

ACP 공정장치 원격취급을 위한 힘반영 서보매니퓰레이터 시스템

한국원자력연구원에서는 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 사용후핵연료 차세대관리 종합공정(Advanced spent fuel Conditioning Process: ACP)을 개발하여 산화우라늄을 대상으로 기술적 가능성을 입증하였으며, 현재는 공학규모의 건식공정(pyroprocess) 개발을 위한 연구를 수행하고 있다.

■ 이종광, 이효직, 박병석, 윤지섭*

(한국원자력연구원 핵연료주기원격장치팀, *선진핵주기시스템공학그룹)

1. 서론

원자력발전에서 필연적으로 발생하는 부산물인 사용후핵연료(spent fuel)는 높은 방사선과 열을 방출하는 고준위 폐기물로 인식되고 있지만, 재사용이 가능한 우라늄을 95% 이상 함유하고 있기 때문에 효과적으로 재순환된다면 미래의 귀중한 에너지 자원이 될 수 있는 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 사용후핵연료 차세대관리 종합공정(Advanced spent fuel Conditioning Process; ACP)을 개발하여 산화우라늄을 대상으로 기술적 가능성을 입증하였으며, 현재는 공학규모의 건식공정(pyroprocess) 개발을 위한 연구를 수행하고 있다.

ACP는 사용후핵연료를 고온용융염 상에서 금속전환하여 사용후핵연료의 부피, 발열량 및 방사선 세기를 1/4 이하로 줄일

수 있는 전해환원 공정으로 건식공정의 일부이다. 2005년도에 실험실 규모(20kgHM/batch)의 금속전환공정을 시험하기 위한 시설(ACP Facility; ACPF)을 완공하고 공정장치들을 설치하였다. 또한 2006년까지 천연우라늄과 모의 사용후핵연료를 사용한 성능시험을 수행하여 시설의 최적 운전조건을 도출하는 한편, 시설의 신뢰성과 안전성 향상을 위한 보완작업을 수행하였다[1].

ACP 핫셀(hot-cell)은 고방사선 환경으로 공정장치의 운전 및 유지보수가 원격으로 수행된다. 이를 위해 일반적인 핫셀과 마찬가지로 벽부착 기계식 원격조종기(Master-Slave Manipulator; MSM)를 설치하였으며, 작업자는 납유리차폐창(lead-glass shield window)을 통해 핫셀 내부를 보면서 작업을 수행한다. 하지만 ACP 핫셀은 공정장치의 규모에 비하여 핫셀의 공간이 협소하여 핫셀 내 공정장치의 일부는 벽에 고정되어 설치된 MSM으로 접근이 불가능하다[2]. 또한 MSM은 힘반영 비를 조절할 수 없기 때문에 작업자의 피로를 유발하며, 작업자가 취급할 수 있는 범위 이내의 하중만을 다룰 수 있다. 이러

한 작업영역의 제한성을 극복하기 위해 핫셀 내에서 자유롭게 이동이 가능한 천정이동 힘반영 서보매니플레이터를 개발하였다. 본 논문에서는 ACP 공정장치의 원격취급을 위해 개발된 양방향 힘반영 서보매니플레이터와 함께 ACPF에서 수행된 실험실 규모 ACP 캠페인에서의 원격 운전 및 유지보수에 대해 소개한다.

2. ACP와 ACPF

ACP는 경수로(PWR) 사용후핵연료에 잔재하는 고방열핵종(Cs, Sr 등)을 제거하고, 산화물인 사용후핵연료를 금속으로 전환하여 잉곳으로 만드는 공정으로, ACP 공정장치 및 공정 흐름이 그림 1에 보여진다.

