유공압시스템학회지 제6권 제3호 pp. 10~17 2009년 9월

비례제어밸브의 모델링 및 동정
Modeling and Identification of Proportional Control Valves

이일영 · 손제목 · 신행봉 · 손정훈
I. Y. Lee, J. M. Son, H. B. Shin and J. H. Son

1. 서 언

이 해설에서는 비례방향제어밸브의 상세한 특성을 반영한 밸브의 모델링 기법을 소개하고, 비례제어밸브의 물리 파라미터들의 동정(identification)기법을 소개한다. 밸브의 모델링·해석을 위하여 상용 소프트웨어인 AMESim을 사용하며[1], 스풀～슬리브 개구부 면적의 비선형성, 스풀에 작용하는 유체의 유동력 그리고 스풀 변위 피드백 제어의 효과를 밸브의 모델링에 효과적으로 반영하는 문제를 중점적으로 다룬다. 대상 비례 전자 밸브의 정특성 시뮬레이션 결과로는 무부하 유량 특성, 누설 유량 특성, 부하 유량 특성, 압력 게인의 시뮬레이션 결과를 예시한다. 아울러, 과도 응답, 주파수 응답으로 표시된 동특성 시뮬레이션 결과도 제시한다.

시스템 동정 기법의 하나인 신호압축법[2~4]을 사용한 비례제어밸브 파라미터 동정법을 제 3장에서 설명한다. 신호압축법을 적용하는 대상 밸브로는 직동형 비례전자압력제어밸브를 사용하며, 신호압축법에 포함된 주요 정수치들이 동정의 결과에 미치는 영향에 대하여 상세히 검토한다.

2. 비례방향제어밸브의 모델링 및 시뮬레이션

2.1 대상 밸브의 개요

이 해설에서 모델링 대상으로 하는 비례방향제어밸브는 입력 전류의 크기에 비례한 유량 제어와 방향 제어를 비교적 고속, 고정밀도로 수행할 수 있는 유압제어밸브이다. 그림 1에 대상 비례방향제어밸브의 개략적 구조를 나타내었다.

비례방향제어밸브는 밸브 몸체, 비례 솔레노이드, 변위센서 및 전기 구동장치로 구성된다. 기준신호가 전기 구동장치로 입력되면 전기 구동장치는 연산과 증폭 등과 같은 일련의 과정을 거쳐 제어신호를 출력한다. 이 출력 신호가 비례 솔레노이드를 구동하고, 비례 솔레노이드에 의해 스풀이 동작하여 유압유의 유동 방향과 유량을 제어하게

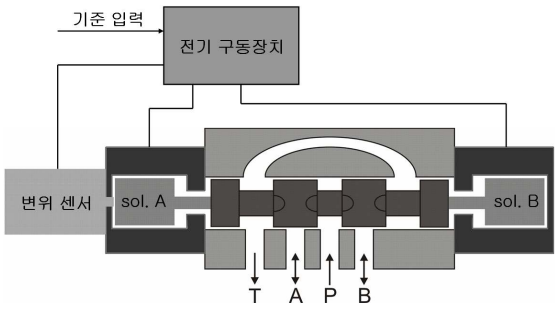


그림 1 대상 비례방향제어밸브의 구조

된다. 이 때, 위치센서가 스풀의 변위를 검출하여 제어기로 피드백함으로써 밸브의 정특성 및 동특성을 개선할 수 있다.

2.2 AMESim을 사용한 시뮬레이션 모델

2.2.1 밸브 모델링

AMESim의 유압 부품 설계(Hydraulic Component Design, H.C.D.) 라이브러리를 이용하면 비례방향제어밸브 몸체의 형상과 치수에 따른 영향을 비교적 정확하게 고려하여 밸브 모델링과 시뮬레이션할 수 있다.

그림 2에서 비례방향제어밸브의 완성된 모델을 나타내었다. 밸브 몸체는 AMESim H.C.D. 라이브러리의 스풀 컴포넌트, 누설유량 및 점성마찰 컴포넌트, 스풀 질량 컴포넌트와 스프링으로 구성하였다. 또, 이 모델에는 비례 솔레노이드, 전기 구동부와 스풀 변위 피드백 루프가 포함되어 있다. 특성 해석에 있어서 부하를 생성하는 방법으로, 정특성 시뮬레이션에서는 교축밸브를 사용하고, 동특성 시뮬레이션에서는 실린더(피스톤의 질량은 미소함)를 사용한다.

2.2.2 스풀 개구부 면적의 비선형성 고려

대상 비례방향제어밸브는 원형의 개구부를 가진 스풀로 구성되어 있다. 그림 3에서 대상 밸브의 원형 개구부를 나타내었다. 오버랩 영역을 벗어났을 때, 스풀 변위 x_v에 따른 개구면적 A는 식 (1)로 표시할 수 있다.

