한국정밀공학회지 제 19 권 제 4 호 (2002 년 4 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 4, April 2002.

최소자승법에 의한 ABS(Antilock Braking System)의 모델링 및 파라미터 평가

송창섭*, 노형우**

Modeling and Parameter estimation of Antilock Braking System

Chang Sub Song*, Hyoung Woo Roh**

ABSTRACT

By using the signal error test, model structure of total antilock braking system consisting of electromagnetic system and hydraulic system is determined as 9th order system. For determining parameters of the ABS, using time discrete model of parametric method, parameters in time discrete model are searched by least square method. By bilinear transform, we have found the model of ABS in s domain. Afterward, experimental output data is compared with simulated output data by MATLAB having identified parameter. As the result, experimental data is agreed with simulated data very well.

Key Words : Antilock Braking System(미끄럼방지 제동 시스템), Parameter Identification(변수추정법), Signal Error Test(신호 오차 테스트), Modeling(모델링), Experimental Data(실험값), Simulated Data(시뮬레이션값)

1. 서론

ABS의 구조를 살펴보면 하나의 블록에 유압부품 및 유압회로가 집적되어 있으며 가해지는 입력은 유압과 전기신호이고 출력은 유압이 토출되는 완전히 전자부품처럼 컴팩트한 부품으로 이루어졌다. 그러므로 ABS를 시뮬레이션하기는 점점 어려워지고 부품 및 유압회로를 해석 및 측정하여 수행하는 종래의 시뮬레이션 방법은 적용하기가 더 어려운 실정이다.

그러나 변수추정법(parameter identification)을 이용하면 ABS 모델의 차수에서 전달함수까지를 구할 수 있다.[1,2] 변수추정법에는 비파라미터적 방법(nonparametric method)과 파라미터적 방법(parameteric method)이 있으나 ABS는 시스템이 잘 알려져 있으므로 파라미터적 방법을 사용하였다.

먼저, 1/4 차량의 ABS 실험장치를 구성하고 ABS의 솔레노이드에 함수발생기를 이용하여 주파수와 듀티가 다른 오프셋된 구형파를 증폭하여 입력신호로 보내고 휠 실린더에 전달되는 압력을 압력센서를 사용하여 출력으로 측정하였다. 입력과 출력은 LABVIEW 를 사용하여 컴퓨터에 저장하였다. 100Hz 샘플링주기로 컴퓨터에 저장된 입력신호와 출력신호를 이용하여 MATLAB에서 파라미터 추정을 하기 위해서 데이터를 가공하여 저장한다. 준비된 데이터를 사용하여 MATLAB의 M파일을 이

2001 년 5 월 21 일 접수
* 한양대학교 기계공학부
** 한양대학원 정밀기계과

용한 프로그램으로 이산시간영역에서 ABS 유압시스템의 모델을 6차부터 11차로 가정하고 파라미터 추정을 수행하였다. 파라미터추정법에는 여러 가지가 있으나, 일반적인 최소자승법(least square method)을 사용하였다. 본래 유압시스템은 비선형 시스템이나 선형시스템으로 선형화하여 모델링을 하고 있으며 본 논문에서도 ABS 모델을 선형시스템으로 설정하여 변수추정 함으로써 보다 쉬운 시뮬레이션을 가능하게 하였다. ABS 유압시스템을 비선형으로 모델링을 할 경우 전체 전달함수를 구 할 수 없기 때문에 선형모델링을 이용하여 전체 전달함수를 구했다. 파라미터추정법을 통하여 얻어진 6차모델부터 11차모델을 이산시간영역에서 bilinear transform 의해서 S 영역으로 변환시키고 이 변환된 S영역의 6차모델에서 11차모델의 각각에 대하여 입력신호와 같은 신호를 MATLAB으로 시뮬레이션한 모델에 입력하여 시스템의 출력을 구한다. 이 시뮬레이션에서 구한출력값을 100Hz로 샘플링하여 실험에서 구한 출력값과 비교한다. 이 방법을 신호오차테스트라고 한다. 이 신호오차테스트를 통하여 시뮬레이션 값과 실험값의 차를 구하고 이 차들을 측정시간영역에서 합하면 9차모델에서 오차의 합이 가장 작음을 알 수 있다.

모델링 하고자 하는 ABS 유압시스템의 차수를 9차로 정하고 각 입력파를 이용하여 모델의 파라미터를 구하기 위해서 변수추정법인 최소자승법을 이용하여 이산시간영역에서 변수추정을 하였다.