25 cm 길이의 절단연료봉(rodcut)이 핫셀 내로 반입된 후, 먼저 중성자 측정장치(ASNC)로 핵물질을 계량한다. 이어 탈피복장치에서 절단연료봉의 피복관을 절개하여 펠렛(pellet)을 분리시킨다. 분리된 펠렛들은 분말화장치에서 산화환원 반응을 통해 U_3O_8 형 분말로 전환되며, 이는 전기화학적 환원장치인 금속전환장치에 공급된다. 금속전환장치에서 우라늄, 초우란

(transuranium) 및 백금족 원소의 산화물은 금속분말로 전환되고, 세슘(Cs)과 스트론튬(Sr) 및 일부 희토류 원소(rare-earth elements)의 산화물은 액체 염화물로 전환되어 서로 분리된다. 금속분말은 염잉곳제조장치에서 금속잉곳으로 제조되고, 염화물은 금속잉곳 제조장치(smelter)에서 고화된다. 현재까지는 사용후핵연료를 직접 사용하는 대신에 비슷한 조성을 갖는 모사연료(simulated fuel)를 사용한 inactive 시험이 수행되었다.

그림 2에 보이는 ACPF는 국내 최초의 고온 용융염 취급공정용 $\alpha-\gamma$ 형 핫셀로 공정셀과 유지보수셀로 구성되어 있다. 공정셀의 크기는 8.1 m(L) × 2 m(W) × 4.3 m(H)이고, 유지보수셀의 크기는 2.2 m(L) × 2 m(W) × 4.3 m(H)이다. 핫셀 벽은 90 cm의 중콘크리트 구조물로 만들어 작업구역에서의 선량률이 0.01 mSv/h 이하가 유지되도록 하였다. 핫셀 전면에는 5조의 차폐창 및 기계식 원격조종기를 설치하였고, 후면의 격리실에는 Pardirac 수송용기 접속장치 및 Jib 크레인 등을 설치하였다.

3. 힘반영 서보매니플레이터 시스템

3.1 천정이동 서보매니플레이터

그림 3은 천정이동형 서보매니플레이터(Bridge Transported Servo-Manipulator, BTSM) 시스템의 모습을 보여준다. BTSM 시스템은 슬레이브 매니플레이터, 마스터 매니플레이터, 천정이동장치, 카메라 시각 시스템, 수동조작반 및 제어반 등으로 구성되어 있다[3]. 마스터 및 슬레이브 매니플레이터는 마스터 측의

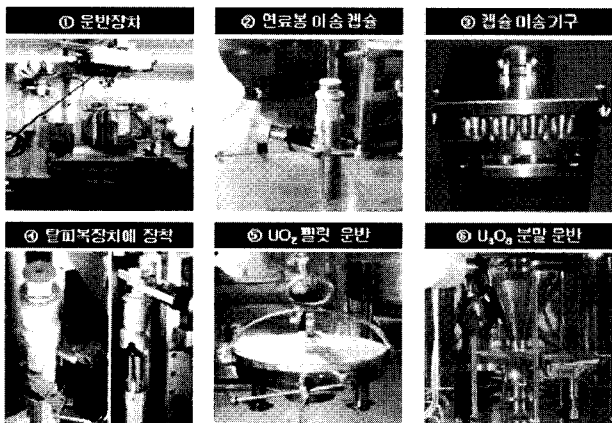
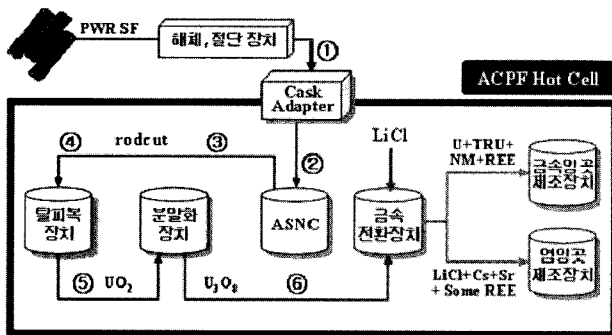


