

차세대관리 종합공정장치 유지보수용
서보 매니플레이터 시제품 개발

Development of a Servo Manipulator Prototype for Advanced Spent Fuel
Conditioning Process

박병석, 진재현, 안성호, 김성현, 홍동희, 윤지섭
한국원자력연구소

요 약

핫셀내에서 원격작업을 수행할 수 있는 천정 이동 서보 매니플레이터 시스템의 시제품을 소개한다. 핫셀(hot cell)에 기본적으로 설치되는 마스터-슬레이브 매니플레이터 (master-slave manipulator, MSM)는 팔 길이의 제한 때문에 핫셀내 장치의 유지보수를 효과적으로 수행할 수 없다. 따라서, MSM의 결점인 접근 지역의 제한을 극복하기 위해 천정 이동 서보 매니플레이터 (Bridge Transported Servo Manipulator, BTSM) 시스템을 개발하고 있다. 개발한 시제품은 부분적으로 와이어 구동방식을 채택한 단일 팔 형태의 힘반영 마스터-슬레이브 서보 매니플레이터로 중량 및 규모 대비 취급하중이 기존 마스터-슬레이브 서보 매니플레이터 보다 크다. 이는 산업용 로봇 및 일반적인 구동장치의 개발에도 유용하다.

Abstract

The development of a prototype for a Bridge Transported Servo Manipulator (BTSM) system operating in a hot cell is introduced. Mechanical master-slave manipulators (MSMs) which are mounted on the hot cell wall cannot access all the areas for the equipment maintenance due to their reach limitation. The BTSM has been developed to overcome the limitation of access that is a drawback of the MSMs for the equipment maintenance. Wire driven mechanisms have been adopted to increase the handling capacity to weight. This system can be a useful reference for designing other devices in the nuclear industry.

1. 서 론

본 논문은 고방사성 환경에 놓여있는 ACP (Advanced spent fuel Conditioning Process) 장치들의 원격 유지보수를 위해서 개발하고 있는 천정 이동 서보 매니플레이터 (Bridge Transported Servo Manipulator, BTSM) 시스템의 개발 활동에 관하여 기술한다. 한국원자력연구소의 사용후 핵연료 기술개발부에서는 사용후핵연료의 전처리 공정으로서 ACP를 개발하고 있다. ACP 장치는

고방사성 환경의 핫셀(hot cell)에서 운전되기 때문에 매니플레이터로 유지보수 되어야 한다.

핫셀에서는 기본적으로 기계식 마스터-슬레이브 매니플레이터(Mechanical Master-Slave Manipulator, MSM) 들이 널리 사용되고 있다. 그러나, MSM에는 단점이 있다. 즉, 마스터와 슬레이브가 핫셀 벽을 통해서 기구적으로 직결되어 있기 때문에 슬레이브 매니플레이터의 접근 영역에 제한이 따른다. 또한, 슬레이브 매니플레이터가 환경에 접촉할 때 마스터에 전달하는 힘의 비는 1:1이기 때문에, 슬레이브 매니플레이터는 단지 인간 능력 범주 내에서 작업환경에 힘을 가할 수 있다(대략 10 kg 이내).

MSM의 이와 같은 단점 때문에, ACP 장치를 유지보수 하기 위한 장비로서 BTSM 시스템이 효과적인 대안으로 대두되었다. 이는 MSM의 결점인 접근 영역과 슬레이브-마스터 간의 힘 전달비의 제한을 극복할 수 있게 한다. BTSM 시스템을 개발하기 위해서 ACP의 핫셀 크기, 공정장치의 배치, 운전 기간, 환경 조건(방사선, 온도, 및 습도 등), 및 작업내용 등을 분석하여 ACP에 적합한 원격 유지보수 작업용 천정 이동 서보 매니플레이터의 성능 요건을 도출하였으며, 이를 설계 및 제작에 반영하였다. 천정 이동 서보 매니플레이터 시스템은 크게 이송장치(transporter), 슬레이브 매니플레이터(slave manipulator), 마스터 매니플레이터(master manipulator) 및 제어 장치로 구성된다.

