

최소자승법에 의한 A/T용 솔레노이드 밸브의 모델링 및 파라미터 평가

노형우*, 박상훈#, 송창섭**

Modeling and Parameter Estimation of Solenoid Valve in Automatic Transmission by the Least Square Method

Hyoungh Woo Roh*, Sang Hoon Park#, Chang Seop Song**

ABSTRACT

Model structure of solenoid valve in the automatic transmission is determined as 5th order system by the signal error test. For determining parameter of the solenoid valve, parameters in time discrete model are searched by the least square method. By bilinear transform, we have found the model of solenoid valve 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 : Solenoid Valve (솔레노이드 밸브), Automatic Transmission (자동변속기), Parameter Identification (변수추정법), Signal Error Test (신호 오차 테스트), Experimental Data (실험값), Simulated Data (시뮬레이션값)

1. 서론

종래의 A/T(Automatic Transmission)용 솔레노이드 밸브의 해석에는 가정자로법, FEM 해석법 등이 사용되어 왔으나, 해석법이 너무 복잡하고 숙련을 요하는 방법이므로 해석하는데 많은 어려움이 있었다. 뿐만 아니라 종래의 방법으로는 솔레노이드 밸브의 전달함수를 구할 수 없었다.

그러나 변수추정법(Parameter Identification)을 사용하면 보다 손쉬운 방법으로 솔레노이드 밸브의 모델차수와 전달함수를 구할 수 있다.

먼저 A/T용 솔레노이드 밸브 실험장치를 구성

하고 솔레노이드 밸브에 PC에서 출력된 PWM duty signals를 증폭하여 입력신호로 보내고 솔레노이드 밸브에서 발생하는 압력을 압력센서를 사용하여 출력으로 측정하였다. 여기서 PWM duty signals는 구형파의 duty ratio를 조절한 신호를 말한다. 이 때, 입력과 출력은 A/D 컨버터를 사용하여 컴퓨터에 저장하였다.

2KHz의 샘플링 주기로 컴퓨터에 저장된 입력신호와 출력신호를 이용하여 MATLAB에서 변수추정을 하기 위하여 data를 가공하여 저장한다. 준비된 데이터를 이용하여 MATLAB의 M파일을 이용한 프로그램으로 이산시간영역에서 솔레노이드 밸브

접수일: 2003년 3월 6일; 게재승인일: 2003년 7월 11일

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

교신저자: 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

E-mail: bbacoms@ihanyang.ac.kr, Tel: (02) 2290-0433

** 한양대학교 기계공학부

모델을 2차부터 8차까지 가정하여 전달함수를 구하고 신호오차테스트를 하였다. 신호오차테스트 결과를 이용하여 A/T용 솔레노이드 밸브의 모델차수를 정하고, 각 입력파를 이용해서 변수추정을 수행하여 모델의 파라미터를 결정하고 실험값과 시뮬레이션값을 비교하였다.

2. A/T용 솔레노이드 밸브의 구조 및 작동원리

A/T용 솔레노이드 밸브는 A/T의 변속제어에 있어서 클러치와 브레이크의 원활한 작동을 얻기 위함을 목적으로 한다. 자동변속기 시스템은 엔진에 시동을 걸면 오일펌프가 작동하여 A/T내의 유압 제어 장치에 유압을 공급하게 된다. 이때, 공급되는 유압은 엔진 토크에 의해 발생되는데 그 압력이 일정하지 않으므로 레귤레이터 밸브를 거쳐서 일정한 라인압을 유지하게 된다. 라인압은 리듀싱 밸브를 통해서 라인압보다 낮은 압력을 유지하게 되고, 이 압력을 Fig. 1에서 P_r 로 표시하였다. 이 P_r 은 제트 오리피스를 거쳐서 솔레노이드 밸브 (PCSV)와 압력 제어 밸브(PCV)에 가해지게 되고, 솔레노이드 밸브의 듀티 제어로서 저하된 1차압(P_1)을 형성하게 된다. 저하된 1차압이 압력 제어 밸브를 작동시킴으로서 2차압을 듀티에 따라 제어하게 된다. 이 형성된 2차압은 클러치와 브레이크로 작용함으로써 변속시의 변속이 적절하게 이루어지도록 한다. 본 논문에서 모델링 하고자 하는 부분은 Fig. 1에서 PCV를 제외한 PCSV(A/T용 솔레노이드 밸브) 부분이다. 그리고 이론적으로 A/T용 솔레노이드 밸브의 차수를 살펴보면, 전자석 시스템을 1차, 플런저 운동방정식을 2차, 압력방정식을 2차로 가정하여 전체시스템 차수는 5차가 된다. 그러나 어떤 시스템 모델차수가 정확한지는 알 수 없으므로 신호오차테스트를 수행하여 모델의 차수를 구한다.

