

## 원격조작시스템의 힘반영 컴플라이언스 제어기 설계

### A Force Reflecting and Compliance Controller Design for Teleoperated Manipulator Systems

안성호, 진재현, 박병석, 홍동희, 윤지섭  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

고방사성 지역에서 물질의 취급이나 장치의 유지보수에는 마스터 슬레이브 형태의 힘반영 원격조작시스템이 유용하게 사용된다. 주변환경이 고강성으로 이루어져 있는 경우에는 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시에 접촉력이 급격히 증가하여 힘반영 작업의 성능이 나쁠 뿐 아니라 방사성 물질을 파손할 수 있기 때문에 접촉시에 유연성을 가지도록 할 필요가 있다. 본 논문에서는 힘기준형 원격조작시스템에서 힘반영 성능과 컴플라이언스 제어성능을 갖는 슬레이브 조작기의 제어기 설계기법을 제안한다. 슬레이브 조작기의 제어기는 개루프 상태에서 불안정한 시스템에 대한 IMC 제어기법으로 설계한다. 슬레이브 조작기의 컴플라이언스는 1 차 저주파 필터 형태의 제어기로 제어된다. 1 자유도 원격조작 시스템에 대하여 제안한 제어기법을 이용하여 제어기를 설계하고 전산모사를 수행하여, 마스터 조작기에 대한 슬레이브 조작기의 위치추종 성능과 컴플라이언스 제어성능을 확인한다.

#### Abstract

A force reflecting and compliance control scheme based on IMC is proposed for the teleoperated manipulator system. The controller of the slave manipulator is designed by the IMC method for an open loop unstable plant. The compliant control is implemented by a first order low pass filter. In the proposed scheme, the slave manipulator tracks well the position of the master manipulator in the free space and the compliance of the slave manipulator is autonomously controlled in a contact condition. The simulation results show the excellence of the proposed controller.

## 1. 서론

원격조작시스템은 우주공간이나 심해탐사, 채굴 그리고 원자력 시설의 유지보수 등과 같이 인간이 직접 작업할 수 없는 극한환경 하에서의 작업에 널리 사용되어 왔으며, 지능형 로봇을 대치하여 작업을 수행하는데 널리 도입되고 있다. 원격조작 시스템에서 정교한 작업을 수행하기 위해서는 조작자에게 작업환경에 관한 정보를 정확하게 전달하여 조작자가 마치 현장에서 직접 작업을 수행하는 것처럼 느끼게 하여야 한다. 예를 들어, 원자력 시설의 유지보수와 같이 정교함과 안전성을 필요로 하는 작업에서는 접촉력에 관한 정보가 조작자에게 효과적으로 전달되어야 하며, 접촉력을 원거리의 조작자에게 현실감 있게 전달해 주는 힘반영 기능이 필수적으로 요구된다.

주변환경이 고강성으로 이루어져 있는 경우에는 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시에 접촉력이 급격히 증가하기 때문에 접촉시에 유연성을 가지도록 하기 위하여 컴플라이언스 (compliance) 제어가 도입되었으며, 많은 연구가 진행되어 왔다[1][2][3]. Kim 등은 1 차저역여과기를 이용한 능동 분할제어(shared control) 기법을 제안하여 시간지연을 가지는 원격조작 시스템에 적용하였다[1]. Venkataraman 등은 신경 회로망을 기초로 하는 컴플라이언스 제어기법을 제안하였다[2]. 안성호 등은 제어입력의 포화를 가지는 슬레이브 조작기에 대하여 제어입력 포화에 관계없이 슬레이브 조작기가 기준위치를 추종하고 컴플라이언스 성능을 갖는 하는 힘반영 컴플라이언스 제어기법을 제안하였다[3]. IMC(internal model control) 제어기법은 제어가 시스템의 모델을 포함하는 형태로서 최근에 많이 연구되고 있다. Morari 등과 Goodwin 등은 안정 또는 불안정한 개루프 시스템에 대한 IMC 제어기법을 제시하였다[4][5].

