

사용후핵연료 집합체 취급 및 해체용 원격조작기 시스템 개발

Development of Teleoperated Manipulator System for Handling and Disassembling of Spent Fuel Bundles

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

요 약

사용후핵연료 집합체를 취급 및 해체하기 위한 원격조작기 시스템을 개발하였다. 사용후핵연료의 취급 및 해체공정은 고하중의 작업이기 때문에 고감속비의 관절을 갖는 고하중조작기가 사용된다. 고하중 조작기는 제어입력의 포화를 빈번히 발생하여 정교한 제어성능을 얻기 힘들기 때문에 안전성을 필요로 하는 사용후핵연료 취급 및 해체공정에 적용하기 위해서는 안정성과 힘반영성을 증가시키는 제어알고리즘의 개발이 필요하다. 조작자가 마스터 조작기를 사용하여 고하중 원격조작기를 정교하게 제어할 수 있는 힘반영 제어 알고리즘을 개발하여 원격조작기 시스템에 적용하여 성능을 평가하였다. 개발한 원격조작기를 그리드 절단 및 해체공정을 수행하여 성능을 실증하였다.

Abstract

A teleoperated manipulator system is introduced, which is developed for handling and disassembling. Since the handling and disassembling tasks of the spent fuel bundles are heavy-duty tasks, the heavy-duty power manipulators with high reduction ratio joints are used in the developed system. The heavy-duty power manipulators so frequently occur the control input saturation that the precise control performances are not achieved due to the windup phenomenon. The advanced force reflecting control algorithm is developed and applied for the developed teleoperated manipulator system. The validity of the developed system is verified by a series of experiment and the grid cutting and fuel pin extraction tasks of the mockup spent fuel bundle.

1. 서 론

사용후핵연료의 취급 및 해체 작업은 고방사선의 극한환경에서 이루어지므로 작업자의 피복을 최소화하고 작업의 안전성과 효율성을 높이기 위하여 원격조작기 시스템 (teleoperated manipulator system)을 이용하여 수행한다. 원격조작기 시스템은 조작자가 마스터 조작기를 조작함으로써 원격 환경 내에 있는 원격조작기를 조종하여 원격작업을 수행하는 마스터 슬레이브 조작기(master slave manipulator) 시스템이다. 원격조작기 시스템은 우주공간이나 심해의 탐사, 채굴 그리고 원자력 시설의 해체 등과 같이 인간이 직접 작업할 수 없는 극한환경 하에서의 작업에 널리 사용되어 왔으며, 지능형 로봇을 대신 하여 작업을 수행하는데 널리 도입되어 왔다. 원격조작기 시스템의 제어방식은 센서정보의 흐름에 따라 편방향 제어(unilateral control) 기법과 양방향 제어(bilateral control) 기법으로 나뉘어진다[1][2]. 편방향 제어기법은 조작자가 시각정보에 의존하면서 힘 또는 운동명령을 마스터 조작기를 통하여 지령하고 마스터 조작기로부터의 명령이 원격조작기로 한 쪽 방향으로만 전달되는 방식이다. 양방향 제어기법은 힘 또는 운동정보가 마스터 조작기를 통하여 원격조작기와 조작자에게 양방향으로 전달되는 방식이다. 양방향 제어기법에서 조작자는 원격조작기의 말단장치가 작업환경과 접촉할 때에 발생하는 접촉력을 마스터 조작기를 통하여 제공받기 때문에 조작자는 인간이 감지할 수 있는 오감 중에서 시각과 촉각을 이용함으로써 작업의 생산성을 증대시킬 수 있다. 이와 같이 양방향 제어기법은 조작자를 케환루프에 포함시키는 것이 일반적인 제어구조와 구별되는 특징이고, 힘 케환 기능을 요구하므로 편방향 제어기법의 경우보다 제어구조가 복잡하지만, 최근 원격조작 시스템에 널리 활용되고 있다. 양방향 제어는 원격조작기의 말단장치에서 작용하는 힘이 조작자에게 반영되므로 힘반영 제어(force reflecting control)라 불려지기도 한다.

일반적으로 고감도의 힘반영 기능을 구현하는데는 저감속비의 관절구조를 갖는 원격조작기가 적합하지만, 저감속비의 관절구조로는 큰 취급하중을 얻기 어렵기 때문에 원자력 시설물의 해체, 이송 등의 작업에는 취급하중이 큰 고감속비의 관절구조를 갖는 고하중 원격조작기가 사용된다. 그러나 고하중 원격조작기는 제어입력의 포화를 빈번히 발생하기 때문에[3], 이를 원격조작기로 사용할 경우에는 적분 되말림(windup) 현상으로 인하여 시스템의 안정도가 나쁠 뿐 아니라 위치추종성능이 나빠지게 된다. 이러한 문제에 대하여 안성호 등은 제어입력 포화를 가지는 1자유도 원격조작기에 대하여 원격조작기의 위치추종성능과 안정한 힘반영 특성을 얻을 수 있는 양방향 제어기법을 제안하였다[4]-[7].

본 논문에서는 사용후핵연료 원격취급 및 해체를 위해 개발한 원격조작기 시스템을 소개한다. 2절에서는 개발한 원격조작기 시스템을 소개하고, 3절에서는 제어입력의 포화를 보상한 힘반영 제어기법을 제안한다. 4절에서는 제안한 힘반영 제어기법을 성능을 살펴보고, 그리드 절단공정에 적용한 결과를 제시한다. 마지막으로 5절에서는 결론을 맺는다.