그림 1. ACP 공정장치 및 물질 흐름도

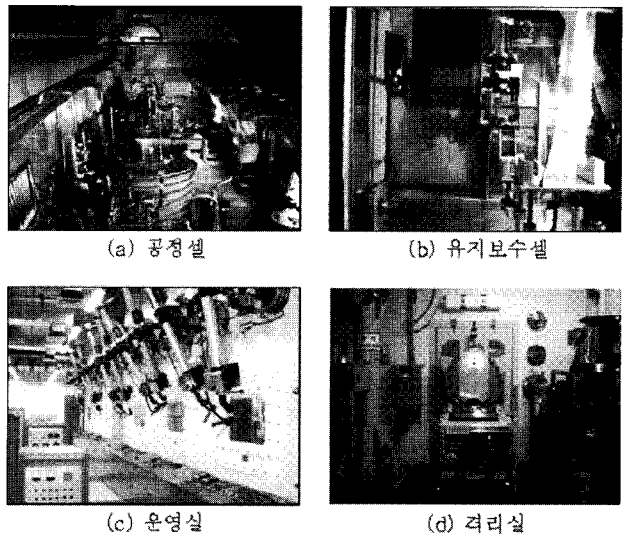


그림 2. ACPF 구성

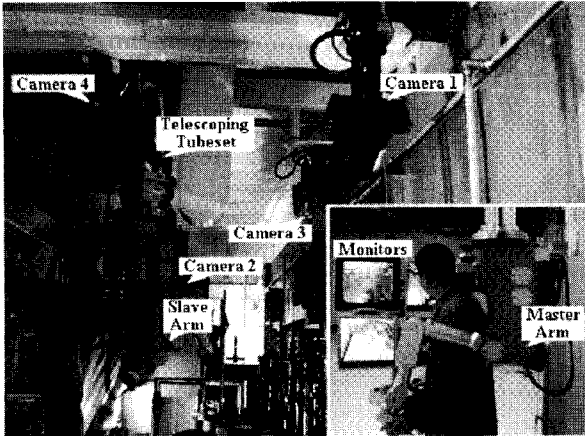


그림 3. BTSM 시스템(우측 하단은 운영실에 설치된 마스터 매니플레이터를 조작하는 모습)

핸들과 슬레이브 측의 그리퍼를 제외하고는 동일한 형상으로 제작되었다. 슬레이브 매니플레이터는 3단의 텔레스코핑 튜브에 부착되어 상하로 이동된다.

그림 4는 6자유도와 그리핑 모션을 갖는 슬레이브 매니플레이터의 기구적 구성을 나타내며, 15 kgf를 취급할 수 있도록 설계하였다. 1, 2, 3축은 기어 구동 방식을 채택하였고, 4, 5, 6축 및 그리핑 축은 와이어 구동 방식을 채택하였다. 와이어 구동 방식은 축간 커플링이 존재하고 모듈화 설계가 힘든 단점이 있지만, 무게와 마찰을 크게 줄일 수 있으며 또한 구동부를 관절로부터 멀리 위치시킬 수 있다[4]. 이러한 설계를 통해 1축을 제외한 모든 서보 모터들을 슬레이브 몸체 후면에 위치시킬 수 있었으며, 이는 구동기 모듈의 유지보수에 편의성을 제공한다. 각 축의 회전량은 포텐쇼메터(potentiometer)와 리졸버(resolver)를 조합하여 측정하는데, 포텐쇼메터는 절대 위치를 리졸버는 정밀하게 위치를 측정하는 역할을 분담한다. 또한 슬레이브 매니플레이터는 MSM을 이용한 간단한 원격 조작만으로도 텔레스코핑 튜브로부터 쉽게 분리될 수 있으며, 이때 구동기 전원 및 신호선들도 동시에 분리된다.

3.2 카메라 시각시스템

원격 조작자에게 시각정보를 효과적으로 제공하기 위해 4대의 내방사성 팬-틸트-줌 카메라가 공정장치들의 배치와 주시각을 고려하여 설치되었다(그림 3). 2대의 카메라는 천정이송장치의 거더(girder) 및 트롤리(trolley)에 설치되었으며, 나머지는 인셀 크레인과 핫셀 벽에 각각 설치되었다. 특히 그림 3에서 camera 4로 명명된 카메라의 앞단에는 상업용의 3D 렌즈[5]를