본 논문에서는 힘기준형 원격조작 힘반영 제어시스템에서 힘반영 성능과 컴플라이언스 제어성능을 갖는 슬레이브 조작기의 제어를 설계기법을 제안한다. 슬레이브 조작기의 제어기는 개루프 상태에서 불안정한 시스템에 대한 IMC 제어기법으로 설계한다. 2절에서는 슬레이브 조작기의 컴플라이언스 제어문제를 살펴보고, 3절에서는 IMC 제어기법에 기초한 힘반영 컴플라이언스 제어기 설계기법을 제안한다. 4절에서는 1 자유도 원격조작 힘반영 제어시스템에 대하여 제안한 제어기 설계기법을 적용하여 전산모사를 수행한 결과를 제시하고, 5절에서는 결론을 맺는다.

## 2. 문제설정

### 2.1 1 자유도 원격조작 힘반영 제어시스템의 모델링

원격조작 힘반영 제어시스템에서 조작자는 모니터를 통하여 슬레이브 조작기의 동작을 주시하면서 마스터 조작기의 손잡이를 조작하여 기준위치를 지령하고, 제어시스템은 슬레이브 조작기 말단장치가 마스터 조작기의 위치를 추종하도록 슬레이브 조작기의 각 관절

의 구동모터를 제어한다. 슬레이브 조작기의 말단장치가 기준위치를 추종하다가 외부 환경과 접촉할 때에는 접촉력을 발생한다. 이 때, 접촉력은 마스터 조작기 관절의 구동모터를 역방향으로 구동하게 하여 조작 손잡이를 쥐고 있는 조작자가 힘을 느끼게 된다. 다시 말해, 슬레이브 조작기의 말단장치에서 작용하는 힘이 조작자에게 반영된다. 일반적으로 작업에 활용되는 원격조작 힘반영 제어시스템은 다자유도(multiple degree of freedom)의 암(arm)으로 구성되지만, 본 논문에서는 힘반영 컴플라이언스 제어기 설계에 간단하게 활용할 수 있도록 1 자유도의 원격조작시스템을 고려한다. 그림 1은 1 자유도 원격조작 힘반영 제어시스템의 개략도를 나타낸다[6].

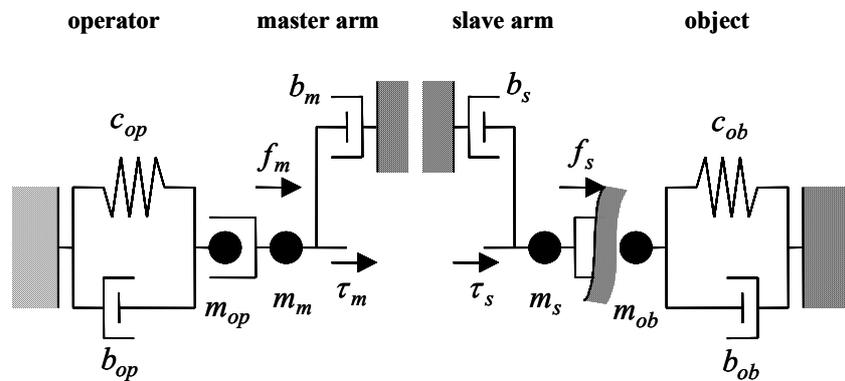


그림 1. 1 자유도 원격조작 힘반영 제어시스템.

그림 1의 원격조작 힘반영 제어시스템에 대하여 마스터 조작기와 슬레이브 조작기의 동역학은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_m + f_m = m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m \quad (1)$$

$$\tau_s + f_s = m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s \quad (2)$$

여기서  $x_m$ 과  $x_s$ 는 마스터 조작기와 슬레이브 조작기 암의 변위를 각각 나타낸다.  $m_m$ 과  $b_m$ 은 마스터 조작기의 질량과 viscous 계수를 나타내며,  $m_s$ 과  $b_s$ 은 슬레이브 조작기의 질량과 viscous 계수를 나타낸다. 또한  $f_m$ 은 조작자가 마스터 조작기에 가하는 힘이고,  $f_s$ 는 슬레이브 조작기가 물체에 가하는 힘이다.  $\tau_m$ 과  $\tau_s$ 는 마스터 조작기와 슬레이브 조작기의 구동력이다.

슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 때의 동역학은 다음과 같이 주어진다.

$$f_s = m_{ob} \ddot{x}_s + b_{ob} \dot{x}_s + c_{ob} x_s \quad (3)$$

식 (3)에서  $m_{ob}$ ,  $b_{ob}$ 와  $c_{ob}$ 는 각각 물체의 질량, viscous 계수, 및 stiffness를 나타내며,  $x_s$ 는 물체의 변위를 나타낸다. 조작자의 동력학은 다음과 같은 spring-damper-mass 시스템으로 주어진다.

$$\tau_{op} - f_m = m_{op} \ddot{x}_m + b_{op} \dot{x}_m + c_{op} x_m \quad (4)$$

식 (4)에서  $m_{op}$ ,  $b_{op}$ 와  $c_{op}$ 는 각각 마스터 조작기를 쥐고 있는 조작자 손의 질량, viscous 계수, 및 stiffness를 나타내며,  $\tau_{op}$ 는 조작자가 가하는 힘을 나타내며,  $x_m$ 은 마스터 조작기의 변위를 나타낸다. 또한 힘기준형 원격조작 힘반영 제어시스템에서 조작자에게 반영되는 힘은

$$\tau_m = K_{fr} f_s \quad (5)$$

로 주어진다. 여기서  $K_{fr}$ 은 힘반영비이다.

## 2.2 힘반영 컴플라이언스 제어

그림 2는 일반적인 힘기준형 원격조작 힘반영 제어시스템의 블록선도를 나타낸다. 그림 2에서  $C(s)$ 는 슬레이브 조작기의 제어기이고,  $K_c(s)$ 는 자율 컴플라이언스 제어기이다. 그림 2의 힘반영 컴플라이언스 제어구조에서는 슬레이브 조작기의 접촉력이 자율 컴플라이언스 제어기를 통하여 케환하고 조작자에게로 힘반영시킴으로써 접촉력을 분할하여 슬레이브 조작기가 추종하는 기준입력을 변화시켜 컴플라이언스를 제어한다.  $C(s)$ 는 자유공간에서 슬레이브 조작기의 위치가 마스터 조작기의 위치에 대한 추종성능을 고려하여 설계하고,  $K_c(s)$ 는 컴플라이언스 성능을 고려하여 설계한다.

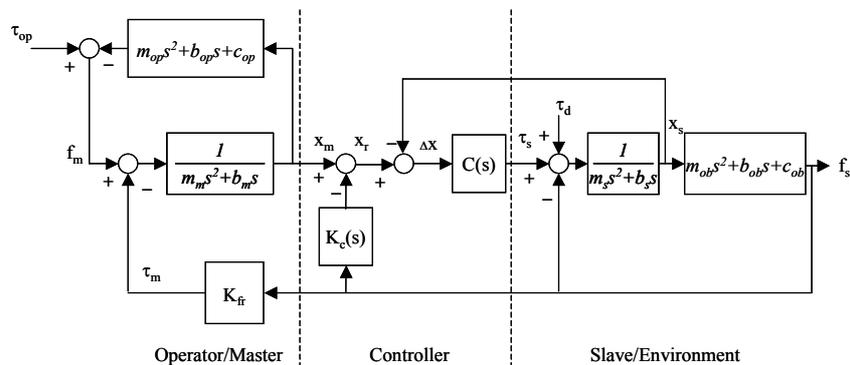


그림 3. 일반적인 힘반영 컴플라이언스 제어시스템.

### 3. 제안하는 힘반영 컴플라이언스 제어기법

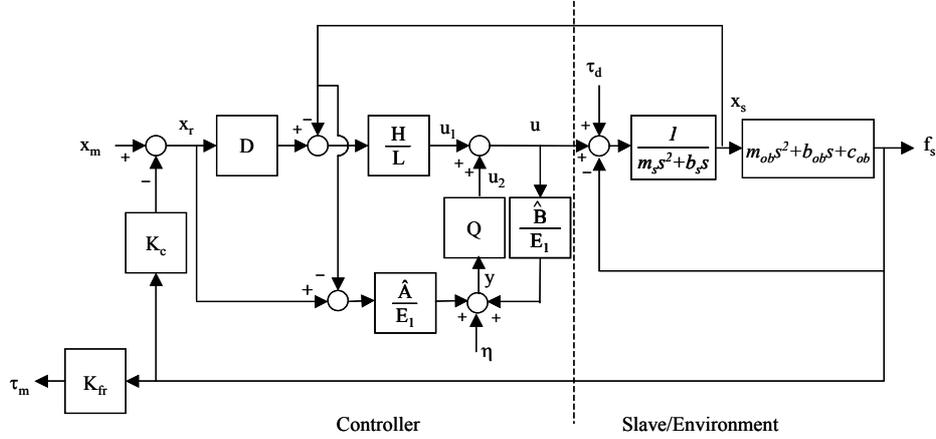


그림 4. 제안하는 힘반영 컴플라이언스 제어 구조.

