원격조작기의 속도포화 보상 힘반영 제어

Force Reflection Control with a Speed Saturation Compensation Scheme for Telemanipulators

안 성 호, 윤 지 섭, 이 상 정
(Sung-Ho Ahn, Ji-Sup Yoon, and Sang-Jeong Lee)

Abstract : This paper proposes a force reflection control method with a speed saturation compensation scheme for the slave manipulators having a speed saturation due to the high reduction ratio joints. When speed saturation is generated, the proposed force reflection control method not only shows an anti-windup feature in controlling the slave manipulator but also makes the master manipulator move slowly using the force reflection caused by saturation. In this way, the position of the slave manipulator tracks the reference position regardless of speed saturation. The experimental results show that the proposed control method provides excellent performance.

Keywords: force reflection control, anti-windup, telemanipulator

I. 서론

원격조작 힘반영 제어시스템은 조작자가 작업상황을 직접 감시하면서 마스터 조작기를 이용하여 슬레이브 조작기(manipulator)를 원격으로 조작하고, 마스터를 쥐고있는 조작자의 손에 슬레이브 조작기의 작업상황이 힘반영 되도록 하는 시스템으로 극한환경에서 작업을 수행하는데 널리 이용되고 있다. 일반적으로 고감도의 힘반영 기능을 구현하는데는 저감속비의 관절을 가지는 슬레이브 조작기가 적합하지만, 저감속비의 관절을 가지는 조작기는 큰 취급 가반하중을 얻기 어렵기 때문에 고하중 작업에 적합하지 않다. 예를 들어 원자력 폐기물의 해체, 절단, 이송 등의 작업에는 취급 가반하중이 큰 고감속비의 관절을 갖는 원격조작기가 사용된다. 고감속비의 관절을 가지는 슬레이브 조작기는 속도포화를 빈번히 발생하기 때문에 마스터에 대한 추종성능이 나쁠 뿐만 아니라 시스템의 안정도도 나빠질 수 있다. 따라서 고감속비의 관절을 가지는 슬레이브 조작기를 정교한 작업이나 위치변화가 빈번한 작업에 안정하게 적용하기 위하여 슬레이브 조작기의 속도포화를 보상한 힘반영 제어기법이 필요하다.

원격조작 시스템에서의 힘반영 제어기법은 위치기준형 힘반영(position-position force reflection) 기법과 힘기준형 힘반영(position-force force reflection) 기법으로 크게 나눌 수 있다[1]-[7]. 위치기준형 힘반영 기법은 마스터와 이를 추종하는 슬레이브 조작기의 상대 위치오차를 궤환시켜 마스터를 움직이는 조작자의 손에 역힘이 가해지도록 하는 기법이다. 이 기법은 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않거나 접촉할 모두의 경우에 대해 안정한 힘반영이 이루어지지만 마스터와 슬레이브의 위치 추종오차가 존재하는 모든 경우에 힘반영되므로 실제로 조작자가 마스터 조작기를 조작하는 데에 과다한 힘이 요구되고, 접촉시에 민감한 힘반영이 이루어지지 않는다는 단점이 있다. 반면에, 힘기준형 힘반영 제어기법은 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 때에 외력을 측정하여 마스터를 움직이는 조작자의 손에 역힘이 가해지도록 하는 기법이다. 이 기법은 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하기 전에는 마스터를 움직이는 조작자가 슬레이브 조작기의 위치에 영향을 받지 않기 때문에 힘들지 않게 마스터를 구동할 수 있으나, 힘반영비가 커지면 시스템이 불안정해지며 시간지연에 대해 민감하다는 단점이 있다.

한편, 취급 가반하중이 큰 원격조작기를 이용하여 해체, 절단, 이송 등의 작업을 수행할 경우에 힘기준형 힘반영 제어기법을 적용하면 위치기준형 기법을 적용한 경우 보다 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시에 좋은 힘반영 특성을 얻을 수 있다. 그러나 큰 가반하중을 얻을 수 있도록 슬레이브 조작기가 고감속비의 관절을 가질 경우에는 속도포화를 빈번히 발생한다. 이 포화현상은 오버슈트(overshoot)를 커지게 하고, 정상상태 도달시간이 길어지게 하는 등의 적분 되말림(windup) 현상을 초래할 뿐만 아니라 궤환루프를 끊어지게 하기 때문에 시스템의 안정도를 바쁘게 하여 실제 플랜트 제어시에 매우 심각한 문제로 대두 될 수 있다. 적분 되말림 현상을 보상하는 기법에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다[8]-[12]. 지금까지 발표된 기법들을 살펴보면, 포화량을 적분기 입력으로 궤환하여 포화량을 감소시키는 역 계산(back calculation) 기법[8], 기준 입력신호와 출력신호의 차이인 오차신호가 제어기의 상태변수에 영향을 미치지 못하도록 하는 컨디셔닝(conditioning) 기법[9], 관측자와 상태변수 궤환을 결합한 구조의 관측자(observer) 기법[10], 그리고 IMC(Internal Model Control) 구조에서의 적분 되말림 현상 보상기법[11][12]으로 크게 분류할 수 있다.

본 논문에서는 슬레이브 조작기가 고감속비의 관절을 가짐으로 인해 속도포화를 발생하는 경우에 대하여 슬레

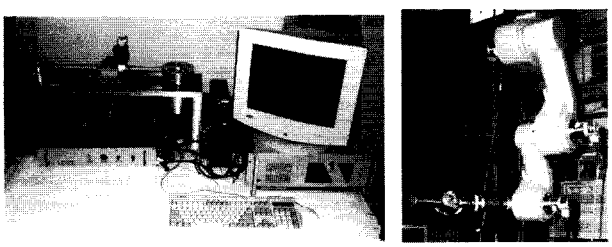
접수일자 : 1999. 12. 27., 수정완료 : 2000. 5. 26.
안성호, 윤지섭 : 한국원자력연구소
이상정 : 충남대학교 정보통신공학부
※ 본 논문은 과학기술부의 원자력연구개발사업에서 지원하여 연구하였습니다.

