사용후연료 건식저장시스템 콘크리트 수평저장모듈의 열적 거동 분석

김형진,이대기
한국수력원자력(주) 원자력발전기술원, 대전광역시 유성구 장동 25-1
hedgehog@khnp.co.kr

1. 서론

사용후연료 건식저장시스템은 1980년대부터 안전성이 입증되어 세계적으로 사용후연료 중간저장에 활용되고 있다. 건식저장시스템에는 볼트, 모듈, 콘크리트/금속저장용기 방식 등이 있으며 기술개발 초기 단계인 우리나라에서는 콘크리트 수평저장모듈과 금속저장용기 방식을 대상으로 설계해석 기반기술을 개발중에 있다[1].

본 연구는 콘크리트 수평저장모듈에 대한 열적 거동을 분석하기 위한 것으로 상하부에는 사용후연료에서 발생하는 붕괴열을 제거하기 위하여 공기 입·출구가 설치된다. 사용후연료에서 발생하는 열을 효과적으로 제거하지 못할 경우 구조물의 수명에 영향을 끼칠 수 있으므로 구조물의 높은 냉각효율 및 저장기간 동안 열적 안전성을 확보하기 위해 국제적으로 널리 적용되고 있는 10CFR72와 NUREG-1536의 기준치를 적용하여 모듈의 열적 안전성을 평가했다. 저장대상인 사용후연료는 농축도 5wt%, 최대연소도 50,000MWD/MTU 및 최소냉각기간 7년, 24개의 연료 다발을 대상으로 했다.

2. 평가 및 결과

2.1 해석조건 및 모델링

수평저장모듈의 열적 거동을 평가한 조건은 표 1과 같다[2]. 비정상조건은 공기 유입구의 부분봉쇄(50% 봉쇄) 조건으로 공기 유입량 감소에 따른 저장모듈의 열적 거동에 대한 해석을 수행했다.

해석모델은 수평저장모듈, 24개 사용후연료 집합체가 적재가능한 캐니스터를 대상으로 했다. 연전달 현상에 필수적인 부품은 모두 모델링했으며, 결과는 그림 1과 같다. 열유동 해석은 FLUENT version 6.2를 사용하여 수행했다[3].

표 1. 수평저장모듈 열유동 해석을 위한 조건

구분	공기입구조건	일사량	붕괴열
정상조건	-	고려	최대
비정상조건	50% 봉쇄	고려	최대

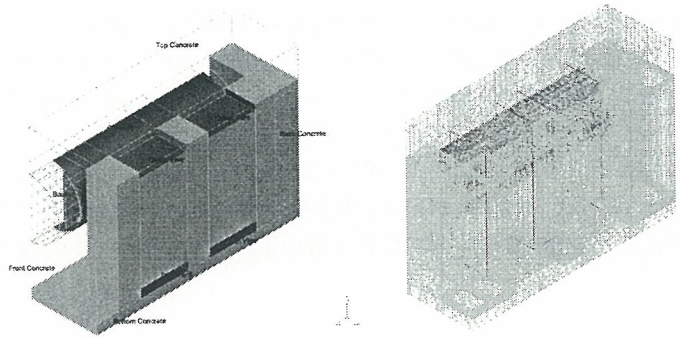


그림 1. 수평저장모듈 열유동 해석 모델

2.2 열전달 특징과 경계조건

수평저장모듈 내부 공기유동은 모듈 내부온도와 외기온도차에 따른 밀도차로 인하여 자연대류현상

이 발생하며, 모듈내 수직공간을 통한 공기 유동이 일어난다. 모듈외부는 대류와 복사를 통해 외부환경과 열교환을 모사했으며, 이를 위해서 모듈의 모든 노출표면에 대해서 대류와 복사를 고려했다.

건식저장시설의 태양열 적용은 10CFR71에 제시된 태양열을 적용할 수 있으며, 저장시설은 열관성이 크기 때문에 수송용기에 적용되는 일사량의 24시간 평균값을 취할 수 있다[4,5]. 본 해석에 적용한 일사량은 표 2와 같다.

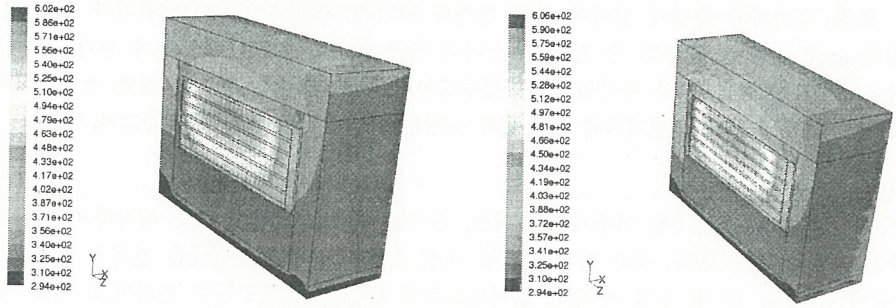
표 2. 표면 형태에 따른 일사량

표면 형태	10CFR71.71에 제시된 일사량[gcal/cm^2]	24시간 평균값 [W/m^2]
수평면	800	388
수직면	200	97

2.3 해석결과

그림 2(a)은 정상조건에서의 열해석 결과에 따른 온도분포이다. 정상조건 온도 기준치를 만족하였으며, 핵연료집합체 최대온도 329℃, 출구 최대온도 69.5℃, 출구 평균온도 52.6℃, 콘크리트 최대온도 93℃, 콘크리트 평균온도 52℃로 나타났다. 또한 공기의 온도상승 14.6℃, 공기유량은 0.7624kg/sec였으며, 총붕괴열(27.12kW)의 84.5%에 해당하는 22.9kW가 제거되는 것으로 나타났다.

비정상조건에 의한 해석결과 핵연료집합체의 최대온도 333℃,공기의 온도상승 14.6℃, 공기유량 0.3921kg/sec, 콘크리트 최대온도 101℃, 콘크리트 평균온도 56℃, 총붕괴열의 74.4%가 제거되는 것으로 나타났다. 비정상조건에서의 온도 기준치를 만족했으며, 해석결과에 의한 온도 분포는 그림 2(b)와 같다.



(a) 정상조건 (b) 비정상조건

그림 2. 수평저장모듈의 최대온도분포

3. 결론

본 논문에서 수행한 열유동 해석을 통해서 수평저장모듈의 열적 거동은 10CFR72와 NUREG-1536의 설계 기준치를 만족하는 것으로 나타났다. 정상 및 비정상조건에 대한 연료봉의 최대온도는 각각의 온도기준치인 340 ℃, 570℃ 보다 낮게 평가되었으며, 콘크리트의 최대온도는 93.3℃와 343℃ 보다 낮고, 평균온도는 65.5℃와 176℃ 보다 낮게 평가되었다. 즉 콘크리트 구조물의 열적 건전성이 확보되며, 열제거 효율은 각각 84%, 74%로 나타났다.

참고문헌

[1] 이대기 외, 경수로 사용후연료 건식저장시설 최적 설계기술 개발, KHNP-NETEC (2008)

[2] Title 10 of the Code of Federal Regulations Part 72 (10 CFR Part 72), Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste, and Reactor-Related Greater than Class C Waste, April 1996.

[3] FLUENT Computational Fluid Dynamics Software, Fluent, Inc., Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766.

[4] Title 10 of the Code of Federal Regulations Part 71 (10 CFR Part 71), Packaging and Transportation of Radioactive Materials, April 1996

[5] NUREG-1536, Standard Review Plan for Dry Storage Systems, USNRC, 1997