

원자력용 매니플레이터의 세계적 개발 현황

윤지섭

한국원자력연구소 부설 환경관리센터 연구개발그룹

1. 서 론

고대부터 인간은 신체능력의 한계를 극복하기 위하여 여러 가지 도구를 만들어 사용해 왔으며, 이러한 도구들의 발전은 인간과 같은 일을 할 수 있는 로봇의 개발에까지 이어져왔다. 하지만 로봇의 자체지능 개발은 한계에 도달하여 고도의 판단이 필요한 작업은 인간이 직접 수행해야 한다. 한편 같은 동기로부터 시작하였으나 그 추구하는 바가 다른 흐름이 있었는데, 완전히 독립적인 로봇이 아니라, '완전히 사람의 의도에 따라 동작하는 시스템', 즉 원격조작기(teleoperator)가 바로 그것이다. 넓은 의미에서 원격조작(teleoperation)이란 '인간의 감각과 작업 능력을 확장하는 일'로 정의되며, 따라서 원격조작기는 다음과 같은 기능을 가진 로봇 시스템이다.

첫째, 원격조작기를 제어하는 주체는 인간이며, 작업 목적을 달성하기 위하여 인간이 계속적으로 제어를 하여야 한다. 둘째, 원격조작이란 단순히 인간이 원거리에서 작업현장의 조작기를 간접 조작하는 것 뿐 아니라, 물건을 정확히 1 μ m 옮긴다든지, 1 ton 무게의 컨테이너를 드는 등 "인간의 감각이나 작업능력을 확장한다"는 포괄적 의미를 가진다. 셋째, 원격조작기를 조작하는 인간에게 자신이 직접 작업현장에서 작업하고 있는 것과 똑같은 감각을 부여해 줄 수 있어야 한다.

원격조작기는 주로 우주, 해저, 원자력 시설 등 극한환경 작업에 사용되어 왔으나, 최근 장애인 보조기구, 원격 수술, 토목, 건설, 창고관리, 화재 진화, 치안 및 군용작업 등에도 적용범위가 확장되고 있다. 각각의 적용환경에 따라 원격조작기의 기능도 다소 달라질 수 있다. 특히, 원자력 시설의 유지, 보수 및 해체 작업을 수행하는 경우, 모든 작업이 방사선 환경 하에서 이루어지므로 작업자의 피폭을 줄이기 위

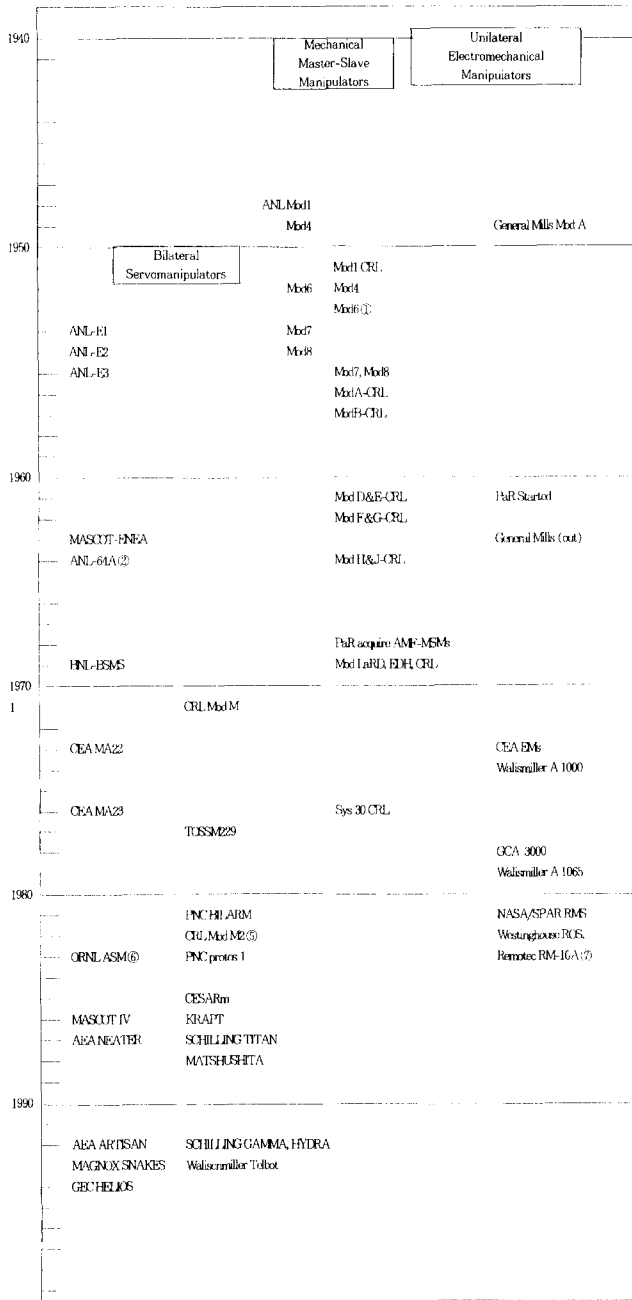
해서 원격조작기의 도움이 필수적으로 요구되며, 실제로 원격조작기가 가장 널리 응용되는 분야이다. 원자력 시설에 적용되는 원격조작기는 다음과 같은 조건을 구비하여야 한다. 첫째, 힘반영 마스터-슬레이브 시스템의 구조를 가지며 마스터팔과 슬레이브 팔의 협력 관계가 원활하여야 한다. 둘째, 고방사선 환경의 밀폐공간에서 작업하므로, 슬레이브 팔에 사용되는 부품의 신뢰성 및 내방사선 성능이 우수하여야 한다. 마지막으로 원활한 이동성과 큰 중량물을 취급할 수 있는 가반하중을 가져야 한다.