그림 4는 제안하는 힘반영 컴플라이언스 제어기법을 나타낸다. 자유공간에서 제어입력에 대한 슬레이브 조작기의 변위의 개루프 전달함수  $P(s)$ 는

$$P(s) = \frac{1}{s(m_s s + b_s)} = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{B(s)}{sA_s(s)} \quad (6)$$

로 주어지며, 원점에 극점을 갖는 불안정한 시스템이다. 여기서  $A_s(s), B(s)$ 는 Hurwitz이다. 따라서 제안하는 힘반영 컴플라이언스 제어기법에서는 슬레이브 조작기의 제어를 개루프 상태에서 불안정한 시스템에 대한 IMC 제어기법으로 설계한다.

$P(s)$ 의 모델링  $P_m(s)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$P_m(s) = \frac{\hat{B}(s)}{\hat{A}(s)} \quad (7)$$

여기서

$$\hat{A}(s) = s \hat{A}_s(s) \quad (8)$$

이고,  $\hat{A}_s(s), \hat{B}(s)$ 는 Hurwitz이다.

$P_m(s)$ 는  $P(s)$ 의 완전모델(perfect model)이라 가정한다. 즉,  $\hat{A}_s(s) = A_s(s), \hat{B}(s) = B(s)$ 라 가정한다. 그림 4에서 자유공간에서는 힘반영 루프가 형성되지 않으며,  $f_s$

와  $\tau_m$ 은 0이다.  $K_c(s)$ 는 1 차 저역필터로 다음과 같이 설계한다.

$$K_c(s) = \frac{K_{cc}}{\tau_c s + 1}. \quad (9)$$

그림 4에서 자유공간에서 임의의 외부입력에 대한 내부상태 변수 출력의 전달함수는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} x_s(s) \\ u(s) \\ y(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta(s)} \begin{bmatrix} y_{11}(s) & y_{12}(s) & y_{13}(s) \\ y_{21}(s) & y_{22}(s) & y_{23}(s) \\ y_{31}(s) & y_{32}(s) & y_{33}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r(s) \\ \tau_d(s) \\ \eta(s) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

여기서,

$$\Delta(s) = A(s)L(s) + B(s)H(s), \quad (11)$$

$$y_{11}(s) = B(s) \left\{ D(s)H(s) - \frac{Q(s)A(s)L(s)}{E_1(s)} \right\}, \quad (12)$$

$$y_{12}(s) = B(s)L(s) \left\{ 1 - \frac{Q(s)B(s)}{E_1(s)} \right\}, \quad (13)$$

$$y_{13}(s) = Q(s)B(s)L(s), \quad (14)$$

$$y_{21}(s) = A(s) \left\{ D(s)H(s) + \frac{Q(s)A(s)L(s)}{E_1(s)} \right\}, \quad (15)$$

$$y_{22}(s) = -B(s) \left\{ H(s) + \frac{Q(s)L(s)}{E_1(s)} \right\}, \quad (16)$$

$$y_{23}(s) = Q(s)A(s)L(s), \quad (17)$$

$$y_{31}(s) = \frac{A(s)}{E_1(s)} \{ L(s) + D(s)B(s)H(s) \}, \quad (18)$$

$$y_{32}(s) = -\frac{B(s)}{E_1(s)} \{ A(s)L(s) + B(s)H(s) \}, \quad (19)$$

$$y_{33}(s) = A(s)L(s) + B(s)H(s) \quad (20)$$

이다.

그림 4의 내부 안정도를 만족하기 위해서는 식 (10)의 모든 전달함수가 안정해야 한다. 그림 4에 대하여 슬레이브 조작기의 제어기는 다음과 같이 설계한다.

$$i) \quad Q(s) = f(s) \frac{E_1(s)}{\widehat{B}(s)} \quad (21)$$

이고,  $Q(s)$ 는 proper하고 안정하다.

ii)  $L(s)$ 와  $H(s)$ 는 다음을 만족한다.

$$\widehat{A}(s)L(s) + \widehat{B}(s)H(s) = E_1(s)E_2(s) \quad (22)$$

iii)  $E_1(s)$ 와  $E_2(s)$ 는 Hurwitz이다.