2. 사용후핵연료 취급 및 해체용 원격조작기 시스템

2.1 원격조작기 시스템 구성

개발한 원격조작기 시스템은 그림 1과 같이 마스터 조작기, 원격조작기, 제어시스템, 구동모터 및 드라이버 그리고 힘/토크 센서 등으로 구성된다.

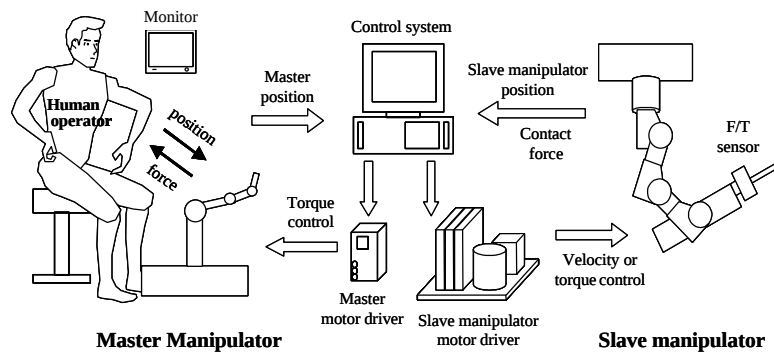
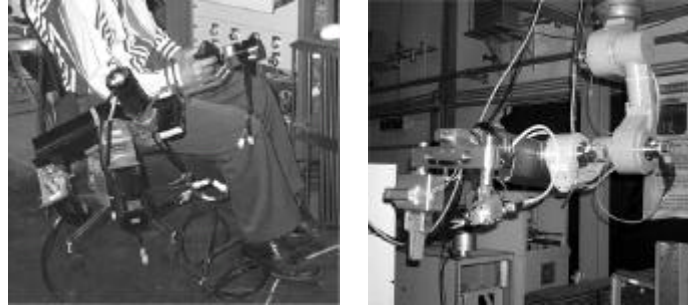


그림 1. 개발한 원격조작기 시스템.

원격조작 양방향 제어시스템에서 조작자는 모니터를 통하여 원격조작기의 동작을 주시하면서 마스터 조작기의 손잡이를 조작하여 기준위치를 지령하고, 제어시스템은 원격조작기 말단장치가 지령된 기준위치를 추종하도록 원격조작기의 각 관절의 구동모터를 제어한다. 원격조작기의 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, 원격조작기의 말단장치에서 작용하는 힘이 조작자에게 반영된다.

본 논문에서 양방향 제어시스템의 원격조작기는 하중이 큰 중량물을 취급할 수 있도록 설계된 고감속비의 관절을 갖는 7자유도의 동력 조작기이다. 원격조작기는 독일의 Hans Wälischmiller사에서 개발한 것으로 천정 크레인의 텔리스코프(telescope)에 부착되어 있으며 원자력 시설의 해체, 이송 등에 사용되며, 취급하중이 약 100 kgf으로 큰 반면에 응답이 매우 느린 특성을 가진다. 마스터 조작기는 의자의 오른쪽 팔걸이 부분에 6자유도를 갖는 조작기를 설치하여 조작자가 편안히 앉은 상태에서 조작할 수 있는 구조이다. 마스터 조작기는 각 축이 직렬 또는 string & pulley 방식으로 구동하는 구조를 가지며, 전후 이동, 좌우회전 및 상하회전이 가능한 구조이다. 제어시스템으로는 pentium 프로세서가 장착된 PC를 사용하였으며, 마스터 조작기와 원격조작기의 구동모터들을 동시에 제어하기 위하여 미국 Motion Engineering사의 다축 제어기(PCX/DSP-400)를 사용하였다. 힘/토크 센서와 제어용 컴퓨터 사이의 신호전달은 RS-232방식으로 하였다. 사용후핵연료 집합체의 그리드 절단과 연료봉 인출을 위한 공구를 개발하여 원격조작기의 말단에 부착하였다. 그림 2는 개발한 원격조작기 시스템의 형상을 나타낸다. 본 논문에서는 3자유도의

마스터 조작기와 3자유도의 원격조작기를 연계하여 원격조작기 시스템을 구성하였다.



(a) 마스터 조작기 (b) 원격조작기 및 공간

그림 2. 개발한 원격조작기시스템의 형상.

2.2 시스템 특성분석

그림 3은 제어입력 포화를 갖는 고하중 원격조작기에 대한 일반적인 힘반영 제어시스템의 블록선도를 나타낸다. F_c 는 힘/토크 센서의 출력에 대하여 중력을 보상하고 교정한 값이며, 원격조작기가 물체에 접촉하지 않을 경우에는 F_c 가 0이다. 따라서 원격조작기가 물체에 접촉할 경우에는 X_s 로부터 조작자에게로의 궤환루프가 형성되지만, 원격조작기가 물체에 접촉하지 않을 경우에는 궤환루프가 형성되지 않는다.

