

CANDU 사용후핵연료 장기건식저장을 위한 저장용기 초기온도 분석

차정훈, 윤범수, 최희주*, 이종열*, 이승우*, 김상녕
 경희대학교, 경기도 용인시 기흥구 서천 1동
 *한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150
 chamanse@nate.com

2008년 현재 국내에는 20기의 원전이 운영 중이며, 2016년에는 각 원자력발전소 부지의 사용후 핵연료 습식 임시저장시설이 포화상태에 이를 것으로 예상하고 있다. 이에 사용후핵연료 중간저장 시설 도입이 필요한 실정이다. 사용후핵연료 중간저장 방식에는 습식저장방식과 건식저장방식이 있으며, 국외 사례를 보면 건식저장은 습식저장 이후에 최종적인 영구 처분 전까지 중간과정으로 각광 받고 있다. 그러나 건식저장 기술은 다른 분야의 선진기술과 마찬가지로 대부분 대외비로 취급되거나 특허에 의해 보호되어 있어 기본 매뉴얼 등을 제외한 기술개발 자료들의 습득이 어려운 실정이다. 향후 건식저장 기술의 국산화가 이루어지지 않을 경우 기존 외국계 회사의 시장지배로 인한 국부의 유출은 막대할 것으로 예상된다. 이러한 건식저장시설 개발을 위해 IAEA Safety Series No. 116, 117, 118 및 미국의 NUREG-1667 등과 같은 건식저장시설 안전해석에 관련된 규정을 검토하였다. 그 중 장기건식저장 기술개발을 위한 열해석은 열적 정상상태와 과도상태의 해석이 모두 필요하다는 것을 알 수 있다. 열적 정상상태에 대한 해석을 위해서는 건식저장시설의 열원과 이에 대한 냉각 시스템을 고려하여야 한다. 냉각시스템은 자연대류를 고려하며, CANDU 사용후핵연료 열원에 대한 시간에 따른 붕괴열은 수식으로 개발되어 있다. 하지만 장기건식저장시설의 운영기간동안의 열적 안전해석과 같은 과도상태 열해석을 위해서는 과도상태의 초기온도를 알아야 할 필요가 있다. 하지만 현재 국내에는 이러한 열설계 기초자료를 제공할 수 있는 실증실험이 이루어 지지 않은 상태에 있다. 이에 본 연구는 한국원자력연구원에서 개발중인 CANDU 사용후핵연료 건식저장용기 모델을 기본으로 하여, 저장용기의 열적정상상태 및 과도상태를 ANSYS 10.0 CFX 코드를 이용하여 계산하고 합당한 저장용기 초기온도를 계산하고자 하였다.

본 연구에서 사용된 장기건식저장용기의 상세제원은 그림1, 표 1과 같다. 저장용기는 10mm의 구리로 코팅된 70mm 주철로 용기 외형이 구성되어 있으며, 내부에는 7개의 CANDU 사용후핵연료 바스켓이 삽입되어 있다. 기준 CANDU 사용후핵연료 붕괴열은 식(1)로부터 계산하였다[1].

