

사용후핵연료 차세대관리공정 원격 운전/유지보수용 천정이동 서보 매니플레이터 시스템 개발

Development of a Bridge Transported Servo Manipulator System for the Remote Operation and Maintenance of Advanced Spent Fuel Conditioning Process

박 병 석*, 이 종 광, 이 효 직, 최 창 환, 윤 광 호, 윤 지 섭

(Byung-Suk Park, Jong-Kwang Lee, Hyo-Jik Lee, Chang-Hwan Choi, Kwang-Ho Yoon, and Ji-Sup Yoon)

Abstract : The Advanced Spent Fuel Conditioning Process(ACP), which is the process of the reduction of uranium oxide by lithium metal in a high temperature molten salt bath for spent fuel, was developed at Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI). Since the ACP equipment is located in an intense radiation field (hot cell) as well as in a high temperature, it must be remotely operated and maintained. The ACP hot cell is very narrow so the workspace of the wall-mounted mechanical Master-Slave Manipulators(MSMs) is restricted. A Bridge Transported Servo Manipulator(BTSM) system has been developed to overcome the limitation of an access that is a drawback of the mechanical MSMs. The BTSM system consists of a bridge crane with telescoping tubeset, a slave manipulator, a master manipulator, and a control system. We applied a bilateral position-position control scheme with friction compensation as force-reflecting controller. In this paper, the transmission characteristics on the tendon-and-pulley train is numerically formulated and analyzed. Also, we evaluate the performance of the force-reflecting servo manipulator.

Keywords : ACP, spent fuel, bridge transported servo manipulator, tendon-and-pulley, maintenance

I. 서론

원자력발전에서 필연적으로 발생하는 부산물인 사용후핵연료(spent fuel)는 높은 방사선과 열을 방출하는 고준위 폐기물이지만, 한편으로는 재사용이 가능한 우라늄을 95% 이상 함유하고 있기 때문에 효과적으로 재순환된다면 미래의 귀중한 에너지 자원인 양면성을 갖고 있다. 한국원자력연구원에서는 이러한 사용후핵연료를 환경 친화적이고 핵확산 저항성(proliferation resistance)이 있을 뿐만 아니라 에너지 자원의 활용을 극대화할 수 있는 관리 및 이용 기술의 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 이의 일환으로 사용후핵연료를 건식 고온에서 금속전환하여 사용후핵연료의 부피, 발열량 및 방사선 세기를 1/4 이하로 줄일 수 있는 사용후핵연료 차세대관리공정(Advanced Spent Fuel Conditioning Process; ACP)을 개발하였으며, 이를 검증하기 위한 실험실 규모 시험 시설(ACP Facility; ACPF)을 건설하여 기술적 가능성을 입증하였다. ACP 장치는 고방사선 물질을 다룰 수 있는 ACPF내 핫셀(hot cell)에 놓여 있으며 핫셀 밖 작업자에 의해 원격조작 장비로 운전된다[1].

핫셀은 일반적으로 크게 방사선을 차폐할 수 있는 두께(90cm 이상)의 콘크리트 벽과 작업자가 핫셀 내부를 볼 수

있는 여러 개의 납유리 차폐 창(lead-glass shield window) 및 원격조작 장비인 벽 부착 기계식 마스터-슬레이브 매니플레이터(Mechanical Master-Slave Manipulators; MSM)로 구성되며, 매니플레이터는 차폐 창을 중심으로 좌우에 1쌍씩 설치된다. 마스터 매니플레이터는 차폐 벽 바깥쪽에 슬레이브 매니플레이터는 차폐 벽 안쪽에 설치된다. 철심 와이어와 기어 등으로 마스터와 슬레이브가 기계식으로 연결되어 있으며, 작업자는 차폐 벽 밖에서 차폐 창을 통해서 핫셀 내부를 보면서 마스터를 조종하여 차폐 벽 안쪽의 슬레이브를 조작하여 방사선 물질의 취급 작업을 하게 된다.

소형 핫셀에서의 원격 작업은 대부분 기계식 마스터-슬레이브 매니플레이터에 의해 이루어져 왔지만, 70년대 이후 중대형 핫셀이 개발됨에 따라 천정이동 양팔 서보 매니플레이터가 요구되었다. 이는 기계식 마스터-슬레이브 매니플레이터에 비해 작업 영역을 증대시키는 장점이 있으나 작업효율을 떨어뜨리는 단점도 발생한다. 특히, 작업자를 쉽게 피로하게 할 수 있기 때문에 힘반영 마스터-슬레이브 서보 매니플레이터에 대한 연구가 오랜 기간 동안 활발히 진행되었다. 최근 유럽연합(EU)에서는 유럽연합 핵융합로인 JET(Joint European Torus)의 유지보수용 천정이동 양팔 마스터-슬레이브 서보 매니플레이터를 개발하여 2003년 3월부터 2004년 1월 까지 212 가지의 원격작업 시험을 완료하였다. 미국 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)에서는 SNS(Spallation Neutron Source)의 중성자 조사실인 target room의 유지보수용 조작기를 개발하여 2006년 5월부터 활용 중에 있다[2].

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 8. 5., 채택확정 : 2007. 9. 1.

박병석, 이종광, 이효직, 최창환, 윤광호, 윤지섭 : 한국원자력연구원 (nbspark@kaeri.re.kr/leejk@kaeri.re.kr/hyojik@kaeri.re.kr/khyoon525@kaeri.re.kr/madistcch@kaeri.re.kr/syoon@kaeri.re.kr)

※ 본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

한국원자력연구원의 ACPF는 소형 핫셀이지만 핫셀 크기에 비해 공정장치의 규모가 크고, 장치간의 간격이 협소한 특수 환경 때문에 장치가 기계식 마스터-슬레이브 매니플레이터의 물리적인 작업 공간 내에 있더라도 장치의 상부 및 후면에 대한 운전/유지보수 작업에는 어려움이 따르고, 일부는 불가능하다[3]. 따라서, ACP의 성공적인 운전 및 유지보수를 위해서는 핫셀 내에서 공간적인 제약 없이 자유롭게 이동할 수 있는 장비가 필요하게 되었다. 본 연구에서는 이를 해결할 수 있는 장비로서 마스터와 슬레이브가 각각 한팔이고, 소형인 천정이동 서보 매니플레이터(Bridge Transported Servo Manipulator; BTSM) 시스템을 개발하여 ACPF의 원격 운전전에 활용하였다[4,5].

