

전기 유압 매니플레이터의 강건 힘 제어

안경관*, 조용래**, 양순용*, 이병룡*

Robust Force Control of a 6-Link Electro-Hydraulic Manipulator

Kyoung-Kwan Ahn*, Yong-Rae Cho**, Soon-Yong Yang*, Byung-Ryong Lee*

ABSTRACT

An electro-hydraulic manipulator using hydraulic actuators has many nonlinear elements, and its parameter fluctuations are greater than those of an electrically driven manipulator. So it is relatively difficult to realize not only stable contact work but also accurate force control for the autonomous assembly tasks using hydraulic manipulators. In this report, we applied a compliance control which is based on the position control by a disturbance observer for our manipulator system. And a reference trajectory modification method is proposed in order to achieve accurate force control even though the stiffness and position of environment change. Experimental results show that highly robust force tracking by a 6-link electro-hydraulic manipulator could be achieved under various environment conditions.

Key Words : Fluid Power Systems(유압 시스템), Impedance Control(임피던스 제어), Force Control (힘 제어), Disturbance Observer(외란 추정기), Hydraulic Manipulators(유압 매니플레이터), Dual Arm(듀얼 암), Multi Link(다관절)

1. 서 론

최근 정보통신기기의 급증으로 배전선의 보수 공사를 수행할 때, 송전을 멈추지 않고 공사를 수행하는 활선배전보수공사(Maintenance Task of Active Electric-Line, 이하 활선공사)가 증가하고 있다. 그런데, 상기 활선공사는 높고 불안정한 장소에서의 작업일 뿐만 아니라, 작업시 감전 등의 안전사고와 3D 산업에서의 작업자의 감소 등의 원인으로 이와 같은 작업을 원격제어 혹은 기계의 완전 자율에 의해 수행할 필요가 있다. 현재는 일본, 캐나다, 미국 등지에서 상기 활선공사를 전용공구에 의한 원격조작 매니플레이터에 의하여 반 자동

으로 수행하고 있으며 그 대부분은 마스터 슬레이브(Master-Slave) 방식의 원격조작 매니플레이터 시스템이다⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾. 한편, 활선 공사에 이용되어지는 매니플레이터는 전기절연성을 높이기 위해서 플라스틱과 같은 절연성의 재료를 사용하고 있으며 또한 전기 서보 시스템을 대신하여 유압 서보 시스템에 의한 구동방식을 채용하고 있다. 유압 매니플레이터의 경우, 대부분 감속기를 포함하고 있지 않아, 외란의 영향을 직접 받기 쉽고, 또 다관절 매니플레이터의 경우에는 매니플레이터의 자세의 변화에 의한 관성모멘트의 변동 등의 시스템의 파라미터 변동이 크기 때문에, 고정도의 조립작업에는 적합하지 않다. 저자는 외란 추정기(Disturbance

2001년 10월 10일 접수

* 울산대학교 기계자동차공학부

** 울산대학교 기계자동차공학부 대학원

Observer)에 의한 고정도의 위치제어를 기본으로 하는 임피던스 제어를 6 축 전기 유압 매니플레이터에 적용하여 안정적인 접촉작업 및 7[mm]의 공차를 가진 Peg-in-Hole 작업을 이미 실현하고 있다⁽⁴⁾. 본 연구에서는 배진공사의 보수작업에 실제로 사용되어지는 한 쌍의 6 축 전기 유압 매니플레이터에 대해 새로운 힘 제어기를 제안한다. 제안하는 힘 제어기는 저자가 제안했던 임피던스 제어⁽⁵⁾를 확장하여, 외란 및 시스템의 파라미터 변동에 강건한 H_x 제어이론에 의해 도출되어진 안정화 필터를 이용하고 있다. 제안한 힘 제어기의 유효성을 확인하기 위하여 4 종류의 다른 강성을 가지는 벽면과 2 종류의 다른 형상을 가지는 벽면에 대한 힘 제어 실험을 수행하여, 도출한 힘 제어기의 효과를 확인한다.

