

유압시스템의 궤적 추종 시뮬레이션 모델 개발

최 종 환*

*부경대학교 기계공학부

Development of Simulation Model for Trajectory Tracking on Hydraulic System

Jong-Hwan Choi*

School of Mechanical Engineering, Pukyong National University

Abstract : The hydraulic system have been used much in a heavy machine which high power source is desired. In the case of the heavy press machine and the injection molding machine, the use of the hydraulic power is essential especially for increasing productivity and getting the good products. Because the hydraulic circuit is very complex and the system parameters are uncertain, the development of the simulation model for hydraulic system is not easy in the heavy machine. In this case, Many researchers have used a commercial program for analysis and development in a major field of study. In this paper, the aim is to develop the simulation model of the hydraulic system with various commercial program for trajectory tracking. And adaptive control method is applied to the simulation model for the trajectory tracking of a cylinder motion. Load on the cylinder is modeled in ADAMS program, the hydraulic circuit including pump, spool valve and cylinder is modeled in AMESim program and a controller is designed in MatLab/simulink program. The suggested model is applied for the tracking of a cylinder motion, and through computer simulation, its trajectory tracking performance is illustrated.

Key Words : AMESim, ADAMS, MatLab/simulink, hydraulic system, data interface, adaptive control

1. 서 론

유압펌프에서 토출되는 고압의 작동유를 에너지 원으로 하는 유압시스템은 높은 동력원이 요구되는 건설 장비에서 많이 사용되고 있다. 특히 부하가 큰 기계를 빠른 작업속도로 정위치하여 우수한 품질의 제품을 대량 생산하는 프레스 기계 및 사출성형기에서 유압시스템의 사용은 필수적이다.

복잡한 유압시스템은 제어밸브의 비선형적 개구 특성과 유압실린더의 비선형적 요소뿐만 아니라 작동유의 체적탄성계수 등 정확히 추정하거나 묘사하기 어려운 비선형적 매개변수들이 많이 존재하여 수학적 해석에 의한 시뮬레이션 모델 개발이 쉽지 않고, 고정도 작업을 위한 유압시스템의 제어기 설

계에서도 시스템의 비선형과 불확실성을 고려한 강인 제어기 설계가 필요하다.

한편, 유체의 유동 해석과 구조 해석 및 동역학 해석 등 공학의 각 분야에는 다양한 상용 프로그램이 있었으나, 상용 프로그램의 가격과 컴퓨터 성능에 대한 한계로 한정된 사용자만이 프로그램을 사용하여 왔다. 그러나 전기·전자기술의 발달로 개인용 컴퓨터의 성능이 향상되고 다양한 형태의 연구비 지원으로 공학의 각 분야에서 상용 프로그램의 사용이 증가되고 있다. 시스템은 상호작용을 하는 복수의 요소들의 집합체이므로 시스템의 내구성 및 성능을 해석하기 위해서는 복수의 상용 프로그램을 사용하여 모델링하고, 온라인에서 각 프로그램의 데이터 인터페이스를 통하여 시뮬레이션을 실행하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 3개의 상용 프로그램인 ADAMS,

* 부경대학교 기계공학부
choijh2007@pknu.ac.kr

AMESim, MatLab/simulink를 동시에 데이터 인터페이스하여 유압실린더의 궤적 추종 시스템의 모델을 구축하고자 한다. 실린더 부하의 동적 상태는 ADAMS를 사용하여 모델링하고, 유압시스템은 유압 해석 전용 프로그램인 AMESim을 사용하여 모델링하고, 유압실린더의 궤적 추종을 위한 제어기 설계는 MatLab/simulink를 사용한다. 유압시스템은 비선형성이 강하고 모델에 대한 불확실성이 많으므로 실린더의 궤적 추종을 위하여 모델기준 적응제어기를 설계하도록 한다. 각각 구축된 모델을 동시에 데이터 인터페이스를 통하여 시물레이션하여 그 결과를 검토하도록 한다.

2. 인터페이스를 통한 모델 구축

본 연구에서는 유압실린더의 궤적 추종 시스템의 시물레이션 모델을 ADAMS, AMESim, MatLab/simulink를 사용하여 구축하고, 모델기준 적응제어기를 설계하여 프로그램 상호간의 데이터 인터페이스를 통하여 시물레이션 한다.