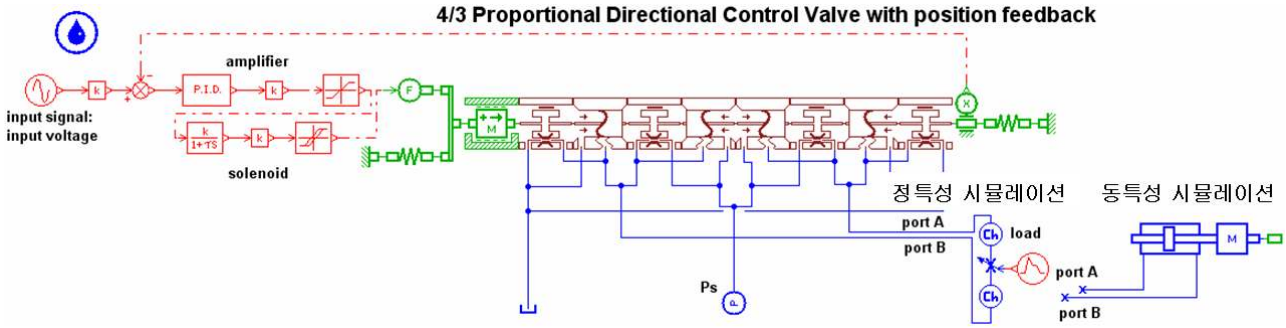


그림 2 AMESim으로 구성한 밸브 특성 시뮬레이션 모델

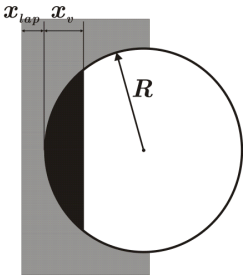


그림 3 원형 개구부

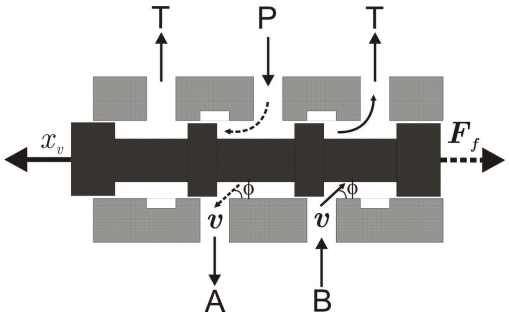


그림 4 밸브 스풀에 작용하는 유동력

$$A = R^2\cos^{-1}(1-\frac{x_v}{R}) - (R-x_v)\sqrt{2Rx_v - x_v^2} \quad (1)$$

식 (1)의 $x_v \sim A$의 함수를 AMESim H.C.D. 라이브러리의 'spool with specific orifice'의 A'=f(x)' 파라미터에 입력하여 원형의 개구부를 시뮬레이션 모델에 반영하는 것이 가능하다.[1] 2.3 절 정특성 시뮬레이션의 무부하 유량 시뮬레이션 결과에서 원형의 개구부가 반영되어 나타나는 유량특성을 확인할 수 있다.

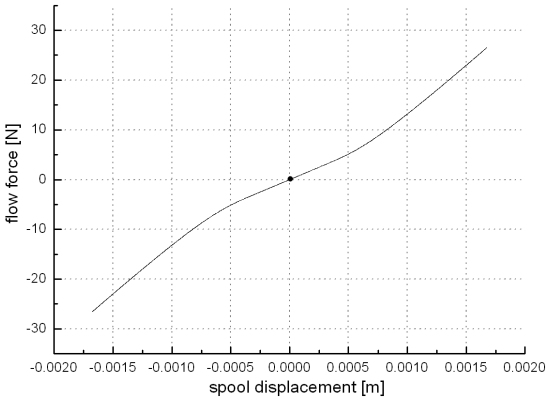
2.2.3 스풀에 작용하는 정상 유동력의 고려

밸브 실 내에서 스풀에 작용하는 유체의 유동력은 밸브 스풀과 슬리브의 개구부를 닫는 방향으로 작용한다.[4] 그림 4에 유체의 흐름과 이 때 스풀에 작용하는 유체의 유동력을 도식적으로 나타내었다. 유체의 유동력은 정상 유동력과 비정상 유동력으로 구분되지만, 여기서는 정상 유동력만을 고려하였다.

