

# 미터링 오리피스 압력 진폭을 이용한 방향제어밸브 대역폭 주파수에 관한 연구 A Study on the Bandwidth Frequency of Directional Control Valves based on the Amplitude of the Metering-Orifice Pressure

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

Sungdong Kim, Sehyeong Jeon and Daeyoung Shin

Received: 24 Feb. 2017, Accepted: 03 Mar. 2017

**Key Words** : Bandwidth Frequency(대역폭 주파수), Metering Orifice(미터링 오리피스), Directional Control Valve(방향제어밸브), Transmission Line(전달배관), Amplitude Ratio(진폭비)

**Abstract**: The spool displacement of a directional control valve can be considered as the standard signal for the measurement of its bandwidth frequency. When the spool displacement is not available, the metering-orifice system is suggested in this study as an alternative way to measure the - 3 dB amplitude-ratio bandwidth frequency of the hydraulic directional-control valve. The amplitude ratio of the metering-orifice pressure can be adjusted to equal that of the spool displacement through the controlling of the metering-orifice opening area. A series of experiments were conducted to verify the effectiveness of the metering-orifice system. The metering orifice was confirmed as adequate for the measurement of the - 3 dB amplitude-ratio bandwidth frequency.

## 기호 설명

$A_o$  : opening area of metering orifice, m<sup>2</sup>  
 $C$  : oil capacitance of a transmission line, m<sup>3</sup>/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<sup>4</sup>  
 $K_{or}$  : pressure-flow gain, m<sup>3</sup>/s·Pa  
 $K_{q0}$  : null spool displacement-flow gain, m<sup>3</sup>/s/m  
 $L$  : length of a transmission line, m  
 $P_{1o}, P_{2o}$  : upstream and downstream pressure of metering orifice, Pa

$P_s$  : supply pressure, 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  
 $Q_{1v}, Q_{2v}$  : flow rate of a directional control valve orifice, m<sup>3</sup>/s  
 $Q_{Lv}$  : load flow rate of a directional control valve, m<sup>3</sup>/s  
 $Q_o$  : flow rate of metering orifice, m<sup>3</sup>/s  
 $s$  : Laplas variable, no dimension  
 $t$  : time, s  
 $w$  : width of directional control valve orifices, m  
 $x_v$  : spool displacement of a directional control valve, m  
 $\beta_{ev}$  : effective bulk modulus of line oil, Pa  
 $\rho$  : oil density, kg/m<sup>3</sup>  
 $\omega$  : frequency, rad/s

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

1 Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 730-701, Korea

2 Innotems Co. LTD. Daejeon 34015, Korea

3 Construction Machinery Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gyeongsan, Gyeongbuk 38430, Korea

Copyright © 2017, 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.

## 1. 서론

광의의 의미에서 방향제어밸브는 비례방향제어밸브와 서보밸브를 포함한다. 비례방향제어밸브와 서보밸브는 유체 흐름의 방향을 제어하는 기능에 추가하여 유량을 제어하는 기능을 가진다. 이제까지 방향제어밸브의 동특성 혹은 대역폭 주파수를 측정하기 위하여 유량 신호와 함께 스톱 변위 신호가 사용되어 왔다<sup>1-5)</sup>. 밸브를 통과하는 유량을 측정하기 위하여 시중에 상용화된 유량센서의 적용을 고려할 수 있다. 하지만 시중에 상용화된 유량센서는 기어 모터나 터빈의 구조를 가지는데, 수십 Hz에서 수백 Hz 영역의 서보밸브 대역폭 주파수를 측정하는 목적으로 적용하기에는 어려움이 따른다.

유량 신호를 이용하여 방향제어밸브의 대역폭 주파수를 측정하는 방법이 ISO 10770-1 규격에서 표준화되어 있다<sup>1)</sup>. ISO 10770-1 규격에서 동적인 유량 신호를 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.

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

장치의 구성과 계측이 편리한 압력신호를 이용하여 방향제어밸브의 동특성과 대역폭 주파수를 측정하는 방법을 개발하고자 함이 본 연구의 목적이다. ISO 10770-1 규격에서 규정하는 미터링 실린더 대신에 Fig. 1에서 보여주는 미터링 오리피스(metering orifice)를 설치하고 방향제어밸브 양단의 부하압력을 이용하는 방법을 고려한다.

방향제어밸브 대역폭 주파수 측정에 부하압력 진폭을 적용하기 위하여 이론 분석을 수행하여 실용적 방법을 모색하고, 도출된 방법을 실험을 통하여 확인

한다.