이브 조작기의 속도포화를 보상할 수 있는 힘반영 제어기법을 제안한다. 제안한 기법은 슬레이브 조작기의 속도포화에 관계없이 슬레이브 조작기가 기준(reference) 위치에 대한 추종성을 가지기 때문에 큰 가반하중을 가지는 슬레이브 조작기를 정교하게 힘반영 제어할 수 있다는 장점이 있다. 2절에서는 본 논문에서 적용한 제어시스템의 제어문제을 설정하고, 3절에서는 슬레이브 조작기의 속도포화를 보상한 힘반영 제어기법을 제안한다. 4절에서는 3절에서 제안한 기법을 고감속비의 관절을 가짐으로 인해 속도포화를 발생하는 동력 매니퓰레이터(manipulator)에 적용하여 실험한 결과를 제시한다.

II. 문제설정

1. 힘반영 제어시스템 구성

본 논문에서 대상으로 한 원격조작 힘반영 제어시스템의 형상은 그림 1과 같으며, 조작자가 조작하는 마스터 부, 슬레이브 조작기, 제어용 컴퓨터, 다축제어기, 구동모터 및 드라이버, 힘/토크 센서 등으로 그림 2와 같이 구성된다. 마스터 부는 조작자의 손잡이가 테이블 형태의 지지대 위에 길이 방향으로 설치된 선형가이드를 따라 직선으로 움직이며, 직경이 12.1 *cm*인 플라이휠(fly wheel)이 지지대 양단에 나란히 설치되어 있는 구조이다. 조작자의 손잡이는 두 플라이휠 사이를 연결한 강철 선을 따라 움직이는 받침대 위에 고정되어 있기 때문에 조작자 손잡이의 직선운동은 플라이휠의 회전운동으로 변환된다. 마스터 구동모터의 회전축에는 토크 제어형 드라이버와 감속기가 없는 서보 모터가 연결되어 있다. 슬레이브 조작기는 취급 가반하중이 큰 중량물을 취급하기 위하여 설계된 고감속비의 관절을 가지는 7자유도(7-DOF)의 동력 매니퓰레이터이다. 동력 매니퓰레이터는 원자력 시설의 해체, 절단, 이송 등에 사용되는 장비로서 취급 가반하중이 100 *kgf*으로 큰 반면에 응답이 매우 느린 특성을 가진다. 본 논문에서는 7축 중에 지면과 수직방향으로 움직이는 한 축을 대상으로 하였다. 슬레이브 조작기의 각위치(angular position)를 측정하기 위하여 관절부위의 끝에 광학 위치센서(encoder)를 부착하였고, 슬레이브 조작기와 외부환경 사이의 접촉힘을 측정하기 위하여 슬레이브 조작기의 종단에 힘/토크 센서를 부착하였다. 힘/토크 센서와 제어용 컴퓨터 사이의 신호전달은 RS-232방식으로 하였다.



(a) Master device and control system (b) slave manipulator

그림 1. 실험에 사용한 힘반영 제어시스템 형상.

Fig. 1. Figure of the experimental setup.

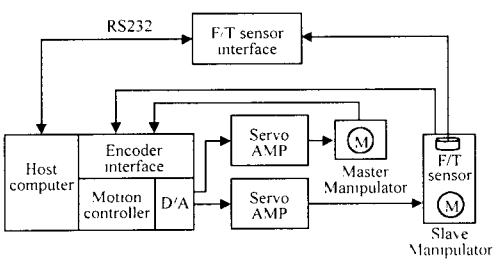


그림 2. 힘반영 제어시스템 구성.

Fig. 2. Block diagram of the force reflection control system.

2. 시스템 특성 분석

그림 3에 슬레이브 조작기가 속도포화를 가지는 경우에 대한 힘기준형 힘반영 제어시스템의 모델을 보였다. $P(s)$는 슬레이브 제어입력 신호(V)에 대한 슬레이브 조작기의 각위치(*rad*)의 전달함수이다. 슬레이브 조작기로 사용한 동력 매니퓰레이터는 하모닉 드라이브(harmonic drive)와 웜(worm)으로 구성된 감속기를 가지는 비선형 특성이 큰 시스템이다[13]. 슬레이브 조작기가 속도포화를 발생하지 않은 경우의 개루프 전달함수를 구하기 위하여, 제어입력으로 3.18 V 계단입력을 인가하여 그림 4와 같은 슬레이브 조작기의 각속도 응답을 얻었다. 그림 4로부터 제어입력의 포화를 제외한 다른 비선형 특성들은 무시하고 $P(s)$를 다음과 같이 모델링하였다[14].

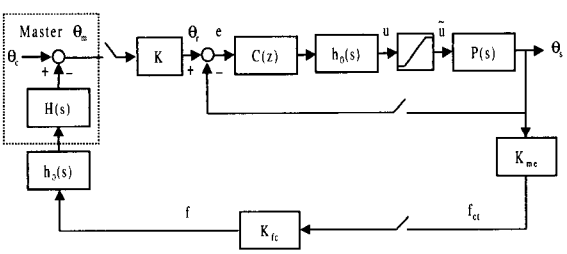


그림 3. 슬레이브 조작기 속도포화를 가지는 경우의 힘기준형 힘반영 제어구조.

Fig 3. The position-force force reflection control scheme with speed saturation of the slave manipulator.

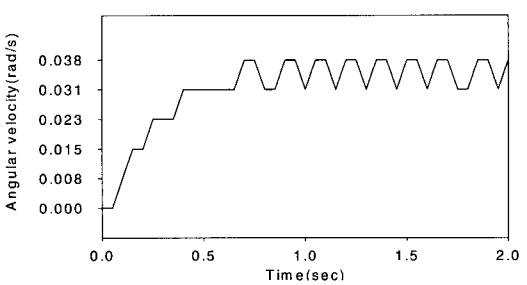


그림 4. 제어입력(3.18 V 계단입력)에 대한 슬레이브 조작기의 각속도 응답.

