

정유압구동기(EHA)의 모델링과 제어기 설계

Modeling and Controller Design of an Electro-Hydrostatic Actuator

허준영^{1*} · 김현호² · 이일영³

J. Y. Huh, H. H. Kim and I. Y. Lee

Received: 28 Jan. 2015, Revised: 27 Mar. 2015, Accepted: 20 Apr. 2015

Key Words : Electro-Hydrostatic Actuator(정유압구동기), Modeling(모델링), Controller Design(제어기 설계), PI controller(PI 제어기)

Abstract: Recently, the Electro-Hydrostatic Actuator(EHA) has been developed as a result of research on energy saving. EHA is usually composed of a direct driven pump from an electric motor and is available to control cylinder displacement or velocity with high efficiency. In addition, it has the advantage of compactness, minimum leakage and availability of decentralized control. In this study, an EHA system was designed to decrease the path tracking error and manufactured for test. The linearization method provided in AMESim software was used to derive the model of EHA system. The derived model was applied to design the PI-D controller to effectively overcome the disturbance. The effectiveness of this controller was verified by further testing.

1. 서 론

최근 산업계에서 에너지 효율을 개선하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이와 같은 기술개발 동향의 한 흐름으로 유압시스템에서는 전동기 일체형 액추에이터(EHA, Electro Hydrostatic Actuator)의 개발이 추진되고 있다. EHA는 전기모터와 양방향 유압펌프, 실린더, 배관이 하나의 모듈로 구성되어 전기모터와 직결되어 구동하는 유압펌프를 이용하여 유압 피스톤의 변위나 속도를 제어할 수 있도록 모듈화된 유압기기로서 소형화와 누유의 최소화, 에너지 전달 효율 개선, 동력의 분산제어 가능 등의 장점이 있다¹⁾.

이로 인해 가격보다는 성능 위주의 개발이 추진되는 군수산업에서부터 적용이 시작되어 최근에는 일반 산업현장의 프레스와 사출성형기 등 제조기기까지 산업분야 전반으로 응용이 확대되고 있다. 이러한 EHA 시스템은 세계 여러 대학이나 연구 단체들, 기업 연구소에서 연구 및 개발되어 왔다²⁻⁵⁾. 그 중에서도 Habibi 등의 연구⁵⁾는 0.005mm의 위치제어 오차로 실린더를 제어하는 것을 보이고 있다. 국내의 연구로 EHA시스템을 구성하고 그 성능을 결정짓는 요인을 정의하고 각각의 요인들이 제어성능에 미치는 영향을 실험 및 시뮬레이션을 통하여 조사한 연구⁶⁾와 EHA 편로드 유압액추에이터의 기동 및 정지특성에 관한 연구⁷⁾, 일반 산업용 EHA 개발에 관한 연구⁸⁾, EHA를 사용한 사출성형 실린더 제어에 관한 연구⁹⁾ 등이 있으나 실험에서는 실린더의 정지 마찰력과 펌프와 모터에서 토크의 포화 등으로 인하여 실린더의 위치추종 오차는 5~10mm까지 발생하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 비교적 추종오차를 줄일 수 있도록 EHA 시스템을 설계하여 제작 시험하였다. EHA 시스템을 모델링하기 위하여 AMESim 소프트웨어에서 제공되고 있는 선형화 기법을 사용하였고, 이를 통해 얻어진 시스템의 전달함수를 사용하여 EHA에 작용

* Corresponding author: huh@koreatech.ac.kr

1 School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education, Chonan 330-708, Korea

2 Department of Mechatronics Engineering, Graduate School, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

3 Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

Copyright © 2015, 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.

하는 외란을 효과적으로 극복할 수 있도록 PI-D 제어기를 설계하여 적용하였으며, 제어기 설계의 효용성을 실험을 통하여 검증하였다.

