

외란관측기를 이용한 유압굴삭기 붐·아암 시스템의 궤적추적제어 Trajectory Tracking Control of a Boom·Arm System of Hydraulic Excavator Using Disturbance Observer

조승호·안건형

S. H. Cho and G. H. Ahn

Key Words : Hydraulic Excavator(유압굴삭기), Disturbance Observer(외란관측기), Trajectory Tracking Control(궤적추적제어), PI controller(PI 제어기)

Abstract : This paper deals with the issue of trajectory tracking control of a hydraulic excavator using disturbance observer in order to compensate external disturbances occurring from coupling between attachment, asymmetry of a single rod cylinder, and deadzone of main control valve. Disturbance compensation control system with disturbance observer has been constructed for the boom and arm respectively. Simulation results were compared with experimental results to validate the computer simulation system of hydraulic excavator itself. Computer simulation shows that disturbance compensation control is effective for compensating system nonlinearity and thus improves positioning accuracy and trajectory tracking performance. Steady state error has been decreased by adding PI controller to this control scheme.

기호 설명

- A_h, A_r : 실린더 헤드측, 로드측 단면적
- θ_r, θ : 관절 목표각변위, 관절 각변위
- K_θ : 각도-전압 변환 비례계인
- J_L : 회전 질량 관성모멘트
- $d_l (= d_h - d_r)$: 실린더 부하압력
- d_h, d_r : 실린더 헤드측, 로드측압력
- D : 관절의 점성 마찰계수
- q_l : 부하 유량
- z : 스톱 변위
- k_z, k_{p_i} : 유량계인, 유량압력계수

1. 서 론

유압 굴삭기는 인간의 팔에 유사한 구조를 가지는

중부하 다관절 로봇이라 할 수 있으며, 굴삭작업을 주로 수행하는 장비이다. 굴삭작업은 운전자의 숙련된 기술을 필요로 하며 또한 상당한 피로와 위험을 수반한다. 따라서 굴삭작업의 고효율화, 작업환경 개선의 측면에서 굴삭작업의 부분적 자동화, 즉 반복되는 궤도굴삭의 경우에는 어느 정도 조작을 간략화하여 컴퓨터 입력에 의한 자동제어가 요망된다. 유압 굴삭기는 액추에이터가 직접적으로 부하 변동의 영향을 받고, 각 관절 상호간에는 원심력, 코리올리력 등의 강한 비선형 간섭(coupling)이 존재하고 있으며, 편로드 실린더의 비대칭성과 주 제어밸브(Main Control Valve)의 데드존, 밸브 개구면적의 비대칭성 등과 같은 유압시스템 내부 고유의 비선형성을 내재하고 있다. 따라서 서보계를 구성하는데 있어서 안정성면에서 루프계인을 크게 하는 것은 어렵고, 그 결과 충분한 위치결정 정밀도를 확보할 수 없는 등의 문제가 따른다. 또한 다양한 작업환경에 따라 외란의 변동이 크고 또한 그에 따른 파라미터의 변동이 큰 경우에는 페루프 제어만으로는 충분한 강인성과 안정성을 동시에 확보하지 못한다. 그리고 비용면에서 큰 규모의 연산 시스템이 소요되는 제어는 유압 굴삭기에는 부적절하다^{1,2)}.

본 논문에서는 기 개발된 굴삭기 동특성 시뮬레이

접수일 : 2004년 1월 12일

조승호(책임저자) : 홍익대학교 공과대학

기계 시스템디자인공학과

E-mail: shcho@wow.hongik.ac.kr, Tel : 02-320-1682

안건형 : 우신금융

선용 소프트웨어³⁾를 사용하여 실제 굴삭기를 구현하고 이를 제어대상 플랜트로 설정하였다. 그리고 상부선회체와 버킷을 고정하고, 붐과 아암의 2축 제어를 위하여 붐과 아암 각각에 외란 관측기(Disturbance Observer)를 사용한 외란 추정 보상형 제어계¹⁾를 구성하였다. 관측기제인의 조정을 통하여 실제 루프의 비례제어제인을 높이지 않고 즉, 안정성을 해치지 않고 비교적 용이하게 시스템의 고강인성을 얻고, 비선형성을 보상하는 것을 검토하였다. 그리고 이것을 유압 굴삭기의 고정도 위치결정 및 원래적 추적제어에 적용하였다. 작업장치와 유압회로 특성을 2장에서 간단히 소개하였고, 3장에서 외란관측기의 모델링 및 제어성능을, 4장에서 외란관측기의 제적추적제어 성능을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2. 작업장치와 유압회로특성

2.1 작업장치

유압굴삭기의 작업은 작업장치를 이루는 붐(boom), 아암(arm), 버킷(bucket)의 3관절과 몸체 부분의 선회 관절에 의하여 주로 수행되고, 붐, 아암, 버킷은 각각 붐 실린더, 아암 실린더, 버킷 실린더로 구동된다. 버킷 실린더와 버킷은 넓은 작업범위를 위해 4절 링크로 연결되어 있다.

