

조사재시험시설(IMEF)내 DUPIC과제를 위한 격리실 개조 및 글로브 박스 개발

Refurbishment of Isolation Room and Development of Glove Box for the
DUPIC Project in IMEF

백상열, 박장진, 이호희, 홍권표, 양명승, 민덕기

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

경·중수로 연계 핵연료(DUPIC : Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU Reactors)의 연구 개발을 위해서는 고방사성 차폐시설이 필요하다. 한국원자력연구소의 조사재시험시설(IMEF : Irradiated Material Examination Facility)은 고방사성 차폐시설이며 그중 M6 핫셀을 이용하여 사용후 PWR 핵연료를 재 가공하여 중수로 핵연료로 다시 사용하는 연구 개발이 원격으로 수행 중에 있다. 이를 위하여 핫셀 내에는 여러 가지 시험장비들이 설치, 운영되고 있다. 높은 방사성 오염으로 인하여 셀 내로의 접근이 불가능하므로, 이런 장비들의 고장 시에는 일정 수준으로 오염 후 M6 핫셀 위에 설치되어 있는 새롭게 개조된 격리실(Isolation Room)과 서비스 구역에 위치한 새로 개발한 글로브 박스(Glove Box)를 이용하여 유지 보수를 할 수 있도록 하였다. 격리실은 벽면에 납판과 납유리를 설치하여 차폐성을 높여주었고, 핫셀 Roof Door를 원격으로 개폐 할 수 있게 하였으며, 장비의 유지 보수를 위한 작업대 등을 제작 설치하였다. 글로브 박스는 핫셀 내 고장난 장비를 Rear Door를 통하여 용이하게 인출 후 유지 보수 할 수 있도록 제작하였다.

Abstract

To perform R&D of DUPIC (Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU Reactors), the high-radioactive shielding facility is necessary. IMEF(Irradiated Material Examination Facility) in KAERI has the high-radioactive shielding facility and some R&D such that the spent PWR fuel can be burned again in a PHWR by direct re-fabrication into CANDU-compatible DUPIC fuel bundles, is being carried out using the manipulator attached to the hotcell-M6. Although many testing equipment are located and are being operated in hotcell, it is not possible to work personally inside the hotcell due to the high radioactive contaminant. When they are out of order, the cleaned one can be maintained and repaired using the renovated isolation room located over the hotcell-M6 and the new devised glove box located at service area. Some lead-sheets and the lead glasses were fixed on the wall of the isolation room to improve the shielding capability and the roof door of hotcell-M6 can be open remotely. To maintain and repair the equipment of hotcell, a working desk was constructed in the isolation room. The glove box was also made to withdraw the disordered equipment of hotcell through the rear door.

1. 서론

한국원자력연구소는 캐나다, 미국 및 IAEA의 협력하에 경·중수로 연계핵연료(DUPIC : Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU Reactor) 기술에 관한 국제 공동연구를 수행하고 있다. 실제 사용후핵연료를 사용한 시험은 조사재시험시설(IMEF)의 M6 핫셀을 이용하여 2000년 1월부터 착수하여, 점차 사용량을 늘려 2006년까지 약 200 kg을 사용할 예정이다. [1]

조사재시험시설의 M6 핫셀은 원래 소량의 고연소도 핵연료의 재료시험을 위해 건설된 핫셀로서 DUPIC 핵연료의 제조시험에 사용될 경우에는 취급하는 핵물질, 취급공정 및 시험장치의 특성에 적합하도록 시설과 장치를 개·보수하여야 한다. 특히 시험장치를 고방사성 환경에서 장기간 안전하고 효율적으로 운영하기 위해서는 유지보수 개념을 확립하고, 유지보수 시설 및 장치를 확보하는 것이 필수적이다. 오염정도를 고려하여 M6 핫셀을 M6a 및 M6b로 분리하고, 오염이 심한 M6a 핫셀에 설치된 시험장치는 격리실을 활용하여 유지보수를 수행하고, 오염이 비교적 덜한 M6b 핫셀에 설치된 시험장치는 이동형 글러브박스를 활용하여 유지보수하기로 결정하였다.

이 논문에는 M6a 핫셀에 설치된 시험장비의 유지보수에 활용하는 격리실의 개·보수내용과 M6b 핫셀에 설치된 시험장비의 유지보수에 활용하는 이동형 글러브박스 개발에 관해 기술한다.

