

파이로 공정장치의 원격 취급성에 관한 실험적 연구

Experimental Study of Remote Handling Performance for Pyroprocessing Facilities

유승남^{1,✉}, 김성현¹
Seung Nam Yu^{1,✉} and Sung Hyun Kim¹

¹ 한국원자력연구원 핵주기공정개발부 (Nuclear Fuel Cycle Process Technology Development Division, KAERI)
✉ Corresponding author: snyu@kaeri.re.kr, Tel: 042-868-4502

manuscript received: 2011.9.21 / Revised: 2012.1.11 / Accepted: 2012.1.14

In this study, it is performed that the assessment of feasibility of developed material processing facilities using tele-operation manipulator system for the pyroprocessing. To evaluate the performance of developed facilities using tele-operation system, several performance indices are considered as remote visibility, remote reachability and remote manipulability. These are applied to RHEM (Remote Handling Evaluation Mock-up) and digital mock-up system respectively. Through this approaches, several requirements for the system improvement are deduced and preliminary inspection for real system application is fully performed. Additionally, assembly and disassembly tasks for the repair of remote handling system are also examined remotely in RHEM and evaluated those performances.

Key Words: Tele-operation System (원격조작 시스템), Pyroprocess (파이로공정), Digital Mock-up Test (디지털모ック 평가)

1. 서론

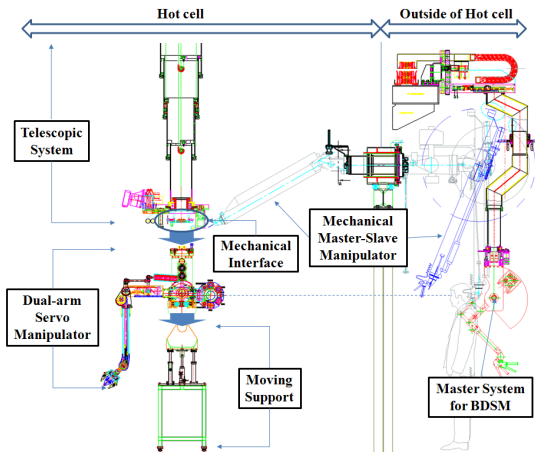
현재, 원자력발전 시 파생되는 사용 후 연료를 처리할 수 있는 기술은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 하나는 직접 지하에 처분하는 방법이며, 또 하나는 사용후 연료의 처리를 통한 재활용이다. 직접 처분하는 경우 사용후 연료로부터 발생하는 열로 인하여 많은 처분장 면적이 필요하다는 단점이 있는 것에 반해, 사용후 연료를 처리하고 재활용 할 경우에는 처분장 면적을 결정하는 고방열 핵종을 분리하여 별도 관리함으로써, 처분장 면적을 줄일 수 있으며 타지 않는 우라늄 및 초우라늄 원소를 재활용하여 자원 활용률을 크게 증가시킬 수 있다.¹ 이와 같은 사용후 연료 재활용 기술의 하나인 파이로 기술과 관련한 공정 프로세스(Pyroprocessing)를 안정적으로 수행하기 위해서는 외부로부터 격리된 인 공간인 셀(Cell) 내부 공정

장치들에 대한 원격취급기술이 필수적으로 수반되어야 한다. 지금까지 방사선 환경에서의 원격 취급 기술과 관련하여 다양한 조작기들이 개발되어 왔으며, 이와 관련된 제반 시스템 및 운용기술은 방사선 작업자의 피폭을 감소시키고 작업의 신뢰성을 높일 수 있는 기술로 인식되어 왔다.²⁻⁵ 최근에는 이러한 원격취급 기술은 노후 시설 해체, 사용후 연료 및 방사성폐기물 관리, 원전 노심 유지 보수 등 원자력 분야뿐만 아니라 극한 환경 (해양, 우주, 국방 등) 다양한 분야에 크게 기여할 수 있는 기술로 인정받고 있으며, 그 중에서도 핵심기술은 조작기의 원격 운전 및 유지 보수와 밀접하게 연관되어 있다.