2. 설계 요건

ACP의 핫셀 제원은 11m (L) x 2m (W) x 4.3m (H) 이다. 슬레이브 매니플레이터는 이송장치에 부착되어 핫셀내 어떤 곳(X, Y, Z)으로 이동 가능하여야 한다. 이송장치의 구동기는 고장시 유지보수가 쉽지 않기 때문에 이의 신속한 대책으로서 그들은 여유 구동기를 가져야 한다. 또한, 구동기들은 10 m/min 속도 이내에서 연속적으로 제어 되어야 한다. 이송장치의 브릿지 레일(bridge rail)과 작업대(working table) 사이의 높이(2.47 m), 작업대에 설치되는 ACP 장치의 최대 높이(1.2 m) 및 설계되는 매니플레이터의 높이를 고려하여, 텔리스코핑 튜브가 완전히 펼쳐졌을 때와 접혀졌을 때의 높이가 적절히 결정되어야 한다. 텔리스코핑 튜브의 취급 용량은 100 kg 이상은 되어야 한다. 슬레이브 매니플레이터를 유지보수 하기 위하여, MSM을 사용하여 이를 탈착할 수 있어야 한다. 마스터와 슬레이브 매니플레이터는 6자유도와 파지 동작을 가져야 한다. 협소한 핫셀 공간을 고려하여 매니플레이터 팔의 펼친 거리는 1 m 이내야 하고, 작업자의 손목 동작에 신속하게 추종하기 위해 엔드 이펙터(end-effector)의 끝 속도는 1 m/sec 이상이어야 한다. 매니플레이터는 유지보수를 고려하여 모듈화 및 탈착이 가능한 구조여야 한다. 취급 및 운반의 용이성을 고려하여 매니플레이터 자체 무게는 40 kg 이내여야 하고, 모듈의 무게는 10 kg 이내여야 한다. 또한, 취급 하중은 10 kg 이상이어야 한다. ACP 핫셀의 공간 제한을 고려하여, 핫셀 안에 있는 BTSM 시스템은 소형이어야 한다. 또한, 핫셀 내의 시각 정보를 주는 카메라의 위치도 공간 제한을 고려하여 최적으로 결정되어야 한다. 핫셀 안에 있는 BTSM 시스템은 10^8 rad 까지의 방사선 흡수량에도 견디어야 한다. 핫셀 안의 BTSM 시스템 제어는 힘반향 기능을 갖는 마스터 매니플레이터와 제어반을 통해서 수행되어야 한다.

3. 서보 매니플레이터 시스템 개발

3.1 서보 매니플레이터 시스템 개요

그림 1은 접근이 불가능한 지역에 대한 작업을 수행하기 위해 설계한 BTSM 시스템을 보여준다. BTSM 시스템의 설계에는 3차원 CAD인 Solid Edge를 사용하였다. BTSM 시스템은 이송장치, 슬레이브 매니플레이터, 마스터 매니플레이터 및 원격 제어장치로 구성된다. Mockup cell 내 상부에 이송장치가 놓여지며, 이송장치의 텔레스코픽 튜브 하단에 슬레이브 매니플레이터가 장착된다. Mockup cell의 크기는 가로, 세로, 높이가 각각 3.4 m, 2 m, 3.37 m 이다. Mockup cell은 가로 크기를 제외하고, 실제 ACP 핫셀의 크기와 같다. 작업자가 마스터 매니플레이터를 움직일 때, 슬레이브 매니플레이터는 실시간으로 마스터의 동작을 추종한다. 설계된 매니플레이터는 힘 반향 기능을 갖는 서보 매니플레이터이다. BTSM 시스템은 양방향 위치제어(bilateral-positioning control)를 통해서, 힘 센서를 사용하지 않고 접촉 힘을 피드백 한다. 작업자는 슬레이브 매니플레이터에 발생하는 힘을 마스터 매니플레이터를 통해서 얻는다. 힘 반향은 작업자에게 마치 작업자가 직접 작업하는 것과 같은 촉감을 느끼게 한다. 이를 통해서, 툴 혹은 물체를 파괴하거나 손상시키지 않고 복잡한 작업을 수행할 수 있게 된다. 작업자는 4대의 카메라 모니터를 보면서 작업 현장을 시각적으로 인식한다. BTSM 시스템은 인간 작업자에 의해서 운전되기 때문에, 인간-기계 접속이 성공의 중요한 요소가 된다.