2. 핫셀 장비 유지보수용 격리실 개·보수

기존 M6a 핫셀 위의 격리실을 보완하여, 내부 양측 면과 전면에 30 mm의 납판을 설치하고, 제염이 용이하도록 하였다. 내부의 시야 확보를 위해서 좌측면 1 개소와 전면 3 개소에 납유리를 설치하고, 납유리 아래쪽으로 Glove가 설치되어 원거리에서 장치 등의 분해조립 등 보수가 용이하도록 설계, 보완하였다. 이중문을 보완하여 밀폐되게 하였다.

Roof Door의 개폐를 위하여 Roof Door Automatic Tool을 제작 설치하였으며, 수리 및 개·보수를 위해 중량물의 취급을 용이하도록 작업대를 설치하여 전기에 의한 상하구동 및 정·역회전이 되도록 하였다. 그밖에 폐기물의 수거를 위하여 용기 접속부를 설치하였다. 격리실 개조를 위한 개략도는 그림 1과 같다. [2]

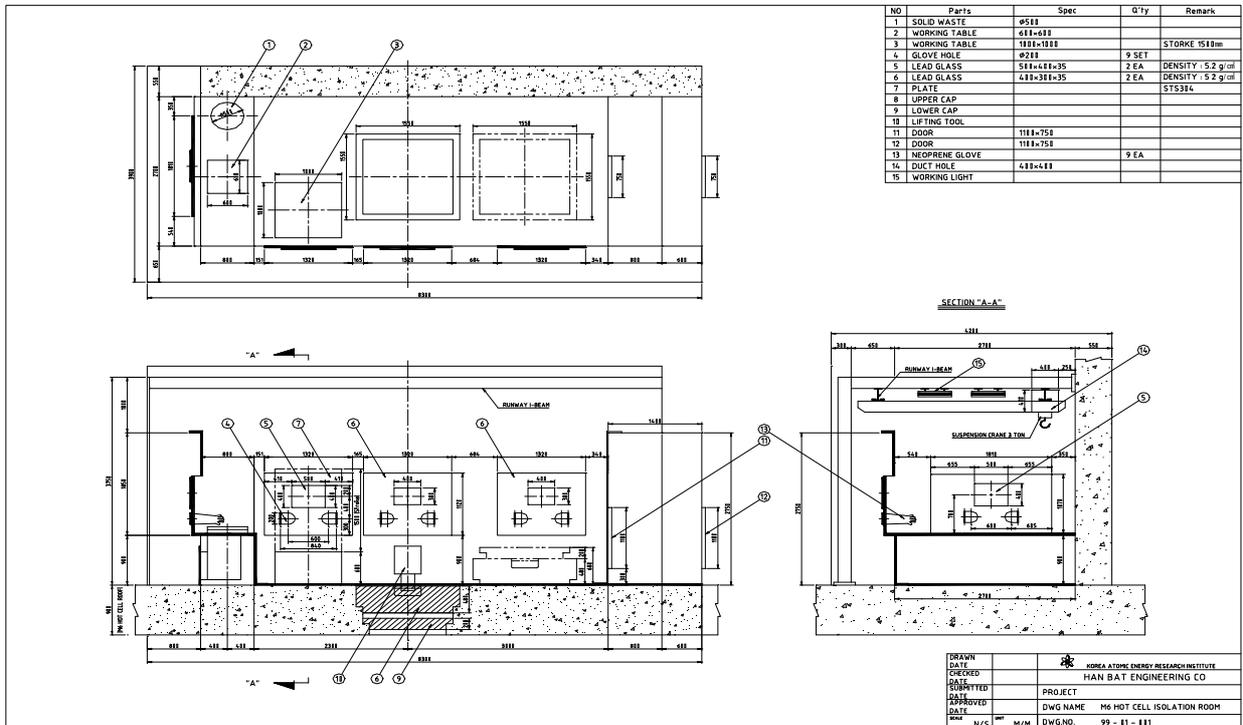


그림 1 M6 핫셀 격리실 개조도.

가. 장치별 세부 설계사양

(1) 차폐벽(Shielding Wall)

DUPIC 핵연료 개발과 관련하여 장비의 유지보수에 이용 될 격리실의 차폐 설계기준은, 제조장비의 구조 복잡성과 오염관리 장비의 성능 등을 고려하여 사용후 PWR 핵연료 1/100 펠렛으로 협의 결정하였다. 실제 사용하기로 된 핵연료 사양은, 고리 1호기 연료 집합체(G23), 14X14 타입, 4주기 연소, 연소도 35,000 MWD/MTU로서 1986년 인출되어 1990년 5월에 PIEF(Post Irradiation Examination Facility) Pool로 이송된 것이다.