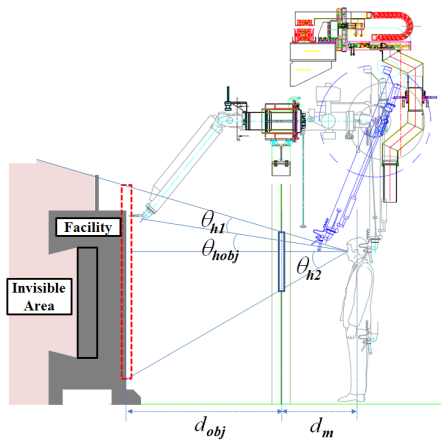
본 연구에서는 사용후 연료의 처리방식의 일종인 파이로 프로세스의 공학규모 일관공정 시설로 구성된 PRIDE (PyRoprocess Integrated Inactive Demonstration) 셀 공간 내에서 다양한 공정장치의

운전 보조 및 시스템 유지 보수를 수행할 수 있는 원격조작기 시스템을 통해 공정장치의 원격취급성을 평가하고자 한다. 아울러, 원격조작기 자체의 유지 보수성을 검증하기 위해 원격조작기 시스템 분리 및 결합작업을 모사함으로써, PRIDE 실비 셀 내부에서의 시스템의 원격 유지 보수성도 함께 논하고자 한다.

2. 시스템 구성



(a) Remote handling system for the PRIDE facility



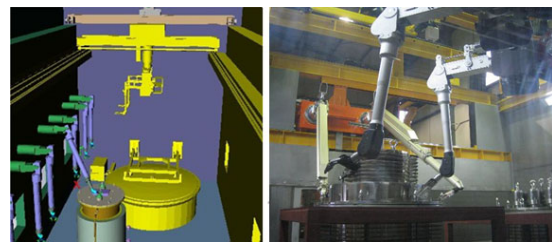
(b) Visible area of the designed remote handling system

Fig. 1 Overview of the bridge-transported dual-arm servo manipulators (BDSM) and mechanical master-slave manipulator (MSM) system

전세계적으로 방사성 물질 취급과 관련한 원격조작기 시스템은 크게 기계식 마스터-슬레이브 조작기 및 서보식 조작기의 2 가지 형태로 개발이

되어 왔으며, 본 연구에서 대상으로 하는 시설 역시 파이로 일관공정 시험시설인 PRIDE 의 작업조건을 기준으로, 벽 부착형 기계식 마스터-슬레이브 시스템 및 전동식 서보형 마스터-슬레이브 시스템이 조합된 타입이다.^{6,7} 본 연구에서는 기계식조작기를 이용하여 셀 내부의 각종 공정장치에 대한 접근성 및 작업성을 평가하였으며, 기계식조작기와 양팔 서보조작기를 조합하여 이들의 협업 성능 및 서보조작기의 원격 탈부착 작업 등을 통한 작업성을 평가하였다.

천정이동 양팔 서보조작기(BDSM, Bridge-transported Dual-arm Servo Manipulators)는 한팔 6 자유도, 양팔 합계 총 12 자유도로 구성되어 있으며, 신축형 튜브를 통해 천정이동장치와 연결되어 있다. 기계식조작기(MSM, Mechanical Master-Slave Manipulator)의 경우에도 한팔 6 자유도의 양팔 합계 총 12 자유도 시스템이 1 set 로 구성되어 있다. 양팔 서보조작기는 천정이동장치를 통하여 PRIDE 내부 공간을 이동할 수 있으며, 목표 지점에 위치한 후에는 양팔 서보조작기의 자체 자유도를 활용하여 작업을 수행한다. 본 시스템의 조작은 PRIDE 셀 외부에 위치한 작업자에 의해 원격으로 이루어진다. (Fig. 1)



