2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핫셀내 장치의 원격 유지보수를 위한 천정 이동 서보 매니퓰레이터 시스템 개발 - 시제품 제작

Development of A Bridge Transported Servo Manipulator System for The Remote Maintenance of The Hot Cell Equipment – Production of The Prototype

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

요 약

핫셀내에서의 원격작업을 수행할 수 있는 천정 이동 서보 매니퓰레이터 시스템의 시제품 개발을 소개한다. 시제품은 부분적으로 와이어 구동방식을 채택한 단일 팔 형태의 힘반영 마스터-슬레이브 서보 매니퓰레이터로 중량 및 규모 대비 취급하중이 기존 마스터-슬레이브 서보 매니퓰레이터 보다 크다. 시스템의 3 차원 설계를 바탕으로 제작 및 기초적인 실험을 수행하였다. 제작품에 대한 상세한 소개 및 전기 케이블 처리, 와이어 처리, 탈착 등에 대한 기초적인 성능시험 결과를 기술한다. 이는 산업용 로봇 및 일반적인 구동장치의 개발에도 유용하다.

Abstract

The development of a prototype for a bridge transported servo manipulator system operating in a hot cell is introduced. Wire driven mechanisms have been adopted to increase the handling capacity to weight. The prototype has been produced and tested. Lessons learned have been summarized. Several configuration items, such as cable management and wire treatment, have been described. They can be a useful reference for designing other devices in the nuclear industry.

1. 서 론

한국원자력연구소에서는 핫셀내의 공정장치를 원격으로 유지보수하기 위한 천정 이동 서보 매니퓰레이터(Bridge Transported Servo Manipulator, 이하 BTSM)를 개발하고 있으며, 시제품의 제작 및 기초 시험에 대한 내용을 소개한다. 본 시스템은 이송장치, 슬레이브 매니퓰레이터, 마스터 매니퓰레이터, 그리고 제어반으로 구성된다. 슬레이브 매니퓰레이터는, 기존의 벽 고정형인 기계식 마스터 슬레이브 매니퓰레이터(이하 MSM)와는 달리, 서보제어 기술을 채택하여 마스터와 분리되어 이송장치에 부착되어 핫셀내의 모든 영역에 접근할 수 있다. 또한 기존의 일반적인 기어연결 구동방식과는 달리 부분적으로 와이어로 구동하는 방식을 채택하였다. 이 방식은 각 축을 구동하는 서보모터가 움직이는 축과는 별도로 본체에 부착되기 때문에 중량대비 취급하중을 높일 수 있다. 끝단은 그리퍼의 형태를 갖추어 물건을 쉽게 잡을 수 있도록 하였다. 이송장치는 크레인 형태와 같이 거더와 트롤리가 있으며, 텔레스코픽 튜브를 장착하여 각각 수평 및 수직방향의 이동을 지원한다. 마스터 슬레이브는 슬레이브와 동일한 형상으로 제작하였다. 그래서 각 축은 일대일 대응이 되어 쉽게 제어할 수 있다. 또한 힘반영 기능을 추가하기 위하여 마스터 매니퓰레이터도 서보 모터를 이용해서 제어하도록 하였다. 제어반은 모든 장치를 제어하며, GUI 및 카메라 모니터를 통해서 시스템에 대한 정보를 작업자에게 전달한다.

여기에서는 제작 및 기초적인 시험 결과를 소개한다. 일례로 제작에서는 케이블의 처리가 가장 어려웠다. 일반적으로 장치를 설계하면서 케이블에 대한 부분은 간과하기 쉬운데, 움직이는 부분에 함께 묶여지기 때문에 주의해서 설계해야 한다. 이러한 내용은 일반적인 구동장치의 설계에도 유용하게 참조할 수 있으며 실증용 장치의 설계에 반영될 중요한 데이터이다.

2. 시제품 제작

2.1 작업환경

BTSM 시스템은 이송장치, 슬레이브 매니퓰레이터, 마스터 매니퓰레이터, 그리고 제어반으로 구성된다. 핫셀에 투입되는 부분은 이송장치와 슬레이브 암이며, 마스터 암과 제어반은 핫셀 외부에 설치된다. 모터 구동에 필요한 전원 공급 및 신호 송수신을 위한 케이블은 핫셀 벽을 관통하여 제어반과 연결된다.