2. EHA 시스템

본 연구에서 사용된 EHA 시스템은 스노우보딩 시뮬레이터에 사용하기 위한 것으로 스노우보드 위에서 있는 사람이 부하로 작용한다. 스노우보드를 설치한 기저판의 한쪽 끝은 힌지되어 있고 다른 한쪽이 EHA 실린더에 연결되어 45kg의 하중이 수직으로 EHA 실린더에 작용하고 있다. EHA는 입력신호에 따라 부하를 수직 상하방향으로 제어한다. 이 때 스노우보드 좌우방향은 별도의 서보모터와 볼스크류를 사용하여 제어한다. 최대부하 3000N을 최대속도 60mm/s로 동작시키는 것을 목표사양으로 하였고, 이를 위해 전기적으로 구동되는 서보 드라이버와 모터는 Higen사의 FDA 7000과 FMA CN08-A를 사용하였고, 유압펌프로는 정역회전 양방향으로 토출이 가능해야 하므로 Casappa사의 PL20-4를 사용하였다. 실린더는 복동 양로드 실린더로 SMC사의 CA2W40을 사용하였다. 고압용 실린더는 립형(lip type)을 사용하나 본 연구에 사용된 실린더는 저압용으로 NBR 고무의 O링실을 사용하여 정지마찰력은 0.5bar 이하이고, 보증 내압력은 15bar이다. 실린더 변위를 측정하기 위하여 Trans-Tek사의 LVDT를 사용하였고, 압력변환기로는 Valcom사의 VPRQ-5MPa를 사용하였다. 그 외에 체크밸브와 축압기를 사용한 보충회로로 구성되어 있다. 이런 형태의 EHA 시스템은 액추에이터에서의 마찰에 따라 발생하는 불감대의 영향을

받기 쉽다. 본 연구에서 제작한 시제품에서는 특별히 정지마찰력이 작은 실린더를 사용함으로써 불감대가 경감되도록 하였다. Table 1에 제작사양을 나타내었다.

Table 1 Major specification of the EHA

Item	Specification	
Servo Motor & Driver	Output(rated)	800 W
	Current(rated)	4.65 A
	Torque(rated)	2.54 Nm
	Max. Instant. Torq.	6.85 Nm
	Speed of Rev.	3000 rpm
Hydraulic Pump	Displacement	4.95 cm ³ /rev
	Max. Speed	4000 rpm
	Max. Pressure	250 bar
Cylinder	Tube inner Dia.	40 mm
	Piston Rod Dia.	16 mm
	Stroke	100 mm
	Max. Pressure	10 bar

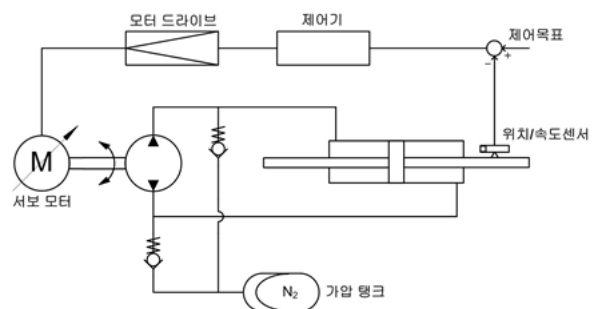


Fig. 2 Hydraulic circuit of the EHA

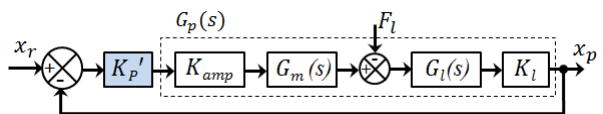


Fig. 3 A system for identifying the EHA

3. EHA의 모델링

EHA 시스템을 비례제어기를 갖는 피드백 제어기로 구성하고 블록선도로 나타내면 Fig. 3과 같다. K_p' 는 비례게인으로 20으로 하였다. K_{amp} 과 $G_m(s)$ 은 각각 서보 드라이버와 서보모터의 게인과 전달함수이다. G_l 과 K_l 은 각각 실린더 전달함수와 변위변환계인이다. Fig. 3에서 $G_p(s)$ 는 개루프 전달