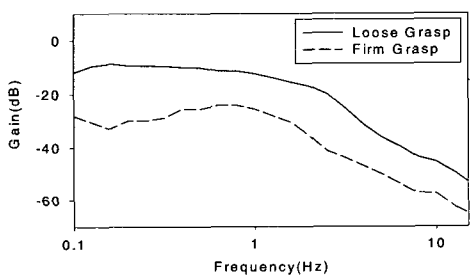
Fig. 4. Angular velocity of the slave manipulator for the control input(3.18 V step input).

$$P(s)=\frac{0.011}{s(0.25s+1)}. \quad (1)$$

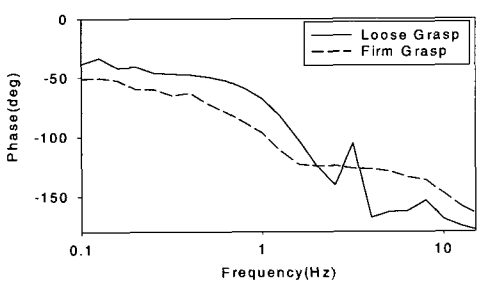
본 논문에서 대상으로 한 고감속비의 관절을 가지는 슬레이브 조작기는 제어입력으로 $\pm 5V$가 인가될 때 $\pm 0.071 rad/s$의 속도포화를 발생하고, 실제 제어입력 $\tilde{u}(t)$는 다음과 같은 포화특성을 가짐을 알 수 있었다.

$$\tilde{u}(t)=\begin{cases}5, & u(t)>5V\\ u(t), & -5V\le u(t)\le 5V.\\ -5, & u(t)<-5V\end{cases} \quad (2)$$

$H(s)$는 마스터를 쥐고 있는 조작자 손에 인가되는 힘에 대한 마스터의 각위치의 전달함수이다. 실험에 의하여, 마스터를 쥐고 있는 조작자 손의 컴플라이언스(compliance) 값은 손잡이를 약하게 쥐었을 경우에 5.5~11 cm/kgf (탄성계수 0.09~0.18 kgf/cm), 강하게 쥐었을 경우에 0.55~1.1 cm/kgf(탄성계수 0.9~1.8 kgf/cm) 정도임을 알 수 있었고, $H(s)$의 주파수 응답을 그림 5와 같이 얻었다. 그림 5에서 차단 주파수는 손잡이를 약하게 쥐었을 경우에 약 1.5 Hz, 강하게 쥐었을 경우에 약 2 Hz 임을 알 수 있다. 직선으로 움직이는 마스터의 위치는 직경이 12.1 cm인 플라이휠에 의해 각위치로 바뀌므로, $H(s)$는 다음과 같이 모델링하였다[7].



(a) Gain



(b) Phase

그림 5. 마스터를 쥐고 있는 조작자 손의 주파수 응답.

Fig. 5. Frequency response of the operator's hand holding the master handle.

$$H(s)=\frac{k}{\tau s+1}. \quad (3)$$

여기서

$$k=\begin{cases}0.91\sim 1.82 rad/kgf, & \text{약하게 쥐었을 때}\\ 0.091\sim 0.182 rad/kgf, & \text{강하게 쥐었을 때,}\end{cases} \quad (4)$$

$$\tau=\begin{cases}0.106, & \text{약하게 쥐었을 때}\\ 0.08, & \text{강하게 쥐었을 때}\end{cases} \quad (5)$$

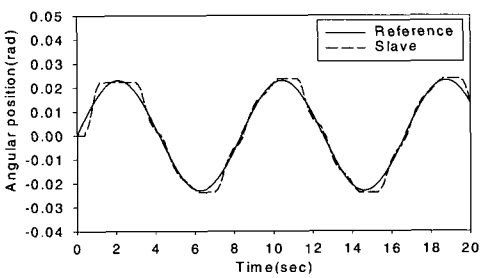
이다.

3. 속도포화를 가지는 슬레이브 조작기의 힘반영 제어문제

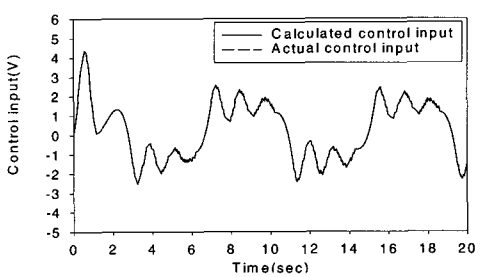
그림 3의 힘기준형 힘반영 제어시스템에 대하여 슬레이브 조작기가 속도포화를 가질 때의 특성을 분석하기 위해 다음과 같은 PID 제어기[14]를 슬레이브 제어기로 사용하여 실험을 수행하였다.

$$C(z)=K_p+\frac{K_i}{1-z^{-1}}+K_d\frac{1-z^{-1}}{1-\gamma z^{-1}}. \quad (6)$$

여기서 $|\gamma|<1$이다. PID 계수는 속도포화가 발생하지 않은 상태에서 슬레이브 조작기의 각위치가 기준 각위치를 추종하도록 설계하였고, 실험을 통해 $K_p=400$, $K_i=45$, $K_d=2.25$, $\gamma=0.3056$으로 설정하였다. K는 0.07로 설정하고, T는 0.05초로 설정하였다.



(a) Angular position



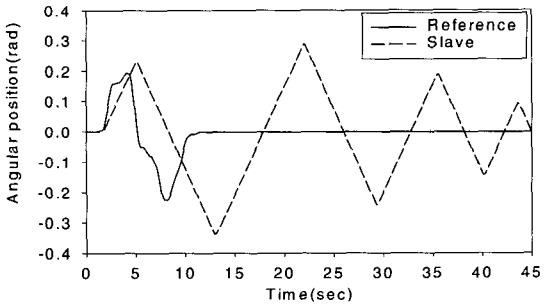
(b) Control input

그림 6. 슬레이브 조작기가 포화되지 않은 상태에서의 응답.

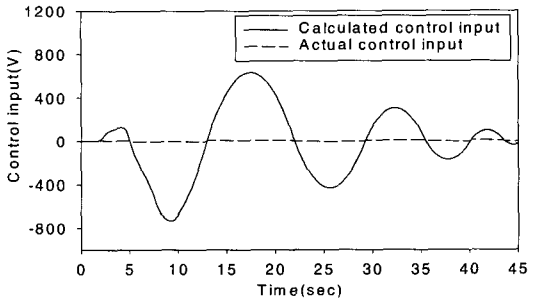
Fig. 6. Responses without speed saturation of slave manipulator.