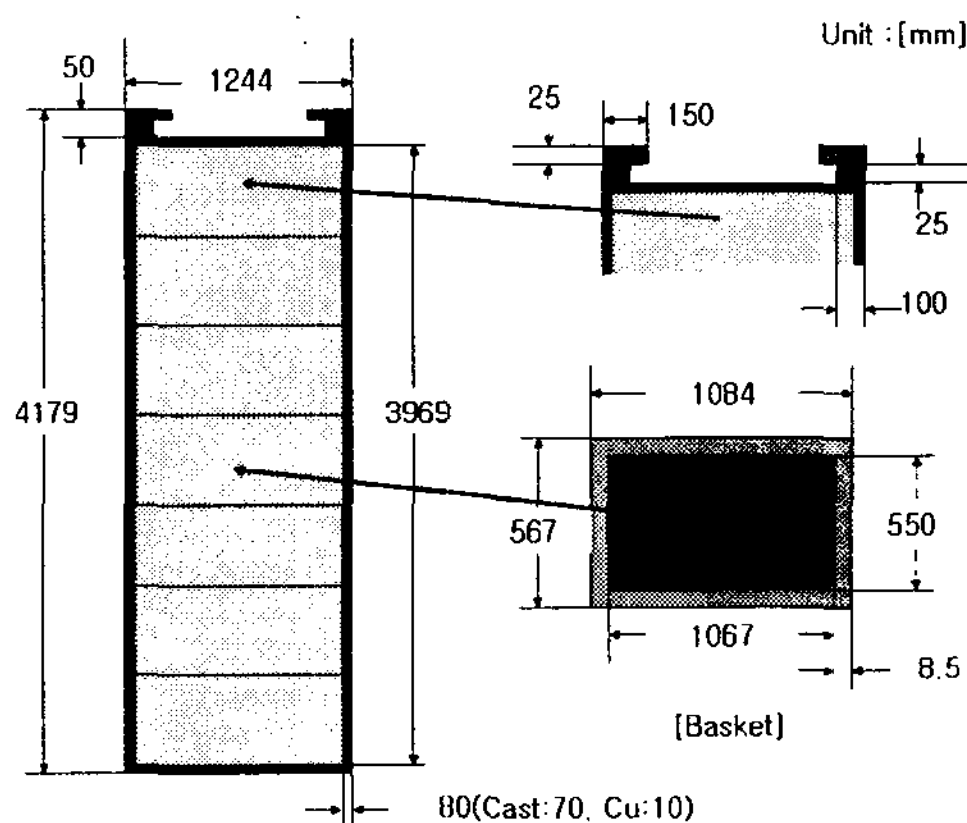


그림 1. CANDU 사용후핵연료 장기건식저장용기 및 내부 바스켓(Basket)

표 1. CANDU 사용후핵연료 장기건식저장용기 제원

구분	값	비고
높이	4130 [mm]	
직경	1244 [mm]	
내부바스켓 총 열량	192 [W]	30년 냉각 60 다발
처분용기 총 열량	1344 [W]	7개 바스켓 420 다발
기준 CANDU 사용후핵연료	초기농축도	0.711 wt.%
	방출연소도	8.1 GWD/MTU
	우라늄량	19.1 kg/bundle
	30년 후 붕괴열	약 3.2 W/bundle

$$P(30) = 251.1 \times e^{-0.024 \times 30 \text{ years}} + 5431.4 \times e^{-0.716 \times 30 \text{ years}} + 47.229 [W/MTU], \quad 1 < t < 100 \text{ yr}$$

$$Q(30) = P(30) \times m [W] \dots\dots\dots (1)$$

여기서 m은 CANDU 사용후핵연료 다발의 초기 우라늄 질량이며, t는 CANDU 사용후핵연료 냉각 기간, P(t)는 t 시간에 대한 우라늄 단위 질량[MTU]당 붕괴열량[W], Q(t)는 t 시간에 대한 CANDU 사용후핵연료 다발 당 붕괴열량[W] 이다.

발전소부지에서 습식저장시설에 저장되어 있던 사용후핵연료가 중간저장시설 또는 영구처분 전 장기건식저장시설로 운반되는 절차는 여러 단계를 거쳐 수행되며[2], 이러한 절차 동안 용기가 40℃ 공기중에서 자연대류에 의해 냉각 되고 있다고 가정하였다. 이에 대한 정상상태 열해석 결과 용기 최대 표면온도는 약 43.7℃이며 용기 높이 약 3.2m(77%)지점에서 최대온도가 나타났다(그림 2, 3). 저장용기의 과도상태 열해석을 수행하기 위하여 저장용기의 초기온도가 공기와 같은 40℃라고 가정하고 사용후핵연료 420다발을 용기에 모두 저장한 후부터 저장용기가 정상상태가 될 때까지의 시간을 계산하였다. 그림 4는 저장용기 약 3.2m 지점에서의 시간에 따른 온도변화를 보여주고 있다.

