

1/2 축소모델을 사용한 사용후핵연료 수평 저장모듈 열 제거 성능시험

방경식, 이주찬, 서기석, 이관수*

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

*한양대학교, 서울특별시 성동구 행당동 17

nksbang@kaeri.re.kr

1. 서 론

사용후핵연료 수평 저장모듈은 사용후핵연료를 장전하는 canister와 수평모듈로 구성되며, 그림 1은 수평 저장모듈의 개요도를 보여주고 있다. 수평모듈은 콘크리트로 제작된 직사각형 구조물이며, 원통형 셀 구조물인 canister는 스테인리스 강 재질로 사용후핵연료 24다발을 저장할 수 있다. 수평모듈에는 PWR 사용후핵연료 집합체로부터 발생하는 붕괴열을 외부 환경으로 적절히 방출하기 위한 피동 열 제거 시스템을 설계하였다.

열 제거 성능시험은 수평 저장모듈 실제 크기의 1/2로 축소한 모델을 사용하여 수행하였다. 시험모델 canister의 뚜껑에는 전기히터를 위한 24개의 홀과, 열전대를 위한 24개의 홀을 가지고 있으며, 사용후핵연료 집합체 24다발을 모사하기 위한 전기히터들은 canister 내부의 바스켓에 설치되었고, swage lock에 의해 canister 뚜껑에 고정되어 밀봉되었다.

Canister 내부의 사용후핵연료에 의해 발생하는 열은 전도, 대류 및 복사에 의해 canister 표면으로 전달되며, 이 열은 대류와 복사를 통해 over-pack 및 모듈의 내부 표면으로 전달된다.

Over-pack 또는 모듈 몸체를 통해 전도된 열은 over-pack 또는 모듈의 표면으로부터 주변 대기로 대류와 복사에 의해 방출되며, 다음과 같은 식(1)로 표현할 수 있다[1].

$$q_s = hA(T_s - T_a) + \sigma \epsilon A(T_s^4 - T_a^4) \dots\dots\dots (1)$$

수평 저장모듈의 피동 열 제거시스템 공기 출구를 통해 주변 대기로 방출되는 열전달은 식(2)와 같이 표현할 수 있다[2].

$$q_A = \dot{m} C_p \Delta T \dots\dots\dots (2)$$

2. 열 제거시험

열 제거시험은 주변온도의 영향을 최소화하기 위해 5.0 m × 6.0 m × 5.0 m의 제원을 가진 열적으로 절연된 house에 시험모델을 설치하고, 히터 하나당 열 유량 약 189 watt씩 24개의 전기히터로부터 총 약 4.5 kW의 열 유량을 적용하여 수행하였다.

표 1은 정상조건하에서 공기 입·출구의 방향이 양 측면인 경우(이하 1차 정상조건)와 전·후면인 경우(이하 2차 정상조건)에서 측정된 시험모델의 최고 온도들을 보여주고 있다. 1차 정상조건 및 2차 정상조건에서 측정된 모델 각 부분의 온도를 비교해 보면 2차 정상조건에서 측정된 모델의 온도가 1차 정상조건 및 2차 정상조건에서 측정된 주변온도(T_{∞})의 차이 만큼인 약 3 °C 정도 높게 나타났음을 알 수 있고, 피동 열 제거시스템의 공기 출구를 통한 열전달은 각각 약 91.5 % 및 91.3 %로 평가되었다. 따라서, 공기 입구 및 출구방향이 전·후면에 위치하든 좌·우측면에 위치하든 동일한 면적을 갖추었다면 위치에 따른 영향은 별로 없음을 알 수 있었다.

표 2는 정상조건시험결과와 비정상조건시험결과와의 비교를 보여주고 있다. 비정상운전조건 시험결과를 보면 시험모델의 주변온도는 25 °C로 측정되었고, 공기 흡입구에서의 유속은 0.42 m/s로 정상조건보다 높게 측정되었으며, 출구에서의 유속은 0.54 m/s로 정상조건보다 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 공기 흡입구의 유로면적이 1/2로 줄어 흡입구에서의 유속은 빨라졌지만 유입되는 유량이 적어 출구에서의 유속이 감소되는 것으로 판단되며, 공기 출구를 통한 열전달은 각각 약 87.2 %로 평가되었다. 비정상

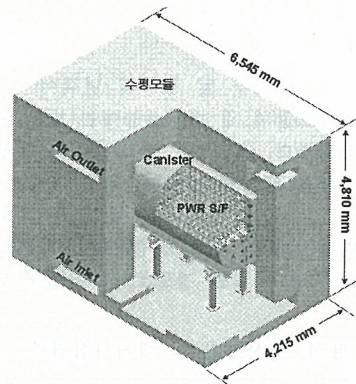


그림 1. 수평 저장모듈.