개발한 한팔 서보 매니플레이터는 현존하는 국내·외 고방사선 작업용 서보 매니플레이터 중 자체 중량에 대한 취급하중이 가장 높다(기존 최고 모델인 독일 Telerob 사의 EMSM 2B의 한팔 자체 중량 및 취급 하중은 각각 85kgf 및 24kgf이며, 개발한 모델은 각각 50kgf 및 15kgf 임). 자체 중량 대비 취급 하중을 크게 하기 위하여 토크 전달력이 큰 몸체 회전, 상부 팔 틸트, 하부 팔 틸트 운동은 기어 구동 방식을 채택하였고, 토크 전달력이 비교적 작은 하부 팔 회전, 손목 팬/틸트 및 그립 운동은 텐던-폴리(tendon-and-pulley) 구동 방식을 채택하였다. 텐던-폴리 구동 방식은 힘 반영(force reflection) 서보 매니플레이터의 중요한 요소인 마찰을 작게 하는 장점이 있으나, 링크의 회전에 따라 텐던이 폴리에 감기는 양이 변화하여 모션 간섭현상(coupling)이 발생하는 단점도 발생한다. 개발한 서보 매니플레이터는 텐던으로 스틸 와이어를 사용하였다.

본 논문에서는 천정이동 서보 매니플레이터 시스템의 개요, 서보 매니플레이터의 와이어-폴리 구동부에 대한 기구학적 유도식과 이의 분석을 통한 와이어 구동 링크들의 동작 특성 및 힘반영 제어 성능에 대해 기술 한다.

II. 힘반영 서보 매니플레이터 설계 요건

우수한 힘반영 서보 매니플레이터는 작업자가 원격 작업을 수행하는 동안 마치 현장에서 직접 작업하는 것과 같은 촉감을 최대로 느낄 수 있게 하여야 한다. 이를 위해서는 매니플레이터 설계에 있어서 역구동성(backdrivability), 힘민감도(force sensitivity), 백래쉬(backlash), 마찰(friction), 관성(inertia), 강성(stiffness), 팔의 무게균형(weight balancing), 제어모드(control mode) 등이 고려되어야 한다. 일반적으로 우수한 힘반영 서보 매니플레이터가 되기 위해서는 역구동성이 좋아야 하고, 힘의 민감도는 취급 하중의 1~5%, 백래쉬는 2mm 이하, 비 무게 균형은 0.4kgf 이하가 되어야 한다. 또한, 마찰 및 관성은 작아야 하고 강성은 커야 한다 [6,7]. 마찰 및 백래쉬가 최소화되기 위해서는 기어에 의한 감속 보다는 텐던 방식에 의한 감속 및 동력전달 크게 유리하다[8,9].

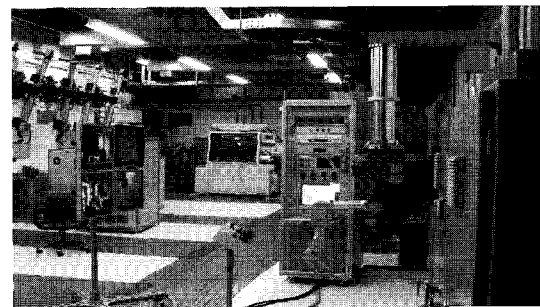
III. 천정이동 서보 매니플레이터 시스템 개요

그림 1은 사용후핵연료 차세대관리공정내 공정장치의 원격 운전/유지보수를 위해 개발한 천정이동 서보 매니플레이

터(BTSM) 시스템을 보여준다. BTSM 시스템은 가로, 세로, 높이가 각각 11m, 2m, 4.55m 인 ACPF 핫셀 내부에 놓여있는 6자유도의 슬레이브 매니플레이터(slave manipulator) 및 이의 3자유도 텔레스코픽(telescopic) 이송장치와 핫셀 외부의 운전지역에 놓여있는 6자유도의 마스터 매니플레이터(master manipulator) 및 원격 제어반으로 구성된다. 핫셀 내 상부에 크레인 형태의 이송장치가 놓여 지며, 이송장치의 텔레스코핑 튜브(telescoping tube) 하단에 슬레이브 매니플레이터가 장착된다. 운전지역 벽에 텔레스코핑 튜브가 부착되고, 이의 하단에 마스터 매니플레이터가 장착된다. 원격 제어반은 컴퓨터 제어반, 수동 조작반 및 카메라 모니터반으로 구성된다. 서보 매니플레이터에 대한 주요 사양은 표



(a) 핫셀 내부



(b) 핫셀 외부(운전 지역)

그림 1. 천정이동 서보 매니플레이터 시스템.

Fig. 1. Bridge transported servo manipulator system.

표 1. 서보 매니플레이터 사양.

Table 1. Specification of servo manipulator.

Motion	Range	Items	Value
Body rotation	-267°~+87°	Weight (slave/master)	50kgf/40kgf
Shoulder	-45°~+45°	Load capacity-continuous	15kgf
Elbow	-45°~+45°	Gripping force	30kgf
Azimuth (Yaw)	-180°~+180°	Lifting capacity	30kgf
Wrist elevation	-135°~+45°	Reach	836mm
Wrist rotation	-180°~+180°	Radiation resistance	10 ⁶ Gy
Gripper opening	0~70mm	Motor type	AC servo motor with resolver

1에 보여준다.

운전자가 수동 조작반 및 마스터 매니플레이터를 조종하면 이의 동작은 실시간으로 전기적인 신호로 바뀌어 컴퓨터 제어반에 전달되고, 운전 프로그램에 의해 이송장치 및 슬레이브 매니플레이터가 모터의 구동으로 동작된다. 이때 슬레이브 매니플레이터는 마스터 매니플레이터와 같은 동작을 하게 되며, 운전자는 슬레이브 매니플레이터가 작업환경과 접촉하는 힘을 마스터 매니플레이터를 통해서 느끼게 된다. 즉, 슬레이브 매니플레이터가 받는 힘을 마스터 매니플레이터를 통하여 힘을 감지할 수 있는 양방향성 구조로서, 양방향 위치제어(bilateral-positioning control)를 통해서 힘 센서를 사용하지 않고 접촉 힘을 피드백 한다. 운전자는 핫셀 내벽 및 이송장치에 설치된 4대의 카메라로부터 전송되는 핫셀 내부의 영상신호를 4대의 모니터를 통해 작업현장을 시각적으로 인식하면서 매니플레이터를 조종한다.