3. 실험 및 파라미터 추정법

3.1 입,출력 데이터 획득을 위한 실험

Fig. 2처럼 실험장치가 구성되며, 오일펌프에서 토출된 유량은 릴리프 밸브에 의해 일정압력 10.5 Kg/cm^2 로 유지하여 솔레노이드 공급압으로 이용하였다. 즉 릴리프 밸브가 자동변속기 시스템의 레귤

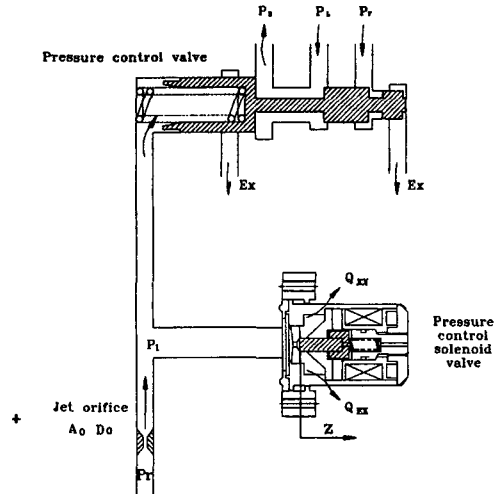


Fig. 1 Layout of solenoid valve in automatic transmission

레이터 밸브의 역할을 하고 있다. 솔레노이드 밸브의 입력신호는 PC에서 출력된 PWM duty signals를 전류구동회로를 거쳐서 임의의 전류치를 솔레노이드 밸브에 공급하고 그 전류치에 따른 발생 제어압을 압력센서를 이용하여 계측하였다. 또한 유압회로내 유온 계측을 위한 Thermister 온도계, 그리고 솔레노이드 밸브에서 소모되는 순간적인 유량변동에 따른 압력변화 방지를 위한 2L 용량의 어큐뮬레이터를 설치하였다. 실험조건은 유온을 40°C 로 하고, 입력신호인 PWM duty signals로는 30Hz, 60Hz의 구형파를 이용하여 듀티를 40%, 50%, 60%, 70%로 변화시킨 신호를 사용하였고, 이때의 제어압력을 출력으로 하고 있다. 각 데이터는 12bit A/D 컨버터를 이용하여 2KHz로 샘플링하여 저장하였다.

