

사용후핵연료 저장조 냉각재 상실사고시 공기중 산화모델 연구

방제건*, 김대호, 전태현, 김선기

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*jgbang@kaeri.re.kr

1. 서론

원자력발전소 부지 내 사용후핵연료 저장조에는 노심내에서 방출된 사용후핵연료집합체가 저장되어 있으며, 높은 붕괴열을 냉각시키기 위해 저장조 수조에 잠겨있다. 그러나 최근의 일본 후쿠시마 원전사고와 같은 지진이나 혹은 다른 요인에 의해 사고가 발생할 경우 저장수조의 온도가 상승함에 따라 냉각수가 증발하게 되어 사용후핵연료집합체가 공기중에 노출될 수 있다.

이 경우 증발된 수증기 외에 공기와의 접촉에 따른 사용후핵연료 피복관의 공기중산화 발생하게 된다. 핵연료 피복관의 수증기산화 거동 및 산화속도는 노심 LOCA연구와 관련하여 매우 많은 시험자료 및 산화모델이 발표되어 적용되어 오고 있다. 그러나 고온의 공기중 산화에 대한 거동 및 산화모델은 매우 제한적이며, 여러 연구에서 각기 다른 산화모델을 적용하고 있고, 따라서 그 결과는 산화모델에 따라 상이한 사고해석 결과를 보여주고 있다. 공기중산화가 사용후핵연료 저장조 사고 시 가장 중요한 열화 mechanism임을 감안할 때 사고 시 피복관의 공기중산화 속도를 정확하게 예측하는 것은 사고 시 대처방안 강구 및 피해절감을 위해 매우 중요하다.

이에 본 연구에서는 핵연료 피복관의 고온 공기중산화 반응속도모델을 비교 검토하고 모델 별 실제 예측치에 있어서 어느 정도의 차이가 나타나는지 평가해보고자 한다.

2. 본론

기존에 보고된 핵연료 피복관의 고온 공기중산화 반응속도모델에 대해 검토하였다. 공기중산화 반응속도모델의 경우 다음과 같이 모델링된다.

$$k(kgm^{-2}s^{-1/2}) = Aexp(-Q/RT)$$

위 식에서, k는 산화반응속도이며, A는

pre-exponential factor를 의미한다. 또한, Q는 산화반응에 대한 활성화에너지(activation energy)를 의미한다.

주요 핵연료 피복관의 고온 공기중산화 반응속도모델을 제시하면 다음과 같다.

Hayes-Roberson[1] for air, 698 K < T < 1173 K

$$k(kgm^{-2}s^{-1/2}) = 0.3391exp(-57196/RT)$$

Leistikow-Berg[2] (973 K < T < 1523 K)

$$k(kgm^{-2}s^{-1/2}) = 75.9exp(-110860/RT)$$

Steinbruck[3] (873 K < T < 1673 K)

$$k(kgm^{-2}s^{-1/2}) = 5.46exp(-86828/RT)$$

(for 873 K < T < 1373 K)

$$k(kgm^{-2}s^{-1/2}) = 0.49exp(-40268/RT)$$

(for 1373 K < T < 1673 K)

Duriez[4] (873 K < T < 1473 K)

$$k(kgm^{-2}s^{-1/2}) = 4.958exp(-89403/RT)$$

(for 873 K < T < 1273 K)

$$k(kgm^{-2}s^{-1/2}) = 1.50 \times 10^4 exp(-172305/RT)$$

(1273 K < T < 1473 K)

ANL Model[5]

$$k(kgm^{-2}s^{-1/2}) = 1.07exp(-57220/RT)$$

(for T < 1193 K)

$$k(kgm^{-2}s^{-1/2}) = 758.95exp(-110903/RT)$$

(for 1193 K < T < 1428 K)

$$k(kgm^{-2}s^{-1/2}) = 24.9exp(-60855/RT)$$

(for T > 1428 K)

KAERI Model[6]

$$k(\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2})=97.51\exp(109,524/RT) : \\ (873\text{K}<T<1373\text{K})$$

$$k(\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2})=0.69\exp(-46,365/RT) : \\ (1373\text{K}<T<1673\text{K})$$

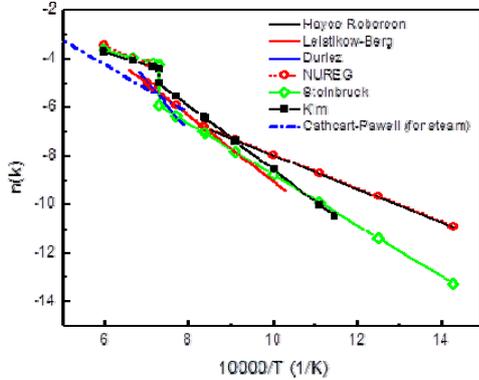


Fig. 1. Comparison between air oxidation kinetic models of Zircaloy-4 cladding.

3. 결론

본 연구에서는 사용후핵연료 저장조 사고 시 발생할 수 있는 핵연료 피복관의 고온 공기중산화 현상에 대해 주요 반응속도모델, 즉 Hayes-Roberson 산화모델, Leistikow-Berg 산화모델, Steinbruck 산화모델, Duriez 산화모델, ANL Model 및 KAERI Model 산화모델을 비교 검토하였다. 또한, 노심 LOCA사고에 적용되는 수증기산화모델인 Cathcart-Pawell 모델과도 함께 비교하였다.

분석결과 노심 LOCA사고에 적용되는 수증기산화모델인 Cathcart-Pawell 모델로 사용후핵연료 저장조 사고 시 발생할 수 있는 핵연료 피복관의 고온 공기중산화를 예측할 경우 실제 산화량보다 낮게 평가하게 되며, 따라서 저장조 사고 시에는 고온 공기중산화모델로 예측해야 함을 알 수 있다. 또한 고온 공기중산화모델 간 산화속도에 있어서 다소 정량적인 차이가 존재하며, 실제 사고 시 정확한 산화량을 예측하기 위해서는 좀 더 세밀한 모델검토가 필요할 것으로 사료된다.

4. 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 지원아래 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다. (NRF-2012-2012M2A8A4013172)

5. 참고문헌

- [1] E.T. Hayes, A.H. Roberson, J. Electrochem. Soc. 96 (1949) 142.
- [2] S. Leistikow, H.V. Berg, Investigation under nuclear safety aspects of Zircaloy-4 oxidation kinetics at high temperatures in air, in: Proceeding of the 2nd Workshop of German and Polish Research on High Temperature Corrosion of Metals, Julich, 2-4 December 1987.
- [3] M. Steinbruck, M. Bottcher, Air oxidation of Zircaloy-4, M5 and ZIRLO™ cladding alloys at high temperatures, J. Nuclear Materials 414 (2011) 276.
- [4] C. Duriez, T. Dupont, B. Schmet, F. Enoch, Zircaloy-4 and M5 high temperature oxidation and nitriding in air, J. Nuclear Materials 380 (2008) 30.
- [5] NUREG/CR-0649, Spent Fuel Heatup Following Loss of Water During Storage, 1979.
- [6] S.K. Kim, T.H. Chun, J.G. Bang, Y.H. Koo, High Temperature Air Oxidation Behavior and Its Kinetics of Zircaloy-4 During a Loss of Coolant Accident in a Spent Fuel Pool, 2nd Asian Nuclear Fuel Conference (2014).