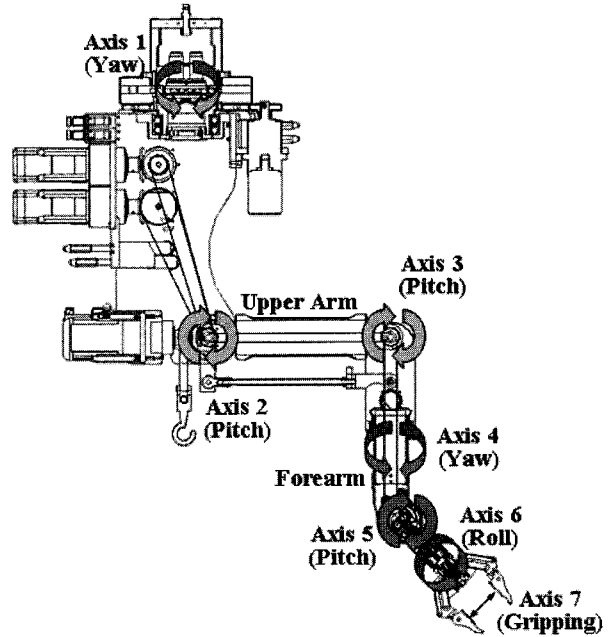


그림 4. 슬레이브 매니플레이터 구조

방사선환경에 적합하도록 개조하여 장착하였다. 3D 렌즈는 스테레오 비전 시스템이 2대의 카메라의 기하학적 관계로부터 3차원 정보를 얻는 것과 유사하게, 양안 거리만큼 떨어져 2개의 렌즈를 설치하고 기계적 셔터링(shuttering) 방법에 의해 좌우상을 분리하여 각각을 영상 프레임의 짝수 및 홀수 필드로 합성하고, 이를 3차원 디스플레이 모니터에 나타내는 방식이다. 방사선 환경에서 사용되는 카메라는 내부 회로의 보호를 위한 차폐구조가 부가적으로 필요하여 소형으로 제작하기 힘들며, 이를 이용하여 스테레오 비전시스템을 구성하는 경우 장치가 너무 커지게 된다. 반면에 3D 렌즈 시스템은 차폐의 필요성이 없어 설치 공간을 줄일 수 있으며, 특별한 영상처리 과정 없이 실시간으로 영상을 표시한다.

카메라 시각 전시반은 그림 5에 보이는 바와 같이 4대의 모니터를 집중적으로 전시할 수 있는 형태를 갖으면서 모니터의 위치를 조정할 수 있다. 또한 하부 프레임에 바퀴 구조를 채택하여 쉽게 이동시킬 수 있다. 작업성 측면에서 작업자가 납유리 차폐창을 통해 직접 보면서 MSM을 조종하여 작업을 수행하는 경우 작업시간이 가장 빠른 반면에, 시각 전시반을 보면서 서보 매니플레이터를 이용해 작업을 수행하는 경우 가장 느리다. ACPF 핫셀은 공간이 협소하고 공정장치들의 크기가 커서 차폐창을 통해 눈높이 이상의 작업 대상이나 장치의 측면부 등에 대한 작업시각을 확보하기 어려운 곳이 존재한다. 또한 커넥터,

소켓, 볼트 등의 방향을 판별하거나 섬세한 작업을 위해서는 영상을 확대할 필요가 있다. 이러한 경우 조작자는 그림 5에 보이는 것과 같이 차폐창 대신 카메라 시각 전시반의 영상을 보면서 작업을 수행함으로써 작업 효율을 높일 수 있다. 그림에서 CAMERA 2의 영상은 MSM을 이용하여 전기 커넥터를 삽입하는 작업 영상을 보여주며, 수동조작반 내의 카메라 제어 버튼을 조정하여 영상을 최대 300배 까지 확대시키면서 보다 섬세한 작업을 효과적으로 수행할 수 있다.

3.3 양방향 힘반영 제어기

제어기는 그림 6과 같은 양방향 위치-위치 힘반영 제어기가 적용되었으며, 마스터와 슬레이브 매니플레이터의 위치오차를 되먹임(feedback)하는 방식이다. 힘반영은 매니플레이터를 움직이는 방향과 반대로 토크를 인가하여 작업자가 저항력을 느끼도록 하는 방식이다. 마찰 보상항이 포함된 PD 제어기를 적용하였으며, 제어기 이득은 실험적인 방법을 통해 구했다.



