

## 후쿠시마 원전 4호기 사용후핵연료 저장조 및 핵연료 온도 예측

인왕기, 최종원, 구양현

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

[wkin@kaeri.re.kr](mailto:wkin@kaeri.re.kr)

### 1. 개요

가압경수로(PWR)와 비등경수로(BWR)의 핵연료는 원자로 정지후 부분교체 및 재장전을 위해 발전소 부지내 저장조에 보관된다. 사용후핵연료 저장수조는 원자력발전소 설계 특성에 따라 다르지만 공통적으로 격납용기 외부에 위치한다. Fig. 1은 일본 후쿠시마 원전 4호기와 유사한 BWR 원자로 건물의 단면을 보여주는 것으로 사용후핵연료 저장조는 격납용기 외부에 원자로보다 높은 곳에 설치되어 있다.

후쿠시마 원자로와 같은 BWR 사용후핵연료 저장조의 크기는 약 16000 m<sup>3</sup> (폭 12m, 길이 12m, 깊이 12m) 이다. 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열(Decay Heat)의 냉각 및 방사능 차폐를 위해 약 15000톤의 물이 저장조에 채워져 있다. 정상상태 조건에서 사용후핵연료 저장조의 수온은 40-50 °C를 유지하고 있다. 그러나 외부 테러 공격이나 지진에 의해 저장조의 냉각수가 완전 상실된 경우 핵연료가 공기중에 노출되어 핵연료가 손상될 수 있다. 이는 핵연료 피복관의 온도가 높아지면(약 1800 °C) 지르코늄 화제가 발생하기 때문이다. US NRC 보고서[1]에 따르면 지진으로 인해 BWR 사용후핵연료 저장조 화제가 발생할 확률은 원자로 수명동안 6.5x10<sup>-4</sup> - 4x10<sup>-11</sup> 으로 평가되었다.

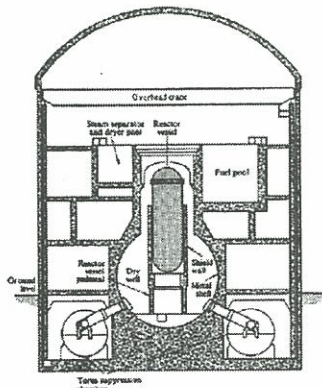


Fig. 1. Schematic view of a GE Mark I BWR plant

최근 후쿠시마 4호기 사용후핵연료 저장조의 핵연료가 일부 손상된 것으로 나타났다. 이는 2011년 3월 11일에 발생한 규모 8.0의 지진과 해일(Tsunami)로 인해 사용후핵연료 저장조의 냉각 기능이 일부 상실되었기 때문인 것으로 예측된다.

본 연구에서는 후쿠시마 4호기 사용후핵연료 저장조의 냉각기능 상실사고시 저장조 내부 온도 및 핵연료 피복관 온도를 예측하였다.

### 2. 저장조 및 핵연료 온도 예측

#### 2.1 저장조 온도예측

사용후핵연료 저장수조에 보관되어 있는 핵연료에서 발생하는 붕괴열은 핵연료와 냉각수 사이의 자연대류 열전달 및 수면에서 공기와의 열전달 과정을 통해 냉각된다. 즉, 저장조의 수온은 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열( $Q_{decay}$ )과 외부로 방출되는 열에너지( $Q_{loss}$ )의 평형 관계식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$(Q_{decay} - Q_{loss})\Delta t = M_{water} C_{p,water} \Delta T_{water} \dots (1)$$

여기서  $M_{water}$  = 저장조 물의 질량

$C_{p,water}$  = 물의 정압비열

$\Delta T_{water}$  = 저장조 냉각수 온도 상승치

저장조의 냉각기능이 정상일 경우에는 저장조 내부에 추가로 축적되는 열에너지가 없으므로 저장조 냉각수의 온도는 일정하게 유지된다. 그러나 저장조의 냉각기능 상실사고시에는 외부로 방출되는 열에너지가 감소하므로 냉각수 온도는 올라간다. 만일 저장조 냉각기능이 20% 저하될 경우 후쿠시마 4호기의 저장조 수온은 시간당 약 0.2-0.3 °C 상승하여 약 10일 후에는 포화온도(100 °C)에 도달하여 냉각수 증발이 시작된다.