그림 6은 슬레이브 조작기의 속도포화가 발생하지 않은 상태에서의 응답을 나타내며, 슬레이브 조작기의 속도포화가 발생하지 않은 경우에는 슬레이브 조작기가 기준 각위치를 잘 추종함을 볼 수 있다. 그러나 조작자가 고감속비의 관절을 가지는 동력 매니퓰레이터에 대하여 속도포화가 발생하지 않도록 항상 마스터를 조작할 수는 없다. 그

림 7은 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 속도포화를 발생한 경우의 응답을 나타낸다. 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 1.75초에서 2.6초 사이에 마스터를 빨리 움직여서 슬레이브 조작기의 속도포화인 0.071 rad/s 보다 빠르게 기준 각위치를 0.165 rad/s로 변화시킨 경우에 슬레이브 조작기의 각위치는 기준 각위치를 추종하지 못하고 불안정하게 진동함을 볼 수 있다. 그림 8은 K_{fc}을 0.065로 설정한 경우에 대해 슬레이브 조작기가 속도포화를 발생한 상태에서 물체에 접촉할 때의 응답을 나타낸다. 슬레이브 조작기의 속도포화가 발생한 상태에서 1.55초에 물체에 접촉하였다. 조작자는 슬레이브 조작기가 물체에 약하게 접촉하도록 하기 위하여 접촉하기 전에 마스터를 천천히 움직이지만 슬레이브 조작기는 제어입력의 포화로 인하여 물체에 강하게 접촉함을 볼 수 있다. 이 때, 마스터는 접촉에 의해 반영되는 힘으로 인해 1.60초에 역방향으로 밀려나지만 슬레이브 조작기는 3.05초까지 물체에 접촉하고 있다가 분리되며, 이후에도 기준 각위치를 추종하지 못하고 불안정하게 진동함을 볼 수 있다. 이와 같은 문제에 대한 대책 없이는 힘반영 제어시스템을 정교한 작업에 사용할 수 없다. 따라서, 슬레이브 조작기가 속도포화를 가지는 경우에 속도포화에 관계없이 항상 슬레이브 조작기가 기준위치를 추종하고 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 경우에도 안정한 힘반영이 이루어지도록 하는 제어기법의 개발이 요구된다.



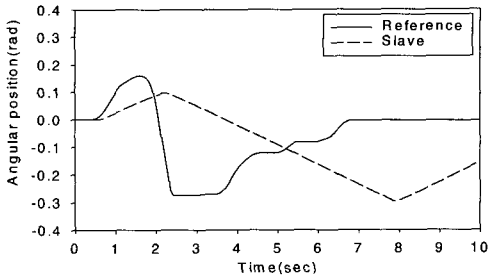
(a) Angular position



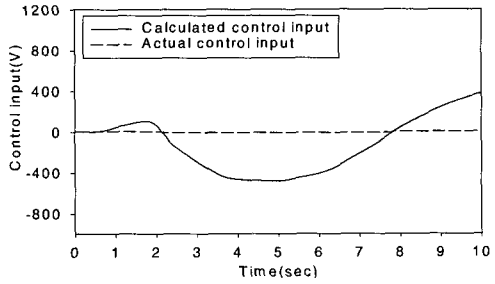
(b) Control input

그림 7. 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 속도포화를 가질 때의 응답.

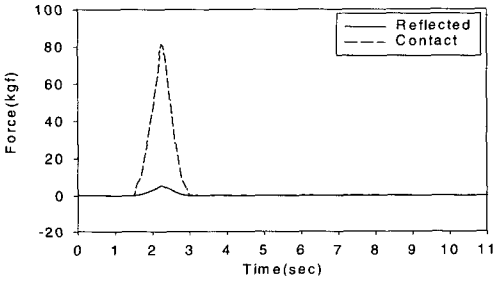
Fig. 7. Responses with speed saturation in the non-contact case.



(a) Angular position



(b) Control input



(c) Contact and reflected force

그림 8. 슬레이브 조작기가 속도포화를 발생한 상태에서 물체에 접촉할 때의 응답.

Fig. 8. Responses with speed saturation in the contact case.

III. 슬레이브 조작기의 속도포화를 보상한 힘반영 제어

이 절에서는 앞 절에서 살펴 본 속도포화를 가지는 슬레이브 조작기에 대하여 슬레이브 조작기의 속도포화를 보상하는 힘반영 제어기법을 제안한다.

1. 속도포화 보상 힘반영 제어 구조

그림 9에 슬레이브 조작기의 속도포화를 보상한 개선된 힘기준형 힘반영 제어구조의 블럭선도를 보였다. 제안한 힘반영 제어기법의 주된 관점은 슬레이브 조작기의 제어기를 적분 되말림 현상을 보상하는 구조로 설계하고, 또한 포화량을 힘으로 변환하여 조작자에게 힘반영되도록 하여 마스터 손잡이를 천천히 움직이도록 하는 것이다. 슬레이브 조작기의 제어기 $C(z)$는 (6)과 같은 구조로 하여 슬레이브 조작기의 속도포화가 발생하지 않은 상태에서 슬레이브 조작기가 기준 각위치를 추종하도록 설계하고, biproper하며 최소위상(minimum phase)이 되도록 설계한다. $C_1(z)$는 biproper하고 최소위상이고 안정하도록 설계

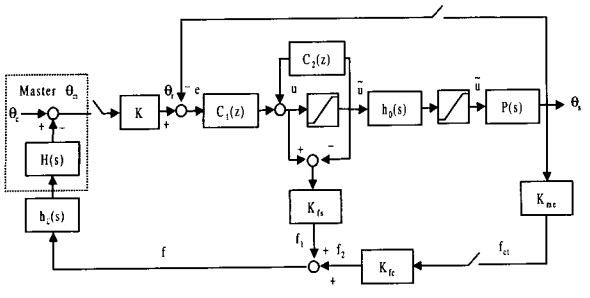


그림 9. 슬레이브 조작기의 속도포화를 보상한 개선된 힘기준형 힘반영 제어구조.

Fig. 9. Block diagram of the enhanced position-force force reflection control scheme with compensation of the speed saturation.