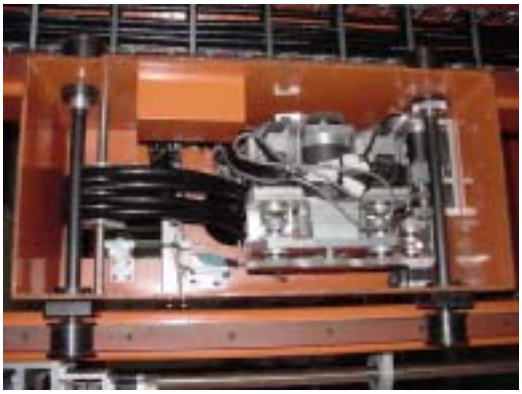
핫셀내의 작업공간은 2 m(폭) × 11 m(길이) 규모이며, 슬레이브 매니퓰레이터는 고준위 방사능 물질을 처리하는 공정장치에 대한 유지보수 작업을 수행하게 된다. 핫셀에는 별도의 MSM 이 있어서 공정장치의 작동을 담당하며, BTSM 은 MSM 이 접근할 수 없는 영역을 담당한다.

2.2 기계 장치

2.2.1 이송장치

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-iⅡ시리즈를 선정하였다. (참조 : http://www.tamagawa-seiki.co.jp)

(a) 이송장치



(b) 트롤리 내부 모습

(c) X 축 구동모듈

(d) Y 축 구동모듈

(e) Z 축 구동모듈

그림 1. 이송장치 및 구동모듈

이송장치 하부에는 카메라를 설치하여 조작기 작업상황을 모니터링 할 수 있도록 하였다. 텔레스코픽 튜브는 고정 1 단, 미끄럼 3 단으로 구성되어 있으며, 최하단은 모터와 체인으로 연결되어 있다. 튜브 내부에는 슬레이브 매니퓰레이터에 접속되는 4 개의 케이블이 통과한다.

그림 2. 텔레스코픽 튜브

텔레스크픽 튜브 하단에는 슬레이브 매니퓰레이터와 접속하기 위한 인터페이스 장치를 장착하였다. 슬레이브 매니퓰레이터를 필요에 따라 탈착 및 부착하기 위한 장치이며, 기계적인 연결장치를 갖추고 있으며 전기적인 연결을 위해서는 커넥터를 설치하였다.

접속을 위해서는 6 개의 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 pin 이 빠지지 않도록 한다.

(a) 상판, 회전판 및 Guide pin

(b) 하판과 Support pin

그림 3. 슬레이브 매니퓰레이터 탈부착용 인터페이스 장치

텔레스코픽 튜브가 상하로 움직임에 따라 케이블 또한 같이 움직여야 한다. 그러나 내부에서 꼬임이나 이완되는 현상이 없도록 해야하는데, 이를 위해 별도의 수납장치를 마련하였다. 움직 도르래를 이용해서 튜브가 올라오면 움직 도르래의 무게를 이용해서 케이블을 당겨주게 된다.

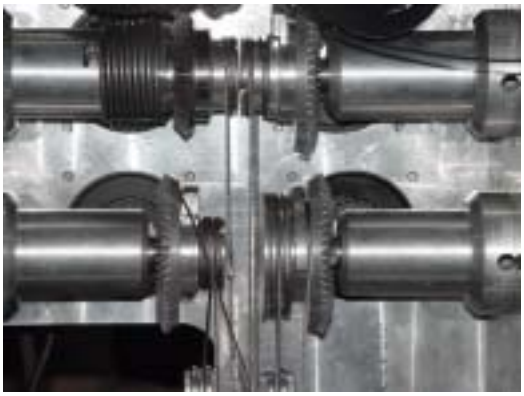
그림 4. 케이블 관리장치

2.2.2 슬레이브 매니퓰레이터

슬레이브 매니퓰레이터는 6 자유도의 운동과 1 개의 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.

(a) 슬레이브 매니퓰레이터 외형



(b) 내부 와이어 구조

(c) 관절부 와이어 구조

그림 5. 슬레이브 매니퓰레이터

그리퍼는 탈착이 가능하도록 설계하여 필요에 따라 다른 툴로 바꿔 작업할 수 있도록 하였다.

그림 6. 그리퍼

2.2.3 마스터 매니퓰레이터

마스터 매니퓰레이터는 슬레이브와 동일한 형상을 갖추고 있다. 그래서 마스터와 슬레이브의 각 축은 일대일 대응한다. 또한 힘반영을 위해 서보 모터를 장착하였다. 끝단은 그리퍼 대신에 핸들을 장착하여 조종하기 쉽도록 하였다. 마스터 매니퓰레이터는 지지대에 장착되어 있다.

