

미터링 오리피스를 이용한 방향제어밸브 위상각 대역폭 주파수 측정에 관한 연구

A Study on the Phase Bandwidth Frequency of a Directional Control Valve based on the Metering Orifice

김성동^{1*} · 전세형² · 윤주섭³

Sungdong Kim, Sehyeong Jeon and Jooseop Yun

Received: 02 Aug. 2017, Revised: 02 Nov. 2017, Accepted: 05 Dec. 2017

Key Words : Bandwidth Frequency(대역폭 주파수), Metering Orifice(미터링 오리피스), Phase Angle(위상각), Directional Control Valve(방향제어밸브), Transmission Line(전달배관)

Abstract: The spool displacement of directional control valve can be considered as the standard signal to measure the bandwidth frequency of a directional control valve. When the spool displacement is not available, the metering-orifice system is implemented in this research as an alternative way of measuring the 90 degrees phase bandwidth frequency of the hydraulic directional control valve. The inertia effect on the transmission line oil induces the phase lead of the valve load pressure when compared with the phase of spool displacement. The capacitance effect of the oil induces the phase lag of the valve load pressure. The phase of the load pressure can be adjusted to be the same as that of the spool displacement by controlling the opening area of the metering orifice. A series of experiments were conducted to verify the effectiveness of the metering orifice. The 90 degrees phase bandwidth frequency measured from the valve load pressure was significantly deviated in some cases from the frequency of the spool displacement. The metering orifice was hard to be applied to measure the -90 degrees phase bandwidth frequency of the high precision.

기호 설명

A_o : area of metering orifice, m^2

b : width of directional control valve orifices, m

C : oil capacitance of a transmission line, m^3/Pa

C_d : discharge coefficient of orifice, no dimension

D : inner diameter of transmission lines, m

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

K_{or} : pressure-flow gain of metering orifice, $m^3/s \cdot Pa$

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

L : length of a transmission line, m

p_{1o}, p_{2o} : upstream pressure and downstream pressure of metering orifice, Pa

p_{1v}, p_{2v} : outlet pressures of directional control valve, Pa

p_{Lo} : load pressure of metering orifice, $p_{1o} - p_{2o}$, Pa

p_{Lv} : load pressure of directional control valve, $p_{1v} - p_{2v}$, Pa

p_s : supply pressure, Pa

p_t : return line pressure, Pa

Q_{1v}, Q_{2v} : flow rate of a directional control valve orifice, m^3/s

* Corresponding author: sdkim@kumoh.ac.kr

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

2 Innotems Co. LTD. Daejeon 34015, Korea

3 Construction Equipment R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gyeongsan, Gyeongbuk 38408, 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 directional control valve, m^3/s
- Q_o : flow rate of metering orifice, m^3/s
- s : Laplas variable, no dimension
- t : time, s
- V_1, V_2 : outlet volumes of directional control valve, m^3
- x_v : spool displacement of a directional control valve, m
- β_{ev} : effective bulk modulus of line oil, Pa
- ρ : oil density, kg/m^3
- ω : frequency, rad/s

1. 서 론

광의의 의미에서 방향제어밸브는 비례방향제어밸브와 서보밸브를 포함한다. 비례방향제어밸브와 서보밸브는 유체 흐름의 방향을 제어하는 기능에 추가하여 유량을 제어하는 기능을 가진다. 이제까지 방향제어밸브의 응답시간(response time)과 대역폭 주파수를 측정하기 위하여 유량 신호와 함께 스톨 변위 신호가 사용되어 왔다¹⁻⁴⁾. 유량신호를 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 응답시간과 대역폭 주파수를 측정하는 방법이 ISO 10770-1 규격에서 표준화되어 있다¹⁾. ISO 10770-1 규격에서 동적인 유량신호를 측정하는 방법으로서 낮은 마찰과 낮은 관성의 실린더(미터링 실린더로 호칭됨)를 설치하고, 미터링 실린더의 피스톤 속도 신호를 동적인 유량 신호로 사용하도록 추천하고 있다. 하지만 미터링 실린더 시스템은 장치의 구성이 복잡하고, 실린더의 동적 거동이 방향제어밸브 동적 거동에 간섭되어 나타날 가능성이 존재하며, 동특성이 왜곡될 수 있다.

방향제어밸브의 대역폭 주파수를 측정할 목적으로 유량 신호를 대체하여 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 감

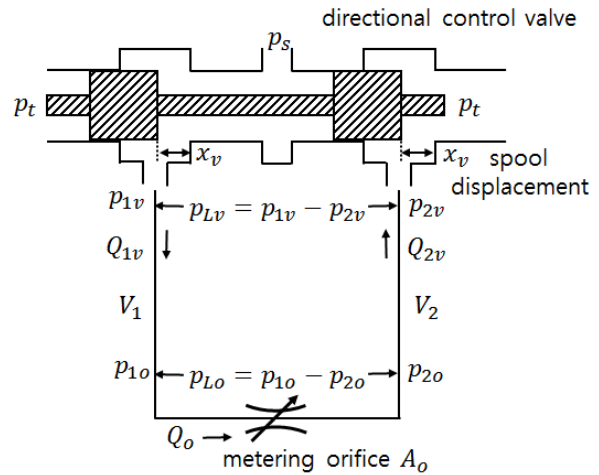


Fig. 1 Schematic view to use pressure signals for the measurement of dynamic behavior of a directional control valve

지기가 내장되어 있지 않으며, 방향제어밸브 외부에 스톨변위 감지기를 설치하는 것도 매우 복잡하여 적용에 한계를 가진다.