2. 실험장치

실험에 사용되어지는 6 축 전기 유압 매니플레이터의 시스템 구성을 그림 1 에 나타낸다. 매니플레이터에 공급되는 유압원의 공급압력은 10[MPa]이다. 각 축의 제어 알고리즘은 1 대의 마이크로 컴퓨터(CPU: MMX Pentium 200[MHz])에 의해 샘플링 주파수 2kHz 내에 연산되어져, 12Bit 의 D/A 보더로부터 서보앰프를 거쳐 서보 밸브가 구동되어진다. 각 관절축에는 위치검출기로서 0.0044[°]의 분해능을 가지는 로우터리 엔코더를 가지고 있으며, Up/Down Counter 를 거쳐 각 관절각이 컴퓨터

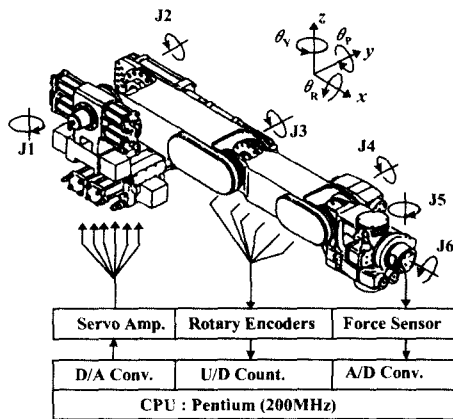


Fig. 1 System Configuration of a 6-Link Hydraulic Manipulator

에 입력되어진다. 또한, 매니플레이터가 외계와 접촉할 때에 발생하는 힘은 매니플레이터의 선단에 장착된 6 축 힘 센서에 의해 검출되어 A/D 변환기를 통해서 컴퓨터에 입력된다.

3. 힘의 외란 추정기

3.1 힘의 외란 추정기에 힘 제어법의 제안

현재까지 힘 제어법으로는 위치와 힘의 하이브리드 제어(hybrid position/force control)와 임피던스 제어(Impedance control)로 대별할 수 있다. 이 중, 위치와 힘의 하이브리드 제어법에서는 작업공간을 위치와 힘의 두 개의 부분공간으로 나누어 각각 위치 및 힘을 제어함으로써, 자유공간에서 구속공간으로 전환시 안정성에 문제가 생길 수 있다. 그리고 실제 작업시 위치와 힘 제어를 실시하고자 하는 부분공간의 설정도 어려운 점이라고 볼 수 있다. 여기에 반해 임피던스 제어는 구속공간이나 자유공간 모두 적용할 수 있다. 그러나 이러한 제어기들은 모델의 불확실성, 환경과 매니플레이터 자신의 강성의 불확실성 등의 영향에 의해 안정적이고 고정도의 힘 제어가 곤란하다.

본 절에서는 이러한 문제점에 대하여 강건한 힘 제어기를 실현하기 위하여, 그림 2 와 같은 3 개의 루프로 구성된 힘 제어 시스템을 제안한다. 우선, 내측의 H_x 제어 이론에 의해 설계되어진 안정화