이산시간영역에서 구한 9 차 모델을 Bilinear Transform 을 이용하여 S영역에서의 전달함수를 구한다. 구해진 전달함수를 이용하여 MATLAB 에서 오프셑구형파를 만들어서 초기값을 설정하여 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 출력 값과 실험출력값은 잘 일치하였다.

2. ABS 의 구조 및 작동원리

본 논문에서 변수추정법을 수행한 시스템은 솔레노이드-유량제어밸브 방식의 ABS 이다.[3]

마스터 실린더에서 발생된 압력은 통상시 브레이크 쪽으로 출입하다가 솔레노이드밸브가 열리는 순간 유량이 펌프쪽으로 빠지면서 유량제어밸브(FCV)의 스풀이 마스터실린더에서 브레이크쪽 유로를 막고 브레이크에서 솔레노이드밸브로 유량이 빠지도록 작동 된다. 솔레노이드 밸브로 빠진 유량은 유량의 일시 저장소인 레저버를 거쳐 귀환펌프로 유입되어 마스터 실린더로 돌아가게 되고 귀환펌프에서 토출되는 유량에 의한 압력의 맥동을 줄이기 위해서 펌프와 마스터 실린더사이에 댐퍼가 설치되어 있다. ABS 의 압력패턴은 normal, dump, reapply 상태이며 ABS 작동시 dump, reapply 상태 사이로 동작하므로 압력파형이 톱니모양으로 된다. 그리고 ABS 시스템의 차수를 살펴보면 마스터실린더는 2차, FCV 밸브는 2차, 솔레노이드 밸브는 3차, 펌프는 1차, 댐퍼는 1차로 가정하면 전체시스템의 차수는 9차가 된다.[1) 3)] 그러나 어떤 시스템 모델차수가 정확한지는 알 수 없으므로 신호오차 테스트를 수행하여 모델의 차수를 구한다.

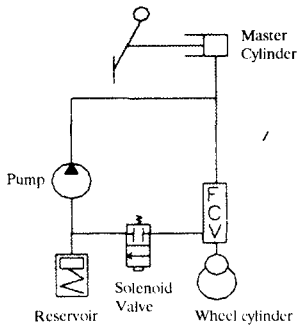

Fig. 1 Solenoid-Flow control valve type ABS

3. 실험 및 파라미터 추정법

3.1 입,출력 데이터 획득을 위한 실험

Fig.3과 같이 실험장치가 구성되며 마스터실린더를 누르기 위해 공압 실린더를 사용하고 ABS 의 솔레노이드 밸브에 함수발생기를 이용하여 1Hz, 2Hz, 5Hz, 10Hz 의 20%, 30%, 40%듀티를 갖는 오프셑된 구형파를 증폭하여 입력하고 시스템의 출력은 휠 실린더에 걸리는 압력을 출력으로 하여 DAQ 하드웨어와 LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 100Hz 로 샘플링하여 저장한다. 저장된 값들을 MATLAB 에서 불러들여 파라미터 추정법을 하기 위해서 저장된 데이터를 가공한다.

