전기-유압 서보 시스템의 모델규명에 관한 연구

엄상오*, 황이철**, 박영산***

A Study on Model Identification of Electro-Hydraulic Servo Systems

Sang-O Eum, I-Cheol Whang, Young-San Park

Abstract

This paper studies on the model identification of electro-hydraulic servo systems, which are composed of servo valves, double-rod cylinder and load mass. The identified plant is described as a discrete-time ARX or ARMAX model which is respectively obtained from the identification algorithms of least square error method, instrumental variable method and prediction error method. where a nominal model and the variation of model parameters are quantitatively evaluated.

Key Words : electro-hydraulic servo system, model identification, ARX or ARMAX model, least square error method, instrumental variable method, prediction error method.

I. 서 론

수치제어 공작기계, 산업용 로봇, 자동차 그리고 항공기 등 거의분의 전자제어장치는 주로 PID 제어알고리즘에 기초하여 설계되어 있으나, 이는 대출력과 고부하 환경에서 구동될 경우 비선형적이고 가변적인 부하특성에 대한 견실 성능이 다소 문제가 되고 있다. 즉 유압장치의 구동에 있어 부하특성의 변동에 따른 유량-압력간의 비선형성, 그리고 예기치 못한 주위환경 변화로 인한 외란 등이 존재함으로 장시간에 걸친 PID 제어게인 조정에 대한 노력이 필요하게 됨을 의미한다.

기존의 연구결과에서 PID 제어게인을 결정하는데 있어 이용되는 수학모델은 주로 비선형 미분방정식을 테일러 급수로 선형화한 모델[1~3]로서, 이는 작동점 근처의 미소변동에 대한 특성만을

* 정회원, 양산대학 환경안전과
** 정회원, 동의대학교 기계·산업시스템공학과
*** 한국해양대학교 대학원
접수일자 : 1999년 10월 29일

기술하므로 작동점이 변동하는 경우 많은 모델링 오차를 내포하게 된다. 따라서 이론적으로 구해진 수학모델에 기초하여 모든 기계적인 시스템에 구동기로 사용되고 있는 전기-유압 서보 시스템에는 전자계측장치와 마이크로 프로세서의 발달로 인하여 전자제어장치에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 현재 대부제어게인을 결정하더라도 실험적으로 여러 가지 작동점에서 게인을 튜닝해야 하는 노력이 필요하게 된다. 이러한 제어게인 조정에 대한 노력을 줄이기 위해서는 유압시스템의 부하특성 변동이나 외부환경 요인에 의한 외란 등의 불확실성을 정확히 기술할 수 있는 수학모델을 실험적으로 규명하는 연구가 반드시 필요함을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서는 비례-전자 서보밸브, 양로드 실린더 그리고 부하질량으로 구성된 유압 구동기에 대한 입출력 실험 데이터를 통하여 시불변이면서 선형인 이산시간 수학모델 규명을 연구목적으로 한다.

본 논문의 연구내용은 먼저 유압 시스템의 입출력 실험데이터로부터 시불변 선형 공칭모델을 규명한 후, 모델 파라미터 변동범위를 정량적으로 규명한다. 위에서 언급한 바와 같이 기존의 연구결과에서는 주로 비선형 수학모델을 선형화하고 있지만, 선형화 과정에서 발생한 모델링 오차, 운전조건 및 외부환경 변화에 따른 시스템 파라미터 변동를 정량적으로 규명하는데 많은 어려움이 따르게 된다. 그리고 작동점의 변화에 따른 시스템 파라미터 변동은 제어게인의 튜닝 문제를 야기시키게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 먼저 입출력 데이터로부터 실험적으로 모델을 규명하고, 반복 실험을 통하여 파라미터 변동을 기술한다. 결과적으로 2차 또는 3차의 이산시간역에서의 ARMAX 모델을 규명한다. 이때 입력신호로서는 지속적 기진조건을 만족하는 PRBS (Pseudo- Random Bineary Sequence) 신호를 사용하며, 규명 알고리즘으로서는 최소자승법, 보조변수법 및 예측오차법[4~8]을 각각 이용한다. 이들 세가지 규명 알고리즘의 결과를 고찰하여 전기-유압 서보 시스템의 공칭모델과 모델 파라미터의 변동범위를 정량적으로 해석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 규명 및 제어대상인 유압 시스템의 비선형 특성을 설명하고, 제 3장에서는 입출력 데이터로부터 모델을 규명한다. 끝으로 결론과 향후 연구과제를 제 4장에서 간략히 언급한다.