그림 5. 시각 전시반과 MSM을 이용하는 작업 모습

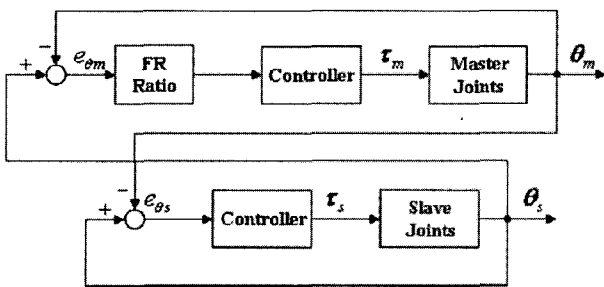
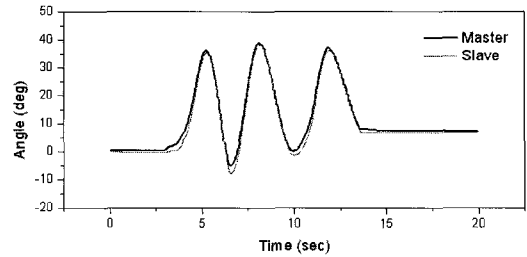
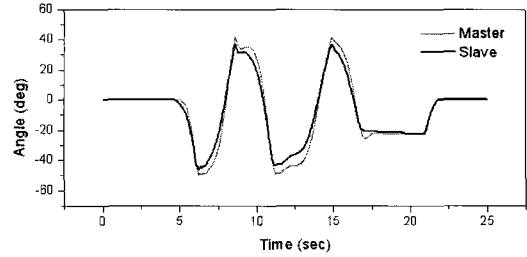


그림 6. 양방향 위치-위치 힘반영 제어기

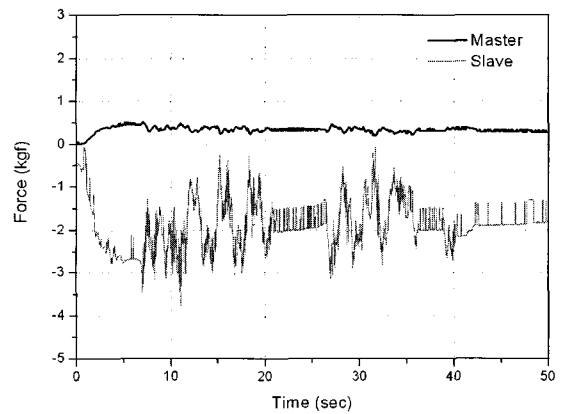


(a) Master to slave

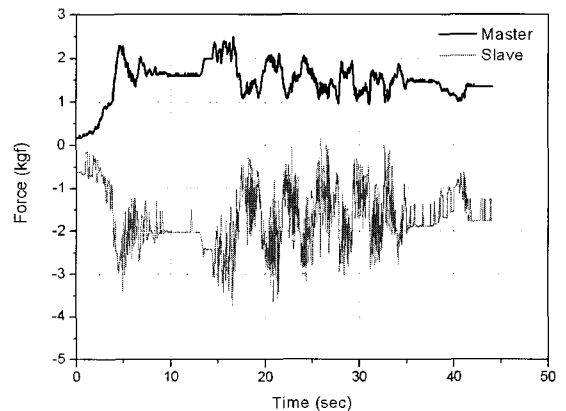


(b) Slave to Master

그림 7. 양방향 위치응답 특성(1축)



(a) FR=0.2



(b) FR=1

그림 8. 힘반영비 변화에 대한 힘반영 성능(1.5 kgf 취급)

그림 7은 양방향 위치제어 결과를 보여주는데, (a)는 마스터 매니플레이터의 움직임을 슬레이브 매니플레이터가 추종한 결과이며, (b)는 이와 반대로 슬레이브 매니플레이터의 움직임을 마스터 매니플레이터가 추종한 결과이다. 슬레이브의 움직임을 마스터가 추종하는 결과의 오차가 좀 더 컸지만 대체로 양호한 양방향 위치응답 성능을 갖도록 제어기 이득이 선정되었음을 알 수 있다. 또한 이러한 작은 마스터와 슬레이브 간의 위치 응답 오차는 원격제어에서의 작업성에 크게 영향을 미치는 요소는 아니다[6].