## 2. 비선형 정적 보정

방향제어밸브 내부에 형성되는 두 개의 오리피스와 미터링 오리피스는 Fig. 1에서 보여주는 직렬로 배치된 구조이다. 직렬 구성의 오리피스에서 스톱 변위  $x_v$ 와 미터링 오리피스의 열림량  $A_o$ 은 방향제어밸브와 미터링 오리피스를 흐르는 유량과 압력에도 서로 영향을 미치게 된다. 서론에서 방향제어밸브의 스톱 변위 신호를 이용하여 측정된 대역폭 주파수가 시스템 주변 환경의 영향을 받지 않기 때문에 표준 대역폭 주파수라로 간주하였다. 본 연구에서 방향제어밸브의 부하 압력(혹은 차압)의 거동으로 방향제어밸브의 표준 거동 신호라고 할 수 있는 방향제어밸브 스톱 변위의 거동을 대신하기 위해서는 부하압력과 스톱 변위의 두 가지 물리량의 상관관계를 파악한다. 이러한 상관관계로부터 미터링 오리피스의 열림량을 조정해 주는 보정 작업이 필요하다.

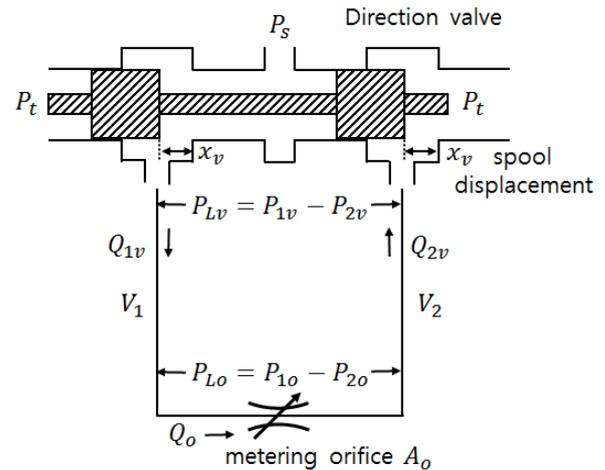


Fig. 1 Schematic view to use pressure signals for dynamic behavior of a servo valve

보정 방법은 방향제어밸브와 미터링 오리피스의 비선형 유량식의 효과를 보정해 주는 비선형 정적 보정과 스톱 변위의 거동과 부하압력의 거동의 차이를 보정해 주는 동적 거동으로 나누어 고려한다. 또한 비선형 정적 보정은 Fig. 1의 구성에서 방향제어밸브 스톱 변위의 진폭이 -3 dB 강하할 동안에 방향제어밸브 부하압력의 진폭도 -3 dB 강하하는 동일한 조건이 되도록 하는 보정 방법을 모색한다.

정적인 상태에서 방향제어밸브의 유량이 미터링

오리피스를 통과하는 유량과 일치하므로 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{Lv} = Q_o \quad (1)$$

방향제어밸브 내부에 두 개의 오리피스가 형성되며, 각각의 오리피스에 대하여 두 개의 유량 방정식이 주어진다. 두 오리피스의 형상이 서로 부합(matched)하며 대칭(symmetrical)이며, 스톱과 슬리브가 제로랩(zero lap)인 경우에 방향제어밸브의 유량관계식은 다음과 같이 주어진다<sup>6)</sup>.

$$Q_{Lv} = C_d w x_v \sqrt{\frac{P_s - P_{Lv}}{\rho}} \quad (2)$$

미터링 오리피스의 유량식도 유사하게 적용하고, 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$C_d w x_v \sqrt{\frac{P_s - P_{Lv}}{\rho}} = C_d A_o \sqrt{\frac{2P_{Lo}}{\rho}} \quad (3)$$

정적 상태에서  $P_{Lo}$  대신에  $P_{Lv}$ 를 대입하고, 비선형 관계식 (3)을 압력 변수의 항과 형상 변수의 항으로 분리한 후에  $K$ 인자를 다음과 같이 정의한다.

$$K \equiv \frac{C_d w x_v}{C_d A_o} = \sqrt{\frac{2 P_{Lv}}{P_s - P_{Lv}}} \quad (4)$$

식 (3)를 테일러 급수로 전개한 후에 첫 번째 항만 취하여 스톱변위 증분량  $\Delta x_v$ 와 방향제어밸브 부하압력 증분량  $\Delta P_{Lv}$ 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{C_d w}{C_d A_o} \Delta x_v = \frac{C_d w}{C_d A_o} x_v \frac{1}{2(P_s - P_{Lv})} \Delta P_{Lv} + \frac{1}{\sqrt{2P_{Lv}(P_s - P_{Lv})}} \Delta P_{Lv} \quad (5)$$

