameters	Specification
Inner diameter of steel tube, $D$	0.011 m
Length of steel tube,	0.35 m
Oil viscosity, $\mu$	0.0365 N·s/m <sup>2</sup>
Oil density, $\rho$	868 kg/m <sup>3</sup>
Effective oil bulk modulus, $\beta_e$	0.689 · 10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup>
Line oil inertia, $I$	3.197 · 10 <sup>6</sup> kg/m <sup>4</sup>
Line capacitance, $C$	4.891 · 10 <sup>-14</sup> m <sup>5</sup> /N
Line resistance, $R$	3.555 · 10 <sup>7</sup> Pa·s/m <sup>3</sup>

이러한 방법은 스폴변위의 진폭이 변화하더라도 적용될 수 있다. 즉 스폴변위가 커지면 밸브를 흐르는 유량도 증가하지만, 식 (21)로 주어지는 보정 위상각은 거의 변화하지 않는다. 조금 더 자세히 설명하여, 식 (20)에서 유량이 변화함에 따라 배관이 저항 계수  $R$  값도 변화하는 비선형성을 보일 것이지만, 배관 유체의 관성효과  $I\omega$ 에 비교하여 월등히 작게 작용한다면  $R$  값의 변화에 의한 오차는 미미할 것이다. 또한 방향제어밸브의 종류와 정격 유량의 크기가 변화한다 하더라도 식 (20)과 (21)에서 유량 이득인  $K_{\phi_0}$  값만 변화하게 되며, 위상각 응답에는 변화가 없다. 즉 주어진 미터링 배관에 대해 특정한 한 가지 조건에서 위상각 보정 주파수 응답 선도  $\angle \frac{P_{L_v}}{X_v}|_{comp}$ 를 구한다면 식 (3)을 이용하여 임의의 방향제어밸브와 스폴변위 진폭에 대하여 위상각 주파수 응답과 대역폭 주파수를 측정할 수 있을 것이다.

### 3. 실험 장치 구성

방향제어밸브의 위상각 주파수 응답과 위상각 대역폭 주파수를 측정하는 목적으로 구성된 미터링 유압배관 실험장치의 구성에서 핵심 하드웨어 부분의 모습을 Fig. 3에서 보여준다. 연구 대상으로 적용된 방향제어밸브는 스폴변위 감지기가 내장되어 있는 직동(direct drive)형 서보밸브가 사용되었다. 스폴변위 감지기가 내장된 서보밸브를 사용한 이유는 위상각 보정 주파수 응답 선도  $\angle \frac{P_{L_v}}{X_v}|_{comp}$ 를 구하기 위하

여 스플변위 신호가 필요하기 때문이다. 또한 유압배관의 부하압력신호를 이용하여 측정된 방향제어밸브 대역폭 주파수의 신뢰성을 확인하기 위하여 표본이 되는 대역폭 주파수와 비교하는 작업이 필요한데, 스플변위 신호를 기반으로 측정된 대역폭 주파수가 기준 데이터로 활용할 수 있기 때문이다. 연구 대상으로 사용하는 방향제어밸브는 직동형 서보밸브이지만 연구 내용과 결과는 비례방향제어밸브 뿐만 아니라 일반적인 서보 밸브에 공통적으로 적용될 수 있을 것이다. 서보밸브 토출부 두 지점에 압력 감지기를 설치하였으며, 두 압력감지기 측정 값의 차압을 부하 압력으로 계산하였다. 식 (20)의 분모항  $RC\omega_j$  을 무시할 수 있도록 유압 배관의 길이  $2L$ 을 짧게 선정하였다. 미터링 유압배관은 내경 0.011 m,  $2L$  길이 0.7 m의 강(steel) 튜브 1종과 내경 0.5 in( 0.127 mm)과 0.25 in( 0.0635 m)이며 각각의 길이 0.6 m인 2종의 호스(hose)가 사용되었다.