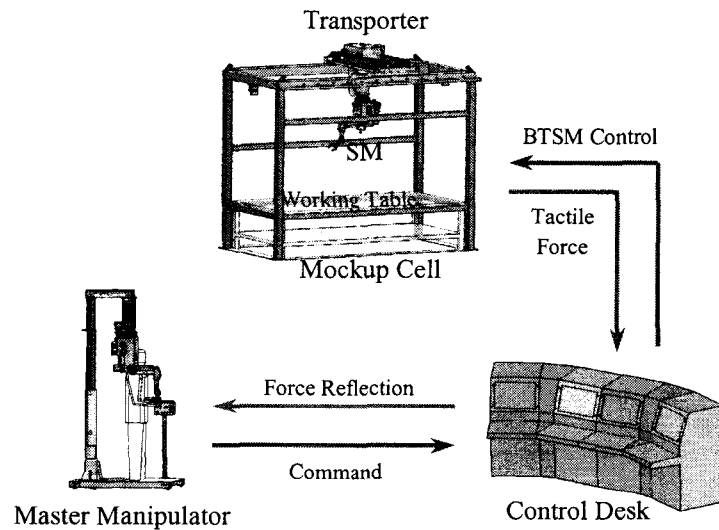


그림 1. 천정 이동 서보 매니플레이터 시스템.

3.2 서보 매니플레이터 시스템 시제품

3.2.1 기계장치

그림 1에서 보여주는 이송장치는 거더와 트롤리의 X-Y 운동과 텔레스코픽 튜브의 Z 운동 기능을 갖추고 있다. 이들의 구동모터는 모두 이중화하였다. X-Y 구동모터는 브레이크가 없으며, Z 구동모터는 브레이크가 있다. 모터는 Tamagawa社의 TBL-iII 시리즈를 선정하였다. 이송장치 하부에는 카메라를 설치하여 슬레이브 매니플레이터의 작업상황을 모니터링 할 수 있도록 하였다. 텔레스코픽 튜브는 고정 1단, 미끄럼 3단으로 구성하였으며, 최하단은 체인으로 연결되어 있다. 튜브 내부에는 슬레이브 매니플레이터에 접속되는 4개의 케이블이 통과한다. 텔레스코픽 튜브 하단에는 슬레이브 매니플레이터와 접속하기 위한 인터페이스 장치를 장착하였다. 슬레이브 매니플레

이터를 필요에 따라 탈착 및 부착하기 위한 장치이며, 기계적인 연결장치를 갖추고 있으며 전기적인 연결을 위해서 커넥터를 설치하였다. 접속을 위해서 6개의 핀을 설치하였다. 이중 하판의 세 개(Support pin)는 대략적인 맞춤을 위한 것이고 나머지 상판의 세 개(Guide pin)는 정밀한 맞춤을 위한 것이다. 결합은 상하판이 붙은 상태에서 회전판을 돌려서 Support pin이 빠지지 않도록 한다. 텔레스코픽 튜브가 상하로 움직임에 따라 케이블 또한 같이 움직여야 하며, 내부에서 꼬임이나 이완되는 현상이 없도록 해야한다. 이를 위해 별도의 수납장치를 마련하였다. 움직 도르래를 이용해서 튜브가 올라오면 움직 도르래의 무게를 이용해서 케이블을 당겨주게 된다.