일반적으로 작업장치의 운동방정식을 유도하는 방법은 크게 세 가지로 분류된다. 뉴턴-오일러 방법(Newton-Euler Method), 오일러-라그랑제 방법(Euler-Lagrange Method), 케인 방법(Kane's Method)⁴⁾이 있으며, 이 중 케인 방법은 시스템에 작용하는 일반화된 작용력(Generalized Active Force)이 일반화된 관성력(Generalized Inertia Force)과 같다는 원리를 이용하여 운동방정식을 전개해 나가며 시스템의 구속력은 서로 상쇄되어 일반화된 관성력에 영향을 미치지 않게 되므로 구속력을 계산하는 과정이 필요하지 않게 된다. 또한 케인법에 의한 운동방정식의 유도과정은 그 절차가 컴퓨터 프로그래밍하기 용이한 단계들로 구성되어 있으므로 실제로 응용가능한 시뮬레이션 패키지 개발에 있어 보다 실용적이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 오일러-라그랑제 방법과 케인 방법을 병용하였으며, 최종적으로 케인 방법을 이용한 시스템 운동방정식 코드 생성기인 Online Dynamics 사의 Autolev를 사용하여 작업장치의 동역학 모델을 구축하고 이를 전체

시스템에 이식하였다³⁾.

2.2 유압회로

본 연구에서 사용한 유압굴삭기⁵⁾는 2개의 가변용량형 액셀피스톤 펌프(variable displacement axial piston pump)에 의해서 구동된다. 각각의 펌프는 자기 펌프압력과 상대 펌프압력 그리고 회로로부터의 파일럿압력에 의해 사판각이 조절되어 토출유량이 제어된다. 주 제어밸브는 방향제어밸브로서 붐, 아암, 버킷을 각각 제어한다. 주 제어밸브는 리모트 컨트롤 밸브로부터의 파일럿압력에 의해 스펴의 위치가 제어되고 유로가 형성되어 각 작업장치의 유압 액츄에이터로 유량을 분배한다. 그리고 과부하에서 회로를 보호하기 위한 릴리프 밸브(relief valve), 유량의 역류방지를 위한 체크밸브(check valve) 등의 보조 밸브 류가 사용된다. 유압 모터는 상부 선회를 위한 스윙모터(swing motor), 추진을 위한 주행모터(driving motor)가 사용되며, 유압 실린더는 편로드 복동 실린더로서 2개의 붐 실린더, 1개의 아암 실린더, 1개의 버킷 실린더가 사용된다. 굴삭기 유압회로에서는 두 개의 유압 펌프 유량을 합류시켜 액츄에이터에 보냄으로써 파워를 증진시키고 유량 부족에 기인한 성능 저하를 방지하고 있다. 주 제어밸브를 이용한 굴삭기 유압회로에는 모두 9개의 주 제어밸브가 사용되는데 붐, 아암, 주행모터를 제어하기 위하여 각각 2개의 밸브가 사용되고 버킷, 선회모터, 옵션용으로 각각 1개씩의 밸브가 사용된다.

주 제어밸브는 중립 위치에서 바이패스(bypass) 회로를 갖는 3 위치 방향제어밸브가 사용된다. 주 제어밸브의 유량 배분은 스펴변위에 따른 개구면적(opening area) 특성에 따라 좌우되며, 비선형적으로 구성되어 있다. 비선형적인 개구면적 특성은 부하 자중에 의한 자유낙하와 공동현상(cavitation) 방지 및 작동기들의 복합동작 시 적절한 유량 배분을 위하여 작동기들의 부하 특성으로부터 결정된다. 이러한 의도적인 비선형성은 비선형적, 지능적인 제어기인 사람이 제어할 경우 좋은 제어성능을 보일 수 있다. 그러나 일반적인 제어기에 의한 제어의 경우 비선형성을 모두 고려할 수 없으므로 제어에 어려움이 있다. 특히 영점(중립위치) 부근의 일정 스펴변위 구간에서 개구면적이 영으로 유지되는 상황 즉, 데드존(deadzone)은 부하의 자중에 의한 자유낙하를 방지하기 위하여 만들어졌으나 제어 시 불감영역과 정상상태 오차를 발생시키는 주 요인으로서 제어성능

의 달성과 이론적 해석을 어렵게 한다.

비례제어 솔레노이드 밸브는 Fig. 1에 도시된 것처럼 입력전류에 상응하는 압력을 출력하여 주 제어 밸브의 스톱변위를 변화시킨다. 아암 좌측 주 제어 밸브의 개구면적선도가 Fig. 2에 도시되어 있다.