장치 구성과 측정이 편리한 압력신호를 이용하여 방향제어밸브 대역폭 주파수를 측정하는 방법을 개발하고자 함이 본 연구의 목적이다. 방향제어밸브에 Fig. 1에서 보여주는 미터링 오리피스(metering orifice)를 설치하고 방향제어밸브 양단의 부하압력을 이용하는 방법을 고려한다. 미터링 오리피스의 부하압력 진폭을 이용하여 방향제어밸브의 -3dB 진폭비 대역폭 주파수를 측정하는 방법에 관한 연구는 Kim 등이 이미 제시하였으며⁵⁾, 본 연구에서는 방향제어밸브 부하압력의 위상각을 이용하여 방향제어밸브의 -90 degree 위상각 대역폭 주파수를 측정하는 방법에 관한 연구를 목적으로 한다. 본 연구의 처음 단계에 미터링 오리피스 열림량을 조절하여 부하 압력 위상각을 스톨변위의 위상각과 일치하도록 교정하는 것이 필요한데, 이 단계에는 스톨변위 감지기가 내장된 방향제어밸브를 교정용 밸브로 사용하였다. 초기 교정 작업 후에 임의의 밸브 사용 조건에 대하여 밸브 부하압력 신호만을 이용하여 위상각 대역폭 주파수를 측정하는 개념을 적용하였다.

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

2. 미터링 오리피스 시스템 전달함수

Fig. 1에서 방향제어밸브의 부하압력 $p_{Lv}(t)$ 가 방

방향제어밸브의 거동 혹은 위상각을 대체할 수 있기 위해서 방향제어밸브의 스펴변위 $x_v(t)$ 거동에 유사하게 되도록 부하압력의 거동을 조절해 주어야 한다. 방향제어밸브 스펴 변위에 대한 부하압력의 전달함수 모델은 다음과 같이 유도된다.

Fig. 1과 같이 그려지는 미터링 오리피스 시스템의 동적 거동을 표현하는 수식은, 개념적으로 분류하여, 서보밸브와 미터링 오리피스의 유량관계식과 배관 오일의 관성 질량에 대한 운동방정식, 배관의 유체 흐름에 대한 연속 방정식 등으로 구성된다.

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

$$Q_{Lv}(t) = C_d b x_v(t) \sqrt{\frac{p_s - p_{Lv}(t)}{\rho}} \quad (1)$$

압력 p_{Lv} 이 영(0)인 무부하와 스펴변위가 영인 중립의 영점(null) 작동 조건에서는 하나의 선형 유량관계식으로 축약될 수 있다.

$$Q_{Lv}(t) = K_{q0} x_v(t) \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에서 $Q_{Lv}(t)$ 는 방향제어밸브에 형성되는 두 개의 오리피스 유량 $Q_{1v}(t)$, $Q_{2v}(t)$ 의 평균 유량으로 다음과 같이 정의된다. K_{q0} 는 영점에서의 유량 이득이며, 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{Lv}(t) = \frac{Q_{1v}(t) + Q_{2v}(t)}{2} \quad (3)$$

$$K_{q0} = C_d w \sqrt{\frac{p_s}{\rho}} \quad (4)$$

식 (2)이 보여주는 바와 같이 스펴변위 $x_v(t)$ 는 밸브 유량 $Q_{Lv}(t)$ 에 직접 비례하며, 유량을 표현하는 표준 신호로 사용될 수 있다. 여기서 표준이라는 의미는 방향제어밸브에 연결되는 배관의 종류와 특성, 오일 특성 등에 무관하게 항상 일정하게 주어진다라는 의미이다.

