

## 핫셀용 운반용기의 안전성 평가 해석

최우석, 방경식, 이주찬, 이상훈, 서기석  
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045  
 wschoi@kaeri.re.kr

### 1. 서론

한국원자력연구원에서는 핫셀에 접속하여 핫셀 내부의 방사성 물질을 운반용기에 담거나, 운반용기의 방사성 물질을 핫셀 내부로 이동할 때 사용되는 핫셀용 운반용기를 개발하였다. 개발된 핫셀용 운반용기는 다목적 운반용기로서 하나의 용기본체에 서로 다른 3종의 뚜껑을 결합하여 3종의 각기 다른 운반용기로 사용가능하도록 설계되었다.[1] 운반용기의 주요 구성요소 치수는 구조해석을 통하여 선정되었다. 개발된 운반용기는 용기 플랜지 부위에 격납유지를 위한 이중 O-ring이 장착되며, 낙하사고시에 운반용기가 받는 충격에너지를 흡수하기 위하여 운반용기 상하부에 충격완충체가 장착된다. 개발된 신규 핫셀용 운반용기는 핫셀의 리어도어와 접속하여 회전운동을 통하여 뚜껑이 개방되며 내부 컨테이너가 이송경로를 따라 핫셀 내부를 향해 이송할 수 있는 구조로 되어 있다.[2] 국내의 관련 규정에 따라 개발된 신규 핫셀용 운반용기에 대한 안전성 평가 해석 및 시험이 수행되었다. 안전성평가 해석 및 시험을 통하여 개발된 핫셀용 운반용기가 운반사고조건하에서 안전성을 확보함을 입증하였다. 본 논문에서는 안전성평가 해석에 대하여 기술하고자 한다.

### 2. 개발된 핫셀용 운반용기 설명

핫셀용 운반용기는 그림 1과 같이 운반용기 본체와 상하부의 충격완충체로 구성된다. 완충체를 포함한 운반용기의 직경은 1,270 mm이고 길이는 1,790 mm이다. 핫셀용 운반용기의 중량은 완충체가 약 0.7톤, 운반용기 본체가 4톤이며, 운반내용물을 포함할 경우 총 중량은 약 4.8톤이다.

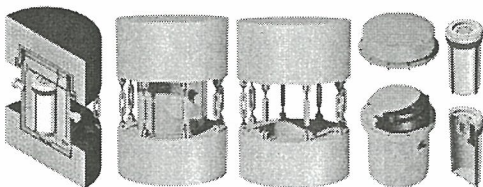


Fig. 1. Major components of transportation package.

### 2.1 운반용기 본체(Cask body)

운반물인 사용후핵연료 또는 공정물질로부터 발생하는 방사선을 차폐하기 위한 핫셀 운반용기 본체는 감마선 차폐체인 납과 중성자 차폐체인 K-resin이 채워진 원통형 셸과 뚜껑으로 구성되어 있다. 핫셀 운반용기의 구조재는 스테인리스강 SA240 Type 304 재료로 설계하였다. 운반용기 본체에 뚜껑을 체결하였을 때 핫셀 운반용기 본체의 플랜지를 포함한 치수는 직경 960 mm, 높이 1,140 mm이다. 운반용기의 내부에는 격납경계를 갖는 밀봉 컨테이너가 장착되며, 내부 컨테이너의 내경은 270 mm, 높이는 634 mm이다. 운반용기 본체와 뚜껑은 플랜지 형태로 체결되며, ASME SA 193-B7와 동등한 재료의 M24 육각머리 볼트 8개로 조립된다.

### 2.2 오링(O-ring) 및 격납경계

오링은 내압 및 외부충격 등으로 부터 격납 건전성을 유지시키기 위하여 핫셀 운반용기는 2중 격납구조를 갖는다. 1차 격납경계는 운반용기 내부 컨테이너이며, 컨테이너 본체와 뚜껑 사이에 밀봉 가스켓 설치하여 밀봉을 유지될 수 있도록 하였다. 2차 격납경계는 운반용기의 밀봉 덮개이며, 밀봉덮개 내부에 원형 단면의 2중 오링을 설치한다. 내부 컨테이너의 밀봉 가스켓 및 원형 단면의 2중 오링의 재질은 Fluorocarbon rubber 계열의 재질로서 사용온도 범위는 -40 ~ 250 °C이다.

### 2.3 완충체(Shock absorber)

운반용기 본체를 보호하기 위한 완충체는 스틸 케이스와 발사우드로 구성되어 있다. 완충체의 구조재인 스틸케이스는 4 mm, 또는 10 mm의 두께를 가진 스테인리스강 ASME SA240 type304 또는 이와 동등한 재질로 설계하였다. 상하부의 완충체는 8개의 턴버클을 이용하여 결합된다. 상하부 완충체에는 턴버클 조립을 위한 리그가 용접되어 있다. 턴버클은 단조형으로 재질은 SUS를 사용하였다. 완충체 내부 및 외부 셸 사이는 구조형상 지지를 위하여 3 mm 두께로 원통형 셸과 스테인리스 강판 8개를 방사선 방향으로 설치하였다. 완

충체 내부 구조물은 다공판 형식으로 충격 시 쉽게 좌굴이 발생하는 구조를 갖고 있다.