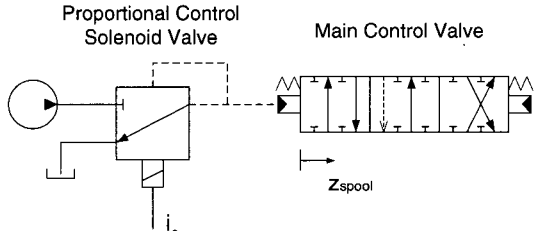


Fig. 1 M.C.V. and proportional control solenoid valve

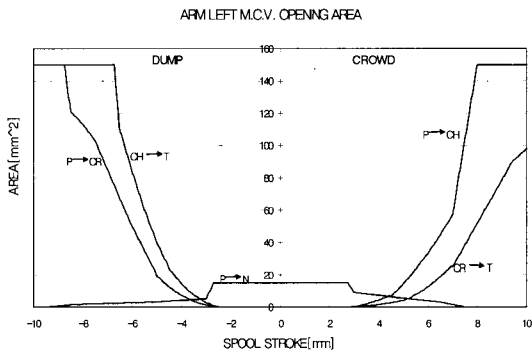


Fig. 2 Opening area curve of M.C.V.3)

비례제어 솔레노이드 밸브와 주 제어밸브의 수학적 모델링은 근사적으로 특성곡선을 사용하여, 제어 전류로부터 주 제어밸브의 스톱변위까지를 시정수 T_{psv} 의 1차 지연으로 모델링하였다. 즉, 제어전류 (i_c)에 의한 스톱의 정적변위 (z_{static})가 특성곡선으로부터 비례제어를 이용하여 산출되면, 이로부터 1차 지연의 동특성을 가지고 스톱변위 (z)가 발생한다고 간주하였다⁵⁾.

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{T_{psv}} (z_{static}(i_c) - z) \quad (1)$$

아울러 노드를 설정하고 각 노드에서의 연속방정식을 구성하여 압력을 계산하였다. 각 노드에 대한 연속방정식은 다음과 같다.

$$\Sigma Q_{in} - \Sigma Q_{out} = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{\beta} \frac{dP}{dt} \quad (2)$$

여기서, P , V 는 각 노드에 해당하는 검사체적의 압력과 체적이다.

2.3 시뮬레이션 및 실험

소프트웨어의 신뢰성을 검증하기 위하여 실제 굴삭기에 대한 실험을 수행하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 실험에 사용된 굴삭기와 컴퓨터의 설치환경이 Fig. 3에 나타나 있다. 본 연구에서 제어대상으로 설정한 굴삭기는 총중량 20 t, 버킷용량(평적) 0.60 m^3 , 최대굴삭반경 10,000 mm 인 모델이다.

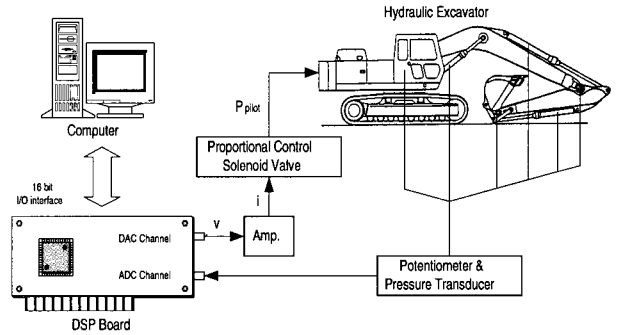
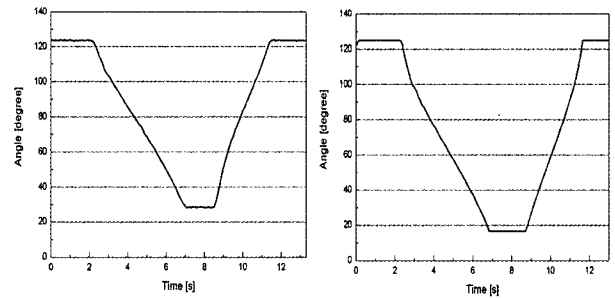
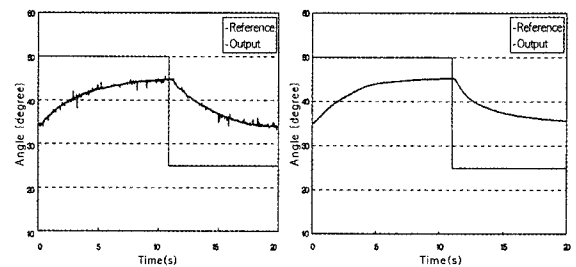


Fig. 3 Overall structure of experimental system

아암 실린더를 최소 스트로크에서 최대 스트로크까지 팽창시켰다가 다시 최소 스트로크까지 수축시켰을 때의 각변위에 대한 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. 아울러 비례제어 솔레노이드 밸브를 사용하여 폐회로 시스템을 구성하고,



(a) Experiment (b) Simulation
Fig. 4 Angular displacement of arm(open loop)