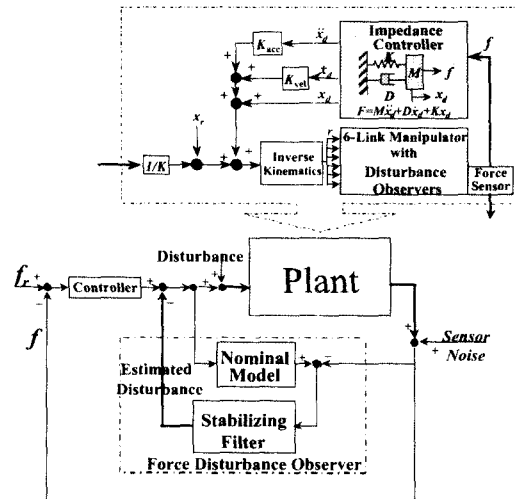


Fig. 2 Proposed Impedance-Force-Control System

제어기를 가진 위치제어 루프, 다음으로 매니플레이터의 끝단의 발생력에 대하여 부드럽게 제어하는 임피던스 제어 루프, 다음으로 외측의 목표력과 매니플레이터의 끝단의 발생력을 비교해서 힘 제어를 실행하는 힘 제어 루프로 구성되어 있다. 특히 힘 제어 루프는 매니플레이터의 끝단이 외부 환경과 접촉할 때 발생하는 힘이 목표력보다 크면 목표력을 외부환경의 깊이 방향에 대해 알게 변경시키고, 발생력이 목표력보다 작으면 목표력을 외부환경의 깊이 방향에 대해 깊게 변경시키는 역할을 한다. 즉, 제안하는 힘 제어수법은 고정도의 위치제어를 바탕으로 힘 제어를 실행하는 방법이다. 다음으로 제안하는 힘 보상기를 설계하기 위한 매니플레이터의 파라미터변동을 정량적으로 고찰한다.

3.2 힘 제어계에 있어서 시스템의 파라미터 변화의 정량화

이 절에서는 힘 보상기를 구성할 때 필요한, 매니플레이터 시스템의 파라미터 변동을 정량적으로 알아본다. 파라미터 변동의 주 원인은 매니플레이터의 자세변화에 의한 매니플레이터 자신의 파라미터 변동, 작업에 따른 임피던스 모델의 변경에 따른 파라미터 변동과 작업환경의 강성의 변화에 의한 파라미터 변동이 주요인으로 생각되어진다. 여기서, 파라미터 변동은 승법적 파라미터 변동으로 평가한다. 각각의 경우에 대한 승법적 모델 오차를 계산한 결과를 그림 3에 나타내고 있다. 각각의 기준이 되는 기준 모델은 종합적으로 모델의 오차가 작아지도록 선정한다. 그림 3의 결과로부터 0.5[Hz]에서 20[Hz]까지의 주파수 영역에서 환경의 강성의 변동에 의한 파라미터 변동이 매니플레이터 자신의 자세변화 및 임피던스 상수의 변동에 의한 파라미터 변동보다 최대 20[dB]정도 크다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서 대상으로 하고 있는 시스템은 매니플레이터 자신의 파라미터 변동, 환경의 변동 등의 불확실성의 영향에 의해 안정하면서 고정도의 힘을 제어하는 것이 곤란하다. 이점은 실제의 작업을 상정한다면, 강성이 다른 부품을 취급할 필요가 있는 본 매니플레이터 시스템에 있어서 실제의 플랜트가 넓은 영역에서 변동하고 있음을 의미한다. 이 정량화된 플랜트의 모델오차로부터 불확실성의 선형모델을 도출한 결과를 그림 4에 나타내고 있다. 즉, 실제의

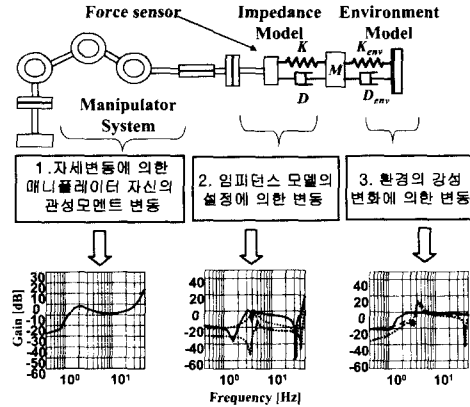


Fig. 3 Multiplicative Model Uncertainty in Manipulator System

매니플레이터 시스템은 오른쪽 블록선도와 같이 고정된 정규모델과 불확실성의 요소로 나눌 수 있다. 여기서 $\|\Delta(s)\|_{\infty}$ 은 1 이하의 값이다. 그림 5에서는 3 개의 모델의 오차를 모두 고려한 승법적 모델 오차를 나타내고 있다. 이 모델 오차를 극복하기 위하여 $W_3(s)$ 함수(로버스터 안정화 함수)를 여유가 없는 경우와, 그 외의 모델변동을 고려하여 6[dB]여유를 둔 경우의 2 가지로 설정하였다. 다음으로 이 선형화된 플랜트를 이용하여 힘 제어기를 설계한다.