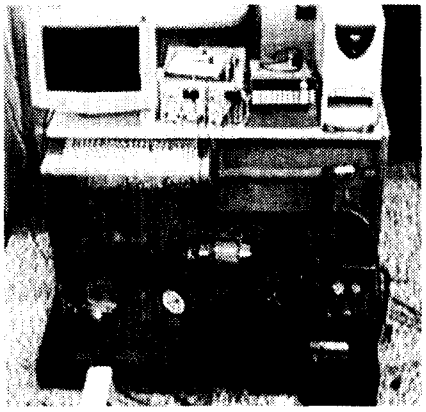

Fig. 2 Configuration of experimental apparatus

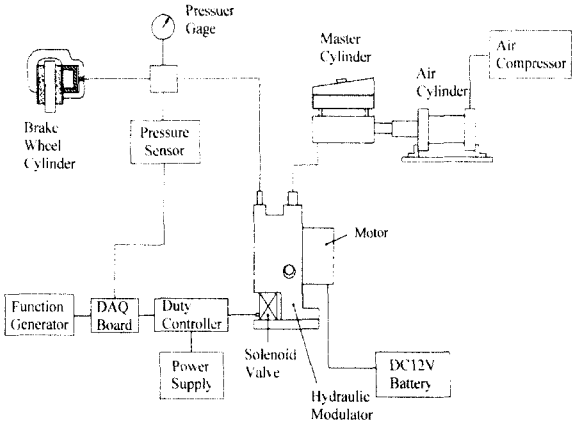

Fig. 3 Blockdiagram of experimental apparatus

Table 1. Specifications of experimetal equipment

실험장비	제품명 및 특성	
디지털 압력센서	측정범위	200kg/cm^2
	인가전압	DC 12V
	온도범위	-40°C ~ +100°C
	Hysteresis	0.5% R0
	출력	0V ~ 5V DC
	소비전류	30 mA
압력게이지	200 kg/cm2 Max	
DAQ Board	Sampling rate	83.3k samples/s
	Gain	2
	Input range	0V ~ 10V
Duty	직접제작	
Controller	입력	5V, 20mA
	출력	12V, 3A Max
Power Supply	Hewlett Packard 6826A	
Motor Driver	DC 12V Battery	
Air Compressor	DARI HP 1.5	
	7.5 bar MAx	
Air Cylinder	단로드형 복동 실린더	
	Diameter	125mm
	Stroke	50mm
	Pressure range	1~9kgf/cm^2
Manual Direction Change Valve	4port 3way manual type valve	
	Pressure range	1~9 kgf/cm^2

3.2 파라미터추정법과 신호오차테스트를 이용한 ABS의 모델 차수 결정

컴퓨터에 저장된 데이터를 이용하여 파라미터 추정을 하기 위해서 MATLAB에서 M 파일을 이용하여 파라미터 추정프로그램을 작성한다. 작성된 프로그램에서 저장된 입력 및 출력데이터를 읽어들이고 파라미터추정을 하여 6차 모델에서 11차모델까지의 시스템 전달함수를 구한다. 파라미터추정법에서 구한 모델은 이산시간영역에서의 모델이므로 Bilinear transform을 사용하여 S 영역의 전달함수를 구한다. 이 전달함수를 이용하여 MATLAB으로 시뮬레이션을 하고 시뮬레이션 영역에서 오프셋된 구형파를 발생시켜 모델에 입력을 주면 출력을 구할 수 있고 이를 다시 100Hz로 샘플링하면 시뮬레이션상의 출력을 구할 수 있다. 이 시뮬레이션 출력과 실험상의 출력을 비교하는 신호오차테스트를 수행한다. 신호오차테스트의 식은 다음과 같다.[4)]

$$\sum_{k=0}^{n} | y_k(t) - S_k(t) | \qquad (1)$$

여기서, $y_k(t)$는 실험상의 샘플링된 출력이고 $S_k(t)$는 시뮬레이션상의 샘플링된 출력이다.

3.3 최소자승법에 의한 이산시간 영역모델의 파라미터 추정법

모델의 파라미터추정법은 다음과 같이 유도된다. 입력신호와 출력신호는 다음의 식(2)과 같은 차분방정식으로 나타내진다. 이 차분방정식은 입력신호의 잡음을 무시하고 입력 및 출력값의 초기

조건을 영으로 가정하여 유도된다.

$$y(k)+a_1y(k-1)+\cdots+a_my(k-m) = b_1u(k-d-1)+\cdots+b_mu(k-d-m) \quad (2)$$

여기서, $y(k)$는 출력이고 $u(k)$는 입력이다.

위의 차분방정식을 Z 변환하고 정리하면 식(3)를 얻게된다.

$$\frac{Y(z)}{u(z)} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}z^{-d} = \frac{b_1z^{-1}+\cdots+b_mz^{-m}}{1+a_1z^{-1}+\cdots+a_mz^{-m}}z^{-d} \quad (3)$$

식(2)에 시간 k 까지 측정된 신호값인 $y(k)$ 와 $u(k)$ 와 시간 $(k-1)$까지의 예측된 파라미터를 대입하면 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$y(k)+a_1y(k-1)+\cdots+a_my(k-m) - b_1u(k-d-1)-\cdots-b_mu(k-d-m)=e(k) \quad (4)$$

여기서, k 는 이산 시간 단위이고, m 은 모델차수이고, d 는 dead time 이고, e(k)는 오차방정식이다.