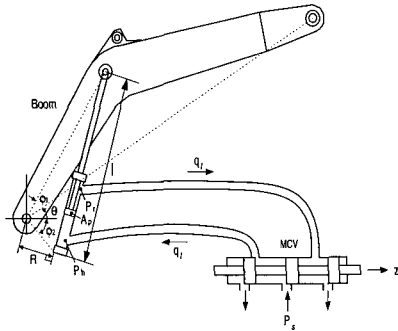
(a) Experiment (b) Simulation
Fig. 5 Angular displacement of boom(closed loop)

붐 위치제어의 실험 및 시뮬레이션 수행결과가 Fig. 5에 도시되어 있다. 예상대로 정상상태 오차가 발생하였고, 이는 붐 상승 시보다 하강 시에 더 심하다. 이 오차는 복합적인 외란에 기인한 것으로서 외란보상제어의 필요성을 시사한다.

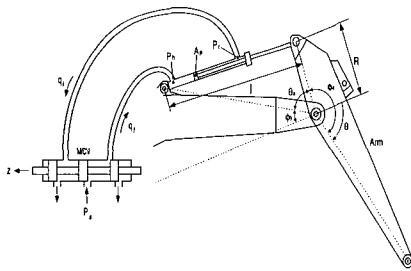
3. 외란관측기의 구성 및 제어

3.1 선형모델

외란관측기를 설계하기 위하여 유압굴삭기의 선형 모델을 유도하였다. 그리고 이를 이용하여 붐·아암 시스템에 대하여 각각 외란관측기를 구성하였다. 굴삭기 붐·아암 시스템의 개략도가 Fig. 6에 도시되어 있다. 주 제어밸브에서 공급되는 유량에 의하여 편로드 복동 유압 실린더가 구동된다.



(a) Boom driving system



(b) Arm driving system

Fig. 6 Schematics of boom and arm

압력이 작용하는 피스톤단면적은 실린더 헤드측과 로드측의 평균치를 사용한다.

$$A_p = (A_h + A_r) / 2 \quad (3)$$

이때 관절의 회전 중심점에서의 회전운동 방정식은 다음과 같다. 실린더와 회전 중심점간의 거리 R은 실제로는 각변위 θ 에 따라 비선형적으로 변화

하나 본 동작범위내에서는 일정하다고 가정한다.

$$A_p R p_l = J_L \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

또한, 밸브의 실린더 헤드측과 로드측 유량을 같다고 가정하여, 작동점 근방에서 선형화한 스톱 밸브의 유량 방정식은 다음과 같다.

$$\delta q_l = k_z \delta z - k_{p_l} \delta p_l \quad (5)$$

기름의 압축성을 무시하면, 연속방정식은 다음과 같다.

$$q_l = A_p \frac{dx_{cyl}}{dt} \quad (6)$$

실린더 변위와 작업장치 각변위의 관계는 다음과 같은 선형적인 관계로 가정한다. 여기서 ϕ_1, ϕ_2 는 기구학적인 상수이다.

$$x_{cyl} = R(\theta + \phi_1 + \phi_2) \quad (7)$$

그러므로 식 (6)와 식 (7)에 의하여 부하 유량은 다음과 같이 표현된다.

$$q_l = A_p R \frac{d\theta}{dt} \quad (8)$$

또한 증폭기(amplifier)와 비례제어 솔레노이드 밸브는 각각 게인 K_a, K_v 의 비례요소로 간주하여 Fig. 7에 도시된 위치피드백 제어계를 구성하고, 오차 $\theta_e (= \theta_r - \theta)$ 부터 출력 θ 까지의 개루프 전달함수는 위의 세 개의 식 (4) (5) (8)으로부터 다음의 2차 시스템으로 구하여진다.

$$\frac{\theta(s)}{\theta_e(s)} = \frac{C_2}{s(s + C_1)} \quad (9)$$

여기에서

$$C_1 = \frac{Dk_{p_l} + A_p^2 R^2}{J_L k_{p_l}}, \quad C_2 = \frac{K_\theta K_a K_v A_p R k_z}{J_L k_{p_l}}$$

여기에서 C_1, C_2 는 구성 파라미터 값에 오차와 불확실성 등이 존재하므로, 계단과 응답 실험과 시뮬레이션으로부터 과도특성이 비교적 일치하도록 결정하였다. 본 연구에서는 아암의 모델과 붐의 모델을 같게 설정하였다.

3.2 외란 관측기의 구성

외란추정 보상형 제어계의 구성이 Fig. 7에 도시되어 있다. 모델 근사에 따른 오차나 축간섭을 포함

하는 파라미터의 변동에 따른 시스템의 변동이 본 시스템의 등가외란으로 작용하는 것으로 고려하였다.