그림 8은 1.5 kgf의 중량물을 취급하면서 힘반영 비를 조절한 경우의 힘반영 결과를 나타낸다. 힘반영 비의 변화에 따라 슬레이브가 받는 힘은 거의 비슷하지만, 조작자가 느끼는 작업력이 변화되어 전달됨을 알 수 있다. 그림에서 슬레이브의 작업력과 마스터의 전달력은 직접 측정하는 대신에 매니플레이터 구동부의 토크로부터 계산하였다.

힘반영 성능을 평가하는 하나의 지표로 힘반영 민감도 (sensitivity)가 사용된다. 힘반영 민감도는 관절이 운동을 시작하는데 필요한 최소 힘으로 정의되는 force threshold를 낮춤으로써 향상시킬 수 있으며, 이는 마찰, 제어기 이득, 감속비 등에 주로 영향을 받는다. 힘반영 민감도가 작을수록 인간과 같은 섬세한 작업을 수행하는 것이 가능하지만, 일반적으로 서보매니플레이터의 취급용량을 키우는 것과 힘반영 민감도를 증가시키는 것은 서로 배치되는 사항이다. 통상 우수한 힘반영 서보매니플레이터의 민감도는 취급용량의 2~5% 정도이다.

힘반영 민감도를 정량적으로 평가하기 위해 ATI사의 내방사선 6축 힘-토크 센서(FT04672 Delta)를 사용하였다. 힘반영 민감도는 힘-토크 센서로 매니플레이터 관절을 밀면서 이때 슬레이

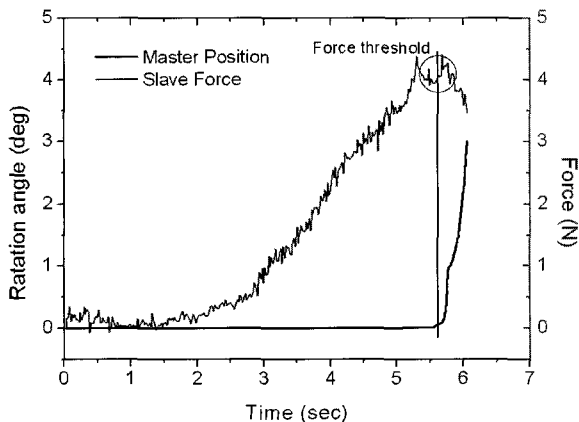


그림 9. 힘반영 민감도(2축)

브가 받는 힘과 마스터 매니플레이터의 움직임을 동시에 측정하는 방식으로 평가하였다. 그리핑 축을 제외한 6축의 힘 민감도 평균값이 0.47 kgf로 슬레이브 자체의 역구동력(back driving force)의 평균값 1.1 kgf 보다도 훨씬 작았으며, 이는 취급용량 대비 3.1%의 수준이다. 그림 9는 슬레이브 매니플레이터 2축에 대한 측정 결과를 나타낸다.

위치기준형 힘반영의 단점중의 하나는 하중을 취급하지 않는 자유운동에서도 추종 오차에 비례하여 불필요한 힘반영이 발생되어 조작자의 피로를 유발시킨다는 것이다. 보다 효율적인 힘반영이 이루어지도록 힘반영 비의 조절, 위치오차의 역치(threshold) 적용, 고주파 필터를 이용하여 되먹임 위치 오차의 특성에 따라 가변적으로 힘반영 비를 결정하는 방법들이 적용되었다[7].