위의 i), ii), iii)의 조건이 만족되면 식 (10)의 모든 전달함수가 안정하고, 그림 4의 내부 안정도가 만족된다. 이 때,  $x_r(s)$ 대하여  $x_s(s)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{x_s(s)}{x_r(s)} = \frac{f(s)A(s)L(s) + B(s)H(s)D(s)}{A(s)L(s) + B(s)H(s)}, \quad (23)$$

식 (23)에 대하여  $D(s)$ 를

$$D(s) = f(s) \quad (24)$$

로 설계하면, 식 (23)은

$$\frac{x_s(s)}{x_r(s)} = f(s) \quad (25)$$

가 되어, 임의로 설계한 필터의 특성으로 나타난다.

#### 4. 전산모사

MATLAB을 이용하여 전산모사를 수행하였다. 전산 모사에 사용한 시스템 파라미터는 다음과 같다.

마스터 조작기	: $m_m = 6kg, b_m = 0.1Ns/m,$
슬레이브 조작기	: $m_s = 6kg, b_s = 0.1Ns/m,$
조작자	: $m_{op} = 2kg, b_{op} = 2Ns/m, c_{op} = 10N/s,$
물체	: $m_{ob} = 10kg, b_{ob} = 100Ns/m, c_{ob} = 200N/s$
힘반영비	: $K_{fr} = 0.05,$