(a) Digital Mock-up (b) Evaluation Mock-up

Fig. 2 Mock-up system for the assessment of facilities

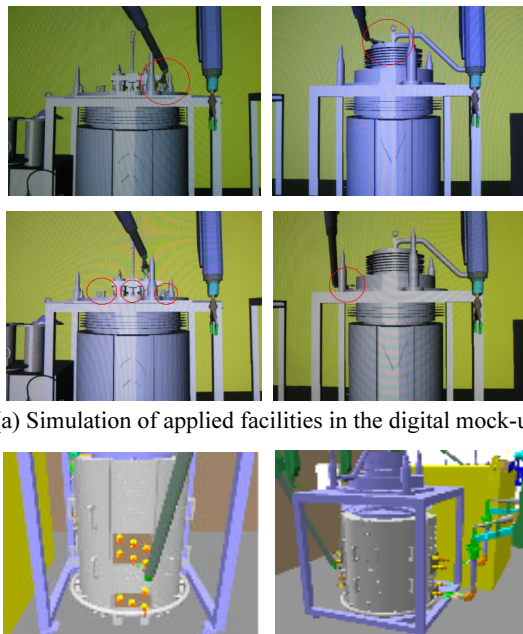
특히 양팔 서보조작기는 지속적인 운전을 거치면서 정기/비정기적인 유지보수 상황이 발생하며, 이때 해당 시스템의 분리 및 교체 역시 원격으로 이루어지게 된다.

3. 공정장치 원격 취급성 평가

본 연구에서는 공정 셀 외부를 기준으로 조작자를 통한 원격 가시성, 원격 접근성, 원격 조작성의 세 가지 성능을 종합적으로 평가하였다. 먼저 원격 가시성의 경우, Fig. 1(b)와 같이 셀 외부의 기

준 위치에서 조작자의 시각으로 취득되는 셀 내부의 시야범위 및 공정장치 각 부위에 대한 시야확보 여부를 의미하며, 작업창으로부터 조작자까지의 거리 d_m , 조작자의 눈높이 h_m 및 작업창으로부터 셀 내부의 공정장치까지의 거리 d_{obj} 를 구하면, 작업 면적을 기준으로 한 비례식을 통해 간단하게 작업자의 셀 내부에 대한 시야 면적 S 를 구할 수 있다. (그림 1 참조) 이러한 작업자의 눈높이 좌표 및 시야 범위를 디지털 목업 (Digital Mock-up, Fig. 2(a))에 적용하면 시뮬레이션을 통해 각 공정장치별 원격가시성을 평가할 수 있다.

Fig. 3(a)는 $d_m=300mm$, $h_m=1600mm$, $d_{obj}=1200mm$ 를 기준으로 하였을 때, PRIDE의 외부에서 조작창을 통해 확보할 수 있는 공정장치의 원격가시성을 예시하고 있다. Fig. 3(b)는 공정장치와 결합되는 주변장치들에 대한 원격 접근성을 나타내고 있다.



(a) Simulation of applied facilities in the digital mock-up

(b) Remote handling performance of utility systems of applied facilities

Fig. 3 Simulation of visibility and reachability for applied facilities in the digital mock-up system

원격 가시성 측면에서는 일반 성인 남성의 신장을 고려할 때, Fig. 3(a)에 표시된 부분과 같이 전고가 높은 장치의 상부 및 상부 후면, 장치 전면부의 돌출부에 가려진 부분은 시야확보가 곤란함

을 알 수 있었다. 원격 접근성 측면에서는 작업자의 시야가 확보되는 영역은 대부분 원격 조작기를 통해 접근이 가능하였으나, 주변 장치와의 간섭으로 인해 조작기의 전체 작업영역을 효과적으로 활용할 수 없음을 확인하였다. 또한 공정장치 거치대를 기점으로 한 공정장치 하부에 대한 접근성의 경우에는 다소 제약이 있는 것으로 파악되었다. 이는 기계식 조작기의 팔꿈치 관절의 구조적 특성 (Prismatic Joint)으로 인하여 Fig. 4와 같이 일부 영역에 대해서는 조작기의 자유도에 제약이 있음을 의미한다. 결국 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 작업영역을 상호 보완하여 운용되는 MSM 및 BDSM의 효과적인 협업이 중요함을 확인할 수 있었다. 실제 실험에 앞선 시뮬레이션을 통하여 확보되는 위와 같은 평가결과들은 공정장치에 대한 원격 접근성 측면에서의 시스템 개선에 중요한 정보로 활용될 수 있다.