Fig. 1에서 미터링 오리피스(metering orifice) A_o 의 유량은 다음과 같이 주어진다.

$$Q_o(t) = C_d A_o \sqrt{\frac{2[p_{1o}(t) - p_{2o}(t)]}{\rho}} \quad (5)$$

미터링 오리피스 유량 Q_o 을 선형화하면

$$Q_o(t) = K_{or} p_{Lo}(t) \quad (6)$$

식 (6)에서 K_{or} 는 압력-유량 이득이며, $p_{Lo}(t)$ 는 오리피스 전후의 차압(혹은 부하압력)으로 다음과 같이 표현된다.

$$p_{Lo}(t) = p_{1o}(t) - p_{2o}(t) \quad (7)$$

$$K_{or} = \frac{C_d A_o}{\sqrt{2[p_{1o}(t) - p_{2o}(t)]}} \quad (8)$$

Fig. 1에서 방향제어밸브와 미터링 오리피스를 연결하는 배관 용적 V_1 과 V_2 이 서로 대칭이라는 조건에서 배관 용적에 존재하는 오일의 관성효과를 하나의 식으로 축약하여 표현하면 다음의 운동방정식이 된다.⁶⁾

$$p_{Lv}(t) - p_{Lo}(t) = 2I \frac{dQ_{Lv}(t)}{dt} \quad (9)$$

식 (9)에서 $p_{Lv}(t)$ 는 서보밸브 연결 배관부의 부하 압력이며, I 는 서보밸브와 미터링 실린더를 연결하는 배관 하나의 오일에 대한 관성이다.

$$p_{Lv}(t) = p_{1v}(t) - p_{2v}(t) \quad (10)$$

$$I = \frac{4\rho L}{\pi D^2} \quad (11)$$

배관 용적 V_1 과 V_2 이 서로 대칭이라는 조건을 유량의 연속 방정식에 적용하면 다음과 같이 정리된다.

$$Q_{Lv}(t) - K_{or} p_{Lo}(t) = \frac{C}{2} \frac{dp_{Lo}(t)}{dt} \quad (12)$$

식 (12)에서 C 는 서보밸브와 미터링 실린더를 연결하는 배관 하나의 압축성을 표현하며 커패시턴스(capacitance)로 호칭된다.⁶⁾

$$C = \frac{\pi D^2 L}{4\beta_{ev}} \quad (13)$$

식 (13)에서 β_{ev} 는 배관부 오일의 유효 체적탄성계수이다.

식 (9)와 (12)을 라플라스 변환⁷⁾하면

$$p_{Lv}(s) - p_{Lo}(s) = 2I Q_{Lv}(s) s \quad (14)$$

$$Q_{Lv}(s) - K_{or} p_{Lo}(s) = \frac{C}{2} p_{Lo}(s) s \quad (15)$$

식 (14)와 (15)에서 s 는 라플라스 변수이다.

식 (14)와 (15)에 식(2)의 라플라스 변환된 식을 적용하고 입력변수 $x_v(s)$ 에 대한 출력변수 $p_{Lv}(s)$ 의 전달함수(transfer function)을 구하면

$$\frac{p_{Lv}(s)}{x_v(s)} = \frac{K_{q0}}{K_{or}} \frac{(CI s^2 + 2IK_{or} s + 1)}{\left(\frac{C}{2K_{or}} s + 1\right)} \quad (16)$$

식 (16)의 s 변수에 주파수 ωj (j 는 허수)를 대입하여 주파수 전달함수를 구하면 다음 식과 같다.

$$\frac{p_{Lv}(\omega j)}{x_v(\omega j)} = \frac{K_{q0}}{K_{or}} \frac{(1 - CI\omega^2) + 2IK_{or} \omega j}{1 + \frac{C}{2K_{or}} \omega j} \quad (17)$$

식 (17)에서 $CI\omega^2$ 항은 배관의 길이를 매우 짧게 선정함으로써 무시할 수 있으며, 전달함수는 다음과 같이 간단해진다.

$$\frac{p_{Lv}(\omega j)}{x_v(\omega j)} \approx \frac{K_{q0}}{K_{or}} \frac{1 + 2IK_{or} \omega j}{1 + \frac{C}{2K_{or}} \omega j} \quad (18)$$

방향제어밸브의 유량신호를 대표하는 스펴변위 신호에 부하압력 신호가 동일하게 대응하도록 보정되어야 한다. 전달함수 식 (18)에서 방향제어밸브 부하압력의 주파수 특성이 스펴변위의 주파수 특성으로부터 왜곡될 수 있다. 즉 식 (18)에서 분모 1차 허수항의 배관 유체 커패시턴스 효과가 분자 1차 허수항인 유체 관성효과보다 우세하면, 주파수가 증가함에 따라 스펴변위의 위상각보다 오리피스 부하압력의

위상각이 뒤지는 ‘위상 지연(phase lag)’이 발생한다. 반대로 식 (18)에서 분모 1차 항의 커패시턴스 효과가 분자 1차 항인 관성효과보다 열세하면, 주파수가 증가함에 따라 스펴변위의 위상각보다 오리피스 부하압력의 위상각이 앞서는 ‘위상 앞섬(phase lead)’이 발생한다. 오리피스 부하압력의 이러한 왜곡을 보정해 주어야 한다. 미터링 오리피스의 열림 면적 A_o 를 조절함으로써 압력-유량 이득 K_{or} 을 변화시키며 식 (18)의 분자 항과 분모 항의 위상각을 일치시킬 수 있고, 나아가서 미터링 오리피스 부하압력의 위상각을 스펴변위의 위상각으로 일치시킬 수 있다.