식 (5)에 식 (4)을 대입하여 정리하면 스톱변위 증분률  $\Delta x_v/x_v$ 와 방향제어밸브 부하압력 증분률  $\Delta P_{Lv}/P_{Lv}$  사이의 관계가 다음과 같이 얻어진다.

$$\frac{\Delta x_v}{x_v} = \left( \frac{K^2}{4} + \frac{1}{2} \right) \frac{\Delta P_{Lv}}{P_{Lv}} \quad (6)$$

식 (6)의 양변에 상용로그 함수를 취하고 20배 증폭한 데시벨 증분률에 -3 dB 값을 각각 대입하면  $K$ 인자 값이  $\sqrt{2}$ 가 된다. 이 값을 식 (4)에 대입하면, 다음의 관계가 주어진다.

$$P_{Lv} = \frac{1}{2} P_s \quad (7)$$

방향제어밸브 입력을 정현파 진폭 값으로 일정하게 인가한 정적인 상태에서 미터링 오리피스의 부하압력이 공급압력의 절반이 되도록 오리피스 열림량  $A_o$ 을 조절하면, 스톱변위 진폭과 오리피스의 부하압력의 증분률이 동일하게 -3 dB으로 변화하는 조건이 된다. 이하 내용에서 이러한 조건을 ‘-3 dB 비선형 정적 보정’으로 호칭하고, 이하 실험도 이러한 조건에서 진행한다.

ISO 10770-1에는 방향제어밸브의 대역폭 주파수를 측정하는 조건으로 부하압력이 영인 무부하에서 시행하는 것으로 서술되어 있다. 반면에 식 (7)과 같이 부하압력이 공급압력의 절반인 부하조건에서 시행하여 ISO 10770-1의 무부하 조건과 차이를 보인다. 하지만, 부하조건에서의 대역폭 주파수는 실제 밸브를 사용하는 조건에서의 특성 값을 보여주는 장점도 있다. 부하압력이 대역폭주파수에 미치는 영향에 관한 조사는 추후의 연구로 미루기로 한다.

### 3. 동적 보정

#### 3.1 미터링 오리피스 시스템 전달함수

Fig. 1에서 방향제어밸브 부하압력의 거동이 방향제어밸브의 거동을 대체할 수 있기 위해서 방향제어밸브의 스톱변위의 거동에 유사하게 되도록 부하압력의 거동을 조절해 주어야 한다. 방향제어밸브 스톱변위에 대한 부하압력의 전달함수 모델을 이용하여 오리피스 압력을 조절할 수 있는 가능성을 살펴본다. Fig. 1과 같이 그려지는 방향제어밸브 - 미터링 오리피스 시스템의 동적 거동을 표현하는 수식은 개념적으로 분류하여 방향제어밸브와 미터링 오리피스의 유량관계식과 배관 오일의 관성 질량에 대한 운동방정식, 배관의 유체 흐름에 대한 연속 방정식 등으로 구성된다.

방향제어밸브의 유량관계식에서  $P_{Lv}$ 이 영인 무부하와 스톱변위가 영인 중립의 영점(null) 작동 조건에서는 하나의 선형 유량관계식으로 축약될 수 있다.

$$Q_{Lv} = K_{q0} x_v \quad (8)$$

식 (8)에서  $Q_{Lv}$ 는 방향제어밸브에 형성되는 두 개의 오리피스 유량  $Q_{1v}$ ,  $Q_{2v}$ 의 평균 유량으로 다음과 같이 정의된다.  $K_{q0}$ 는 영점에서의 유량 이득이며, 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{Lv} = \frac{Q_{1v} + Q_{2v}}{2} \quad (9)$$

$$K_{q0} = C_d w \sqrt{\frac{P_s}{\rho}} \quad (10)$$

식 (10)의 유량 이득은 공급압력과 유체밀도가 일정한 조건에서 일정하다. 일정한 유량 이득에 대해서 식 (8)이 보여주는 바와 같이 스펙변위  $x_v$ 는 밸브 유량  $Q_{Lv}$ 에 직접 비례하며, 유량을 표현하는 표준 신호로 사용될 수 있다. 여기서 표준이라는 의미는 방향제어밸브의 대역폭 주파수를 가장 효율적으로 표현하는 신호이며, 유량신호 혹은 압력신호를 이용하여 측정된 대역폭 주파수의 신뢰성을 검증하는 용도의 기준 신호로 사용할 수 있다는 의미이다.