4. 원격 운전/유지보수 시험

그림 10은 ACPF 핫셀에 설치된 6개의 주요 공정장치들의 모습을 보여준다. 이 중에서 영입곳 제조장치는 인셀 크레인과 천정 이송장치 간의 물리적 간섭으로 인해 서보매니플레이터가 장치에 접근할 수 없다. 따라서 MSM만을 이용하여 원격취급이 가능하도록 공압구동 리니어 가이드 위에 장치를 설치하여 작업시 장치를 MSM의 작업영역으로 이동시킬 수 있도록 개선하였다. 원격 운전 및 유지보수 장비로는 5조의 MSM과 BTSM, 인셀 크레인, 슬레이브 매니플레이터 몸체에 설치된 30 kgf 취급

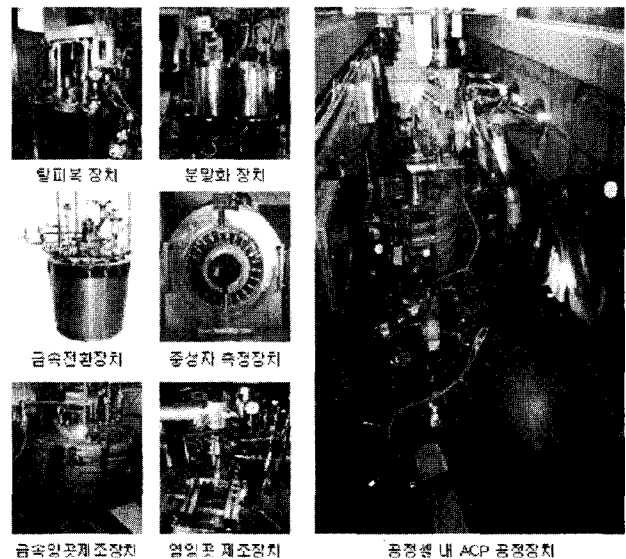


그림 10. ACPF 공정장치 및 설치 모습

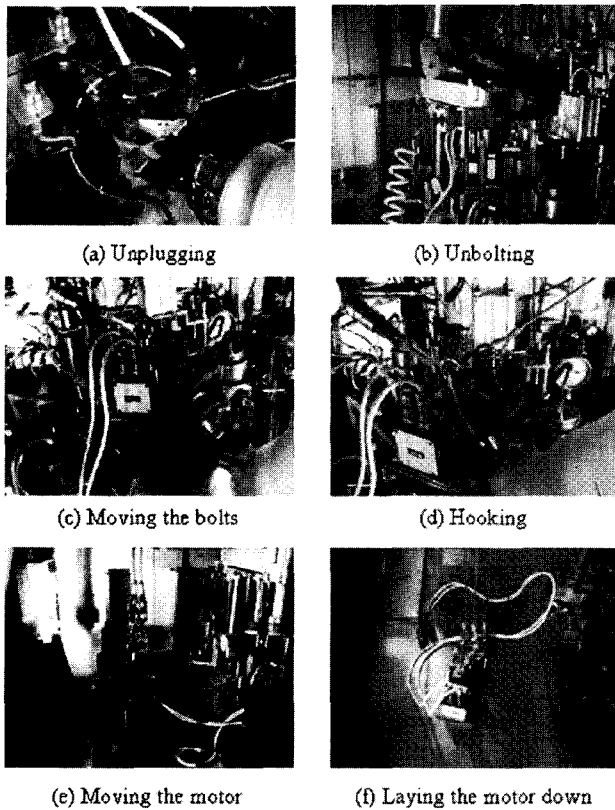


그림 11. 분말화장치 메시 회전모터 유지보수 작업

용량의 후크 및 각종 공구류들을 포함하며, 작업 대상에 따라 장비들을 조합하여 작업을 수행하였다.

먼저 공정장치와 핫셀 유틸리티들 중에서 중요도가 높은 유지보수 모듈을 선정한 후, 각각의 대상 모듈에 대하여 전용 공구를 제작하고 유지보수 시험을 수행하였으며, 유지보수성을 높일 수 있는 개선 방안을 도출하였다.