핫셀 내에 놓여있는 슬레이브 시스템은 10⁸Gy의 방사선 흡수에도 견딜 수 있는 재료 및 센서를 사용하였으며, 원격 유지보수를 고려하여 구동부, 매니플레이터 자체 등을 모듈화 하여 원격으로 탈부착이 가능하도록 하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 텔레스코픽 이송장치와 매니플레이터 사이에는 결합장치를 구비하여 작업자의 직접적인 접근 없이 MSM으로 슬레이브 매니플레이터를 원격 탈부착 할 수 있게 하였다. 결합장치의 중앙에는 전기적 신호를 송수신할

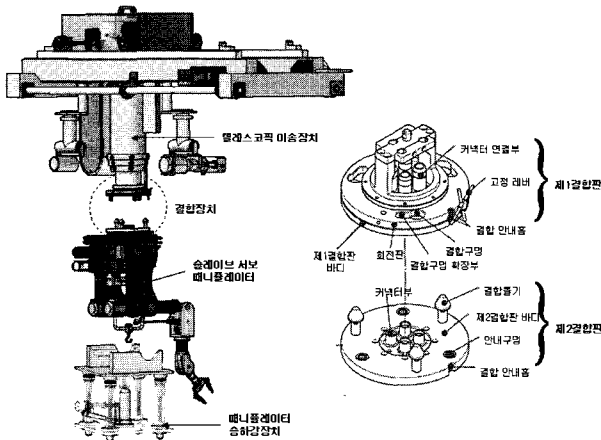


그림 2. 매니플레이터 탈부착.

Fig. 2. Interface between telescoping tube and manipulator.

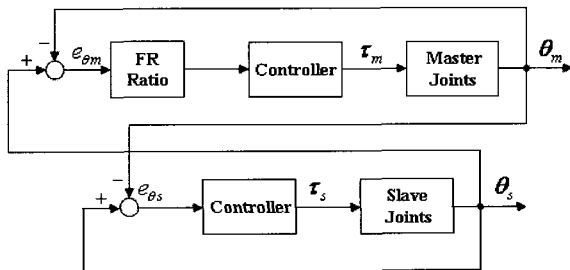


그림 3. 방향 위치-위치 힘반영 제어기 블록선도.

Fig. 3. Block diagram of bilateral position-position force reflection controller.

수 있는 커넥터를 4조 구비하였으며, 이들도 매니플레이터의 탈부착시 동시에 결합 또는 분리가 가능하도록 하였다.

서보 매니플레이터에 적용된 제어기는 (1)과 같은 양방향 위치-위치 힘반영 제어기(bilateral position-position force reflection controller)로서 마찰 보상항이 포함된 PD 제어기이다[8]. 마스터와 슬레이브 매니플레이터의 위치오차를 각각에 되먹임(feedback)하는 방식으로서 이의 개략적인 블록선도는 그림 3과 같다. 작업자가 마스터 매니플레이터를 움직일 때 슬레이브 매니플레이터가 저항을 받으면 이들 사이에는 위치 오차가 발생하게 되며, 이 때 마스터 구동기에 반대 방향으로 토크를 인가하여 마스터 매니플레이터를 붙잡고 있는 작업자에게 저항력을 느끼게 한다.

$$\begin{aligned} \tau_m &= K_{pm}(\theta_s - \theta_m) + K_{dm}(\dot{\theta}_s - \dot{\theta}_m) + \tau_{fm} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_m) \\ \tau_s &= K_{ps}(\theta_m - \theta_s) + K_{ds}(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_s) + \tau_{fs} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_s) \end{aligned} \quad (1)$$

IV. 매니플레이터 텐던-폴리 구동부

1. 매니플레이터 구동부 개요

그림 4는 서보 매니플레이터 구동부의 단면 모습과 운동방향 및 구동축을 보여준다. 몸체 회전(1 축), 상부 팔 틸트(2 축) 및 하부 팔 틸트(3 축)는 기어로 구동되며, 나머지 축은 스틸 와이어로 구동된다.

2. 하부 팔 및 손목 와이어 구동부

그림 5는 하부 팔 및 손목을 회전시키는 4 번축 및 5, 6 번축 와이어와 폴리만을 표현한 기구학적 개략도이다. 폴리 0에서 출발한 와이어는 아이들 폴리 1 및 2에 각각 1 바퀴씩 감기고 폴리 3 및 4에 n₁ 바퀴 감긴다. 복귀하는 와이어는 다시 별도의 아이들 폴리 2 및 1에 1 바퀴씩 감기고 폴리 0에서 n₀ 바퀴 감긴다. 하부 팔 회전은 폴리 3에 연결된 베벨기어에 의해서 회전되고, 손목의 틸트 운동은 폴리 4가 회전되어 발생한다. 링크 1 및 2가 각각 θ_{L1}, θ_{L2} 회전할 때의 하부 팔 및 손목 와이어 길이 및 이의 폴리 회전량은 다음 식과 같이 된다.

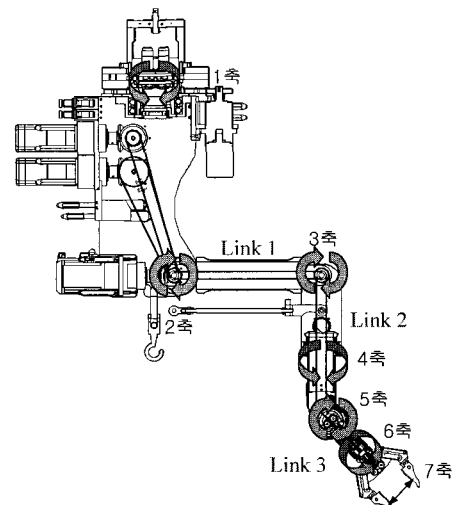


그림 4. 슬레이브 매니플레이터의 개략도.

Fig. 4. Schematic of slave manipulator.