매니플레이터를 도입한 최초의 원격조작기는 1945년 미국 Argonne National Lab.의 R. Goertz에 의하여 개발된 기계식 마스터-슬레이브 시스템으로서, 차폐실(hot cell) 내에서 방사성 물질을 취급하는 데에 사용되었다. 이 시스템은 차폐실 벽에 부착되어야 하기 때문에 작업 가능한 영역은 벽으로부터 최대 1.5m내 정도에 불과하여 당시의 차폐실은 길고 좁은 구조로 건설되었다. 근래에 들어와 전기식 서보매니플레이터 시스템이 개발되고, 폐회로 방식의 원격비전시스템이 도입되어 조작자가 임의의 먼 거리에 떨어져 있어도 차폐실내의 모든 영역에서의 작업이 가능하게 되었다. 최근에는, 6자유도 힘반영조작기, 양팔협력식 조작기 및 다양한 원격현실감(Telepresence) 구현기술이 개발되었으며, 매니플레이터 자체의 성능 및 제어방법의 개선을 위한 연구가 수행되고 있다. 본 기고에서는 최근에 개발된 원자력용 매니플레이터의 개발 현황을 기술하고 이들의 원자력 발전소에서의 적용분야 및 원자력용으로서의 구비 요건 등에 대하여 기술하였다.

2. 원자력용 매니플레이터 개발 현황

가) 슬레이브 매니플레이터

표 1. 원자력용 매니플레이터 개발 역사.



1. Technology Transfer ANL to CRL
2. ANL Program Ended
3. Robotics Begun
4. Microprocessor Control, Coordinate Transforms
5. Distributed Digital Control
6. Modularized for Remote Maintenance
7. Fast Master/Slave Unilateral Design

1980년대 초반과 중반까지의 원자력용 매니플레이터는 정교한 작업을 위한 전동식 서보매니플레이터가 주로 개발되어 사용되어왔다(표 1 참조). 대표적인 힘반영 서보매니플레이터로는 미국 ORNL의 ASM[1, 2], 및 CESARM[3], 미국 CRL의 M2[4](그림 1), 프랑스 CEA의 MA23[5, 6, 7], 일본 PNC의 BILARM[8] 등이 있다.

ORNL의 ASM은 각 팔이 모듈식 구조로 조립되어 있어 방사선 조사에 의한 고장시 원격 조작 방식으로 보수될 수

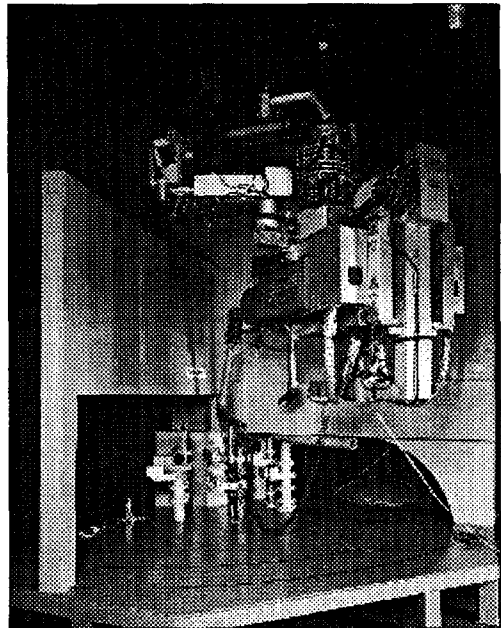


그림 1. CRL의 M2 매니플레이터.

있다. 또한, 일본 PNC는 ORNL로부터 ASM 설계 기술을 전수받아 자체 내에서 BILARM을 개발한 바 있다. 위에서 열거한 모든 서보 매니플레이터는 원격조작 효율을 높일 수 있도록 힘반영(force reflection) 기능을 포함한 여러 가지 기능을 구비하고 있으나 실제 원자력 시설(방사성 작업)에 적용된 매니플레이터는 MA23 매니플레이터(수중 해체작업) 뿐이다.

이에 반하여 정교한 작업을 수행할 수 없으나 중량물을 취급할 수 있는 전동식 매니플레이터는 오히려 원자력 시설에 널리 적용되었다(특히 차폐실내에서 고방사성 중량물 이송 및 장비 해체를 위한 절단 작업등). 전동식 매니플레이터의 대표적 모델로는 미국 GCA 3000[9], 독일 Hans Walischmiller의 A1065(그림 2) 등이 있다. 대부분의 큰 가반중량/자체중량비가 요구되는 서보 매니플레이터(가반하중: 10~25kg)에 비하여 전동식 매니플레이터는 100kg 이상의 가반하중을 갖으며 매니플레이터 자체의 중량에 큰 제한이 없기 때문에 방사선 차폐 구조를 가질 수 있고 결과적으로

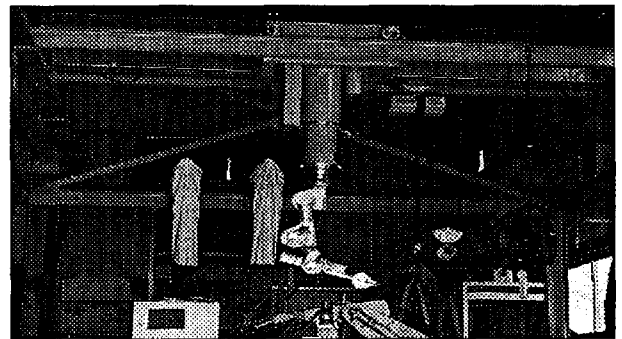


그림 2. Walischmiller사의 A1065 매니플레이터.

원자력용 매니플레이터용으로 적합하여 널리 사용되고 있다.