Fig. 1에서 미터링 오리피스(metering orifice) 열림량  $A_o$ 가 ‘-3 dB 비선형 정적 보정’의 값으로 설정된 상태에서 유량  $Q_o$ 에 대해서 선형화 개념을 적용한다.

$$Q_o = K_{or} P_{Lo} \quad (11)$$

$K_{or}$ 는 유량 이득이며,  $P_{Lo}$ 는 오리피스 전후의 차압(혹은 부하압력)이다.

Fig. 1에서 방향제어밸브와 미터링 오리피스를 연결하는 배관 용적  $V_{1v}$ 과  $V_{2v}$ 이 서로 대칭이라는 조건에서 배관 용적에 존재하는 오일의 관성효과를 하나의 식으로 축약하여 표현하면 다음의 운동방정식이 된다<sup>7)</sup>.

$$P_{Lv} - P_{Lo} = 2I \frac{dQ_{Lv}}{dt} \quad (12)$$

여기서  $P_{Lv}$ 는 서보밸브 연결 배관부의 부하압력(혹은 차압)이며,  $I$ 는 서보밸브와 미터링 실린더를 연결하는 배관 하나의 오일에 대한 관성이다.

$$P_{Lv} = P_{1v} - P_{2v} \quad (13)$$

$$I = \frac{4\rho L}{\pi D^2} \quad (14)$$

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

$$Q_{Lv} - K_{or} P_{Lo} = \frac{C}{2} \frac{dP_{Lo}}{dt} \quad (15)$$

식 (15)에서  $C$ 는 서보밸브와 미터링 실린더를 연결하는 배관 하나의 압축성을 표현하며 커패시턴스(capacitance)로 호칭된다<sup>7)</sup>.

$$C = \frac{\pi D^2 L}{4\beta_{ev}} \quad (16)$$

식 (16)에서  $\beta_{ev}$ 는 배관부 오일의 유효 체적탄성계수이다.

식 (12)와 (15)를 라플라스 변환<sup>8)</sup>하면

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

$$Q_{Lv} - K_{or} P_{Lo} = \frac{C}{2} P_{Lo} s \quad (18)$$

식 (17)와 (18)에서  $s$ 는 라플라스 변수이다.

식 (17)와 (18)에 식(8)을 적용하고, 입력변수  $x_v$ 에 대한 출력변수  $P_{Lv}$ 의 전달함수(transfer function)을 구하면

$$\frac{P_{Lv}}{x_v} = \frac{K_{q0}}{K_{or}} \frac{(CI s^2 + 2IK_{or} s + 1)}{\left(\frac{C}{2K_{or}} s + 1\right)} \quad (19)$$

식 (19)의  $s$  변수에 주파수  $\omega_j$  ( $j$ 는 허수)를 대입하여 주파수 전달함수를 구하면 다음 식과 같다.

$$\frac{P_{Lv}}{x_v} = \frac{K_{q0}}{K_{or}} \frac{(1 - CI\omega^2) + 2IK_{or} \omega j}{1 + \frac{C}{2K_{or}} \omega j} \quad (20)$$

식 (20)에서  $CI\omega^2$  항은 배관의 길이를 매우 짧게

선정함으로써 무시할 수 있으며, 전달함수는 다음과 같이 간단해진다.

$$\frac{P_{Lv}}{x_v} \approx \frac{K_{q0}}{K_{or}} \frac{1 + 2IK_{or} \omega j}{1 + \frac{C}{2K_{or}} \omega j} \quad (21)$$

방향제어밸브의 유량신호에 대응하는 스폴변위 신호에 부하압력 신호도 대응하도록 보정되어야 한다. 전달함수 식 (21)에서 오리피스 압력의 주파수 특성이 스폴변위의 주파수 특성으로부터 왜곡될 수 있다. 즉 식 (21)에서 1차 분모 항의 배관 유체 캐패시턴스 효과가 1차 분자 항인 유체 관성 효과보다 우세하면, 스폴 진폭의 주파수가 증가함에 따라 오리피스 부하압력의 진폭이 감소한다. 반대로 식 (21)에서 1차 분모 항의 캐패시턴스 효과가 1차 분자항 관성효과보다 열세하면, 스폴 진폭의 주파수가 증가함에 따라 오리피스 부하압력의 진폭이 오히려 증가한다. 오리피스 부하압력과 표준 신호인 스폴변위 사이에 이러한 왜곡이 보정되어야 한다.