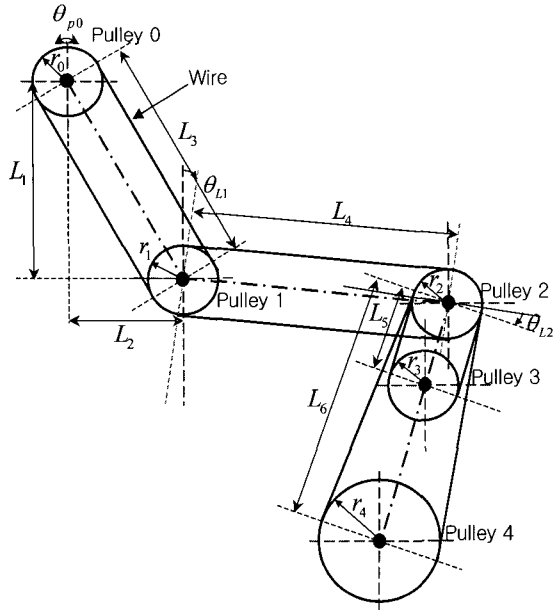


그림 5. 하부 팔과 손목 운동의 와이어-폴리 개략도.
Fig. 5. Schematic of lower arm and wrist motion.

$$L = 2(L_3 + L_4 + L_{5\text{or}6}) + 4\pi(r_1 + r_2) + 2\pi(n_0r_0 + n_1r_{3\text{or}4}) \quad (2)$$

$$\theta_{p0} = \frac{r_2}{r_0}\theta_{L2} \quad (3)$$

$$\theta_{p3\text{or}4} = \frac{r_2}{r_{3\text{or}4}}\theta_{L2} \quad (4)$$

(2)에서 보면, 링크 1 및 2가 동작할 때 θ 에 대한 항은 나타나지 않는다. 이는 링크 1과 링크 2가 운동하여도 하부 팔 및 손목 와이어의 길이 변화가 발생하지 않는다는 것을 의미한다. (3)은 하부 팔 풀리 3 및 손목 풀리 4가 고정된 상태에서 풀리 2가 회전할 때 풀리 0의 회전량을 나타내며, (4)는 하부 팔 풀리 0 및 손목 풀리 0를 고정시켰을 때의 각각의 풀리 3 및 4에 대한 결과이다. (3)과 (4)에서 보면, 풀리 0 또는 풀리 3, 4의 회전량은 링크 1의 동작에는 관계없으며 링크 2의 회전량에 비례하여 영향을 받음을 알 수 있다.

3. 그리퍼 와이어 구동부

그림 6은 그리퍼의 집게(jaw)를 운동시키는 7번 축 와이어와 풀리만을 표현한 기구학적 개략도이다.

풀리 0에 n_0 바퀴 감고, 아이들 풀리 1 및 2에 1 바퀴씩을 감은 후 아이들 풀리 5 사이를 지나 그리퍼 집게 운동부에 고정된다. 링크 1, 2 및 3이 각각 θ_{L1} , θ_{L2} 및 θ_{L3} 회전할 때 그리퍼 와이어의 길이 및 풀리 0의 회전량은 다음 식과 같이 된다.

$$L = L_3 + L_4 + L_7 + L_8 + L_9 + 2n_0\pi r_0 + 2\pi r_1 \frac{360^\circ - \theta_{F1} + \theta_{L1}}{360^\circ} + 2\pi r_2 + 2\pi r_2 \frac{\theta_{F2} + \theta_{L2}}{360^\circ} + 2\pi r_5 \frac{|\theta_{L3}|}{360^\circ} + 2\pi r_6 \frac{\theta_{F6}}{360^\circ} \quad (5)$$

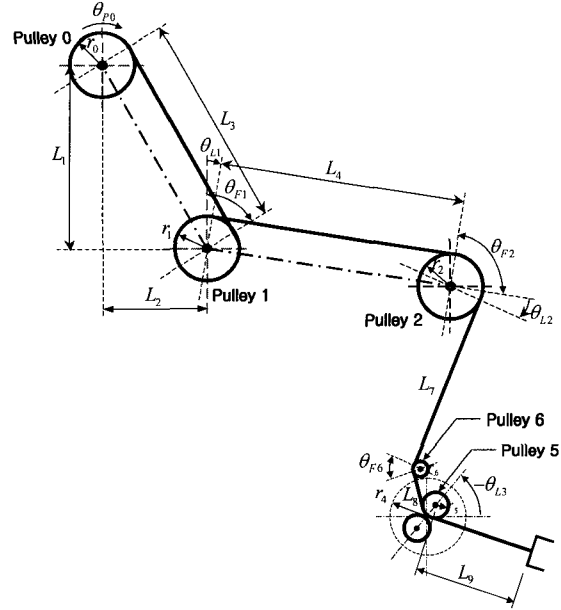


그림 6. 그리퍼 조 운동의 와이어-폴리 개략도.
Fig. 6. Schematic of gripper jaw motion.

$$\theta_{p0} = \frac{r_2}{r_0}\theta_{L2} + \alpha \quad (6)$$

(5)에서 보면 링크 1, 2 및 3이 동작할 때 그리퍼 와이어에 길이변화가 일어남을 알 수 있다.

(6)은 그리퍼 조를 고정시킨 상태에서 링크 1, 2 및 3의 동작에 따른 그리퍼 풀리 0의 회전량이다. 그리퍼 풀리 0는 링크 2의 회전량에 비례한 영향을 받으며, 또한 링크 3의 회전량에 따른 α 의 영향을 받는다. 여기서 α 는 비선형 항이다. 이는 4절에서 자세히 분석한다.

4. 손목 운동에 따른 그리퍼 와이어 길이변화

손목을 상하로 움직이면, 그림 7과 같이 풀리 6을 지나가는 그리퍼(마스터는 핸들) 와이어가 아이들 풀리 5-1과 5-2(이하 풀리 5)에 접하지 않는 경우, 풀리 5-2에 내접하는 경우, 풀리 5-1에 외접하는 경우가 발생한다.

손목을 움직일 때 발생하는 그리퍼(또는 핸들)의 와이어 길이 변화를 구하는데 아래의 식이 사용된다.

4.1 직선과 원의 위치관계 판별

좌표 O_1 과 O_2 를 지나는 직선과 원의 중심 좌표 P 를 지

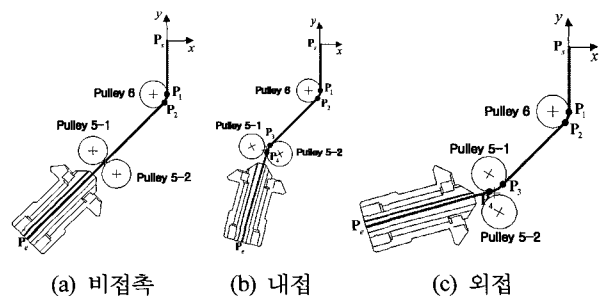


그림 7. 손목 회전에 따른 풀리와 와이어 접촉.
Fig. 7. Wire contacts by wrist rotation.

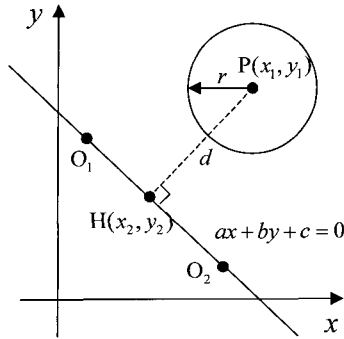


그림 8. 원의 중심과 직선 사이의 수직 거리.
Fig. 8. Distance between circle center and line.

