Pool Fire에서 금속용기의 열전달 핀 및 중성자차폐체가 미치는 열 적 영향

방경식*, 유승환, 이주찬, 서기석, 최우석
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
*nksbang@kaeri.re.kr

1. 서론

PWR 사용후핵연료 21다발을 운반 및 저장하기 위해 설계된 금속용기는 Fig. 1에서와 같이 원통형 몸체(cask body), 중성자 차폐체(neutron shield), 캐니스터(canister), 뚜껑(lid), 바스켓(basket), 및 충격 완충체(impact limiter)로 구성되어 있다. 금속용기 몸체는 탄소강으로 제작되었고, 외부 표면 및 뚜껑은 스테인리스강으로 제작되었다. 외부 표면과 몸체 사이는 중성자 차폐체인 NS-4-FR로 충진되었으며, 냉각핀이 설치되어 있다. 금속용기의 외부 직경은 2,126 mm이고, 전체 길이는 5,285 mm이며, 중량은 약 120 톤이다. 금속용기는 연소도(burn-up) 45,000 MWD/MTU, 냉각기간 10 년인 PWR 사용후핵연료 21다발을 적재할 수 있으며, 이들로부터 방출되는 붕괴열은 16.8 kW이다.

여기서는, 실제 금속용기의 1/6 slice 모델을 사용하여 법규 [1, 2]에서 규정하고 있는 800°C 이상의 화염 속에서 30 분 이상 방치한 후 자연 냉각시키는 열 시험을 수행하고 동일한 조건에 대한 열 해석을 수행하여 열전달 핀 및 중성자차폐체가 미치는 열 적 영향을 평가하였다.

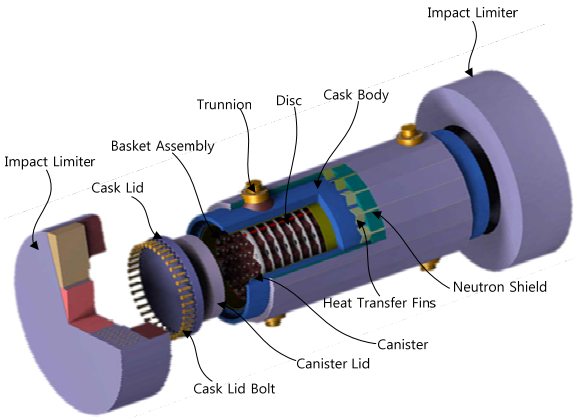

Fig. 1. Dual Purpose Cask.

2. 열 시험

열 시험은 법규에서 규정하고 있는 시험방법 중 open pool fire 방법으로 3.5 × 4.0 × 3.0 m 크기를 가진 화재시험설비에서 Fig. 2와 같이 수행되었다.

Fig. 2. Engulfed flame.

화재는 성장기(growth), 안정기(steady-state) 및 쇠퇴기(decay)의 단계를 거쳐 진행이 된다. Table 1은 화재시험동안 측정된 화염의 평균온도를 보여주고 있다. 점화 후 약 3 분 동안 성장기에서의 평균 화염온도는 239°C로 측정되었다. 성염이 된 후 안정기인 30 분 동안 평균 화염온도는 834°C로 법규에서 규정하고 있는 800°C 이상의 화염조건을 만족하였다. 안정기인 30 분이 지난 후 쇠퇴기 시작 후 3 분 동안 평균 화염온도는 611°C로 측정되었다.

Table 1. Average Flame temperature

위 치	시험 전	성장기	안정기	쇠퇴기	자연 냉각
		3분	30분	3분	
상 부	5°C	154°C	695°C	525°C	3°C
중앙부	5°C	253°C	844°C	611°C	3°C
하 부	5°C	280°C	917°C	667°C	3°C
평 균	5°C	239°C	834°C	611°C	3°C

열 시험에서 열전달 핀이 설치된 표면에서의 온도는 Sec.1에서 409°C, Sec.2에서 432°C, Sec.3에서 634°C였다. 그러나, 열전달 핀이 설치되지 않은 표면에서의 온도는 Sec.1에서 789°C, Sec.2에서 764°C, Sec.3에서 897°C였다. 이것은 화염에 의해 생성된 높은 열이 열전달 핀을 통해 시험모델 내부로 전달되었기 때문에 열전달 핀이 설치된 표면에서의 온도가 낮게 나타난 것이다.