벽면으로부터 직경 50cm 실린더로 높이 50cm만큼 선원이 분포 오염되었다고 가정 시, Mshield 프로그램으로 계산한 결과는 납판을 30mm 두께로 설치했을 때 시설의 운전기준인 15 mrem/h이하로 계산되었다. 즉, 벽면에서는 6.0 mrem/h, 납유리에서는 6.6 mrem/h로 계산되어 기준범위 내에 들었다.

따라서, 방사선 차폐를 위한 차폐벽은 기존의 6mm 철판 위에 두께 30mm의 납판을 설치하였고, room의 전면과 양측면을 차폐하도록 하였다. 그 위에 6mm두께의 STS 304 plate로 lining하여 납유리 및 gloves 등이 설치되도록 하였으며, 뒷면은 스테인레스 3mm의 강판으로 lining하여 기밀이 유지되도록 하였다. 아울러 기존의 아크릴판(2700mm x 1200mm x 1 EA, 1320mm x 1200mm 3 EA)을 제거하고 납유리 및 gloves를 설치하였다. 차폐벽은 납판의 연결부를 보강토록 하여, 연결부가 겹쳐서 관통되지 않도록 하였으며 볼트의 연결부분 등의 설계에도 차폐성능이 보장되도록 하였다.

(2) 납유리(Lead Glass)

Room에서 각종 작업 수행시 시계확보 및 방사선으로부터 피폭을 방지하기 위해서 전면 3개소, 좌측면 1개소에 납유리가 설치되었다. 납유리의 제원은 전면 1곳과 좌측면 1곳은 L 500mm x W 400mm x T 35mm를 각각 2 장씩 겹쳐 사용하였으며, 나머지 2 곳은 L 400mm x W 300mm x T 35mm를 역시 2장씩 겹쳐 사용하였다. 납유리의 프레임(frame)과 차폐벽 사이는 틈을 최소화하고 설치 후 분리되지 않도록 볼트로 견고히 고정하였다. 납유리의 사양은 density: 5.2 g/cm³, flatness: ≤3pm/100mm diameter 등이다.

(3) Roof Door 자동 개폐 틀

M6 핫셀 위에는 2 단의 roof door가 설치되어 있으며, 핫셀 내부에 설치되어 있는 장치 등의 유지보수 또는 개·보수를 위하여는 고준위 사용후핵연료와 격리시켜야 한다. 이때 오염된 각종 장치 등은 roof door를 통하여 핫셀 상부로 올려 각종 작업이 이루어지므로, 작업자의 방사선 피폭을 방지하기 위하여 원거리에서 자동 시스템으로 roof door(W1550mm x L800mm x H480mm)를 locking 및 unlocking하여 개폐하도록 하였다. 제 2 단계의 roof door(W1550mm x L1550mm x H220mm)도 제 1 단계의 door와 같은 방법으로 개폐 되도록 하였다.

문의 무게가 약 2800 kg이므로 틀은 4000kg의 하중에 견딜 수 있도록 설계 제작하였으며, 기존의 크레인에 체결이 용이하도록 하였다. 각 구동부는 자바라를 부착하여 방사성물질로부터 오염되지 않는 구조로 하고, 모든 소재는 STS304를 사용하였다. 용접부는 TIG welding 하였으며 모든 용접부는 산 처리후 pickling 처리하였다. 틀의 운전은 전기적으로 조절되도록 하였으며, 기능 및 성능은 성능 시험을 통하여 입증하였다.

(4) Working Table

고준위에 오염된 각종 장치들 중 제원이 크고 중량물인 장치를 유지보수하는 Base Working Table은 큰 하중에 견딜 수 있어야 하며, 제한된 작업공간 및 시야를 통하여 작업이 이루어져야 하므로 table의 크기는 W1000mm x L1000mm x H600mm 로 하였다. 또한 상하구동 및 회전이 되어야 하며 상하 stroke은 500mm이고, 회전각도는 360 ° 정·역 구동이 되도록 하였다. 장치의 각종 구동은 전기 control 되도록 하며, 각 구동부는 자바라를 설치하여 방사성물질로부터 오염을 방지하도록 하였다. 모든 소재는 구동 부의 일부 부품을 제외하고 STS304를 사용하였다. 용접은 TIG welding 하였고, STS 304L f 2.0

용접봉을 사용하였으며, 모든 용접부는 산처리 후 pickling 하였다. Table 위에는 중량물의 하중에 충분히 견딜 수 있는 구조가 되도록 밑면에 support를 설치하였으며, bearing(NSK) #51160을 사용하여 상하 구동 및 정·역회전이 원활하도록 cross-roll bearing(IKO)을 사용하였다.