### 3. 안전성 평가 해석

개발된 핫셀용 운반용기의 정상운반조건과 운반사고조건에 대한 안전성평가 해석을 수행하였다. 구조 해석의 경우, 각각의 운반조건하에서의 해석결과 및 응력비교를 정리하여 표 1에 나타내었다. 핫셀용 운반용기는 9m 낙하충격 후 ASME 한계응력인  $3.6S_m$  및  $3.0S_m$ (볼트)을 만족하였다. 여기서,  $S_m$ 은 설계응력 강도(Design stress intensity)를 의미하며 이는 재료의 고유 물성치이다. 일부 운반사고조건하에서 최대응력이 응력한계를 초과하였으나 이는 매우 국부적인 응력이거나 격납경계에서 떨어진 곳이므로 격납건전성에는 영향을 주지 않는 것으로 판단하였다. 최종적인 건전성 유지여부는 안전성시험으로 평가한다.

운반사고조건인 800°C 화재사고조건하에서 열 해석 평가를 수행하였다. 과도시간에 따른 운반용기의 주요부위에서의 온도시간이력, 운반용기 전체 모델의 온도분포, 반경방향 온도분포를 그림 2에 나타내었다. 핫셀용 운반용기의 방사선 차폐 해석을 Monte Carlo 방법을 사용하는 확률론적 범용 프로그램 MCNP를 사용하여 수행하였다. 핫셀용 운반용기의 MCNP 해석모델은 그림 3과 같다. 정상운반조건 및 가상사고조건에 대하여 차폐 해석을 수행하여 차폐성능이 충분히 보장되며 B-type 운반용기의 방사선 안전성이 충분히 입증됨을 증명하였다. 핫셀용 운반용기의 임계해석을 위해 NUREG-1617에 제시된 SCALE5 코드의 KENO-Va 모듈을 이용하여 해석을 수행하였다. 임계해석을 위해 고려한 운반용기 내부 단면도는 그림 3과 같다. 정상운반조건 및 가상사고조건에 대하여 임계안전성이 유지됨을 입증하였다.

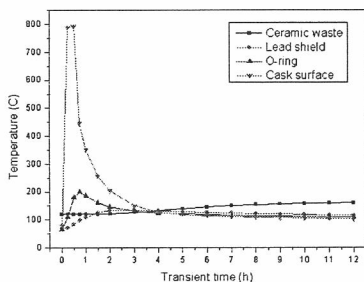


Fig. 2. Temperature history @ major components under fire accident.

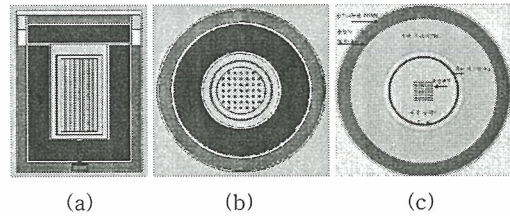


Fig. 3. (a) MCNP analysis model for the side, (b) MCNP analysis model for the section, and (c) criticality analysis model.

Table 1. Stress limit and maximum stress under the NOC and HAC.

		Normal operating conditions		Hypothetical accident conditions	
		Stress limit [MPa]	Max. stress [MPa]	Stress limit [MPa]	Max. Stress [MPa]
Bottom Down	P <sub>m</sub>	138	19.06	331	275.27
	P <sub>m</sub> +P <sub>b</sub>	207	21.43	497	275.27
Top down	P <sub>m</sub>	138	46.03	331	412.11
	P <sub>m</sub> +P <sub>b</sub>	207	46.03	497	412.11
Side	P <sub>m</sub>	138	245.61	331	238.02
	P <sub>m</sub> +P <sub>b</sub>	207	254.30	497	393.79
COG	P <sub>m</sub>	138	20.38	331	177.55
	P <sub>m</sub> +P <sub>b</sub>	207	21.13	497	340.73
Oblique (10°)	P <sub>m</sub>	138	110.88	331	295.75
	P <sub>m</sub> +P <sub>b</sub>	207	110.88	497	452.77

### 4. 결론

한국원자력연구원에서는 기존 핫셀 및 신규 핫셀에서 사용할 다목적 핫셀용 운반용기 3종을 개발하였다. 개발된 신규 핫셀용 운반용기에 대하여 구조, 열, 임계, 차폐분야의 해석을 통하여 안전성을 검증하였다. 해석결과와 이후 수행된 안전성 평가 시험결과를 비교하여 해석방법론의 타당성을 검증하였다. 또한, 개발된 핫셀운반용기가 정상운반조건 및 가상사고조건하에서 안전성을 확보함을 입증하였다. 개발된 핫셀용 운반용기는 KINS로부터 2011년 4월 설계인허가를 획득하였다.

### 5. 참고문헌

- [1] 최우석 외, “다목적 핫셀운반용기 및 접속시스템 개발”, 방폐학회, 춘계학회 논문집, pp.359-360, 2010.
- [2] 최우석 외, “방사성물질 수송용기의 개폐시스템 개발”, 방폐학회, 춘계학회 논문집, pp.285-286, 2008.