Fig. 1은 유압실린더의 궤적 추종을 위한 유압시스템 및 상용 프로그램을 사용한 모델링 부분을 나타내고 있다. 실린더의 부하는 ADAMS 프로그램을 사용하여 모델링하고, 유압시스템은 AMESim 프로그램을 사용하여 모델링하며, 제어기 설계는 MatLab/simulink를 사용하여 모델링한다.^{4,5)}

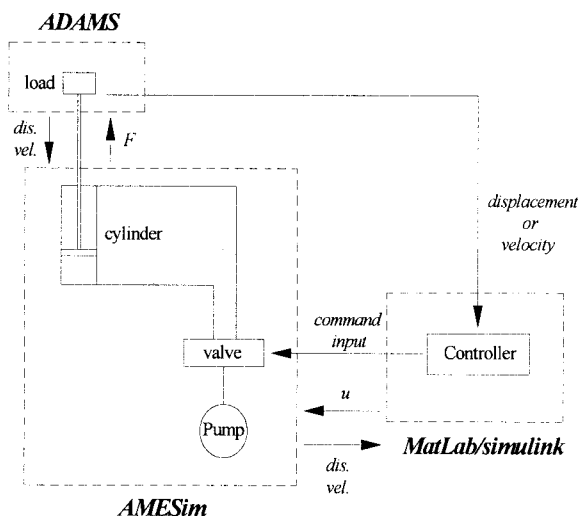


Fig. 1. Simulation model for trajectory tracking of hydraulic system

2.1. ADAMS와 AMESim 인터페이스

Fig. 2는 ADAMS와 AMESim 사이의 인터페이스 과정을 나타내고 있다. ADAMS 프로그램에서 실린더 부하를 모델링한 후 인터페이스 모델을 생성하면 확장자가 *.inf, *.adm, *.cmd인 3개의 파일이 생성된다. inf 파일에는 ADAMS에서의 path, 파일명, 입출력 변수 등 인터페이스 할 때 모델 사이에 결합되는 포괄적인 정보가 내재하고, adm 파일에는 시물레이션 할 때 solve의 필요한 정보가 있으며, cmd 파일은 시스템에 관련된 모든 정보와 ADAMS/View와 관련된 정보들이 있다. 유압시스템을 모델링한 AMESim 모델에 ADAMS 모델의 *.inf 파일을 불러들이고 인터페이스 환경을 설정한다.^{1,2)}

ADAMS 모델과 AMESim 모델에 대한 데이터 인터페이스 매개물은 유압실린더이고 물리량은 실린더에서 발생하는 유압력과 실린더 변위와 속도이다. AMESim 모델의 실린더에서 발생하는 유압력은 ADAMS 모델의 입력 요소가 되고, 유압력에 의하여 ADAMS 모델에서 생성되는 부하의 변위와 속도는 AMESim 모델의 입력 요소가 되어 온라인상에서 데이터를 인터페이스하면서 동시에 동작된다.

2.2. AMESim과 MatLab 인터페이스

Fig. 3은 AMESim과 MatLab/simulink 사이의 인터페이스 과정을 나타내고 있다. AMESim에서는 “SimuCosim” 블록을 사용하여 MatLab/simulink와 인터페이스하고, MatLab/simulink에서는 “S-Function” 블록을 지정하여 AMESim과 인터페이스 한다.^{1,2)}