또한 공정장치 모듈의 특성에 맞게 원격취급 장비의 활용방안 및 작업공구의 이용방안에 대한 절차를 작성하였다. 이를 바탕으로 유지보수 시험을 수행하면서 작업 절차의 수정, 보완을 반복하였으며, 또한 여러 방안을 비교하여 유지보수 대상별 최적의 작업절차서를 작성하였다. 선정된 18개의 유지보수 모듈에 대해 숙련된 작업자가 유지보수 작업을 수행한 후 5점 척도로 작업 난이도를 평가한 결과 모듈 개선, 공구 및 작업절차 개선에 의하여 평균적인 작업 난이도를 약 14%정도 줄일 수 있었다.

그림 11은 MSM, BTSM, 인셀 크레인 및 에어 라쳇 공구를 활용하여 분말화장치의 메시 회전모터를 원격으로 유지보수 하는 작업과정을 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 사용후핵연료를 효과적으로 재순환하기 위한 ACP 공정장치들을 원격으로 운전 및 유지보수 하기 위해 개발된 천정이동 서보매니플레이터(BTSM) 시스템을 소개하였다. BTSM 시스템은 슬레이브 매니플레이터, 마스터 매니플레이터, 카메라 시각시스템 및 원격제어시스템으로 구성되어있다. 슬레이브 매니플레이터는 천정이송장치의 하부에 설치된 3단의 텔레스코핑 튜브와 연결되어 있어, 벽부착 기계식 원격조종기의 단점인 접근영역의 제한성을 극복한다. 또한 양방향 힘반영 제어를 통해 조작자는 슬레이브가 받는 힘을 느끼면서 작업을 수행할 수 있다. 현재까지 2번의 실험실 규모 ACP 캠페인(20kgHM/batch)을 통한 inactive test가 수행되었다. 이 과정을 통해 유지보수성을 향상시키기 위한 공정장치 모듈 및 공구들에 대한 다양한 개선점들이 도출되었다. 또한 원격취급 장비의 활용방안 및 유지보수 대상별 작업절차를 최적화함으로써 작업 시간을 단축하고, 작업 난이도를 줄일 수 있었다.

금년부터 공학규모의 건식공정(pyroprocess)을 개발하고 이를 실증하기 위한 연구가 시작되었다. 공학규모의 공정은 ACP에 비해 장치의 수가 많아지고 규모가 더욱 커지기 때문에 이를 효과적으로 운전하고 유지보수 할 수 있는 기술의 개발이 필요하다. 이를 위해 공정장치들에 대한 모듈화 설계 방안의 마련과 함께 천정이동 힘반영 양팔 서보매니플레이터를 포함한 원격취급 장비를 개발하고 있다.

참고 문헌

- [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] 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.
- [3] B. S. Park, J. H. Jin, J. K. Lee, J. S. Yoon, and G. J. Jung, "A bridge transported servo-manipulator for the advanced spent fuel conditioning process," Proc. of GLOBAL 2005, paper no. 273, 2005.
- [4] J. Herndon, C. Kring, and J. Rowe, "Advanced remote handling for

future applications: the advanced integrated maintenance system,"
Proc. of Remote Systems and Robotics in Hostile Environments,
pp. 622-629, 1987.

[5] www.wasol.co.kr

[6] R. Kress, J. Jansen, M. Noakes, and J. Herndon, "The evolution of
teleoperated manipulators at ORNL," Proc. of the ANS 79th
Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, pp. 623-631,
1997.

[7] 진재현, 박병석, 윤지섭, "핫셀내 원격작업을 위한 서보 매
니플레이터의 힘반영 알고리즘," KACC 2005, pp. 821-825,
2005.

◎ 저 자 약 력

이 종 광

제어 · 자동화 · 시스템공학회 논문지 제 13 권 제 5 호 p. 473 참조.

이 호 직

제어 · 자동화 · 시스템공학회 논문지 제 13 권 제 5 호 p. 473 참조.

박 병 석

제어 · 자동화 · 시스템공학회 논문지 제 13 권 제 5 호 p. 473 참조.

윤 지 섭

제어 · 자동화 · 시스템공학회 논문지 제 13 권 제 5 호 p. 473 참조.