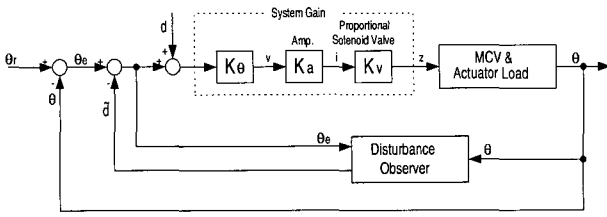


Fig. 7 Control system using disturbance observer

외란 d 를 상태변수의 하나로서 포함하는 시스템의 상태방정식은 아래와 같다.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B\theta_e \\ \theta = Cx \end{cases} \quad (10)$$

여기에서,

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ d \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -C_1 & 0 & C_2 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} C_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \ 1 \ 0]$$

이로부터 외란 관측기는 다음식으로 표현된다.

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + B\theta_e + k(\theta - \hat{\theta}) \\ \hat{\theta} = C\tilde{x} \end{cases} \quad (11)$$

$$\dot{\tilde{x}} = (A - kC)\tilde{x} + B\theta_e + k\theta \quad (12)$$

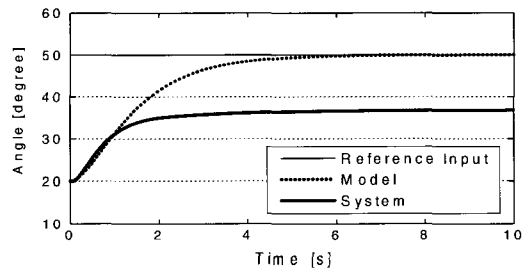
단, k 는 관측기 게인 벡터이다. 여기에서 \tilde{x} 는 상태변수의 추정치를 표시한다. 또한 외란 관측기의 극점은 복소평면에 있어서 실축 상에 가능한 한 좌측에 설정하고, 추정시간을 짧게 하는 것이 요망된다. 관측기 게인(observer gain; k_1, k_2, k_3)은 관측기 시스템의 상태변수 추정 속도와 안정성을 결정한다. 이 중 게인 k_3 는 외란의 추정에 대한 직접적인 응답 속도를 결정하게 된다. 따라서 최적의 외란 관측기 게인 값은 시스템과 외란에 대한 특성과 안정성에 따라 결정되어야 하며, 계산과 시뮬레이션을 통한 검증단계를 거쳐야 한다. 본 연구에서는 시뮬레이션의 시행착오를 거쳐 각축 $-50[\text{rad/s}]$ 의 삼중극점을 갖는 게인 값으로 결정하였다. 이에 따른 관측기 게인 벡터는 다음과 같다.

$$k = [k_1 \ k_2 \ k_3]^T = [7059.0 \ 147.0 \ 66930.82]^T$$

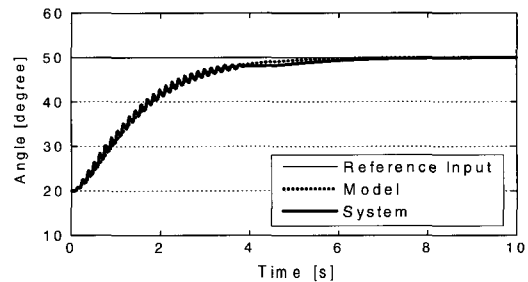
위치결정 정밀도에서의 외란 관측기의 효과를 확인하는 목적에서, 붐과 아암의 각각에 대하여 일정한 계단과 응답 시뮬레이션을 수행하였다. 편로드 실린더는 수압면적의 비대칭성에 의해 실린더 팽창 시와 수축 시의 응답이 다르다. 따라서 이를 고려하여, 팽창인 경우(Extending; Boom-up, Arm-crowd)와 수축인 경우(Retracting; Boom-down, Arm-dump), 그리고 각각에 대하여 외란 추정 보상형 제어를 하였을 때와 하지 않았을 경우의 총 4가지에 대하여 붐과 아암 구동 시스템의 계단과 응답 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 입력을 받지 않는 스윙 및 버킷은 초기위치에 고정하였다.

3.3 제어성능 시뮬레이션

먼저 실린더 팽창 시는 붐과 아암의 초기위치로부터 $+30^\circ$ 의 계단입력을 가한다. 시스템의 게인 값 $K_{sys} (= K_\theta K_a K_v)$ 는 응답의 과도 특성을 충분히 표현하고 외란 추정 보상의 효과를 검증하기 위하여 0.0002로 낮게 설정하였다. 또한 비례제어 솔레노이드 밸브와 주 제어밸브와의 응답의 시간지연은 실험에 의해 0.1초로 선정하였다. 붐과 아암에 대하여 위치피드백만 시킨 경우와, 여기에 외란 추정보상을 추가한 경우의 시뮬레이션 결과가 각각 Fig. 8, Fig. 9에 도시되어 있다.