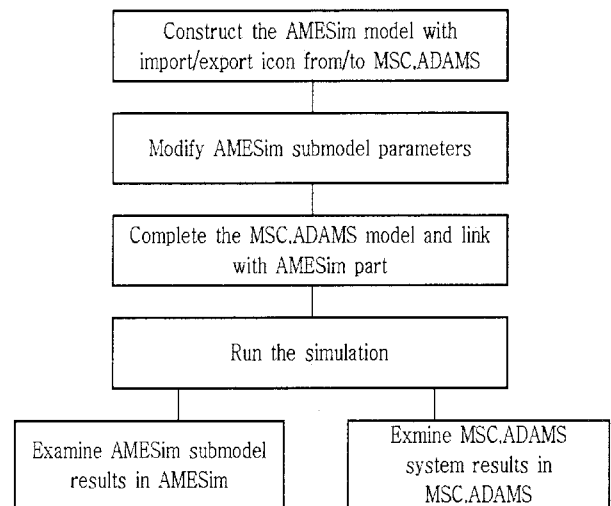


Fig. 2. Process of interface between AMESim and ADAMS

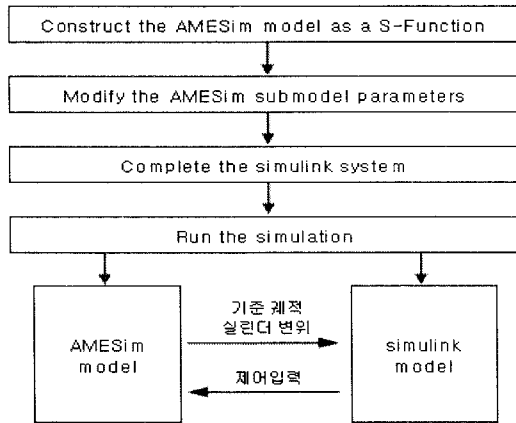


Fig. 3. Process of interface between AMESim and MatLab

인터페이스 데이터는 AMESim 모델에서 생성되는 유압실린더의 변위와 속도, MatLab/simulink 모델에서 생성되는 제어 입력이다. Fig. 4는 3개의 상용 프로그램을 사용하여 모델링한 결과를 나타내고 있다. ADAMS 모델은 AMESim 모델과 연계되어 있고, AMESim 모델은 MatLab/simulink 모델과 연계되어 있다. 데이터 인터페이스 매개변수에 대한 물리량 단위는 동일하게 설정하며 시뮬레이션 증분시간도 각각 동일하게 설정한다. 시뮬레이션의 동작은 MatLab/simulink에서 실행한다.²⁾

3. 모델기준 적응제어기 설계

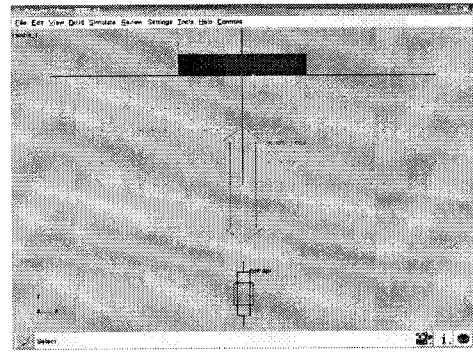
유압실린더의 궤적 추종시스템을 위하여 유압시스템의 비선형성과 불확실한 물리량을 고려하여 모델기준 적응제어기를 설계하도록 한다.

펌프에서 토출된 고압의 작동유는 스플밸브의 개구면적을 지나 유압실린더로 공급된다. 작동유의 유량을 오리피스 방정식을 적용하여 나타내면 식(1)과 같고, 연속방정식을 적용하여 유압실린더에서의 압력변화율을 나타내면 식(2)와 같다.³⁾

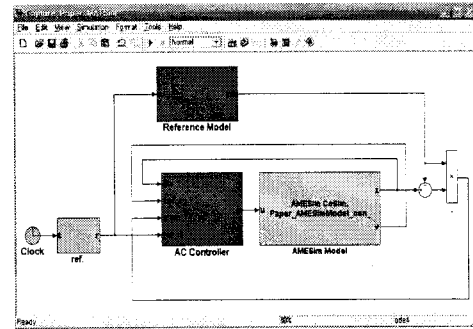
$$q = c_d A(u) \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (1)$$

$$q = A_p \dot{x} + \frac{V}{4\beta} \dot{p} \quad (2)$$

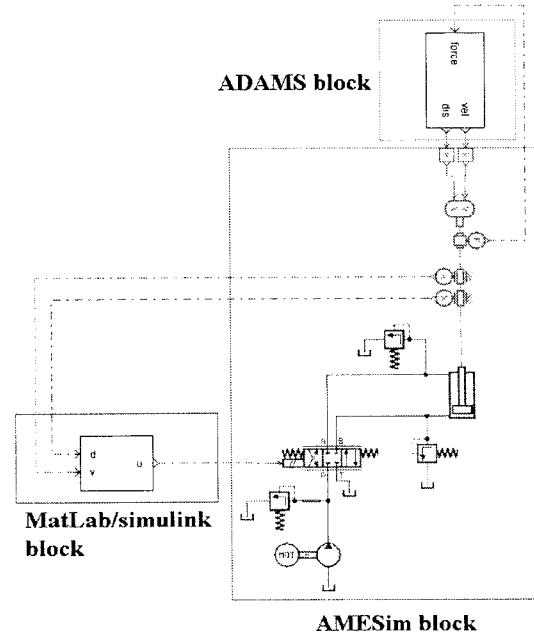
여기서 c_d , A_p , V , β 는 오리피스 상수, 실린더의 단면적 및 체적, 작동유의 체적탄성계수 등을 각각 나타내고, $A(u)$ 는 입력신호에 대한 스플밸브의



(a) ADAMS model



(b) MatLab/simulink model



(c) AMESim model

Fig. 4. Simulation model using AMESim, ADAMS and MatLab

개구면적을 나타낸다. x 는 실린더 변위, q 는 공급되는 유량, p 는 실린더 내에서의 압력을 나타낸다.