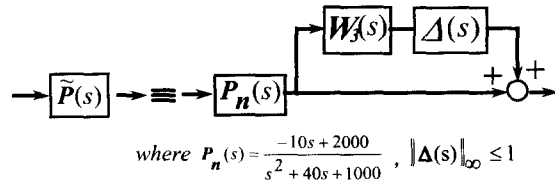


Fig. 4 Linear Fractional Transformation of Real Plant

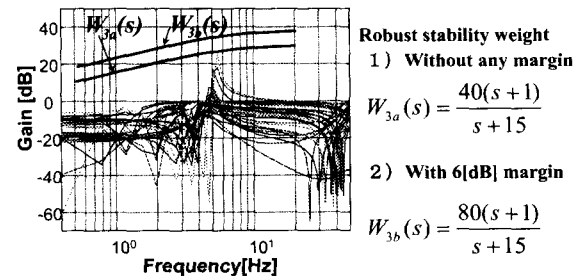
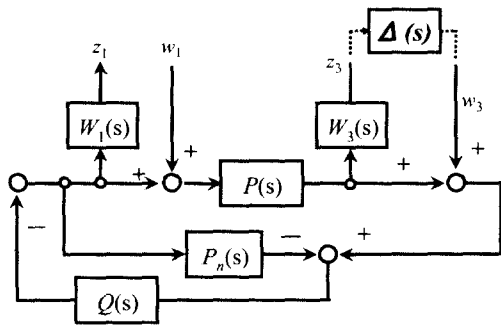


Fig. 5 Multiplicative Uncertainty and $W_3(s)$

3.3 힘 제어기의 설계

목표궤도 수정에 의한 힘 제어기의 안정화 제어기 $Q(s)$ 를 H_x 제어이론에 의해 설계하려면, 우선 일반화 플랜트를 설계할 필요가 있다. 여기서는 그림 6에 나타낸 것과 같은 일반화 플랜트를 제안한다. 그림 6에서 $P(s)$, $P_n(s)$, $Q(s)$ 는 그림 2의 Plant, Nominal Model 및 Stabilizing Filter에 해당하며, $W_1(s)$ 는 입력 외란의 영향을 억압하여 정상상태를 0으로 하기 위한 외란 억압 함수를 의미하며, $W_3(s)$ 는 로버스터 안정화 함수를 의미한다. 여기서, $W_1(s)$ 는 무한대의 입력을 허용하지 않는다는 H_x 제어의 가해조건을 만족하기 위하여 부가되어 있다. 특히, $W_3(s)$ 에 관해서는 플랜트의 모델변동과 관련되어 있으며, 여기서는 여유가 있는 경우와 없는 경우의 2 종류의 함수에 대하여 힘 제어기를 설계한다. 여기서 $P_n(s)$ 는 규범 모델이다.



$$P(s) = \frac{-10s + 2000}{s^2 + 40s + 1000}$$

$$P_n(s) = \frac{-10s + 2000}{s^2 + 40s + 1000}$$

$$W_{3a}(s) = \frac{40(s+1)}{s+15} \quad W_{3b}(s) = \frac{80(s+1)}{s+15}$$

$$W_1(s) = 0.001$$

Fig. 6 Generalized Plant

여기서는 진동하지 않는 댐퍼 특성을 가진 다음 식과 같은 모델을 규범모델로서 설계했다.