식 (18)에서 주파수 전달함수 $p_{Lv}(\omega j)/x_v(\omega j)$ 의 위상각이 0이 되는 조건은 전달함수 분모 항의 위상각과 분자항의 위상각이 동일한 것이다.

$$\tan^{-1}(2IK_{or}\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{C\omega}{2K_{or}}\right) \quad (19)$$

식 (19)를 압력-유량 이득 K_{or} 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$K_{or} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C}{I}} \quad (20)$$

식(20)에 식 (11)과 식 (13)을 대입하면 다음 식과 같이 얻어진다.

$$K_{or} = \frac{\pi D^2}{8\sqrt{\rho\beta_{ev}}} \quad (21)$$

식 (21)의 의미는 미터링 오리피스 열림량 A_o 를 조절하여 압력-유량 이득 K_{or} 의 값이 식 (21)의 우측항의 값과 같아질 경우에 미터링 오리피스 부하압력의 위상각이 스펴변위의 위상각이 일치한다는 것이다. 이러한 오리피스 열림량 조건은 오리피스 연결 배관의 직경 D 와 유압유의 물성치인 유효체적탄성계수 β_{ev} 와 밀도 ρ 등에 따라 주어짐을 알 수 있다.

3. 실험 장치 구성

미터링 오리피스 시스템 실험장치의 구성에서 핵심 하드웨어 부분의 모습을 Fig. 2에서 보여준다. 미터링 오리피스는 열림량을 조절할 수 있도록 스톱밸브(throttle valve)를 장착하였다. 연구 대상으로 적

용된 방향제어밸브는 스펴변위 감지기가 내장되어 있는 직동(direct drive)형 서보밸브가 사용되었다. 압력신호를 이용하여 측정된 방향제어밸브 대역폭 주파수의 신뢰성을 확인하기 위하여 표본이 되는 대역폭 주파수와 비교하는 작업이 필요한데, 스펴변위 신호를 기반으로 측정된 대역폭 주파수가 기준 데이터로 활용된다. 또한 주어진 배관 계에 대하여 방향제어밸브 부하압력신호의 위상각을 스펴변위 위상각에 일치시키는 교정 작업에도 스펴변위 신호가 활용되었다. 연구 대상으로 사용하는 방향제어밸브는 직동형 서보밸브(Direct Drive Servo Valve)이지만 연구 내용과 결과는 비례방향제어밸브 뿐만 아니라 일반적인 서보 밸브에 공통적으로 적용될 수 있을 것이다. 서보밸브 토출부 두 지점에 압력감지기를 설치하였으며, 두 압력감지기 측정 값의 차압을 부하압력으로 계산하였다. 식 (17)에서 $CI\omega^2$ 항을 무시할 수 있도록 양 쪽 유압 배관의 길이 L 을 대칭으로 0.4 m로 짧게 선정하였다.

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.

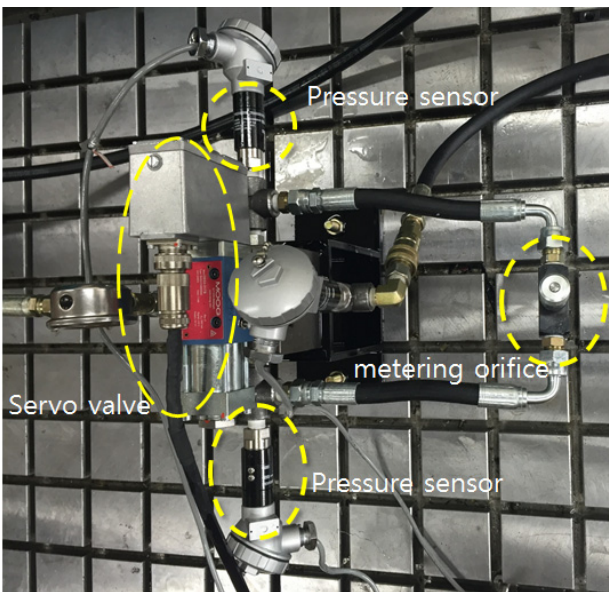


Fig. 2 Photographic view for the hardware part of the bandwidth frequency measuring device

전달 배관의 내경은 1/2 in (0.0127 m)와 3/8 in (0.009525 m), 1/4 in (0.00635 m)의 세 종류를 사용하였다. 공급압력은 7 MPa과 10 MPa의 두 종류에 대하여 실험되었다. 서보밸브의 10 V 정격 입력에 대하여 1 V, 2.5 V, 5 V, 7.5 V, 9 V의 다섯 가지 입력 진폭의 정현파 신호에 대하여 수행되었다. 10 LPM과 20 LPM 2 가지 정격유량의 밸브를 실험하였다. 방향제어밸브 부하압력과 스펴변위의 위상각을 일치시키는 미터링 오리피스 교정 작업은 5 V 신호에서 수행되었다. 미터링 오리피스 실험 장치의 주요 파라미터 값들은 Table 1에 표기되어 있다.