1980년대 후반기에는 미국, 유럽 및 일본 등을 중심으로 로봇의 지능화 및 기능 고도화를 추구하여, 다양한 종류의 매니플레이터의 개발이 이루어 졌다. 대표적인 예로 일본의 큐슈 전력회사에서는 고압선 보수를 위해서 이동성이 좋고 힘반영 기능을 가진 양팔협력식 매니플레이터를 개발, 상품화하였다[10]. 또한, 사람의 팔과 손의 구조를 그대로 구현한 Dexterous Manipulator가 개발되었는데, 미국 Utah 대학에서 개발한 DTS는 10 자유도를 가진 팔과 3자유도의 손으로 구성되어 있다[11]. 일본에서는 1980년대에 통산성 산하의 공업기술원 주관으로 약 10년에 걸친 연구개발을 통하여, 두 팔, 네 다리, 손가락, 머리, 눈 등, 사람의 기능을 모두 가진 “극한 작업 로봇”(그림 3)을 원자력 시설의 유지 보수용으로 개발하였다. 이는 현존하는 원자력용 로봇중 가장 높은 기술 수준을 가지는 것으로 인정되나, 실용성 측면에서 많은 보완이 필요하다.

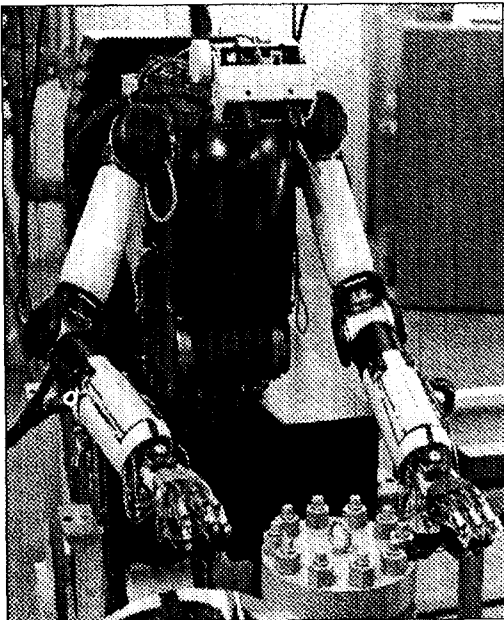


그림 3. 일본의 극한작업용 로봇.

산업용 매니플레이터의 구성부품을 내방사선 부품으로 교체하여 원자력용 매니플레이터로 사용한 예도 있는데, 영국 AEA Technology의 NEATER Series(그림 4)(PUMA 매니플레이터를 개조)는 이미 상품화되어 있으며[12, 13] 노후화된 원자력 시설의 해체 작업에 널리 사용되고 있다. 한편 1990년대에 들어서는 매니플레이터의 실용성에 초점을 두어, 보다 높은 가반하중을 가지며 속도가 빠르고 작업 범위가 넓은 매니플레이터들이 개발되고 있다.

또한, 그림 4에서 보인 영국 GEC Alstom사가 개발한 HELIOS[14](그림 5)는 최대 팔 길이가 4.1m이며 가반하

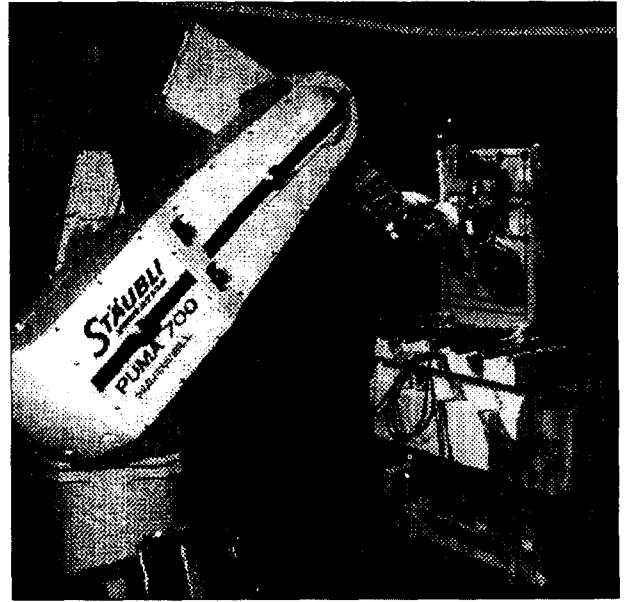


그림 4. Neater를 이용한 glove box 해체작업.

중도 200kg(2m reach시) 정도이며, 독일의 Walischiiller사가 개발한 Telbot[15](그림 6)은 3m 정도 작업 범위와 최대 가반하중이 100kg이다. 이와 같은 전기식 서보 매니플레이터는 주로 겐트리 크레인에 부착되어 넓은 영역으로 이동되며 작업을 수행하나 가반하중이 커짐에 따라 매니플레이터 용량도 커져 큰 매니플레이터의 설치가 용이하지 않은 작업(원자력 발전소의 노즐대 보수, 차폐실 벽 또는 천정 구멍을 통한 차폐실 보수 작업등)에는 적용할 수 없다.

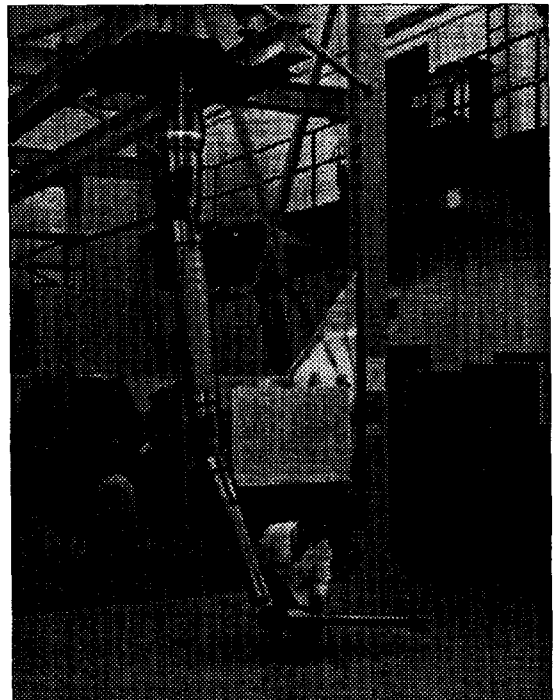


그림 5. GEC Alstom사의 HELIOS.

