

건식 저장시스템 열 시험 평가

방경식, 이주찬, 서기석, 이경호*, 이대기*

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

사용후핵연료 건식 저장방식은 크게 저장용기, vault 및 silo 방식으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 이들 가운데 저장용기 방식 중 하나인 콘크리트 저장용기 방식과 silo 방식 중 하나인 수평모듈 방식에 대한 정상조건에 대한 열 시험을 통해 열 적 성능을 비교 평가하였다.

콘크리트 저장용기는 사용후핵연료를 장전하는 canister와 over-pack으로 구성된다. Over-pack은 원통형 셸 구조물로서 내·외부의 탄소강 셸 사이에 차폐체인 콘크리트가 채워지며, 스테인리스 강 재질의 원통형 셸 구조물인 canister에는 사용후핵연료 24다발을 저장할 수 있다.

수평모듈은 사용후핵연료를 장전하는 canister와 모듈로 구성된다. 모듈은 콘크리트로 제작된 직사각형 구조물이며, 원통형 셸 구조물인 canister는 스테인리스 강 재질로 사용후핵연료 24다발을 저장할 수 있다.

콘크리트 저장용기 및 수평모듈에는 PWR 사용후핵연료 집합체로부터 발생하는 붕괴열을 외부 환경으로 적절히 방출하기 위한 피동 열 제거 시스템을 설계하였다. 콘크리트 저장용기는 하부에 설치된 공기 흡입구 8개와 상부의 공기 출구 8개에 의해 발생하게 되며, 수평모듈은 하부에 설치된 공기 흡입구 4개와 상부의 공기 출구 4개에 의해 발생하게 된다.

열 시험은 콘크리트 저장용기 시험모델 및 수평모듈 시험모델 모두 실제 크기의 1/2로 축소된 모델을 사용하여 수행하였다. 그림 1은 콘크리트 저장용기 모델의 단면도를 보여주고 있으며, 그림 2는 수평모듈 모델의 단면도를 보여주고 있다. 두 모델 모두 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].

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

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

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

열 시험은 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 1 및 2는 정상조건하에서 측정된 콘크리트 저장용기 모델 및 수평모듈 모델의 최고 온도들을 보여주고 있다. 시험모델의 열평형은 모두 약 120시간 경과 후 도달하였으며, 그 상태를 2일간

유지하였다. Over-pack 표면의 온도는 평균 36 °C로 측정되었으며, 공기 흡입구에서의 온도 및 유속은 평균 27 °C 및 0.49 m/s, 출구에서의 온도 및 유속은 평균 73 °C 및 0.72 m/s로 측정되었다. 이들 측정값들로부터 over-pack의 표면을 통한 열전달은 약 17 %이며, 피동 열 제거시스템의 공기 출구를 통한 열전달은 약 83 %임을 알 수 있다.

Module 표면의 온도는 평균 34 °C로 측정되었으며, 공기 흡입구에서의 온도 및 유속은 평균 23 °C 및 0.31 m/s, 출구에서의 온도 및 유속은 평균 41 °C 및 0.75 m/s로 측정되었다. 이들 측정값들로부터 over-pack의 표면을 통한 열전달은 약 8 %이며, 피동 열 제거시스템의 공기 출구를 통한 열전달은 약 92 %임을 알 수 있다.

표 1과 2를 비교해 보면 basket에서의 온도는 콘크리트 저장용기가 높으며, canister에서의 온도는 수평모듈이 높음을 알 수 있다. 이것은 수평모듈의 경우 canister가 수평으로 놓여 콘크리트 저장용기보다 열 유동이 잘 발생하지 않기 때문에 내부 사용후핵연료의 온도를 낮추기 위해 canister 내부에 열전달 목적의 plate를 설치하였기 때문으로 판단된다.

표 2의 basket의 온도를 보면 section I 부분이 section III에서의 온도보다 가장 낮음을 알 수 있다. 이것은 over-pack과 module 사이의 공간이 section I 부분이 section III보다 커서 유동이 좀 더 잘 일어났기 때문으로 판단된다.

Inlet과 outlet에서의 온도를 비교해보면 콘크리트 저장용기에서의 온도가 수평모듈에서의 온도보다 높음을 알 수 있다. 이것은 수평모듈의 inlet 및 outlet의 면적이 0.274 m²으로 콘크리트 저장용기의 면적인 0.102 m²보다 약 2.7배 크기 때문에 공기 출구를 통한 열전달이 더 많았기 때문으로 판단된다.

외부 구조물인 콘크리트 재질의 over-pack과 module의 온도를 살펴보면 over-pack의 온도가 module의 온도보다 높음을 알 수 있다. 이것은 수평모듈의 경우 module과 canister 사이의 공간이 작아 콘크리트의 온도가 올라가는 것을 방지하여 구조물인 콘크리트의 열 적 건전성을 유지시키기 위하여 module의 내부에 열 차단판을 설치하였기 때문으로 판단된다.

표 1. 열 시험 결과 온도분포

Location		Maximum Temperatures (°C)					
		Basket	Canister	Over-pack		Inlet	Outlet
				Inside	Outside		
Upper	0°	259	116	53	36	27	70
	90°	259	121	54	36	27	76

표 1. 열 시험 결과 온도분포

Location		Maximum Temperatures (°C)					
		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

[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.