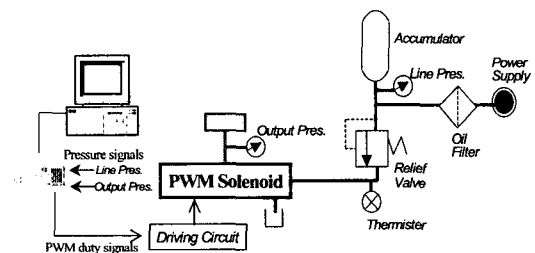


Fig. 2 Block diagram of experimental apparatus

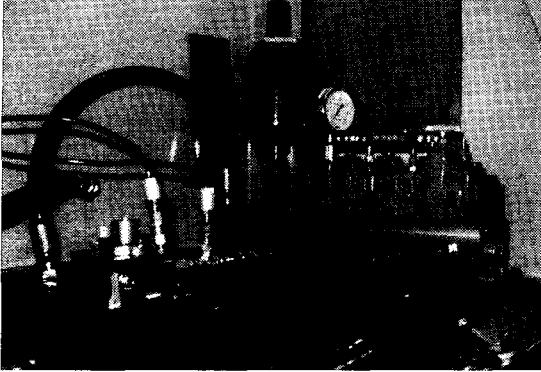


Fig. 3 Configuration of experimental apparatus

3.2 파라미터 추정법과 신호 오차 테스트를 이용한 솔레노이드 밸브의 차수 결정

컴퓨터에 저장된 데이터를 이용하여 파라미터 추정을 하기 위하여 MATLAB에서 M파일을 이용하여 파라미터 추정 프로그램을 작성한다. 작성된 프로그램에서 저장된 입력 및 출력 데이터를 읽어 들이고 파라미터 추정을 하여 2차모델에서 8차모델까지의 시스템 전달함수를 구한다. 파라미터 추정법에서 구한 모델은 이산시간영역에서의 모델이므로 bilinear transform을 사용하여 s영역의 전달함수를 구한다. 이 전달함수를 이용하여 MATLAB으로 시뮬레이션을 하고 시뮬레이션 영역에서 구형파를 발생시켜 모델에 입력을 주면 출력을 구할 수 있고 이를 다시 2KHz로 샘플링하면 시뮬레이션상의 출력을 구할 수 있다. 이 시뮬레이션 출력과 실험상의 출력을 비교하는 신호오차테스트를 수행한다. 신호오차테스트의 식은 다음과 같다.

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

여기서, $y_k(t)$ 는 실험상의 샘플링 된 출력이고 $S_k(t)$ 는 시뮬레이션상의 샘플링 된 출력이며, n 은 샘플링 된 데이터의 개수이다. 이 식(1)을 이용하여 평균오차값이 가장 적은 최적의 모델차수를 구하게 된다.

3.3 최소자승법에 의한 이산시간 영역모델의 파라미터 추정법

모델의 파라미터 추정법은 다음과 같이 유도된다. 입력신호와 출력신호는 다음의 식(2)과 같은 차분방정식으로 나타내진다. 이 차분방정식은 입력신호의 잡음을 무시하고 입력 및 출력값의 초기조건을 영으로 가정하여 유도된다.

$$\begin{aligned} y(k) + a_1y(k-1) + \dots + a_my(k-m) \\ = b_1u(k-d-1) + \dots + b_mu(k-d-m) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $y(k)$ 는 출력이고 $u(k)$ 는 입력이다. 위의 차분방정식을 z변환하고 정리하면 식(3)을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} \frac{Y(z)}{U(z)} &= \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} z^{-d} \\ &= \frac{b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m}}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_mz^{-m}} z^{-d} \end{aligned} \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} y(k) + a_1y(k-1) + \dots + a_my(k-m) \\ - b_1u(k-d-1) - \dots - b_mu(k-d-m) = e(k) \end{aligned} \quad (4)$$

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 $y(k|k-1)$ 을 구하면 식과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} y(k|k-1) &= -a_1y(k-1) - \dots - a_my(k-m) \\ &\quad + b_1u(k-d-1) + \dots \\ &\quad + b_mu(k-d-m) = \psi^T(k)\theta \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 데이터벡터 $\psi^T(k)$ 는

$$\begin{aligned} \psi^T(k) &= [-y(k-1) \dots -y(k-m) \\ &\quad | u(k-d-1) \dots u(k-d-m)] \end{aligned} \quad (6)$$

이고, 파라미터벡터 θ 는

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

이다.

식(4)과 식(5)에서

$$y(k) = \phi^T(k)\theta(k-1) + e(k) \quad (8)$$

이 된다. 따라서,

$$e(k) = y(k) - \phi^T(k)\theta(k-1) \quad (9)$$

최소자승법을 적용하면, 오차인 $e(k)$ 의 제곱의 합을 구하는 식은 식(10)이고, 이 값을 최소화 되게 하기 위해 이를 미분하면 식(11)이 되고 정리하면 식(12)을 얻게 된다.

$$V = \sum_{k=m+d}^{m+d+N} e^2(k) = e^T(m+d+N)e(m+d+N) \quad (10)$$

$$\frac{dV}{d\theta} = -2\phi^T[y - \phi\theta] = 0 \quad (11)$$

$$\theta = [\phi^T\phi]^{-1}\phi^Ty \quad (12)$$

여기서, N 은 측정 시간이다. 식(12)을 사용하여 입력과 출력으로 구성된 데이터 매트릭스 ϕ 와 출력 매트릭스 y 를 대입하여 미지의 파라미터를 추정한다. MATLAB에서 사용한 프로그램은 식(12)의 행렬식을 계산하는 알고리즘을 갖고 있고, 신호 오차 테스트에서 결정된 모델구조를 이용하여 파라미터를 추정할 수 있다.

