

## 중수로 사용후핵연료 운반용기의 개념설정 및 열안전성 평가

이주관, 방경식, 서중석, 서기석, 김범인\*, 최병일\*  
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045  
 \*한국방사성폐기물관리공단, 경북 경주시 북성로 89  
 sjclee@kaeri.re.kr

### 1. 서론

국내에서는 총 30만 다발 이상의 중수로 사용후 핵연료가 월성원전의 습식저장조 및 건식저장시설에서 임시저장 관리되고 있다. 월성원전에서는 습식저장조에서 건식저장시설까지 사용후핵연료의 소내운반을 위하여 HI-STAR 63[1] 운반용기를 개발하여 사용하고 있다. HI-STAR 63 운반용기는 60다발의 연료를 장전하는 바스켓 2개를 운반할 수 있다. 따라서 중수로 사용후핵연료를 중간저장시설 또는 처분시설로 운반하기 위하여 안전성 및 운반 효율성을 갖는 대용량 운반용기의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 5개의 바스켓(300다발)을 운반할 수 있는 대용량 중수로 사용후핵연료 운반용기의 개념설정 및 열전달 안전성을 평가하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 운반용기의 개념설정

운반용기의 기준연료는 기존의 HI-STAR 63 운반용기와 월성원전의 건식저장시설 설계에서 적용된 연료와 같은 연소도 7,800 MWd/tU, 냉각기간 6년으로 설정하였다.

그림 1은 운반용기의 개념도를 보여주고 있다. 운반용기는 원통형 구조를 가지며, 5개의 연료 바스켓이 장전되는 운반용기 본체와 상하부의 충격완충체로 구성된다. 바스켓에는 중심부로부터 원주방향으로 6, 12, 18, 24개씩의 중수로 연료다발을 배열하여 1개의 바스켓에는 총 60개의 연료다발이 장전된다. 따라서 5단 바스켓 운반용기의 용량은 중수로 사용후핵연료 300다발이다.

운반용기 본체와 밀봉덮개 사이에는 2개의 O-Ring을 장착하여 밀봉을 유지한다. O-ring은 Fluoro-carbon rubber 계열의 viton O-ring으로서 사용온도 범위는  $-40 \sim 250$  °C이다. 운반용기의 본체는 탄소강이고, 운반용기의 상하부에는 충격완충체가 설치된다. 충격완충체는 스테인리스강

케이싱 내부에 발사우드를 채워 넣는 구조이다. 충격완충체는 낙하사고조건에서 충격흡수를 하며, 화재사고조건에서 운반용기의 상하 방향으로 단열 기능을 한다.

바스켓은 직경이 1,067 mm, 높이가 557 mm이며, 운반용기의 내부 치수는 5단 바스켓의 적재공간을 고려하여 직경 1,090 mm, 높이 2,800 mm로 설계하였다. 운반용기의 차폐체는 두께 230 mm의 탄소강이다. 60다발의 연료를 포함한 바스켓 1개의 중량은 1,950 kg이므로 5단의 바스켓의 중량은 9,750 kg이고, 충격완충체를 포함한 운반용기의 총 중량은 42.9톤이다.

#### 2.2 열전달해석 조건 및 방법

중수로 사용후핵연료 운반용기는 B형 운반물로 구분되며, 국내·외 운반용기 관련 법규[2, 3]에서 규정하고 있는 정상운반조건 및 운반사고조건에서 안전성이 유지되어야 한다. 정상운반조건은 대기온도 38 °C, 최대 붕괴열 및 최대 일사량을 고려하였고 운반사고조건은 대기온도 38 °C의 정상조건 하에서 800 °C 화제가 30분 동안 진행된 후 자연 냉각조건이다.

운반용기의 형상은 원통형 구조이며, 열해석 모델은 그림 2와 같이 2차원 축대칭 모델을 사용하였다. 사용후핵연료 1다발의 붕괴열은 6.3 W이며, 총 붕괴열은 1,890 W로 고려하였다. 운반용기 내부의 핵연료 바스켓에는 60개의 연료다발이 일정한 간격으로 배열되며, 연료 다발을 전체를 3차원 모델링은 전산용량의 한계로 인하여 거의 불가능하다. 따라서 바스켓 내부의 모델링은 균질화 모델과 유효열전도도를 고려하여 2차원으로 모델링하였다.