Ⅱ. 전기-유압 시스템의 동특성

본 논문에서의 모델규명 및 제어대상은 Fig. 1과 같이 전자-비례 서보밸브, 양로드 실린더(double-rod cylinder), 그리고 부하질량계로 구성되어 있다. 위의 그림에서 공급 압력은 90kgf/㎠, 관성 부하는 55kg이고, 앰프를 거친 변위 센서의 게인은 1V/cm 이다. AD/DA 보드는 12bit로서 제어기인 컴퓨터와 연결되어 인터페이스 역할을 하고 있다. 여기서 시스템의 각 요소 제원은 Table 1과 같다.

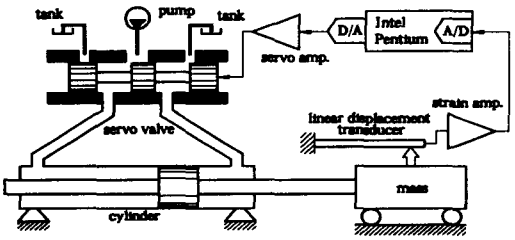

Fig. 1 Schematic diagram of an electro-hydraulic system

Table 1 Specification of hydraulic servo system and measuring devices

Instruments		Specification
Hydraulic System	Hydraulic Pump	40 cc/rev
	Servo Valve	30ℓ/min
	Cylinder	double rod, area $\pi \times (4^2\text{-}2^2)$ cm^2
Amplifier and Sensor	Servo Amp.	30mA/10mV
	Dynamic Strain Amp.	max±10V
	Displacement Sensor	max. range 5cm
Measuring Device	Oscilloscope	100MHz
Controller	Computer	Pentium 100MHz, RAM 16MByte
	Interface	12bit ±5V AD/DA converter
Power Supply	Constant DA Voltage Power Supply	

Fig. 1의 유압장치에 있어 비선형성은 서보밸브로의 입력전류와 밸브유량 및 부하압력 그리고 실린더와 피스톤의 쿨롱마찰 등으로 인하여 발생된다. Fig. 2는 실험으로부터 지령전압에 대한 밸브유량의 Bode 주파수 응답을 나타내고 있으며, 인가되는 지령전압이 커질수록 대역폭이 줄어들어 비선형성이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 지령전압과 유량 및 부하압력 사이의 비선형성에 의한 것으로 사료된다. 위의 주파수 응답 선도에서 대역폭은 약 7~8 Hz임을 알 수 있고, 특히 대역폭 근방에서 약 3차 시스템으로 근사가 가능함을 알 수 있다.

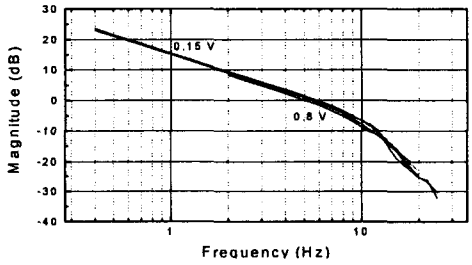

Fig. 2 Experimental result of Bode plot

Ⅲ. 전기-유압 시스템의 모델규명

1. 입출력 실험 데이터

모델규명 시에 사용되는 일반적인 입력신호는 GBN(Generalized Binary Noise) 신호로서, 이는 1과 -1을 스위칭하는 신호이며, 그 한쪽의 신호 발생확률은 $p\,(0<p<1)$ 이고 $p=0.5$ 일 경우 PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence) 신호가 된다. 확률 p가 높을수록 고주파, 낮을수록 저주파 특성으로 나타나며, PRBS 신호의 주기가 M이라면 M차수의 지속적 기진조건(PE 조건)을 만족하게 된다. 만약 시스템에 가할 수 있는 신호의 최대 크기가 제한되어 있는 경우, PRBS 신호는 백색잡음보다 파워 스펙트럼의 밀도가 더 높기 때문에 입력신호로서의 장점을 가지게 된다. 따라서 본 논문에서도 식(1)과 같은 PRBS 신호를 입력신호로 사용하였다.

$$u(t)=u(t-1)\times sign(r(t)-0.5),\ u(0)=\pm 1$$
$$r(t):\ \text{random variable}\ (0<r(t)<1) \quad \cdots\cdots (1)$$

위의 신호를 Fig. 3과 같이 쉬프트 레지스터(shift register)를 이용하여 2^{n-1}개의 데이터까지는 모든 주파수 영역에서 같은 스펙트럼이 나올 수 있도록 하였다. 단 ⊕의 정의는 Table 2와 같다.