Room의 bench에 설치되는 Bench Working Table의 크기는 W600mm x L600mm x H300mm로 하였고, table위에서 고준위에 오염된 핫셀 장비 및 부품 등을 제한된 공간과 시야를 확보하여 작업이 이루어지도록 하였다. 따라서 table이 정·역회전하도록 하였으며, 장치의 제작 사양은 base working table과 같다. Working Table의 사진은 그림 2와 같다



그림 2 Working Table 사진.

(5) 고체폐기물 용기(Solid Waste Container) 접속부 및 기타 설비

각종 작업 수행시 발생하는 방사성폐기물을 분리 수거할 수 있도록 기존의 위치에 고체폐기물을 수집할 수 있도록 시스템을 구성하였고, 스테인레스 강판으로 제작된 용기를 설치하였으며 설치부 밑 부분은 차폐벽과 동일한 조건으로 차폐벽을 설치하여 근접하지 못하도록 하였다.

격리실에는 1100mm x 750mm의 문이 2 개가 설치되어 있다. 이는 오염된 공기의 확산방지 및 일정한 부압을 유지하기 위한 에어록(air-lock)으로 기존의 문에 30mm의 납판을 부착시키고 그 위에 STS304 6mm의 plate를 부착시킨 후, neoprene gasket을 부착시켜 기밀이 유지되도록 하였다. 문에 시건 장치를 부착하고, 모든 표면은 오염 물질의 제염이 용이하도록 buffing 하였다.

Room의 전면에 3 쌍, 좌측면의 bench부에 1쌍의 글로브가 설치되어 각종작업을 수행함으로써 방사선 피폭을 최소화하였다. 글로브를 사용하지 않을 때에는 글로브 부분을 차폐할 수 있도록 제작 설치하였으며, 글로브 차폐부는 내부 3mm 외부 6mm의 STS304 plate를 사용하였고 내부는 15mm의 lead plate를 사용하였으며 최종 후 처리는 pickling하였다.

Room의 바닥은 스테인레스 3mm 강판으로 lining 하였고, 용접부 및 표면은 산처리 후 polishing 하여

방사성물질의 제염이 용이하도록 하였다.

각종 툴을 취급할 수 있도록 Tong을 전면부에 설치하였다.

나. 격리실 개·보수 결과

격리실의 각 장비를 제작 설치 후 기능에 대한 시험을 실시하였으며, 차폐벽과 납유리에 대한 차폐성능 검사를 실시하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 차폐벽의 차폐성능은 현장 성능시험을 통하여 입증하였다. 차폐벽의 선량 측정을 위하여 3면의 벽을 가로 세로 50cm의 구역으로 나누어서 표시 후 측정하였다. 납유리의 경우는 최종 설치 후에 각 차폐창 별로 가로 세로 10cm로 나누어서 측정하였다. 또한 납유리와 차폐벽 사이에 대해서도 측정을 실시하였다.

(1) ISOLATION ROOM 차폐벽 선량측정 이론식

(가) ISOLATION ROOM 자체 차폐

- 납 : 30mm
- STEEL : 12mm

(나) Collimator 차폐

- 납 : 20mm
- STEEL : 2mm

(다) TOTAL 차폐

- 납 : 50mm
- STEEL : 14mm

(라) 반가층

- 납 : 6mm
- STEEL : 13mm

(마) Ir-192 강도 : 5.8 Ci(1999년 6월 9일 기준)

(바) 이론식 및 선량율

이론식에 의하여 표 1의 결과를 얻었다

$$\frac{0.48 \text{ mR/hr} \times 1\text{m} \times 5.8\text{Ci}}{(\text{거리})^2} \times e^{-0.693(\frac{50}{6} + \frac{14}{13})} \times 1000$$

표 1. 이론식에 의한 선량율 계산 결과(차폐벽)

* 거리에 따른 선량율	
1m	4.097 mR/h
1.5m	1.821 mR/h
2m	1.024 mR/h

(2) 차폐벽 각 POINT별 실제 선량율 측정결과

측정결과 세 벽면 모두 만족할 만한 결과를 얻었으며 그 중에 북쪽 벽면의 결과는 표 2와 같다. 선량율의 단위는 mR/h 이다.