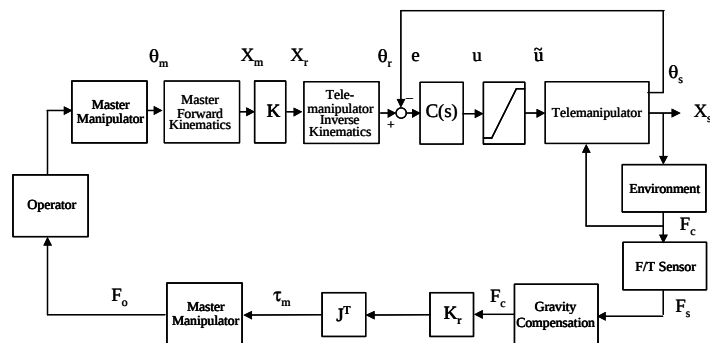


그림 3. 일반적인 고하중 원격조작기의 힘반영 제어 구조.

동력조작기는 하모닉 드라이브(harmonic drive)와 웜(worm)으로 구성된 감속기를 갖는 비선형 특성을 가지는 시스템이지만, 제어입력 포화를 제외한 비선형 특성들은 무시한다. 고감속비의 관절을 가짐으로 인하여 느린 동특성을 가지며 제어입력의 포화를 발생시키는 3자유도 고하중 원격조작기를 그림 3의 점선으로 표시된 부분과 같이 간략히 모델링할 수 있다. 여기서 $P(s)$ 는

$$P(s) = \begin{bmatrix} P_1(s) & 0 & 0 \\ 0 & P_2(s) & 0 \\ 0 & 0 & P_3(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

로 주어진다. $P_i(s), (i=1,2,3)$ 는 동력조작기의 제어입력이 포화되지 않도록 계단입력의 전압(V)을 가하여 각위치(rad)를 측정하여 다음과 같이 각각 모델링하였다[8]. 그리고 $C(s)$ 는

$$C(s) = \begin{bmatrix} C_1(s) & 0 & 0 \\ 0 & C_2(s) & 0 \\ 0 & 0 & C_3(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

로 주어진다. 또한, $\tilde{u}_i(t), (i=1,2,3)$ 는 $u_i(t)$ 에 대하여 다음과 같은 포화특성을 갖는다.

$$\tilde{u}_i(t) = \begin{cases} u_{i_{\max}}, & u_i(t) > u_{i_{\max}} \\ u_i(t), & -u_{i_{\max}} \leq u_i(t) \leq u_{i_{\max}} \\ -u_{i_{\max}}, & u_i(t) < -u_{i_{\max}} \end{cases} \quad (3)$$

2.3 고하중 원격조작기의 제어 문제

힘반영 제어시스템에서 원격조작기의 제어입력이 포화되면 적분 되말림 현상이 발생하여 시스템이 불안정해지고 기준위치에 대한 원격조작기의 위치추종성능이 나빠지게 되며 안정하고 정교한 힘반영 성능을 얻기 어렵다[4]. 원격조작기의 제어입력 포화는 마스터 조작기를 빠르게 조작함으로써 발생되기 때문에 원격조작기의 위치추종오차를 감소시키기 위해서는 제어입력이 포화될 경우에 조작자가 마스터 조작기를 천천히 조작해야 된다. 그러나 조작자가 원격조작기의 제어입력 포화를 시각에만 의존하여 확인 가능하기 때문에 조작자가 제어입력의 포화를 인식하기 어려우므로 조작자가 제어입력이 포화됨과 동시에 마스터 조작기를 느리게 조작하기 힘들다. 따라서 원격조작기의 위치추종성능이 저하되며 마스터 조작기 손잡이의 위치와 원격조작기 말단장치 사이에 공간적인 일치감을 얻기 힘들며, 위치 추종성과 힘반영 성능을 갖는 제어기법의 개발이 요구된다.

3. 제어입력포화를 고려한 힘반영 제어기법

3.1. 제안하는 힘반영 제어기법

그림 4는 제안하는 힘반영 제어기법의 블록선도를 나타낸다. 3자유도 원격조작기에 대하

여 각 관절의 제어기는 2단계 설계기법으로 설계한다[4].

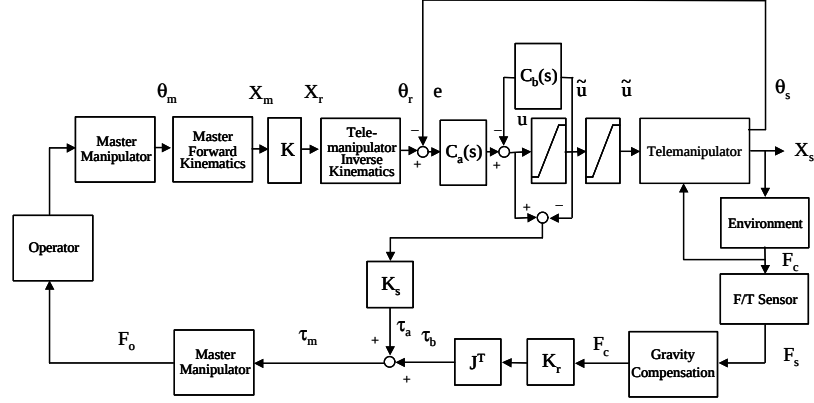


그림 4. 제안하는 힘반영 제어 구조.

i) 1 단계 : 식 (2)에서 $C_i(s)$, ($i=1,2,3$)를 다음과 같은 불완전 미분 형태의 PID 제어기로 설계한다.

$$C_i(s) = K_{Pi} + \frac{K_{Ii}}{s} + \frac{K_{D_i}s}{s + \gamma_i}, \quad i=1,2,3. \quad (4)$$