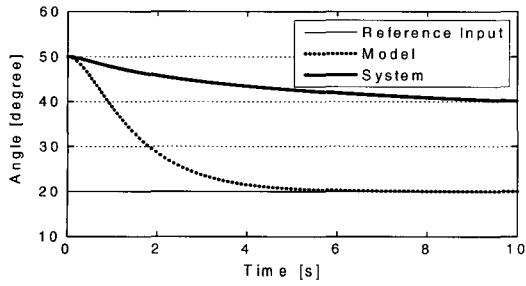


(a) without disturbance compensation

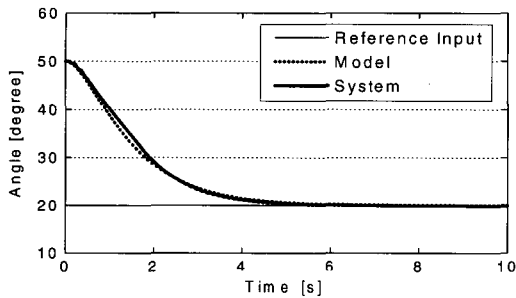


(b) with disturbance compensation

Fig. 8 Angular displacement during boom-up



(a) without disturbance compensation



(b) with disturbance compensation

Fig. 9 Angular displacement during boom-down

위치 피드백만 하였을 경우는 붐과 아암 각각의 주 제어밸브 개구면적 데드존에 의해 정상상태 오차가 발생하는 것을 볼 수 있으며, 외란 관측기는 이를 외란으로 판단하여 추정된 외란을 보상하는 제어신호를 피드백함으로써 각도 응답에 생기는 정상상태 오차는 없어지고 시스템응답이 모델응답에 추종하는 모습을 볼 수 있다. 실린더가 수축하는 경우는 붐과 아암에 초기위치로부터 -30° 만큼의 계단입력을 가하였다. 위치 피드백만 취한 경우에는 편로드 실린더의 비대칭성과 작업장치 자중을 고려한 미터-아웃회로로 인하여, Fig. 9(a)에 도시되어 있듯이 정상상태 오차는 팽창 시에 비해 더 크게 나타난다. 마찬가지로 추정된 외란을 보상하는 제어신호를 가함으로써 시스템의 비선형성에 따른 응답의 정상상태 오차는 사라지고 모델에 잘 추종하는 모습을 Fig. 9(b)에서 볼 수 있다.

4. 원궤적 추적제어

5.1 외란관측기를 이용한 P-제어

본 장에서는 Fig. 10에 도시된 버킷 선단의 궤적에 주목하여, 2축에 외란추정 보상형제어를 동시에 적용하여 원을 그리게 하는 궤적제어 시뮬레이션을 수행한다. 붐과 아암의 각도 목표치는 미리 아암 선단의 궤적으로부터 역기구학으로 구하여진다. 원은

반경 0.5 m이고, 원을 그리는 각속도는 ω 로서 좌회전에 $2\pi/30$ rad/s(1 회전 30초)의 목표치를 가한다. 위치 피드백만을 적용한 경우, 원의 궤적 시뮬레이션 결과가 Fig. 11에 도시되어 있다.

본 연구에서는 시스템 게인 K_{sys} 를 0.0002로 일괄적으로 적용하고 있다. 그러나 위치 피드백만 적용하였을 경우에는 주 제어밸브 데드존에 따른 정상상태 오차가 커서 각도의 응답이 나타나지 않는다. 따라서 이 경우에 한하여 5배, $K_{sys} = 0.001$ 로 게인 값을 증가시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 그럼에도 붐과 아암 시스템의 각도 응답은 느린 응답과 정상상태 오차가 여전히 존재함으로써 목표 궤적에 거의 추종치 못함을 볼 수 있다.

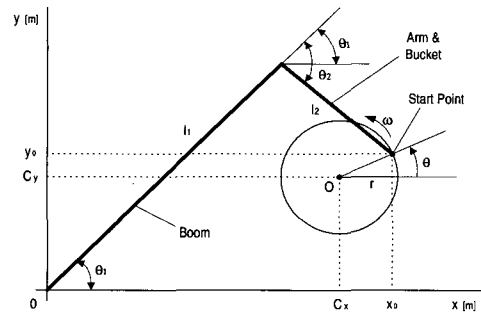


Fig. 10 Geometry of circular trajectory

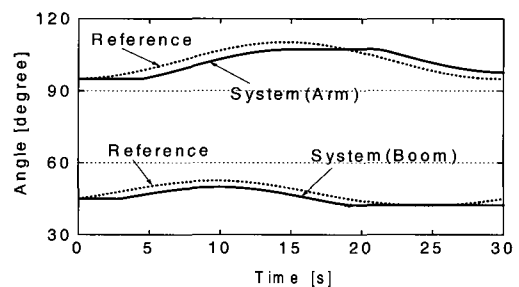
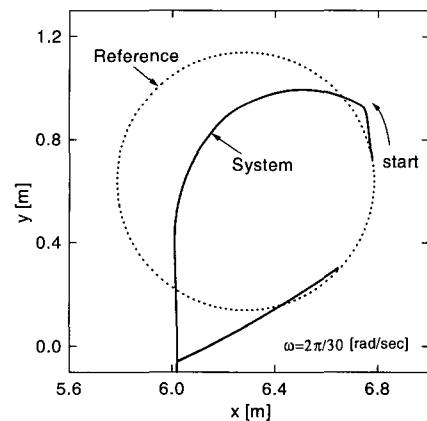


Fig. 11 P-control without disturbance compensation

다음은 2축 모두에 외란추정 보상기를 적용한 경우의 궤적제어 시뮬레이션 결과가 Fig. 12에 도시되어 있다. 낮은 비례게인에 의한 모델 선정으로 봄 상승-하강, 아암 오므림-펼침 시 초기응답의 지연이 보이나 외란 추정 보상기를 사용하여 얻어진 궤적은 대체로 원에 가까운 모습을 보인다.