하고, $C_2(z)$는 다음을 만족하도록 설계한다.

$$C(z)=\frac{C_1(z)}{1+C_2(z)}, \tag{7}$$

$$C_2(z)=C_1(z)C^{-1}(z)-1. \tag{8}$$

이 때 $C_2(z)$는 proper하고 안정하다. 따라서 포화가 발생하지 않은 상태에서는 불안정한 극점과 영점의 상쇄 없이 (7)과 (8)이 성립한다. 슬레이브 조작기의 속도포화가 발생하면

$$u(z)=C_1(z)e(z)-\{C_1(z)C^{-1}(z)-1\}\tilde{u}(z) \tag{9}$$

로 주어지고, 적분 되말림 현상을 보상하는 구조가 된다 [11]. 이 때, 포화량을 힘으로 변환시켜

$$f_1(z)=K_{fs}\{u(z)-\tilde{u}(z)\} \tag{10}$$

의 역힘을 조작자에게 가하게 되고, 조작자는 마스터를 천천히 움직이게 된다.

1.1 물체에 접촉하지 않을 때의 입출력 관계

그림 9에서, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 속도포화가 발생하지 않을 때는

$$f(z)=f_1(z)=f_2(z)=0 \tag{11}$$

이므로 조작자에게 아무런 힘을 가하지 않으며,

$$\tilde{u}(z)=u(z), \tag{12}$$

$$u(z)=\frac{C_1(z)}{1+\{C_1(z)C^{-1}(z)-1\}}e(z)=C(z)e(z) \tag{13}$$

이고,

$$\theta_r(z)=K\theta_m(z), \tag{14}$$

$$\theta_s(z)=\frac{P(z)C(z)}{1+P(z)C(z)}\theta_r(z) \tag{15}$$

이 된다. $C(z)$는 3.1절에서 추종성능을 만족하도록 설계하였으므로, (15)에서 $\theta_s(z)$는 $\theta_r(z)$를 추종한다.

슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 속도포화가 발생하면 속도포화에 의해 조작자에게

$$f(z)=f_1(z)=K_{fs}\{u(z)-\tilde{u}(z)\} \tag{16}$$

의 역힘을 가하고, 이로 인하여 조작자는 마스터 손잡이를 천천히 움직이게 된다. 이 때,

$$u(z)=\frac{1}{1+KK_{fs}C_1(z)H(z)}[KC_1(z)\theta_c(z)+\{KK_{fs}C_1(z)H(z)-C_1(z)C^{-1}(z)-C_1(z)P(z)+1\}\tilde{u}(z)], \tag{17}$$

$$\theta_s(z)=P(z)\tilde{u}(z) \tag{18}$$

$$\theta_r(z)=\frac{K}{1+KK_{fs}C_1(z)H(z)}\times\left[\theta_c(z)+K_{fs}C_1(z)H(z)\left\{\frac{1+P(z)C(z)}{C(z)}\right\}\tilde{u}(z)\right] \tag{19}$$

이 된다. $\theta_r(z)$에 대한 $\theta_s(z)$의 추종성능을 향상시키기 위한 K_{fs}의 설정조건은 Ⅲ장의 2에서 다룬다.

1.2 물체에 접촉할 때의 입출력 관계

슬레이브 조작기가 물체에 접촉한 상태에서 속도포화가 발생하지 않으면, 조작자에게

$$f(z)=f_2(z)=K_{fc}f_{ct}(z) \tag{20}$$

의 역힘을 가하고,

$$\tilde{u}(z)=u(z), \tag{21}$$

$$\frac{\theta_r(z)}{\theta_c(z)}=\frac{K\{1+P(z)C(z)\}}{1+P(z)C(z)\{1+K_{fc}K_{me}H(z)\}}, \tag{22}$$

$$\frac{\theta_s(z)}{\theta_r(z)}=\frac{P(z)C(z)}{1+P(z)C(z)\{1+K_{fc}K_{me}H(z)\}} \tag{23}$$

이 된다. 그러나 마스터를 세게 밀면 슬레이브 조작기 구동모터의 속도는 빨라지지만 슬레이브 조작기는 물체에 접촉한 상태에 있으므로 접촉에 의해 반영되는 힘이 커지며 속도포화를 발생하게 된다.

슬레이브가 물체에 접촉한 상태에서 속도포화가 발생하면, 슬레이브 조작기의 접촉에 의한 힘과 포화에 의한 힘에 의하여 조작자에게

$$f(z)=K_{fs}\{u(z)-\tilde{u}(z)\}+K_{fc}f_{ct}(z) \tag{24}$$

의 역힘을 가하고,

$$u(z)=\frac{1}{1+KK_{fs}C_1(z)H(z)}[KC_1(z)\theta_c(z)+\{KK_{fs}C_1(z)H(z)-C_1(z)C^{-1}(z)-C_1(z)P(z)-KK_{fc}K_{me}H(z)C_1(z)P(z)+1\}\tilde{u}(z)], \tag{25}$$

$$\theta_r(z)=\frac{K}{1+KK_{fs}C_1(z)H(z)}\times\left[\theta_c(z)+K_{fs}C_1(z)H(z)\left\{\frac{1+P(z)C(z)}{C(z)}\right\}\tilde{u}(z)-K_{fc}K_{me}H(z)P(z)\tilde{u}(z)\right] \tag{26}$$

이 된다.

2. 추종성능을 위한 힘반영비 설정조건

이 절에서는 그림 9의 힘반영 제어구조에 대하여 슬레이브 조작기의 속도포화에 관계없이 슬레이브 조작기가 기준위치를 추종하도록 하는 K_{fs}의 설정조건을 제시하고자 한다.

