

사용후핵연료 관리공정 실증시설의 핫셀 격리실 설계

유승남*, 한종희, 류동석, 이종광, 김성현, 박병석, 조일제, 김기호
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
*snyu@kaeri.re.kr

1. 서론

본 논문에서는 사용후핵연료 관리공정 실증시설(이하 ACPF)의 핫셀(Hot-cell) 부속 격리실에 대한 개량설계를 위하여 고려한 사항들을 소개하고자 한다. 본 격리실은 ACPF 핫셀에 대한 물질 반출입 과정에서 작업자들로 하여금 방사성 물질 혹은 비산된 유해물질에 신체가 불필요하게 노출되는 것을 완화해 주는 역할을 한다. 이를 위해 본 논문에서 소개하는 개량형 핫셀 격리실의 경우, 작업자가 주로 머무는 구역 부근의 벽면을 납유리(Lead Glass) 및 별도의 차폐체로 보강하여 격리실 외부에 대한 차폐능을 향상시켰으며, 특히 차폐체 소재 선정을 위한 차폐안전성 해석을 통하여 후보 소재별 차폐능을 비교함으로써 선량기준과 관련된 원자력 법규들을 충분히 만족시킬 수 있는 소재를 선정하였다. 실제적인 격리실의 설계 및 시공을 위하여 핫셀 주변 현장 여건, 차폐창의 설치 문제 및 시공성 등을 종합적으로 판단하여 보강 차폐체의 두께 및 재질을 선정하였으며, 이를 ACPF의 기본 및 상세설계에도 반영하였다. 또한, 격리실 내에서의 취급물에 대한 양정높이 확보를 위해 천장 높이를 상향조정하고 그에 대응한 시설 구조물을 설계하여 구조해석을 통해 최적화하였다. 최종적으로는 차폐체 벽면, 작업창 및 벽면 등을 시공하고, 내부에 천장이동 크레인을 설치하여 개량형 격리실을 구축하였다. 본론에서는 전술한 각각의 설계 요소들을 좀더 상세히 기술할 것이다.

2. 본론

2.1 ACPF 차폐체 선정

격리실 벽면의 차폐 보강 재료로서 중량콘크리트, 스틸, 납 등을 선택하여, 핫셀의 차폐 선량기준을 만족시키기 위한 해석을 수행하였다. 해석도구로는 QAD-CGGP-A 및 MCNP-4C 코드를 이용하였다. QAD-CGGP-A 전산프로그램은 기존의 QAD-CGGP 프로그램을 AECL이 보완한 것으로서 주요 보완 사항은 감마선 감쇠계수 평가 시 Cubic Spline

Interpolation 적용, 선원의 전이 및 회전 (Translation and Rotation), Buildup Factor 평가 시 잠재 오류의 수정 및 Free-format Input의 적용 등이 있다. QAD 프로그램은 Los Alamos Scientific Laboratory에 의해 개발된 일련의 Point Kernel Code로서 여러 가지 차폐체에 대한 속중성자선 및 감마선의 투과선량을 계산하는 프로그램이다 [1]. 격리실 차폐체의 선정을 위해 사용 가능한 차폐체의 종류를 사전에 조사 및 분석하였으며, 일반 콘크리트, 스틸 (7.86 g/cm³), 납(11.3 g/cm³) 등을 후보 소재로 고려하였다. 또한 격리실 외부에서 내부를 관찰할 수 있는 작업창을 신설하기 위하여 특수 납유리(4.12 g/cm³, 5.2 g/cm³)도 검토하였다. 제품으로 공급받을 수 있는 납유리의 Pb 밀도는 10 mm 납당량 2.2 mm pb 일 때 4.12 g/cm³, 10 mm 납당량 3.2 mm pb 일 때, 5.20 g/cm³ 가량이다. 납유리의 두께는 일반적으로 100~300 mm로서 주문제작 방식으로 공급된다. 상세한 납유리의 공급유형은 Table 1과 같다.

Table 1. Product Standard of the Lead Glass

규격	비고
200 x 300	
300 x 300	
360 x 360	
300 x 400	
400 x 400	
400 x 600	
600 x 800	
600 x 1000	
600 x 1200	* 투명도 85% 이상
800 x 900	
800 x 1200	* 두께별 납당량
1000 x 1200	• 8 mm : 1.76 mmpb
1000 x 1400	• 10 mm : 2.2 mmpb
1000 x 1500	
1000 x 1800	
1000 x 2000	
1200 x 1500	
1200 x 1600	
1200 x 1800	
1200 x 2000	
1200 x 2400	

본격적인 차폐계산을 위하여 다음의 사항을 가정하여야 한다. 즉, Padirac 외부에서의 기준 선량률은 10 mSv/hr, 차폐벽 표면에서의 기준 선량률은 0.15 mSv/hr로 가정하며, 고려대상 차폐체의 재질별 밀도의 경우에는 일반 콘크리트(2.33 g/cm³), 스틸(7.86 g/cm³), 납(11.3 g/cm³), 납유리(4.12 g/cm³, 5.2 g/cm³) 별로 각각 설정한다. 기준선원은 16×16 Plus7 1 kg로 하며, 실린더형 선원으로 가정하여 선원과 벽과의 거리는 30 cm로 모델링한다. 전산 프로그램은 전술한 바와 같이 QAD-CGGP-A를 활용하였으며 이때, Padirac 표면에서의 선량률인 10 mSv/hr를 만족하기 위한 보정계수는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\text{Conversion Factor} = 10/583.87 = 0.01713 \quad (1)$$