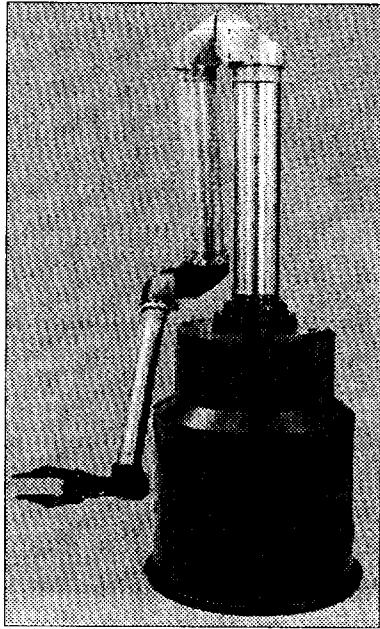


그림 6. Walischmiller사의 Telbot.

따라서, 최근에는 가반하중/자체중량비가 큰 유압식 서보 매니플레이터의 개발이 활발히 진행되고 있다. 대표적인 예로 미국 GEC Alstom 사의 Schilling Robotics Division에서는 TITAN, GAMMA, HYDRA Series 등 많은 유압식 매니플레이터들을 개발하여 상용화[16]하였으며, 영국 Harwell 연구소에서도 유압식 매니플레이터(ARTISAN)를 개발하였다[17]. Schilling이 개발한 TITAN7F(그림 7)는 원자력 시설의 보수용으로 현재 가장 널리 사용되고 있다. 또한, 미국의 Army Research Laboratory에서는 25ton의 초중량물 취급이 가능한 FMR 매니플레이터를 개발하였으며[18], 영국 BNFL에서는 무게 3 on을 들 수 있으며, 팔 길



그림 7. Schilling arm을 이용한 원전 노즐담 보수작업.

이가 4.8 m나 되면서도 정교한 조작이 가능한 긴 팔 매니플레이터를 개발하였다[19].

한편, 뱀과 같이 여러 자유도를 가진 유지보수용 매니플레이터도 최근 개발되고 있는데, 이러한 구조의 매니플레이터는 좁고 복잡한 시설 내에서의 작업에 매우 유용하게 사용될 수 있다. 대표적인 예로는 영국 MAGNOX 사의 SNAKE[20](그림 8)가 있으며 역시 유압을 구동원으로 사용한다. 이와 같이 많은 자유도를 갖는 매니플레이터는 유럽(JET), 미국(TFTR), 일본(ITER)에서 개발중인 핵융합로(Fusion reactor)의 보수용으로 절대적으로 필요한 것으로 6 자유도 이상의 boom 끝에 기존 서보 매니플레이터(그림 9, 10)를 부착한 구조로 되어 있다[21].

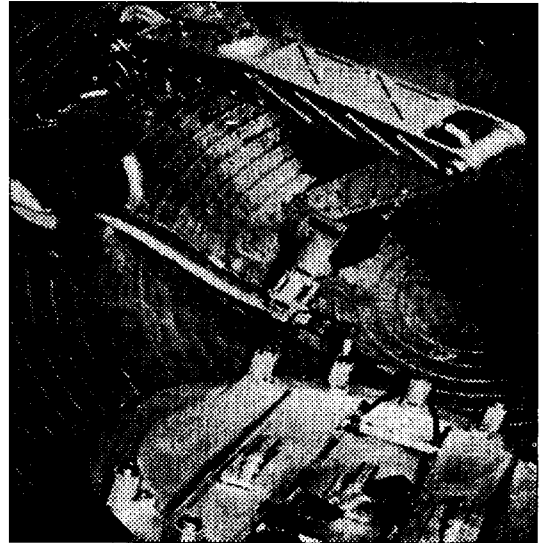


그림 8. Snake arm을 이용한 원전 노즐담 보수작업.

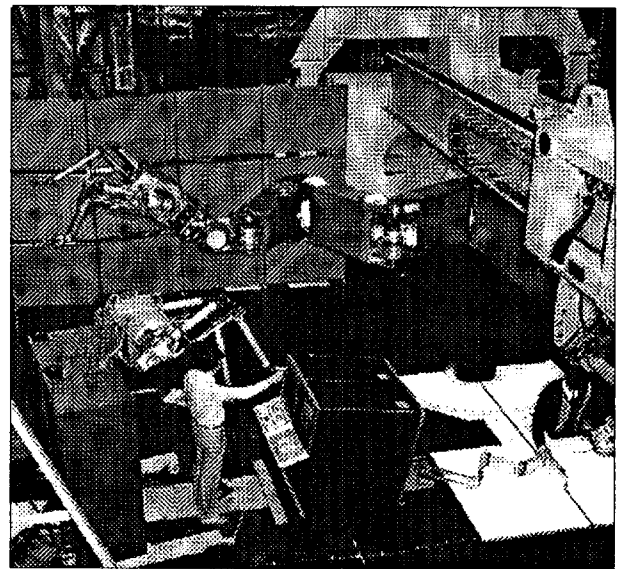


그림 9. 핵융합로 보수용 긴 팔 매니플레이터.



그림 10. 핵융합로 내부 보수작업.

나) 힘반영 제어기

원자력용 원격조작기는 슬레이브 매니플레이터와 hand controller가 각각 차폐실의 안과 밖에 위치하기 때문에 Hand Controller에는 슬레이브가 작업환경과 접촉하여 발생하는 힘 정보를 조작자에게 전달해주어 조작자가 마치 슬레이브의 위치에서 환경과 직접 접촉하고 있는 것과 같은 일체감을 느끼도록 하는 힘반영 기능이 필수적으로 구비되어야 한다. 일반적으로 원자력용 마스터 팔과 산업용 마스터 팔은 큰 차이점은 없으나 대개의 경우 원자력용 마스터 팔과 슬레이브 팔이 같은 구조를 갖는 것이 사용된다.