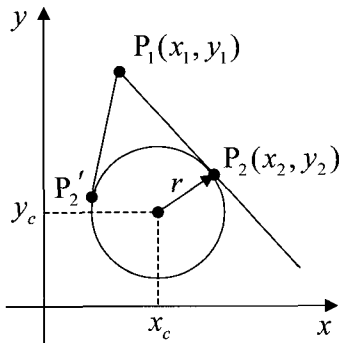


그림 9. 직선과 원이 접하는 두 점.
Fig. 9. Contact point of line and circle.

나는 직선이 수직으로 만날 때 \overline{HP} 의 길이 d 는 다음과 같
이 된다.

$$d = \frac{|ax_1 + by_1 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (7)$$

직선과 원의 위치관계 판별은 $d < r$, $d = r$ 및 $d > r$ 을 적용한다.

4.2 한 점을 통과하는 직선과 원이 접하는 점

점 $P_1(x_1, y_1)$ 에서 원 $(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r^2$ 에 그은 접선의 방정식으로 부터 접점 $P_2(x_2, y_2)$ 를 구하면 다음과 같이 된다.

$$x_2 = -\frac{y_1 - y_c}{x_1 - x_c} y_2 + \frac{(y_1 - y_c)y_c + r^2}{x_1 - x_c} + x_c \quad (8)$$

$$= A y_2 + B$$

$$(A^2 + 1)y_2^2 + 2(AB - Ax_c - y_c)y_2 + B^2 - 2Bx_c + x_c^2 + y_c^2 - r^2 = 0 \quad (9)$$

(9)에서 근 y_2 를 구하고, (8)에 대입하여 x_2 를 구한다. 이 때 근이 2개(P_2, P_2')이므로 폴리와 와이어의 구성에 따라 적합한 1개의 근을 선택한다.

4.3 두 원의 내접 점 및 외접 점

4.3.1 내접점

내접선($\overline{P_1P_2}$)과 두 원의 중심을 이은 직선($\overline{C_1C_2}$) 사이의 교점 $P_3(x_3, y_3)$ 를 구한다. 교점 P_3 에서 두 원에 각각

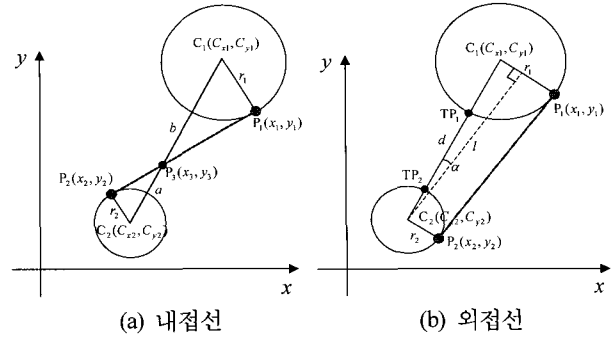


그림 10. 두 원 사이의 내접선 및 외접선.
Fig. 10. Tangent line between two circles.

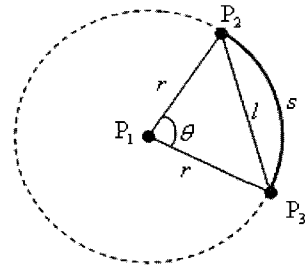


그림 11. 두 좌표 사이의 호의 길이.
Fig. 11. Length of arc.

접선을 그어 (8)과 (9)를 적용하여 내 접점 P_1, P_2 를 구한다.

$$P_3(x_3, y_3) = [k C_{x1} + (1 - k) C_{x2}, k C_{y1} + (1 - k) C_{y2}] \quad (10)$$

여기서, $k = \frac{a}{a+b} = \frac{r_2}{r_1+r_2}$ 이다.

4.3.2 외접점

원의 중심을 잇는 선분을 $d - r_1 : r_1$ 로 내분하는 점 TP_1 과 $r_2 : d - r_2$ 로 내분하는 점 TP_2 를 구한다. 점 $P_1(x_1, y_1)$ 은 외접점 TP_1 을 C_1 을 중심으로 $\pi/2 - \alpha$ 만큼 회전시킨 점이며, 점 $P_2(x_2, y_2)$ 는 외접점 TP_2 를 C_2 를 중심으로 $\pi/2 + \alpha$ 만큼 회전시킨 점이다. 여기서, $\alpha = \cos^{-1}(l/d)$, $l = \sqrt{d^2 - (r_1 - r_2)^2}$ 이다. 외 접점 P_1, P_2 는 다음 식과 같이 된다.

$$P_1 = \begin{bmatrix} \sin\alpha & -\cos\alpha \\ \cos\alpha & \sin\alpha \end{bmatrix} TP_1, P_2 = \begin{bmatrix} -\sin\alpha & \cos\alpha \\ -\cos\alpha & -\sin\alpha \end{bmatrix} TP_2 \quad (11)$$

4.4 원주 상의 두 점 사이의 호의 길이

원주 상에 두 점이 있을 때, 점 사이의 호의 길이는 다음과 같다.

$$s = r\theta = r \cos^{-1} \frac{2r^2 - l^2}{2r^2} \quad (12)$$

손목의 움직임에 따른 그리퍼(또는 핸들) 와이어의 길이를 구하는 과정은 다음과 같다.

1) 와이어가 폴리 2에 접하지 않는 경우

① 좌표 P_5 에서 폴리 6에 접선을 그어 좌표 P_1 를 구한다.

이 때 (8)과 (9)가 적용된다. 직선 $\overline{P_s P_1}$ 의 길이를 구한다.

② 좌표 P_c 에서 풀리 6에 접선을 그어 좌표 P_2 를 구한다. 이 때 (8)과 (9)가 적용된다.

③ 좌표 P_c 와 P_2 를 통과하는 직선이 풀리 5에 접하는지를 판별한다. 이 때 (7)이 적용된다.

④ 직선이 풀리 5에 접하지 않는다면, (12)를 적용하여 원호의 길이 $\widehat{P_1 P_2}$ 를 구하고 또한 직선 $\overline{P_2 P_c}$ 를 구한다.

⑤ 와이어의 전체 길이는 $\overline{P_s P_1} + \widehat{P_1 P_2} + \overline{P_2 P_c}$ 로 계산된다.

2) 와이어가 풀리 2에 내접 및 외접하는 경우

직선이 풀리 5에 내접 및 외접하면, ①-③의 과정은 같고, 이 후부터는 다음의 과정을 거친다.