### 3.2 동적 보정

동적 보정 방법은 Fig. 2에서 보여주는 스폴변위의 진폭변화율에 대응하는 부하압력의 진폭변화율 정도를 보정해 주는 것으로서 Fig. 3에서 보여주는 네 단계의 절차로 이루어진다. 입력신호의 주파수가 증가함에 따라 부하압력의 진폭비가 감소하거나 증가하게 되는 경향을 보상하는 것이 동적 보정의 핵심 개념이다.

(1) 로그-로그 치수의 방향제어밸브 부하 압력 진폭비 선도에서 1~10 Hz의 낮은 주파수 영역에서 진폭비가 감소하는 기울기를 구하는 단계

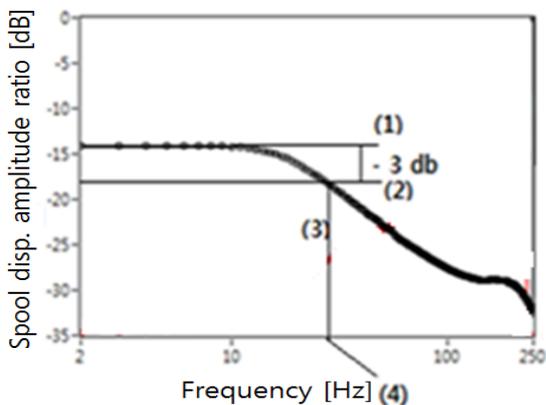


Fig. 2 Process to determine the -3 dB bandwidth frequency for the spool displacement

(2) 구해진 기울기와 평행하면서 3 데시벨이 낮은 평행선을 그리는 단계

(3) 평행선 선도가 부하 압력 진폭비 선도와 교차하는 교점을 구하는 단계

(4) 상기 교점의 주파수를 보정된 진폭비 대역폭 주파수로 정하는 단계

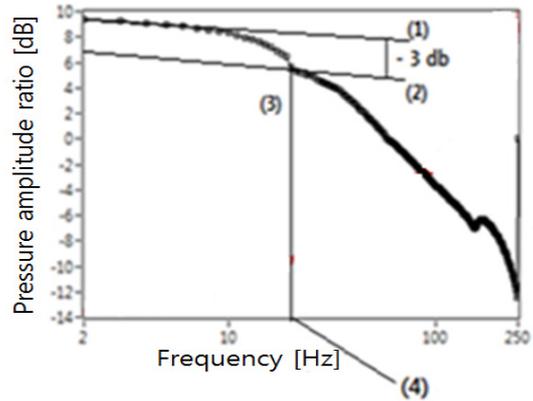


Fig. 3 Process to determine the dynamically compensated bandwidth frequency for the metering orifice pressure

## 4. 실험 장치 구성

Fig. 4에서 미터링 오리피스 시스템 실험장치의 핵심 하드웨어 부분의 모습을 보여준다. 미터링 오리피스는 열림량을 조절 가능하게 스톱 밸브(throttle valve)를 장착하여 다양한 실험 조건에서 열림량을 조절하여 실험이 가능하도록 하였다. 연구 대상으로 사용하는 방향제어밸브는 스폴변위 센서가 내장되어 있는 직동형 서보밸브가 적용되었다.

압력신호를 이용하여 측정된 방향제어밸브 대역폭 주파수의 신뢰성을 확인하기 위하여 기준이 되는 대역폭 주파수와 비교하는 작업이 필요한데, 스폴변위 신호를 기반으로 측정된 대역폭 주파수가 기준 데이터로 활용된다. 연구 대상으로 사용하는 방향제어밸브는 직동형 서보밸브(Direct Drive Servo Valve)이지만 연구 내용과 결과는 비례방향제어밸브 뿐만 아니라 일반적인 서보 밸브에 공통적으로 적용이 된다. 서보밸브 토출부 두 지점에 압력센서를 설치하였으며, 두 압력센서 측정 값의 차압을 부하압력으로 계산하였다. 식 (20)에서  $CI\omega^2$  항을 무시할 수 있도록 한 쪽 유압 배관의 길이  $L$ 을 0.4 m로 짧게 선정하였고, 양 쪽이 대칭이 되도록 하였다.