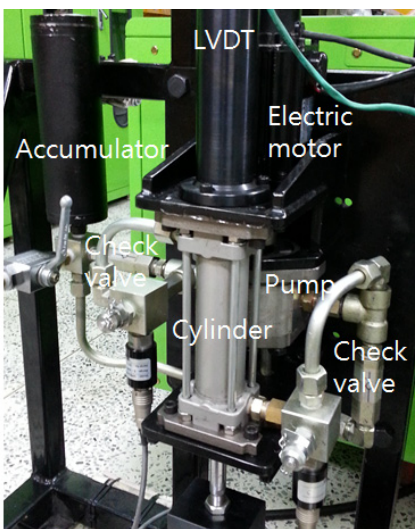


Fig. 1 Photo of the EHA

함수로 $K_{amp} G_m(s) G_l K_l$ 이다. 이를 구하기 위해서는 일반적으로 주파수응답 실험을 통하여 폐회로 전달함수를 구한다. 그러나 주파수응답을 실험을 통하여 구하는 일은 준비와 측정, 결과정리에 상당한 시간이 요구되는 작업이다. 본 연구에서는 EHA 시스템을 AMESim으로 모델링하고 AMESim소프트웨어에서 제공하는 선형화기법을 사용하여 구하고자 한다. EHA 시스템을 AMESim으로 모델링하기 위하여 우선 사용된 장치와 기기의 물리량 변환값을 구한다. 사용한 LVDT는 $\pm 35\text{mm}$ 의 변위를 $\pm 5\text{V}$ 로 변환시킨다. 서보모터의 각속도-전압계수는 입력지령 범위 $\pm 10\text{V}$ 에 대하여 정격속도를 $\pm 1800\text{rpm}$ 으로 설정하였으므로 180rpm/V 이다. 서보모터와 드라이버의 동특성은 1차 지연으로 간주하였다. EHA 시스템을 AMESim으로 모델링한 결과를 Fig. 4에 나타낸다. AMESim의 'Run' 모드에서 'Linear analysis' 버튼을 클릭하면 선형화 해석 모드가 되어 주어진 작동점에 대하여 시스템을 선형화시켜 상태방정식을 얻을 수 있다¹⁰⁾.

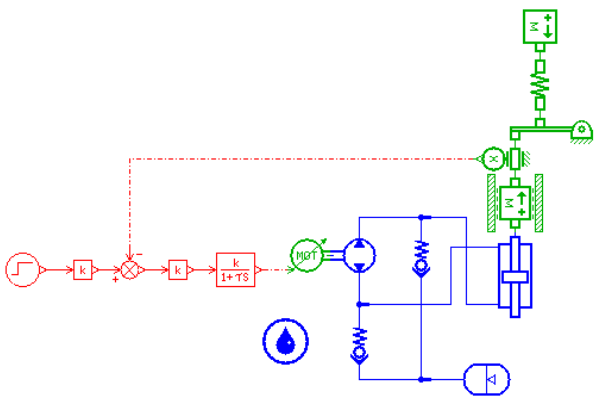


Fig. 4 AMESim modeling of the EHA

AMESim의 선형해석모드에서 기준입력을 제어변수로, 실린더 변위출력을 관측기 변수로 선택하여 보드응답을 보면 Fig. 5와 같다. 여기서 나타낸 주파수응답은 페루프 응답으로 페루프 전달함수 $T(s)$ 를 표준 2차계로 나타내면 식(1)과 같다. 표준 2차계에서 위상각이 -90° 일 때의 주파수가 ω_n 이므로 이를 구하기 위해 Fig. 5의 Bode선도에서 위상각이 -90° 일 때의 주파수를 읽으면 100 rad/s 을 얻는다. ζ 를 구하기 위해 위상각이 -90° 일 때의 게인값 M_r 은 -7.86dB 이므로 식(2)에 대입하면 $\zeta = 1.24$ 를 구할 수 있다. 페루프 전달함수 $T(s)$ 가 구해졌다면 개루프 전달함수 $G_p(s)$ 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있으므로 식(4)와 같이 구해진다¹¹⁾.

$$T(s) = \frac{k_v \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{1}{2} 10^{-\frac{M_r}{20}} \quad (2)$$

$$G_p(s) = \frac{T(s)}{K_p'(1 - T(s))} \quad (3)$$

$$= \frac{500}{s^2 + 248s} \quad (4)$$

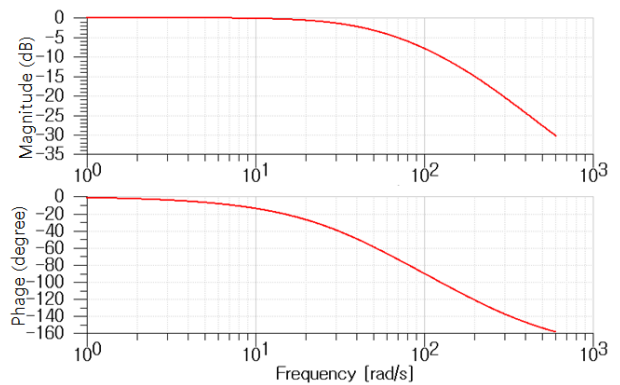


Fig. 5 Frequency response using AMESim linear analysis.