표 2. 북쪽 벽면 선량 측정 결과

POINT	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-3
선량율	1.51	1.56	1.35	1.54	1.52	1.42	1.34	1.57	1.3	1.19	1.13	1.12	15.7
POINT	3-4	3-5	4-1	1-2	4-3	4-4	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	5-5	
선량율	1.41	1.35	1.27	1.36	1.37	1.53	1.27	0.95	0.83	0.67	0.21	0.24	

(3) ISOLATION ROOM WINDOW 선량측정 이론식

(가) ISOLATION ROOM WINDOW 자체 차폐

- 납유리 : 70mm

(나) Collimator 차폐

- 납 : 20mm

- STEEL : 2mm

(다) TOTAL 차폐

- 납유리 : 70mm

- 납 : 20mm

- STEEL : 2mm

(라) 반가층

- 납 : 6mm

- STEEL : 13mm

- 납밀도 : · 납밀도 : 11.34, 납유리 밀도 : 5.2

$$\cdot \text{납유리 반가층} \frac{11.34}{5.2} \times 6 = 13\text{mm}$$

(마) Ir-192 강도 : 8.7 Ci(2000년 1월 18일 기준)

(바) 이론식 및 선량율

이론식에 의하여 표 3의 결과를 얻었다

$$\frac{0.48 \text{ mR/hr} \times 1\text{m} \times 8.7\text{Ci}}{(\text{거리})^2} \times e^{-0.693\left(\frac{20}{6} + \frac{70+2}{13}\right)} \times 1000$$

표 3. 이론식에 의한 선량율 계산 결과(납유리)

* 거리에 따른 선량율	
0.5m	35.704 mR/hr
1m	8.926 mR/hr

(4) 납유리 각 POINT별 실제 선량율 측정결과

측정결과 4곳에 설치되어 있는 납유리에서 모두 만족할 만한 결과를 얻었으며 그 중에 서쪽 납유리에 대한 결과는 표 4와 같다. 선량율의 단위는 mR/h 이다.

표 4 서쪽 납유리 선량 측정 결과[WEST WINDOW-1].

POINT	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2
선량율	13.2	12.3	12.4	12.6	12.7	12.4	11.8	13.4	13.1	13.6	11.9	12.1
POINT	3-3	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	A	B	C	D
선량율	12.6	12.3	12.4	11.8	12.4	113.2	13.3	12.7	12.8	12.7	12.8	15.3

3. 핫셀 장비 유지보수용 글로브 박스 설계 및 제작

가. 장비 사양

(1) 제품의 개요

본 Glove Box는 M6b Hot Cell 내에서 사용 관리하는 장비에 대한 유지 보수가 필요 할 때 Hot Cell 내에서 Rear Door를 거쳐 서비스 구역에 설치된 Buffering Tent 내로 장비를 안전하게 반출, 보수 후 반입할 수 있는 반자동식 이동용 Glove Box 이다. 글로브 박스의 개략도는 그림 3과 같다.

(2) 제작 내용

- (가) 본 Glove Box는 방사능에 오염된 장비류를 반출 보수 및 반입하는 장비이므로, 준비중 또는 보수 중 방사능의 노출을 최대한 방지할 수 있는 구조로 제작하였다.
- (나) 본 Glove Box는 부식 및 산화방지를 목적으로 Stainless Steel 류를 사용하였다.
- (다) 본 Glove Box는 Hot Cell 용 Rear Door를 충분히 열은 후 Hot Cell 벽 내부로 자유롭게 진입 퇴출 할 수 있는 크기와 구조로 제작되었다.
- (라) 본 Glove Box의 이동은 전기 모터와 감속장치에 의해 7 m/min(116 mm/sec) 이하의 속도로 이동하고 정·역이 가능하도록 하였으며, 수동 조향 장치가 설치되었다.
- (마) Hot Cell 용 장비 반출 반입시 본 Glove Box 정면은 Hot Cell 입구 벽면과 밀착 밀봉 되도록 Sealing 구조를 갖추었다.
- (바) 본 Glove Box의 최대 적용중량은 150kg으로 하며 장비 상, 하차용 Pallet 설비를 갖추었다.
- (사) 본 Glove Box 전면의 장비 출입구는 방사능 차폐가 가능한 재질과 두께의 Shutter를 설치하였으며, 전기조작에 의해 개폐가 용이하도록 하였다.
- (아) 본 Glove Box는 우측면과 후면에 각각 보수용 Glove(1 Pair) 와 투시용 Glass를, 윗면에는 공구 투입구를 설치하였다.