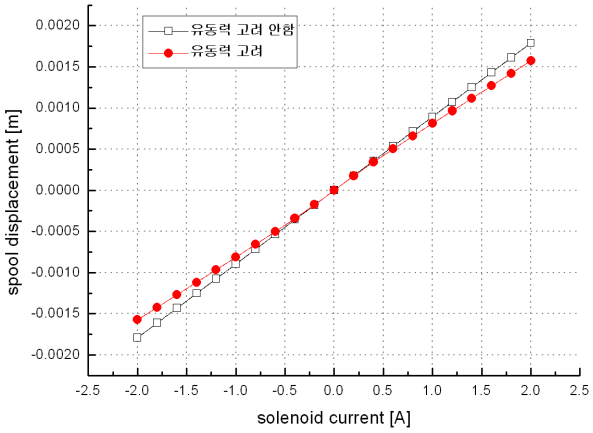
비례방향제어밸브에서 스풀에 작용하는 전체 유동력은 아래 식 (2)와 같다.[5]

$$F_f = 4\,C_d\,w\,x_v\,\Delta p\cos\phi \quad (2)$$

식 (2)에서 C_d는 유량계수, w는 스풀의 면적 구배, x_v는 스풀 변위, Δp는 밸브 개구부의 차압, 그리고 ϕ는 유체의 유입각도를 나타낸다.



(a) 스풀 변위 ~ 정상 유동력



(b) 전류 ~ 스풀 변위 (스풀 변위 피드백이 없음)

그림 5 유동력이 스풀 변위에 미치는 영향

AMESim H.C.D. 라이브러리의 스풀 모델에서 'zet force coefficient' 파라미터 값을 설정함으로써 식 (2)의 유동력을 밸브 모델에 고려해줄 수 있다[1]. 그림 5에는 유동력이 스풀 변위에 미치는 영향에 관한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 공급압력이 10 bar, 무부하 상태일 때에, 스풀의 변위에 따라서 스풀에 작용하는 유동력을 표시한 것이 그림 5(a)이며, 스풀에 작용하는 유동력이 솔레노이드 전류~스풀 변위 특성에 미치는 영향을 나타낸 것이 그림 5(b)이다. 그림 5(b)의 결과(유동력 고려 유무에 따른 스풀 변위의 편차)는 솔레노이드의 힘과 스프링력의 설정치에 따라서 달라질 수 있다.

2.2.4 스풀 변위 피드백 루프의 고려

그림 6에 스풀 변위 피드백 루프의 블록선도를 나타내었다. 비례 솔레노이드는 히스테리시스와 응답지연의 특성을 가진다. 스풀~슬리브의 고체마찰은 스레쉬홀드 효과를 유발한다. 스풀 변위 센서(예: LVDT)를 사용하여 스풀 변위를 피드백 제어함으로써 스풀 변위의 응답지연, 히스테리시스와 스레쉬홀드를 줄일 수 있다. 그림 2의 모델에는 스풀 변위 피드백 루프가 포함되어 있다.

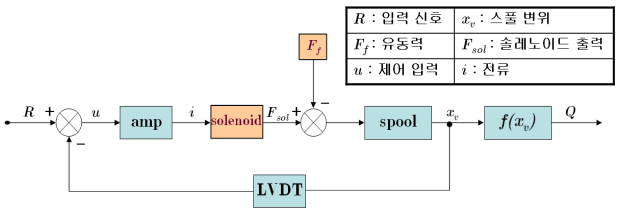
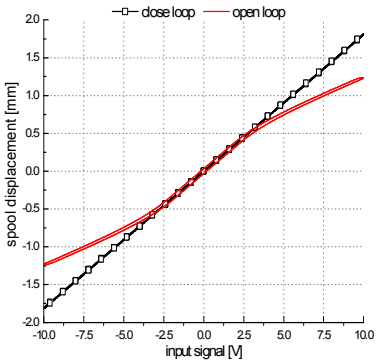


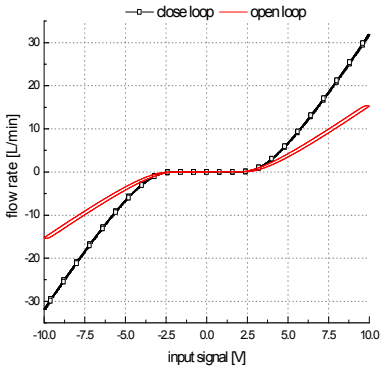
그림 6 스풀 변위 피드백 루프

2.3 정특성 시뮬레이션[6]

그림 7은 밸브의 무부하 유량 특성 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션에서 밸브 압력차 Δp ($\Delta p = p_s - p_L - p_r$)가 10 bar가 되도록 공급압력 p_s를 설정한다. 그림 7의 (a)에서 스풀 변위 피드백이 없을 때(open loop로 표시)에 스풀 변위가 비선형적으로 나타난 것은 정상 유동력의 영향이며, 스풀 변위 피드백 루프의 사용으로 선형성이 회복됨을 보였다. 그림 5의 (b)를 보면 스풀 변위 피드백 루프의 유무에 무관하게 전류~유량 특성이 비선형적으로 나타났다. 이러한 결과는 대상 밸브에 불감대가 있고, 밸브 개구부가 비선형성(그림 3 참조)을 가지기 때문이다. 이 경우에도 스풀 변위 피드백 루프를 사용함에 따라서 히스테리시스와 유동력의 영향을 대폭 줄일 수 있음을 알 수 있다.