실험 데이터의 계측은 컴퓨터와 데이터 수집 보드(Data Acquisition Board)를 이용하여 디지털 데이터로 측정되었다. 데이터 수집 보드의 아날로그 출력 채널을 통하여 서보밸브에 1~250 Hz의 정현파 입력 신호를 인가하여 서보밸브를 구동시켰다. 측정된 시간영역 데이터를 후처리하여 주파수 응답 선도인 보데 선도(Bode Diagram)를 그리고, 대역폭 주파수를 산출하는 일련의 과정은 LabVIEW 그래픽 언어를 기반으로 작성된 프로그램으로 이루어졌다. 공급압력은 70 bar로 일정하게 설정한 상태에서 10 V 정격 입력의 서보밸브에 대하여 1 V, 2.5 V, 5 V, 7.5 V, 9 V의 다섯 가지 입력 진폭의 정현파 신호에 대하여 수행되었다. 스플변위에 대한 배관 부하 압력의 위상각을 보정하는 주파수 응답 선도는 5 V 입력 조건에서 각

Table 2 Specification of the metering hydraulic line system

Instruments	Specification
Servo valve	rated flow 10 LPM, rated pressure 210 bar
Power unit	rated flow 10 LPM, rated pressure 210 bar
PC	CPU speed 2.0 GHz, memory capacity 512 MB
DAQ board	16bit, A/D 16 channel, D/A 2 channel
Pressure sensor	rated pressure 100 bar
Accumulator	capacity volume 2L, rated pressure 350 bar
Oil cooler	exchanged calory 6,178 kcal/hr, capacity 50-75 LPM
Filter	filtration rating 10 $\mu$ , rated flow 12.7 GPM
Software language	version LabVIEW 2012

각의 유압배관에 대하여 구별하여 채취되었다. 유압유의 온도와 공급 압력의 변화가 측정 정밀도에 미치는 영향을 실험하기 위하여 실험하기 위하여 유압유 온도와 공급 압력을 변화시켜 가면서 대역폭 주파수를 측정하였다. 미터링 배관을 이용한 방향제어밸브 주파수 측정 장치의 주요 파라미터 값들은 Table 2에 표기되어 있다.

#### 4. 실험 결과 및 분석

##### 4.1 밸브입력-스플변위-배관압력 위상각 응답

미터링 배관으로 내경 0.011 m 강 튜브를 사용하고, 밸브 입력 진폭 전압 5 V 조건에서 위상각 보정 주파수 응답 선도를 구하였는데, 시간영역 응답선도와 주파수 응답선도를 Fig. 4와 Fig. 5에서 보여준다. Fig. 4에서 스플변위 신호의 중립점 값이 3이며 영으로부터 편위된 이유는 사용된 변위센서가 4-20 mA 전류 출력형이며, 12 mA 중립점에 대해 250  $\Omega$  저항을 부착하여 3 V 값으로 주어지기 때문이다.

10 Hz 입력신호 주파수에 대하여 측정한 시간영역 응답선도인 Fig. 4에서 스플변위의 위상각과 입력신호의 위상각의 차이 정도를 구별하기 어려운 반면에 압력신호는 스플변위 신호보다 위상각이 90 degree 가까이 앞서는 모습을 관측할 수 있다. 압력신호에 필터를 사용하지 않았기 때문에 노이즈(noise)가 심하

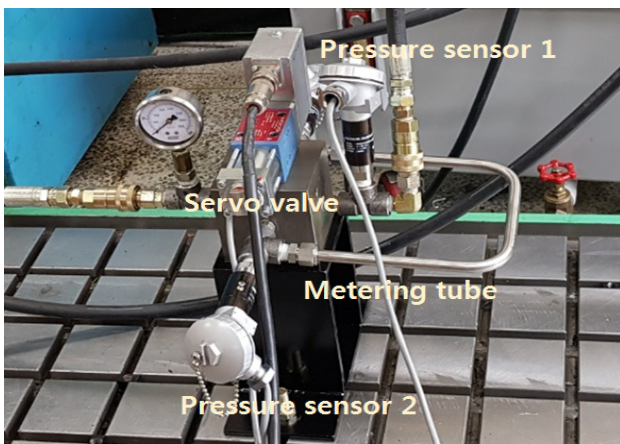


Fig. 3 Photographic view for the hardware part of the bandwidth frequency measuring device

