

사용후연료 금속저장용기의 열적 안전성 평가

이경호, 김형진, 이대기

한국수력원자력 원자력발전기술원, 대전광역시 유성구 장동 25-1번지

suhong@khnp.co.kr

1. 서론

사용후연료의 저장용기는 연료다발에서 발생된 붕괴열을 제거하여 저장기간 동안 열적 안전성을 확보하도록 설계되어야 한다. 이러한 성능을 확보하기 위해서는 열해석을 통해 저장된 연료다발 피복관 최대온도, 저장용기 구성품 최대온도, 금속구조물의 온도분포, 저장용기 최대내부압력 등을 평가하여야 한다. 설계기준은 미국 NRC NUREG-1536[1]에서 제시된 요건을 적용하여 열적안전성을 평가하였다. 저장용기에 적재된 내용물은 7년 냉각된 24개의 연료다발을 대상으로 하였으며, 연료 다발의 최대연소도, 열발생률 및 농축도는 각각 50,000MWD/MTU, 1.13kW/FA, 5wt%를 적용하였다. 해석모델링에서는 열제거 성능에 영향을 미치는 모든 구성품을 포함 하였고, 3차원 축대칭 모델을 이용한 유한체적법을 적용하였다. 해석코드는 범용 열유동 해석코드인 FLUENT 6.2를 사용하였다.

2. 사용후연료 금속저장용기의 열적 설계기준

항 목	설계기준	항 목	설계기준
연료피복관 최대온도	340℃(10년 냉각기준)	금속셸 최대온도	500℃
중성자차폐체 최대온도	148℃	최대 대기온도	40℃
최대 내부압력	7.8 atm	기타 구성품 최대온도	격납·차폐기능 유지가능 온도

3. 열해석 및 결과

본 해석에 적용된 모델은 24개 연료다발을 저장할 수 있도록 설계된 금속저장용기를 대상으로 하였다. 해석모델은 그림 1,2와 같이 3차원 축대칭, 유한체적모델(Finite Volume Model)을 구성하였다. 열전달 현상에 필수적이고 안전성관련 부품은 해석모델에 모두 포함시켜 상세모델링을 수행하였다. 금속저장용기의 구성은 캐니스터와 원통형 셸(shell), 용기 뚜껑(lid), 바닥판(baseplate) 및 중성자 차폐체(neutron shield)로 구성되어 있다. 구성품의 사양은 아래 표1에 요약하였다.

표1. 금속저장용기의 구성품 사양

품 목	재질	크기/수량	비고
용기뚜껑	탄소강 SA516 Gr 70	직경:2,459mm, 두께 : 60mm	
용기본체	탄소강 SA516 Gr 70	직경:2,459mm, 높이:5,402mm	
디스크	탄소강(SA537-CL2)	간격:170mm/수량25개	내부바스켓 지지
바닥판	탄소강 SA516 Gr 70	직경:2,459mm, 두께 : 260mm	
차폐체	NS-4-FR	두께:100mm	

또한 중성자차폐체 내부에는 탄소강으로 제작된 열전달관이 설치되었다. 이는 중성자 차폐체를 고정시킬 뿐만 아니라 열전달을 촉진시키는 역할을 한다. 바스켓 내부의 연료집합체는 유효열물성치를 갖는 균질모델로 고려하였다. 균질모델의 유효열전도도는 연료집합체 단면의 상세 2차원 모델링에 대한 열해석을 수행하여 단면 최대온도(T_{max})를 도출한 후 다음과 같은 횡단면 유효열전도도 산정식[2]을 사용하여 계산하였다.

$$k_{eff} = 0.2497 \frac{Q}{4L (T_{max} - T_B)}$$

단, k_{eff} : 유효열전도도 [W/m K], Q : 연료집합체당 발생열 [W]
 L : 핵연료집합체의 유효길이 [m], T_{max} : 최대 중심온도 [°C]
 T_B : 바스켓 내부벽 온도 [°C]

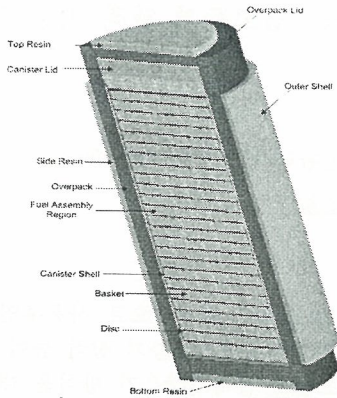


그림 1 금속저장용기 해석모델

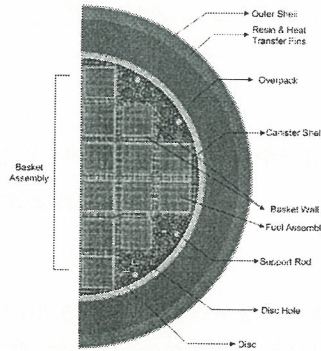


그림 2 금속저장용기 해석모델 단면

금속저장용기의 열해석 결과는 표2에 요약하였다. 결과에는 용기본체, 뚜껑, 중성자 차폐체, 캐니스터, 바스켓 및 연료피복관의 최대온도를 나타내었다.

표2. 금속저장용기의 열해석 결과

구성요소	최대온도 [°C]	허용온도 [°C]	비고
용기본체	173	371	
본체 뚜껑	144	500	metallic seal 허용온도
중성자 차폐체	129	148	
캐니스터	224	427	
바스켓	278	427	
사용후연료 피복관	313	340	

최대압력은 NUREG-1536에서 제시된 요건에 따라 계산을 하였다. 저장된 연료 중 1%가 손상되고, 연료봉내 주입가스 100%가 캐니스터 내부로 방출되며, 손상 연료봉 중 30%가 핵분열성 가스를 방출한다고 가정하여 내부압력 계산을 수행하였다. 또한 건식저장 시스템 최대내부압력에 관련된 요소는 다음과 같다.

- 손상 핵연료로부터 발생하는 핵연료봉 주입가스(backfill gas)
- 손상 핵연료로부터 발생하는 핵분열성 가스 및 저장용기 주입가스

최대내부압력을 계산하기 위해 주입가스인 헬륨의 몰수, 온도 및 캐니스터의 자유체적을 계산하였다. 따라서 정상조건시 금속저장용기내 최대내부압력은 $P=NRT/V$ 식으로부터 5.7 atm으로 계산되었다. 이는 캐니스터 설계압력인 7.8 atm보다 낮게 계산되었다.

4. 결론

본 논문에서 수행한 건식저장 시스템 부품 최대온도는 허용온도 이하로 유지되는 것으로 계산되었다. 격납기능에 중요한 쉘 온도는 144°C로 허용온도 500°C이하로 유지되며, 중성자 차폐체 최대온도는 129°C로 허용온도 148°C이하로 유지되었다. 따라서 쉘 및 중성자 차폐체는 열적 건전성이 확보되며 각각 격납기능 및 차폐기능 저하를 유발하지 않는다.

사용후연료의 피복관 최대온도는 313°C로 허용온도 340°C이하로 유지되므로 저장기간중 손상을 유발하지 않는 것으로 평가 되었다. 최대내부압력은 5.7 atm으로 설계압력 7.8atm이하로 유지되어 안전성이 확인되었다. 상기의 열해석 평가로부터 금속저장용기의 열적 안전성을 입증하였다.

참고문헌

1. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan for Dry Cask Storage System, NUREG-1536, 1997.
2. SANDIA Report, SAND90-2406, A Method for Determining the Spent Fuel Contribution to Transport Cask Containment Requirements, 1992.