

파이로 Mock-up 시설 구조 및 셀장치 설계

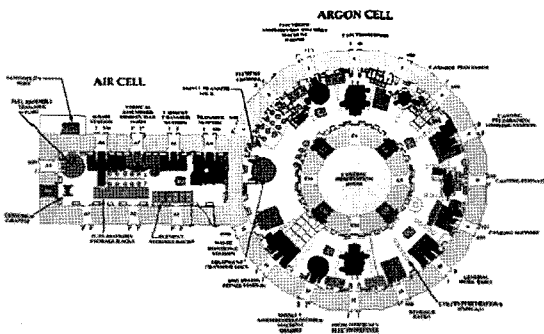
■ 이 은 표 / 한국원자력연구원, neplee@kaeri.re.kr

원자력기술 개발 초기인 1950년대부터 미국에서 부터 시작된 고속로 개발과 병행하여 금속핵연료 에 대한 처리 및 핵연료 재활용을 위해 파이로 기 술이 개발되기 시작하였으며, 파이로 기술을 시험 하기 위한 시설들도 이와 때를 같이하여 개발되었 다. 그림 1은 파이로 시험시설의 대표적인 예인 INL(Idaho National Laboratory)의 FCF(Fuel Conditioning Facility)의 주 공정 셀 개념도이며, 그림 2는 INL 내에 위치한 또 다른 파이로 시험시

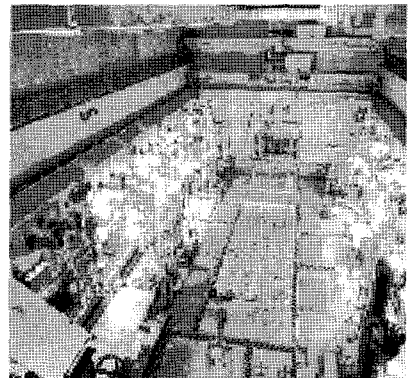
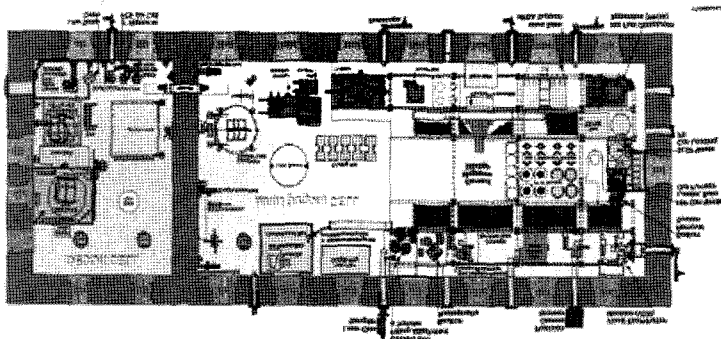
설인 HFEF(Hot Fuel Examination Facility)의 내부 배치 및 내부 전경을 보여주고 있다. 두 시설 모두 공기 분위기 셀, 아르곤 불활성 분위기 셀, 셀 운영 을 위한 운영 장비 및 설비 등으로 구성되어 있다.

파이로 시설에 설치되는 주요 설비로는 불활성 분위기 유지를 위한 순환형 아르곤 시스템 및 건물 배기 시스템, 셀 내로 장치 및 물질을 이송하기 위 한 이송 시스템, 셀 내 공정장치 운전 및 유지보수 를 위한 원격장비, 하중물 취급을 위한 크레인 및 호이스트 등이 있다. 파이로 시설에 설치되는 설비 들의 기존 공기 분위기 핫셀에 적용하는 설비 요건 과의 가장 큰 차이는 불활성 분위기 유지를 위한 아르곤 설비의 도입과 셀에 부착되는 모든 장비 및 설비들이 엄격한 기밀 성능을 가져야 한다는 것이 다. 또한 셀내에 설치되는 공정장치 및 셀에 부착 되는 셀운동을 위한 셀장치들의 운영 및 유지보수 를 위하여 사람의 접근이 불가능하므로, 셀 내 운 전을 원격으로 수행하여야 하며 고장 수리 시 원격 으로 유지보수가 가능하도록 설계되어야 한다.