힘반영 기능을 효과적으로 구현하기 위해서는 마스터 팔의 설계시 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다. 첫째, 조작자가 힘들이지 않고 조작할 수 있도록 가벼워야 하며, 중력 및 회전 관성을 최소화시키도록 설계하거나 제어하여야 한다. 둘째, 반응 속도가 빨라야 한다. 즉, 인간은 약간의 시간 지연에도 민감하게 반응하고, 시간지연은 시스템의 불안정을 야기하기 때문이다. 셋째, 역구동성이 있어야 한다. 즉, 작업자가 마스터 팔을 이용하여 슬레이브 팔을 구동도중 만약 슬레이브 팔이 장애물 등과 충돌하여 과도한 힘이 슬레이브 팔에 가해지면 이 과도한 힘을 마스터 팔로 역으로 전달하여 작업자가 작업을 중지시킬 수 있도록 정보를 제공해주어야 한다. 이와 같은 이유로 마스터 팔에는 매우 낮은 감속비의 기어를 사용하거나 감속기어를 사용하지 않는 것이 좋다. 만약, 감속기를 사용할 경우 야기되는 Force Threshold를 최대한 낮추도록 보상제어를 해주어야 한다[21].

힘반영 제어 방법은 크게 위치기준 힘반영과 힘기준 힘반영 방법으로 구분된다. 위치기준 힘반영에서는 마스터와 슬레이브의 위치 차이에 비례하는 힘을 마스터 측에 반영해주는 방법인데, 만약 작업 대상과 슬레이브의 정확한 탄성계수를 알 수 있으면, 후크의 법칙으로부터 정확한 힘을 반영시킬 수 있다. 하지만 실제로 작업환경의 탄성계수가 일정하지 않으므로 정확한 느낌을 반영하는 것이 어려운 경우가 많다. 한편, 힘기준 힘반영 방법은 슬레이브에 장착된 손목센서로 접촉력을 측정하여 이를 마스터 측에 반영시키는 방법이다. 이 방법을 사용할 경우 힘 측정시 발생하는 고주파 성분의 노이즈를 적절히 필터링해주어 안정성을 확보하여야 하는데, 이로 인하여 시간지연이 발생하고 힘반영 비도 감소하는 단점이 있다. 최근에는 이러한 두 가지 방법을

보완하여 힘반영 비와 안정성을 동시에 높이는 방법론들이 개발되고 있는데, 대표적인 방법으로 임피던스 제어방법[22], 컴플라이언스 제어방법[23] 및 Shared Control 방법[24] 등이 제안되고 있다.

1940년대 말에 개발된 기계식 마스터/슬레이브 매니플레이터는 가격이 저렴하고 내구성이 좋기 때문에 아직도 거의 모든 차폐실에 사용되고 있다. 이 매니플레이터는 마스터와 슬레이브가 cable로 연결되어 구동되며 cable이 반복구동 또는 방사전 조사에 의하여 끊어지지 않는 한 고장 발생의 우려가 없다. 그러나, 앞 절에서 언급하였듯이 기계식 매니플레이터는 작은 작업공간을 갖기 때문에 대형 차폐실 혹은 작업장과 제어실이 멀리 떨어져 있는 시설에서는 사용이 불가능하고 이에 따라 마스터와 슬레이브가 서로 분리될 수 있는 hand controller가 개발되었다.

Hand Controller를 구조적 측면에서 구분하면 크게 속도지령형과 위치지령형으로 나눌 수 있다. 속도지령형 Hand controller는 주로 조이스틱 구조로 되어있으며, Force Ball과 같은 특수한 구조를 갖는 경우도 있다. 이러한 구조는 주로 우주항공분야의 원격조작기에 사용되며, 일반적으로 힘반영 기능을 구현하기에는 적합치 않다고 알려졌다[25]. 하지만, 영국 AEA Technology사의 Harwell 연구소에서는 Joystick 형태의 힘반영 hand controller를 개발하여 상품화한 바 있다[26]. 원자력 시설용 원격조작기에는 관절형 기구 구조를 갖는 위치 지령형 마스터 팔(Master Arm)이 주로 사용된다. 마스터 팔은 슬레이브팔과 동일한 구조를 가질 수 있으나, 마스터와 슬레이브가 다른 구조를 가지더라도(범용입력장치라 함) 간단한 알고리즘을 이용하여 기구학적 차이를 보완해 줄 수 있다[27]. 대표적인 힘반영 범용



그림 11. Mitsui Engr.의 FF JOYARM.

입력장치로는 미국 JPL의 Hand Controller[28], Catholic 대학의 PFORCH[29], 독일의 PUSH[30] 등이 있으며, Mitsui Engineering Co. 및 Cyber Systems, Co. 등에서는 6축까지의 힘반영 마스터 팔을 판매하고 있다. 그림 11은 Mitsui Engineering의 힘반영 입력장치 FF JOYARM을 보여준다.

다) Haptic Interface

효과적인 원격조작을 수행하기 위해서는 힘반영 기능 외에도 작업장에 실재하는 다양한 감각정보를 인간에게 전달해 주어야 한다. 이러한 감각을 총칭해서 원격현실감이라 하며, 원격현실감을 인간에게 전달해 줄 수 있는 장비를 Haptic Interface라 한다[31]. Haptic Interface의 기능은 원거리의 작업환경의 3차원 시각 정보를 전시해 주는 원격 시각 기능, 비디오 디스플레이가 조작자의 머리 움직임에 따라 움직이는 Head Mounted Display, 원격 촉각, 근접 감각 및 운동감의 전달 기능이 중요하다. 이러한 기능을 개별적으로 구현할 수 있는 장비들이 많이 상품화되어 있는데, AEA사의 3차원 카메라 및 모니터는 시각정보를 입체적으로 전시하여 보여준다[13]. Head Mounted Display 장비 중에서는 그림 12에 보인 Division사의 Head Mounted Display등 많은 제품이 상품화되어 있다[32].