나. 글로브 박스 제작 결과

글로브 박스를 제작 후 장비의 구동시험, 셔터의 개폐시험, Pallet의 구동시험 등을 실시하여 만족할만한 결과를 얻었다.

글로브 박스를 사용하여 핫셀 내의 고장난 장비를 수리하는 과정은, 우선 M6b 핫셀 뒷문을 중심으로 서비스구역에 Buffering Tent를 설치 후에 Rear Door를 최대한 뒤로 이동시키고, 장비를 구동시켜서 Rear Door Hole로 조심스럽게 진입시킨다. 진입이 완료되면, Shutter를 하강시키고, Pallet를 핫셀 내로 전진시켜서 셀 내부의 크레인으로 장비를 싣고, Pallet를 후진시켜 그로브 박스 안으로 장비를 인출하고 셔터를 닫는다. Cart를 후진시켜 보수 등을 완료 후에 반대과정을 거쳐 장비를 반입시키고 마무리한다.

회로도 및 각종 구동 스위치 배치도는 그림4, 5와 같다.

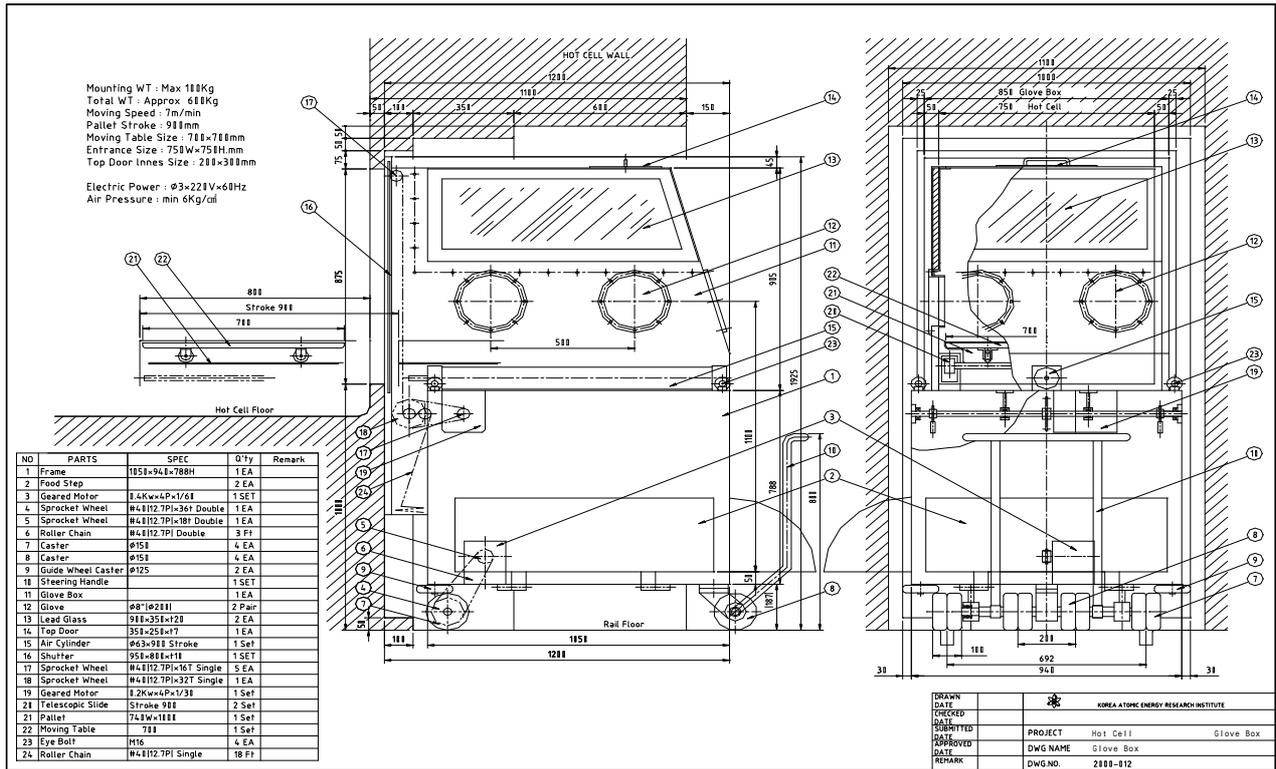


그림 3 글로브 박스 개략도.