파이로 Mock-up 시설은 국내 최초의 파이로 기 술을 실증하기 위한 시험시설로서 위에서 언급한



[그림 1] INL의 파이로 시험시설(FCF) 주공정셀 배치도



[그림 2] INL의 파이로 시험시설(HFEF) 주공정셀 배치도 및 시설내부 전경



파이로 시설이 갖추어야 할 요건에 따라 구조 및 셀장치들이 설계되어야 한다. 따라서 파이로 Mock-up 시설 내의 불활성 분위기 셀은 파이로 공정에서 요구하는 불순물 농도가 매우 낮은 불활성 분위기 조건이 유지되어야 하며, 외부로의 방사성 물질의 누설을 방지하기 위해 기밀이 철저히 보장되어야 한다. 또한 이와 같은 조건하에서 공정장치를 운영, 보수유지하기 위해 다양한 셀 운영 장비가 필요하다.

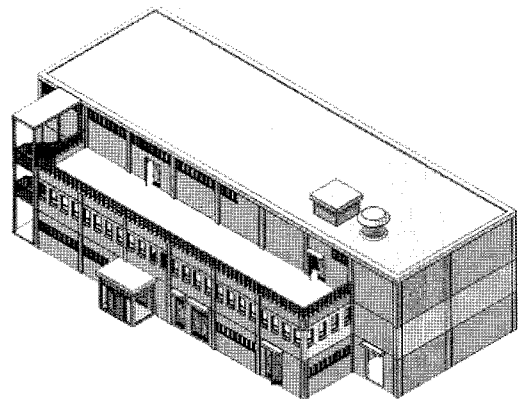
이 글에서는 기존 핫셀과 파이로 시설 설비에 대한 개념 차이를 이해를 돕기 위하여, 국내 최초의 파이로 시험시설인 파이로 Mock-up 시설의 구조물 설계 요건 및 시설 운영을 위한 셀장치의 주요 특징에 대하여 기술하였다. 파이로 Mock-up 시설에 설치되는 주요 셀장치로는 대형 및 소형 이송 시스템, 투시창, 피드 스톱, 그레퍼티 튜브, 아르곤 셀 크레인 및 호이스트 등이 있다.

파이로 Mock-up 시험시설 구조물 설계 요건

파이로 Mock-up 시설은 천연 우라늄을 사용하여 파이로 공정 및 장치 성능을 시험하고, 이를 통해 공정장치의 설계에 필요한 자료들을 생산하기 위한 시설로 원자력법 제57조에 의한 핵연료물질의 사용시설로 분류될 수 있다. 구조물에 대한 법적 요건으로서 원자력법 제58조에는 핵연료물질 사용시설의 “위치·구조 및 설비가 과학기술부령이 정하는 기술기준에 적합하여 방사성물질등에 의한 인체·물체 및 공공의 재해방지에 지장이 없을 것”을 명시하고 있다. 또한 원자력법 시행규칙 제46조에는 “지진·화재 등의 재해로 인하여 예상되는 사고의 종류·정도 및 원인과 사고에 따른 재해방지조치에 관한 설명서를 사용허가 신청시 제출할 것”을 요구하고 있다. 원자력법 제58조의 핵연료물질 사용시설의 시설기준은 ‘방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙’ 제4조(사용시설등의 위치)와 제5조(사용시설등의 구조 및 설비)에 명시되어 있다. 원자로시설 및 핵연료주기시설의 경우 ‘원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙’ 및 과학기술부고시 제2000-8호 ‘원자로시설의 위치, 구조

및 설비에 관한 기술기준’을 통해 세부 기술기준 및 준용할 외국 규정 등을 구체적으로 제시하고 있는 반면, 핵연료물질 사용시설의 경우 준용할 구체적인 기술기준을 명시하고 있지는 않다. 따라서 파이로 Mock-up 시설은 천연 및 감손우라늄을 사용하여 파이로 기술을 시험하기 위한 시설이므로 시설의 안전한 운전정지 요건이나 안전한 운전정지 상태를 유지하기 위한 특별한 요건이 적용되지는 않는다. 파이로 Mock-up 시설 구조물에 대한 구조 건축 설계 기준을 결정하기 위해 선진국의 설계기준들(IAEA TECDOC, DOE STANDARD, US NRC REG. GUIDE, KBC 2005)에 대한 검토 및 파이로 Mock-up 시설의 용도 및 취급방사성 물질을 고려하였다.