4. 제어기 설계

4.1 외란에 대한 응답 전달함수

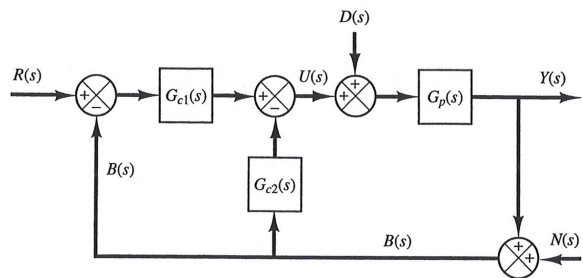


Fig. 6 Block diagram of a PI-D controller

기준입력 $R(s)$ 와 더불어 외란입력 $D(s)$ 와 잡음입력 $N(s)$ 의 영향을 받고 있는 Fig. 6과 같은 제어시스템에서 $G_{c1}(s)$, $G_{c2}(s)$ 는 제어기의 전달함수이고 $G_p(s)$ 는 플랜트의 전달함수이다. 이 시스템은 세 개의 페루프 전달함수 중에서 두 개의 페루프 전달함수가 독립적이므로 2자유도 시스템이고, 시스템의 응답 성능을 향상시키기 위하여 페루프 특성과 되먹임 특성을 독립적으로 조절할 수 있다. 여기서는 단위계단

기준입력에 대한 응답에서 최대 오버슈트가 2%보다 크고 19%보다 작도록, 그리고 정착시간이 1초보다 작도록 제어기 $G_{c1}(s)$ 와 $G_{c2}(s)$ 를 설계하고자 한다. 램프기준입력과 가속도 기준입력에 대하여 정상상태 오차는 0이어야 한다. 또 단위계단 외란입력에 대한 응답은 작은 진폭을 가지고 0으로 신속히 접근하도록 제어기를 설계한다. $R(s)$ 와 $N(s) = 0$ 이라고 가정하면 외란 입력 $D(s)$ 와 피스톤의 변위 $Y(s)$ 사이의 전달함수는,

$$G_{yd} = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_p}{1 + (G_{c1} + G_{c2})G_p} = \frac{G_p}{1 + G_c G_p} \quad (5)$$

$$= \frac{500s}{s^3 + (248 + 500K_D)s^2 + 500K_P s + 500K_I}$$

여기서 $G_{c1}(s) = K_p + K_I/s$, $G_{c2}(s) = K_D s$ 이고 $G_p(s)$ 는 식(4)로 나타내었다.

4.2 기준모델과 제어기 게인 설정

시스템응답에 대한 설계사양을 고려하여 제어 시스템에 대한 기준모델을 설정해야 한다. 여기서 저자는 표준 2차계와 1차 지연계, 미분요소의 곱으로 식(6)으로 구성하였다¹²⁾.

$$\left[\frac{Y(s)}{D(s)} \right]_{ref} = \frac{\omega_{nr}^2}{s^2 + 2\zeta_r \omega_{nr} s + \omega_{nr}^2} \frac{\alpha \zeta_r \omega_{nr}}{s + \alpha \zeta_r \omega_{nr}} K_r s \quad (6)$$

단위 스텝 기준입력에 대한 응답 요구조건(최고 오버슈트: 20%이하, 정착시간(settling time): 0.15s 이하, 상승시간: 0.05s 이하)을 만족시키는 영역에서 ω_{nr} 과 ζ 로 구성된 폐루프 극점의 조합을 찾는다. 표준 2차계에서 오버슈트와 정착시간, 상승시간을 각각 식(7), (8), (9)로 나타낼 수 있으므로

$$M_p = e^{-\pi\zeta_r / \sqrt{1-\zeta_r^2}}, \quad 0 \leq \zeta_r < 1 \quad (7)$$

$$t_s = \frac{4.6}{\zeta_r \omega_{nr}} = \frac{4.6}{\sigma} \quad (8)$$

$$t_r \cong \frac{1.8}{\omega_{nr}} \quad (9)$$

이로부터 각각 $0.46 \leq \zeta_r < 1$, $\sigma \geq 30.7$, $\omega_{nr} \geq 36$ 의 조건을 얻는다. 이 조건을 만족시키도록 $\omega_{nr} = 45$