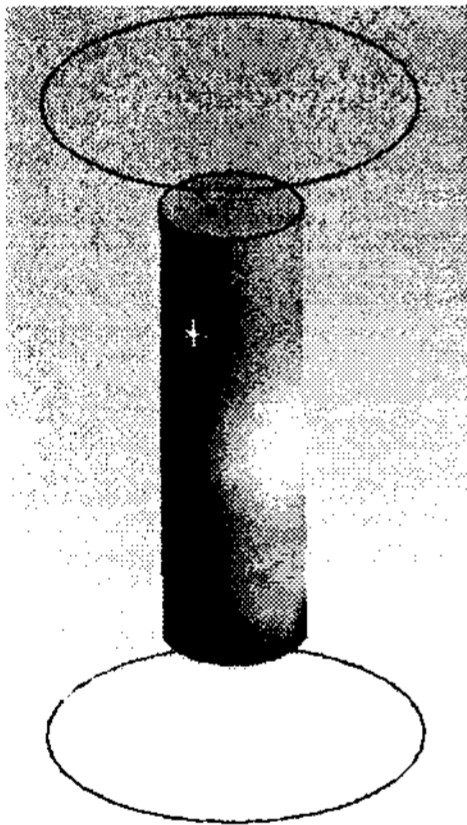


그림 2. 저장용기 온도 최대지점 +표시

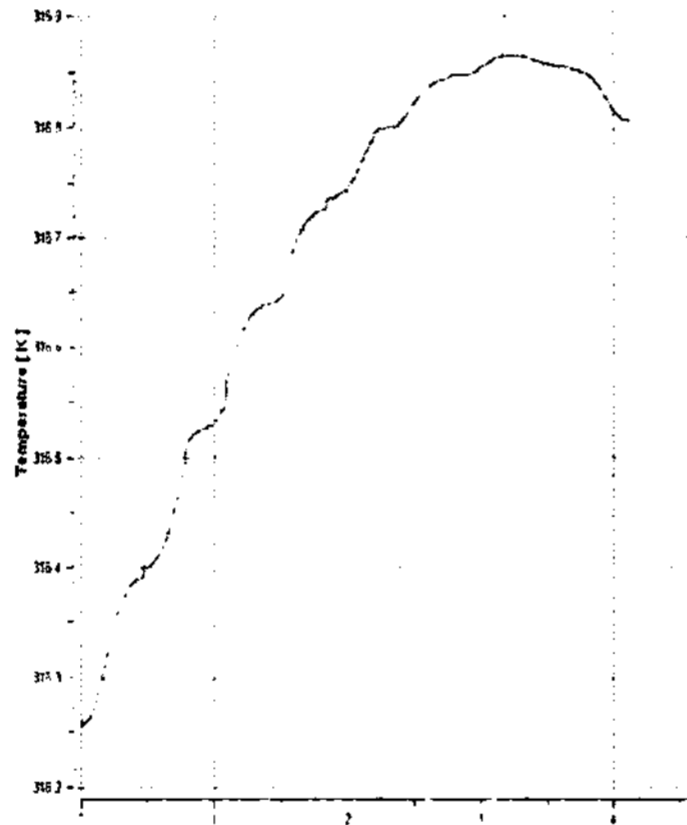


그림 3. 저장용기 높이에 따른 표면온도 변화

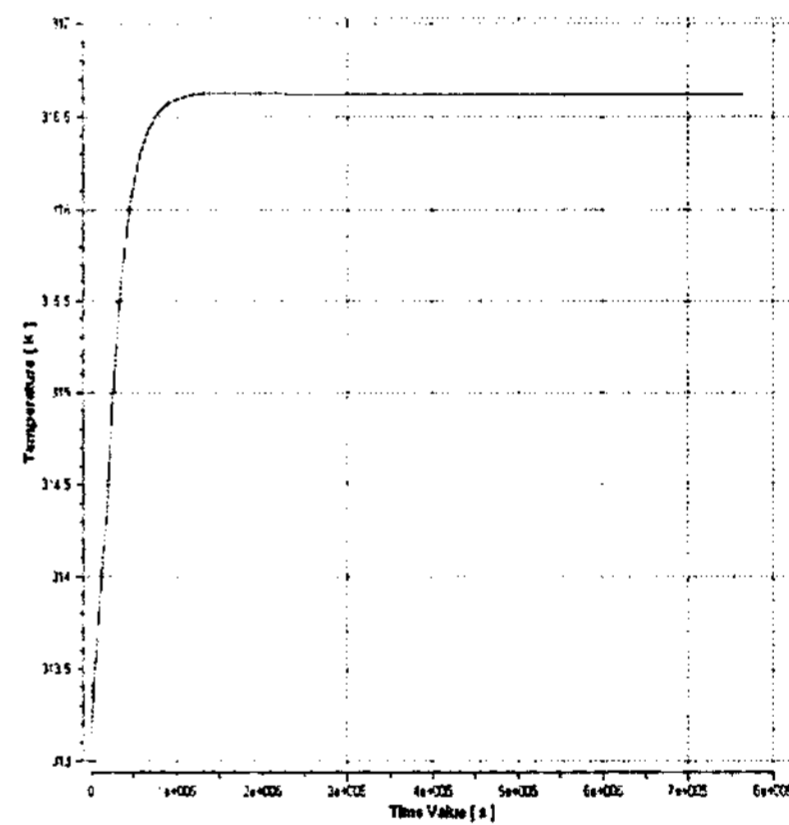


그림 4. 그림2 지점에서의 시간에 따른 온도 변화

과도상태 열해석 계산결과 사용후핵연료 저장용기의 과도상태 온도는 20시간 이전에 이미 정상상태 온도의 99%에 이르게 된다. 이와 같은 시간은 저장용기에 사용후핵연료를 저장한 후 공기중에 충분히 노출될 수 있는 시간이라고 추정되며 장기간의 저장기간을 생각한다면 아주 짧은 시간이라고 말하기에 충분하다. 이와 같은 결과는 앞으로 더 많은 연구와 실증실험을 통해 그 상관관계를 확실하게 할 수 있도록 보완 하여야 하겠지만 장기건식저장시설에 대한 열해석 특성상 운영기간 동안의 과도상태 열해석에 소모되는 많은 시간을 간단한 정상상태 계산으로 대체할 수 있어 해석에 소모되는 시간 및 비용이 감소 될 수 있을 거라 기대된다.

참고문헌

[1] Seung-woo Lee, "Burnup and Source Term Analyses for a CANDU Spent Fuel", Transaction of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, PyeongChang, Korea, October 25-26, 2007.
 [2] 최희주 외, "사용후핵연료 수송비용 평가를 위한 선결조건", 한국원자력연구원 기술보고서, KAERI/TR-3456/2007(2007).