여기서 $\gamma_i > 0$ 이다. Biproper하고 최소위상(minimum phase)인 $C_i(s)$ 의 PID 계수들은 원격조작기의 제어입력이 포화되지 않은 상태에서 원격조작기 각 관절의 각위치가 기준 각위치를 추종하도록 설정한다.

ii) 2 단계 : 그림 4의 구조에 대하여 $C_a(s)$ 와 $C_b(s)$ 를 다음과 같이 설계한다.

$$C_a(s) = \begin{bmatrix} C_{a1}(s) & 0 & 0 \\ 0 & C_{a2}(s) & 0 \\ 0 & 0 & C_{a3}(s) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

여기서 $C_{ai}(s)$, $i=1,2,3$ 은 biproper하고 최소위상이며 안정하다.

$$C_b(s) = \begin{bmatrix} C_{b1}(s) & 0 & 0 \\ 0 & C_{b2}(s) & 0 \\ 0 & 0 & C_{b3}(s) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\text{여기서 } C_{bi}(s) = C_{ai}(s)C_i^{-1}(s) - 1, \quad i=1,2,3. \quad (7)$$

로 설계한다.

한편, 3자유도의 마스터 조작기와 3자유도의 원격조작기로 구성된 양방향 제어시스템에서는 1자유도의 경우와는 달리 원격조작기와 마스터 조작기 사이에 상호 대응되는 링크가 움직이는 방향은 항상 일치하지 않는다. 따라서 3자유도 원격조작기에 대한 양방향 제어 구조에서는 원격조작기 어느 한 관절의 제어입력이 포화될 경우에 마스터 조작기의 각 링크가 움직이는 방향과의 반대방향으로 힘을 가하여 조작자가 마스터 조작기를 빨리 움직이지 못하도록 한다. 즉, 원격조작기 각 관절에 대한 제어입력의 포화량에 의해 마스터 조작기의 각 관절 구동모터에

$$\begin{bmatrix} \tau_{a1}(s) \\ \tau_{a2}(s) \\ \tau_{a3}(s) \end{bmatrix} = K_s \begin{bmatrix} |u_1(s) - \tilde{u}_1(s)| \\ |u_2(s) - \tilde{u}_2(s)| \\ |u_3(s) - \tilde{u}_3(s)| \end{bmatrix} \quad (8)$$

의 토크를 발생하여 조작자에게 힘반영한다. 여기서

$$K_s = \begin{bmatrix} a_1 K_{s11} & a_1 K_{s12} & a_1 K_{s13} \\ a_2 K_{s21} & a_2 K_{s22} & a_2 K_{s23} \\ a_3 K_{s31} & a_3 K_{s32} & a_3 K_{s33} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$a_j = \begin{cases} +1, & \theta_{mj} \text{ 가 } \theta_{mj}^{\max} \text{ 가} \\ -1, & \theta_{mj} \text{ 가 } \theta_{mj}^{\min} \text{ 가} \\ 0, & \theta_{mj} \text{ 가 } \theta_{mj}^{\text{mid}} \text{ 가} \end{cases}, \quad j=1,2,3 \quad (10)$$

이고, θ_{mj} 는 마스터 조작기 j 번 째 관절의 각위치이다. 식 (8)-(10)으로 주어지는 힘반영은 원격조작기의 제어입력이 포화될 때에 포화량을 힘으로 변환하여 움직이고 있는 마스터 조작기의 링크를 통하여 조작자에게 반영시켜 마스터 조작기를 천천히 움직이게 함으로써, 기준위치와 원격조작기 말단장치 사이의 위치오차를 감소시킨다. 결과적으로, 그림 4의 3자유도 원격조작기에 대한 양방향 제어구조에서는 원격조작기 어느 한 관절의 제어입력이 포화될 경우에 적분 되말림 현상의 보상과 동시에 식 (8)-(10)으로 주어지는 힘반영으로 인하여 기준위치에 대한 원격조작기 말단장치의 위치추종 성능은 향상된다.

원격조작기의 말단장치가 외부환경과 접촉할 때의 접촉력을 마스터 측에 힘반영하기 위하여 마스터 조작기 관절에서 발생해야 하는 토크는 마스터 조작기에 대한 자코비안(jacobian)의 전치행렬(transpose matrix) J^T 를 구함으로써 얻어진다[9]. 그림 4의 양방향 제어구조에서 원격조작기 각 관절의 제어입력이 포화되지 않은 상태에서 원격조작기의 말단장치가 물체에 접촉할 경우에는 마스터 조작기의 각 관절 구동모터에

$$\begin{bmatrix} \tau_{b1}(s) \\ \tau_{b2}(s) \\ \tau_{b3}(s) \end{bmatrix} = J^T K_r \begin{bmatrix} F_{cx}(s) \\ F_{cy}(s) \\ F_{cz}(s) \end{bmatrix} \quad (11)$$

의 토크를 발생하여 조작자에게 힘반영한다.

한편, 원격조작기 각 관절의 제어입력이 포화된 상태에서 원격조작기의 말단장치가 외부 환경과 접촉하면, 접촉력과 포화량에 의하여 마스터 조작기의 각 관절 구동모터에

$$\begin{bmatrix} \tau_{m1}(s) \\ \tau_{m2}(s) \\ \tau_{m3}(s) \end{bmatrix} = K_s \begin{bmatrix} |u_1(s) - \tilde{u}_1(s)| \\ |u_2(s) - \tilde{u}_2(s)| \\ |u_3(s) - \tilde{u}_3(s)| \end{bmatrix} + J^T K_r \begin{bmatrix} F_{cx}(s) \\ F_{cy}(s) \\ F_{cz}(s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

의 토크를 발생하여 조작자에게 힘반영한다. 이 때, 원격조작기 말단장치의 접촉력에 대한 힘반영 뿐만 아니라 제어입력 포화에 대한 힘반영에 의하여 조작자는 마스터 조작기를 천천히 움직이게 되고, 마스터 조작기의 위치에 의해 지정되는 기준위치에 대한 원격조작기 말단장치의 위치추종성능은 향상된다.