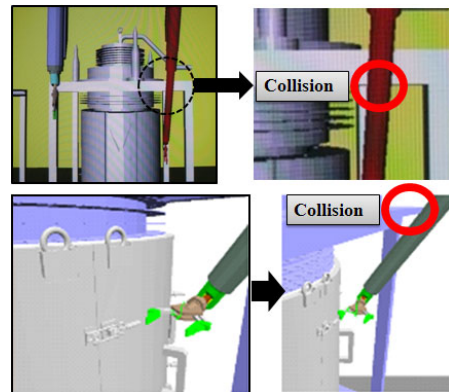
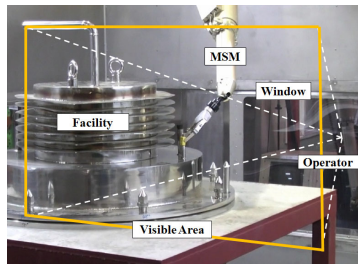
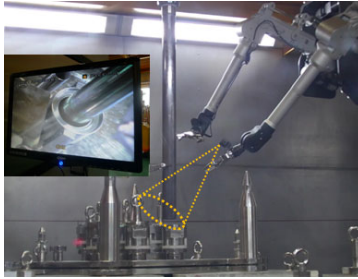


Fig. 4 Collision detection test between the manipulator and obstacles using the digital mock-up system

최종적으로 원격 조작성의 경우에는 해당 공정장비들을 검증용 목업 (Fig. 2(b))에 설치한 뒤, 기계식 조작기를 직접 조작하면서 작업 성능을 테스트하였다. 본 테스트를 위해서는 충분한 시야확보가 중요한 요소이며 Fig. 5(a)와 같이 조작자가 셀 외부에서 셀 내부의 공정장치를 바라볼 경우, 장치의 일부만을 육안으로 확인할 수 있기 때문에 이를 보완하기 위해 셀 내부 시설 및 조작기에 별도로 설치된 보조카메라들을 활용하였다. (Fig. 5(b)) 결과적으로 셀 외부의 작업자는 작업창 및 보조카메라를 병용하여 작업에 필요한 영상정보들을 모두 획득할 수 있었다.

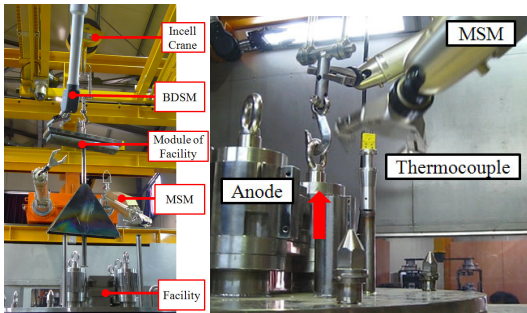


(a) Visible area of operator through a window

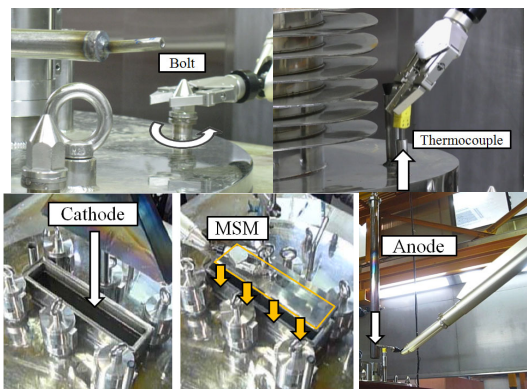


(b) Camera system attached on the gripper of BDSM

Fig. 5 Remote handling test through the window and additional camera of BDSM



(a) Components for remote handling system of evaluation mock-up and primary parts of target facility



(b) Remote handling Test of facility

Fig. 6 Performed experiments in the evaluation mock-up

Fig. 6(a)는 공정장치 원격 취급을 위한 기본 구성요소 및 실험대상 공정장치를, Fig. 6(b)는 원격조작기를 통한 공정장치의 기본 성능테스트 장면을 각각 도시하고 있다.

Table 1 은 검증용 목업에서 평가한 공정장치들의 실험결과 일부를 나타내고 있다. 전술한 바와 같이 장치 상부 및 상부 후면의 경우 접근성은 양호하나, 조작자의 시각을 기준으로 하였을 때 가시성이 떨어짐으로 인하여 작업 난이도가 높았으며 MSM 또는 BDSM 과 크레인의 협업이 필요하였다. 장치 하부의 경우, 원격 가시성은 양호하나 시뮬레이션에서 도출된 결과와 같이, 장치의 접근성이 떨어졌다. 이와 같이, 디지털 목업 및 검증용 목업을 통해 원격 취급성을 종합적으로 판단할 수 있으며, 실험결과는 공정장치 시스템 개선에 직접적으로 활용될 수 있다.