Table 1 Specification of the metering orifice system

Instruments	Specification
Servo valve 1	rated flow 10 LPM, rated pressure 21 MPa
Servo valve 2	rated flow 20 LPM, rated pressure 21 MPa
Power unit	rated flow 10 LPM, rated pressure 21 MPa
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 MPa
Metering orifice	rated flow 30 LPM, rated pressure 21 MPa
Accumulator	capacity volume 2L, rated pressure 35 MPa
Oil cooler	exchanged calory 6,178 kcal/hr, capacity 50-75 LPM
Filter	filtration rating 10 μ , rated flow 12.7 GPM
Measurement software language	version LabVIEW 2012

4. 실험 결과 및 분석

4.1 미터링 오리피스 부하 압력의 위상각 조절

미터링 오리피스 열림량을 조절함으로써 오리피스 부하압력의 위상각을 스펴변위의 위상각에 일치시킬 수 있음을 실험으로 확인하였으며, 그 결과를 Fig. 3 ~ 6에서 예시하였다. 정격 유량 10 LPM의 서보밸브를 적용하였으며, 시스템의 공급 압력이 7 MPa이며, 3/8 in 전달 배관의 경우를 예시하였다. 5 V 진폭 정격 입력신호의 조건에 대하여 방향제어밸브 부하압력과 스펴변위의 위상각을 비교하면서 미터링 오리

피스 열림량을 조금씩 미세하게 조절하여 오리피스 부하 압력의 위상각을 스톱변위의 위상각에 일치시켰다. Fig. 3은 위상각 일치 상태에서 오리피스 부하 압력과 스톱변위의 시간영역 응답선도를 보여 준다.

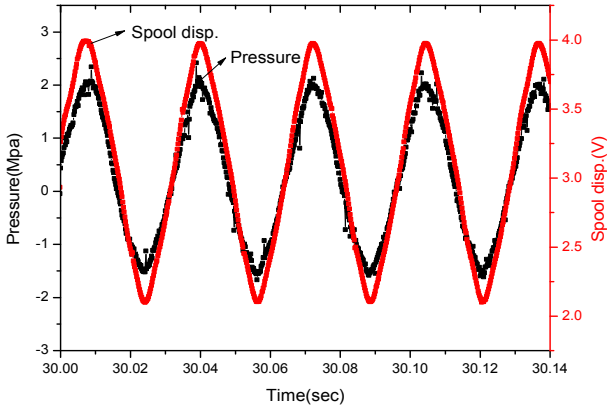


Fig. 3 Time domain responses of spool displacement and orifice pressure for the phase tuning condition

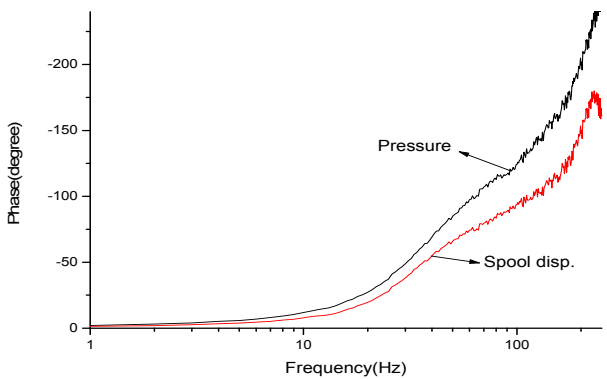


Fig. 4 Phase responses for the phase mistuned condition of 4.1 MPa static orifice load pressure

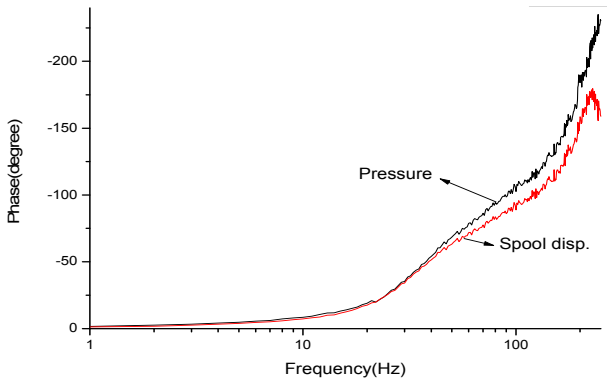


Fig. 5 Phase responses for the phase mistuned condition of 3.7 MPa static orifice load pressure

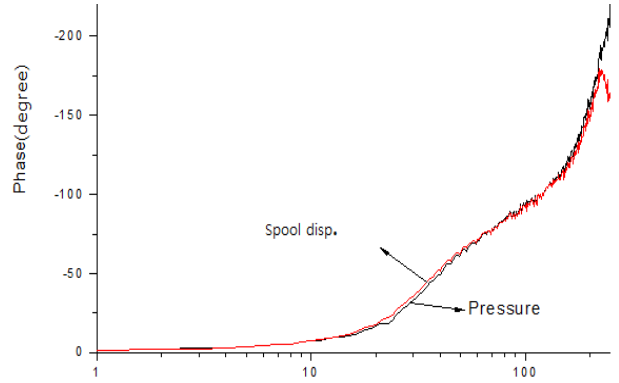


Fig. 6 Phase responses of spool displacement and orifice pressure for the phase tuning condition of 3.4 MPa static orifice load pressure