파이로 Mock-up 시설 시설 구조물의 내진해석은 KBC(Korea Building Code) 2005 기준에 따른 내진하중을 적용하여 해석을 수행하였다. 그림 3은 파이로 Mock-up 시설의 외관에 대한 3D 모델링 개념도이다. 구조해석을 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS Gen을 사용하여 파이로 Mock-up 시설 구조물에 대한 유한요소 모델 사례는 그림 4, 5에 나타내었으며, 불활성분위기 셀 부압에 따른 영향을 평가한 결과는 그림 6과 같다. 파이로 Mock-up 시설 내 주요 장치들이 설치되는 2층 바닥에는 1,000 kgf/m²의 분포하중을 적용하였으며, 지진하중은 KBC 2005에 따르면 대전지역의 경우 지역계수 0.11 g와 중요도계수 1.5를 곱한 0.165 g



[그림 3] 파이로 Mock-up 시설 3D 모델링 개념도

를 최대 수평 지반가속도로 적용하여, 동적해석법인 모드해석법을 통해 내진해석을 수행하였다.

파이로 Mock-up 시설 셀 운영장비

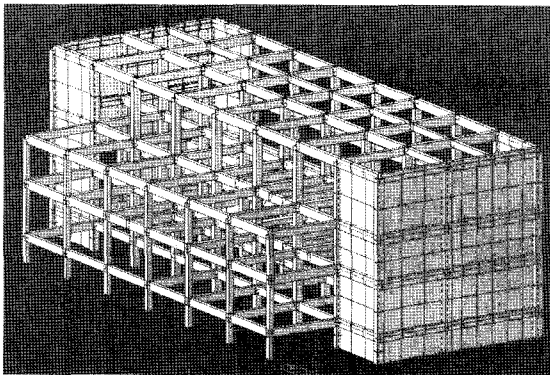
셀에 부착되는 셀장비의 3D 개념도 및 불활성 분위기 셀 설치 위치는 그림 7과 같다. 파이로 Mock-up 시설에 설치되는 셀 운영장비로는 대형 및 소형장비 이송시스템, 윈도우, 원격조작기인 MSM (Master Slave Manipulator), 양팔형조작기, 인셀 크레인 및 호이스트, 셀조명, 그레버티 튜브 및 배관과 배선 연결을 위한 Feedthrough 등이며, 이를 이용하여 대형 불활성 분위기 셀 운영 및 누설을 요건을 만족시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다.

대형 및 소형장비 이송시스템

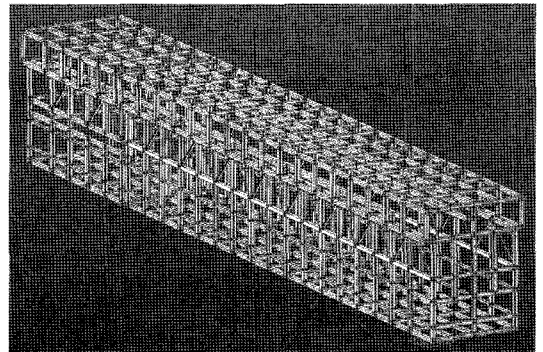
셀 외부에서 셀 내부 또는 셀 내부에서 셀 외부로

비교적 규모가 크거나 중량이 큰 공정장치, 공정물질 및 기타 장비를 이송시키기 위한 장치로서, 반출입할 수 있는 장치의 최대 크기는 직경 2.2 m, 높이 2.2 m이고, Transfer basket을 이용하는 경우는 직경 1.5 m, 높이 1.7 m 규모이며, 취급할 수 있는 장치 최대 중량은 2.8 ton이다. 대형이송시스템은 모의셀 내의 산소, 수분의 농도 및 부압에 영향을 미치지 않고, 기능요건 및 원격 유지보수가 가능하도록 특수한 설계 개념들이 도입되었다.

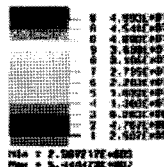
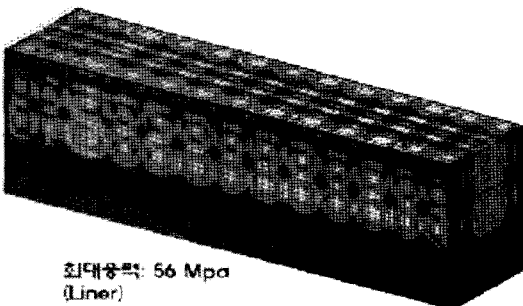
소형장비 이송시스템은 셀 외부 또는 셀 내부로부터 작은 크기나 적은 중량의 공정 물질, 공구 및 기타 장비를 이송시키기 위한 장치로서 가로 850 mm, 세로 250 mm, 높이 400 mm 크기 이하 또는 30 kg 이하의 공정물질 등의 운반이 가능하도록 챔버 내부 양쪽 면에 이중 가이드를 도입한 서랍식 구조로 원격조종기를 이용하여 구동하게 된다.