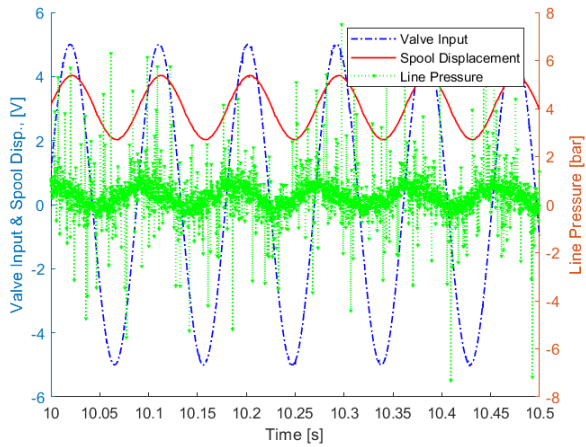


Fig. 4 Time domain responses of valve input  $i$ , spool displacement  $x_v$  and the pressure  $p_{Lv}$

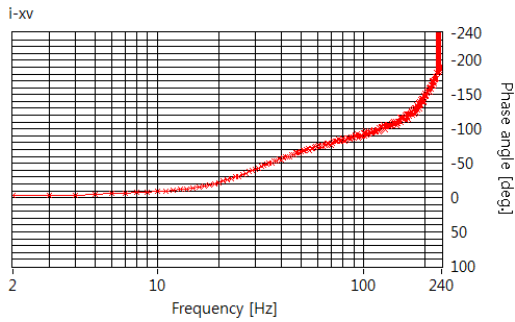


Fig. 5(a) Phase frequency response of  $i \rightarrow x_v$

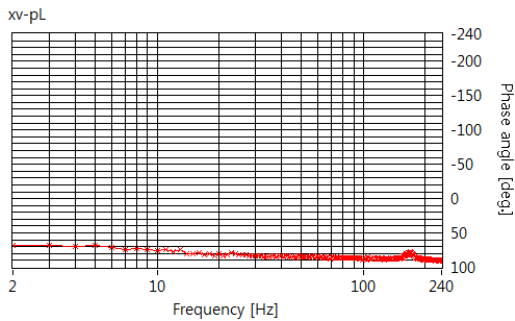


Fig. 5(b) Phase frequency response of  $x_v \rightarrow p_{Lv}$

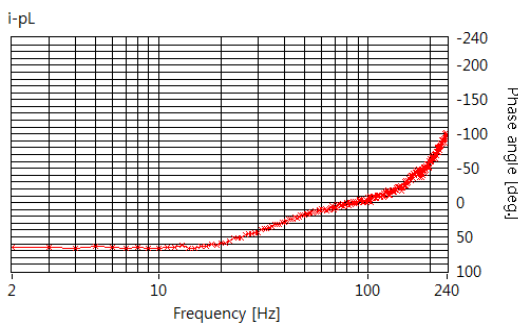


Fig. 5(c) Phase frequency response of  $i \rightarrow p_{Lv}$

계 발생하였지만, Fig. 5 (b)와 (c)의 주파수 응답선도에서는 노이즈가 제거된 모습을 보였다.

Fig. 5의 (a), (b), (c)는 각각 밸브입력에 대한 스폴변위의 위상각 주파수 응답선도, 스폴변위에 대한 배관부하압력의 위상각 주파수 응답선도와 밸브입력에 대한 압력의 위상각 주파수 응답선도이다. Fig. 5, (b)에서 주파수가 증가함에 따라 스폴변위에 대한 배관압력의 위상각이 +90 degree에 접근함을 관측할 수 있다. 예를 들어서 2 Hz에서 스폴변위에 대한 배관압력의 위상각이 +68 degree 이며, 10 Hz에서 위상각이 75 degree이고, 30 Hz에서 84 degree으로 거의 일정한 포화 상태에 다다른 모습이다.