이 때 사용된 입력은 30Hz, 60Hz의 구형파이고 듀티는 40%, 50%, 60%, 70% 으로 설정하였다. 신호 오차 테스트를 이용하여 모델의 차수를 결정하고 결정된 모델 차수를 이용하여 전달함수의 파라미터를 변수추정법을 사용하여 결정한다.

4. 결과 및 검토

신호 오차 테스트의 결과를 검토해보면 다음과 같다. Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9를 살펴보면 5차시스템에서 평균오차값이 작고 안정

화됨을 알 수 있다. Fig. 10은 8차가 됨을 알 수 있고 Fig. 11은 6차임을 알 수 있지만, 전체적으로 보면 A/T용 솔레노이드 밸브는 5차시스템임을 알 수 있다. 이는 2절에서 이론적으로 구한 전체차수 5차와 일치하는 것도 알 수 있다.

Fig. 12에서 Fig. 15는 A/T용 솔레노이드 밸브를 5차시스템으로 결정하고 입력주파수를 30Hz, 60Hz로 듀티는 40%, 50%, 60%, 70%로 변경하면서 시물레이션 한 결과로서, 오차가 작은 것을 제시하였으며 실험값과 잘 일치하고 있음을 보여준다. 이 그림에서 실선은 실험값이고 점선은 시물레이션값이다. 그리고 제시한 결과의 전달함수는 다음과 같다.

30Hz 70% duty 일 때,

$$\frac{-0.012s^5 + 215.325s^4 - 1.76 \times 10^6 s^3 + 7.22 \times 10^9 s^2 - 1.47 \times 10^{13} s + 1.28 \times 10^{16}}{s^5 + 5.42 \times 10^3 s^4 + 2.24 \times 10^7 s^3 + 2.82 \times 10^{10} s^2 + 2.6 \times 10^{13} s + 6.13 \times 10^{15}}$$

30Hz 60% duty 일 때,

$$\frac{-0.013s^5 + 261.835s^4 - 2.26 \times 10^6 s^3 + 9.54 \times 10^9 s^2 - 1.97 \times 10^{13} s + 1.71 \times 10^{16}}{s^5 + 5.68 \times 10^3 s^4 + 2.41 \times 10^7 s^3 + 3.09 \times 10^{10} s^2 + 2.98 \times 10^{13} s + 8.16 \times 10^{15}}$$

60Hz 70% duty 일 때,

$$\frac{-0.008s^5 - 49.24s^4 - 5.25 \times 10^5 s^3 + 4.56 \times 10^9 s^2 - 7.69 \times 10^{12} s + 1.21 \times 10^{16}}{s^5 + 5.42 \times 10^3 s^4 + 2.77 \times 10^7 s^3 + 3.7 \times 10^{10} s^2 + 2.81 \times 10^{13} s + 5.22 \times 10^{15}}$$

60Hz 60% duty 일 때,

$$\frac{-0.025s^5 + 394.69s^4 - 3.86 \times 10^6 s^3 + 1.52 \times 10^{10} s^2 - 2.51 \times 10^{13} s + 2.95 \times 10^{16}}{s^5 + 9.33 \times 10^3 s^4 + 4.88 \times 10^7 s^3 + 9.9 \times 10^{10} s^2 + 7.02 \times 10^{13} s + 1.28 \times 10^{16}}$$

이다.