3.2 기구학 해석 및 작업영역 조합

원격조작 시스템에서는 원격조작기의 말단장치가 마스터 조작기를 사용하여 조작자가 지정하는 기준위치를 추종하기 때문에 마스터 조작기와 원격조작기에 대한 기구해석과 상호 간의 적절한 작업공간 조합(mapping)이 필요하다. 그림 5는 본 논문에서 사용한 3자유도의 마스터 조작기와 3자유도의 원격조작기에 대한 개략도를 나타낸다.

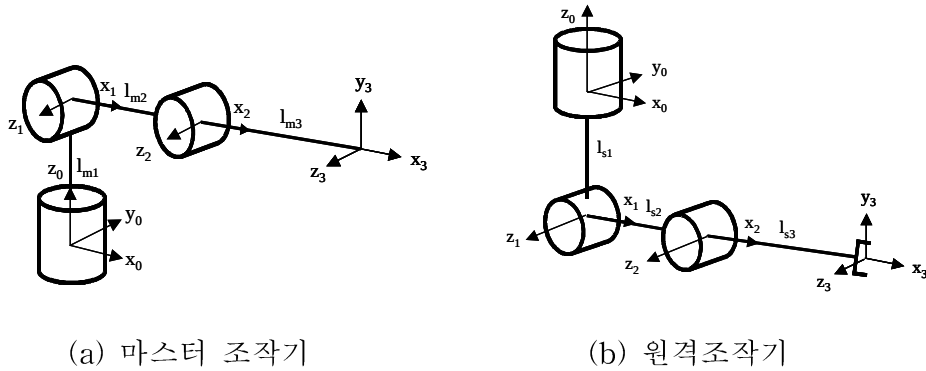


그림 5. 마스터 조작기와 원격조작기의 개략도.

본 논문에서 사용한 마스터 조작기와 원격조작기의 링크(link)들은 길이가 서로 다르기 때문에 원격조작기 말단장치가 추종해야할 기준위치를 마스터 조작기 손잡이의 위치로부터 보정하였다. 그림 5에서 l_{m1} 을 0으로 둔 상태에서 마스터 조작기의 손잡이의 위치를

기준위치로 설정하였으며, l_{s1} 을 0으로 둔 상태에서 원격조작기의 말단장치가 기준위치, 즉 마스터 조작기의 손잡이 위치를 1 : 1로 추종하도록 작업공간을 조합하였다.

그림 5의 (a)의 마스터 조작기에 대하여 D-H표기법(Denavit-Hatenberg notation)을 사용하여 마스터 조작기 첫 번째 관절 좌표계에 대한 말단부 좌표계의 변환을 구하면 다음과 같이 표시된다[9].

$$\begin{aligned} {}^0_3T &= {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T \\ &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x_m \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y_m \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z_m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서 회전행렬 r_{ij} , ($i, j=1, 2, 3$)은

$$r_{ij} = \begin{bmatrix} C_{m1}C_{m23} & -C_{m1}S_{m23} & S_{m1} \\ S_{m1}C_{m23} & -S_{m1}S_{m23} & -C_{m1} \\ S_{m23} & C_{m23} & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

이고, l_{m1} 이 0인 경우의 마스터 조작기 첫 번째 관절 좌표계에 대한 말단부 좌표계의 위치 벡터, 즉 정기구학(forward kinematics)은

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{m1}(C_{m2}l_{m2} + C_{m23}l_{m3}) \\ S_{m1}(C_{m2}l_{m2} + C_{m23}l_{m3}) \\ S_{m2}l_{m2} + S_{m23}l_{m3} \end{bmatrix} \quad (15)$$

로 주어진다. 여기서 $C_{mi} = \cos \theta_{mi}$, $S_{mi} = \sin \theta_{mi}$, $C_{mij} = \cos(\theta_{mi} + \theta_{mj})$, $S_{mij} = \sin(\theta_{mi} + \theta_{mj})$ 이다.

원격조작기 말단장치가 기준위치를 추종하기 위하여 원격조작기의 각 관절이 움직여야 할 각위치를 구하기 위하여 원격조작기의 역기구학(inverse kinematics) 해석이 필요하다. 그림 5의 (b)의 원격조작기에 대하여 D-H표기법을 사용하여 첫 번째 관절 좌표계에 대한 말단장치 좌표계의 변환을 구하면 다음과 같이 표시된다[9].