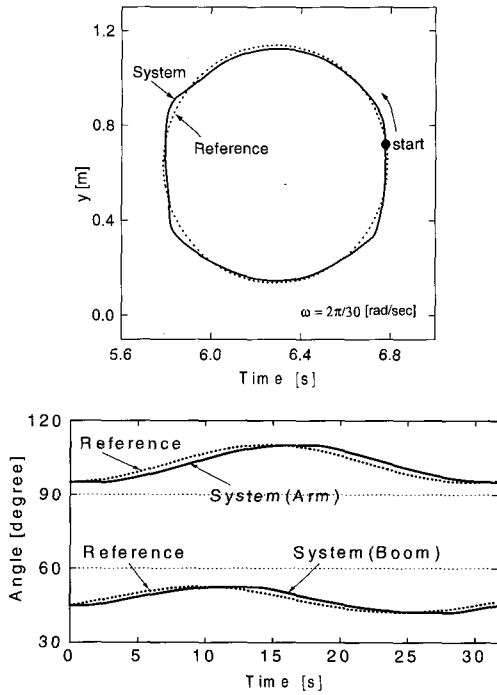


Fig. 12 P-control with disturbance compensation

5.2 외란관측기를 이용한 PI-제어

회전 각속도 ω 의 변화에 따른 시뮬레이션 결과가 Fig. 13에 도시되어 있다. 응답의 빠르기가 각속도 증가를 따라가지 못하여 목표궤적과의 상대적 오차가 점차 증가하는 모습을 보인다. 이는 모델 자체의 느린 응답성에 기인하는 것으로서, 따라서 외란 관측기에 PI 제어기를 부가하여 추적오차와 시간지연을 최소화 줄이면서 목표치에 빠르게 추종시키는 것을 시도한다.

이를 위한 제어계 블록선도가 Fig. 14에 도시되어 있다. 여기서 PI 제어기의 설계파라메타 K_p 와 T_I 의 수치는 추적오차가 충분히 작게 되는 값을 시뮬레이션의 시행착오에 의해 결정하였다. PI 제어기의 파라미터를 $K_p = 9.0$, $T_I = 250.0$ s 로 설정하여 단독으로 사용하였을 경우와 외란 추정 보상기와 병용하였을 때의 시뮬레이션 결과가 Fig. 15, Fig. 16에 각각 도시되어 있다.

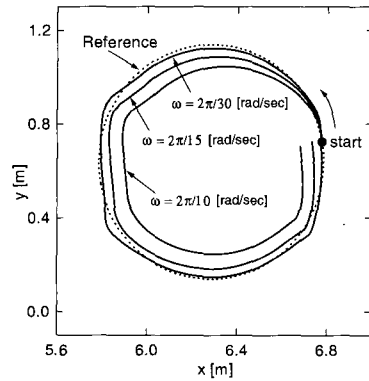


Fig. 13 Trajectories for a range of velocities with disturbance compensation

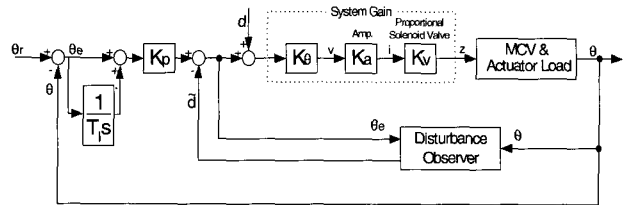


Fig. 14 PI control system combined with a disturbance observer

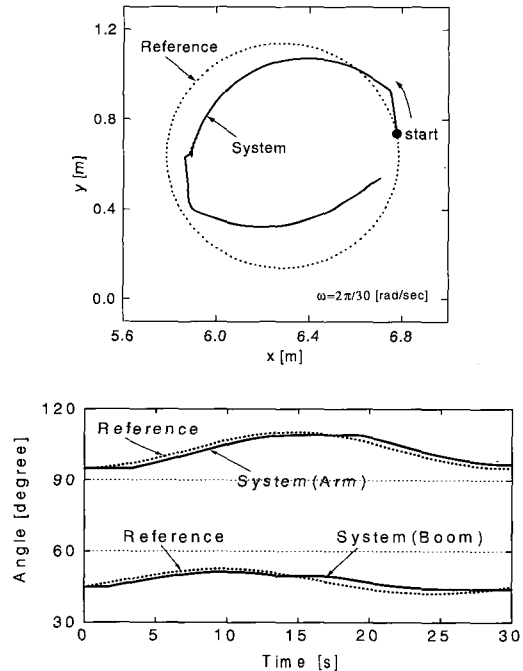


Fig. 15 PI control without disturbance compensation

PI 제어만의 경우는 봄의 상승-하강, 아암의 오므림-펼침 시에 따른 시스템의 비대칭성이 강하여 일률적인 게인 값 선정에 따른 목표궤적과의 큰 오차를 보이고 있다. 그러나 외란 추정 보상기에 PI 제