(a) 스풀의 변위



(b) 유량

그림 7 무부하 상태에서 전류 변화에 따른 스풀 변위와 유량

그림 8은 누설 유량 특성을 시뮬레이션한 결과이다. 여기서 공급 압력은 315 bar로 하고 부하로흐르는 유로를 차단한 상태에서 복귀 포트로 흐르는 누설 유량에 대하여 검토한다. 오버랩 영역에서누설 유량은 일정하게 나타나며 오버랩을 벗어난 영역에서 누설 유량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또 누설 유량은 이론적으로 스풀~슬리브사이의 반경 방향 틈새(radial clearance) c의 세제곱에 비례하여 나타나는데[5] 그림 8에서 이러한 결과를 확인할 수 있다.

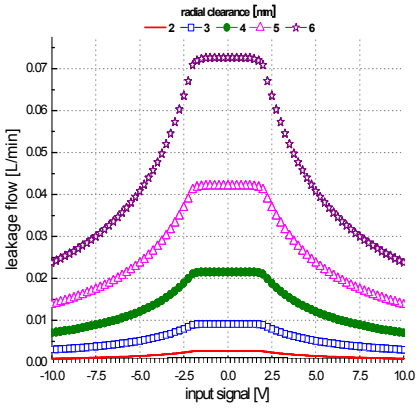


그림 8 누설 유량

그림 9는 부하 유량 특성을 시뮬레이션한 결과이다. 공급 압력은 315 bar로 하고 부하 압력을 0 bar에서 315 bar까지 상승하였을 때 밸브 압력차Δp와 부하로 흐르는 유량과의 관계를 그래프로 나타내었다.

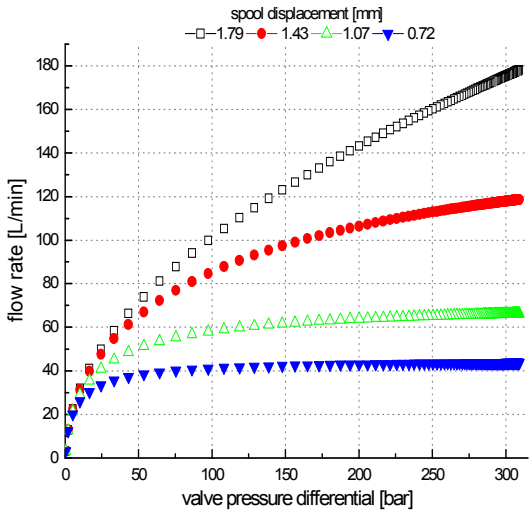


그림 9 밸브 압력 강하~부하 유량

그림 10은 압력 게인 특성을 시뮬레이션한 결과이다. 공급 압력은 315 bar로 하고 부하로 흐르는 유로를 차단한 상태에서 밸브 기준 입력에 따른 막힌 포트 A와 포트 B의 압력을 나타내었다.

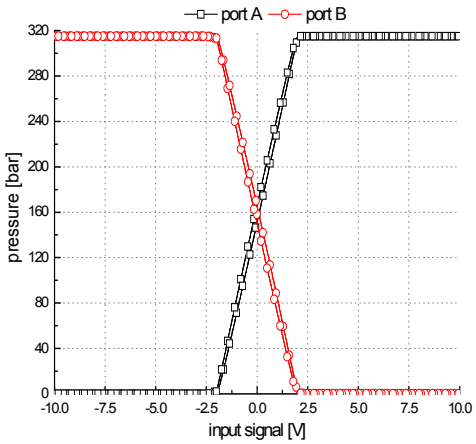
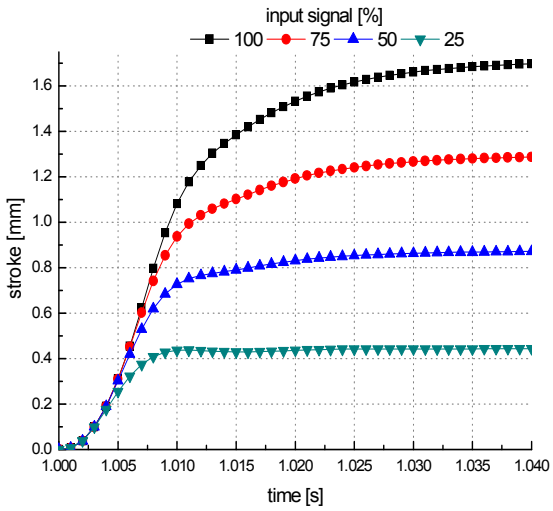