이외에도 비디오 화상에 부가적인 정보를 겹쳐 전시하는 것이 조작자에게 도움이 될 수 있다[33]. 이와 같은 Haptic interface 기술은 원격 작업의 효율 향상을 위해서 필수적이고 산업체에서 개발된 기술을 원자력용으로 적용하는 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

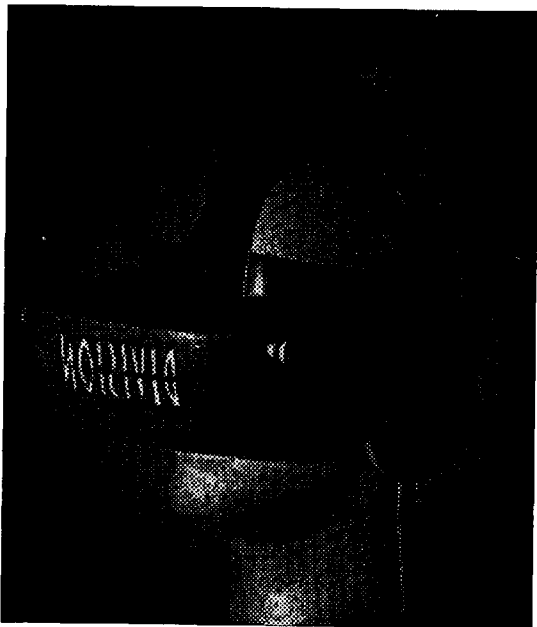


그림 12. Head Mounted Display.

3. 원자력 발전소에의 원격조작기 적용 분야

가) 원자력 발전소에의 원격조작기 적용시 장·단점
원자력 발전소의 각종 작업에 원격조작기 혹은 로봇 등을 적용할 경우 원자력 발전소의 운영자가 공통적으로 느끼는 장점은 다음과 같다.

- 작업자의 피폭 최소화
 - 발전소 검사와 같은 반복 작업에의 적용
 - 발전소 보수와 같은 고방사선 작업에의 적용
- 원자력 발전의 경제성 향상
 - 운전 정지 시간 감소에 따른 경제적 이득
 - 2차 방사성 폐기물(방사선 작업시 작업자가 사용하는 소모성 물질 및 제염후 발생하는 2차 폐기물)발생 최소화
 - 고방사선 물질 취급 작업자의 고용 불필요 등

이와 같은 장점에도 불구하고 원격조작기가 원자력 발전소에서의 작업에 적용되는 경우는 그리 많지 않다. 이의 가장 큰 요인은 여러 가지 문제점이 있지만 역시 원격조작기를 적용함에 따른 비용상승요인이다. 즉, 위에서 언급한 바와 같이 원격조작기 혹은 로봇을 적용함에 따라 여러 가지 경제성 향상 요인이 존재하지만 이와 같은 요인이 과연 로봇을 적용하는 데 따른 부대비용 상승 요인과 비교할 때 경제성이 존재하는가에 대한 의구심이 발전소 운영 측면에서 발생하기 때문이다.

미국의 EPRI(Electric Power Research Institute)와 NRC(Nuclear Regulatory Commission)은 이와 같은 궁금증을 풀기 위하여 원자력 발전소에의 로봇 적용 분야 발굴 및 경제성 분석 프로젝트를 수행한 바 있다.[34] 이 연구결과에 따르면 20만불의 비용(매니플레이터 가격 및 설치 등 부대비용 포함)이 소요되는 로봇을 원자력 시설의 유지·보수 및 보건물리(health physics) 작업에 투입한 결과 10만 ~ 100만불 정도의 비용 절약이 가능하다고 밝혔다. 그러나, 이 연구결과는 로봇의 원자력용 수요가 제한되어 있기 때문에 로봇 자체의 개발비용을 원자력 발전자가 부담할 경우 경제성이 대폭 저하된다고 지적하였다. 따라서, 국내의 로봇 생산 업체 또는 개발팀은 범용 로봇을 개발한 후 이를 원자력용으로 개조하는 마케팅 전략을 염두에 두어야 하며 원자력 산업에 로봇을 적용할 때 다음과 같은 비용 상승 요인을 고려하여야 할 것이다.

- 비용 상승 요인
 - 로봇 자체 가격
 - 작업장내 설치 비용
 - 로봇 작동 및 보수 비용
 - 작업자 훈련 비용
 - 작업후 로봇 제염 비용
 - 로봇 취급 전문 기술자 인건비

나) 원자력용 로봇 개발시 고려사항 및 원자력 발전소 적용 분야

위에서 기술한 로봇의 경제성 문제 외에 원자력용 로봇이 산업용 로봇과는 달리 반드시 갖추어야 할 특성 또는 기능이 있는데 이는 표 2에서 보는 바와 같다[35]. 또한, EPRI와 NRC의 연구[34]는 경제성이 다소 떨어지더라도 원격조작기의 필요성이 큰 원자력 발전소에서 원격조작기의 적용분야를 제시하였는데 이는 표 3에서 보는 바와 같다.

표 2. 원자력용 로봇의 구비 조건.