그림 신호의 주파수는 31 Hz의 부분을 예시한 것이다. 위상각 일치 상태에서 오리피스 부하압력과 스톱변위의 주파수 영역 위상각 선도는 Fig. 6에서 보여 준다. Fig. 4 ~ 6의 실험에서 밸브 입력이 5 V로 일정하게 주어진 정적 상태에서 오리피스 부하압력을 오리피스 열림량을 모니터링하는 간접 변수로 사용하였다. 미터링 오리피스의 열림량을 직접 확인할 방법이 없지만, 오리피스 열림량에 반비례하는 부하압력을 통하여 간접 확인하였다. Fig. 4는 처음 오리피스 열림량을 임의로 선정된 상태로 정적 부하압력이 4.1 MPa으로 Fig. 4 ~ 6의 3 가지 경우에서 가장 큰 값인데, 오리피스가 과도하게 잠긴 상태를 의미하며 방향제어밸브 부하압력의 위상 지연 각이 스톱변위의 위상 지연각보다 훨씬 크다. Fig. 5에서 미터링 오리피스를 조금 더 열어서 정적 부하압력을 3.7 MPa이 되도록 조절하면, 전달 배관을 흐르는 유체의 관성 효과도 증가하게 된다. 결과적으로 오리피스 부하압력의 위상 지연 각이 감소하고 스톱변위의 위상각에 가까이 접근된 모습을 변화된 모습을 Fig. 6에서 보여준다.

4.2 압력 위상각 대역폭 주파수

4.1절에서 설명한 방법으로 미터링 오리피스 부하 압력의 위상각을 스톱변위의 위상각으로 일치시킨 후에 3절에서 언급한 다양한 조건에 대하여 방향제어밸브 부하압력 신호의 -90 degree 위상각 대역폭 주파수를 측정하였다. 그 결과를 스톱변위 신호의 -90 degree 위상각 대역폭 주파수와 비교하였으며, Fig. 7 ~ Fig. 10에서 보여준다. Fig. 7 ~ Fig. 9는 모두 10 LPM 정격유량의 서보밸브를 사용하였다. 1/4, 3/8, 1/2 in 배관의 크기가 변경되거나, 시스템 공급

압력이 7 MPa와 10 MPa으로 변경될 때마다 미터링 오리피스에 열림량을 변경하여 방향제어밸브 부하압력의 위상각을 새로이 조절하였다. 방향제어밸브 부하압력의 위상각 조절에 적용된 밸브 입력 신호의 진폭은 정격 진폭인 10 V의 중간 값인 5 V를 선정하였다. 이상과 같이 배관 직경과 공급압력, 밸브 입력이 주어진 조건에서 방향제어밸브 부하압력의 위상각을 조절한 후에 서보밸브에 입력 신호를 1, 2.5, 5, 7.5, 9 V로 가변하면서 각각 5번씩 실험하여 평균 값으로 -90 degree 위상각 대역폭 주파수를 측정하였다. Fig. 10은 Fig. 8의 위상각 교정 조건과 동일하게 7 MPa의 공급압력과 3/8 in의 배관인 경우 10 LPM 정격유량 서보밸브에 대하여 5 V 입력으로 방향제어밸브 부하압력의 위상각을 교정한 후에, 20 LPM 정격유량 서보밸브로 교체하고서 측정한 결과이다.

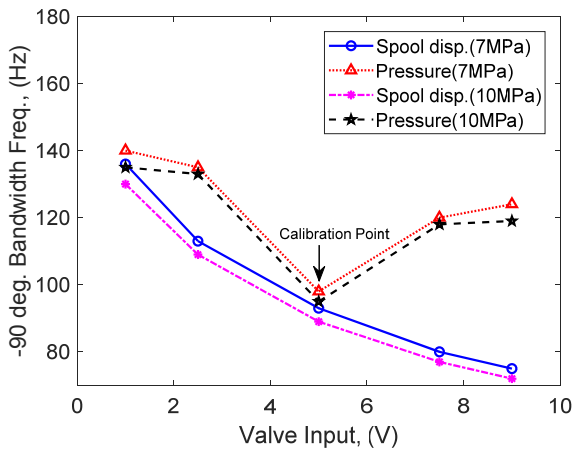


Fig. 7 -90 degree phase bandwidth frequencies of spool displacement and load pressure for 1/4 inch line and 10 LPM valve