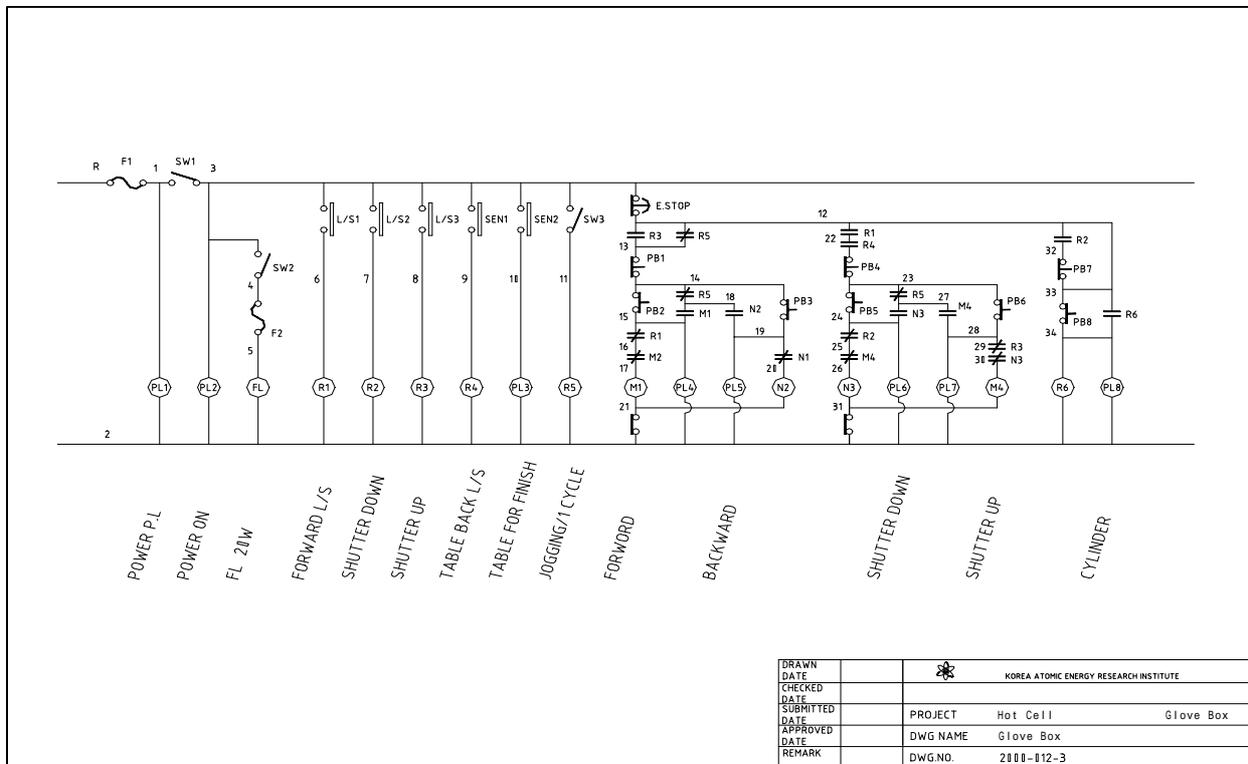


그림 4 글로브 박스 회로도.