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x_s \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y_s \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

식 (16)에서 회전행렬 r_{ij} , ($i, j=1, 2, 3$)은

$$r_{ij} = \begin{bmatrix} C_{s1}C_{s23} & -C_{s1}S_{s23} & S_{s1} \\ S_{s1}C_{s23} & -S_{s1}S_{s23} & -C_{s1} \\ S_{s23} & C_{s23} & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

로 주어지고, l_{s1} 가 0인 경우의 원격조작기 첫 번째 관절 좌표계에 대한 말단장치 좌표계의 위치벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{s1}(C_{s2}l_{s2} + C_{s23}l_{s3}) \\ S_{s1}(C_{s2}l_{s2} + C_{s23}l_{s3}) \\ S_{s2}l_{s2} + S_{s23}l_{s3} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

원격조작기의 각 관절이 움직여야 할 각위치는, 식 (18)로 주어지는 원격조작기의 위치 $[x_s, y_s, z_s]^T$ 를 원격조작기가 추종할 기준위치 $[x_r, y_r, z_r]^T$ 로 두고 원격조작기의 역기구학을 풀면, 다음과 같이 구해진다[9].

$$\begin{bmatrix} \theta_{r1} \\ \theta_{r2} \\ \theta_{r3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Atan2}(y_s, x_s) \\ \text{Atan2}(\mp\sqrt{1-C_{s2}^2}, C_{s2}) \\ \text{Atan2}(\pm\sqrt{1-C_{s3}^2}, C_{s3}) \end{bmatrix}. \quad (19)$$

여기서,

$$C_{s2} = \frac{(C_{s1}x_s + S_{s1}y_s)(l_{s2} + C_{s3}l_{s3}) + (S_{s3}l_{s3})z_s}{(l_{s2} + C_{s3}l_{s3})^2 + (S_{s3}l_{s3})^2} \quad (20)$$

$$C_{s3} = \frac{(C_{s1}x_s + S_{s1}y_s)^2 + z_s^2 - l_{s2}^2 - l_{s3}^2}{2l_{s2}l_{s3}} \quad (21)$$

이다.

원격조작기의 말단장치가 물체에 접촉할 때의 접촉력을 마스터 측에 힘반영할 때에 마스터 조작기 각 관절에서 발생하는 토크는 마스터 조작기에 대한 자코비안의 전치행렬을 구함으로써 얻어지며, 식 (11),(12)에서의 J^T 는 다음과 같이 주어진다[10].

$$J^T = \begin{bmatrix} 0 & S_{m3}l_{m2} & 0 \\ 0 & C_{m3}l_{m2} + l_{m3} & l_{m3} \\ -C_{m2}l_{m2} - C_{m23}l_{m3} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

3.3 힘/토크 센서 출력의 중력보상

원격조작기의 말단장치에 부착된 힘/토크 센서는 중력의 영향으로 인하여 원격조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서도 값을 출력할 뿐 만 아니라 말단장치의 위치에 따라 값이 변한다. 따라서 원격조작기가 물체에 접촉할 때의 접촉력을 측정하기 위하여 중력에 대한 보상이 필요하다. 3자유도 원격조작기에 대하여 접촉력은 실제 힘/토크 센서로부터 측정한 값 $[F_{sx}(s) \ F_{sy}(s) \ F_{sz}(s)]^T$ 와 원격조작기가 초기위치에 정지해 있을 때에 측정한 값의 평균치로부터 예측한 값 $[F_{ex}(s) \ F_{ey}(s) \ F_{ez}(s)]^T$ 과의 차에 교정상수(K_{co})를 곱하여 얻는다. 즉, 접촉력 $[F_{cx}(s) \ F_{cy}(s) \ F_{cz}(s)]^T$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} F_{cx}(s) \\ F_{cy}(s) \\ F_{cz}(s) \end{bmatrix} = K_{co} \left(\begin{bmatrix} F_{sx}(s) \\ F_{sy}(s) \\ F_{sz}(s) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{ex}(s) \\ F_{ey}(s) \\ F_{ez}(s) \end{bmatrix} \right) \quad (23)$$

여기서 $[F_{ex}(s) \ F_{ey}(s) \ F_{ez}(s)]^T$ 는

$$\begin{bmatrix} F_{ex}(s) \\ F_{ey}(s) \\ F_{ez}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{s12} & -S_{s12} & 0 \\ S_{s12} & C_{s12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{ax}(s) \\ F_{ay}(s) \\ F_{az}(s) \end{bmatrix} \quad (24)$$

이고[10], $[F_{ax}(s) \ F_{ay}(s) \ F_{az}(s)]^T$ 는 원격조작기가 초기위치에 정지해 있을 때에 측정한 값의 평균치이다.

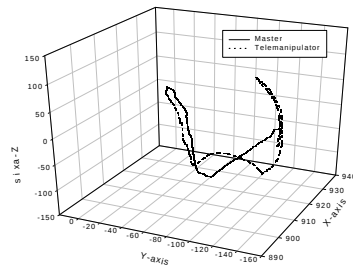
4. 적용실험

3자유도의 마스터 조작기와 고감속비를 갖는 3자유도 원격조작기로 구성된 힘반영 제어 시스템에 대하여 실험을 수행하였다. 디지털 제어시스템으로 구현할 때의 샘플링 주기 T 는 0.05초로 설정하였다. 디지털 제어가 $C_i(z)$ 는 $C_i(s)$ 로부터 쌍선형(bilinear) 변환에 의해 구하였다.

