

## 핫셀 운반용기의 정상운반 및 운반사고조건에 대한 열해석 평가

이주찬, 방경식, 최우석, 이상훈, 서중석, 서기석, 김호동  
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045  
[siclee@kaeri.re.kr](mailto:siclee@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

사용후핵연료 건식처리공정인 파이로 공정 기술을 통한 선진 핵연료주기를 구현하기 위해서는 파이로 공정에서 발생하는 고방사성물질에 대한 운반 및 저장시스템의 개발이 필수적이다. 한국원자력연구원에서는 파이로 공정 실증을 대비하여 사용후핵연료, TRU 연료물질, 기타 공정물질 등을 핫셀 및 관련 시설로 운반하기 위한 핫셀 운반용기를 개발하고 있다. 그림 1은 핫셀 운반용기의 단면도를 나타내며, 운반용기의 1회 운반용량은 연소도 55 GWd/MtU, 초기연소도 4.5 wt%, 냉각기간 8년의 PWR 사용후핵연료 20 kg 또는 Pyro-process 공정에서 발생하는 AMFP 세라믹폐기물 21 kg 또는 I/Tc fly ash 5 kg이다. 운반용기 본체의 치수는 직경 800 mm, 높이 1,150 mm이고 상하부 완충체를 포함한 총 중량은 약 3.7톤이다. 핫셀 운반용기는 B형 운반용기로 구분되며, B형 운반용기는 국내외의 관련법규에 따라 정상운반은 물론 가상사고조건에서도 방사성물질의 누설이 발생되지 않도록 방사선차폐, 열 및 구조적 건전성이 유지되어야 한다. 운반용기의 열적 건전성을 유지시키기 위하여 정상운반조건에서는 내부의 운반물로부터 방출되는 붕괴열(decay heat)을 외부로 적절하게 방출시켜야 하며, 운반사고조건인 800 °C 화재조건에서는 외부 화염으로부터 유입되는 열을 적절히 차단하여 설계압력 유지 및 밀봉재, 차폐재 등 주요 부품의 허용온도를 초과하지 않아야 한다. 본 연구에서는 법규에서 규정하는 정상운반 및 운반사고조건에 대한 열안전성을 평가하였다.

### 2. 열해석 조건 및 방법

열해석을 위한 해석조건은 법규에서 규정하고 있는 정상운반조건 및 운반사고조건을 적용하였으며, 정상운반조건은 대기온도 38 °C에서 최대 태양열이 유입되는 경우이며, 화재사고조건은 정상조건하에서 800 °C 화제가 30분 동안 진행된 후 자연 냉각되는 조건이다.

핫셀 운반용기의 중성자차폐체로 60 mm 두께의 K-resin을 고려하였으며, K-resin은 열전도율( $k = 1.14 \text{ W/m-K}$ )이 낮아서 화재조건에서 단열재 역할을 한다. 운반용기의 상하부에는 Balsa wood 재질의 충격완충체가 장착되며, Balsa wood의 열전도도는  $0.05 \text{ W/m-K}$ 를 적용하였다.

운반용기 내부의 운반 내용물로부터 발열량은 사용후핵연료 20 kg의 경우 32 W, 세라믹 폐기물 21 kg의 경우 397 W이며, I/Tc fly ash 5 kg의 경우는 약 0.006 W로서 거의 무시할 수 있는 양이므로 사용후핵연료 및 세라믹 폐기물을 장전할 경우에 대한 해석을 수행하였다. 운반용기가 수직 상태로 운반되고 용기 표면에 유입되는 태양열 유속은 국내의 원자력법에서 규정하고 있으며, 용기 측면의 형상은 곡면이므로  $400 \text{ W/m}^2$ , 용기 상부는 수직평면이므로  $800 \text{ W/m}^2$ 을 고려하였다. 해석코드는 범용 열유동해석 프로그램인 FLUENT 코드를 사용하였다.