그림 7. 마스터 및 지지대

2.2.4 주요 부품의 내방사선화

핫셀에서 작업하는 장치가 고장을 일으키는 원인은 방사선 조사에 의한 부품의 기능저하에 의한 것이다. 이러한 고장을 방지하기 위해서는 일정기간의 조사량에도 견딜 수 있는 내방사선 부품을 사용하여야 한다.(1,2) 슬레이브 매니퓰레이터에 장착되는

주요 부품은 카메라, 모터, 커넥터, 케이블, 및 그리스/오일 등이 있다. 참고로 BTSM 의 운전 기간내 최대 추정 누계선량은 4 × 10^4 Gy 이다(3.93 Gy/h).

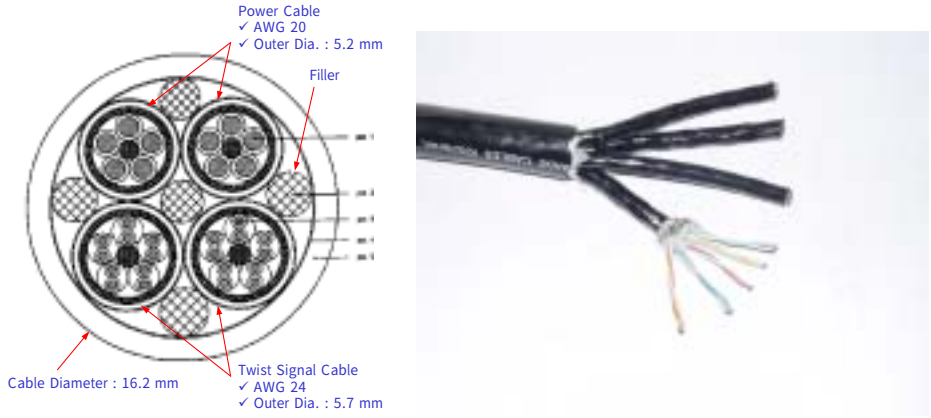
일반 카메라의 예상 손상분기점은 최대 약 10^2 Gy 로 추정된다. 따라서 상기의 최소선량인 3.93 Gy/h 를 고려할 경우 예상되는 설계수명은 25.4 시간 정도이다. 따라서 카메라의 경우에는 반드시 내방사선 카메라의 사용을 고려하여야 한다. 현재는 성능 시험을 위해서 일반 카메라를 사용하고 있지만 실증용으로는 내방사선 카메라를 고려하고 있다.

AC 또는 DC 모터의 경우 예상 손상분기점은 약 10^5 Gy 로 추정된다. 따라서 예상되는 설계수명은 최대 25,445 시간에서 최소 7,692 시간 정도로 최소 1 년 이상 정도는 사용할 수 있다. 그러나, 서보 모터의 경우에는 내방사선성이 AC 모터보다 떨어지므로 원격으로 교체가 가능하도록 설계하였다. 시제품에서는 내방사선 모터를 사용하지 않고 일반 모터를 사용하였다. 내방사선 모터는 부피와 무게가 너무 커져 설계상의 어려움이 많다. 대신 레졸버형을 선택하여 환경적인 영향을 가능한 줄이도록 하였다. 선정한 모터는 Tamakawa 社의 TBL-iⅡ시리즈이다.

일반 커넥터의 경우 예상 손상분기점은 약 10^3 Gy 로 추정되며, 예상되는 설계수명은 최대 254 시간에서 최소 76.9 시간이다. 일반 케이블의 경우, 예상 손상분기점은 약 1.5 x 10^4 Gy 로 추정되며, 예상되는 설계수명은 최대 3,816 시간에서 최소 1,153 시간이다. 그래서, 케이블과 커넥터는 내방사선 제품을 채택하였다. 채택된 케이블과 커넥터는 10^6 Gy 까지 견딜 수 있기 때문에 조작기 시스템을 운전하는 기간중에는 문제가 없다. 케이블과 커넥터는 각각 Ecolab 社와 Lemo 社의 제품으로 선정하였다.(참조, http://www.leoni-elocab.ca/, http://www.lemo.com/) 특히, 슬레이브 매니퓰레이터에 장착되는 커넥터는 remote type 으로 하여 MSM 으로 쉽게 탈부착할 수 있도록 하였다.