Table 1 Experimental results of remote handling task

Tasks	Position in the target facility (from the window)	Test Result
1 Separation of thermocouple	Upper & Front part	Possible
2 Tighten/Release a Bolt	Upper & Front/Side/ Rear part	Possible (Front/Side) & Impossible (Rear)
3 Put in/out a electrode	Upper & Middle part	Possible with a In-cell crane
4 Put in/Pull out a Heater Plug	Lower part	Position moving is required

4. 원격조작기 유지보수성 평가

4.1 작업 시나리오 구성

전 절에서 논한 바와 같이, 원격조작기는 PRIDE 내부의 공정장치들에 대한 운전 및 유지보수를 위해 운용된다. 하지만, 이들 원격조작기 자체도 -서론에서 논한 바와 같이- 정기/비정기적인 시스템 유지보수를 필요로 한다. 따라서 원격취급과 관련된 기술은 셀 내부에 설치된 공정장치들의 원격취급기술 및 공정장비 자체에 대한 원격 유지보수 기술을 동시에 요구한다.

본 연구에서 제시된 서보조작기 시스템의 유지보수를 위해서는 천정이동장치말단부의 회전판에

부착되어있는 양팔 서보조작기를 분리하여 셀 외부로 반출하여야 한다. 남은 천정이동장치의 경우에는, 상부 거더(Girder)에 부착된 트롤리-천정이동장치-회전판 일체를 한꺼번에 반출하여 유지보수할 수 있다.⁸ 본 절에서는 셀 내부에서 운용되는 서보조작기 Arm 의 개별적인 원격 분리 및 결합 실험을 통해서 본 작업과 관련한 방법론을 검증하고 작업자 별 소요시간을 분석하여, 시스템의 원격 유지보수성을 고찰하고자 한다. 전 절에서 논의된 기본 구성요소들을 기반으로 양팔 서보조작기의 원격 분리작업 시나리오를 Fig. 7 과 같이 구성하였다. MSM, 천정이동장치 및 인양기구는 개별적으로 복수의 작업자가 운용하거나, 한 명의 작업자가 각 장치를 순차적으로 조작할 수도 있다.

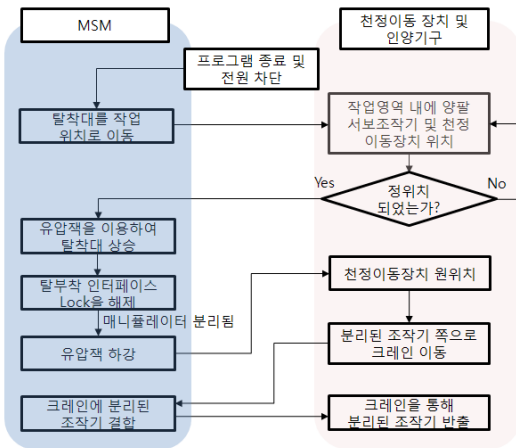


Fig. 7 Designed scenario for a manipulator disassembly task based on a MSM and lifting tool

4.2 조작기의 원격 분리/결합 실험

Fig. 8 은 위의 시나리오를 기반으로 검증 목업 내부에서 수행된 양팔 서보조작기의 원격 교체작업을 도시하고 있으며, 작업 시나리오에 더하여 MSM 및 BDSM 의 유기적인 협업이 요구됨을 실험을 통해 확인할 수 있었다. Fig. 9 는 Fig. 8 에 도시한 MSM 기반 BDSM 원격 분리 실험을 동일조건으로 각각 5 회씩 수행한 3 명의 작업자의 작업 구간별 평균 작업시간에 대한 측정결과를 나타내고 있다. 결과 그래프에 도시된 바와 같이, 유압 작키를 MSM 으로 직접 상승시키는 ‘탈착대 상승’ 과 같이 많은 시간과 반복작업이 요구되는 작업 구간 및 높은 위치에서 원격 조작기 말단부의 많은 자유도를 사용해야 하는 ‘탈부착 장치 회전’과 같은 작업 구

간과 관련한 작업효율 개선이 필요함을 확인하였다.

