

## 건식 저장용기 열 시험

방경식, 이주찬, 서기석, 김호동, 정기정, 조천형\*, 이연도\*, 이흥영\*

한국원자력연구소 대전광역시 유성구 덕진동 150  
 \*한국수력원자력(주) 대전광역시 유성구 덕진동 150

건식 저장용기는 over-pack과 캐니스터 두 개의 요소로 구성된다. Over-pack의 구조재는 탄소강으로 제작되었으며, 그 내부는 방사선 차폐를 위해 콘크리트로 채워져 있다. 건식 저장용기의 외경은 3,550 mm이고, 높이는 5,885 mm로서 총 중량은 약 135 톤이다. 건식 저장용기는 연소도 55,000 MWD/MTU, 냉각기간 7년인 PWR 사용후연료 집합체 24다발을 저장할 수 있으며, PWR 사용후연료 집합체 24다발로부터 발생하는 총 붕괴열은 25.2 kW이다.

열 시험은 건식 저장용기 실제 크기의 1/2로 축소된 모델을 사용하여 수행하였다. 그림 1은 열 시험 모델의 단면도를 보여주고 있다. 캐니스터의 뚜껑에는 전기히터를 위한 24개의 홀과, 열전대를 위한 24개의 홀을 가지고 있다.

사용후연료 집합체 24다발을 모사하기 위한 전기히터들은 캐니스터 내부의 바스켓에 설치되었으며, swage lock에 의해 캐니스터 뚜껑에 고정되어 밀봉되었다.

캐니스터 내부의 사용후연료에 의해 발생하는 열은 전도, 대류 및 복사에 의해 캐니스터 표면으로 전달되며, 이 열은 대류와 복사를 통해 over-pack의 내부 표면으로 전달된다.

건식 저장용기의 차폐체는 콘크리트이다. 콘크리트는 열전도율이 매우 낮기 때문에 건식 저장용기는 캐니스터로부터 열을 over-pack과 캐니스터 사이의 공간을 통한 thermo-siphon 현상에 의해 방출하기 위해 공기 흡입구 8개 및 공기 출구 8개로 구성된 피동 열 제거시스템을 설계하였다. 그러므로, over-pack으로부터 주변 대기로의 열전달은 두 가지 메커니즘에 의해 성취된다. Over-pack의 몸체를 통해 전도된 열은 over-pack의 표면으로부터 주변 대기로 대류와 복사에 의해 방출되며, 다음과 같은 식(1)로 표현할 수 있다[1].

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

건식 저장용기 피동 열 제거시스템의 공기 출구를 통해 주변 대기로 방출되는 열전달은 식(2)와 같이 표현할 수 있다[2].

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

건식 저장용기 열 시험은 주변온도의 영향을 최소화하기 위해 5.0 m × 5.0 m × 5.0 m의 제원을 가진 열적으로 절연된 house에 시험모델을 설치하고, 그림 1에서의 같이 모델 및 주변온도측정을 위해 105개의 열전대를 설치하고, 유속측정을 위해 공기 흡입구에 열선 타입의 유속계 3개를 출구에 프로펠러 타입의 유속계 3개를 설치한 후, 히터 하나당 열 유량 약 189 watt씩 24개의 전기히터로부터 총 약 4.5 kW의 열 유량을 적용하여 수행하였다.

표 1은 정상조건하에서 측정된 모델의 최고 온도들을 보여주고 있다. 시험모델의 열평형은 약 120시간 경과 후 도달하였으며, 그 상태를 2일간 유지하였다. Over-pack 표면의 온도는 평균 28 °C로 측정되었으며, 공기 흡입구에서의 온도 및 유속은 평균 21 °C 및 0.49 m/s, 출구에서의 온

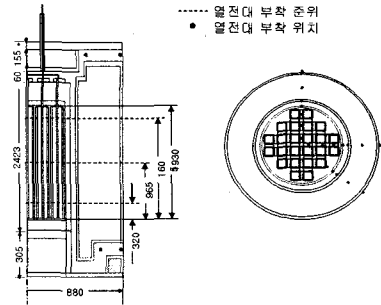


그림 1. 모델의 단면도.

도 및 유속은 평균 66 °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. 따라서, 피동 열 제거시스템의 성능이 잘 유지됨을 알 수 있었다.

바스켓의 온도는 상부와 중앙부가 유사하게 측정되었다. 이것은 캐니스터 뚜껑과 바스켓 상부 사이의 공간이 4 mm로 아주 작아 유동이 발생하지 않았기 때문에 일어난 현상이다.

캐니스터 표면 및 over-pack의 온도는 135° 방향에서 가장 높게 측정되었다. 공기 흡입구 및 출구에서의 온도차는 0° 방향이 50 °C로 가장 크게 낮으며, 135° 방향이 42 °C로 가장 적었다. 이와 반대로 공기 흡입구 및 출구에서의 유속의 차는 0° 방향이 0.16 m/s로 가장 적었으며, 135° 방향이 0.32 m/s로 가장 컸다. 이 결과로부터 0° 방향에서는 0.0075 m<sup>3</sup>/s의 공기가 유입되어 0.0096 m<sup>3</sup>/s의 공기가 빠져 나가지만, 135° 방향에서는 0.0055 m<sup>3</sup>/s의 공기가 유입되어 0.0096 m<sup>3</sup>/s의 공기가 빠져나감을 알 수 있다. 이것은 캐니스터 내부의 바스켓이 135° 방향으로 접촉되었기 때문에 나타난 결과이다. 표 2는 캐니스터 뚜껑과 바스켓 상부 사이의 공간을 67.5 mm로 확장하고, over-pack과 캐니스터 사이의 공간과 캐니스터와 바스켓 사이의 공간이 동일하도록 조정 한 후 시험한 결과로서 캐니스터 내부 공간에서 열유동이 잘 발생하고 있음을 알 수 있다.

건식 저장용기 열 시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, 건식 저장용기의 피동 열 제거시스템은 잘 설계되었다. 두 번째, 캐니스터 내부에서의 유동이 잘 일어나도록 하기 위해서는 캐니스터 뚜껑과 바스켓 상부 사이에는 유동을 위한 적절한 공간이 마련되어야 한다. 세 번째, 건식 저장용기의 국부적인 온도 상승을 방지하기 위해서는 over-pack과 캐니스터의 사이뿐만 아니라 캐니스터와 바스켓 사이의 공간은 동일한 거리를 유지하여야 한다.

표 1. 열 시험 결과 온도분포

Location	Maximum Temperatures (°C)					
	Basket	Canister	Over-pack		Inlet	Outlet
			Inside	Outside		
0°	Upper	284	110	45	28	
	Middle	285	106	38	26	
	Lower	212	84	31	24	21
90°	Upper	283	120	47	28	65
	Middle	286	108	40	26	
	Lower	214	85	32	24	21
135°	Upper	263	126	47	29	63
	Middle	263	114	40	27	
	Lower	171	87	32	24	21

표 2. 모델 수정 후 열 시험결과 온도분포

Location	Maximum Temperatures (°C)					
	Basket	Canister	Over-pack		Inlet	Outlet
			Inside	Outside		
0°	Upper	259	116	53	36	72
	Middle	240	105	46	34	
	Lower	177	-	39	32	27
90°	Upper	259	121	54	36	81
	Middle	239	110	47	34	
	Lower	176	88	40	32	27
135°	Upper	-	-	-	37	80
	Middle	-	-	-	35	
	Lower	-	-	-	32	27

[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 한국수력원자력(주)으로부터 수탁사업의 일환으로 수행되었음.