$$P_n(s) = \frac{-10s + 1000}{s^2 + 40s + 1000} \quad (1)$$

$W_3(s)$ 를 설정하기 위해서는 규범 모델과 다양한 조건에서의 매니플레이터의 응답 특성과의 오

차를 계산하여, 그 오차에 대하여 여유 없는 경우 ($W_{3a}(s)$)와 6[dB]의 여유를 가지는 경우($W_{3b}(s)$)의 2가지의 $W_3(s)$ 를 준비하였다. 설정한 로버스터 안정화 함수 $W_{3a}(s)$, $W_{3b}(s)$ 와 외란 감도 억압 함수 $W_1(s)$ 를 각각 식(2)~(4)와 같이 설정하였다.

$$W_{3a}(s) = \frac{40(s+1)}{s+30} \quad (2)$$

$$W_{3b}(s) = \frac{80(s+1)}{s+15} \quad (3)$$

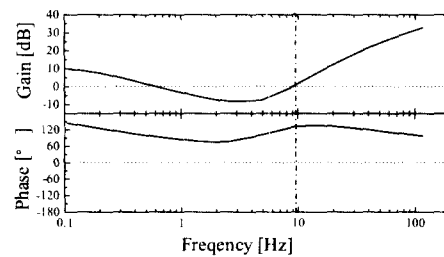
$$W_1(s) = 0.001 \quad (4)$$

이상에 의해, 그림 6의 일반화 함수를 바탕으로, 상기의 H_x 제어기의 도출에 필요한 각 함수를 이용하여 MATLAB을 활용하여 제어기 $Q(s)$ 를 도출한 결과, 식(5), (6)을 얻었다.

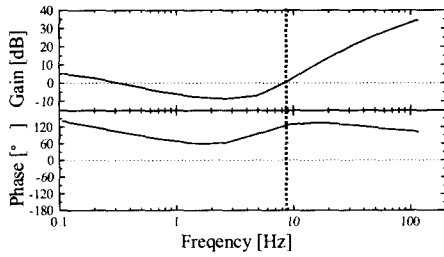
$$Q_{fa}(s) = 1.9 \times 10^8 \times \frac{(s+53.3)(s-12)}{(s+4 \times 10^5)(s+7.6 \times 10^3)} \times \frac{(s+(20 \pm 24.5j))}{(s+2 \times 10^2)(s+52.7)(s+1)} \quad (5)$$

$$Q_{fb}(s) = 3.2 \times 10^{10} \times \frac{(s+40.9)(s-6.2)}{(s+8 \times 10^5)(s+5.2 \times 10^5)} \times \frac{(s+(20 \pm 24.5j))}{(s+2 \times 10^2)(s+44.9)(s+1)} \quad (6)$$

또, 도출한 제어기의 주파수 특성을 그림 7에 나타낸다. 그림 7(a)에는 로버스터 안정화 함수에 여유가 없는 경우를, 그림 7(b)에는 6[dB]의 여유를 둔 경우의 결과를 나타내고 있다. 이 그림으로부터 알 수 있듯이 6[dB]의 여유를 가지게 함으로서



(a) In the case of $W_{3a}(s)$



(b) In the case of $W_{3b}(s)$

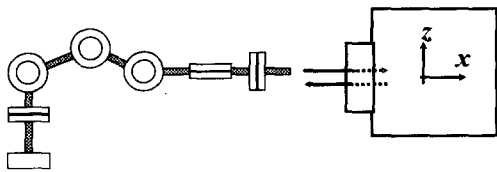
Fig. 7 Bode Diagram of Force Disturbance Observer

제어기의 게인이 훨씬 낮게 설정되어 있음을 알 수 있다. 아래에서 도출한 $Q(s)$ 를 적용, 힘 제어 실험을 수행하여 비교 분석한다.