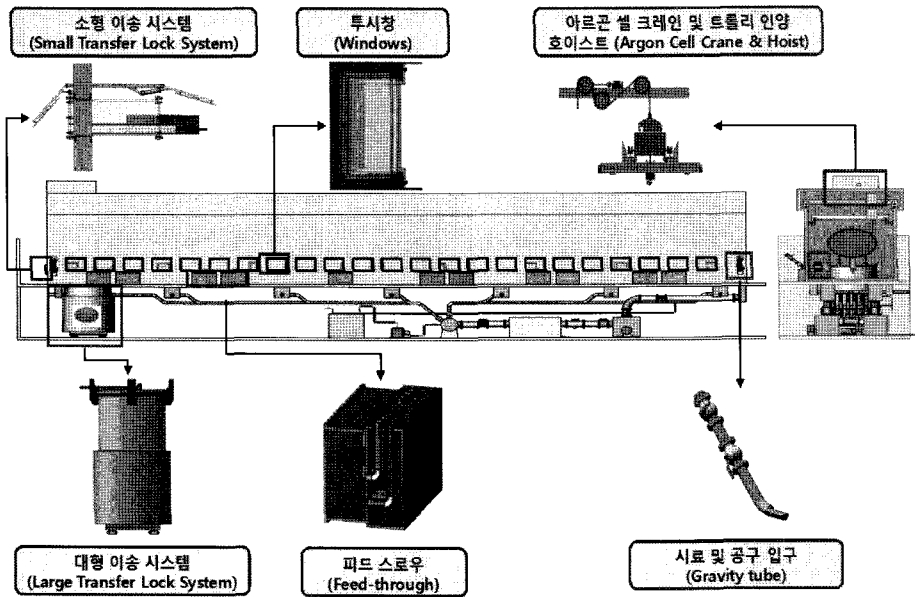
[그림 4] 파이로 Mock-up 시설 전체 건물 구조해석 모델



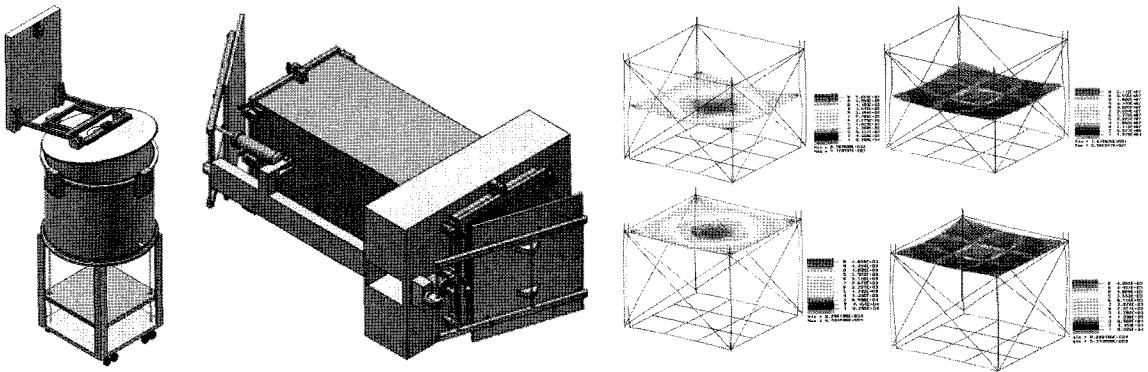
[그림 5] 파이로 Mock-up 시설내 불활성분위기 셀 구조해석 모델



[그림 6] 불활성분위기 셀 응력분포 및 셀 프레임 모멘트 다이어그램



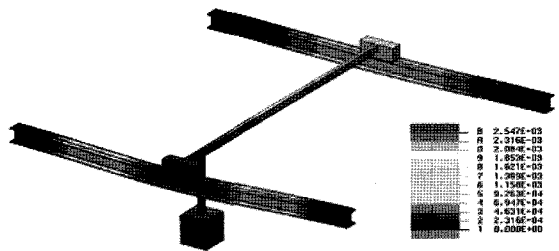
[그림 7] 셀운영장비 3D 모델링 개념도 및 설치 위치



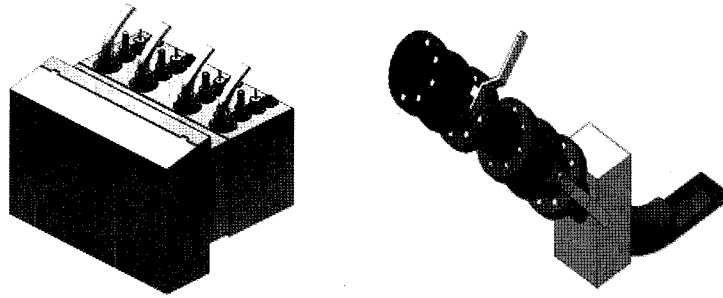
[그림 8] 대형, 소형장비 이송시스템 3D 개념도 및 하부 테이블 볼 스크류 좌굴 해석