$$A(s) = 6s + 0.1, \quad (26)$$

$$B(s) = 1, \quad (27)$$

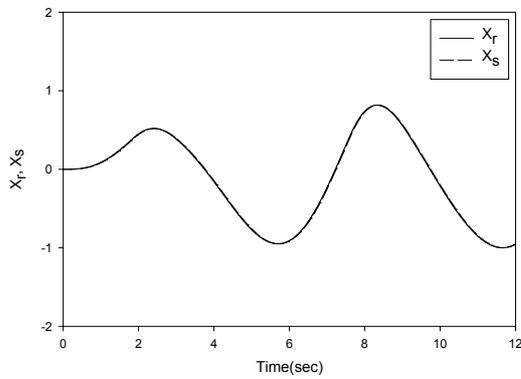
$$L(s) = s + 2, \quad (28)$$

$$H(s) = 6s + 0.1, \quad (29)$$

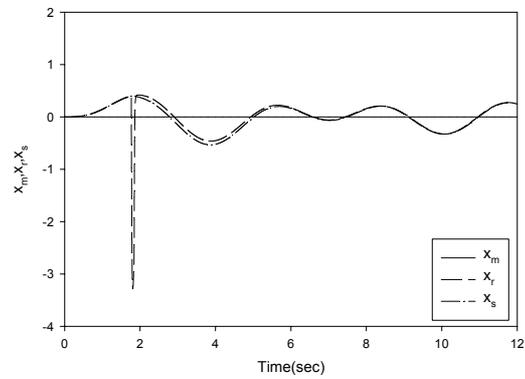
$$E_1(s) = (s + 1)^2, \quad (30)$$

$$f(s) = \frac{1}{(0.01s + 1)^2}, \quad (31)$$

$$K_c(s) = \frac{0.1}{0.01s + 1}. \quad (32)$$

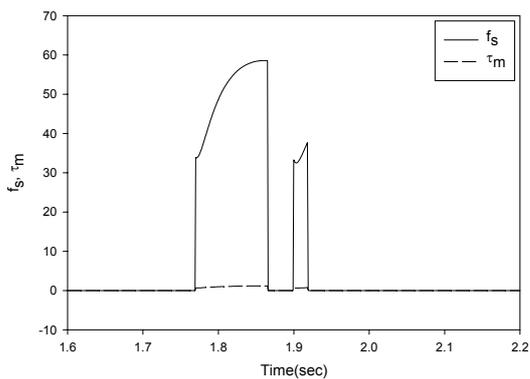


(a) 자유공간에서의 응답

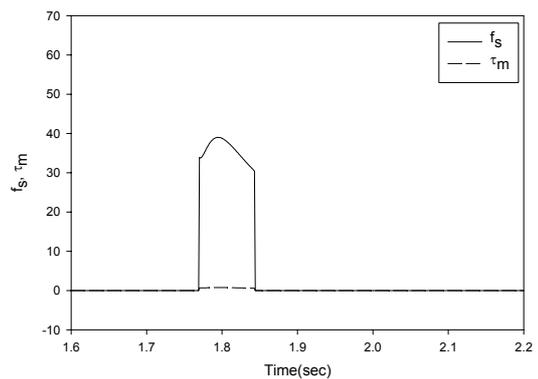


(b) 접촉동작시의 응답

그림 5. 위치추종응답.



(a) 힘반영 제어의 경우



(b) 힘반영 컴플라이언스 제어의 경우

그림 6. 접촉력과 조작자에게 반영되는 힘.

그림 5는 자유공간 및 접촉동작시에 마스터 조작기가 지정하는 기준위치에 대한 슬레이브 조작기의 위치추종 특성을 나타내며, 자유공간에서 슬레이브 조작기의 위치가 기준위치를 잘 추종함을 (a)에서 볼 수 있다. 그림 5의 (b)에서 슬레이브 조작기는 1.77초에 물체에 접촉하는 경우이고, 접촉 순간에 기준입력이 변경되고 결과적으로 슬레이브 조작기의 위치가 변경되며, 접촉 후에는 슬레이브 조작기의 위치가 기준위치를 잘 추종함을 볼 수 있다. 그림 6은 원격조작 시스템에서 힘반영 제어만을 수행한 경우와 그림 4의 제안한 힘반영 컴플라이언스 제어를 수행한 경우에 대하여 접촉력과 조작자에게 반영되는 힘을 나타낸다. 그림 6에서 힘반영 제어만을 사용한 경우에는 슬레이브 조작기가 물체에 접촉한 후에 접촉력이 계속 증가하지만, 제안한 힘반영 컴플라이언스 제어의 경우에는 접촉 순간에는 접촉력 증가하지만 시간이 지날수록 감소하여 슬레이브 조작기의 컴플라이언스가 제어됨을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

원격조작 힘반영 제어시스템에서 주변환경이 고강성으로 이루어져 있는 경우에는 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시에 접촉력이 급격히 증가하여 힘반영 작업의 성능이 나쁠 뿐 아니라 물체를 손상할 수 있기 때문에 접촉시에 유연성을 가지도록 할 필요가 있다. 본 논문에서는 힘기준형 원격조작시스템에서 힘반영 성능과 컴플라이언스 제어성능을 갖는 슬레이브 조작기의 제어를 설계기법을 제안하였다. 슬레이브 조작기의 제어기는 개루프 상태에서 불안정한 시스템에 대한 IMC 제어기법으로 설계한다. 슬레이브 조작기의 컴플라이언스는 1 차 저주파 필터 형태의 제어기로 제어된다. 1 자유도 원격조작시스템에 대하여 제안한 제어기법을 이용하여 제어기를 설계하고 전산모사를 수행하여, 마스터 조작기에 대한 슬레이브 조작기의 위치추종 성능이 우수하고, 물체에 접촉시에 컴플라이언스 제어성능을 가짐을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 과학기술부의 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] W. S. Kim, B. Hannaford and A. K. Bejczy, "Force reflection and shared compliance control in operating telemanipulators with time delay," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 2, pp. 176-185, 1992.
- [2] S. T. Venkataraman and S. Gulati, J. Barhen and N. Toomarian, "A neural network based identification of environments models for compliant control of

- space robots," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 9, No. 5, pp. 685-697, 1993.
- [3] 안성호, 윤지섭, 이상정, "제어입력 포화를 고려한 고하중 원격조작기의 힘반영 유연성," 대한전자공학회 논문지 제37권, 제5호, pp.22-33, 2000.
- [4] M. Morari and E. Zafiriou, "Robust process control," Prentice-Hall Inc., 1989.
- [5] G. C. Goodwin, S. F. Graebe and W. S. Levine, "Internal model control of linear systems with saturating actuators," *Proc. European Control Conference*, pp.1071-1077, 1993.
- [6] Y. Yasuyoshi and T. Yoshikawa, "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 10, no. 5, pp. 605-620, 1994.