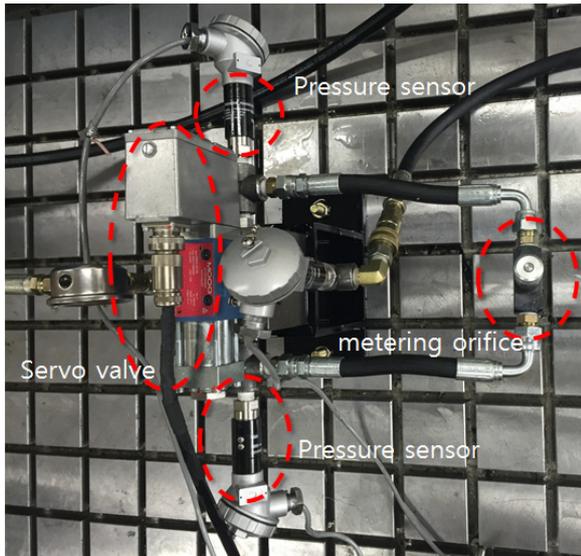


Fig. 4 Photographic view of the bandwidth frequency measuring device

실험 데이터의 계측은 컴퓨터와 데이터 수집 보드(Data Acquisition Board)를 이용하여 디지털 데이터로 측정되었다. 데이터 수집 보드의 아날로그 출력 채널을 통하여 서보밸브에 정현파 입력 신호(1~250Hz)를 인가하여 서보밸브를 구동시켰다. 측정된 데이터를 보정하고, 주파수 응답 선도인 보데선도(Bode Diagram)를 그리고, 대역폭 주파수를 산출하는 일련의 과정은 LabVIEW 그래픽 언어를 기반으로 작성된 프로그램으로 이루어졌다.

유압 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 MPa와 10 MPa의 두 종류에 대하여 실험되었다. 서보밸브의 정격 입력 전압은 10 V 인데, 1 V, 2.5 V, 5 V, 7.5 V, 9 V의 다섯 가지 입

Table 1 Specification of the metering orifice system

Instruments	Specification
Servo valves	10 LPM, 21 MPa
Power unit	10 LPM, 21 MPa
PC	2.0 GHz, 512 MB
DAQ board	16bit, A/D16, D/A 2
Pressure sensor	100 MPa
Metering orifice	30 LPM, 21 MPa
Accumulator	2L, 21 MPa
Water cooler	100 LTS
Filter	10[ $\mu$ ] 12.7 GPM
Measurement software language	LabVIEW 2012

력 진폭의 정현파 신호에 대하여 수행되었다. 입력 신호의 주파수는 1 Hz에서 250 Hz까지 1 Hz 단위로 변화시켜 가면서 스톱변위와 미터링 오리피스 부하압력을 측정하였다. 미터링 오리피스 시스템의 주요 파라미터 값들은 Table 1에 표기되었다.

## 5. 실험 결과 및 분석

### 5.1 동적 보정 필요성 확인

스톱 변위 신호에 대한 방향제어밸브 부하압력의 전달함수 식 (20)에서 보여준 바와 같이, 스톱 변위의 주파수 응답 특성과 방향제어밸브의 주파수 응답 특성은 서로 차이를 보인다. 예를 들어, Fig. 5~Fig. 7에서 부하압력과 스톱변위의 시간 영역 응답선도를 예시적으로 보여주고 있다. 짧은 시간 동안에 측정된 응답 선도를 확대한 Fig. 5에서는 두 가지 종류의 신호의 양상이 유사하다는 것 외에 별다른 정보의 파악이 어렵다. 반면에 전체 시험 시간 동안의 응답선도인 Fig. 6과 Fig. 7에서는 뚜렷한 차이를 확인할 수 있다. 스톱변위 실험 결과 그림인 Fig. 6의 초기 시간 영역에서 스톱변위 진폭이 거의 일정한 반면에 미터링 오리피스 부하압력 그림인 Fig. 7에서는 진폭이 감소하는 모습을 보인다.

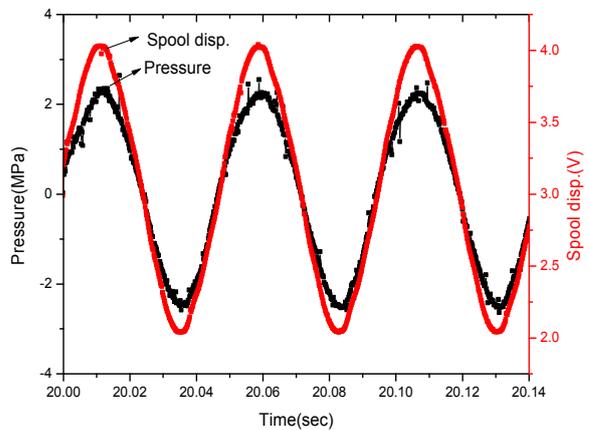


Fig. 5 Time domain response for the 3/8 in Line,  $P_S=7\text{MPa}$  and input signal 5V

이러한 경향은 진폭비 주파수 응답선도인 Fig. 8에서도 확인할 수 있는데, 스톱변위 진폭비가 일정한 초기 영역에서 부하압력 진폭비는 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 진폭비 동적 보정을 취할 필요가 있음을 확인하였다.