사용후핵연료 저장조의 냉각기능이 완전 상실된 경우 저장조 수온은 포화온도까지 급속히 증가한다. 저장조 냉각수가 완전히 증발하는데 걸리

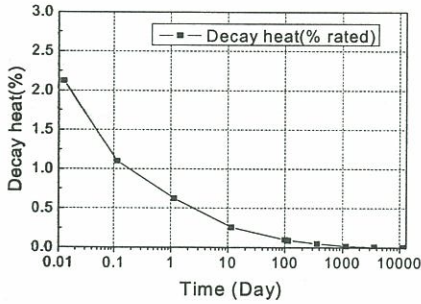


Fig. 2. Decay heat after reactor trip

는 시간은 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$Q_{decay} \Delta t = M_{water} (C_{p,water} \Delta T_{water} + h_{fg}) \dots\dots (2)$$

여기서  $h_{fg}$  = 냉각수 증발잠열

후쿠시마 4호기 저장조의 경우 원자로 정지후 약 100일이 지난 핵연료를 보관중이므로 붕괴열이 정격열출력(약 2300 MWt)의 0.1%이다(Fig. 2). 따라서 냉각수가 완전히 증발하기 까지는 약 18일이 소요될 것으로 예측된다.

2.2 사용후핵연료 피복관 온도 예측

저장조에 보관중인 사용후핵연료의 피복관과 냉각수 사이에는 자연대류 열전달이 발생한다. 따라서 피복관 온도를 예측하기 위해서는 다음과 같은 관계식을 이용한다.

$$q''_{decay} = h_{fc} (T_{wall} - T_{water}) \dots\dots (3)$$

여기서  $h_{fc}$ 는 자연대류 열전달 계수로 McAdams의 상관식[2]을 이용한다.

$$Nu_L = \frac{hL}{k_{water}} = 0.15 Ra_L^{0.333} \dots\dots (4)$$

Figure 3는 후쿠시마 4호기 사용후핵연료 저장조의 냉각능력이 감소된 경우 예측된 냉각수 온도 및 핵연료 피복관 온도 변화를 보여준다. 사용후핵연료 저장조 냉각능력이 저하되면 냉각수 온도가 상승하고 핵연료 피복관 온도도 함께 증가한다. 만일 저장조 냉각수 상실사고 또는 냉각수의 증발로 인해 핵연료가 공기에 노출되는 경우

에는 공기온도가 시간당 약 50 °C 상승하여 2일

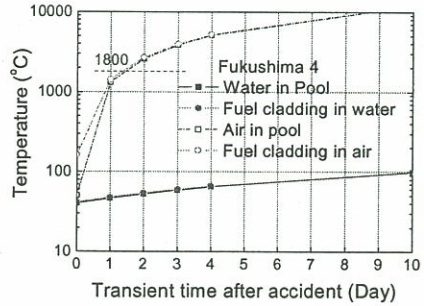


Fig. 3. Coolant and fuel cladding temperatures in spent-fuel pool

이내에 지르코늄 피복관 화재 발생이 가능한 온도(1800 °C)까지 상승할 것으로 예상된다. 핵연료 피복관과 냉각수의 온도 차이는 크지 않은데 이는 붕괴열이 작기 때문이다.

3. 결론

일본 후쿠시마 원전 4호기 사용후핵연료 저장조의 냉각능력 상실사고시 냉각수 온도와 핵연료 피복관 온도를 예측하였다. 저장조 냉각능력이 20% 감소하면 저장조 수온은 약 10일 후에 포화 온도까지 상승하여 냉각수 증발이 시작된다. 만일 저장조 냉각수 상실사고가 발생하여 사용후핵연료가 공기중에 노출되는 경우에는 1일 이내에 지르코늄 피복관 화재가 발생 가능한 온도까지 피복관 온도가 증가할 것으로 예상된다.

4. 감사의 글

본 연구는 원자력기술개발사업 및 방사성폐기물관리기술개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

[1] V. L. Sailor et al., Severe Accidents in Spent Fuel Pools in Support of Generic Safety Issue 82, NUREG/CR-4982, BNL, July 1987.  
 [2] W. H. McAdams, Heat Transmission, 3rd edition, New York, McGraw-Hill, 1954.