와 $\zeta_r = 0.8$ 로 선택하면 2차계의 대표 극점은 $s_1 = -36 + j27$ 와 $s_2 = -36 - j27$ 가 된다. 다른 하나의 극점은 대표 극점 실수값의 5배가 되도록 하였다. 이리하여 $s_3 = -180$ 을 얻었다. 식(5)와 (6)의 분자항을 일치시키면 $K_r = 0.00145$ 를 얻을 수 있다. 그러면 기준모델 식(6)은 식(10)과 같이 된다.

$$\left[\frac{Y(s)}{D(s)} \right]_{ref} = \frac{500s}{s^3 + 252s^2 + 14985s + 364500} \quad (10)$$

극배치법에 의하여 식(5)와 식(10)의 분모항이 일치되도록 하면 식(11)과 같이 제어기 게인을 구할 수 있다. 최종적으로 얻어진 제어기를 Fig. 7에 나타내었다.

$$G_{c1}(s) = 30 + 729/s, \quad G_{c2}(s) = 0.008s \quad (11)$$

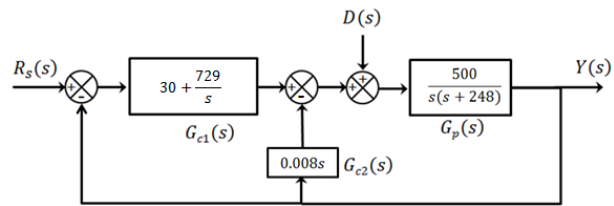


Fig. 7 Designed PI-D controller

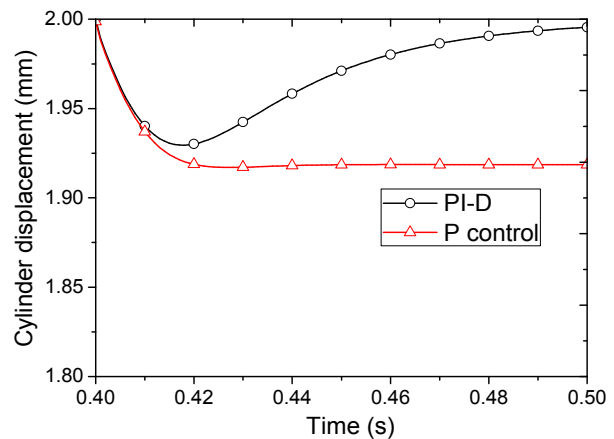


Fig. 8 Response for unit step disturbance input

Fig. 8에 시뮬레이션 결과로 스텝 외란입력에 대한 실린더 변위의 응답 $y(t)$ 를 나타낸다. 실린더가 목표 변위인 2mm에 머물러 있을 때 갑자기 스텝 외란입력으로는 몸무게 60kg의 사람이 스노우보드에 탑승하는 경우를 상정하였고, EHA 시스템에는 약간의 누유가 있다고 가정하였다. 비례게인이 30인 비례제어

에서는 정상상태 오차가 0.08mm 발생하였으나 본 연구에서 제안한 외란에 대한 정상상태 오차가 0으로 수렴하도록 설계한 PI-D제어기를 사용하면 최대 0.07mm 발생하였으나 0.1s 만에 0으로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

5. 결과 및 고찰

Fig. 9에 스텝응답의 결과를 나타낸다. 목표변위는 2mm로 하였고, ▲을 포함한 실선은 실험결과를, ○을 포함한 실선은 AMESim으로 시스템을 비선형 모델링한 경우의 시뮬레이션 결과를, △을 포함한 실선은 EHA 시스템을 본 연구에서 제안한 방식을 사용하여 선형화 모델링하여 식 (4)의 전달함수로 나타낸 경우의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 실험결과에서 오버슈트는 전달함수 모델보다 조금 높게, 그리고 조금 빠르게 상승하는 것으로 나타났으나, 응답의 형상과 정정시간은 거의 일치하였다. 실험결과는 AMESim의 비선형 모델링 결과와 상승시간 등에서 더 일치한 결과를 보였다.