정리 : 그림 9의 힘반영 제어구조에서 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않을 경우, 마스터의 동작 주파수 범위 내에서 다음의 조건을 만족하면 속도포화에 관계없이 슬레이브 조작기의 각위치는 기준 각위치를 추종한다.

$$\text{(i) } K_{fs} \gg \left| \frac{C(e^{j\omega T})}{\{1+P(e^{j\omega T})C(e^{j\omega T})\}C_1(e^{j\omega T})H(e^{j\omega T})\tilde{u}(e^{j\omega T})} \right| |\theta_c(e^{j\omega T})|. \quad (27)$$

$$\text{(ii) } K_{fs} \gg \left| \frac{1}{KC_1(e^{j\omega T})H(e^{j\omega T})} \right|. \quad (28)$$

증명 : 그림 9의 힘반영 제어구조에서 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않고 속도포화를 발생하지 않은 경우에는 (15)가 성립되고, 추종성능을 만족하도록 설계된 (6)의 $C(z)$에 의해 슬레이브 조작기의 각위치는 기준 각위치를 추종한다. 한편, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 슬레이브 조작기의 속도포화가 발생하는 경우에는 (19)가 성립되고, 마스터의 동작 주파수 범위 내에서

$$\left| K_{fs}C_1(e^{j\omega T})H(e^{j\omega T})\left\{\frac{1+P(e^{j\omega T})C(e^{j\omega T})}{C(e^{j\omega T})}\right\}\tilde{u}(e^{j\omega T})\right| \gg |\theta_c(e^{j\omega T})| \quad (29)$$

이면, 즉,

$$K_{fs} \gg \left| \frac{C(e^{j\omega T})}{\{1+P(e^{j\omega T})C(e^{j\omega T})\}C_1(e^{j\omega T})H(e^{j\omega T})\tilde{u}(e^{j\omega T})} \right| |\theta_c(e^{j\omega T})|$$

을 만족하면,

$$\theta_r(e^{j\omega T}) \approx \frac{KK_{fs}C_1(e^{j\omega T})H(e^{j\omega T})}{1+KK_{fs}C_1(e^{j\omega T})H(e^{j\omega T})} \frac{1+P(e^{j\omega T})C(e^{j\omega T})}{C(e^{j\omega T})} \tilde{u}(e^{j\omega T}) \quad (30)$$

이 된다. (18)에서

$$\tilde{u}(e^{j\omega T}) = \frac{\theta_s(e^{j\omega T})}{P(e^{j\omega T})} \quad (31)$$

이므로, (31)을 (30)에 대입하면

$$\theta_r(e^{j\omega T}) \approx \frac{KK_{fs}C_1(e^{j\omega T})H(e^{j\omega T})}{1+KK_{fs}C_1(e^{j\omega T})H(e^{j\omega T})} \frac{1+P(e^{j\omega T})C(e^{j\omega T})}{P(e^{j\omega T})C(e^{j\omega T})} \theta_s(e^{j\omega T}) \quad (32)$$

이 된다. 또한, 마스터의 동작 주파수 범위 내에서

$$K_{fs} \gg \left| \frac{1}{KC_1(e^{j\omega T})H(e^{j\omega T})} \right|$$

을 만족하면, (32)는

$$\theta_r(e^{j\omega T}) \approx \frac{1+P(e^{j\omega T})C(e^{j\omega T})}{P(e^{j\omega T})C(e^{j\omega T})} \theta_s(e^{j\omega T}) \quad (33)$$

이 된다. 여기에서 $C(e^{j\omega T})$는 biproper하고 최소위상이고, $C_1(e^{j\omega T})$는 biproper하고 최소위상이며 안정하고, $P(e^{j\omega T})$는 proper하므로, (33)은 biproper하고 안정하다. 이 때, 슬레이브 조작기의 각위치는

$$\theta_s(e^{j\omega T}) \approx \frac{P(e^{j\omega T})C(e^{j\omega T})}{1+P(e^{j\omega T})C(e^{j\omega T})} \theta_r(e^{j\omega T}) \quad (34)$$

로 주어지며, (34)는 biproper하고 안정하다. 따라서 슬레이브 조작기의 속도가 포화될 때에도 슬레이브의 각위치는 기준 각위치를 추종하게 된다. 결과적으로, 슬레이브 조작기의 속도포화에 관계없이 슬레이브 조작기의 각위치는 기준 각위치를 추종한다. ■

주 : 제안한 그림 9의 힘반영 제어시스템은 슬레이브 조작기의 속도포화가 발생할 때에 제어기가 적분 되말림 현상을 보상하며, 포화에 의해 반영되는 힘으로 마스터의 각위치가 느리게 변하도록 함으로써 슬레이브 조작기가 느리게 변하는 기준 각위치를 추종하게 된다.

IV. 고감속비의 관절을 가지는 조작기에 응용 예

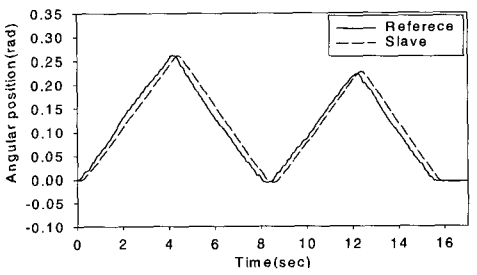
이 절에서는 3절에서 제안한 힘반영 제어기법을 2절에서 살펴본 고감속비의 관절을 가짐으로 인하여 속도포화를 발생하는 동력 매니퓰레이터에 적용하여 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 경우와 접촉한 경우에 대해 실험한 결과를 살펴본다. K_{fc}는 2절의 경우와 같이 0.065로 설정하였고, $C_1(z)$는 biproper하고 최소위상이며 안정하도록 다음과 같이 설계하였다.

$$C_1(z) = \frac{402z^2 - 481z + 110}{z^2}. \quad (35)$$

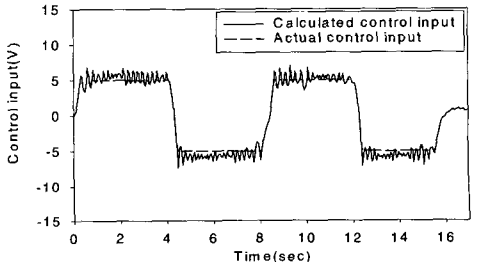
K_{fs}는 (27), (28)을 만족하도록 0.6으로 설정하였다.