Fig. 5(a)의 위상각에 Fig. 5(b)의 위상각을 더해주면 Fig. 5(c)의 위상각에 일치함을 육안으로도 확인할 수 있으며, 식 (2)의 중첩원리가 성립함을 알 수 있다. 반복되는 설명이지만, 식 (3)과 같이 중첩원리를 역으로 적용하여 밸브입력에 대한 압력의 위상각 주파수 응답선도에서 스폴변위에 대한 배관부하압력의 위상각 주파수 응답선도를 빼주면 표준 응답선도이라고 할 수 있는 밸브입력에 대한 스폴변위의 위상각 주파수 응답선도와 일치함을 Fig. 6에서 보여준다. Fig. 6에서 스폴변위의 위상각 선도와 보정된 배관압력의 위상각 선도가 마치 하나의 선도인 것처럼 정확히 일치한 모습이다.

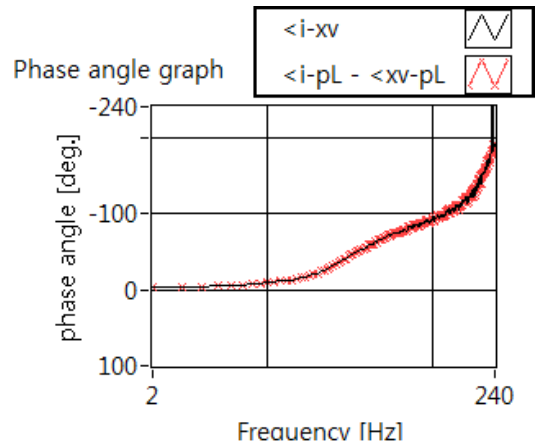


Fig. 6 Comparison between Phase frequency responses of ' $\angle i \rightarrow x_v$ ' and ' $\angle i \rightarrow p_{Lv} - \angle x_v \rightarrow p_{Lv}$ '

#### 4.2 배관부하압력 기반 대역폭 주파수 정밀도

Fig. 7-9에서 배관부하압력을 이용하여 측정된 방향제어밸브의 위상각 대역폭 주파수의 정밀도를 예시하고 있다. Fig. 7은 내경 0.011 m의 강 튜브를 사

용한 결과이며, Fig. 8과 Fig. 9는 각각 내경 0.5 in와 0.25 in의 호스를 사용한 결과이다. 공급압력 70 bar, 입력진폭 5 V 조건에서 세 종류의 미터링 배관에 대하여 각각 독립적으로 보정 위상각 선도를 구하였다.

입력신호의 진폭으로 1 V, 2.5 V, 5 V, 7.5 V, 9 V에 대하여 배관압력신호의 응답을 측정하였으며, 보정 위상각 선도를 이용하여 위상각 대역폭 주파수를 구하였다. 통상의 방향제어밸브에서 입력신호의 진폭이 증가하면 대역폭 주파수는 감소하는 경향을 가진다. 배관 재질과 직경을 달리한 세 가지 배관의 Fig. 7~9의 결과에서도 그러한 경향은 스펙트럼 신호를 이용한 대역폭 주파수와 압력신호를 이용한 대역폭 주파수에서 일관되게 보여준다. 본 연구에서 보다 중

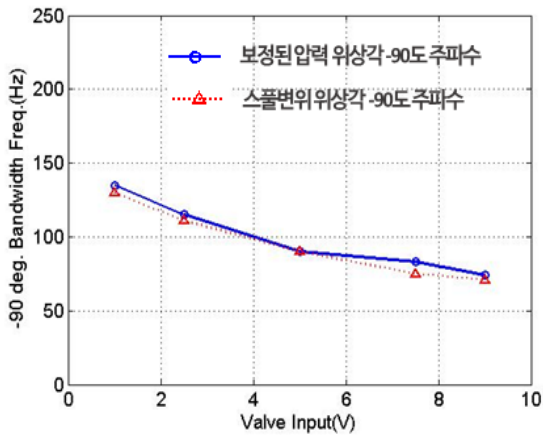


Fig. 7 Comparison between the phase bandwidth frequencies of  $\angle i \rightarrow x_v$  and  $\angle i \rightarrow p_{Lv} - \angle x_v \rightarrow p_{Lv} |_{comp}$  for  $\phi 0.011$  m steel tube