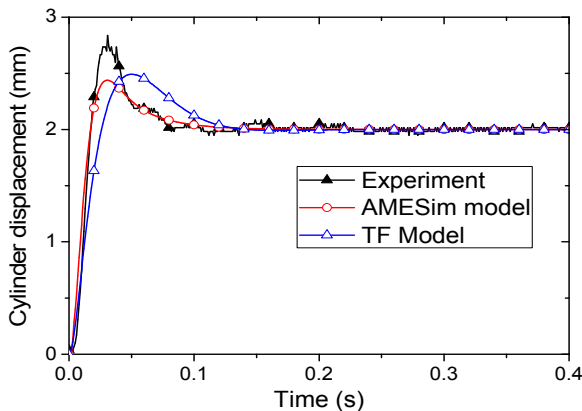


Fig. 9 Response for unit step input

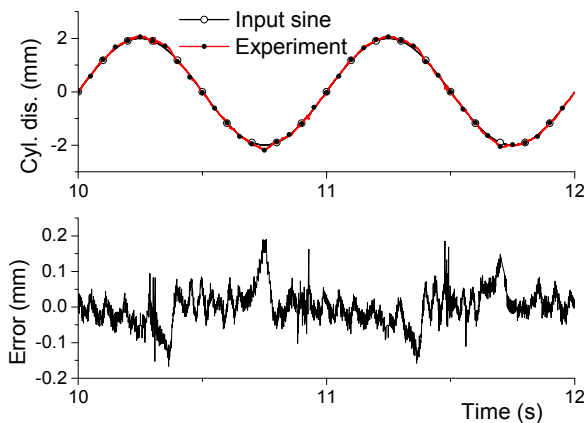


Fig. 10 Response for sine wave input

본 연구에서 사용된 EHA 시스템은 스노우보딩 시뮬레이터에 사용하기 위한 것으로 주된 입력과형이 사인파이다. Fig. 10에 1Hz의 사인파 입력에 대한 실험 결과를 나타낸다. 이때 EHA 시스템에 사람은 탑승하지 않았지만 90kg의 기저판의 한쪽 끝이 연결되어 EHA 액추에이터에는 45kg의 부하가 작용하고 있는 상황이다. 사인파 입력은 ○을 포함한 실선으로, 실험결과는 ●을 포함한 실선으로 나타내었다. Fig. 10의 아래에 나타낸 그래프는 추종오차를 나타낸다. 액추에이터는 사인파 입력을 대체로 잘 추종하지만 실린더 스트로크의 최하점을 통과하여 상승을 시작할 때 최대 0.18mm의 추종오차가 발생하였다. 이 오차는 가해진 부하와 피스톤의 방향이 바뀌면서 생기는 마찰 등으로 인해 발생된다고 사료된다.

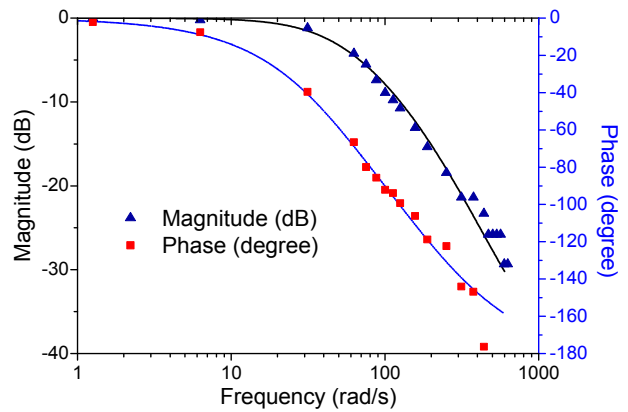


Fig. 11 Comparison of the frequency response

Fig. 11은 주파수응답을 비교한 것으로 ▲은 진폭비를 실험적으로 구한 값이고, ■은 위상차를 실험적으로 구한 값이다. 그리고 ▲와 ■에 겹치는 각각의 실선은 본 연구에서 제안한 방식으로 AMESim 선형화기법을 사용하여 구한 진폭비와 위상차의 결과이다. 실험결과와 AMESim 선형화기법을 사용한 결과는 잘 일치함을 볼 수 있다. 200 rad/s (31.8Hz) 이상의 실험결과에서는 약간의 변동이 수반되는데 이는 고주파에서 진폭비와 위상차를 정확하게 측정하기 어려움으로 인한 측정오차로 사료된다.