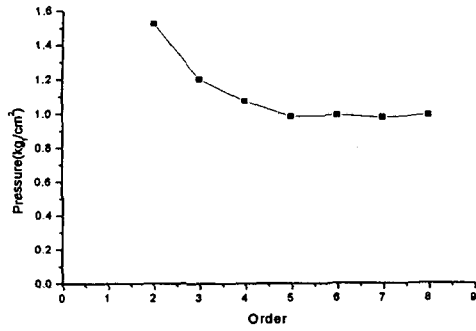


Fig. 4 Result of signal error test by 30Hz, 40% duty input

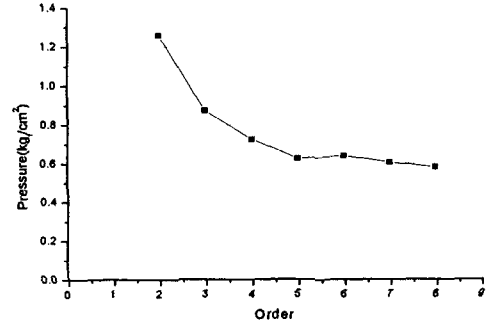


Fig. 7 Result of signal error test by 30Hz, 70% duty input

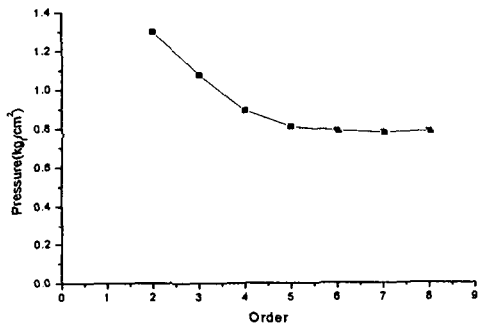


Fig. 5 Result of signal error test by 30Hz, 50% duty input

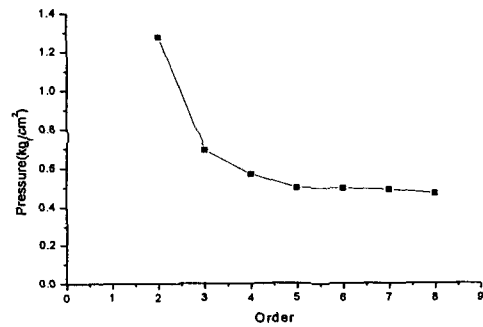


Fig. 8 Result of signal error test by 60Hz, 40% duty input

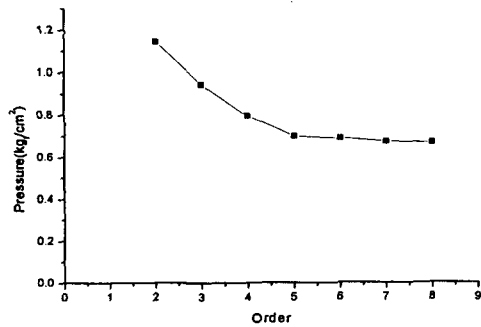


Fig. 6 Result of signal error test by 30Hz, 60% duty input

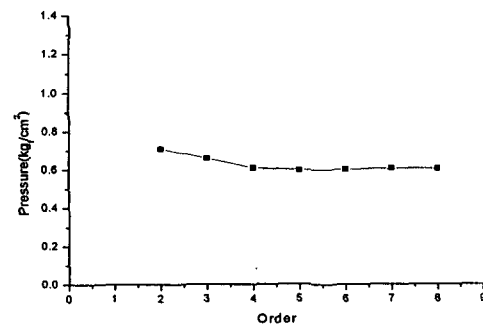


Fig. 9 Result of signal error test by 60Hz, 50% duty input

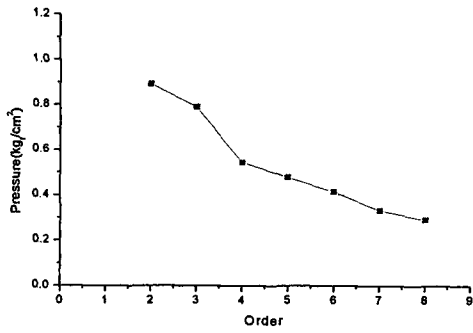


Fig. 10 Result of signal error test by 60Hz, 60% duty input

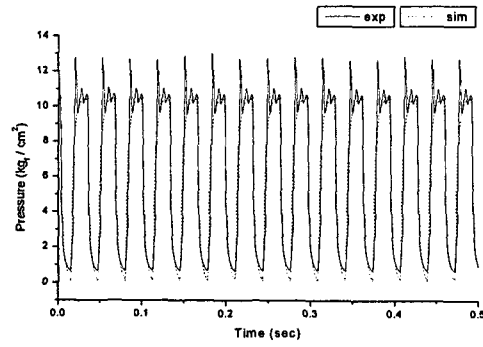


Fig. 13 Comparison of simulated data with experimental data by 30Hz, 60% duty input

