수평모듈 정상 및 비정상조건 열전달시험

방경식, 이주찬, 서기석, 이경호*, 이대기*

한국원자력연구원
대전광역시 유성구 덕진동 150
*한국수력원자력(주) 원자력발전기술원
대전광역시 유성구 장동 25-1

사용후핵연료 건식 저장방식은 크게 저장용기, vault 및 silo 방식으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 이들 가운데 silo 방식 중 하나인 수평모듈 방식에 대한 정상조건 및 비정상조건에 대한 열전달시험을 통해 수평모듈의 열 전달성능을 평가하였다.

수평모듈은 사용후핵연료를 장전하는 canister와 모듈로 구성된다. 모듈은 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. 수평모듈은 하부에 설치된 공기 흡입구 4개와 상부의 공기 출구 4개에 의해 발생하게 된다.

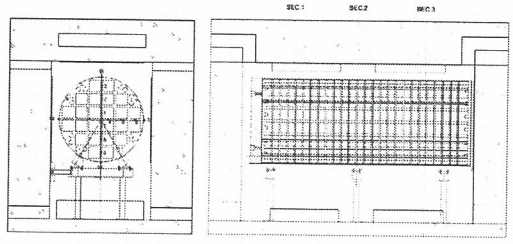

그림 1. 수평모듈 시험모델.

열 시험은 수평모듈 실제 크기의 1/2로 축소한 모델을 사용하여 수행하였다. 그림 1은 수평모듈 시험모델의 단면도를 보여주고 있다. 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 발생되는 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].

$$q_s = hA(T_s - T_a) + \sigma\epsilon A(T_s{}^4 - T_a{}^4) \quad \cdots\cdots (1)$$

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

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

열 시험은 주변온도의 영향을 최소화하기 위해 5.0 m × 6.0 m × 5.0 m의 체원을 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 측정된 수평모듈 모델의 최고 온도들을 보여주고 있다. 시험모델의 열평형은 모두 약 120시간 경과 후 도달하였으며, 그 상태를 2일간 유지하였다. 전체적인 온도를 비교해 보면 section II에서의 온도가 가장 높게 측정되었다. 이것은 캐니스터가 모듈에 수평으로 놓여 있기 때문에 나타난 결과로 수평가열조건에서 중심부의 온도가 가장 높게 나타나는 현상을 전형적으로 잘 보여주고 있다. Section I과 section III의 온도를 비교해 보면 section I에서의 온도보다

section III에서의 온도가 높음을 알 수 있다. 이것은 section I 부분은 콘크리트 module과 다소의 공간을 가지고 있어 대류에 의한 유동이 발생하였지만 section II 부분은 콘크리트 module 부분과 거의 공간이 없이 접촉되었기 때문에 전도에 의한 영향을 받아 나타난 결과로 판단된다.

바스켓에서의 온도를 비교해보면 가장 높은 위치인 B3보다 B2의 온도가 216 ℃로 가장 높게 측정되었다. 그것은 캐니스터 상부표면부분에 공기 출구가 위치해 있기 때문에 대류의 영향을 받아서 나타난 결과로 판단된다.

콘크리트 module에서 측정된 최고온도는 모듈 내부의 상부에서 46 ℃로 측정되었으며, module 표면에서의 평균온도는 상부 33 ℃, 중앙부 28 ℃ 및 바닥면은 20 ℃로 측정되었다. 공기 흡입구에서의 온도 및 유속은 평균 23 ℃ 및 0.31 m/s, 출구에서의 온도 및 유속은 평균 41 ℃ 및 0.75 m/s로 측정되었다. 이들 측정값들로부터 module의 표면을 통한 열전달은 약 8 %이며, 피동 열제거시스템의 공기 출구를 통한 열전달은 약 92 %임을 알 수 있다.

표 2는 비정상운전조건시험에서 열평형상태에 도달한 후 측정된 시험모델의 최고온도를 보여주고 있다. 시험모델은 정상조건과 마찬가지로 약 120시간 경과 후 열 평형상태에 도달하였고, 그 상태를 2일간 유지하였다. 비정상운전조건 시험결과를 보면 시험모델의 주변온도는 25 ℃로 측정되었으며 온도분포의 경향은 정상운전조건과 마찬가지의 경향을 보여주었다. 공기 흡입구에서의 유속은 0.42 m/s로 정상조건보다 높게 측정되었으며, 출구에서의 유속은 0.56 m/s로 정상조건보다 유속이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 공기 흡입구의 유로면적이 1/2로 줄어 흡입구에서의 유속은 빨라졌지만 유입되는 유량이 적어 출구에서의 유속이 감소되는 것으로 판단된다.

정상운전조건 시험결과와 비정상운전조건 시험결과를 비교해 보면 주변온도를 고려할 때 비정상운전조건의 시험결과가 정상운전조건의 시험결과보다 약 1℃~7℃정도 높게 측정되었을 것으로 예측할 수 있다. 따라서, 비정상운전조건에서 공기 흡입구가 1/2 막히면서 편류가 발생하지만 이 편류가 건식저장시스템인 수평모듈의 온도상승에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

표 1. 정상조건 열전달시험 결과 온도분포

Location		Maximum Temperatures (℃)					
		Basket	Canister	Module		Inlet	Outlet
				Inside	Outside		
Upper	I	187	115	43	34	23	41
	II	216	128	46	33	-	-
	III	204	124	44	34	23	41

표 2. 비정상조건 열전달시험 결과 온도분포

Location		Maximum Temperatures (℃)					
		Basket	Canister	Module		Inlet	Outlet
				Inside	Outside		
Upper	I	194	121	51	37	25	48
	II	222	134	54	39	-	-
	III	210	130	52	39	25	51

[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.

감사의 글

본 연구는 (주)한국수력원자력으로부터 수탁사업의 일환으로 수행되었음.