6. 결 론

종래의 EHA 시스템에서 자주 발견되는 액추에이터가 가지는 마찰 특성으로 인해 불감대가 생기는 문제점을 극복할 수 있도록 저마찰 실린더를 사용한

EHA 시스템을 설계하여 제작하고 시험하였다. EHA 시스템을 모델링하기 위하여 AMESim 소프트웨어에서 제공되고 있는 선형화 기법을 사용하였고, 이를 통해 얻어진 시스템의 전달함수를 사용하여 EHA에 작용하는 외란을 효과적으로 극복할 수 있도록 PI-D 제어계를 설계하여 적용한 결과 아래의 결론을 얻었다.

1. AMESim 선형화 기법을 사용한 주파수응답의 결과는 200rad/s 이하에서 실험 결과와 잘 일치하였다.
2. EHA 시스템의 응답을 표준 2차계로 모델링하여 외란에 대한 영향을 최소화시키기 위해 설계한 PI-D 제어기는 시뮬레이션 결과에 따르면 효과적으로 정상상태 오차를 0으로 가져갔다.
3. 저마찰 실린더를 사용한 EHA 시스템은 원활하게 작동하나 1Hz 사인파 입력에 대하여 0.18mm의 오차가 발생하였다. 향후 추종성 향상을 위한 연구가 요망된다.

후 기

이 연구는 2014년도 한국기술교육대학교 연구제과견연구비의 일부지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

References

- 1) S. H. Park, "Characteristics of an Electro Hydrostatic Actuator and Application Fields", Journal of The Korea Fluid Power Systems Society, Vol. 6, No. 1, pp. 2-10, 2009.
- 2) G. Carsten and C. Udo "Control of an electro-hydrostatic actuation system for the nose landing gear of an all electric aircraft", Recent Advanced in Aerospace Actuation Systems and Components 2004, Toulouse, November 24-26, 2004.
- 3) K. Rongjie, J. Zongxia, W. Shaoping and C. Lisha "Design and Simulation of Electro-hydrostatic Actuator with a Built-in Power Regulator", Chinese Journal of Aeronautics 22, pp. 700-706, 2009.
- 4) S. Habibi, A. Goldenberg, "Design of a New High-Performance ElectroHydraulic Actuator", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 5, No. 2, JUNE 2000.
- 5) E. Sampson, S. Habibi, R. Burton and Y. Chinniah, "Effect of controller in reducing steady-state error due to flow and force disturbed in the electrohydraulic actuator system", International Journal of Fluid Power 5, No. 2 pp.57-66, 2004.
- 6) D. H. Kim, Y. S. Hong and D. M. Kim "Performance Analysis of an Electro-Hydrostatic Actuator", Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Science, Vol. 35, No. 4, pp. 316-322, 2007.
- 7) G. H. Jung, "Start and Stop Characteristics of Single-Rod Electro-Hydrostatic Actuator", Transactions of the KSME A, Vol. 35, No. 11, pp. 1483-1490, 2011.
- 8) J. M. Lee, M. G. Park, S. H. Park, J. S. Kim and H. G. Lee "Design and Control of Electro Hydrostatic Actuator Systems", Journal of The Korea Society of Fluid Power Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 26-31, 2008.
- 9) S. H. Cho "Motion Control of Injection Moulding Cylinder with Electric-Hydrostatic Drives", Journal of The Korea Society of Fluid Power Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 29-37, 2009.
- 10) S. A. Imagine, AMESim User Manual, Ver 4.3. pp. 162-173, 2005.
- 11) I. Y. Lee, Hydraulic Engineering, Munundan, pp. 327 -334, 2012.
- 12) K. Ogata, "Modern Control Engineering", Prentice Hall, Fourth Edition, pp. 705-746.