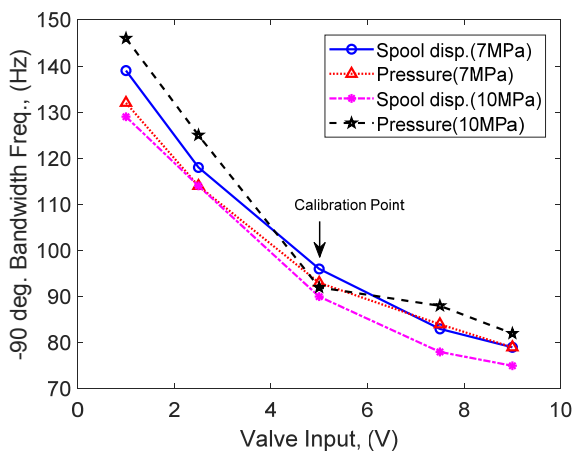


Fig. 8 -90 degree phase bandwidth frequencies for 3/8 inch line and 10 LPM valve

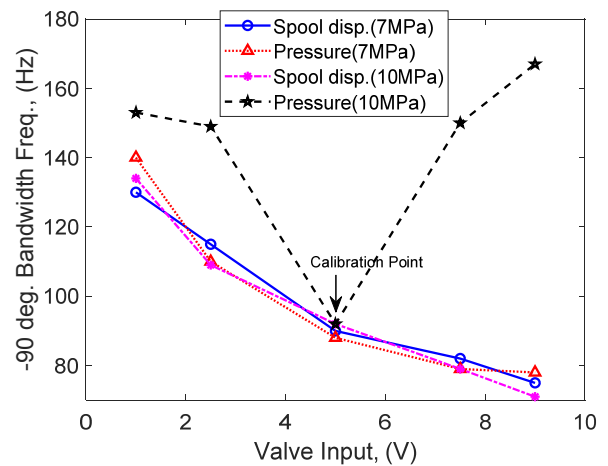


Fig. 9 -90 degree phase bandwidth frequencies for 1/2 inch line and 10 LPM valve

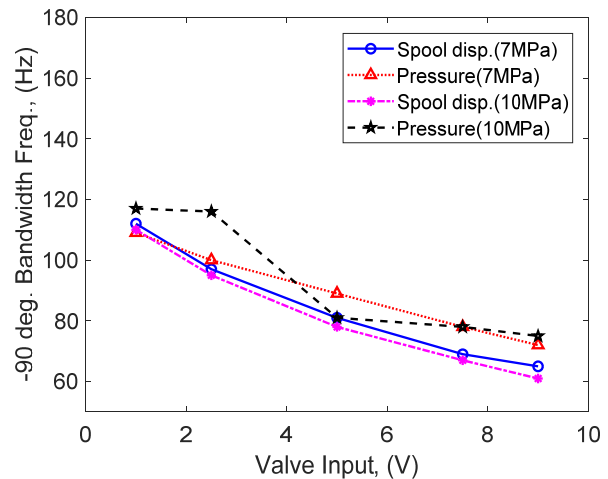


Fig. 10 -90 degree phase bandwidth frequencies for 3/8 inch line and 20 LPM valve

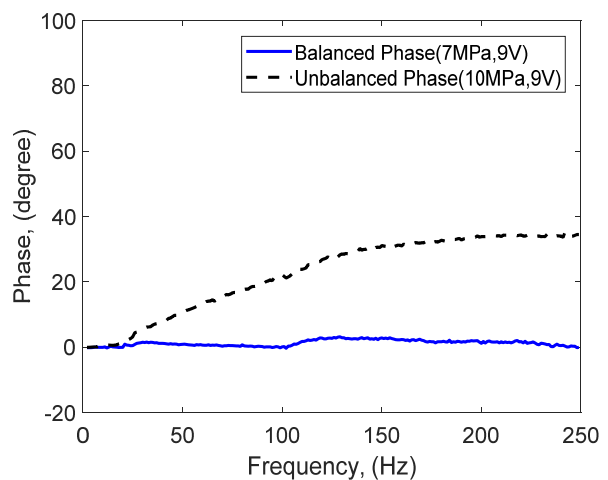


Fig. 11 Phase frequencies responses of the valve load pressure with respect to the spool displacement