그림 2에서 보여주는 슬레이브 매니플레이터는 6자유도의 운동과 1개의 그리핑 운동이 가능하다. 각각의 운동은 서보모터를 통해 제어된다. 1, 2, 3 축은 기어 구동방식이고, 4, 5, 6, 7 축은 와이어 구동방식이다. 1, 2, 3 축은 상대적으로 많은 토크를 필요로 하기 때문에 강성이 충분한 기어 구동방식을 택하였으며, 4, 5, 6, 7 축은 모터의 위치를 몸체부분에 배치하여 취급하중 대비 중량을 키울 수 있는 와이어 구동방식을 채택하였다. 그리퍼는 탈착이 가능하도록 설계하여 필요에 따라 다른 톨로 바꿔 작업할 수 있도록 하였다.

그림 3에서 보는 바와 같이 마스터 매니플레이터는 슬레이브와 동일한 형상을 갖추고 있다. 즉, 마스터와 슬레이브의 각 축은 일대일 대응한다. 또한 힘반영을 위해 서보 모터를 장착하였다. 끝단은 그리퍼 대신에 핸들을 장착하여 조종이 쉽도록 하였다. 마스터 매니플레이터는 2단 step의 텔레스코핑 튜브를 갖는 지지대에 장착되며, 작업자의 키에 따라 기준 높이를 조절할 수 있게 하였다.

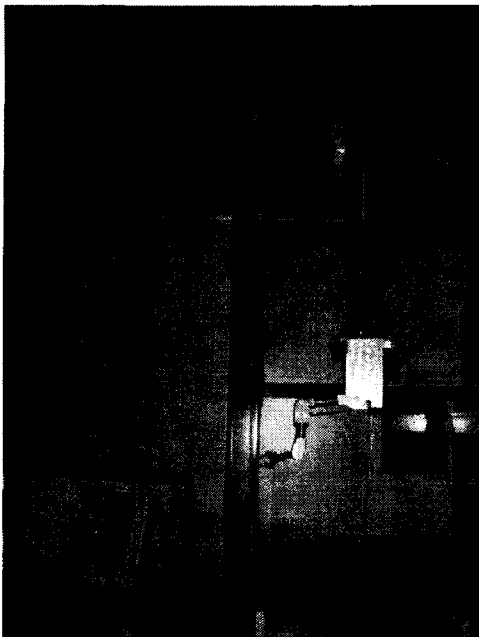


그림 2. 이송장치와 슬레이브 매니플레이터.

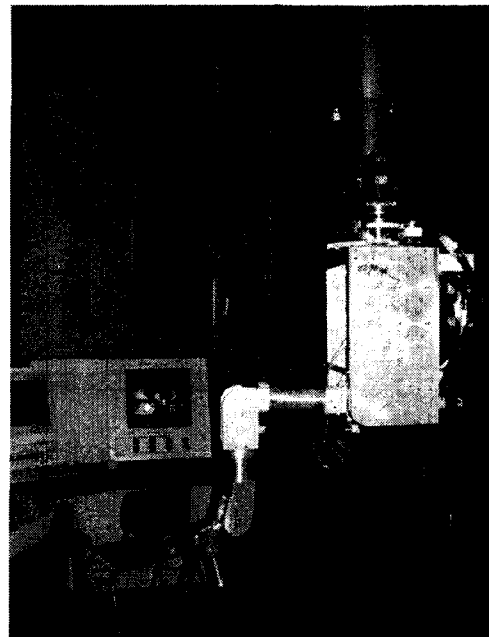


그림 3. 마스터 매니플레이터.

3.2.2 제어 장치

그림 4에서 보는 바와 같이 제어 시스템은 사용자가 조작기의 상태 및 작업상황을 쉽게 파악할 수 있도록 통합적으로 구성하였다. 컴퓨터 모니터를 통해서 는 조작기의 상태를 파악할 수 있으며 카메라 모니터를 통해서 는 작업상황을 파악할 수 있다. 내부에는 슬레이브 및 마스터 매니플레이

터를 구동하는 모터 드라이버 및 제어용 입출력 보드를 장착하였다.

