

콘크리트 저장용기 입·출구 Bird-screen의 Mesh 크기에 따른 열 유동시험

방경식*, 유승환, 이주찬, 서기석, 최우석

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*nksbang@kaeri.re.kr

1. 서 론

저장관련 법규인 10CFR72[1] 및 NUREG-1536 [2]의 규정에 따라 콘크리트 저장용기는 피동 열 제거시스템을 갖추어야 한다. 콘크리트 저장용기 주요 차폐체인 over-pack 내의 콘크리트는 열 특성이 좋지 않기 때문에 콘크리트 저장용기의 over-pack에 공기 입구 및 출구를 설계하여 피동 열 제거시스템을 구성하게 된다. 콘크리트 저장용기의 공기 입구 및 출구의 개구부에 설치되는 bird-screen은 mesh 규격에 따라 열 제거성능에 미치는 영향이 달라질 것이다. 전산 soft-ware를 사용하여 bird-screen의 mesh 크기에 따른 영향을 해석적으로 평가하기는 매우 어렵다. 따라서, 정상조건하에서 공기 입구 및 출구의 개구부에 설치되는 bird-screen mesh 규격을 여러 가지로 적용한 열 유동시험을 수행하여 mesh 크기에 따른 열 제거성능을 평가하였다.

2. 열 유동시험

2.1 시험모델

열 유동 성능시험에 사용된 시험모델은 콘크리트 저장용기의 full scale 모델로 사용후핵연료가 장전되는 canister와 over-pack으로 구성되었다. Over-pack에는 경수로 사용후핵연료 집합체로부터 발생하는 붕괴열을 thermo-siphon 현상에 의해 외부 환경으로 적절히 열을 제거할 수 있도록 피동 열 제거 시스템이 설계되어 있다. 피동 열 제거 시스템은 하부에 공기 흡입구 4개 및 상부의 공기 출구 4개로 구성되어 있으며, 하부에는 공기 흡입구를 통해 들어온 공기가 적절히 분배될 수 있도록 방사형 구조물이 설계되어 있다.

콘크리트 저장용기의 열 유동 성능시험에서 온도를 측정하기 위한 열전대는 canister 표면, over-pack 내부표면, over-pack 내부의 콘크리트 및 over-pack 외부표면에 34°, 124° 및 214° 방향으로 각 6개씩의 열전대를 부착하였으며, 공기 입구 및 출구에 각 3개, 그리고 뚜껑 부위에 2개를 포함하여 총 80개의 열전대를 부착하였다.

유속을 평가하기 위한 유속계로는 두 가지 type을 사용하였다. 시험모델의 공기 입구는 낮은 온도 영역에서 사용되는 열선(hot wire type) 유속계를 사용하였으며, 공기 출구에는 비교적 높은 온도에서 사용할 수 있는 바람개비(vane type) 유속계를 사용하였다.

2.2 열 유동시험

열 유동시험은 Fig. 1과 같이 시험 건물 내에 시험모델을 설치하고, 태양 복사열이 없는 고요하고 정지된 주변온도에서 전기히터로부터의 총 열 유량은 16.8 kW를 적용하여 수행하였다. 시험은 공기 입구 및 출구 개구부에 mesh 규격에 따른 bird-screen을 설치한 후 열전대와 측정계통이 이상 없이 작동하는 것을 확인하고 전기히터를 가동하여 정상조건하에서 모델의 온도분포가 열평형 상태에 도달한 후 이를 동안 그 상태를 유지하였다. Bird-screen mesh의 규격에 따른 열 유동시험은 Table 1과 같이 4개의 경우에 대하여 수행되었다.



Fig 1. Test House.

Table 1. Bird-screen Mesh Size

Mesh	Wire Dia.(mm)	Opening (mm)	Open Area(%)
4	0.71	5.64	78.9
6	0.71	3.53	69.6
8	0.71	2.46	60.2
10	0.71	1.40	43.6

Table 2. Maximum Temperature

구분	Temperatures (°C)				
	Canister Surface	Over-pack			Amb.
		Inner Surface	Concrete Center	Outer Surface	
4	131	54	39	31	20
6	123	45	31	23	10
8	139	63	47	39	26
12	140	65	49	39	26

첫 번째 열 유동시험은 미국의 Hi-Storm 100 콘크리트 저장용기에 적용된 mesh 규격인 #6을 적용하여 수행하였다. 시험모델의 온도분포는 약 216 시간 경과한 후 열평형 상태에 도달하였으며, 주변온도는 평균 약 10°C로 측정되었다. 시험모델에서 측정된 최고온도는 Table 2에서와 같이 canister 표면에서는 123°C, over-pack 내부표면은 45°C, over-pack 내부의 콘크리트 중심은 31°C, 그리고 over-pack 외부표면은 23°C로 측정되었다.