여기를 부가한 경우에는 시스템 각도 응답의 추적오차는 충분히 작아지며, 목표한 궤적에 거의 일치하게 되어 궤적 추종성이 보다 향상되어 있는 것이 보여진다.

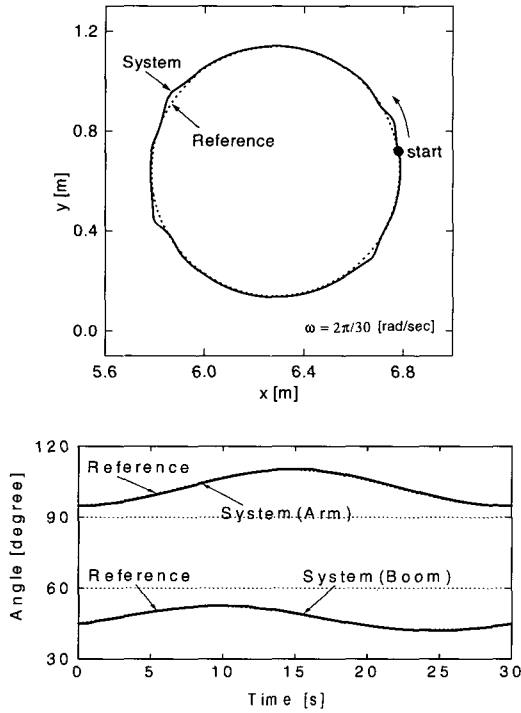


Fig. 16 PI control with disturbance compensation

5. 결론

본 연구에서는 외란관측기를 이용한 유압굴삭기의 위치 및 궤적추적제어에 대하여 고찰하였다. 그 과정에서 우선 제어대상 플랜트로 설정된 비례제어 솔레노이드밸브·붐·아암 시스템에 대한 개회로와 폐회로 제어실험을 수행하고 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 굴삭기 해석 소프트웨어의 성능을 검증하였다. 작업장치간의 상호 간섭이나 편로드 유압 실린더의 비대칭성 및 주 제어밸브 테드존으로부터 발생하는 비선형성 외란을 보상하기 위하여, 유압 굴삭기 붐과 아암의 각축에 대하여 외란 관측

기를 사용한 외란 추정 보상형 제어계를 구성하였다. 그리고 이를 굴삭기 전용 동특성 해석 소프트웨어를 사용하여 구현된 굴삭기 모델에 적용하여 위치 결정 정밀도 및 궤적 추종성을 향상시키는 것이 가능함을 보였다. 회전각속도 증가 시에도 외란 추정 보상기에 PI 제어기를 부가하여 추적오차를 작게 하여 궤적추종성을 보다 향상시켰다. 이 방법은 유압 시스템 고유의 비선형성에 대하여 매우 유효하고, 또한 알고리즘이 간단하여 연산시간도 적으므로 실시간에서 수행되는 유압 시스템 제어에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 1) Y. Shinichi, S. Masanori and I. Ken, “油壓ショベルのブーム,アーム系の高精度軌跡制御”, 日本機械學會論文集(C編), 62卷 593号, pp. 161~167, 1996.
- 2) T. Yochimura and K. Etokoro, “油壓ショベルの床掘操作性のシミュレーションにする研究”, 日本機械學會論文集(C編), 58卷 554号, pp. 3003~3010, 1992.
- 3) 이교일, 조승호, 강철구, “굴삭기 가상 기능품에 의한 실시간 모의 시험 시스템 개발”, 현대중공업 제 2차년도 최종보고서, 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소, 1998.
- 4) T. R. Kane and D. A. Levinson, “DYNAMICS : Theory and Applications”, McGraw-Hill, 1985.
- 5) 이시천, “유압 굴삭기의 수평정지작업을 위한 퍼지제어기 설계에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 박사 학위 논문, 1993.
- 6) 박종원, “굴삭기 작업장치 및 유압제어회로의 동특성 시뮬레이션”, 홍익대학교 대학원 석사 학위 논문, 1997.
- 7) 강순동, 허만조, “소형 유압 쇼벨암을 이용한 목표궤도추종제어에 관한 연구”, 한국정밀공학회지 제13권 제7호, pp.78~89, 1996.