물론 작업시간 측정의 경우, 조작기의 자세 및 셀 내부에서의 장비 배치 등에 따라 결과는 달라질 수 있다. 하지만 본 논문에서 제시한 작업시간 측정결과는, 동일한 조건의 작업을 수행한 다수의 작업자를 통해 그들간에 공통적으로 발생하는 단위 작업간의 시간 지연요소를 추출하고 이를 개선하는데 그 목적과 의미가 있다고 할 수 있다.

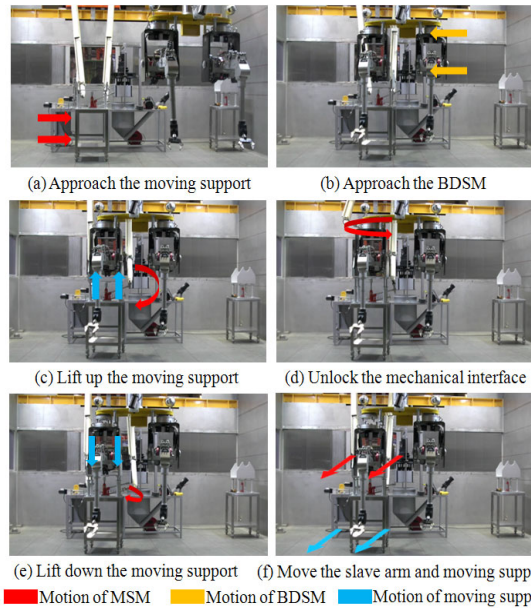


Fig. 8 Experiment of a manipulator disassembly task

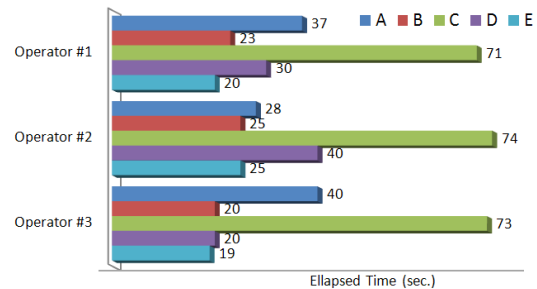


Fig. 9 Elapsed time for each task of manipulator disassembly performed by three subjects (Average time of five trials per one operator, A: Approaching the slave arm and moving support, B: Approaching the BDSM toward a MSM, C: Lift up the slave arm and moving support, D: Lock the mechanical interface, E: Remove the BDSM of moving support)

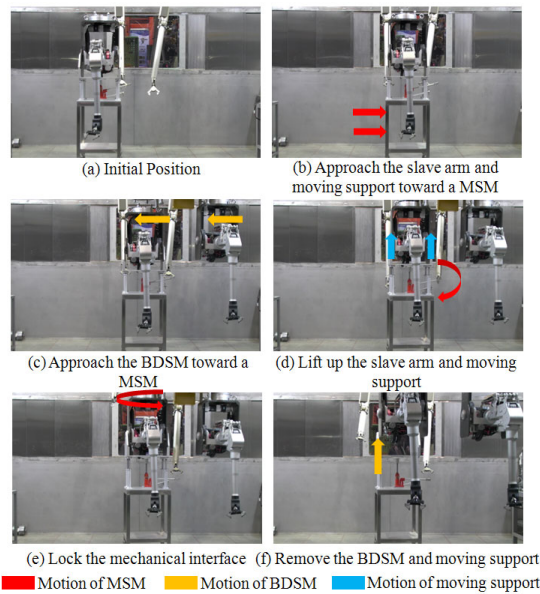


Fig. 10 Experiment of a manipulator assembly task

Fig. 10 은 MSM 을 통한 BDSM 의 원격 결합 실험을 단계별로 묘사하고 있으며, Fig. 11 은 이러한 BDSM 결합실험을 BDSM 분리실험과 동일한 조건으로 5 회 수행한 작업자의 구간별 평균 작업 시간을 나타내고 있다. 조작기 원격 결합작업의 경우에도 원격 분리작업과 유사한 경향을 나타냄을 확인할 수 있었으며, Fig. 11 의 결과에서 확인할 수 있듯이 슬레이브 암의 탈착대 상승 및 탈부착 장치 회전 잠금장치 조작 등에 많은 시간이 소모되었다.