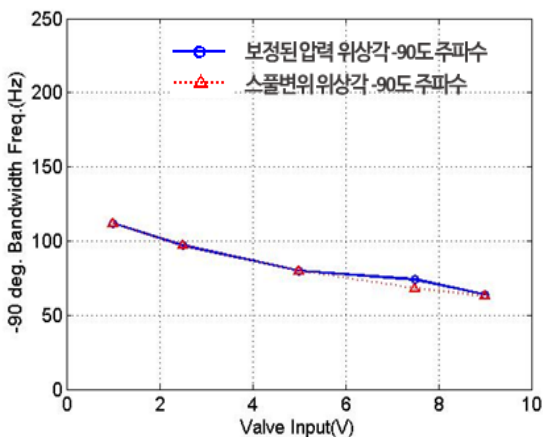


Fig. 8 Comparison between the phase bandwidth frequencies of  $\angle i \rightarrow x_v$  and  $\angle i \rightarrow p_{Lv} - \angle x_v \rightarrow p_{Lv} |_{comp}$  for  $\phi 0.25$  in hose

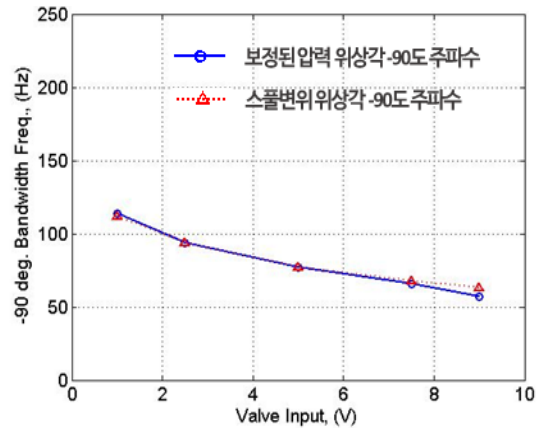


Fig. 9 Comparison between the phase bandwidth frequencies of  $\angle i \rightarrow x_v$  and  $\angle i \rightarrow p_{Lv} - \angle x_v \rightarrow p_{Lv} |_{comp}$  for  $\phi 0.5$  in hose

요한 사항은 배관 부하압력을 이용한 대역폭 주파수가 스펙트럼을 이용한 표준 대역폭 주파수에 근접하는 정밀도를 확인하는 것이다. 세 가지 배관의 Fig. 7~9에서 모든 입력 진폭 값에 대하여 배관 압력을 이용하여 측정한 위상각 대역폭 주파수가 스펙트럼 신호를 이용하여 구한 표준 대역폭 주파수에 근접하고 있음을 보여준다.

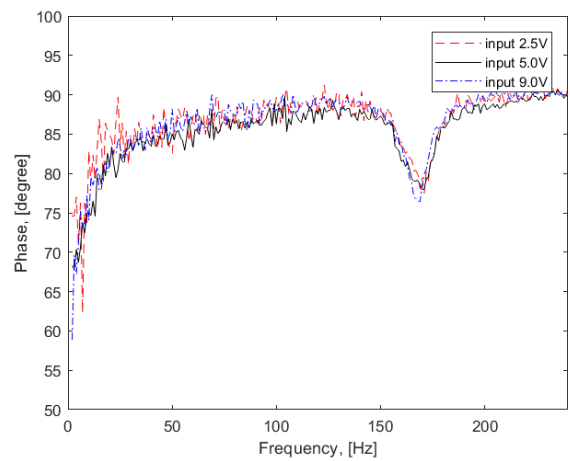


Fig. 10 Phase frequency responses of  $\angle x_v \rightarrow p_{Lv}$  for 2.5 V, 5 V and 9 V inputs