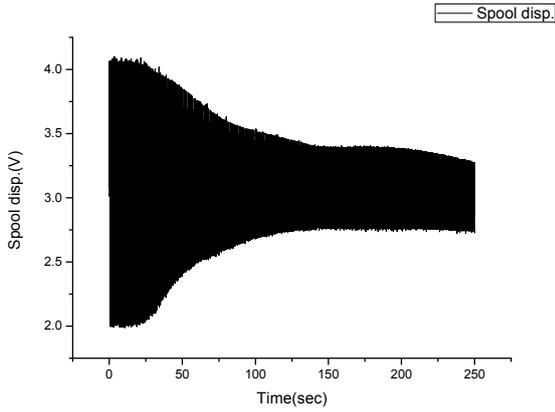


Fig. 6 Time domain response for spool displacement

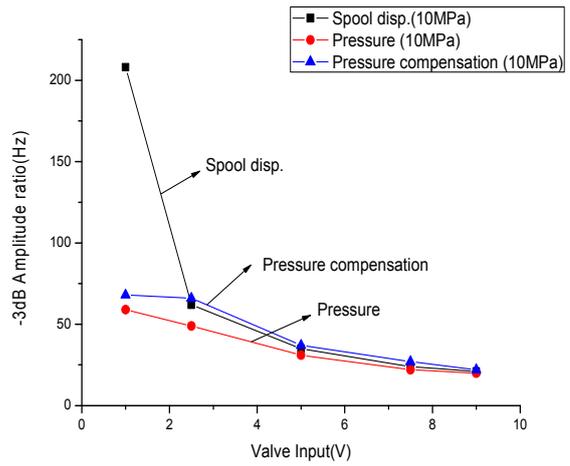


Fig. 9 -3 dB bandwidth frequencies for 1/4 in line and 10 MPa supply pressure

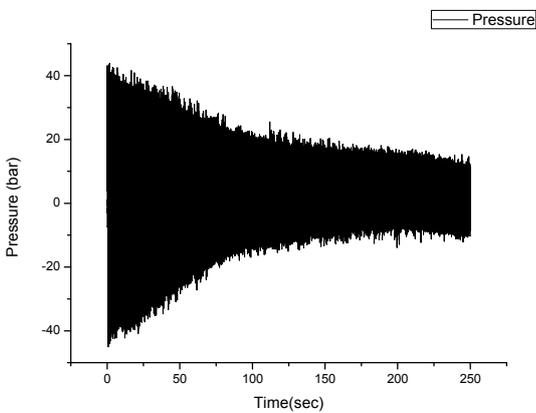


Fig. 7 Time domain response for load pressure

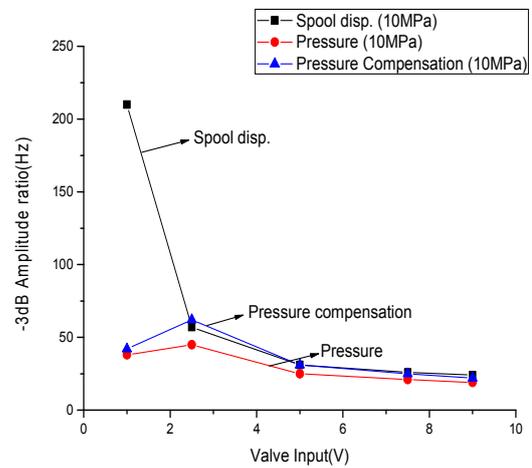


Fig. 10 -3dB bandwidth frequencies of spool displacement and load pressure on condition of 3/8 in line and 10 MPa supply pressure

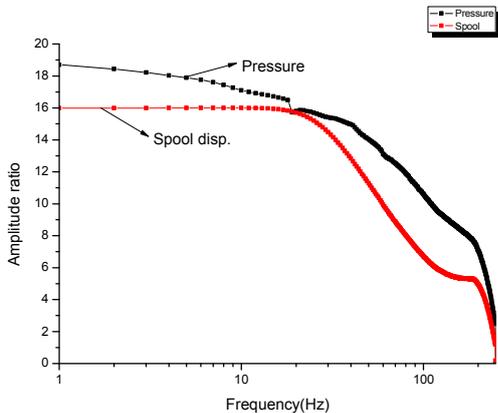


Fig. 8 Frequency domain response for the 3/8 in Line,  $P_s=7\text{MPa}$  and valve input signal 5V

### 5.2 압력 진폭비 대역폭 주파수

미터링 오리피스를 설치한 상태에서 방향제어밸브 부하압력을 측정하고, 앞에서 설명한 ‘-3 dB 비선형 정적 보정’과 ‘동적보정’을 적용하여 대역폭 주파수를 측정하는 실험을 수행하였으며, 스폴변위를 이용한 대역폭 주파수와 비교하였다.