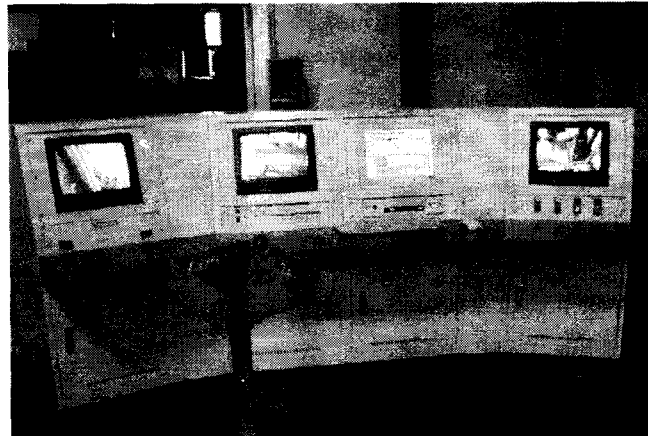


그림 4. 제어 시스템.

그림 5에서 보는 바와 같은 GUI 운전 프로그램은 시스템 파라미터를 설정하고, 마스터의 지령 신호를 처리하여 슬레이브 매니플레이터를 제어하며, 조작기의 상태에 대한 정보를 제공한다.

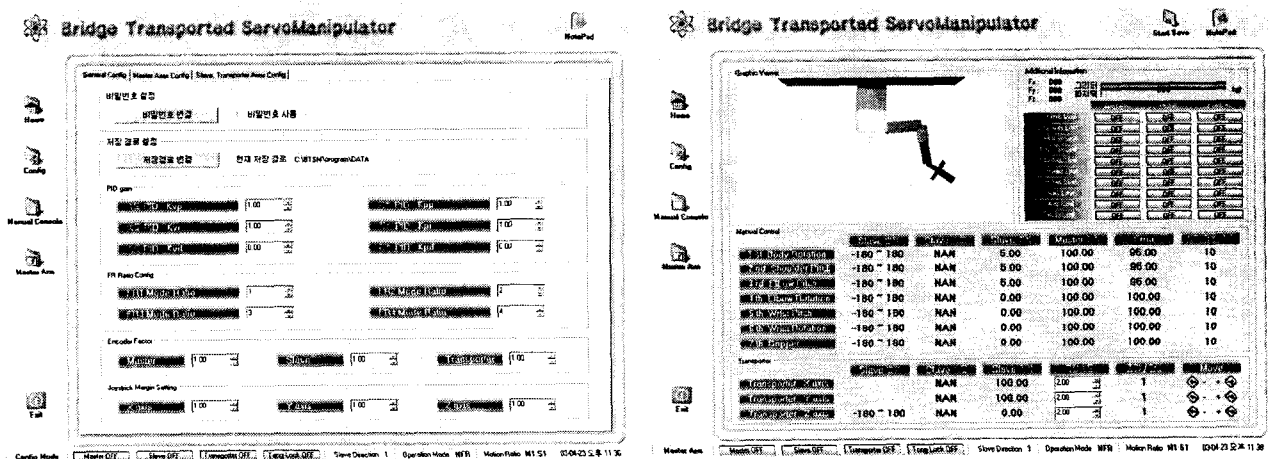


그림 5. 천정 이동 서보 매니플레이터 시스템 운전프로그램.

마스터 매니플레이터 옆에는 매뉴얼 콘솔을 설치하여, 작업자가 이송장치와 슬레이브의 각축을 제어하거나, 카메라를 제어할 수 있도록 하여 작업을 쉽게 할 수 있도록 하였다. 매뉴얼 콘솔은 다음과 같은 다양한 기능을 갖는다.