한편 유압실린더에서의 운동방정식을 나타내면 식(3)과 같다.

$$A_p p = M \ddot{x} + B \dot{x} + Kx \quad (3)$$

식(1)의 오리피스 방정식을 선형화하고, 식(2)~(3)을 라플라스 변환하여 스토폴밸브의 입력 신호에 대한 유압실린더의 변위의 전달함수를 나타내면 식(4)와 같다.

$$G(s) = \frac{X}{U} = \frac{b}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } a_0 &= k_2 K, & a_1 &= \frac{KV}{4\beta} + k_2 B + A_p^2 \\ a_2 &= k_2 + \frac{BV}{4\beta}, & a_3 &= \frac{MV}{4\beta} \\ b &= A_p k_1 \end{aligned}$$

모델기준 적응제어 기법을 적용하여 유압실린더의 변위를 제어하기 위한 블록선도를 나타내면 Fig. 5와 같다.^{4,5)}

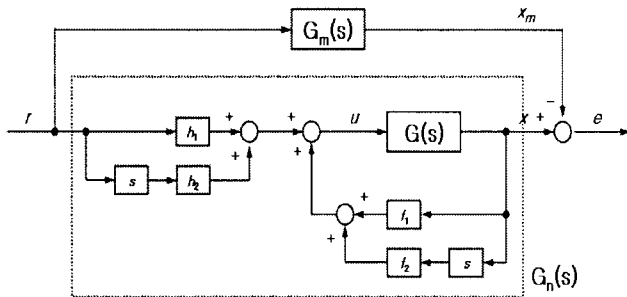


Fig. 5 Block diagram of cylinder control system using a adaptive controller

여기서 $G(s)$ 는 유압실린더 모델의 전달함수, $G_m(s)$ 는 기준 모델의 전달함수를 나타낸다. 적응 제어기는 피드포워드 제어기와 피드백 제어기로 구성되며, h_1 , h_2 , f_1 , f_2 는 제어기의 게인들을 나타낸다.

Fig. 5에서 실린더 기준 궤적에 대한 실린더 변위의 폐루프 전달함수를 나타내면 식(5)와 같고, 기준 모델은 ITAE의 기준에 근거로 하여 2차 전달함수로 선정하면 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} G_n(s) &= \frac{X(s)}{R(s)} \quad (5) \\ &= \frac{b(h_2 s + h_1)}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + (b f_2 + a_1) s + a_0 + b f_1} \end{aligned}$$

$$G_m(s) = \frac{X_m(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 1.4142 \omega_n s + \omega_n^2} \quad (6)$$

적응 제어시스템에서는 유압실린더의 폐루프 전달함수와 기준 모델과의 오차를 최소화시키므로 $G_n(s) \cong G_m(s)$ 을 만족해야 한다.

적응 오차를 유압실린더 모델의 출력과 기준 모델의 출력과의 오차로 정의하면 식(7)과 같다.

$$e(t, h_2) = x(t, h_2) - x_m(t) \quad (7)$$

한편, 평가함수를 적응 오차의 제곱의 평균으로 나타내면 식(8)과 같다.⁶⁾

$$J(h_2) = \frac{1}{2} \| e(t, h_2) \|^2 \quad (8)$$

제어기 게인 h_2 의 적응을 위하여 게인의 변화율에 경사 추정법을 적용하여 평가함수 기울기의 반대방향이 되도록 하면 식(9)와 같다.^{6,7)}

$$\begin{aligned} \frac{dh_2(t)}{dt} &= -\gamma_0 \frac{\partial J}{\partial h_2} = -\gamma_0 e \frac{\partial e}{\partial h_2} \quad (9) \\ &= -\gamma e x_m(t) \end{aligned}$$

여기서 γ 는 설계 변수인 적응 게인을 의미한다. 식(9)를 적분하여 제어기 게인 h_2 을 구하고, 나머지 게인들도 구하면 식(10)과 같다.