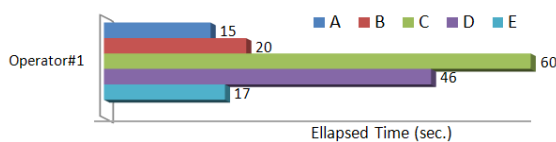


Fig. 11 Elapsed time for each task of manipulator assembly performed by one subject (Average time of five trials of one operator, A: Approach the slave arm and moving support toward a MSM, B: Approach the mechanical interface, C: Lift up the slave arm and moving support, D: lock the mechanical, E: Remove the BDSM and moving support)

5. 결론

본 연구에서는 파이로 공정장치를 운용할 수

있는 PRDIE 셀을 모사한 목업 공간 내에서 공정 장치의 운전 보조 및 유지 보수를 수행할 수 있는 원격조작기 시스템을 통해 각 장치의 원격 취급성을 평가하였다. 먼저, 셀 내에서 운용되는 공정장치를 대상으로 원격 가시성 및 접근성을 평가하였으며, 디지털 목업을 통해 원격 가시성 및 접근성을, 검증용 목업을 통해 원격 가시성 및 작업성을 평가하였다. 아울러 원격조작기 자체의 유지보수를 위한 시스템 원격 분리 및 결합작업을 모사해 봄으로써, 현재 구현되어있는 원격조작기 관련 보조 장비 및 작업 프로세스의 검증과 함께, 단위 작업별 개선안을 도출할 수 있었다. 원격장치를 통해 고하중의 공정장치를 핸들링 하는 작업은 높은 수준의 조작 정밀도를 요구한다. 본 논문에서 제시한 실험결과는 그 중 MSM 을 통한 조작성만을 제시하였으며, 향후에는 BDSM 및 기타 원격조작기를 종합하여 다양한 원격조작 작업에 대한 평가를 실시할 것이다. 아울러, 본 연구에서 활용된 시스템들을 토대로 하여 디지털 목업을 통한 공정 장치 사전평가→ 시스템 1 차 개선→검증용 목업을 통한 공정장치 검증 및 평가→시스템 2 차 개선→검증용 목업을 통한 공정장치 최종 검증'의 순서로 각각의 목업을 유기적으로 활용함으로써 공정 시스템의 완성도를 효과적으로 향상시키는 데에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

참고문헌

1. Lee, H. S., "Development of Pyroprocessing Technology," Magazine of Nuclear Industry, Vol. 313, No. 3-4, pp. 91-117, 2009.
2. Drotning, W., Kimberly, H., Wapman, W., Darras, D., Homan, D., Johnson, P., Kast, B., Kuhlmann, J., Lennox, R. C. and Montoya, C., "A Sensor-Based Automation System for Handling Nuclear Materials," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 352-358, 1997.
3. Pittman, P. C., Roybal, J. E., Durrer, R. E. and Gordon, D. J., "Material Handling for the Los

- Alamos National Laboratory Nuclear Storage Facility,” Proceedings of the Eighth ANS Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, 1999.
4. Turner, C. J., Harden, T. A. and Lloyd, J. A., “Robotics in Nuclear Materials Processing at LANL : Capabilities and Needs,” ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE2009), pp. 701-710, 2009.
 5. Phillips, C., Houghton, D. and Crawford, G., “The Use of Transportable Processing Systems for the Treatment of Radioactive Nuclear Wastes,” The 34th Annual Waste Management Conference & Exhibition, 2008.
 6. Kim, S. H., Park, H. S., Lee, H. J., Choi, C. W. and Park, B. S., “Analysis of the Remote Operation in a Digital Mockup of the Advanced Spent Fuel Conditioning Process,” International Conference on Smart Manufacturing Application, pp. 530-533, 2008.
 7. Yu, S. N., Kim, S. H., Lee, H. J., Lee, J. K., Park, B. S. and Kim, K. H., “Assessment of Remote Handling Tasks for Pyroprocessing Equipment,” Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 515-516, 2011.
 8. Park, B. S., Lee, H. J., Lee, J. K., Yu, S. N., Kim, K. H. and Lee, H. D., “Modular Design of Bridge transported Dual arm Servo-Manipulator for PRIDE facility,” Korean Radioactive Waste Society Annual Spring Conference, pp. 153-154, 2011.