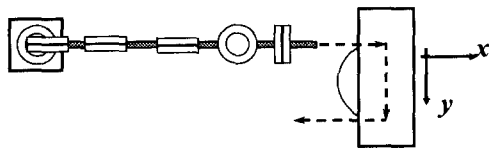
4. 힘 제어 실험

4.1 실험 방법

접촉대상물의 벽면을 $x=1.44[m]$, $y=0.43[m]$ 의 위치에 x 방향에 대해 수직으로 위치시키고, 매니플레이터의 선단부의 x 방향의 힘을 제어하는 힘 제어 실험을 실시하였다. 힘 제어실험 방법 1 과 2의 개요를 그림 8에 나타낸다.



(a) Experimental Condition 1 (In the case of changing the stiffness of environment)



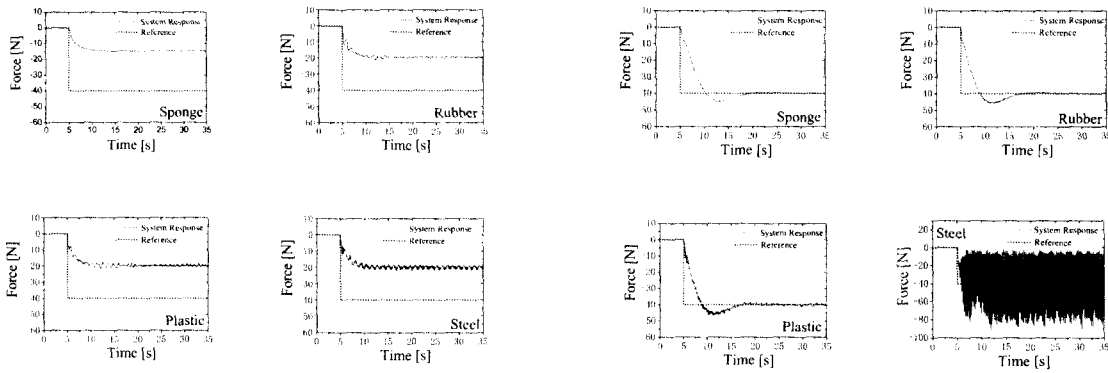
(b) Experimental Condition 2 (In the case of round wall)

Fig. 8 Experimental Setups

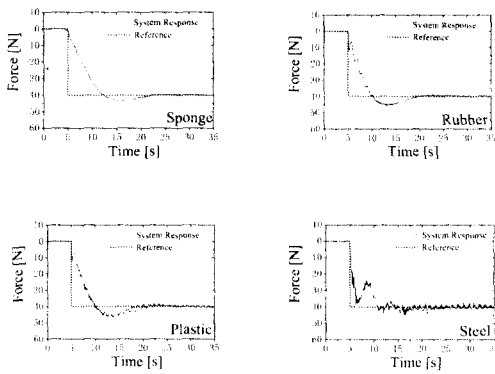
힘 제어 실험 방법 1에서는 벽면을 스펀지, 고무, 플라스틱 및 강으로 바꾸면서 힘 제어 성능 실험을 실시하였다. 이 때, 사용한 재료의 탄성계수는 각각 350, 30000, 80000, 200000[N/m]이다. 또한 힘 제어 실험 2에서는 돌출부를 가진 벽면에 대하여 힘 제어 성능실험을 실시하였다. 각각의 실험을 실시할 때에는 x 방향의 힘이 $-1[N]$ 이하로 발생한 시점에 힘 제어를 시작하여 그 힘이 $-40[N]$ 을 유지하도록 힘 제어를 실시한다. 위치제어의 외란 추정기에는 $Q_p(s)$, 힘 제어기에는 비례제어 및 힘 외란 추정기를 이용하였다. 또한 임피던스 계인은 가상댐퍼를 800[Ns/m], 가상 스프링상수를 2000[N/m]로 하였다. 또한 위치제어기는 비례게인만을 1.0으로, 힘 제어기에서는 비례게인을 1.5, 적분게인을 2.5로 하는 PI 제어를 실시하였다.