Fig. 7 ~ Fig. 10 각각의 그림이 조금씩 다른 경향을 보이는 모습이다. 예를 들어, Fig. 8에서는 방향제어밸브 부하압력 위상각 대역폭 주파수가 스프롤변위 위상각 대역폭 주파수에 대해 10% 수준 이내의 비교적 작은 차이를 보이는 반면에 Fig. 7과 Fig. 9의 일부 조건에서는 부하압력 위상각 대역폭 주파수가 스프롤변위 위상각 대역폭 주파수의 두 배에 접근하여 오차가 100 %의 수준에 이르는 극단적인 결과를 보였다. 이러한 현상에 대한 원인은 방향제어밸브 부하압력 위상각이 스프롤변위 위상각과 일치하는 조건의 균형 상태가 매우 예민하여 유압유의 조건이 조금만 변화하더라도 위상각 불균형 상태로 변화하기 때문인 것으로 판단된다. 예를 들어서 유압 유체 중의 기포 혼입도가 변화하여 유압유의 유효 탄성계수가 변화하거나, 유체 온도의 변화에 따른 유체 밀도가 변화한다면, 위상각 균형 조건식 (21)의 우변 항의 값이 변화하며 위상각 불균형 상태로 빠져들기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 위상각 불균형 상태를 Fig. 11에서 예시하였다. 그림에서 방향제어밸브의 부하압력 위상각이 스프롤변위 위상각과 일치하는 정도를 표현하는 다른 방법으로서 스프롤변위신호에 대한 부하압력의 위상각 선도들을 도시하였다. Fig. 9에서 부하압력의 위상각 대역폭 주파수가 스프롤변위 위상각 대역폭 주파수에 양호하게 부합하는 공급압력 7 MPa, 밸브 입력 9 V 조건에 대한 Fig. 11의 위상각 선도는 0 degree에 매우 근접하여 부하압력의 위상각이 스프롤변위의 위상각에 양호하게 일치함을 보인다. 반면에 Fig. 9에서 부하압력의 위상각이 스프롤변위 위상각 대역폭 주파수와 큰 차이를 보이는 공급압력 10 MPa, 밸브 입력 9 V 조건에 대한 Fig. 11의 위상각 선도는 부하압력의 위상각이 스프롤변위의 위상각보다 앞서는 양의 위상각을 보였다. 이러한 현상은 배관 오일 관성 효과에 의한 위상각 앞섬 현상이 배관 커패시턴스 효과보다 더 우세하게 작용하였기 때문인 것으로 판단된다.

이상에서 설명한 위상 불균형 상태는 다분히 우발적인 현상으로 판단할 수 있는데, Fig. 8과 Fig. 10에서는 위상 불균형 상태가 심각하지 않은 모습이다. 특히 Fig. 10은 Fig. 8의 10 LPM 정격유량 밸브에 대하여 5V 입력 조건에서 방향제어밸브 부하압력 위상각을 교정한 상태에서 단순히 서보밸브를 20 LPM 정격유량의 밸브로 교체한 상태에서 측정한 결과임에도 불구하고 위상 불균형이 심각하지 않은 모습이다. 하지만 전반적인 분석 결과로서 오리피스를 교정

한 상태에서 측정한 위상각 대역폭 주파수의 정밀도는 현저히 낮으며, 높은 정밀도가 요구되는 경우에는 적용이 어려울 것으로 판단된다.

Fig. 7 ~ Fig. 10에서 위상 불균형 경우를 제외한다면, 서보밸브의 입력이 커짐으로 인하여 스프롤변위의 대역폭 주파수가 낮아진다. 이러한 현상은 방향제어밸브의 입력 신호가 커짐에 따라 점점 대역폭 주파수가 작아진다는 일반적으로 알려진 결과와 일치하는 현상이다.

5. 결 론

본 연구에서 방향제어밸브의 -90 degree 위상각 대역폭 주파수를 측정하는 새로운 방법으로서 미터링 오리피스를 이용하는 방법을 제시하고, 미터링 오리피스를 조절함으로써 방향제어밸브 부하압력신호의 위상각과 스프롤변위의 위상각을 일치시킬 수 있음을 확인하였다. 실험을 통하여 미터링 오리피스 부하압력을 이용하여 -90 degree 위상각 대역폭 주파수를 측정하는 방법의 효율성을 검증하였는데, 이 방법의 정밀도가 현저히 떨어지며, 높은 정밀도가 요구되는 경우에는 적용이 어렵다.

향후 연구로 측정 정밀도를 개선하기 위하여 방향제어밸브 부하압력 위상각이 스프롤변위 위상각과 일치하는 조건의 균형 상태를 견고히 유지시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다. 또한 임의의 밸브와 임의의 밸브 입력 크기에 적용이 용이하며, 방향제어밸브 부하압력의 위상각 교정용 밸브의 스프롤 변위신호를 사용하지 않고 순수하게 압력신호만으로 보정하는 방법에 대한 연구와 개발이 필요하다.

후 기

이 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

References

- 1) International Organization for Standardization, "ISO 10770-1 Hydraulic fluid power - Electrically modulated hydraulic control valves - Part 1: Test methods for four-way directional flow control valves", 1998.

- 2) William J. Thayer, "Specification Standards for Electrohydraulic Flow Control Servo valves, Moog Technical Bulletin 117", Moog Inc. Control Division, 1962.
- 3) Robert 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) Sungdong Kim, Sehyeong Jeon and Daeyoung Shin, A Study on Bandwidth Frequency of directional Control Valves based on the Amplitude of Metering Orifice Pressure, Journal of Drive and Control, Vol.14 No.2 pp.1-8 Jun. 2017.
- 6) M. Rabie, "Fluid Power Engineering, McGraw-Hill Professional", 2009.
- 7) K. Ogata, Modern Control Engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1970.