$$h_2(t) = h_2(0) - \gamma \int_0^t e x_m(t) dt \quad (10.a)$$

$$h_1(t) = \frac{a_2}{b} \omega_n^2 - 1.4142 \omega_n h_2(t) \quad (10.b)$$

$$f_2(t) = h_2(t) + \frac{1.4142}{\omega_n} h_1(t) - \frac{a_0}{b} \quad (10.c)$$

$$f_1(t) = h_1(t) - \frac{a_0}{b} \quad (10.d)$$

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

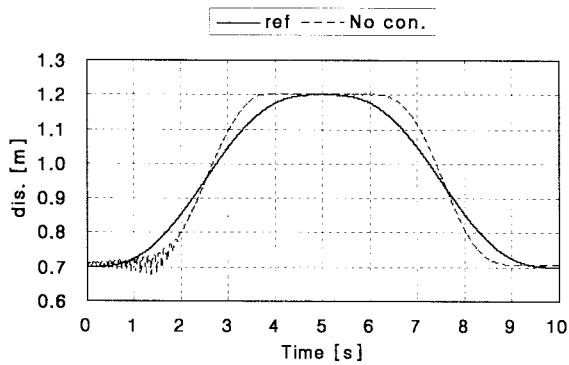
부하가 4[ton]인 유압실린더를 동작시키는 이동거리를 5[m]로 설정하고 10[s] 동안 상승과 하강을 수

행하도록 하였다. 유압실린더 변위의 허용 절대오차 범위는 3[cm] 이내로 선정하였으며, Table 1에는 시뮬레이션에서 사용된 유압시스템의 물성치를 나타내고 있다.

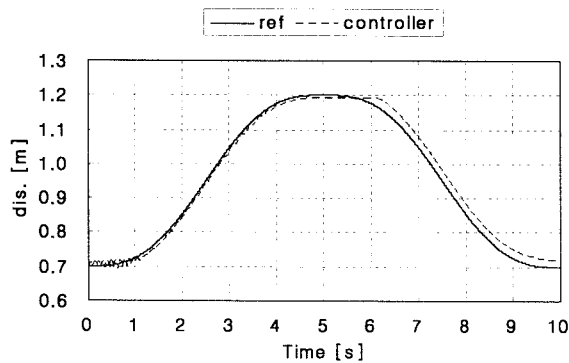
Table 1. Parameters used in simulation for hydraulic system

para.	value	para.	value
M	4000 [kg]	d1	140 [mm]
β	17000 [bar]	d2	95 [mm]
density	850 [kg/m ³]	stroke	1.5 [m]
viscous friction	500 [N/(m/s)]	x(0)	0.7 [m]
kinematic viscosity	51 [cSt]	Ps	320 [bar]

시뮬레이션 결과 검토는 유압실린더의 궤적 추종 시스템에서 제어기를 설계하지 않은 경우와 적응제어기를 설계한 경우 실린더의 변위를 비교하도록 한다. Fig. 6은 기준궤적과 실린더의 변위를 나타낸다. 제어기가 설계되지 않은 경우 시뮬레이션 초기



(a) without controller



(b) with controller

Fig. 6. reference trajectory and cylinder trajectory for simulation model of hydraulic system

에 실린더 변위는 진동을 하며 오차가 증가되고, 실린더 속도의 부호가 변하는 시점에서 오차가 증가하고 있다. 유압실린더의 부하가 크기 때문에 시간지연의 영향이 큰 것으로 여겨진다. 적응제어기를 설계한 경우 시간지연이 감소되고 기준 궤적에 대한 추종성이 향상되었음을 알 수 있다. Fig. 7은 제어기의 유무에 따른 제어입력을 나타낸다. 유량제어 밸브를 동작시켜 실린더 변위를 제어할 때 유량은 실린더의 속도와 관계하므로 제어기를 설계하지 않은 경우에 스톱밸브의 제어입력은 기준 궤적의 속도 성분을 이용하여 선정하였고, 제어기가 설계된 경우에는 모델기준 적응제어기법에 근거하여 제어입력을 생성하였다. Fig. 8은 기준궤적과 실린더 변위와의 절대오차를 나타낸다. 제어기가 없는 경우 절대오차의 최대값은 약 7[cm]로 나타나고 주기적으로 변하고 있음을 알 수 있다. 그러나 제어기를 설계한 경우 절대오차의 최대값은 약 3[cm]로 제어기 설계사양을 만족하고 있으며 절대오차의 변화량도 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다.