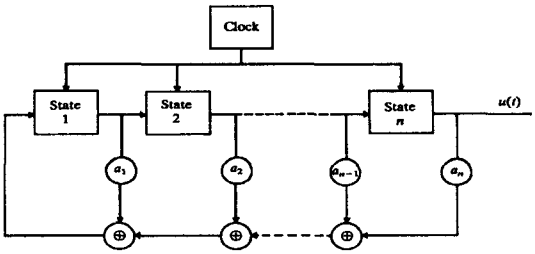

Fig. 3 Shift register with modulo-two feedback path

Table 2 Modulo-two addition of two binary variables

u_1	u_2	$u_1 \oplus u_2$
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0

입력신호 발생 시 데이터의 샘플링 주파수는 추정하려는 시스템의 주파수보다 커야하며 이론적으로는 나이키스트(Nyquist) 주파수 이상으로 되어야 한다. 샘플링 주파수가 커지면 이산시간계의 극이 복소 z-평면에서 $z=1$에 접근함으로 인하여 수치적으로 매우 민감하고, 또한 고주파 영역에서의 피팅을 강조하는 결과를 초래하게 된다. 모델규명 시 일반적인 샘플링 주파수는 $10\omega_B \le \omega_s \le 30\omega_B$($\omega_B$: bandwidth) 범위 내의 값이므로, 본 논문에서 고려한 유압시스템의 대역폭이 7~8 Hz정도임을 고려하여 샘플링 주파수를 200 Hz로 선정하기로 한다.

2. 모델규명 결과 및 고찰

시스템의 입출력을 각각 $u(t)$, $y(t)$로 정의하면,

ARMAX 모델은 다음과 같이 정의된다.

$$(\text{ARMAX})\ A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})e(t) \quad \cdots\cdots (2)$$

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_n z^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} - \cdots - b_m z^{-m} \\ C(z^{-1}) &= 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} - \cdots - c_p z^{-p} \end{aligned} \quad \cdots\cdots (3)$$

위의 식에서 $e(t)$는 일정강도를 가지는 백색잡음이며, ARX 모델은 $C(z^{-1})=1$로 둔 경우이다. 식 (2)에 포함된 시스템 파라미터를 결정하기 위하여 (i) 최소자승법(LSM), 보조변수법(IVM)을 적용하여 ARX 모델을, 예측오차법(PEM)을 통하여 ARMAX 모델을 규명[4~8]한다.

모델차수 결정 및 검증법에는 일반적으로 AIC (Akaike's Information Criterion)법과 FPE(Akaike's Final Prediction Error)법[7] 등이 사용되지만, 이를 적용한 결과 매우 높은 차수의 모델이 규명되어 본 논문에서는 다음의 네가지 조건 i) 극영점의 상쇄가 없고 시스템이 안정할 것, ii) residual test가 99% 신뢰 간격 안에 들어 올 것, iii) 차수의 증가에 비하여 예측오차의 감소율이 작을 것, iv) 저차일 것을 만족하는 범위 내에서 모델을 규명한다. 여기서 ii)항은 모델의 검증법인 residual 해석으로부터 주어지는 조건이며, 즉 모델의 오차와 입력신호가 서로 무상관임을 테스트하는 조건으로 해석된다. 본 논문에서는 모델규명 전문 패키지인 Matlab의 Identification Toolbox를 이용하였으며, 입출력 데이터는 Matlab에서 Borlandc 3.1 컴파일러를 이용한 동적 링크 라이브러리(dll)를 만들어 AD/DA카드를 구동하여 획득하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 ARX 모델을 각각 최소자승법 및 보조변수법에 대한 규명 결과를 나타낸다. 두 결과 모두 출력오차나 residual test는 만족할 만하나 극영점의 상쇄가 나타나며, 이는 차수가 과도하게 결정되었다는 것을 의미한다. 그리고 Fig. 6은 각각 ARMAX 모델을 예측 오차법으로 규명한 결과를 나타내는 것으로서, 위의 다른 두가지 방법보다 더 좋은 결과를 보여 주지만 residual과 출력과의 residual