식(4)에서 출력인 $y(k)$ 의 예측인 $y(k\mid k-1)$ 을 구하면 식 (5)과 같이 표시된다.

$$y(k\mid k-1) = -a_1y(k-1)-\cdots-a_my(k-m) + b_1u(k-d-1)+\cdots + b_mu(k-d-m)=\boldsymbol{\psi}^T(k)\boldsymbol{\theta} \quad (5)$$

여기서, 데이터벡터 $\boldsymbol{\psi}^T(k)$ 는

$$\boldsymbol{\psi}^T(k) = [-y(k-1)\cdots-y(k-m) \mid u(k-d-1)\cdots u(k-d-m)] \quad (6)$$

이고, 파라미터벡터 $\boldsymbol{\theta}$ 는

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1\cdots a_m \mid b_1\cdots b_m]^T \quad (7)$$

이다.

식(4)과 식(5)에서

$$y(k)=\boldsymbol{\psi}^T(k)\boldsymbol{\theta}(k-1)+e(k) \quad (8)$$

이 된다.

오차함수를 최소화하면 식(9)가 된다. 식(9)에 식(8)를 대입하고 이를 미분하면 식(10)이 되고 정리하면 식(11)를 얻게 된다.

$$V = e^T(m+d+N)e(m+d+N) \quad (9)$$

$$\left.\frac{d\mathbf{V}}{d\theta}\right|_{\theta=\boldsymbol{\theta}} = -2\boldsymbol{\psi}^T[y-\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\theta}\,] = 0 \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [\boldsymbol{\psi}^T\boldsymbol{\psi}]^{-1}\boldsymbol{\psi}^T\mathbf{y} \quad (11)$$

여기서, N 은 측정 시간이다. 식(11)를 사용하여 입력과 출력으로 구성된 데이터 매트릭스 $\boldsymbol{\psi}$ 와 출력 매트릭스 $\mathbf{y}$ 를 대입하여 미지의 파라미터를 추정한다. MATLAB 에서 사용한 프로그램은 식(11)의 행렬식을 계산하는 알고리즘을 갖고 있고 신호오차테스트에서 결정된 모델구조를 이용하여 파라미터를 추정할 수 있다. 이때 사용되는 입력은 1Hz, 2Hz, 5Hz, 10Hz 의 오프셋된 구형파이고 듀티도 20%, 30%, 40%로 설정하였다. 파라미터추정법을 이용하여 이산시간영역에서 Z전달함수의 파라미터를 구하고 이를 Bilinear transform하여 S영역에서의 전달함수를 구한다. 이 전달함수를 이용하여 MATLAB에서 실제의 입력과 같은 신호를 시뮬레이션영역에서 만들어 입력시키고 출력을 받아 샘플링하여 시뮬레이션 데이터를 받아서 실험치의 출력과 비교한다. 신호오차테스트를 수행하여 오차가 가장 작은 모델의 전달함수를 ABS의 전달함수로 정한다.

3.4 상태방정식을 이용한 초기치설정

본 논문에서 적용한 최소자승법은 초기값을 0 으로 가정하여 식(11)이 유도되므로 변수추정을 수행하면 초기값이 0부터 시작하여 변수추정을 수행한다. 이것은 실제 실험값과 초기조건에서 차이를 보이므로 구한 전달함수에 초기값을 설정하기 위해서 전달함수를 상태방정식으로 MATLAB에서 변환시키고 초기값을 변경시켜가면서 실제 실험값과 시작점이 일치되는 것을 선택하면 Fig.8 에서 Fig.10과 같은 결과를 얻을수 있다. 2Hz, 20%듀티일 때의 전달함수는

$$\frac{0.0092S^9+15.18S^8+4.89\times10^3S^7+2.10\times10^6S^6+}{S^9+2.11\times10^3S^8+1.26\times10^6S^7+5.18\times10^8S^6+}$$
$$\frac{-2.49\times10^8S^5+1.22\times10^{10}S^4-1.48\times10^{13}S^3+}{1.08\times10^{11}S^5+1.48\times10^{13}S^4+1.19\times10^{15}S^3}$$
$$\frac{-4.58\times10^{14}S^2-2.94\times10^{16}S+4.17\times10^{17}}{4.07\times10^{16}S^2+3.81\times10^{17}S+4.92\times10^{17}}$$

이다.