1. 물체에 접촉하지 않을 때의 응답

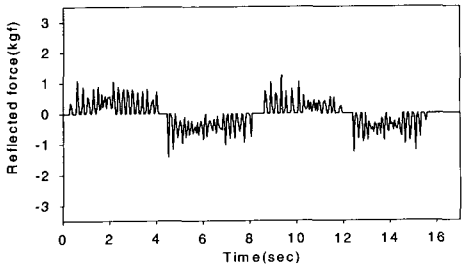
슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 속도포화를 발생하는 경우의 응답을 그림 10에 보였다. 그림 10에서, 마스터 조작기를 빨리 움직여서 슬레이브 조작기의 속도포화가 발생하더라도 포화량은 감소된 상태로 유지되고, 포화에 의한 역힘을 조작자의 손에 가하여 마스터를 천천히 움직이게 하여, 슬레이브 조작기는 느리게 변하는 기준 각위치를 추종함을 볼 수 있다.



(a) Angular position



(b) Control input



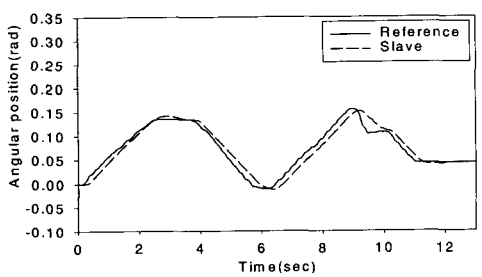
(c) Reflected force

그림 10. 제안한 기법에 대하여 물체에 접촉하지 않을 때의 응답 ($K_{fs}=0.6$).

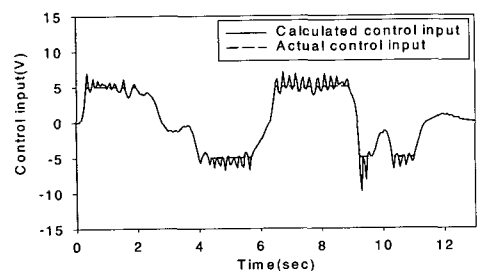
Fig. 10. Responses for the proposed scheme in the non-contact case ($K_{fs}=0.6$).

2. 물체에 접촉할 때의 응답

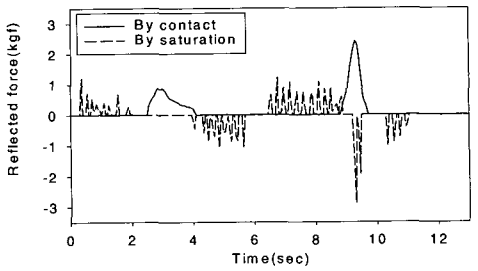
슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 때의 응답을 그림 11에 보였다. 슬레이브 조작기가 물체에 약하게 접촉할 때와 강하게 접촉할 때의 특성을 살펴보기 위하여 첫 번째는 약하게 접촉하였고, 두 번째는 강하게 접촉하였다. 첫 번째 접촉에서, 슬레이브 조작기가 2.55초에 물체에 약하게 충돌할 때에 조작자는 접촉에 의한 힘을 느끼지만 마스터를 약하게 밀어 슬레이브 조작기를 접촉한 상태로 유지하였다. 이 상태에서 3.6초에 마스터를 역방향으로 움직일 경우에 슬레이브 조작기는 3.8초에 물체로부터 분리됨을 보인다. 두 번째 접촉에서, 8.85초에 강하게 충돌시킨 후 조작자가 접촉에 의한 힘을 느끼지만 슬레이브 조작기를 접촉한 상태로 유지하고 있다가 9.05초에 마스터를 역방향으로 움직일 경우에 슬레이브 조작기는 9.3초에 물체로부터 분리됨을 보인다. 여기에서, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉한 상태에 있을 때에 제어기의 포화량이 작게 유지되기 때문에 마스터를 역으로 움직이면 슬레이브 조작기는 기준



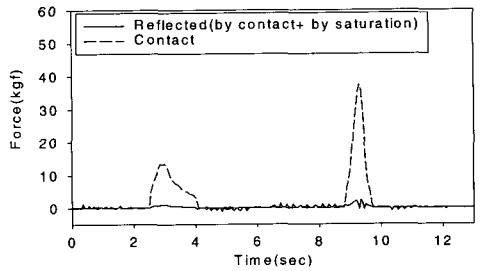
(a) Angular position



(b) Control input



(c) Reflected force



(d) Contact and reflected force

그림 11. 제안한 기법에 대하여 물체에 접촉할 때의 응답 ($K_{fs}=0.6$).

Fig. 11. Responses for the proposed scheme in the contact case ($K_{fs}=0.6$).

위치를 곧바로 추종함을 알 수 있다. 그림 11의 (c), (d)에서, 슬레이브 조작기가 물체에 강하게 충돌할 때에 조작자에게 순간적으로 큰 역힘이 가해짐으로 인해 마스터의 순간적인 역방향으로의 진동폭은 크게 되고, 이로 인하여 슬레이브 제어기의 출력이 역방향으로 포화되며, 포화에 의해 반영되는 힘이 접촉에 의해 반영되는 힘과 반대방향으로 작용하여 서로 상쇄됨을 알 수 있다. 그리고 슬레이브 조작기의 속도포화를 보상하지 않은 구조에서는 포화에 의하여 슬레이브 조작기는 물체에 강하게 충돌하였으나, 제안한 기법에서는 조작자가 속도포화에 관계없이 슬레이브 조작기의 위치제어가 가능하기 때문에 슬레이브 조작기의 접촉력을 임의로 조절할 수 있음을 볼 수 있다.

V. 결론

큰 취급 가반하중을 얻기 위해 고감속비의 관절을 가지는 슬레이브 조작기는 속도포화를 빈번히 발생하기 때문에 기준위치에 대한 슬레이브 조작기의 위치 추종특성이 나빠지고 시스템이 불안정해질 수 있으므로 정교한 힘반영 제어를 수행하는데 어려움이 있다. 본 논문에서는 슬레이브 조작기가 속도포화를 가지는 경우에 대해 속도포화에 관계없이 항상 슬레이브 조작기가 기준위치에 대한 추종성을 가지는 힘반영 제어기법을 제안하였다. 제안한 기법은 슬레이브 제어기 설계시에 적분 되말림 현상을 보상하도록 하고, 또한 포화에 의한 힘을 조작자의 손에 반영하여 마스터 손잡이의 움직임을 느리게 하여 기준위치에 대한 슬레이브 조작기의 위치 추종성을 증가시킨다. 제안한 기법은 조작자가 속도포화에 관계없이 슬레이브 조작

기의 위치를 제어 가능하기 때문에 슬레이브 조작기의 접촉력을 임의로 조절할 수 있다. 또한, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하고 있는 상태에서도 제어기 출력의 포화량이 줄여진 상태에 있게 하기 때문에, 접촉한 상태에서 마스터를 역방향으로 움직이더라도 기준위치에 대한 슬레이브 조작기의 추종성은 향상된다.