- Joystick으로 이송장치를 X-Y-Z 운전한다.
- 매니플레이터의 운전 모드(Jog, 위치제어, 힘반영 제어 및 힘반영 비)를 설정한다. Jog는 마스터와 슬레이브 매니플레이터의 위치가 서로 일치하지 않을 때 사용(속도조절 가능)하며, 위치제어는 마스터에 힘반영을 하지 않을 때 사용한다. 힘반영 제어시에는 힘반영 비를 조절하여 작업자에게 피로도를 주지 않는 최적의 힘을 느끼게 한다.
- 마스터의 구동범위는 슬레이브의 구동범위의 0.5~2 배로 scale할 수 있도록 하여 고하중 작업 또는 섬세한 작업별로 적절히 선택할 수 있도록 한다.

- 마스터는 $\pm 90^\circ$ 범위에서 움직이지만 슬레이브는 $\pm 360^\circ$ 영역을 움직이기 때문에 슬레이브 매니퓰레이터를 90° 간격으로 offset 시킬 수 있다.
- 카메라 4 대를 각각 Pan/Tilt/Zoom/Focus 조절 할 수 있다.
- 마스터, 슬레이브 매니퓰레이터 및 운반장치의 운전/이상 상태를 표시한다.

4.결 론

고 방사선 환경하에 있는 ACP (Advanced spent fuel Conditioning Process) 장치를 원격으로 유지보수 하기 위한 천정 이동 서보 매니퓰레이터(Bridge Transported Servo Manipulator) 시스템의 시제품 개발에 대한 내용을 소개하였다. 천정 이동 서보 매니퓰레이터 시스템은 이송장치, 슬레이브 매니퓰레이터, 마스터 매니퓰레이터 및 제어 장치로 구성된다. 이송장치는 슬레이브 매니퓰레이터를 핫셀내 3차원 공간상 임의의 위치로 이동시키는 기능을 한다. 마스터와 슬레이브 매니퓰레이터는 핸들(handle)과 그리퍼(gripper)를 제외하고 기구적으로 같다. 매니퓰레이터는 핸들(또는 그리퍼)을 포함하여 7 자유도를 가진다. 서보 매니퓰레이터는 현존하는 마스터-슬레이브 서보 매니퓰레이터와 비교하여 크기가 가장 작으며, 중량 대비 취급용량은 가장 크다. 유지보수가 어려운 이송장치의 구동기는 이중화하였으며, 슬레이브 매니퓰레이터의 구동부는 MSM으로 탈착이 가능하도록 모듈화 구조로 설계하였다. 힘반향 민감도를 높이기 위하여 매니퓰레이터의 4, 5, 6, 및 7축의 동력 전달은 와이어로 실현되도록 하여 역구동성을 높이도록 하였다. 향후, 천정 이동 서보 매니퓰레이터에 대한 힘반영 시험 및 원격 유지보수성 시험을 수행하고 이를 바탕으로 실증용 서보 매니퓰레이터를 개발할 예정이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] L.W. Ricketts, 1972, "Fundamentals of Nuclear Hardening of Electronic Equipment", John & Wiley & Sons.
- [2] D. P. Kuban and H. L. Martin, "An Advanced Remotely Maintainable Force-Reflecting Servomanipulator Concept," Proc. of the 1984 National Topical Meeting on Robotics and Remote Handling in Hostile Environments, pp. 407-415, 1984.
- [3] J. N. Herndon, H. L. Martin, and P. E. Satterlee, Jr., "The State-Of-The-Art Model M-2 Maintenance System," Proc. of the 1984 National Topical Meeting on Robotics and Remote Handling in Hostile Environments, pp. 147-154, 1984.
- [4] T. W. Burgess, "The Remote Operation and Maintenance Demonstration Facility at the Oak Ridge National Laboratory," Proc. of Spectrum '86 Int'l Topical Meeting on Waste Management and Decontamination and Decommissioning, pp. 2089-2100, 1986.
- [5] Eugene I. Rivine, Mechanical Design of Robots, McGraw-Hill Book Company, 1988.