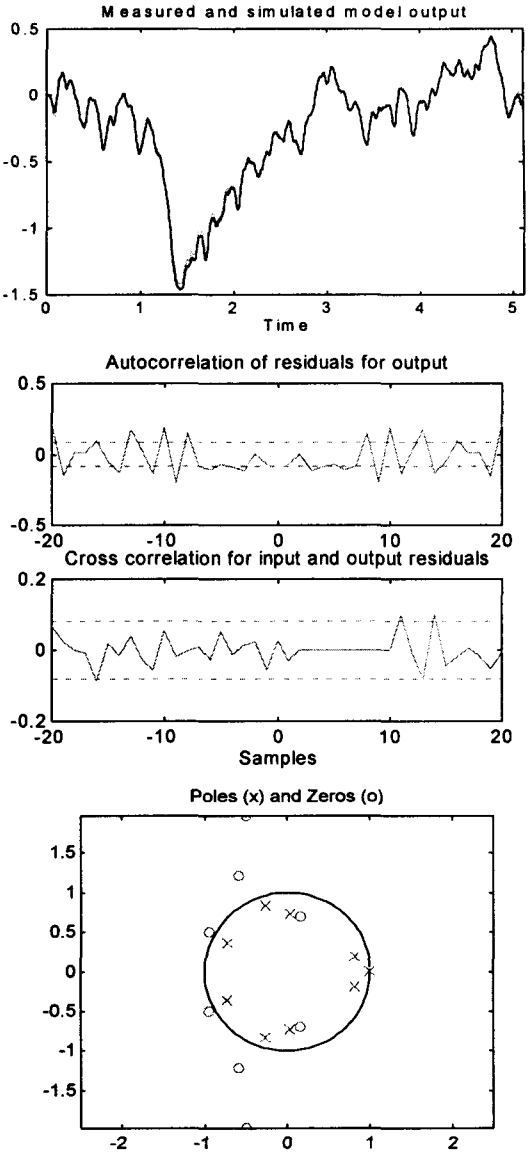

Fig. 4 Model validation of ARX model with least square method(n=9, m=9)

test는 만족하지 못한 결과를 보여 준다. 이것은 잡음 모델의 추정 정도가 좋지 않다는 것을 의미하며, 그러나 저차에서도 위의 두가지 방법보다 상대적으로 양호한 결과를 보여주고 있는데, 이는 ARX모델의 경우는 추정된 파마리터에 잡음의 영향도 같이 반영되므로 모델이 잡음영역까지 추정하기 위하여