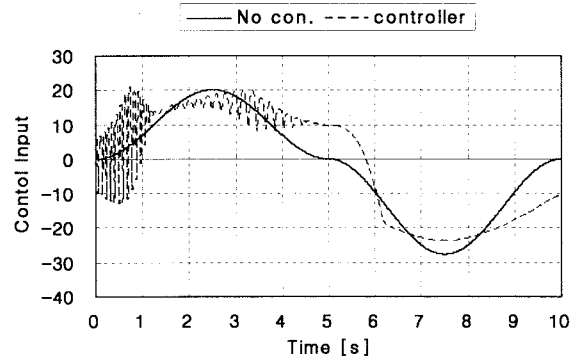


Fig. 7. Control input of spool valve for simulation model

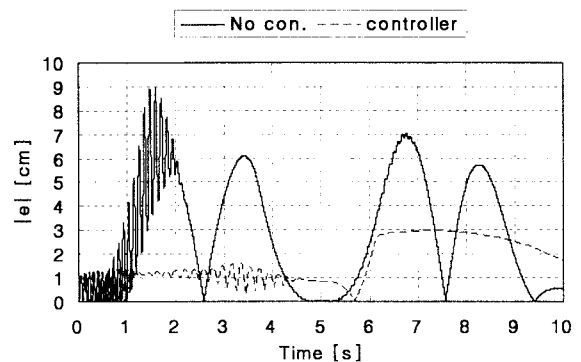


Fig. 8. Absolute error between reference trajectory and cylinder trajectory

5. 결 론

본 연구에서는 3개의 상용 프로그램을 사용하여 유압실린더의 궤적 추종 시스템의 시뮬레이션 모델을 개발하였고, 온라인상에서 데이터 인터페이스를 통하여 유압실린더의 변위를 기준궤적에 추종하도록 하였다. 시뮬레이션을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 비선형성과 불확실성이 존재하는 유압시스템에서 시뮬레이션 모델의 신뢰성을 높이기 위하여 유압전용 해석 프로그램인 AMESim과 동특성 해석 프로그램인 ADAMS와 제어기 설계가 용이한 MatLab/simulink를 사용하였다. 3개의 모델을 동시에 데이터 인터페이스하여 유압실린더의 변위를 기준궤적에 추종하도록 하는 시뮬레이션 모델을 구축하였다.

2. 유압실린더의 궤적 추종 시스템에서 제어기를 설계하지 않은 경우에 시스템의 시간지연으로 실린더 변위와 기준궤적과의 오차가 크게 발생하지만, 적응제어기를 설계한 경우 시스템 설계사양인 오차 범위를 만족하고 있음을 확인하였다. 또한 적응 제어기를 설계할 때 적응 게인 γ 의 영향보다는 기준 모델의 절점 주파수 ω_n 과 h_2 의 초기값의 영향이 크다는 것을 확인 할 수 있었다.

3. 대형 프레스 기계 및 사출성형기 또는 굴삭기와 같은 건설 중장비를 동작시키는 유압시스템을 수학적 해석에 의하여 신뢰성이 높은 시뮬레이션 모델로 구축하는 것은 매우 힘든 작업이 될 것으로 예상된다. 그러나 본 연구의 결과에서 보인 바대로 다수의 상용 프로그램을 사용하여 모델링하고, 온라인상에서 인터페이스하여 모델의 동특성을 검토한다면 복잡한 기계에 대하여 신뢰성이 높은 모델을 어렵지 않게 구축될 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) AMESim User's Manual ver. 4.2, IMAGINE, 2004.
- 2) AMESim, MATLAB/Simulink interface ver. 4.2, IMAGINE, 2004.
- 3) Merritt, H. E., Hydraulic Control System, New York:Wiley, 1967.
- 4) Chiang, M. H., Adaptive Achsregelung für Hydraulikbagger, PhD thesis, Aachen Techn.

Hochsch., 1998.

- 5) Choi, J. H., "Wheel Slip Control of ABS using Adaptive Control Method", Journal of KSMPE, Vol. 5, No. 3, pp.71-79, 2006.
- 6) Bu. F., Yao. B., "Observer Based Coordinated Adaptive Robust Control of Robot Manipulators Driven by Single-Rod Hydraulic Actuators", Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp.3034-3039, 2000.
- 7) Astrom, K. J., Adaptive Control, Addison-Wesley Publishing Company, 1995.