이 전달함수를 MATLAB 에서 상태방정식으로 바꾸고 초기값을 설정한다.

$$\dot{x}(t)=\begin{bmatrix} a_8 & a_7 & a_6 & a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x(t)+\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t)=\begin{bmatrix} c_8 & c_7 & c_6 & c_5 & c_4 & c_3 & c_2 & c_1 & c_0 \end{bmatrix} x(t)+0.0092\,u(t)$$

여기서,

$a_8=-2.12\times10^{3}$, $a_7=-1.26\times10^{6}$, $a_6=-5.18\times10^{8}$,

$a_5=-1.06\times10^{11}$, $a_4=-1.48\times10^{13}$, $a_3=-1.19\times10^{15}$,

$a_2=-4.07\times10^{16}$, $a_1=-3.82\times10^{17}$, $a_0=-4.92\times10^{17}$

$c_8=-4.43$, $c_7=-6.76\times10^{3}$, $c_6=-2.69\times10^{6}$,

$c_5=-1.25\times10^{9}$, $c_4=-1.50\times10^{11}$, $c_3=-2.58\times10^{13}$,

$c_2=-8.35\times10^{14}$, $c_1=-3.30\times10^{16}$, $c_0=-4.13\times10^{17}$

4. 결과 및 검토

신호오차테스트의 결과를 검토하면 오차가 너무커서 신호오차테스트의 결과로 제시하기 어려운 것은 생략하고 비교적 오차가 적은 것(10%이하)를 결과로 제시하였다. Fig.4를 살펴보면 9차일 때 안정화되나 오차는 11차일 때 가장 적어서 11차임을 알 수 있다. Fig.5는 10차에서 오차의 합이 가장 적어서 10차가 됨을 알 수 있다. Fig.6 은 9차에서 오차의 합이 적어서 9차가 됨을 알 수 있다. Fig.7 은 9차일 때 오차의 합이 가장 적어서 9차임을 알 수 있다. 10차와 11차인경우가 있으나 대체적으로 차수는 9차가 최적임을 알 수 있다. 이는 2 절에서 구한 전체차수 9차와 일치함을 알 수 있다.

Fig.8 에서 Fig.10 는 ABS를 2Hz 20%듀티인 입력값을 이용하여 구한 9 차 시스템으로 가정하여 입력주파수를 2Hz, 5Hz, 10Hz로 변경시켜 가면서 시뮬레이션한 결과로서 실험값과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 초기값을 설정하는 이유는 변수추정법을 수행할때에 초기조건을 영으로 가정하였기 때문이다. 이 그림에서 실선은 실험값이고 점선은 시뮬레이션값이다.