그림 10 압력 게인

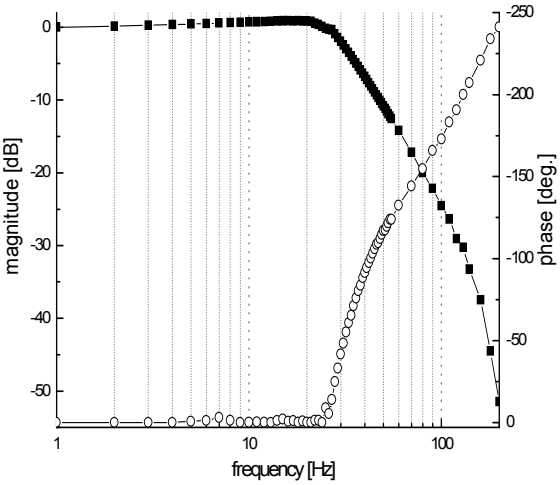
2.4 동특성 시뮬레이션[6)]

동특성 시뮬레이션은 그림 2의 밸브 모델에서 실린더를 구동하는 유압계를 대상으로 하였다. 실린더 로드 및 헤드의 총 질량은 매우 미소한 양(50 g)으로, 점성 마찰 계수는 0(무마찰)으로 설정하였다.

그림 11에 동특성 시뮬레이션의 결과를 나타내었으며, -90° 위상에서 약 30 Hz의 특성을 보였다.



(a) 스텝 응답



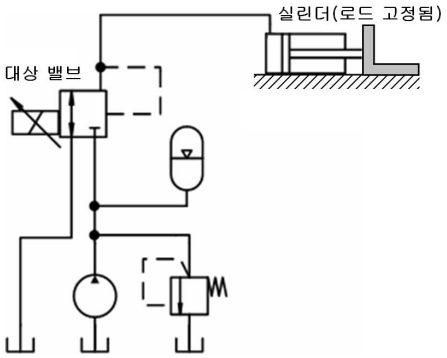
(b) 주파수 응답

그림 11 동특성 시뮬레이션 결과

3. 신호압축법을 이용한 비례압력제어밸브의 동정[2~4)]

3.1 대상 비례압력제어밸브의 개요

그림 12에 비례압력제어밸브 시험용 유압 회로도와 시험 장치의 사진을 나타내었다. 여기서 사용되는 비례압력제어밸브는 그 내부에 순 유압식 압력 피드백 기구를 내장한 비교적 복잡한 구조의 밸브이므로 밸브계의 미분 방정식을 직접 세워서 수학 모델을 구하기가 쉽지 않으며, 고주파수 영역에서 강한 비선형 특성을 가지는 시스템으로 알려져 있다. 이러한 밸브의 수학 모델을 얻는 방법으로는 실험적인 동정법을 적용하는 것이 손쉬운 방법일 것이다.



(a) 시험 장치 회로도

(b) 시험 장치

그림 12 비례압력제어밸브 시험 장치

3.2 비례압력제어밸브의 동정

그림 13에 신호압축법을 이용한 시스템의 동정 절차를 나타내었다. 우선, 시험에 사용될 입력신호를 얻기 위하여 시험에 필요한 주파수 영역까지 임펄스 특성을 가진 신호를 FFT(Fast Fourier Transform, 고속 푸리에 변환)한 후에 주파수 영역에서 위상 지연 특성을 가지는 수학적인 신장 필터를 통과시키면, 일정한 파워를 가지면서 위상 지연을 가진 신호를 얻게 된다. 이 신호를 역 FFT하여 시간영역 신호로 바꾸면 그림 14와 같은 시험 신호가 구해진다.

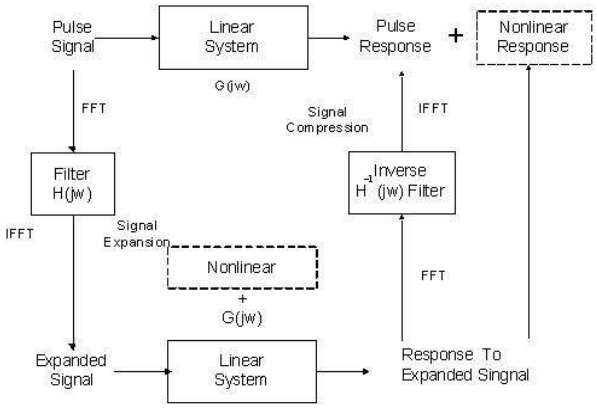


그림 13 신호압축법의 체계

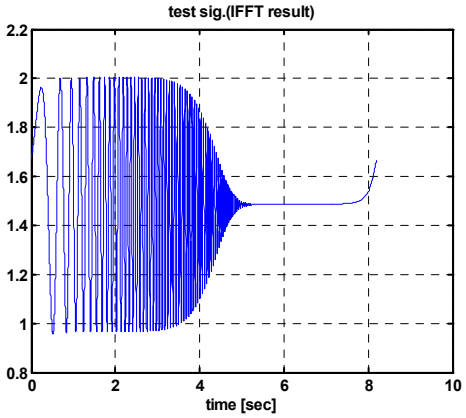


그림 14 시험 신호

그림 15에 시험 결과 얻어진 밸브의 부하 포트 압력(출력 신호)을 나타내었다. 이 출력 신호를 FFT하고, 위상 전진 특성을 가지는 필터를 통과시킨 후 역 FFT하면 그림 16과 같은 응답을 얻게 된다.