내환경성	내방사선화	<ul style="list-style-type: none"> · 고방사선 작업에 따른 로봇 소요 부품의 내방사선화 또는 차폐 필요(원자로 해체를 작업할 때 원자로 내부 구조물의 표면 선량률은 최고 10⁵~10⁶ R/h) · 일반적으로 반도체 소자들이 영향을 많이 받음(CMOS의 MSI 또는 LSI 종류들은 10³~10⁴ rad을 조사받으면 오작동)
	방수, 방습성	<ul style="list-style-type: none"> · 수중작업(노심검검, 사용후핵연료 저장폴 검사, 청소등) 적용에 따른 방수 성능 필요(최고 20m 정도)
	기타 환경조건	<ul style="list-style-type: none"> · 작업환경에 따라 다르지만 수 10°C~300°C 정도를 견딜 수 있는 내열성과 각종 화학 약품에 대응할 수 있는 내부식성도 요구됨
작업 공간의 적용성	유연한 이동 기능	<ul style="list-style-type: none"> · 방사선 구역은 원전내에 여러 층에 걸쳐 위치함 · 로봇의 접근 구역 또는 공간에 큰 제한(가압경수로 경우 더욱 심함)
	유연한 지지 기능	<ul style="list-style-type: none"> · 일반 산업용 라인에 사용되는 로봇(작업대에 고정)과는 달리 이동 기능 필요 · 이동하는 기구(주행대차, 트롤리 등)에 견고하게 지지되어야 하며 로봇의 자중도 작아야 함
제어의 용이성		<ul style="list-style-type: none"> · 방사선 작업 후 로봇을 제어하여 다시 사용할 수 있도록 로봇의 표면이 복잡한 구조가 아니어야 함
기용성		<ul style="list-style-type: none"> · 매니플레이터가 각종 공구 또는 end effector를 쉽게 교체할 수 있어야 함
기타 고려사항		<ul style="list-style-type: none"> · 무선통신시 장애 요인 발생가능 · 작업장 바닥에 각종 장애물(water dam, pipe, duct 등)들이 혼재 · 조명이 어둡고 전기 공급이 용이하지 않음

표 3. 원격조작기의 원자력 발전소 적용분야.

검 사	<ul style="list-style-type: none"> · 방사능 측정 · pipe, tube, x-ray · condenser tube sheet 검사, 보수 · pressurizer 검사 · 차폐 콘크리트 검사 · 운전중 Turbine 검사
제 염	<ul style="list-style-type: none"> · 소규모 누출 방사선 제염, 장비 표면 제염 · reactor cavity 청소
보 수	<ul style="list-style-type: none"> · PWR 증기 발생기 보수 · pipe 보수 <ul style="list-style-type: none"> - BWR 순환 파이프 보수 - PWR 증기 발생기 파이프 보수 - 각종 pipe 청소, 용접 · valve 보수/운전(나사체결/분해) · 노즐맵 보수
이 송	<ul style="list-style-type: none"> · 소형 장비, 공구 이송 · 방사성 폐기물/드럼 이송
기 타	<ul style="list-style-type: none"> · 표면 도색 코팅, filter 교체

4. 결 언

본 기고에서는 원자력용 원격매니플레이터의 세계적인 개발 동향, 이들 매니플레이터의 원자력용으로서의 구비조건과 원자력 산업에의 적용 분야를 기술하였다.

본 기고에서도 기술한 바와 같이 세계적으로도 많은 고기능의 매니플레이터가 개발되고 있지만 원자력 산업 현장의 사용자와 개발자 사이의 매니플레이터에 대한 인식의 차로 이들 매니플레이터가 실제 원자력 산업에 적용되고 있는 예는 그리 많지 않다. 따라서, 원자력 산업에 로봇 기술이 널리 적용되기 위해서는 EPRI의 연구 결과에서도 밝혔듯이 이와 같은 사용자와 개발자간의 인식차가 좁혀져야 할 것으로 사료된다. 즉, 기술 사용자에게는 로봇 기술의 적용에 따른 작업의 용이성, 방사선 피폭 방지, 및 장기적인 경제성 향상 면에 대한 이해가 요구되며 기술 연구자는 작업자가 요구하는 로봇은 사용하기 용이하도록 기능이 단순하고, 고장 발생이 적으며, 주어진 작업을 성공적으로 수행할 수 있는 것이라는 것을 고려하여야 할 것이다.

참 고 자 료

- [1] M. J. Feldman, et al., "Remote Maintenance for a New Generation of Hot Cells," Proceedings of the International Topical Meeting on Remote Systems and Robotics in Hostile Environments, Pasco, Washington, pp.615-621, 1987.
- [2] J. N. Herndon, et al., "Advanced Remote Handling for Future Applications : The Advanced Integrated Maintenance System," Proceedings of the International Topical Meeting on Remote Systems and Robotics in Hostile Environments, Pasco, Washington, pp. 622-629, 1987.
- [3] S. M. Babcock, et al., "Advanced Manipulation for Autonomous Mobile Robots," Remote Systems and Robotics in Hostile Environment, pp.290-297, 1987.
- [4] J. N. Herndon, et al., "The State-of-the-Art Model M-2 Maintenance System," Proceedings of the 1984 Topical Meeting on Robotics and Remote Handling in Hostile Environments, Gatlinburg, Tennessee, pp. 147-154, 1984.
- [5] W. R. Hamel and M. J. Feldman, "The Advancement of Remote Systems Technology : Past Perspectives and Future Plans," Proceedings of the 1984 Topical Meeting on Robotics and Remote Handling in Hostile Environments, Gatlinburg, Tennessee, pp.11-24, 1984.