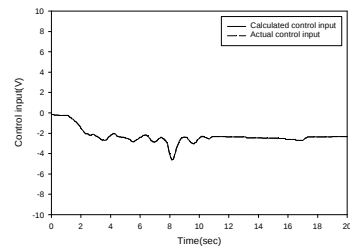
4.1 제어입력 포화를 보상하지 않은 경우의 응답

그림 6은 3자유도 원격조작기에 대하여 제어입력 포화를 보상하지 않은 그림 3의 구조로 원격조작 양방향 제어시스템을 구성한 경우의 응답을 나타낸다. 조작자는 마스터 조작기를 (935.0mm, 0.0mm, 0.0mm)에서 출발하여 (916.8mm, -62.8mm, -12.4mm)를 경유하고 (912.3mm, -141.2mm, 25.7mm)에 도착하도록 조작하였다. 이 때, 원격조작기는

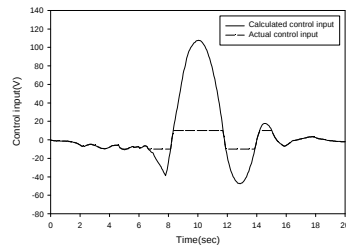
(935.0mm, 0mm, 0mm)에서 출발하여 6.85초에 (920.2mm, -49.7mm, -107.9mm)에서 물체에 접촉하고 불안정하게 진동하다가 마지막 도착위치 (912.2mm, -141.5mm, 26.5mm)에 도착함을 그림 6의 (a)에서 볼 수 있다. 식 (23)을 이용하여 중력을 보상한 결과, 접촉력의 중력보상 특성이 우수함을 그림 6의 (e)에서 볼 수 있다. 그림 6의 (b), (c), (d)에서 원격조작기 제 2축과 3축의 제어입력이 불안정하게 진동함을 볼 수 있으며, 이로 인하여 원격조작기 말단장치의 위치는 불안정하게 진동하여, 마스터 조작기 손잡이의 위치에 대한 원격조작기 말단장치의 위치추종성능이 나쁨을 (a)에서 볼 수 있다. 결과적으로, 고감속비의 관절을 갖는 3자유도 원격조작기에 대하여 제어입력의 포화를 보상하지 않은 양방향 제어구조로는 안정하고 정교한 접촉작용을 필요로 하는 작업에 적용할 수 없음을 알 수 있다.



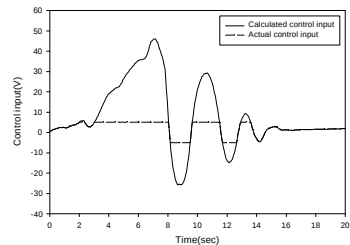
(a) 위치추종



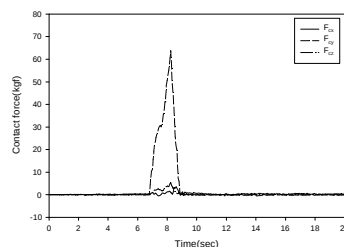
(b) 제어입력(1축)



(c) 제어입력(2축)



(d) 제어입력(3축)

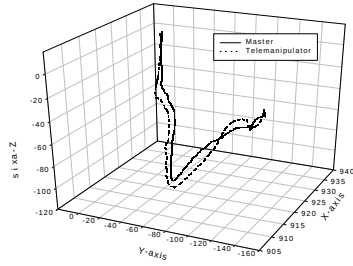


(e) 접촉력

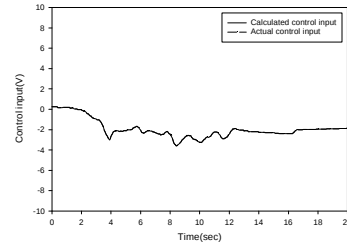
그림 6. 제어입력 포화를 보상하지 않은 경우의 응답.

4.2 제안한 힘반영 제어기법에 대한 응답

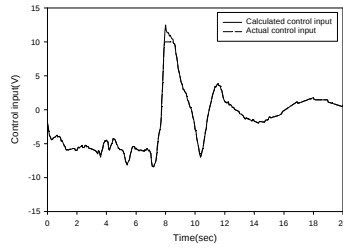
제안한 그림 4의 양방향 제어구조에 대하여 $C_{ai}(s)$ 는 biproper하고 최소위상이며 안정하도록 다음과 같이 설계하였다. 그리고 $C_{bi}(s)$ 는 식 (7)을 만족하도록 설계하였다.



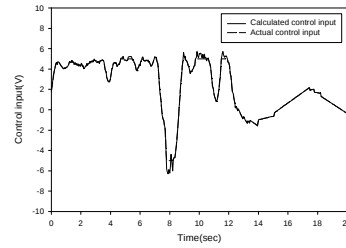
(a) 위치추종



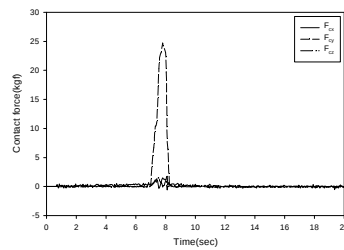
(b) 제어입력(1축)



(c) 제어입력(2축)



(d) 제어입력(3축)



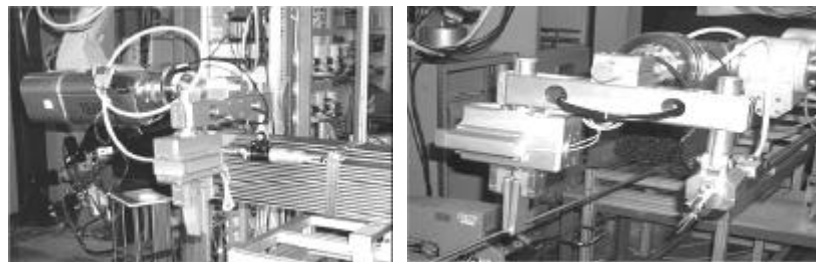
(e) Contact force

그림 7. 제안한 양방향 제어기법에 대한 응답.