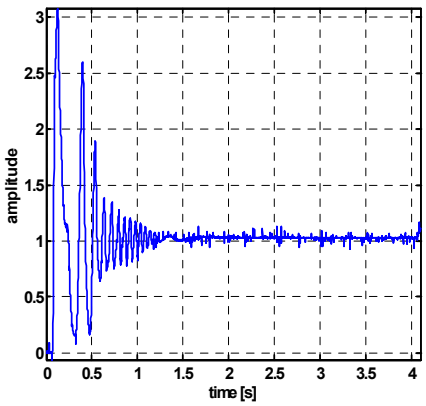


그림 15 시험에서 얻어진 출력 신호

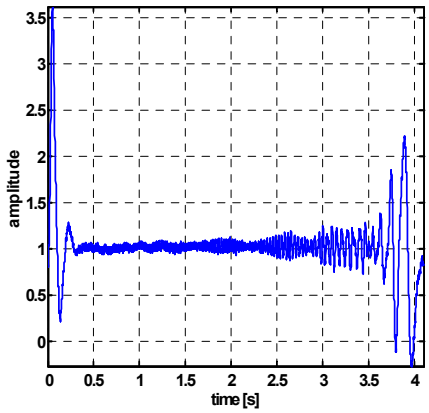


그림 16 압축 후의 신호

그림 17과 같이 비선형요소를 제거하고 얻어진 신호를 다시 FFT한 결과를 Bode선도로 나타내면 그림 18의 원형 표시로 된다. 이 결과와 비교적 잘 맞는 2차계 전달함수의 감쇠계수 ζ와 고유진동수 ω_n을 선

정하면 비례압력제어밸브의 2차계 모델이 구해진다. 그림 18의 실선이 동정된 2차계 전달함수의 Bode선도이다. 여기서 구해진 2차계 전달함수의 감쇠비 ζ는 0.25, 고유진동수 ω_n은 5.5 Hz이다.

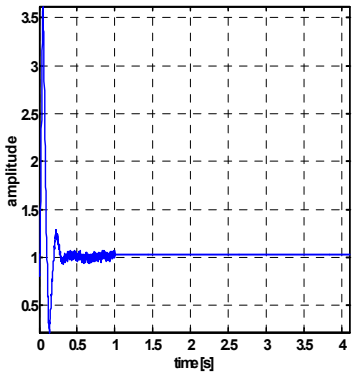


그림 17 비선형요소의 제거

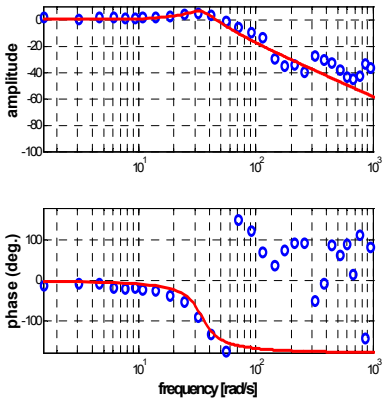


그림 18 그림 17을 FFT하여 얻은 Bode 선도(직선은 시뮬레이션 모델, $\zeta = 0.25$, $\omega_n = 5.5$)

그림 19에 위의 과정을 거쳐서 구한 2차계 전달함수의 스텝응답 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 나타내었다. 이 결과로부터, 얻어진 모델이 실제 시스템을 비교적 잘 모의하고 있음을 확인할 수 있다.

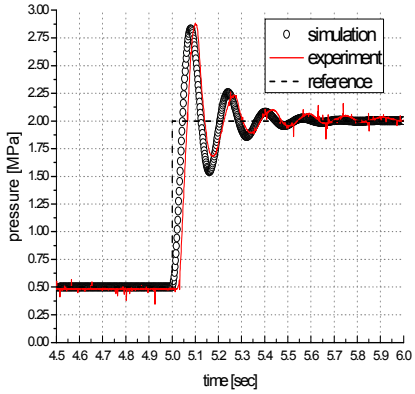


그림 19 스텝 응답(원형 표시는 시뮬레이션 결과, $\zeta = 0.25$, $\omega_n = 5.5$)

3.3 신호압축법의 관련 파라미터 고찰

신호압축법으로 하나의 시스템을 동정할 때 표 1과 같은 파라미터 값의 지정이 필요하다. 여기서 파라미터 a는 시험 신호의 주파수 대역폭과 관련되며, 시험 대상 시스템의 고유 주파수와 관계가 있다. 파라미터 b는 시험 신호의 위상 지연과 관련된다.

