

핫셀 운반용기 설계를 위한 단열재의 열전달 특성 평가

이주찬, 방경식, 최우석, 강희영, 서기석

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

siclee@kaeri.re.kr

1. 서 론

핫셀 운반용기는 핫셀과 핫셀간 또는 핫셀과 방사성폐기물 저장시설간의 사용후핵연료 또는 고준위폐기물의 운반 및 저장에 활용되며, 국내에서는 핫셀 접속용 소형 운반용기(Padirac cask, solid waste cask) 및 접속장치를 전량 해외로부터 수입하여 사용하고 있다. DUPIC이나 ACP 공정에서 사용되는 Padirac cask는 중성자 차폐체가 없는 소형 방사성폐기물 운반용기로 방사선차폐 안전성 및 운반 효율성 면에서 문제점을 갖고 있다. 따라서 한국원자력연구원에서는 2007년도부터 ACP 및 Pyroprocess 실증을 대비하여 사용후핵연료 및 고준위 공정폐기물 운반을 위한 핫셀 운반용기를 개발하고 있다. 핫셀 운반용기는 B형 운반용기로 구분되며, B형 운반용기는 국내 외의 관련법규에 따라 정상운반은 물론 가상사고조건에서도 방사성물질의 누설이 발생되지 않도록 방사선차폐, 열 및 구조적 건전성이 유지되어야 한다. 운반용기의 열적 건전성을 유지시키기 위하여 정상조건에서는 핵연료로부터 방출되는 붕괴열(decay heat)을 외부로 적절하게 열전달 시켜야 하고, 반면에 화재사고조건에서는 외부 화염으로부터 유입되는 열을 적절히 차단하여 설계 압력 및 차폐체의 건전성이 유지되도록 설계되어야 본 연구의 목적은 기존의 핫셀 용기의 단열재 재질 및 두께에 따른 열전달 특성을 해석적으로 평가함으로써 핫셀 운반용기 설계를 위한 기본 자료를 확보하는데 있다.

2. 해석조건 및 방법

Padirac cask는 구조재로 탄소강을 감마선 차폐재로 150 mm 두께의 납을 사용하고 있다. 또한, 화재사고 조건시 고온으로부터 감마선 차폐체를 보호하기 위해 외각에 단열재로 50 mm 두께의 석회석을 사용하며, 충격완충을 목적으로 100 mm 두께의 Balsa wood로 전면을 감싸주고 있다. 핫셀 운반용기의 열전달 특성을 평가하기 위하여 기존의 Padirac cask의 단열재 및 완충체인 석회석 50 mm + Balsa wood 100 mm 두께와 단열재/완충체 두께를 각각 절반으로 축소시킨 석회석 25 mm + Balsa wood 50 mm 두께에 대한 열전달해석을 수행하였다. 또한, 단열재 및 완충체로 16 mm의 3M 매트와 100 mm의 폴리우레탄 폼을 사용한 경우와 8 mm의 3M 매트와 50 mm의 폴리우레탄 폼을 사용한 경우에 대한 열전달해석을 수행하였다. 표 1은 열전달해석에 사용된 주요 재료의 열적 물성치를 나타내며, 단열재 및 완충체의 열전도도가 1 W/m-K 이내로 단열 성능이 우수함을 알 수 있다.

열해석을 위한 해석조건은 법규에서 규정하고 있는 정상운반조건 및 화재사고조건을 적용하였으며, 정상운반조건은 대기온도 38 °C에서 최대 태양열이 유입되는 경우이며, 화재사고조건은 정상조건하에서 800 °C화재가 30분 동안 진행된 후 자연 냉각되는 조건이다. 핫셀 운반용기의 운반 대상은 연소도 43,000 MWd/tU, 냉각기간 10년인 PWR 사용후핵연료 10 kg을 기준으로 하였으며, 핵연료로부터 발생되는 붕괴열을 16 W로 고려하였다. 용기 표면에 유입되는 태양열유속은 법규에서 규정하고 있는 운반용기 형상이 곡면일 경우의 태양열유속 400 W/m²을 고려하였으며, 범용 열유동해석 프로그램인 FLUENT 코드를 이용하여 해석을 수행하였다.