Fig. 9에서는 1/4인치 배관에 대하여 10 MPa 공급 압력의 조건에서 측정한 진폭비 대역폭 주파수들을 보여 준다. 1 V 진폭 정현파 입력의 경우를 제외하고는 미터링 오리피스 부하압력에 기반하여 측정된 대역폭 주파수 값들과 매우 근접되어 있음을 알 수 있다. 또한 동적 보정을 적용하지 않은 압력 대역폭 주파수가 동적 보정을 미적용한 압력 대역폭 주파수 보다 스폴변위 대역폭 주파수에 더욱 더 근접되어 있음을 알 수 있다. 서보밸브의 1V 진폭 입력에서는 스폴변위 대역폭 주파수가 210 Hz 정도인 반면에 압력신호 대역폭 주파수는 70 Hz 정도이어서

큰 차이를 보인다. 현재 압력신호를 이용하는 대역폭 주파수를 측정하는 본 연구에서 구성한 장치로 측정할 수 있는 영역이 210 Hz에는 미치지 못하며, 70 Hz 정도가 한계인 것으로 판단된다. 측정 가능 영역을 높이는 연구는 추후에 별도로 이루어져야 할 내용으로 여겨진다. 또 1V 진폭 정현파 입력 신호에 대하여 스톱변위의 대역폭 주파수가 매우 높은 이유는 밸브에 내장된 증폭기의 출력 제한기(output limiter)의 간섭을 받지 않기 때문인 것으로 추정된다. Fig. 9에서 분석된 결과들은 배관 크기와 공급 압력을 달리한 조건에 대한 실험 그래프인 Fig. 10과 Fig. 11에서도 동일하다는 것을 확인할 수 있다.

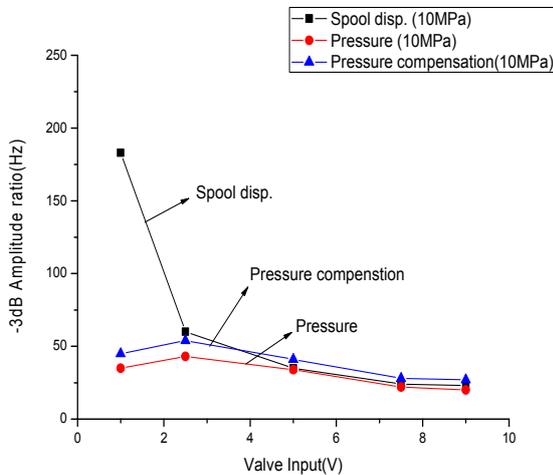


Fig. 11 -3dB bandwidth frequencies of spool displacement and load pressure on condition of 1/2 in line and 10 MPa supply pressure

## 5. 결 론

본 연구에서는 방향제어밸브의 대역폭 주파수를 측정하는 새로운 방법으로서 미터링 오리피스를 이용하는 방법을 제시하고, 미터링 오리피스 부하압력 신호를 보정하는 방법과 측정하는 방법을 이론적으로 확립하였다. 실험을 통하여 미터링 오리피스를 설치하고, 비선형 정적 보정과 동적 보정을 실시한 상태에서 부하압력을 이용하여 측정한 대역폭 주파수가 수십 Hz 영역에서는 효율적임을 실험적으로 확인하였다.

본 연구에서는 방향제어밸브의 진폭비 대역폭 주파수를 측정하는 방법에 대해서만 조사되었다. 향후에 미터링 오리피스 부하압력신호를 이용하여 -90도 위상각 대역폭 주파수를 구하는 방법에 대해서도 연구를 수행할 예정이다. 부하압력이 대역폭주파수에 미치는 영향에 관한 조사도 추후의 연구로 미루기로 한다.

## 후 기

이 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 지원에 의하여 수행되었습니다.

## 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) 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, Wen-Long An and Sehyeong Jeon, "Study on Bandwidth Frequency of Servovalve based on Metering Cylinder", *Journal of Drive and Control*, Vol.12 No.3 pp.44~51 Sep. 2015.
- 6) Herbert E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, Inc. (New York USA), ISBN 0 471 59617 5, pp289~290, 1967.
- 7) M. Rabie, "Fluid Power Engineering, McGraw-Hill Professional", 2009.
- 8) K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1970.