중성자 차폐체인 NS-4-FR과 표면의 온도를 비교해 보면, 상부에서는 Sec.2의 표면온도는 516°C로 Sec.3의 표면온도 619°C보다 낮았다. 그러나, Sec.2의 중성자차폐체 온도는 101°C로 Sec.3의 중

성자차폐체 온도 78℃보다 높았다. 중앙부에서, Sec.2의 표면온도는 764℃로 Sec.3의 표면온도 897℃보다 낮았다. 그러나, Sec.2의 중성자차폐체 온도는 183℃로 Sec.3의 중성자차폐체 온도 170℃보다 높았다. 하부에서, Sec.1의 표면온도는 370℃로 Sec.2의 표면온도 340℃보다 높았다. 그러나, Sec.1의 중성자차폐체 온도는 70℃로 Sec.2의 중성자차폐체 온도 174℃보다 낮았다. 이것은 중성자차폐체가 연소할 때 주변의 잠열을 흡수하기 때문에 반대 현상이 나타난 것이다. 따라서, 중성자차폐체가 화염의 높은 열에 의해 연소할 때 금속용기 내부로의 열전달을 감소시키는 역할을 수행하게 된다.

3. 열 해석

Pool Fire 시험결과와 비교하기 위하여 FLUENT 상용 전산코드를 사용하여 열 해석을 수행하였다. Fig. 3은 열 해석모델을 보여주고 있다. 열 해석에서 화염온도는 Table 1과 같이 열 시험에서 취득한 구간 및 위치별 온도를 각각 적용하였다.

Table 2는 열 시험결과와 열 해석결과의 비교를 나타내고 있다. 열 시험에서 열전달 핀이 설치된 표면의 평균온도는 492℃였고, 열전달 핀이 설치되지 않은 표면의 평균온도는 816℃였다. 그러나, 열 해석에서는 열전달 핀이 설치된 표면의 평균온도는 738℃였고, 열전달 핀이 설치되지 않은 표면의 평균온도는 717℃였다. 열전달 핀은 두께가 얇기 때문에 해석에서 이를 정확히 모사하기 어렵기 때문에 중성자차폐체와 열전달 핀의 유효열전달 계수를 적용하여 나타난 결과이다.

중성자차폐체 부분에서 열 시험과 해석의 결과는 상당한 차이를 보여주고 있다. 이것은 금속용기 표면과 접촉되어 있는 중성자차폐체가 연소할 때 중성자차폐체가 주변의 잠열을 흡수하여 내부로의 열전달을 감소시키는 역할을 수행하지만, 해석에서는 이를 정확히 모사하는 것은 매우 어렵기 때문에 나타난 결과이다.

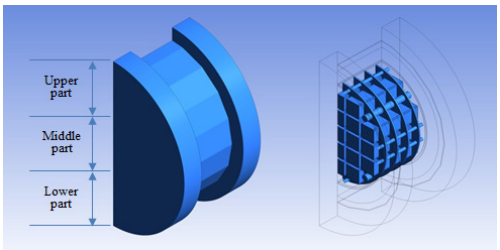

Fig. 3. Thermal Analysis Model.

4. 결론

금속용기의 열 시험 및 해석을 수행하여 비교 평가한 주요 결론은 다음과 같다.

i) 화염에 의해 생성된 높은 열은 열전달 핀을 통해 금속용기 몸체 내부로 전달되기 때문에 열전달 핀이 설치된 표면의 온도가 더 낮게 측정되었다.

ii) 중성자 차폐체가 연소할 때 중성자 차폐체는 주변의 잠열을 흡수한다. 따라서, 금송용기 내부로의 열전달은 감소되었다.

iii) 열 해석에서 열전달 핀 및 중성자차폐체의 연소효과를 정확히 모사하기는 매우 어렵다. 따라서, 금속용기의 열 적 건전성 평가는 열 시험을 통해 수행하는 것이 바람직하다.

Table 2. Comparison of the test and analysis results

Location \ Temp. (℃)		T/C No.	시험 Sec1	Sec2	Sec3	해석
상 부	Basket	3	33	32	32	39
	Canister	4	37	36	36	57
	Body	5	47	44	45	62
	NS-4-FR	6	101	101	78	187
	Surface	7	407	516	619	523
중앙부	Basket	10	31	30	30	43
	Canister	11	40	39	39	71
	Body	12	62	59	62	80
		12-1	103	92	73	78
	NS-4-FR	13	100	107	155	272
		13-1	153	183	170	330
	Surface	14	409	432	634	738
		14-1	789	764	897	717
하 부	Basket	17	28	28	28	47
	Canister	18	35	34	34	77
	Body	19	46	43	43	87
	NS-4-FR	20	70	174	103	286
	Surface	21	370	340	359	816

* 12, 13, 14 : with heat transfer fin
* 12-1, 13-1, 14-1 : without heta transfer fin

5. 참고문헌

[1] 원자력안전위원회 고시 제 2014-50, "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정", 2014.

[2] IAEA Safety standard Series No. SSR-6, "Regulations for Packaging and Transportation of Radioactive Material", 2012 Ed.