본 논문에서 제안한 힘반영 제어기법을 속도포화를 빈번히 발생하는 슬레이브 조작기의 힘반영 제어에 적용하고 실험을 수행하여 제안한 기법의 우수성을 확인하였다. 그러나, 속도포화에 의한 힘반영비를 너무 크게 설정하면 마스터의 불안정한 진동을 유발할 수 있으므로 추종성능과 안정성을 고려하여 힘반영비를 적절하게 설정할 필요가 있으며, 추후 이에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서 제안한 힘반영 제어기법은 고감속비의 관절을 가짐으로 인해 속도포화를 발생하는 슬레이브 조작기에 적용할 경우에 정교하게 힘반영 제어할 수 있다는 장점을 가진다. 특히 원자력 시설의 해체, 절단, 이송 등의 고하중 작업이나 방사선물질의 원격취급을 위한 조작기에 적용하여 정교한 작업을 안정하게 수행함으로서 안정성을 향상할 수 있다는 장점이 있다.

참고문헌

[1] J. Vertut, P. Coiffet, *Robot technology, teleoperation and robotics*, vol. 3A, Prentice-Hall Inc., 1986.

[2] G. J. Raju, G. C. Verghese, and T. B. Sheridan, "Design issues in 2-port network models of bilateral remote manipulation", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1316-1321, 1989.

[3] B. Hannaford, "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 5, no. 4, pp. 426-434, 1989.

[4] W. S. Kim, B. Hannaford, and A. K. Bejczy, "Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay", *IEEE Trans. Robotics and Automation,* vol. 8, no. 2, pp. 176-185, 1992.

[5] A. A. Goldenberg, "On bilateral control of force reflecting teleoperation," *Proc. 11th IFAC World Congress*, pp. 215-220, 1990.

[6] J. C. Dudrange, "A generalized bilateral control applied to master-slave manipulators", *Proc. 20th Int. Sym. Industrial Robots*, pp. 435-442, 1989.

[7] W. S. Kim, "Developments of new force reflecting control schemes and an application to a teleoperation training simulator," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1412-1419, 1992.

[8] H. A. Fertik and C. W. Ross, "Direct digital control algorithms with anti-windup feature", *ISA Trans.*, vol. 6, no. 4, pp. 317-328, 1967.

[9] R. Hanus, M. Kinnaert, and J. L. Henrotte, "Conditioning technique, a general anti-windup and bumpless transfer method," *Automatica*, vol. 23, no. 6, pp. 729-739, 1987.

[10] J. K. Park and C. H. Choi, "Dynamic compensation method for multivariable control systems with saturating actuators", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 40, no. 9, 1995.

[11] A. Zheng, M. V. Kothare, and M. Morari, "Anti-windup design for internal model control", *Int. J. Control*, vol. 60, no. 5, pp. 1015-1024, 1994.

[12] 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.

[13] N. Kircanski and A. Goldenberg, "An experimental study of nonlinear stiffness, hysteresis, and friction effects in robot joints with harmonic drives and torque sensors", *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 16, no 2. pp. 214-239, 1997.

[14] C. L. Phillips, H. T. Nagle, *Digital control system analysis and design*, Prentice-Hall, 1990.

기호설명

θ_c 조작자의 지령 각위치

θ_m 마스터의 각위치

θ_r 기준 각위치

θ_s 슬레이브 조작기의 각위치

u 슬레이브 조작기의 제어기에서 계산된 제어입력

$\tilde{u}$ 슬레이브 조작기의 실제 제어입력

f_{ct} 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시의 접촉힘

f_1 슬레이브 조작기의 속도포화에 의해 조작자에게 가하는 힘

f_2 슬레이브 조작기의 접촉에 의해 조작자에게 가하는 힘

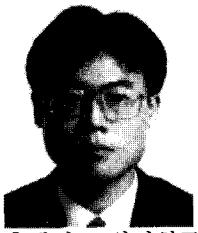
f 접촉 또는 포화에 의해 조작자에게 가하는 힘

K 위치 보정 계수

K_{fc} 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시의 힘반영비

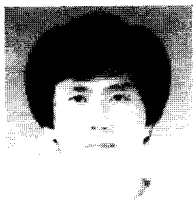
K_{fs} 슬레이브 조작기 속도포화시의 힘반영비

K_{me} 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시에 슬레이브 조작기의 각위치 변화에 대한 접촉힘의 비



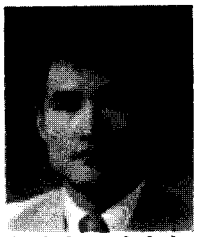
안 성 호

1964년 5월 9일생. 1986년 영남대학교 전자공학과 졸업. 1988년 동대학원 전자공학과 졸업(석사). 1994년~현재 충남대학교 전자공학과 박사과정. 1990년~현재 한국원자력연구소 사용후핵연료 원격취급장치개발팀 선임연구원. 관심분야는 힘 반영제어, 원격로봇제어, 강인제어, Anti-windup 제어.



이 상 정

1957년 8월 15일 생. 1979년 서울대 학교 전자공학과 졸업. 1981년 동대학원 전자공학과 졸업(석사). 1987년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(박사). 1988년~현재 충남대학교 정보통신공학부 교수. 관심분야는 강인제어, GPS 수신기 설계.



윤 지 섭

1958년 2월 3일생. 1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1987년 동대학원 기계공학과 졸업(박사). 1987년 3월~현재 한국원자력연구소 사용후핵연료 원격취급장치개발팀 책임연구원/팀장. 관심분야는 산업공정 원격취급기술, 생산 자동화 및 계측제어, 로봇 및 센서 적용기술.