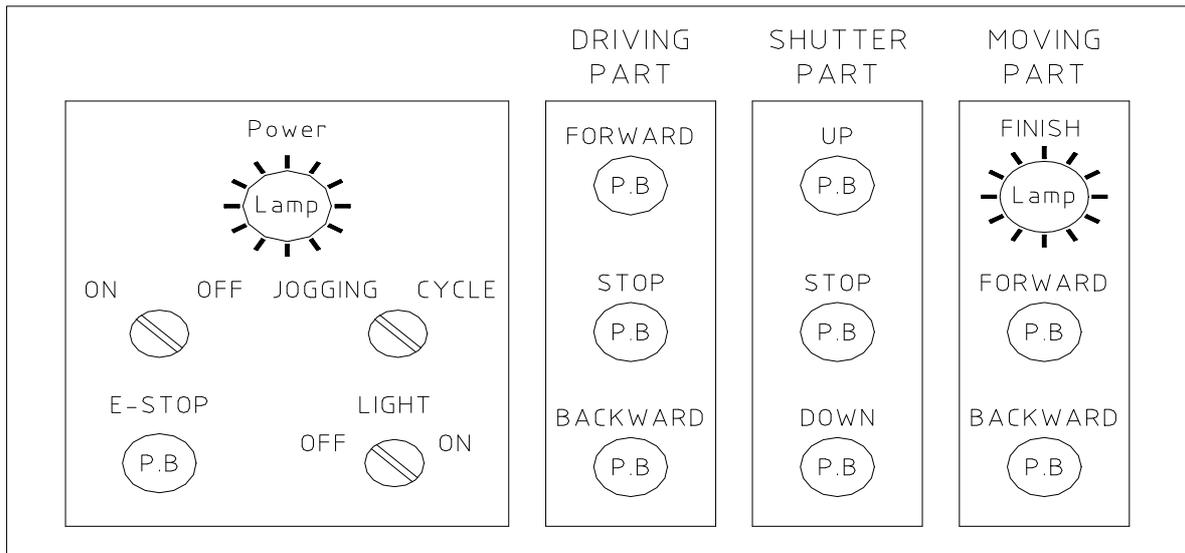


그림 5 글로브 박스 스위치 배치도.

4. 결론 및 고찰

핵연료 제조시험 중에 고장난 시험장비에 대한 유지보수를 위하여, M6a 핫셀 위의 격리실을 개조 및 보완하였고, M6b 핫셀 장비의 유지 보수를 위해 특별히 설계된 글로브 박스를 제작하였다.

M6a 핫셀에서 사용되는 오염이 심한 장비들은 격리실에서 유지보수 할 수 있도록 하였는데, 내부 양 측면과 전면에 30mm의 납판을 설치하고, 그 위에 6mm의 스테인리스 판을 용접 설치하였으며, 바닥과 뒷면은 3mm두께의 스테인레스 판을 용접 설치하여 내부 오염이 용이하도록 하였다. 내부의 시야 확보를 위해서 좌측면 1 개소와 전면 3 개소에 납유리를 설치하고, 납유리 아래쪽으로 Glove를 설치하여 원거리에서 장치 등의 분해조립 등 보수가 용이하도록 하였다. 이중문에는 기존의 구조물에 30mm의 납판과 스테인레스판 6mm를 부착한 후 Neopren Gasket을 부착시켜 밀폐되게 하였다. 격리실 아래에 설치된 2단의 Roof Door를 개폐하기 위하여, 기 설치되어 있는 3톤 크레인에 Roof Door Automatic Tool을 이용 원격으로 열고 닫을 수 있도록 하였으며, 중량물의 취급이 용이하도록 작업대를 설치하여 전기에 의한 상하구동 및 정·역회전이 되도록 하였다. 그밖에 폐기물의 수거를 위하여 용기 접속부 등을 설치하였다.

M6b 핫셀의 장비들은 비교적 오염이 적게된 장비로서, 고장 시에 전동 모터로 이동이 가능한 글로브 박스를 이용하여 반출할 수 있도록 하였다. 어느 정도의 차폐를 위하여 7mm의 스테인리스 판을 이용하였고, 20mm의 납유리를 설치하여 시계를 확보하였다. 파렛트의 공압식 이동장치에 의하여 핫셀과 글로브 박스 사이에 장비의 반입 및 반출이 용이토록 하였다.

핫셀에서 원격으로 원자로용 핵연료를 제조하고, 시험장비를 유지 보수할 수 있는 시설 및 장비의 확보는 국내에서는 물론 세계적으로도 선두에 속한다. 이러한 시설 보완 및 글로브 박스의 제작은 사용후 핵연료를 취급하는 시설뿐 아니라, 원격을 수반하는 산업 분야 시설에도 응용될 수 있겠다.

참고문헌

- [1] 박장진 등, "DUPIC 핵연료시설 기술개발", KAERI/RR-2009/99, 2000.3
- [2] 한발엔지니어링, "Isolation Room Device 제작설치 최종보고서", 1999.6