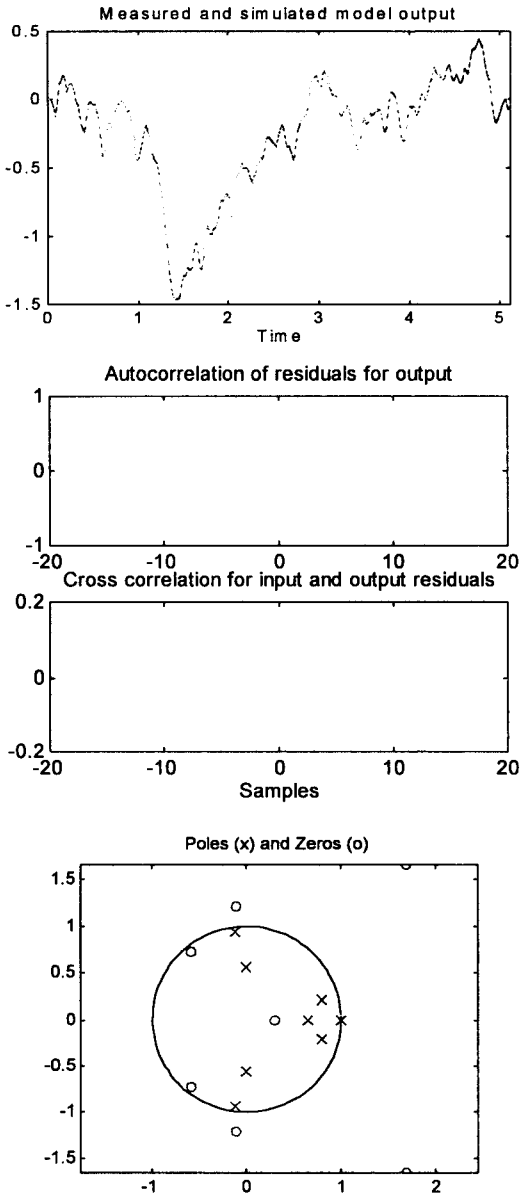

Fig. 5 Model validation of ARX model with instrumental variable method (n=8, m=8)

실제 시스템의 차수보다 더 높은 차수로 나타나기 때문이다. 결과적으로 ARMAX 모델은 잡음을 추정하는 MA(Moving Average)부분이 있으므로 상대적으로 저차로도 좋은 추정상태를 나타낸다고 할 수 있다.

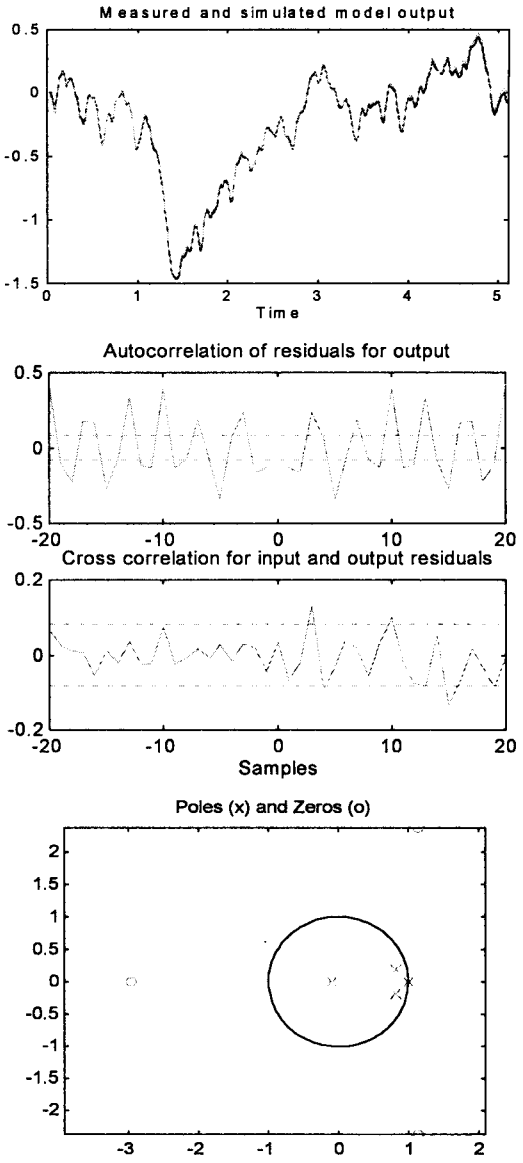

Fig. 6 Model validation of ARMAX model with prediction error method(n=4, m=4, p=4)

Fig 7은 주파수역에서의 각 모델에 대한 Bode 선도로서, 300rad/s 이상에서 각 모델마다 많은 차이점을 보여준다. 이것은 고주파수 영역에서 시스템의 고주파수 다이나믹과 잡음 등이 모델에 얼마나 반영되었는지를 보여준다. 따라서 제어가 가능한 영역이 대역폭 근처의 영역까지인 것을 감안하

면 세 모델이 모두 타당하지만, 제어기 설계에 있어서 모델은 저차이어야 설계가 용이하므로 제어를 위한 모델은 예측오차법에 의한 ARMAX 모델이 더 바람직함을 알 수 있다.