- [6] G. Streiff, et al., "Association of Remote Dexterity and Remote Lifting for Maintenance in Fuel Reprocessing Industry," Proceedings of the 1984 Topical Meeting on Robotics and Remote Handling in Hostile Environments, Gatlinburg, Tennessee, pp.197-203, 1984.
- [7] G. Clement, et al., "First Intervention of MA23M Servomanipulator in a French Nuclear Power Plant," Proceedings of the ANS 3rd Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Charleston, South Carolina, paper no.3-2, 1989.
- [8] S. Kawatsuma, et al., "The Status of Two-Arm Bilateral Servomanipulator System Development," Proceedings of the International Topical Meeting on Remote Systems and Robotics in Hostile Environments, Pasco, Washington, pp.630-637, 1987.
- [9] J. J. Fisher, et al., "Development of a Telerobotic System for Handling Contaminated Process Equipment," Remote Systems and Robotics in Hostile Environment, pp.78-85, 1987.
- [10] M. Nakashima, et al., "Application of Semi-automatic Robot Technology on Hot-line Maintenance Work," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.843-850, 1995.
- [11] S. C. Jacobsen, et al., "Design of the Utah/MIT Dexterous Hand," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, California, 1986.
- [12] R. Bicker, D. Glennie, and S. M. Ow, "Telerobotics in Hazardous Environments," Proceedings of International Conference on Remote Techniques for Hazardous Environments, Leicestershire, UK, pp.93-98, 1996.
- [13] E. Abel, et al., "Nuclear Robotics Research at UKAEA's Harwell Laboratory," Proceedings of the ANS 3rd Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, 1-5, 1989.
- [14] J. A. Collis-Smith, and R. Schilling, "The Development of Robotic Systems for Hazardous Environments," Proceedings of International Conference on Remote Techniques for Hazardous Environments, Leicestershire, UK, pp.113-118, 1996.
- [15] W. Walischmiller, et al., "The Modular Tele-Robot System for Hostile Environments with Unlimited Revolutionary Joints and Motors Drive Sensors and Cables in the Base," Proceedings of 6th Robotics and Remote Systems, vol.1, pp.274-280, 1995.
- [16] R. Schilling, "Telerobots in the Nuclear Industry—a Manufacturer's View," Proc. 6th Robotics and Remote System, vol.1, pp.50-55, 1995.
- [17] J. D. Asquith et al., "Development of Remote Handling Systems Based on Application Experiences," Proceedings of 5th Robotics and Remote Systems, vol.2, pp.625-629, 1993.
- [18] T. M. Cook, "Teleoperation of Heavy Equipment : Essential Visual Information," Proceedings of the ANS 5th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, pp.161-164, 1993.
- [19] D. A. Webster and S. F. Challinor, "Long Reach Manipulators for Decommissioning," Proceedings of the ANS 5th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, pp.79-82, 1993.
- [20] S. A. Barnes, et al., "Magnox Electric Littlebrook Reactor Inspection and Repair Rehearsal Facility," Proceedings of International Conference on Remote Techniques for Hazardous Environments, Leicestershire, UK, pp.235-241, 1996.
- [21] R. Hancox, et al., "Decommissioning of the Joint European Torus," Proceedings of the ANS 5th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Knoxville, Tennessee, Vol.2, pp.697-704, 1993.
- [22] N. Hogan, "Impedance Control : An Approach to Manipulation : Part I, II, III," ASME Journal on Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 107, pp.1-23, 1995.
- [23] W. S. Kim, "Development of New Force Reflecting Control Schemes and an Application to a Teleoperation Training Simulator," Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1412-1419, 1992.
- [24] 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.
- [25] G. Hirzinger, "The Space and Telerobotic Concepts of DFVLR ROTEX," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automations, pp. 443-449, 1987.
- [26] P. J. Fischer, et al., "Six-axis Bilateral Joystick for Telerobotic Applications," International Conference on Remote Techniques for Nuclear Plants, BNES,

London, pp.128-131, 1993.

- [27] Y. S. Park, et al., "An Extended Workspace Mapping Algorithm and Its Implementation in a Nuclear Tele-robotic System," Proceedings of IFAC Workshop on AARTC, Seoul, 1992.
- [28] A. K. Bejczy and J. K. Salisbury, "Kinesthetic Coupling Between Operator and Remote Manipulator," Proceedings of ASME International Computer Technology Conference, vol. 1, pp.197-211, San Francisco, 1980.
- [29] D. Mark, et al., "Kinematics and Control of a Fully Parallel Force-reflecting Hand Controller for Manipulator Teleoperation," Journal of Robotic Systems, vol.10 no.5, pp.745-766, 1993.
- [30] M. Lawo, and R. Gruber, "PUSH-A 6-axis Force-reflecting Hand Controller for Remote Manipulation of Robots," Proceedings of 91 International Symposium on Advanced Robotics Technology, pp.491-506, 1991.
- [31] B. D. Adelstein, and J. E. Colgate, "Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems," Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting Dynamic Systems Controls Division, vol.2, pp.603, 1995.
- [32] J. Pretlove, "Get a Head in Telepresence : Active Vision for Remote Intervention," Proceedings of International Conference on Remote Techniques for Hazardous Environments, Leicestershire, UK, pp. 264-269, 1996.
- [33] M. Mitsuishi, et al., "Predictive, Augmented and Transformed Information Display for Time Delay Compensation in Tele-handling/machining," ICRA, vol.1, pp.45-51, 1995.
- [34] Richard C. Dorf, International Encyclopedia of Robotics ; Application and Automation, Interscience Publication, Vol.1, pp.394-408, 1987.
- [35] 고방사성물질 취급 기술과 로봇, 일본원자력학회, pp. 426-428, 1983.

저 자 소 개



윤 지 섭

1958년 2월 3일 서울생

1980년 2월 서울대학교 공과대학 기계공학과 졸업(학사)

1982년 2월 한국과학기술원 생산공학과 졸업(석사)

1987년 2월 한국과학기술원 생산공학과 졸업(박사)

1987년 3월부터 현재 한국원자력연구소 연구개발그룹 원격조작기술개발실 책임연구원/실장

1991년 3월부터 1992년 3월 : Post Doc. 지능제어연구실, Oak Ridge 국립연구소

관심분야 : 산업공정 원격취급기술, 생산자동화 및 계측제어, 로봇 및 센서 적용 기술

(305-600) 대전 유성우체국 사서함 105호 한국원자력연구소 환경관리센터 연구개발그룹 극한환경 원격조작 기술분야.

TEL. 042) 868-2855 / FAX. 042) 868-2854 e-mail: jsyoon@nemacnis.kaeri.re.kr.