아르곤셀 크레인 및 호이스트

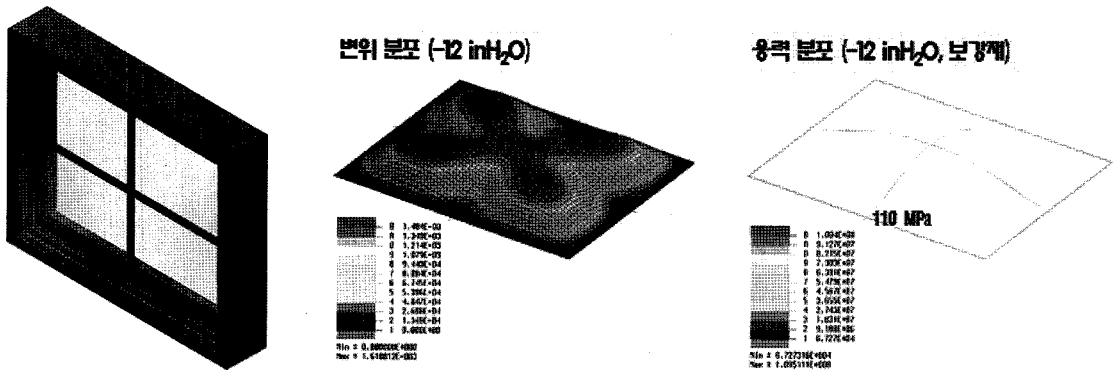
아르곤 셀내의 하중물을 취급하는 크레인 고장 시 사람의 접근이 불가능하므로, 아르곤셀 크레인은 기존 산업용 크레인과는 다른 설계 개념이 도입되어, 어떠한 고장 시에도 원격 유지보수가 가능하도록 하였다. 주 구동 모터 고장 시 보조 구동 모터가 작동되며, 트롤리 고장 시 트롤리 인양 호이스트를 이용하여 트롤리를 거더에 원격으로 안착 및 분리할 수 있도록 하였다(그림 9).



[그림 9] 크레인 하중에 의한 H-형강 변위분포



[그림 10] Feedthrough 및 그레버티 튜브 3D 개념도



[그림 11] 윈도우 3D 개념도 및 유한요소 해석

Feedthrough, 윈도우 및 그레버티 튜브

Feedthrough는 셀 내에 설치된 셀 장치 및 공정 장치에 전기, 아르곤 가스 및 냉각수 등을 공급, 배출시키기 위해 전기, 아르곤 가스, 냉각수 등을 셀 내부와 외부로 연결시키기 위한 설비로서, 기밀을 유지하면서 셀 내부로 유틸리티 공급을 위한 필수 설비이다.

Gravity Tube는 셀 내의 산소, 수분의 농도 및 부압에 영향을 미치지 않고 셀 내로 작은 공구 및 시편을 투입하기 위한 장비로 외경 140 mm, 길이 330 mm 이하 크기의 공구류 등의 투입이 가능하도록 10^{-4} torr에 상응하는 6 inch ball valve와 튜브로 설계하였다.

셀 내의 공정장치의 운전을 원활히 하기 위한 사각지역을 최소화하고, Window의 투명창은 셀 내의 최저 부압 및 최대압력에 견딜 수 있도록 유한요소 모델링을 이용하여 파이로 Mock-up 셀 내의

부압에 가장 취약한 부분에 대한 해석을 수행하여 Window의 투시창의 최적 크기를 결정하였다.

맺음말

파이로 Mock-up 시설 구축의 주요 목적은 파이로 종합공정의 공정기능 및 공정특성을 고려하여 효율적인 운전성과 안전성을 확보하는 것이다. 이를 위해 이 글에서는 파이로 Mock-up 시설 운영에 필수적인 구조물 및 셀운영장비의 기본적인 요건, 요구기능 및 특징에 대해 간략하게 소개하였다. 향후 이를 토대로 파이로 Mock-up 시설 구축을 완료하고 파이로 기술을 실증함에 따라, 파이로 시설에 필수적인 셀 운영장비 및 설비들에 대한 지속적인 성능개선 및 연구개발이 필요할 것으로 기대된다. ❀