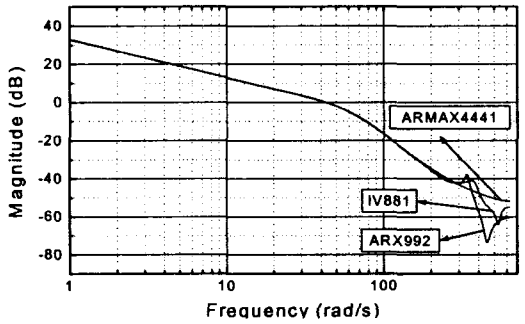

Fig. 7 Bode plots of estimated models

아래 식 (4)는 PE법에 의하여 추정된 ARMAX 모델을 나타낸다.

$$b_1 = 3.996\times10^{-4},\ b_2 = 1.139\times10^{-3}$$
$$b_3 = -2.338\times10^{-4},\ b_4 = 1.629\times10^{-2} \quad \cdots\cdots (4)$$
$$a_1 = -2.507,\ a_2 = 2.011$$
$$a_3 = -4.225\times10^{-1},\ a_4 = -8.147\times10^{-2}$$

위에서 계수 b_1, b_2, b_3가 b_4보다 상대적으로 작은 것으로 미루어 볼 때 이 시스템은 지연이 샘플링 시간의 약 4배 정도인 것을 알 수 있다. Table 2는 데이터 세트로부터 구한 파라미터 변동의 범위를 나타낸 것이다.

Table 2 Variation of Parameters

	a_1	a_2	a_3	a_4
maximum	-2.432	2.088	-0.2427	-0.06174
minimum	-2.5374	1.8111	-0.48847	-0.13625
average	-2.4956	1.9744	-0.3845	-0.09426
	b_1	b_2	b_3	b_4
maximum	0.001536	0.001408	0.003344	0.01656
minimum	0.0001786	-0.002151	-0.0008190	0.01531
average	0.0008305	0.0001862	0.0004453	0.01596

식 (4)에서 주어진 모델은 이산시간 모델이므로 연속 시간 모델로 바꾸면 아래 식(5)와 같다.

$$G(s) = \frac{-2.39s^3 + 1546s^2 - 3.664\times10^5 s + 5.487\times10^7}{s^4 + 398.6s^3 + 2.937\times10^4 s^2 + 1.215\times10^6 s - 195.6} \quad \cdots\cdots (5)$$

그리고 본 논문의 결과가 고성능 제어기 설계에 유용성을 가지기 위해서는 보다 낮은 차수의 모델이 필요하게 된다. 그래서 Hankel norm 근사법를 이용하여 식 (5)를 식 (6)과 같이 3차 시스템으로 근사화한다.

$$G(s) = \frac{-0.009537s^3 + 5.941s^2 - 1328s + 1.559\times10^5}{s^3 + 76.37s^2 + 3453s - 0.556} \quad \cdots\cdots (6)$$

실제 실험 데이터에서 $10^{-3} rad/s$이하의 주파수 영역은 데이터 개수가 무한이 아니므로 오차가 발생하며, 샘플링 주파수가 $620 rad/s$이고 잡음 등이 있으므로 $3\times10^2 rad/s$이상은 신뢰할 수 있는 영역이 아니다. 그리고 영점의 영향은 시스템의 대역폭을 훨씬 넘어서므로 무시할 수 있어 식 (6)을 다음과 같이 식 (7)로 기술하기로 한다.

$$G(s) = \frac{155906}{s^3 + 76.37s^2 + 3453s} \quad \cdots\cdots (7)$$

Fig. 8은 각각 식 (4), (5), (7)에서 주어진 모델의 Bode 선도를 나타내고 있다. 전체적으로 저주파역에서는 일치하나 200rad/sec 이상의 고주파역서는 불일치함을 알 수 있다. 여기서 여러 조건에서의 실험 데이터를 위와 같은 과정을 거쳐 각 모델의 파라미터들을 구한 후, 그 평균을 취하면 공칭모델은 다음과 같이 주어진다.

$$G_0(s) = \frac{159207}{s^3 + 75.64s^2 + 3569s} \quad \cdots\cdots (8)$$

Fig. 9와 10은 각각 실험 데이터 세트에서 얻은 공칭모델과 그 상하한을 나타내는 것으로, 특히 파라미터의 상하한에 대한 평가는 견실 제어기 설계시 모델링 오차에 대한 가중함수 설정에 유용성을 가질 것으로 사료된다.