표 1 신호압축법 과정에서 사용되는 파라미터

파라미터	설명
a	입력 신호의 주파수 대역폭 관련 인자
b	위상 지연 필터의 파라미터

이 두 가지 파라미터는 동정하고자 하는 시스템의 고유진동수를 고려하여 결정해주어야 한다. 일반적으로 고유진동수가 비교적 느린 기계시스템을 동정할 때는 입력 신호의 주파수 대역폭 a와 위상 지연 필터의 파라미터 b값을 낮게 지정하고, 비교적 고유진동수가 빠른 전기시스템을 동정할 때는 a와 b값을 높게 지정해주어야 한다.

본 장에서 다루는 비례압력제어밸브의 고유진동수는 약 2 Hz이다. 그리고 앞서 3.2절 대상 비례압력제어밸브의 동정에서 사용한 시험 신호의 파라미터 a는 170, 파라미터 b는 1000으로 지정하였다. 아래에서는 이 두 가지 파라미터 값을 앞서 시험한 것보다 작거나 크게 지정하여 시험을 하면 비례압력제어밸브의 동정 결과에 어떤 영향을 미치는가 분석하기로 한다.

그림 20은 파라미터 a는 80, 파라미터 b를 400으로 지정하여 만들어진 시험 신호이다.

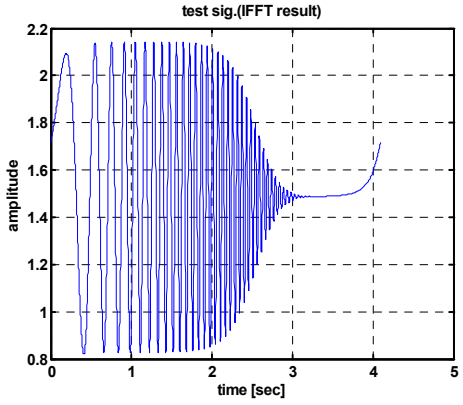


그림 20 시험 신호($a = 80$, $b = 400$)

그림 20의 시험 신호를 사용하여 얻은 동정 결과를 그림 21에 나타내었다.

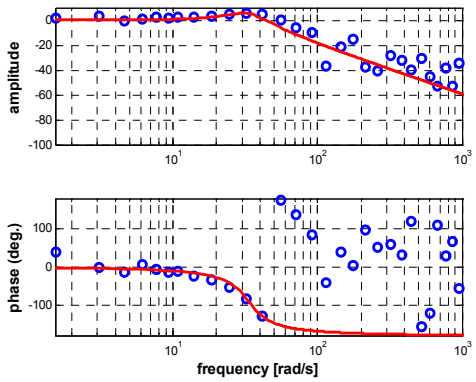


그림 21 그림 20을 입력 신호로 사용하여 얻은 동정 결과 Bode 선도(직선은 시뮬레이션 모델, $\zeta = 0.27$, $\omega_n = 5.3$)

그림 22에 실제 시스템과 동정된 2차계 전달함수 모델의 스텝응답을 비교하여 나타내었다. 3.2절에서 동정한 2차계 모델과 비교할 때, 감쇠계수 ζ가 커서 실제 시스템보다 진동의 진폭이 감소하고, 정상상태로 보다 빠르게 수렴함을 알 수 있다.

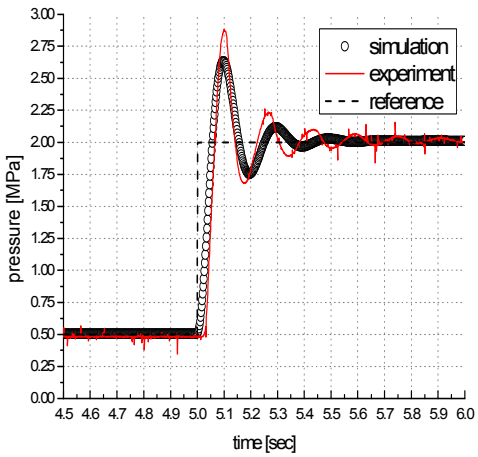


그림 22 스텝 응답(시뮬레이션 모델 $\zeta = 0.27$, $\omega_n = 5.3$)

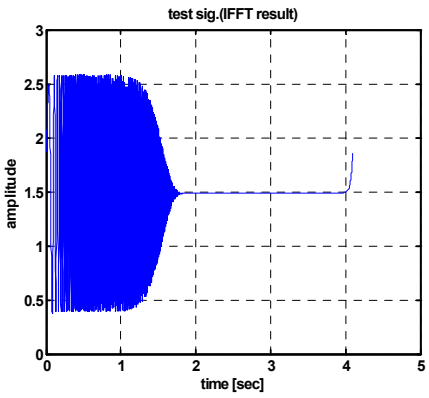


그림 23 시험 신호($a = 1200$, $b = 10000$)

그림 23은 파라미터 a를 1200, 파라미터 b를 10000으로 결정했을 때의 시험 신호이다. 이 시험 신호를 사용하여 얻은 동정 결과를 그림 24에 나타내었다. 이 결과는 대상 밸브의 특성과는 매우 다른 결과임을 알 수 있으며, 적정 범위를 벗어난 파라미터 a, b값의 결정은 동정 결과에 큰 오류를 유발함을 알 수 있었다.