(a) 커넥터 결합 모습 (b) 내방사선 커넥터

그림 8. Remote type 내방사선 커넥터



(a) 내방사선 케이블 단면 설계 (b) 케이블 실물

그림 9. 내방사선 케이블 단면 및 실물

Grease 와 Oil 의 예상 손상분기점은 약 10^6 Gy 정도로 알려져 있으며, 내방사선 제품의 경우에는 10^7 Gy 정도이다. 따라서 차세대관리공정의 수행환경에서 Grease 와 Oil 의 경우에는 크게 영향을 받지 않을 것으로 판단된다.

2.3 제어 장치

2.3.1 주 제어반

제어 시스템은 사용자가 조작기의 상태 및 작업상황을 쉽게 파악할 수 있도록 통합적으로 구성하였다. 컴퓨터 모니터를 통해서는 조작기의 상태를 파악할 수 있으며 카메라 모니터를 통해서는 작업상황을 파악할 수 있다. 내부에는 슬레이브 및 마스터 매니퓰레이터를 구동하는 모터 드라이버 및 제어용 입출력 보드를 장착하였다.

그림 10. 제어 시스템

운전 프로그램은 시스템 파라미터를 설정하고, 마스터의 지령 신호를 처리하여 슬레이브 매니퓰레이터를 제어하며, 조작기의 상태에 대한 정보를 제공하는 GUI 프로그램이다.

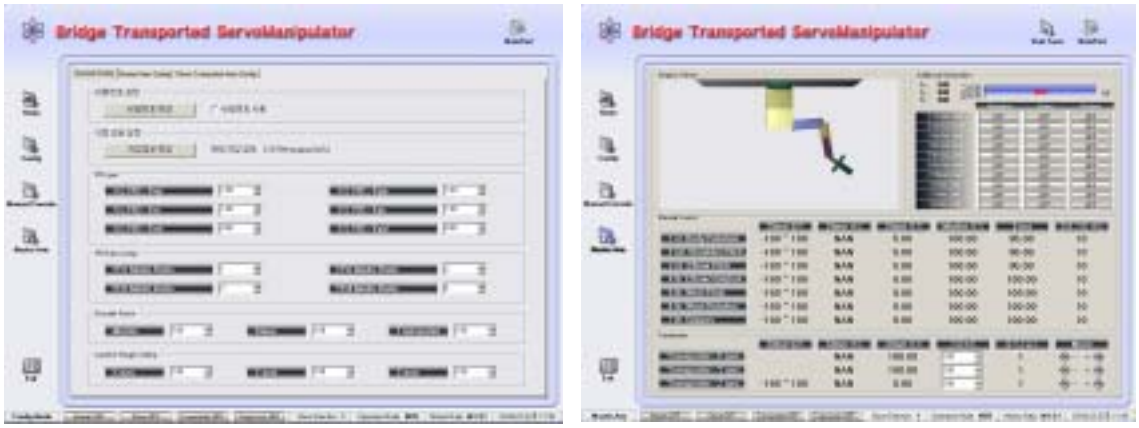


그림 11. 조작기 운전프로그램

2.3.2 매뉴얼 콘솔

마스터 매니퓰레이터 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.

- Joystick 으로 이송장치를 X-Y-Z 운전한다.
- 매니퓰레이터의 운전 모드(Jog, 위치제어, 힘반영 제어 및 힘반영 비)를 설정한다. Jog 는 마스터와 슬레이브 매니퓰레이터의 위치가 서로 일치하지 않을 때 사용(속도조절 가능)하며, 위치제어는 마스터에 힘반영을 하지 않을 때 사용한다. 힘반영 제어시에는 힘반영 비를 조절하여 작업자에게 피로를 주지 않는 최적의 힘을 느끼게 한다.
- 마스터의 구동범위는 슬레이브의 구동범위의 0.5 2 배로 scale 할 수 있도록 하여 고하중 작업 또는 섬세한 작업별로 적절히 선택할 수 있도록 한다.
- 마스터는 ±90 범위에서 움직이지만 슬레이브는 ±360 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.

그림 12. 매뉴얼 콘솔

3. 기초 시험

제작된 시제품의 성능 시험을 위해 먼저 기초적인 동작 시험과 주요 메카니즘의 성능 시험을 수행하였으며, 취급하중 및 힘반영에 대한 성능 시험은 진행중에 있다. 향후에 이 시험 결과를 실증용 장치에 대한 설계로 활용하게 된다.