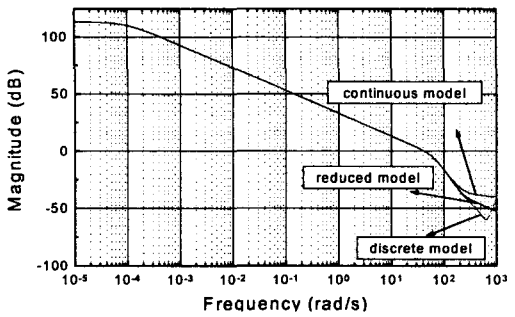

Fig. 8 Comparision between estimated and reduced models within wide frequency range

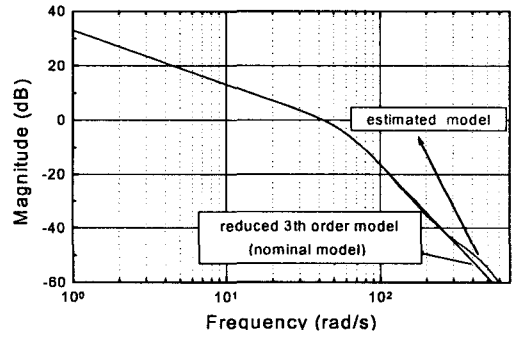

Fig. 9 Comparison between estimated and nominal model

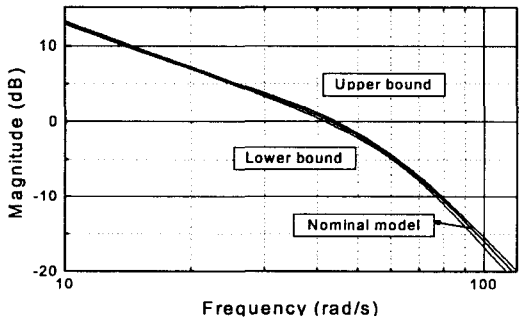

Fig. 10 Nominal model and upper-lower bound

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 전기-유압 서보 시스템에 대하여 세가지 규명 알고리즘 즉 최소자승법과 보조변수법을 적용한 ARX 모델규명, 그리고 예측오차법을 적용한 ARMAX 모델규명에 관한 연구를 수행하였다. 결과적으로 예측오차법을 통하여 전기-유압 서보 시스템에 대한 3차의 ARMAX 모델을 규명하고, 반복된 실험으로부터 파라미터 변동범위를 구하였다. 본 논문의 결과는 전기-유압 서보 시스템의 PID 제어기 제어게인을 결정 및 동시에 최적제어 또는 견실제어기를 설계하는데 있어 한 수학모델로서 그 유용성을 가질 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] 하석홍, "슬라이딩모드에 의한 전기 · 유압서보계의 제어 및 응용에 관한 연구," Ph.D Thesis, 부산대학교, 1992.

[2] 의 위치제어에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 1994.

[3] 박성환, "고속 전자 밸브를 이용한 전기 유압 서보시스템의 제어에 관한 연구," Ph.D Thesis, 부산대학교, 1996.

[4] Lennart Ljung, *System Identification:Theroy for the user*, Prentice-Hall, 1984.

[5] P. P. J. van den Bosch, A. C. van der '1994.

[6] Torsten Soderstrom, Petre Stoica, *System Identification*, Prentice Hall, 1989.

[7] 片山 徹, システム同定入門, システム制御情報學會, 1994.

[8] Lennart Ljung, "System Identification," Technical Report, Linkoping, Sweden, 1995.

엄 상 오(Sang-O Eum)
1986년 부산공업대학교 전기공학과 졸업
1991년 8월 숭실대학교 대학원 졸업(석사)
1995년 2월 한국해양대학교 대학원 박사과정수료
현재 양산대학 환경안전과 교수
* 주관심분야 : 전력전자, 전기기기제어

황 이 철(I-Cheol Whang)
1961년 10월생.
1987년 2월 부산대 기계설계공학과 졸업
1991년 2월 동 대학원 졸업(석사)
1996년 오사카대 대학원 전자제어기계공학과 졸업(박사)
1996년 10월 ~ 1998년 2월 부산대 기계공학부 국책교수
1998년 3월 ~ 현재 동의대 기계.산업시스템공학부 교수

박 영 산(Young-San Park)
1991년 한국해양대학교 기관학과 졸업
1997년 동대학원 기관공학과 졸업(석사)
1999년 동대학원 박사과정수료

* 주관심분야 : DSP. 전력전자. 전기제어.