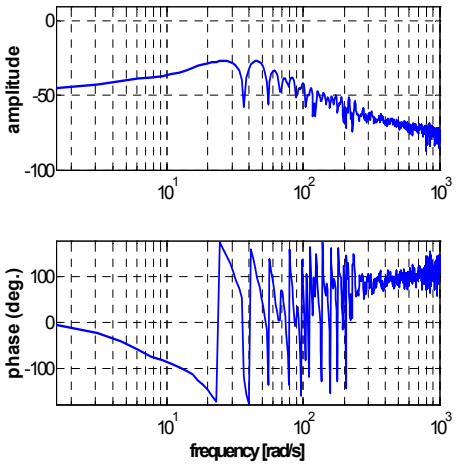


그림 24 Bode 선도($a = 1200$, $b = 10000$)

4. 결 언

이 해설에서는 상용 소프트웨어인 AMESim을 사용하여 비례방향제어밸브의 물리 파라미터가 상세히 반영된 모델링 기법을 소개하였고, 비례제어밸브의 물리 파라미터들의 동정(identification)기법을 소개하였다.

비례방향제어밸브의 모델링에 관한 내용에서는 밸브 스풀 개구부 면적의 비선형성, 밸브 실 내에서 스풀에 작용하는 유체의 유동력, 그리고 스풀 변위 피드백 효과를 반영하는 문제를 중점적으로 다루었다. 시뮬레이션 결과의 고찰 과정을 통하여 밸브의 특성에 미치는 주요 설계 인자의 영향에 대하여 상세하게 검토하였다.

이와 더불어, 시스템 동정 기법의 하나인 신호압축법을 비례제어밸브의 물리 파라미터 동정에 적용하는 기법을 소개하였다. 실험 결과의 검토 과정을 통하여, 신호압축법이 비례제어밸브의 동정에 효과적으로 적용될 수 있음을 보였다.

이 해설에서 소개한 비례제어밸브의 모델링 기법 및 동정 기법은 각종 비례제어밸브의 연구·개발 및 성능 시험 과정에서 유용한 참고 자료가 될 것으로 기대한다.

참고 문헌

1) LMS IMAGINE S. A., "AMESim Library Manual", 2008.
2) N. Aoshima, "Measurement of Nonlinear Vibration by Signal Compression Method", 1984.
3) N. Aoshima, "Computer-generated Pulse Signal Applied for Sound Measurement", 1981.
4) 박두환, 송정민, 박홍신, 박성환, "PBW 액추에이터의 제어기 개발", 유공압시스템학회지, 제 6권, 제 1호, 2009.
5) H. E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, Inc., 1967.
6) ISO 10770-1: Hydraulic Fluid Power- Electrically Modulated Hydraulic Control Valves -Part 1 : Test Methods for Four-way Directional Flow Control Valves.

[저자 소개]

이일영(책임저자)

E-mail : iylee@pknu.ac.kr
Tel : 051-629-6153
1954년 8월 4일생
1978년 부경대학교 기관공학과 졸업, 1986년 Tokyo Institute of Technology 제어공학과 박사 과정 졸업, 1986～현재 부경대학교 교수, 유압 시스템 맥동 해석, 유압 시스템 제어에 관한 교육 및 연구에 종사, 유공압시스템학회, 대한기계학회 등의 회원

[저자 소개]

손제목

E-mail : junsu807@naver.com
Tel : 051-629-6153
1981년 11월 18일생
2008년 동명대학교 메카트로닉스공학과 졸업, 2009～현재 부경대학교 대학원 지능기계공학과 재학 중

[저자 소개]

신행봉

E-mail : tig74@hanmail.net
Tel : 055-296-1873
1974년 4월 21일생
1997년 경남대학교 기계설계학과 졸업, 2000년 경남대학교 기계설계학과 석사과정 졸업, 2004년～현재 SG Servo㈜ 기술연구소 선임연구원

[저자 소개]

손정훈

E-mail : rcneek@gmail.com
Tel : 055-296-1873
1979년 12월 24일생
2005년 부경대학교 기계공학부 졸업, 2007년 부산대학교 공학대학원 메카트로닉스 협동과정 석사과정 졸업, 2007년～현재 SG Servo㈜ 기술연구소 주임연구원