4.2 실험 결과

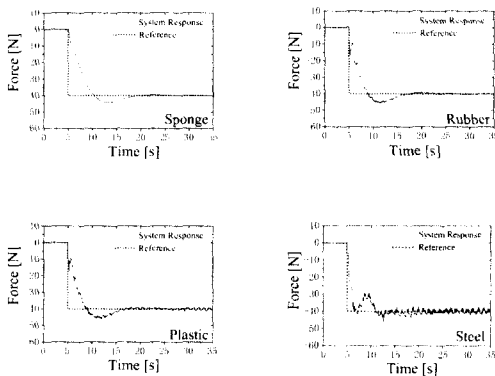
각 힘 제어기의 성능을 비교하기 위하여, 우선 위치제어기는 외란 추정기로 고정하고 힘 제어기를 비례제어, 힘 외란 추정기(Force Disturbance Observer)의 안정화 필터에는 $Q_{fa}(s)$, $Q_{fb}(s)$ 를 이용한 경우, 실험방법 1에 대한 실험결과를 각각 그림 9(a)~(c)에 나타내고 있다. 이 결과로부터 힘 제어기에 비례제어를 이용한 경우는 목표력에 추종하지 못하고 상당한 정상상태 오차가 발생함을 알 수 있다. 반면, 힘 외란 추정기에 $Q_{fa}(s)$ 를 이용한 경우, 상승시간(Rising time)은 벽면이 스펀지, 고무, 플라스틱 및 강인 경우 각각 5.9[s], 4.4[s], 4.0[s], 1.7[s], 정착시간(Settling time)은 16.4[s], 12.2[s], 3.5[s] 및 16.1[s]의 결과를 얻었다. 또, 힘 외란 추정기에 $Q_{fb}(s)$ 를 이용한 경우, 상승시간(Rising time)은 벽면이 스펀지, 고무, 플라스틱 및 강인 경우 각각 4.4[s], 3.2[s], 3.0[s], 1.2[s], 정착시간(Settling time)은 11.0[s], 10.3[s], 9.6[s] 및 16.1[s]의 결과를 얻었다. 또, 힘 제어기를 힘의 외란 추정기 $Q_{fb}(s)$ 로 고정하고 위치제어기를 비례제어로 한 경우의 실험 결과를 그림 10에 나타낸다. 이 결과로부터, 위치제어기의 성능이 좋지 않은 경우에는 상당히 탄성계수가 큰 강과 같은 접촉 대상물에 대해서는 힘 제어가 곤란함을 알 수 있다. 또한 고정도 위치제어기를 사용한 경우라도 매니플레이터 자신 및 환경의 파라미터 변화가 심한 시스템에 대해 강건 힘 제어를 이루기 위해서는 계산상 도출한 플랜트의 변화에 대해 약 6[dB]의 여유를



(a) In the case of Proportional Force Controller



(b) In the case of Force Disturbance Observer $Q_{fd}(s)$



(c) In the case of Force Disturbance Observer $Q_{fb}(s)$

Fig. 9 Experimental Results of Force Control

Fig. 10 Experimental Results with Proportional Position Controller

두고 로버스터 안정화 함수를 설계할 필요가 있을
을 알 수 있다

그림 11에서는 실험방법 2에 대한 실험결과를
나타내고 있다. 이 실험에서는 벽면으로서 강을
사용하였다. 이 결과로부터 힘 제어기에 비례제어
만을 사용한 경우는 정상상태 편차가 발생하나,
힘 외란 추정기를 사용한 경우는 거의 정상상태
없이 힘 제어가 되고 있음을 알 수 있다. 특히, 로
버스터 안정화 함수에 6[dB]의 여유를 둔 경우의
힘 외란 추정기가 가장 양호한 응답특성을 보여주
고 있다.