④ 좌표 P_c 에서 풀리 5-1에 접선을 그어 좌표 P_4 를 구한다. 이 때 (8)과 (9)가 적용된다. 직선 $\overline{P_4 P_c}$ 의 길이를 구한다.

⑤ 좌표 P_2 와 P_3 는 풀리 6과 풀리 5의 내접 및 외접 점을 계산하여 구한다. 이 때 (10)과 (11)이 적용된다. 직선 $\overline{P_2 P_3}$ 의 길이를 구한다.

⑥ (12)를 적용하여 원호의 길이 $\widehat{P_1 P_2}$ 와 $\widehat{P_3 P_4}$ 를 계산한다.

⑦ 와이어의 전체 길이는 $\overline{P_s P_1} + \widehat{P_1 P_2} + \overline{P_2 P_3} + \widehat{P_3 P_4} + \overline{P_4 P_c}$ 로 계산된다.

V. 텐던-풀리 구동부 분석 결과

1. 텐던-풀리 구동부 동작 특성

IV.4절의 손목 운동에 따른 그리퍼 와이어의 길이 변화에 대한 분석 결과는 다음과 같다. 그림 12는 풀리 5-1과 5-2 사이의 중심거리 변화에 따른 와이어 길이 변화를 보여준다. 중심거리가 멀어지면 길이 변화가 작아지나, 35mm 이상이 되면 다시 커짐을 알 수 있다. 그림 13은 풀리 5들의 중심 거리가 18mm인 상태에서 풀리 5의 크기(반경)에 따른 와이어 길이 변화를 보여준다. 풀리 반경이 작아지면 길이 변화가 작음을 알 수 있다. 그림 14는 풀리 5의 대각선 위치 변화에 따른 와이어 길이 변화를 보여준다. 풀리 5가 손목의 중심에서 아래로 이동할 때 길이 변화가 줄어드나, 5mm 이상이 되면 다시 증가함을 알 수 있다. 그림 15는 핸들 그룹의 운동에 따른 그리퍼 집계의 운동을 보여주며, 잘 일치함을 알 수 있다.

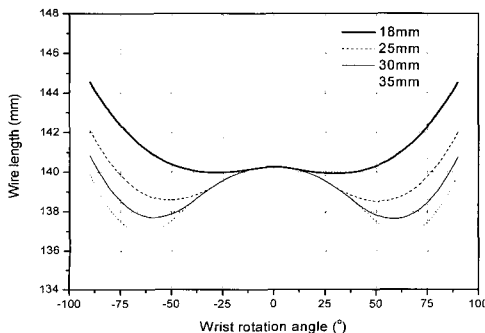


그림 12. 풀리 5-1과 5-2 사이의 중심 거리 변화.
Fig. 12. Distance changes between pulley 5-1 and 5-2.

이의 분석 결과들은 매니플레이터 자체에 대한 것이다. 마스터 매니플레이터는 운전자가 하부 팔 및 핸들을 붙잡고 있기 때문에 링크 2를 움직이면 풀리 0 축의 감속기의 낮은 감속비로 인해 풀리 0가 회전하여 모터가 회전하게 되고, 슬레이브 매니플레이터에 있어서는 링크 2를 움직일 때 풀리 0 축을 회전시키는 감속기 비의 크기에 따라 풀리 0 또는 하부 팔이 회전하게 된다. 그러나, 마스터 매니플레이터와 슬레이브 매니플레이터는 기구적으로 같은 구조이기 때문에 별도의 보상식 없이 마스터 매니플레이터 풀리 0 축의 회전량을 슬레이브 매니플레이터 0축에 그대로 지령하면 두 시스템의 자세는 일치하게 된다.

와이어-풀리 방식에 있어서 풀리의 크기, 축의 편심 및 감는 방식에 따른 와이어의 길이변화를 정리하면 다음과 같다.

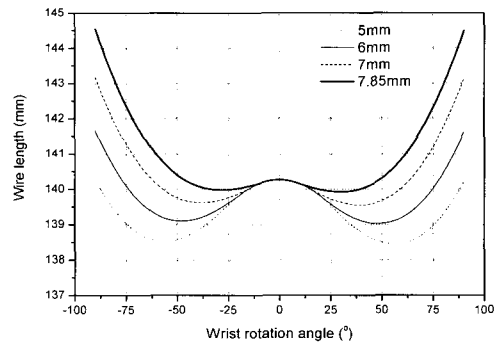


그림 13. 풀리 5의 크기 변화.
Fig. 13. Size changes of pulley 5.

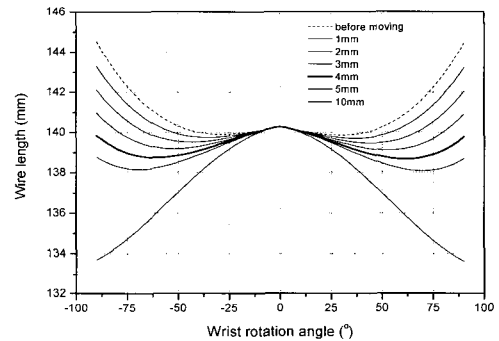


그림 14. 풀리 5의 위치 변동(대각선).
Fig. 14. Position changes of pully 5 (diagonal line).

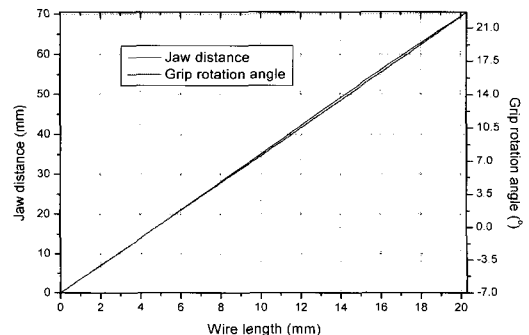


그림 15. 핸들 그룹 운동에 따른 그리퍼 집계의 운동.
Fig. 15. Gripper jaw motion by handle grip motion.

① 대각선 또는 평행하게 왕복으로 감으면 축의 편심 및 롤러의 크기에 관계없이 길이 변화는 없음

② 편도로 감으면 길이 변화가 발생

BTSM 서보 매니플레이터에 있어서 와이어 구동부의 동작에 따른 특성을 정리하면 다음과 같다.

① 상부 팔의 동작(상하 운동)은 와이어 구동 풀리 들(하부 팔 팬, 손목 틸트, 그리퍼(또는 핸들))에 영향을 미치지 않는다.