Bird-screen mesh의 규격에 따른 열 유동시험은 3월 초에 시작하여 5월 중순에 종료되었다. 따라서, 시험건물 내의 모델 주변온도는 Table 2에서와 같이 10 ~ 26°C로 측정되었다.

콘크리트 저장용기의 canister 표면의 온도는 피동 열 제거시스템을 통해 들어오는 공기의 영향을 직접적으로 받게 된다 [3]. 따라서, 가장 높게 측정된 주변온도인 26°C로 가정해 보면, mesh 4, 6, 8, 12의 경우에 Canister 표면온도는 각각 137°C, 139°C, 139°C, 140°C로 평가할 수 있으므로, 온도차는 1°C ~ 3°C로 나타났다. 따라서, mesh의 크기 변화가 canister 표면의 온도 상승에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가된다.

Over-pack에서의 온도는 열 관성이 발생하므로 주변온도의 차이보다는 다소 작게 나타날 것이다. 그렇지만 단순 비교를 위해 주변온도 차만큼을 고려해 보면,

- 내부표면의 온도차는 1 ~ 5°C, 콘크리트 중심의 온도차는 2 ~ 4°C로 나타났다. 이것은 mesh의 크기 변화가 over-pack 구성품의 온도 상승에는 영향을 미치는 것으로 평가된다.

- Over-pack 표면의 온도차는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, canister 표면에서와 마찬가지로 mesh의 크기 변화가 over-pack 표면의 온도 상승에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가된다.

Mesh 4, 6, 8, 12의 경우에 피동 열 제거시스템

을 통해 자연대류에 의해 외부로 전달되는 열은 각각 84.8%, 78.1%, 74.9% 및 68.8%로 평가되었다. 따라서, mesh의 크기가 작아질수록 피동 열 제거 시스템을 통해 자연대류에 의해 제거되는 열은 작아지고, 콘크리트 저장용기의 온도는 높아짐을 알 수 있다.

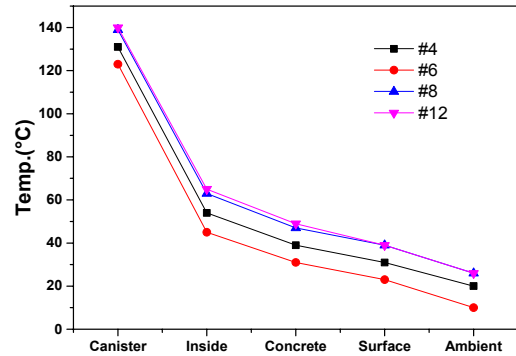


Fig. 2. Temperature according to Mesh Size.

3. 결 론

콘크리트 저장용기의 공기 입·출구 개구부의 bird-screen mesh 규격에 따른 열 유동시험결과 mesh의 크기 변화가 온도 상승에 미치는 영향은 다음과 같다.

- Canister 표면과 over-pack 표면의 온도 상승에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가되었다.
- Over-pack 구성품의 온도 상승에는 영향을 미치는 것으로 평가되었다.
- Mesh의 크기가 작아질수록 피동 열 제거 시스템을 통해 자연대류에 의해 제거되는 열은 작아지고, 콘크리트 저장용기의 온도는 높아졌다.

4. 참고문헌

- [1] U.S Code of Federal Regulations, Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel and High-level Radioactive Waste, Part 72, Title 10, "Energy", 2005.
- [2] NUREG-1536, Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Cask Storage Systems, U.S. NRC Washington, DC, July 2010.
- [3] Bang, K.S., Yu, S.H., Lee, S.H., Lee, J.C., and Seo, K.S., 2015, "Experimental Investigation of Heat Removal Performance of a Concrete Storage Cask", Annals of Nuclear Energy 85, 679-686.