중수로 사용후핵연료 운반용기 내부로부터 발생된 열은 내부 공간의 공기에 의한 대류 및 복사, 용기 본체를 통한 열전도, 용기 표면에서의 대류 및 복사열전달을 통하여 외부로 전달된다. 열해석을 위한 전산 프로그램은 범용 열 유동해석 코드인 FLUENT 코드를 사용하였다.

2.3 열전달해석 결과

표 1은 정상운반 및 화재사고조건에 대한 열 해석 결과를 보여주며, 그림 3은 과도시간에 따른 운반용기의 온도분포를 나타낸다. 일사량을 고려하지 않은 경우 운반용기의 표면온도는 법규에서 규정하는 허용온도인 85 °C보다 낮은 67 °C로 나타났다.

핵연료의 온도는 800 °C, 30분 화재 이후에도 온도가 상승하지 않고 초기온도와 같은 193 °C를 유지하였다. 바스켓의 온도는 정상조건에서 158 °C, 화재사고조건에서 최대 175 °C까지 상승하지만 ASME Sec.III의 제한치인 427 °C보다 훨씬 낮게 나타났다. 용기 본체의 온도는 화재사고조건에서 최대 518 °C까지 상승하지만 이온도는 외부 표면에서의 온도이고 격납경계를 이루는 용기본체 내벽의 온도는 최대 215 °C로 계산되어 ASME Sec.III에서 제한하는 허용치인 371 °C보다 낮다. 중수로 사용후핵연료 운반용기의 격납경계를 이루는 O-ring의 온도는 최대 130 °C까지 상승하지만 Viton O-ring의 허용온도가 250 °C이므로 운반용기의 격납 건전성이 충분될 것이다.

3. 결론

본 연구에서는 5개의 바스켓을 운반할 수 있는 중수로 사용후핵연료 운반용의 개념설계 및 열안전성을 평가하였다. 열 안전성 평가 결과 정상운반 및 운반사고에서 열적 건전성이 충분히 되는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 향후 중수로 사용후핵연료의 중간저장 또는 처분용 운반용기의 설계 및 인허가를 위한 기본 자료로 활용될 수 있을 것이다.

4. 감사의 글

본 논문은 한국방사성폐기물관리공단의 위탁 과제로 수행된 연구결과입니다.

5. 참고문헌

[1] Holtec Int., "Safety Analysis Report on the Hi-Star 63 Package", Holtec Report No. HI-2073777, 2009.  
 [2] 교육과학기술부 고시 제 2009-37호, "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정", 2009.

[3] IAEA Safety Standard Series No. TS-R-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 2005.

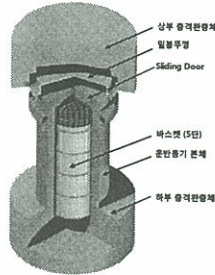


Fig. 1. Transport cask

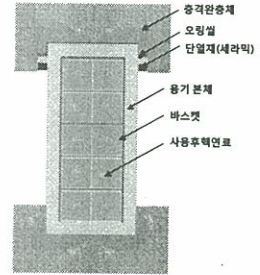
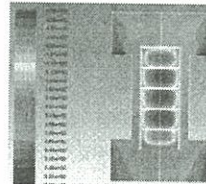
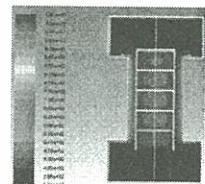


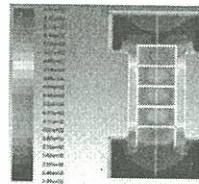
Fig. 2. Analysis Model



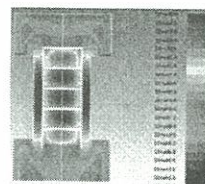
(a) Time = 0.5 h



(b) Time = 1.0 h



(c) Time = 2.0 h



(d) Time = 4.0 h

Fig. 3. Temperature contours for fire condition

Table 1. Thermal analysis results for normal and fire accident conditions

Location	Calculated temperatures (°C)							Max.
	Normal	Fire phase		Post fire (t>0.5 h)				
		0.25	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	
Fuel bundle	193	193	193	193	193	193	193	193
Fuel basket	158	158	158	158	173	175	170	175
O-ring seal	82	83	91	113	125	128	130	130
Cask body(inside)	90	108	164	215	209	192	177	215
Cask body	93	408	518	231	209	192	177	518
Cask surface	91	799	799	230	206	189	174	799