② 하부 팔의 동작(전후 운동)은 이의 회전 각도 및 시작 풀리와 말단 풀리의 반경비에 비례하여 와이어 구동 풀리 들에 영향을 미친다.

③ 손목부의 동작(상하)은 그리퍼 와이어의 길이 변화를 발생시킨다.

④ 핸들의 그림 구동 풀리와 그리퍼 집계의 구동 풀리의 운동이 비례하지 않을 수 도 있다.

와이어 구동 방식은 팔의 자세가 변함에 따라 다음과 같은 현상이 발생할 수 있다. 첫째는 와이어의 길이 변화가 일어날 수 있고, 둘째는 와이어의 길이 변화는 없지만 풀리의 회전이 일어날 수 있다. 이와 같은 현상은 링크 1, 2 및 3이 운동할 때 이의 내부를 관통하는 와이어 및 풀리에서 일어난다. 이러한 링크 회전에 따른 와이어 길이 변화는 구동축들의 모션을 서로 간섭시킬 수 있다. 따라서, 매니플레이터 팔의 자세가 변하게 되면 와이어 길이가 강제적으로 늘어나 와이어를 파단 시키거나 매니플레이터의 풀리를 파손시킬 우려가 있으며, 부하의 크기에 따라 와이어가 늘어나는 양이 달라 마스터와 슬레이브의 위치 차이가 일어날 수 있으며, 와이어가 통과하는 축의 회전시 와이어로 구동되는 축에도 영향을 주어 조작자의 명령과 다른 동작을 취할 수 있게 된다. 또한, 와이어 길이가 줄어들게 되면 와이어가 풀리로부터 이탈될 수 있으며, 매니플레이터 팔을 견고하게 지탱하지 못하게 된다. 따라서, 와이어를 사용할 경우에는 매니플레이터 팔의 자세 변화에 따른 와이어의 길이 변화를 최소화하여야 한다.

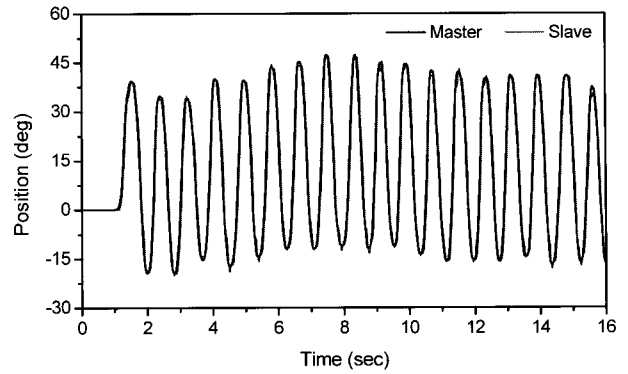
2. 힘반영 서보 매니플레이터 제어 특성

그림 16은 하중을 취급하지 않는 자유운동에 대한 서보 매니플레이터의 양방향 위치제어 특성을 나타낸다. 이는 식 (1)을 적용한 결과이다. (a)는 마스터에서 지령된 위치명령을 슬레이브가 추종한 결과를 나타내며, (b)는 슬레이브에서 지령된 위치명령을 마스터가 추종한 결과를 나타낸다. 슬레이브의 움직임을 마스터가 추종하는 경우가 그 반대의 경우에 비해 위치추종 오차가 컸지만 대체로 위치추종 성능이 양호하도록 제어기 게인이 선정되었음을 알 수 있다. 제어기 게인은 실험적으로 구하였다.

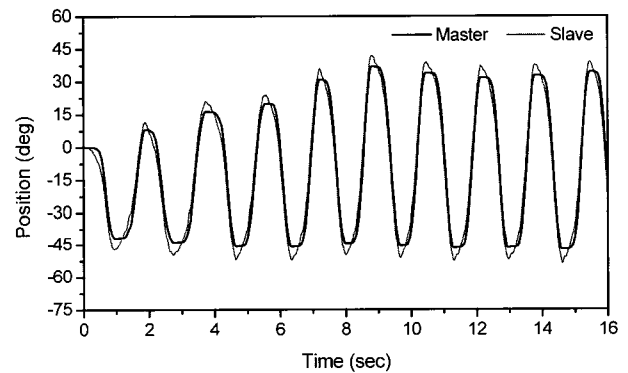
힘반영 성능을 평가하는 하나의 지표로 힘반영 민감도(force reflection sensitivity)가 사용된다. 힘반영 민감도는 슬레이브 매니플레이터 관절에 힘을 가해 움직이기 시작할 때의 힘에 의해 정의되며 이는 무게 균형, 마찰, 감속비 등에 영향을 받는다. 힘반영 민감도가 작을수록 인간과 같은 섬세한 작업을 수행하는 것이 가능하지만, 일반적으로 서보 매니플레이터의 취급용량을 키우는 것과 힘반영 민감도를 낮추는 것은 서로 배치되는 사항이다. 통상 우수한 힘반영

서보 매니플레이터의 민감도는 취급용량의 1~5% 정도이다.

힘반영 민감도를 정량적으로 평가하기 위해 ATI사의 내방사선 6축 힘-토크 센서(FT04672 Delta)를 사용하였다. 힘반영 민감도는 힘-토크 센서로 슬레이브 매니플레이터의 관절을 밀면서 힘과 움직임을 동시에 측정하는 방식으로 평가하였다. 그리핑 축을 제외한 6축의 힘반영 민감도는 평균값이 0.47kgf로 나타났다. 이는 취급용량(15kgf) 대비 3.1%의 수준이다. 그림 17은 슬레이브 매니플레이터 2축에 대한 측정 결과를 나타낸다.



(a) Master to Slave



(b) Slave to Master

그림 16. 양방향 위치제어 특성.

Fig. 16. Characteristic of bilateral position control.

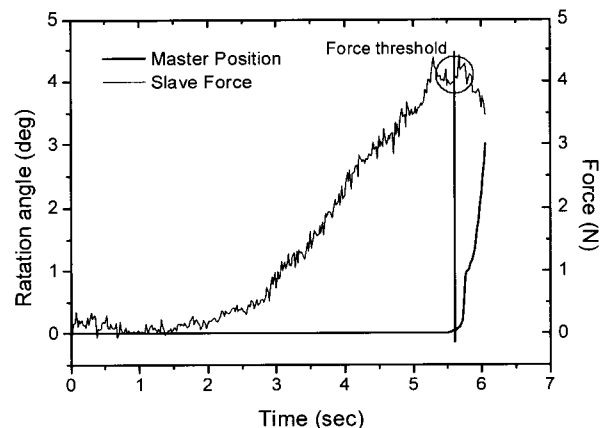


그림 17. 접촉력 변화에 따른 힘반영 성능.