조건시험에서의 전체적인 사항을 평가하여 보면 공기 입구가 1/2 막히면서 건식저장시스템인 수평모들의 국부적인 온도상승을 발생시킬 수 있는 편류는 발생하지 않았다. 따라서, 공기 입구가 1/2 막혀도 온도상승에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

1차 정상조건시험에서의 공기 입·출구비는 0.64이다. 따라서, 공기 입·출구비가 0.64인 조건, 0.8인 조건 및 1.0인 조건에서 측정된 모델 각 부분의 온도를 표 3에 비교해 보았다. 1차 정상조건시험에서의 주변온도는 24 °C로 입·출구비가 0.8 및 1.0인 조건의 주변온도 26 °C보다 2 °C 정도 낮았음을 감안하여 보면 전체적으로 약 2 °C 정도씩 높아졌음을 알 수 있었다. 표 4는 공기 입·출구비가 0.64, 0.8 및 1.0인 조건에서 평가된 공기 입구에서의 유량 및 공기 출구에서의 질량 유동률을 보여주고 있다. 표 4에서 보면 공기 입구가 작아질수록 공기 유량이 작아지고, 그에 따라 출구에서의 공기 유속이 감소되어 출구를 통해 대기로 빠져 나가는 질량 유동률이 감소됨에 따라 전체적인 열 제거 효율이 떨어짐을 알 수 있었다. 그러나, 사용후핵연료 및 콘크리트의 건전성에 영향을 미칠 정도의 온도 상승은 발생치 않은 것으로 판단된다.

3. 결 론

공기 입구 및 출구의 면적이 동일하다면 방향이 전·후면에 위치하든 좌·우측면에 위치하든 수평 저장모들의 열 제거성능에는 별다른 영향을 미치지 않으며, 공기 입구의 1/2이 막히는 상황에서 수평 저장모들의 국부적인 온도상승을 발생시킬 수 있는 편류는 발생하지 않으며, 전체적인 온도상승에 크게 영향을 미치지 않는다. 수평 저장모들의 공기 입구가 작아질수록 출구를 통해 빠져 나가는 질량 유동률이 감소하여 전체적인 열 제거 효율이 떨어지지만 사용후핵연료 및 콘크리트의 열 적 건전성에 영향을 미칠 정도의 온도 상승은 발생하지 않았다. 그러므로, 사용후핵연료 및 콘크리트의 열 적 건전성에 영향을 미치지 않는 정도로 공기 입구 및 출구를 크지 않게 제작하는 것이 바람직할 것이다.

표 1. 정상조건 열 제거시험결과

Location 구 분	Temperatures(°C)							Amb.
	Basket			Canister	Module			
	B1	B2	B3	Surface	Inner	Outer		
상 부	1차	210	216	206	127	46	33	24
(Sec.II)	2차	213	218	209	132	49	36	27

표 2. 정상 및 비정상조건 열 제거시험결과비교

Location 구 분	Temperatures(°C)							Amb.
	Basket			Canister	Module			
	B1	B2	B3	Surface	Inner	Outer		
상 부	정 상	210	216	206	127	46	31	24
(Sec.II)	비정상	217	222	213	134	54	39	25

표 3. 정상 및 비정상조건 열 제거시험결과비교

Location 입·출구비	Temperatures(°C)							Amb.
	Basket			Canister	Module			
	B1	B2	B3	Surface	Inner	Outer		
상 부	0.64	210	216	206	127	46	33	24
(Sec.II)	0.8	214	219	210	131	50	36	26
	1.0	216	220	211	132	51	37	26

표 4. 입·출구비에 따른 질량 유동률 및 열전달률

Location 입·출구비	입구 유량 (m ³ /s)	출구 질량 유동률 (kg/s)	출구 열전달	
			Watt	비율 (%)
0.64	0.130	0.229	4151	91.5
0.8	0.087	0.218	3848	84.8
1.0	0.071	0.187	3492	77.0

[참고문헌]

- [1] F.P. Incropera, D.P. Dewitt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th Edition, 2002, John Wiley & Sons, New York.
- [2] R.L. Street, G.Z. Watters, and J.K. Vennard. Elementary Fluid Mechanics, 7th Edition, 1996, John Wiley & Sons, New York.