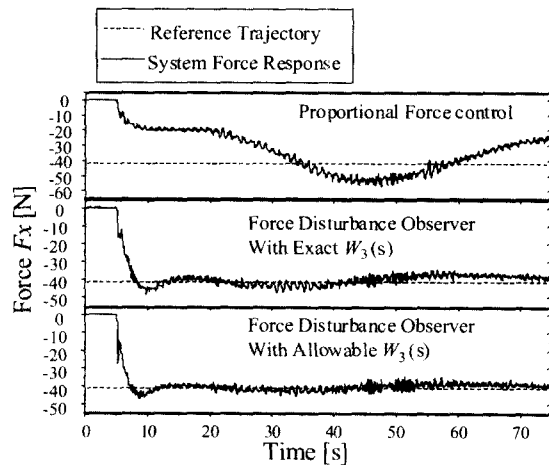


Fig. 11 Experimental Results of Force Control of Round Obstacle

5. 결 론

비선형성과 시스템의 파라미터 변동이 큰 유압식 매니플레이터를 이용하여 자동조립작업을 수행할 때 필수 불가결한 요소인 안정된 접촉작업의 구현 및 고정도의 힘 제어를 구현하기 위하여, 외란 추정기에 의한 고정도 위치제어를 기본으로 하는 임피던스 제어기와 목표궤적의 수정에 의한 힘 제어를 제안하였다.

특히, 힘 제어기로서 힘 외란 추정기를 제안하고 힘 외란 추정기의 안정화 필터를 H_∞ 제어이론에 의해 도출하였다. 특히 제어기의 도출을 위해 매니플레이터의 파라미터 변동과 환경의 변동 중 특히 접촉상대물의 강성의 변화를 적극적으로 설계에 반영하였으며, 4 가지의 강성이 다른 벽면과 도출부가 있는 벽면에 대한 힘 제어실험을 통하여 제안한 제어기의 유효성을 검증하였다.

향후 제안한 제어법을 바탕으로 건설기계의 지능로봇화에 응용할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국과학 재단 지정 울산대학교 기계 부품 및 소재 특성평가 연구 센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. M.Nakashima, H.Yakabe, Y.Maruyama, K.Yano and K.Morita, H. Nakagaki: Application of Semi-Automatic Robot Technology on Hot Line Maintenance Task, Proc. of the 1995 IEEE Int. Conf. on R&A, pp. 843-850, 1995.
2. M.Nakashima, Y.Maruyama, K.Yano and H.Yakabe : The Hot-Line Work Robot System and its Human-Robot Interface "MOS" Proc. of the 1995 IEEE Int. Conf. on R&A, pp. 116-123, 1995.
3. M.Boyer: System Integration in Telerobotics : Case Study: Maintenance of Electric Power Lines, Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on R&A, pp. 1042-1047, 1996.
4. Kyoungkwan AHN, Shinichi YOKOTA, Tomohiko OZEKI and Toshirou YAMAMOTO : Compliance Control of a 6-Link Electro-Hydraulic Manipulator

(Application to the Peg-in-Hole Task), Trans. of JSME(C), Vol.64, No.624, pp. 3019-3025, 1998.

5. Kyoungkwan AHN, Shinichi YOKOTA and Toshirou YAMAMOTO: Application of an Impedance-Force Control to a 6-Link Electro-Hydraulic Manipulator; Proc. of Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control, pp. 111-121, 1998.
6. N.Hogan, Impedance Control: An Approach to Manipulation Part2, Transaction of ASME, Journal of DSMC, Vol.107, pp. 8-16, 1985.
7. Toshirou YAMAMOTO and Shinichi YOKOTA : Application of Control Theory for 2-DOF Control System (A Design Method of Robust Controller for Each Axis of a Hydraulic Manipulator), Trans. of JSME(C), Vol. 64, No. 617, pp. 177-184, 1998.