Fig. 17. Performance of force reflection.

VI. 결론

본 논문에서는 사용후핵연료를 효과적으로 관리 및 이용하기 위해 개발 중인 ACP(Advanced spent fuel Conditioning Process)의 장치들을 원격으로 운전 및 유지보수 하기 위해 개발한 천정이동 서보 매니플레이터(bridge transported servo manipulator) 시스템을 소개하였다. 또한, 매니플레이터의 와이어-풀리 구동부 동작특성 및 서보 매니플레이터의 힘반영 제어 성능도 소개하였다. 개발한 서보 매니플레이터는 자체중량 대비 취급 용량을 크게 하기 위하여 토크 전달력이 큰 몸체 회전, 상부 팔 틸트, 하부 팔 틸트 운동은 기어 구동 방식을 채택하였고, 토크전달력이 비교적 작은 하부 팔 회전, 손목 팬/틸트 및 그립 운동은 와이어-풀리(wire-and-pulley) 구동 방식을 채택하였다. 기어 구동방식은 큰 토크를 전달할 수 있으나 힘반영 서보 매니플레이터의 성능을 떨어뜨리고, 와이어-풀리 구동방식은 힘반영 성능은 우수하나 구동부 간에 모션이 간섭(couple)되는 단점이 발생한다. 따라서, 향후에는 모든 축이 텐던-풀리 방식으로 구동되면서도 축간에 간섭이 일어나지 않는 구조에 대한 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] J. H. Koo, W. M. Chung, I. J. Cho, K. C. Kwon, D. H. Kook, G. S. You, and J. S. Yoon, "Performance test of advanced spent fuel conditioning process facility (ACPF)," *The 4th Korea-Japan Workshop on Nuclear Pyroprocessing*, pp. 39-40, 2006.
- [2] M. J. Rennich and T. W. Burgess, "Remote handling in the spallation neutron source target facility," *Nuclear News*, vol. 49, no. 2, pp. 32-36, 2006.
- [3] J. S. Yoon, S. H. Kim, and T. G. Song, "Visualization and analysis of remote operation involved in advanced conditioning process," *Proc. of the 4th Korea-China Joint Workshop on Nuclear Waste Management*, pp. 205-219, 2003.
- [4] B. S. Park, J. H. Jin, B. S. Ko, J. K. Lee, and J. S. Yoon, "A bridge transported bilateral force-reflecting servo manipulator for maintenance of nuclear pyroprocessing equipment," *ICCAS*, pp. 2226-2230, 2005.
- [5] J. K. Lee, H. J. Lee, K. H. Yoon, B. S. Park, and J. S. Yoon, "A servo manipulator for remote handling of ACP equipment," *Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp. 954-959, August 2007.
- [6] P. Fischer, R. Daniel, and K. V. Siva, "Specification and design of input devices for teleoperation," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 540-545, 1990.
- [7] R. L. Kress, J. F. Jansen, M. W. Noakes, and J. N. Herndon, "The evolution of teleoperated manipulators at ORNL," *Proc. of the 6th ANS Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, pp.623-631, 1997.
- [8] W. T. Townsend, and J. A. Guertin, "Teleoperator slave-WAM design methodology," *Industrial Robot*, vol. 26, no. 3, pp. 167-177, 1999.
- [9] J. K. Lee, H. J. Lee, B. S. Park, and J. S. Yoon, "Sensitivity enhancement for force reflection of remote manipulator using friction compensation," *CASS 2006*, pp. 709-713, June 2006.



박 병 석

1986년 조선대학교 기계공학과(공학사). 1990년 전남대학교 기계공학과(공학석사). 2002년 충남대학교 기계설계공학과(공학박사). 1987년~현재 한국원자력연구원 핵연료주기원격장치랩 책임연구원/랩장. 관심분야는 마스터-슬

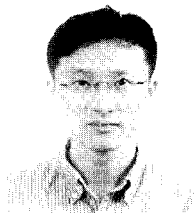
레이브 로봇 설계, 힘반영 제어, 강인제어, 신호처리, 가상 환경 작업 시뮬레이션.



이 종 광

1997년 충남대학교 기계설계공학과(공학사). 1999년 충남대학교 기계설계공학과(공학석사). 2004년 충남대학교 기계설계공학과(공학박사). 2006년~현재 한국원자력연구원 핵연료주기원격장치랩 선임연구원. 관심분야는 마스터-슬

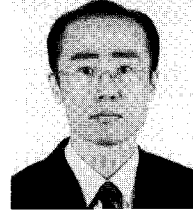
레이브 로봇 설계, 로봇-비전, 지능제어.



이 효 적

1995년 KAIST 기계공학과(공학사). 1998년 KAIST 기계공학과(공학석사). 2004년 KAIST 기계공학과(공학박사). 2004년~현재 한국원자력연구원 핵연료주기원격장치랩 선임연구원. 관심분야는 원격 취급기술, 가상공학, 모델링

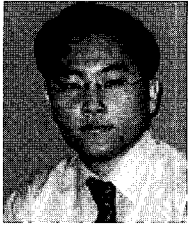
및 시뮬레이션.



최 장 환

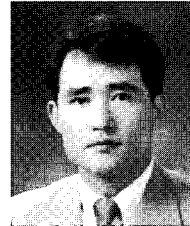
1995년 한양대 정밀기계공학과(공학사). 1997년 광주과학기술원(공학석사). 2001년 광주과학기술원(공학박사). 2001년~현재 한국원자력연구원 핵연료주기원격장치랩 선임연구원. 관심분야는 원격 조작기, 햅틱, 로봇 시스템 설계

및 제어, 그래픽 및 동역학 시뮬레이션, 비선형 시스템 해석 및 제어.



윤 광 호

1999년 호서대학교 전기공학과(공학사). 2001년 건국대학교 전기공학과(공학석사). 2005년 건국대학교 전기공학과(공학박사). 2006년~현재 한국원자력연구원 핵연료주기원격장치랩 Post Doc. 관심분야는 모터제어, 원격 조작기, 건설 제어, 관측기 설계, 지능제어.



윤 지 섭

1980년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1982년 KAIST 기계공학과(공학석사). 1987년 KAIST 기계공학과(공학박사). 1987년~현재 한국원자력연구원 선진핵주기시스템공학그룹 책임연구원/그룹장. 관심분야는 사용후핵연료 재 활용, 원격취급기술, 계측제어, 원격로봇.