그림 7은 제어입력의 포화를 보상한 그림 4 구조의 원격조작 양방향 제어시스템을 구성하고 원격조작기가 물체에 접촉할 때의 응답을 나타낸다. 조작자는 마스터 조작기를 (935.0mm, 0.0mm, 0.0mm)에서 출발하여 (919.5mm, -48.1mm, -109.1mm)를 경유하고

(910.0mm, -49.5mm, -15.5mm)에 도착하도록 조작하였다. 이 때, 원격조작기의 말단장치는 (935.0mm, 0.0mm, 0.0mm)에서 출발하여 7.05초에 (921.7mm, -37.5mm, -102.1mm)에서 물체에 접촉하고 마지막 위치 (909.7mm, -150.9mm, -14.3mm)에 도착함을 그림 7의 (a)에서 볼 수 있다. 그림 7의 (b), (c), (d)에서 원격조작기의 말단장치가 물체에 접촉하는 것과 관계없이 제어입력의 포화로 인한 적분 되말림 현상은 보상됨을 볼 수 있으며, (a)에서 원격조작기의 말단장치 위치는 마스터 조작기 손잡이의 위치에 대하여 우수한 추종성을 가짐을 볼 수 있다. 결과적으로, 본 논문에서 제안한 양방향 제어기법으로 고감속비의 관절을 갖는 원격조작기를 정교하게 제어할 수 있음을 알 수 있다.

개발한 원격조작기 시스템을 목업 사용후핵연료 집합체의 그리드 절단 및 연료봉 취급 및 이송 공정에 적용하였다. 그리드의 절단과 연료봉 취급 및 인출 공정을 위하여 공압가위 절단장치와 전동 그리퍼로 구성되는 공구를 원격조작기의 말단에 부착하였다. 그림 8은 그리드 절단공정과 연료봉 취급 및 인출공정을 나타낸다. 개발한 원격조작기 시스템을 사용후핵연료 집합체의 그리드 절단 및 연료봉 인출공정에 적용한 결과 안정하고 정교한 작업을 수행할 수 있음을 확인하였다.



(a) 그리드 절단공정 (b) 연료봉 취급 및 인출공정

그림 8. 사용후핵연료 취급 및 해체 공정.

5. 결 론

사용후핵연료의 취급 및 해체 작업을 위한 원격조작기 시스템을 개발하였다. 이 원격조작기 시스템은 조작자가 조작하는 마스터 조작기, 원격환경 내에서 원격작업을 수행하는 원격조작기 그리고 제어시스템 등으로 구성된다. 사용후핵연료의 취급 및 해체 작업은 고하중 작업이므로 고감속비의 관절을 갖는 고하중 원격조작기가 사용되었다. 고하중 원격조작기는 마스터 조작기에 비하여 느린 동특성으로 인하여 제어입력에 포화를 빈번히 발생한다. 제어입력의 포화는 적분 되말림 현상을 발생하여 원격조작기의 위치추종성을 나쁘게 할 뿐 만 아니라 시스템을 불안정하게 하기 때문에 정교한 힘반영 제어성을 얻기 어렵다. 본 논문에서는 제어입력 포화를 보상한 힘반영 제어기법을 개발하여 원격조작기 시스템에 적용하여 실험하였다. 사용후핵연료 집합체의 그리드 절단 및 연료봉 이송 실험을 통하여 개발한 시스템의 우수성을 확인하였다. 개발한 원격조작기 시스템을 원자

력 시설의 해체, 이송 등과 같이 하중이 큰 물질의 원격취급을 위한 고하중 작업에 적용하여 정교하고 안정하게 작업을 수행할 수 있다는 장점이 있다.

후 기

이 논문은 과학기술부의 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] J. Vertut, P. Coiffet, *Robot technology, teleoperation and robotics*, vol. 3A, Prentice-Hall Inc., 1986.
- [2] M. Uebel, M. Ali and I. Minis, "The effect of bandwidth on telerobot system performance", *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 24, no. 2, pp. 342-348, 1994.
- [3] 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.
- [4] S. H. Ahn, J. S. Yoon and S. J. Lee, "A force reflecting control scheme for telemanipulators with high reduction ratio joint," *Robotica*, vol. 20, no. 1, pp. 69-79, 2002.
- [5] 안성호, 윤지섭, 이상정, "제어입력 포화를 가지는 원격조작기의 힘반영 제어," 대한전기학회 논문지, 제49권, D편, 제10호, pp. 572-581, 2000.
- [6] 안성호, 윤지섭, 이상정, "원격조작기의 속도포화 보상 힘반영 제어," 제어·자동화·시스템 공학회 논문지, 제6권, 제10호, pp. 894-902, 2000.
- [7] 안성호, 윤지섭, 이상정, "제어입력 포화를 고려한 고하중 원격조작기의 힘반영 유연성 제어," 대한전자공학회 논문지, 제37권, SC편, 제5호, pp. 330-341, 2000.
- [8] C. L. Phillips, H. T. Nagle, *Digital control system analysis and design*, Prentice-Hall, 1990.
- [9] P. McKerrow, *Introduction to robotics*, Addison-Wesley, 1986.
- [10] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot dynamics and control*, John Wiley & Sons, Inc. 1989.