Fig. 10에서 압력위상각을 보정하는 입력진폭인 5.0 V 진폭과 2.5 V, 9.0 V의 세 가지 입력진폭에 대하여 스펙트럼-배관압력의 위상각 선도를 함께 보이고 있다. Fig. 10에서도 다양한 입력진폭에 대하여 스펙트럼-배관압력의 위상각 선도가 거의 유사한 모습을 보이고 있다. 그러므로 한 가지 입력진폭에 대하여 보정 위상각을 구하고, 이를 다양한 입력진폭에



적용하더라도 비교적 높은 정밀도의 위상각 대역폭 주파수를 구할 수 있을 것이다.

입력 진폭 크기에 무관하게 측정의 정밀도가 높다는 의미를 확대하여 해석하면 방향제어밸브의 종류에 무관하게 높은 측정 정밀도를 얻을 수 있다는 것이다. 입력 진폭 크기에 비례하여 배관 통과 유량의 크기도 변화하는데, 배관 통과 유량의 크기에 무관하게 측정한 위상각 대역폭 주파수의 정밀도가 매우 높다는 의미이다.

이것은 방향제어밸브의 종류와 정격 유량이 변화하더라도 동일한 위상각 보정 주파수 선도를 적용할 수 있음을 의미한다. 총 10회 측정한 결과에 대해 다음의 공식으로 측정한 오차를 정리하면 Table 3과 같다.

Table 3 Error of the measured bandwidth frequencies for 3 metering hydraulic lines

metering hydraulic line	averaged error [%]	maximum error [%]
φ0.011 m steel tube	3.4	10.7
φ0.5 in hose	1.5	8.8
φ0.25 in hose	1.4	7.9

Fig. 11에서 유압유 온도의 변화가 대역폭 주파수에 미치는 영향을 보여준다. 공급압력 70 bar이고 밸브입력진폭이 5 V으로 주어지고, 유압유 냉각기의 작동을 멈추어서 인위적으로 유압유 온도가 상승하도록 유도한 상태에서 15~32 °C의 영역에서 총 20회 측정한 결과이다. 여기서 온도 변화에 대하여 대역폭 주파수 값들이 거의 변화하지 않는다는 사실도 중요하지만, 더 중요한 것은 식 (22)을 적용하여 계산된 대역폭 주파수의 오차 수준이 어느 정도이나 하는 것이다. 오차 수준의 정도는 Table 4에 정리되어 있는데, 평균 오차는 2.2 %이고 최대 오차는 6.7 % 수준이었다. 공급압력의 변화가 대역폭 주파수의 정밀도에 미치는 영향에 대해서도 Fig. 11의 방법과 유사하게 측정되었다.

$$Error [%] = \frac{|\omega_{bp} - \omega_{bx}|}{\omega_{bx}} \cdot 100 \quad (22)$$

밸브입력진폭이 5 V이며 유압유 냉각기를 작동하여 유압유의 온도를 25 °C로 일정하게 유지한 상태에서 공급압력을 30 bar에서 110 bar까지 15 bar의 간

격으로 변화시켜 가면서 측정된 대역폭 주파수를 Fig. 12에서 보여준다.

공급압력의 변화가 측정된 대역폭 주파수의 오차에 크게 영향을 미치지 않은 모습이다. 총 10회 실시한 결과의 오차는 Table 4에 정리되어 있는 바와 같이 평균 오차는 4.0 %이고 최대 오차는 11.8 % 수준이었다.