와이어는 장력을 통해 동력을 전달하는 중요한 요소이다. 그래서 와이어의 장력을 적절하게 유지하여야 한다. 일반적인 장력 조절 장치는 너무 길어 본 장치에는 적합하지 않아서, 다음과 같은 장력 조절 장치를 적용하였다. 그러나 풀리와 와이어간의 마찰로 약간의 저항은 존재한다. 또한 와이어가 풀리를 감고 지나갈 때 와이어 끼리 마찰을 일으키는데, 풀리를 가급적 넓게 설계하여 이를 방지하도록 한다.

그림 13. 장력 조절 장치 및 와이어 풀리

케이블은 설계시 쉽게 간과하는 중요한 구성요소이다. 케이블은 한번 납땜 혹은 접점연결하면 쉽게 분해되지 않기 때문에, 설계에서 충분히 고려하지 않으면 조립에서

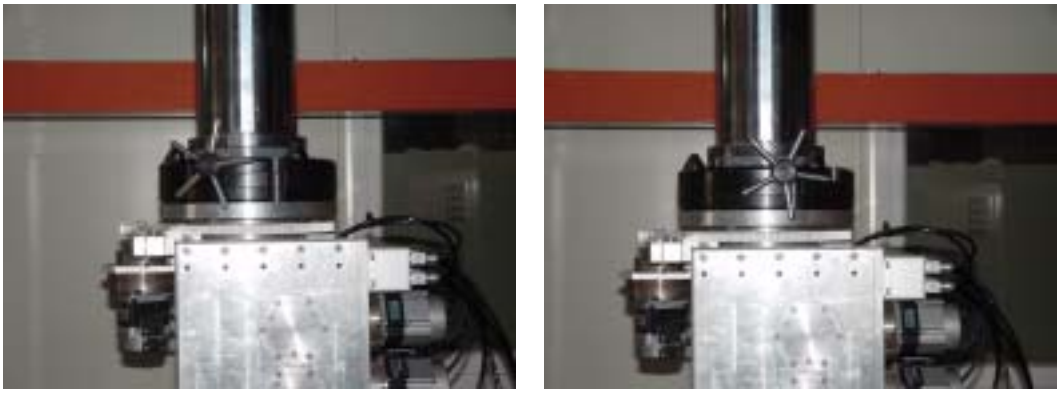
문제가 발생한다. 연결되는 부분에서는 항상 케이블의 분해 조립을 고려하여야 하며, 움직이는 부분에서는 접점에 힘이 걸리지 않도록 Collet 혹은 가이드를 꼭 설치하여야 한다. 또한 케이블이 지나가는 부분은 곡률반경을 충분히 주어 힘이 걸리지 않도록 해야 한다.

(a) 탈착 상부판 케이블 처리 (b) 튜브 내 케이블 관통

그림 14. 전기 케이블 처리

슬레이브 매니퓰레이터는 유지보수를 위해서 텔레스코픽 튜브로부터 분리된다고 설명하였다. 시험을 통해 탈부착의 실제 입증 및 필요한 접속력을 확인하였다. 탈착은 슬레이브 암의 자중에 의해 이루어 진다. 부착은 Support pin, Guide pin, 그리고 커넥터의 위치 정밀도에 의해 이루어 지며, 커넥터 접속에 필요한 힘은 10 kg 정도였는데, 텔레스코픽 튜브와 접속장치의 무게로 이를 감당할 수 있었다.

(a) 부착 준비 (b) 접속장치 정렬



(c) 접속 (d) 회전판 체결

그림 15. 슬레이브 암 접속 과정

4. 결론

천정이동 서보 매니퓰레이터의 시제품 제작에 대한 내용을 소개하였다. 제작한 기구부의 전반적인 내용과 제작을 통해 경험했던 사항을 정리하였다. 천정 이동 서보 매니퓰레이터는 이송장치, 슬레이브 및 마스터 매니퓰레이터, 그리고 제어시스템으로 구성된다. 와이어와 케이블의 처리는 중요한 설계요소로서 제작 및 신뢰성에 영향을 미치기 때문에 조립 및 간섭등을 충분히 고려하여야 한다.

앞으로 천정 이동 서보 매니퓰레이터에 대한 취급하중 및 힘반영 시험을 수행하고 이를 바탕으로 실증용 매니퓰레이터를 개발할 예정이다. 이러한 시험 결과들은 일반적인 기계장치의 설계에도 활용될 수 있는 유용한 것이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

(1) L.W. Ricketts, 1972, “Fundamentals of Nuclear Hardening of Electronic Equipment”, John & Wiley & Sons.

(2) K.U. Vandergriff, 1991, “Testing of components for use in high-level gamma radiation environments”, ORNL/TM-11507, Technical report of ORNL.

(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.