### 3. 해석결과 및 고찰

표 1은 핫셀 운반용기의 정상 및 화재사고조건에 대한 열해석 결과이며, 그림 2은 세라믹 폐기물을 장전할 경우에 대한 화재사고조건 온도분포를 나타낸다. 표 1의 결과로부터 사용후핵연료 20 kg을 장전할 경우 붕괴열이 32 W로 비교적 적은 양이며, 정상조건에서 용기 본체의 온도가 대기온도에 비하여 높게 상승한 이유는 용기 표면에 유입되는 태양복사열에 의한 영향으로 판단된다. 정상조건에서 운반용기의 표면온도는 교육과학기술부고시 제 2008-69호 제 26조[1], IAEA Standard Safety Series No. TS-R-1[2]에서 규정하고 있는 허용 표면온도인 85 °C보다 낮은 60 °C로 계산되었다. 800 °C 화제가 30분 동안 진행되는 화재사고조건에서 운반용기의 격납경계를 이루는 O-ring의 온도는 최대 183 °C까지 상승하지만 Viton O-ring의 허용온도가 250 °C이므로 운반용기의 격납 건전성이 유지되며, 납 차폐체의 온도도 최대 119 °C로 용융온도인 327 °C보다 훨씬 낮으므로 차폐 건전성도 충분히 유지됨을 알 수 있다.

세라믹폐기물 21 kg을 적용할 경우 붕괴열이 397 W로 비교적 커서 정상조건에서 세라믹 폐기물의 최대온도는 300 °C 이상 상승하였으나 용기 본체의 온도는 100 °C 이하로 계산되었다. 정상조건에서 운반용기의 표면온도는 허용 표면온도 85 °C보다 낮은 79 °C로 계산되었다. 800 °C 30분 화재사고조건에서 운반용기의 격납경계를 이루는 O-ring의 온도는 최대 208 °C까지 상승하여 Viton O-ring의 허용온도인 250 °C에 비하여 낮으며, 납차폐체의 온도는 최대 149 °C로 납의 용융온도 327 °C보다 훨씬 낮으므로 차폐 건전성이 충분히 유지되었다. 세라믹 폐기물의 최대온도는 338 °C로 허용온도로 설정된 450 °C이 내이므로 운반용기의 열적 건전성이 유지되었다.

이상의 결과로 보아 핫셀 운반용기는 정상운반조건 뿐만 아니라 및 운반사고조건에서도 열적 건전성이 충분히 유지될 것으로 판단된다. 본 연구결과는 핫셀 운반용기의 SAR 및 설계승인을 위한 기본 자료로 활용될 예정이다.

4. 참고문헌

- [1] 교육과학기술부고시 제 2008-69호, "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정", 2008.
- [2] IAEA Safety Standard Series No. TS-R-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 2005.

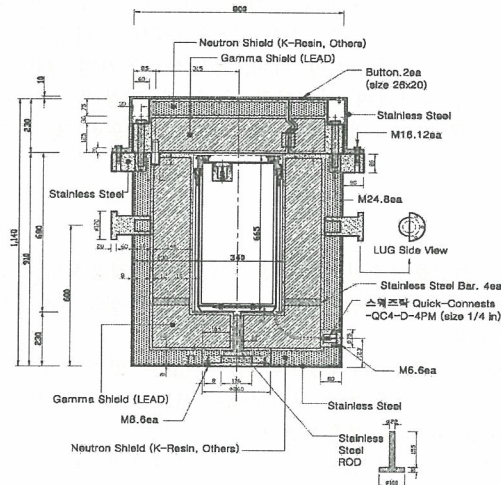


그림 1. 핫셀 운반용기 설계도

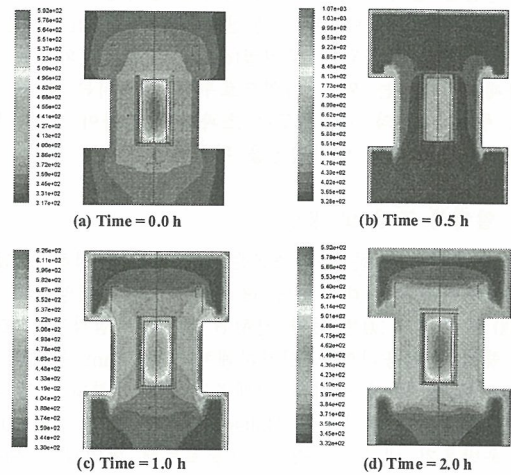


그림 2. 화재사고조건 온도분포 (세라믹폐기물)

표 1. 핫셀 운반용기의 정상운반 및 운반사고조건 열해석 결과

Location	Maximum calculated temperature (°C)			
	Spent fuel 20 kg (32 W)		Ceramic waste 21 kg (397 W)	
	Normal	Accident	Normal	Accident
Spent fuel or ceramic waste)	68	94	319	338
O-ring (viton)	51	183	80	208
Lead shield	53	119	90	149
K-resin (core)	53	279	83	298
K-resin (max.)	53	712	88	715
Cask surface	60	797	78	797