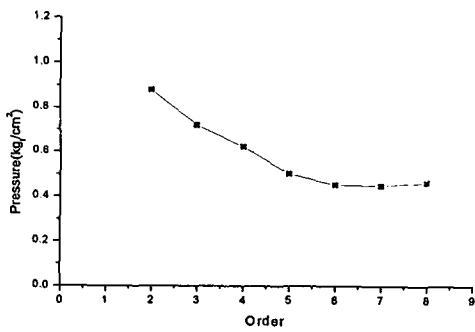


Fig. 11 Result of signal error test by 60Hz, 70% duty input

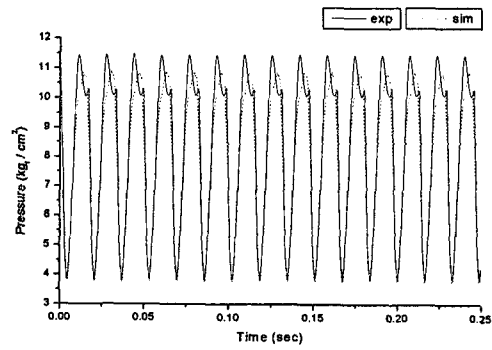


Fig. 14 Comparison of simulated data with experimental data by 60Hz, 70% duty input

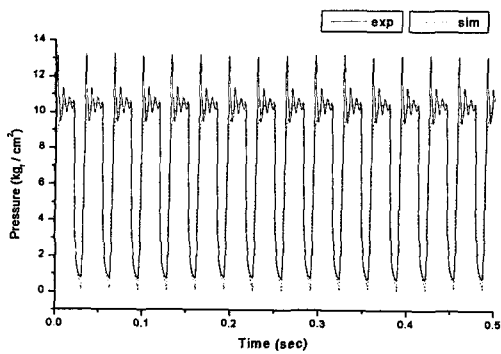


Fig. 12 Comparison of simulated data with experimental data by 30Hz, 70% duty input

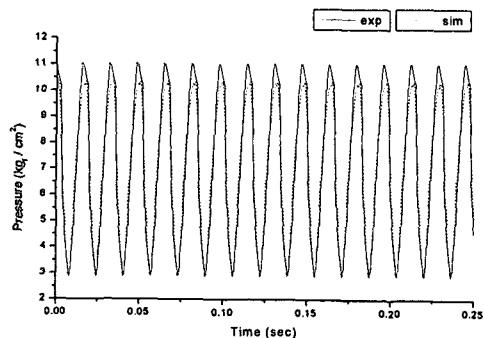


Fig. 15 Comparison of simulated data with experimental data by 60Hz, 60% duty input

5. 결론

이산시간 영역에서 A/T용 솔레노이드 밸브의 모델을 가정하여 주파수 30Hz, 60Hz에 40%, 50%, 60%, 70% 듀티인 구형파 입력을 이용하여 변수추정법을 수행하였고, 이 결과를 이용하여 모델의 차수를 결정하기 위한 신호오차테스트를 수행하여 솔레노이드 밸브가 5차시스템임을 알았다. 5차시스템을 모델의 차수로 정하고 변수추정법을 이용하여 파라미터를 구하고 최적의 전달함수를 구했다. 이 전달함수를 이용하여 시뮬레이션 출력값과 실험의 출력값을 비교한 결과 비교적 잘 일치하였다. 따라서 이론적 해석방법으로는 구하기 힘든 A/T용 솔레노이드 밸브의 특성을 실험적 해석방법인 변수추정법을 이용하여 간단하게 시스템의 전체 전달함수를 구할 수 있었다. 이러한 변수추정법은 향후 시스템 제어기 설계에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Isermann, R., Identifikation Dynamischer Systeme Band 1, 2, Springer-Lehrbuch, 1991.
2. Lennart Ljung, System Identification, Second Edition, Prentice Hall, 1999.
3. Son, W. C., "Analysis of the Shifting Control Pressure of Hydraulic Circuit of Automatic Transmission," Hanyang University, Master's Thesis, 1993.
4. Unbehauen, H. & Goehring, B., "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.