Table 4 Error of the measured bandwidth frequencies for environmental factors

environmental factor	averaged error [%]	maximum error [%]
oil temperature	2.2	6.7
supply pressure	4.0	11.8

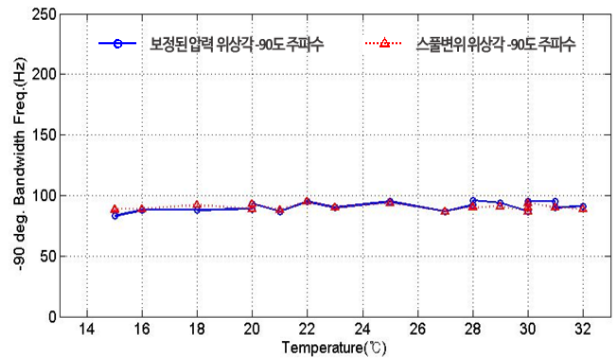


Fig. 11 Effect of the oil temperature variation on the bandwidth frequencies

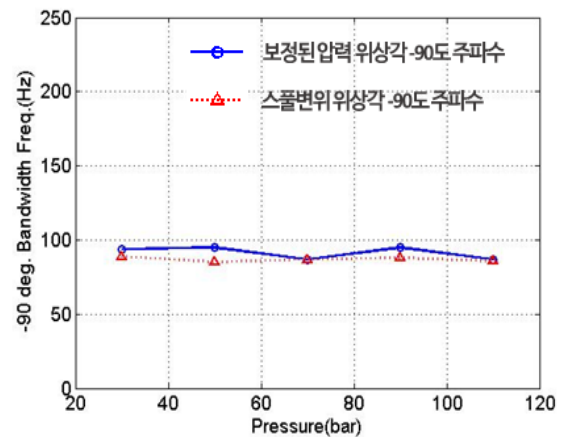


Fig. 12 Effect of the supply pressure variation on the bandwidth frequencies

### 5. 결 론

본 연구에서는 방향제어밸브의 대역폭 주파수를

측정하는 새로운 방법으로서 미터링 유압배관을 이용하는 방법을 제시하였다. 스폴변위에 대한 유압배관 부하압력의 위상각을 보정용 위상각으로 먼저 얻은 후에 이것을 이용하였다. 밸브 입력신호에 대한 압력신호의 위상각 주파수 응답에서 보정용 위상각을 빼주어 스폴변위의 표준 위상각을 대체할 수 있는 위상각 응답을 구하였다. 이러한 보정된 위상각 선도를 이용하여 방향제어밸브의 -90 degree 위상각 대역폭 주파수를 산출하였다. 이상에서 설명한 유압배관 부하압력을 이용하여 -90 degree 위상각 대역폭 주파수를 측정하는 방법에 대한 실험 거로과로부터 평균 오차 3.4% 수준의 정밀도를 확인하였다. 밸브 입력 진폭 크기와 유압유 온도, 공급압력 등의 변화에 대하여 매우 안정되고 높은 정밀도의 측정 결과를 보였다.

## 후 기

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음(과제 번호 2018-104-027)

## References

- 1) ISO 10770-1 Hydraulic Fluid Power - Electrically Modulated Hydraulic Control Valves - Part 1: Test Methods for Four-way Directional Flow Control Valves. 1998.
- 2) W. J. Thayer, "Specification Standards for Electrohydraulic Flow Control Servo Valves, Moog Technical Bulletin 117", Moog Inc. Control Division, 1962.
- 3) R. A. Nasca, "Testing Fluid Power Components", Industrial Press Inc. (New York USA), ISBN 0-8311-3002-4, pp212-240, 1990.
- 4) KS B 6511 Test Methods for Electro - Hydraulic Proportional Directional Series Flow Control Valves. 2011.
- 5) S. D. Kim, S. H. Jeon and D. Y. Shin, "A Study on the Bandwidth Frequency of Directional Control Valves based on the Amplitude of the Metering-Orifice Pressure", Journal of Drive and Control, Vol.14, No.2, pp.1-8, 2017.
- 6) S. D. Kim, S. H. Jeon and J. S. Yun, "A Study on the Phase Bandwidth Frequency of a Directional Control Valve Based on the Metering Orifice", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.1, pp.1-9, 2018.
- 7) M. Rabie, Fluid Power Engineering, McGraw-Hill Professional, New York, 2009.
- 8) I. Y. Lee and Education Division of Bosch Rexroth Korea, Hydraulic Power Engineering, Munundang Publishing Co., Seoul, pp.585-591, 2012.
- 9) K. Ogata, Modern Control Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1970.