결과적으로 격리실 차폐벽으로 사용될 경우, 각 소재별 요구 두께는 일반 콘크리트 13 cm, 스틸 5 cm, 납 3 cm, Lead Glass 8 cm(for 4.12 g/cm³), 6 cm(for 5.2 g/cm³)로 각각 산출된다. 본 설계에서는 위의 데이터를 근거로 하여, 격리실 차폐벽면 내부에는 5 cm의 스틸 판을 삽입하고, 작업창으로 사용될 납유리는 5.2 g/cm³의 납 밀도를 가지는 6 cm의 규격의 제품을 최종적으로 선정하였다. 차폐창의 크기와 위치는 아래 Fig. 1과 같이 시야각 및 내부 가시성을 고려하여 최종 결정되었다.

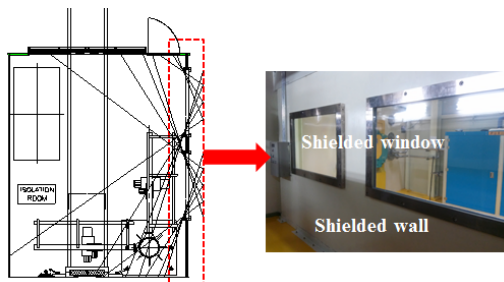


Fig. 1. Positioning of the Shielded Window Based on the Visibility Inside the Isolation Room.

2.2. 격리실 프레임(Frame) 구조설계

격리실 프레임의 설계는 건축구조기준 및 강구조 설계기준에 입각하여 한계상태설계법(LSD)으로 설계하였으며 설계하중은 고정하중의 경우, 벽체 및 지붕을 통해 0.50 kN/m²이 부과되며, 활하중은 천정이동 크레인을 직접 지지하는 프레임 상단 지붕에서 1.00 kN/m²가 부과되는 것으로 가정하여 설계하였다. 여기에 천정이동 크레인의 자중 및 최대 취급하중 1 ton도 함께 고려하였다. 설계된 프레임의 형상 및 치수는 Fig. 2와 같다.

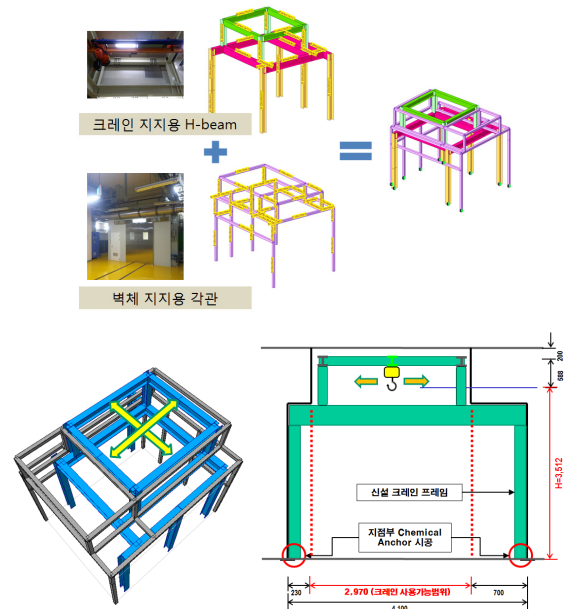


Fig. 2. Structure Design for the Isolation Room.

특히, ACPF 핫셀에 대한 효과적인 차폐용기 및 물질 반출입을 위하여 기존의 격리실 대비 천장높이를 65% 상향조정함과 동시에, 격리실 내부 도달 구역은 기존 Jib Crane의 94% 수준을 확보함으로써 전체적인 크레인 취급영역이 확장되는 효과를 기대할 수 있다 (Fig. 3).

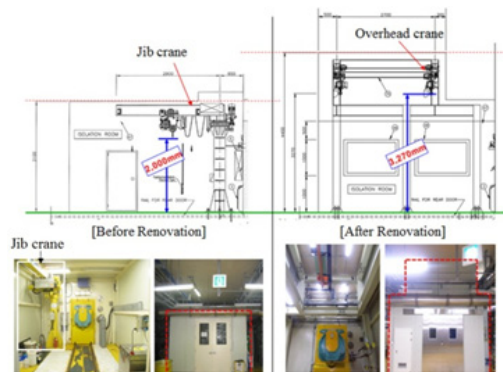


Fig. 3. Renovated Isolation Room and Changed Structure of Crane System.

3. 결론

본 논문에서는 ACPF 핫셀과 연계하여 마련된 격리실의 설계 주안점들을 소개하였으며, 해당 시설은 현재 한국원자력연구원 내 조사재시험시설 지하 1층에 위치한 ACPF에 설치가 완료되어 운전시험을 통한 신뢰성 검증을 수행하고 있다.

4. 참고문헌

[1] KAERI/TR-2441/2003, 차세대관리 종합공정 실증시설 방사선 안전성 평가, 2003.12.