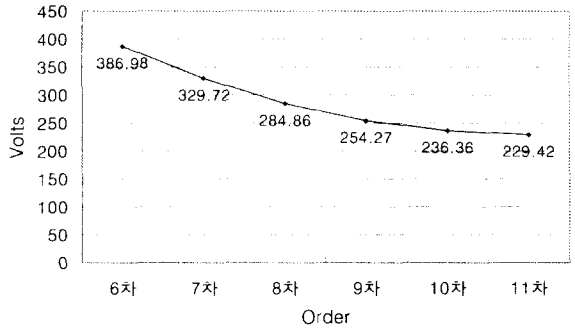

Fig. 4 Results of signal error test by 2Hz. 40% duty input

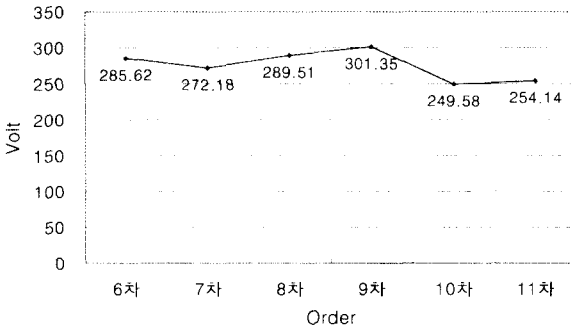

Fig. 5 Results of signal error test by 5Hz, 40% duty input

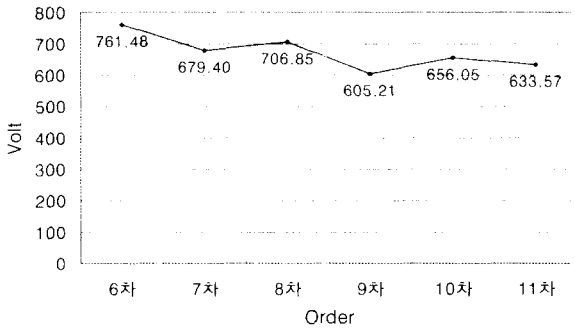

Fig. 6 Results of signal error test by 10Hz, 20% duty input

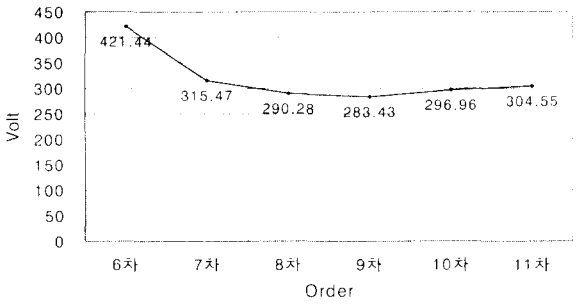

Fig. 7 Results of signal error test by 10Hz, 40% duty input

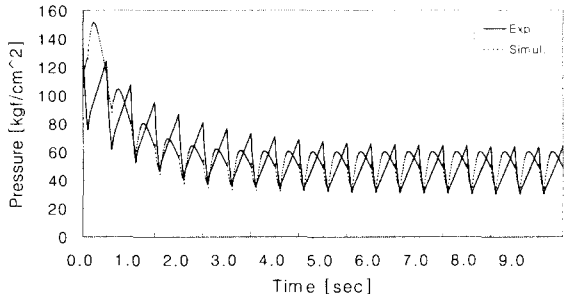

Fig. 8 Comparison of simulated data with experimental data by 2Hz, 20% duty input

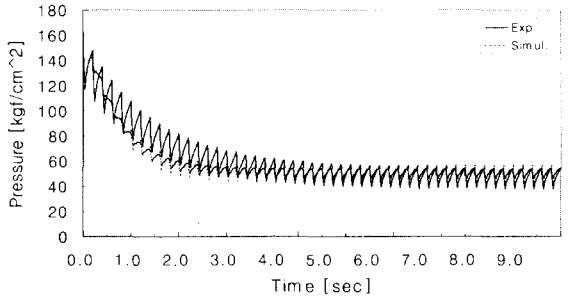

Fig. 9 Comparison of simulated data with experimental data by 5Hz, 20% duty input

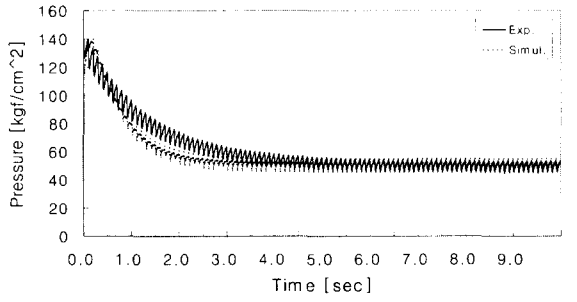

Fig. 10 Comparison of simulated data with experimental data by 10Hz, 20% duty input

5. 결론

이산시간영역에서 ABS 모델을 가정하여 1, 2, 5, 10Hz에 20%, 30%, 40% 듀티인 입력을 이용하여 변수추정법을 수행하고 이 결과를 이용하여 신호오차테스트를 수행하여 ABS 모델의 차수를 9차로 정하고 정해진 차수를 이용하여 모델의 변수를 구하여 S 영역의 전달함수를 구했다. 전달함수는 듀티에 따라 많은 차이를 보였으며, 오차가 가장 적은 2Hz, 20% 듀티인 입력을 이용한 9차시스템을 변수추정법을 이용하여 최적의 전달함수를 구하고 이를 2, 5, 10Hz에 20%듀티로 입력값을 주고 초기값을 설정한 시뮬레이션결과, 시뮬레이션값과 실험값은 비교적 잘 일치하였다. 그러므로 변수추정법을 이용하여 ABS 유압시스템의 전체 전달함수를 구할 수 있었다.

참고문헌

1. R. Isermann,"Identifikation dynamischer Systeme Band 1, 2," Springer-Lehrbuch, 1991.
2. Lennart Ljung, "System identification second edition ," prentice hall, 1999.
3. 양해정, "PWM 제어에 의한 솔레노이드-유량제어 방식 ABS 의 제동 압력 특성," 한양대학교 박사학위 논문, 1996.
4. H. Unbehauen & B. Goehring, "Tests for determining model order in parameter estimation," Automatica, Vol. 10, pp. 233-244, 1974.
5. Peter Young, "parameter estimation for continuous-time model- A survey," Automatica, Vol. 17, No. 1, pp. 23-39, 1981.
6. Simulink manual, math works Inc.
7. Merrit, H. E., "Hydraulic control system," John Wiley & Sons, 1967.
8. Ogata, "Modern Control Engineering," prentice hall, 1970.