Table 1. Thermal Properties of Materials

Materials	Thermal properties		
	Conductivity(W/m-K)	Density(kg/m ³)	Specific heat(J/kg-K)
Lead	35	11,340	129
Carbon steel	43	7,833	420
Limestone	0.92	900	1,650
Balsa wood	0.05	24	2,520
3M mat	0.15	865	1,385
Polyurethane foam	0.04	200	1,670

3. 결과 및 토의

그림 1은 화재사고조건에 대한 운반용기의 온도분포를 나타내고 있다. 운반용기의 내부 핵연료에서 발생하는 붕괴열이 16 W로 적은 양이므로 정상운반 및 화재사고조건에서 핵연료의 열적 건전성은 충분히 유지된다. 따라서 핫셀 용기 설계 시 납차폐체의 허용온도 이하 유지 여부가 중요한 설계요건이 되며, 표 2에는 단열재 및 완충체 두께에 따른 납차폐체의 최대온도를 나타내었다. 납차폐체의 온도는 정상운반조건에서 80 ~ 85 °C, 화재사고조건에서 91 ~ 102 °C의 온도로 납의 용융온도인 327 °C보다 훨씬 낮으므로 모든 조건에서 운반용기의 열적 건전성이 충분히 유지됨을 알 수 있다. 단열재 및 완충체로 석회석과 balsa wood를 사용한 경우와 3M 매트와 폴리우레탄폼을 사용한 경우의 단열 효과는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 기존 핫셀 운반용기의 단열재 및 완충체 두께를 각각 1/2로 축소시켜도 열적 건전성이 충분히 유지되므로 기존 용기는 단열성능이 과도하게 설계되었음을 알 수 있다. 따라서 ACP 및 Pyroprocess 실증을 위한 핫셀 운반용기 설계시 단열재 두께를 기존 용기의 1/2 이하로 줄일 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구결과는 향후 핫셀 용기의 단열재 및 완충체 최적설계를 위한 기본 자료로 활용될 예정이다.

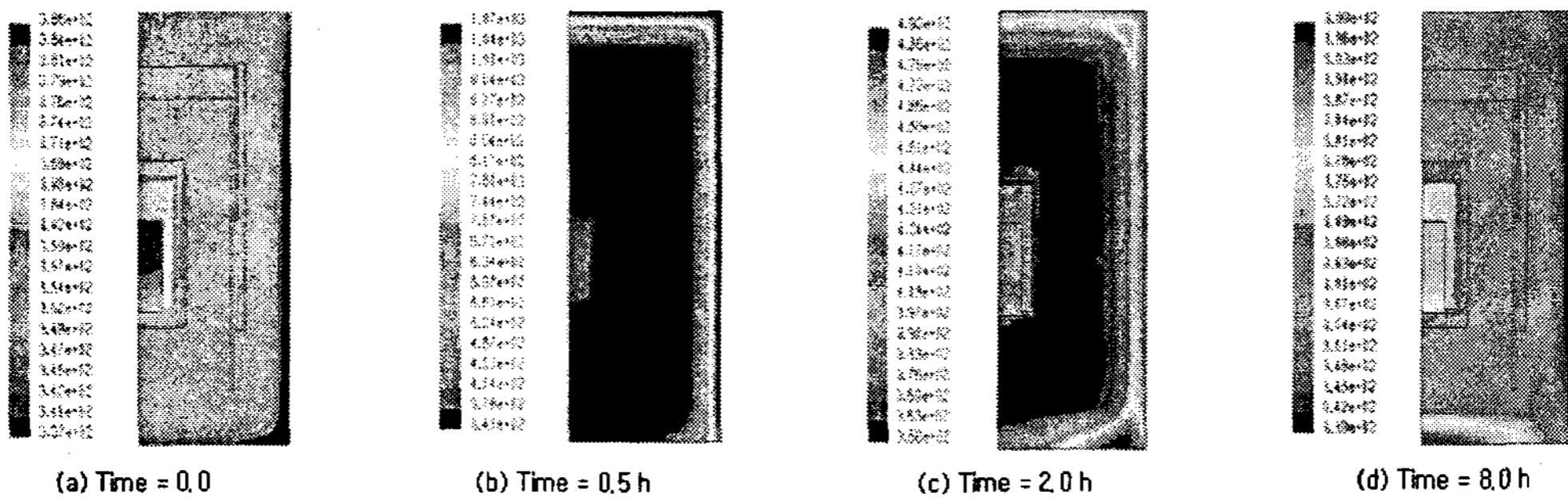


Fig. 1. Temperature Contour of Hotcell Cask under Fire Accident Condition.

Table 2. Maximum Lead Temperatures as a Variation of the Insulation and Shock Absorber

Thickness of Insulation and absorber (mm)	Maximum temperature of lead shield (°C)	
	Normal condition	Fire accident condition
Limestone 50 + Balsa 100	84	92
Limestone 25 + Balsa 50	80	105
3M mat 16 + PU 100	85	91
3M mat 8 + PU 50	81	102