

사용후핵연료 저장조 사고시 주요 안전 이슈 고찰

방제건*, 김대호, 전태현, 김선기

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*jgbang@kaeri.re.kr

1. 서론

2011년 일본 후쿠시마 원전 사고 이후, 원전의 안전성에 대한 관심이 사용후핵연료 저장조 안전성에도 쏠리고 있다.

원자력발전소 노심내에서 방출된 사용후핵연료는 사용후핵연료 저장조에 보관하고 있다. 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 붕괴열로 인해 온도가 매우 높게 올라감으로써 적절한 조치가 취해지지 않을 경우 중대 사고(severe accident)로 진행되어 매우 심각한 안전성 저해를 가져올 수 있다[1-4]. 특히, 사용후핵연료 저장조의 경우 노심에 비해 10배-20배 이상의 많은 사용후핵연료가 보관되어 있으므로 사고의 확률은 낮으나, 사고시 노심에 비해 다량의 방사능물질이 환경으로 방출될 수 있다[5].

이에 본 연구에서는 사용후핵연료 저장조에서 냉각기능상실 혹은 냉각수상실 사고가 발생할 경우 예측되는 주요 안전 이슈에 대해 고찰하고자 한다.

2. 본론

2.1 피복관 공기산화에 의한 열화

노심과 달리 저장조 건물의 분위기는 공기가 존재하므로, 사고시 노심의 경우 고온의 수증기에 의한 산화반응만 발생하지만, 저장조의 경우 공기+수증기 혼합분위기에서 산화반응이 발생한다. 공기산화는 반응속도가 수증기산화에 비해 훨씬 빠르며, 발열반응에 따른 발생열이 약 2배 정도로 높기 때문에 노심내 LOCA 사고시보다 산화에 의한 열화가 심각하다[6].

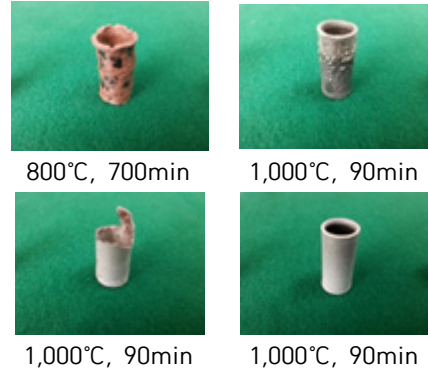
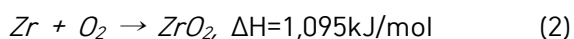
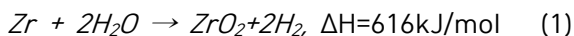


Fig. 1. Degradation of Zircaloy-4 cladding by air oxidation.

2.2 피복관 수증기산화에 따른 수소발생 및 수소 폭발(Hydrogen Explosion)

사용후핵연료 피복관과 수증기와의 산화반응에 따라 반응의 부산물(reaction product)로서 수소가 발생하게 된다. 이때 발생하는 수소의 양만큼 수증기의 양은 감소하게 되며, 저장조 건물의 분위기는 공기중의 O₂, N₂, H₂O 및 H₂의 혼합물로 존재하게 되는데, 수소의 농도가 일정 비율 이상이 될 경우 수소폭발이 발생할 수 있다. 그러나 전체적인 수소의 비율이 폭발 임계치 이하일 경우에도, 수소는 저장조 건물 상단부 천장부에 모이게 되므로, 저장조 건물 상단부 천정부의 수소농도가 폭발 임계치를 넘을 경우 수소폭발이 발생할 수 있다.

이러한 수소폭발 임계비는 온도에 따라 다르며, 통상 온도가 높은 조건하에서는 수소폭발 임계비는 더 낮아진다. 20°C 및 100°C에서의 임계비는 다음과 같다[7].

$$HR_{th} = 11.6\% \quad (20^\circ\text{C}) \quad (1)$$

$$HR_{th} = 9.4\% \quad (100^\circ\text{C}) \quad (2)$$

2.3 UO₂ 산화에 따른 파편화/분말화에 의한 대량 방사능 물질 방출

수조에 저장중인 사용후핵연료 피복관은 수위가 낮아지면서 공기중으로 노출되게 되는데, 사용후핵연료 봉내압이 약 30 - 100기압 정도되므로 일정

수준의 온도(약 600-700°C)가 되면, ballooning에 의한 변형과 파손이 발생하게 된다. 이때 파손분위를 통해 유입된 공기 및 수증기와 UO₂와의 산화반응이 약 600-700°C 정도의 온도 때부터 지속적으로 산화반응이 발생하며, 공기 및 수증기의 비율에 따라 다르지만, UO₂의 파편화 혹은 분말화가 발생하게 된다[8]. UO₂의 파편화 혹은 분말화 특성은 사고시 환경으로의 대량 방사능물질의 종류와 방출량을 예측하는데 매우 핵심적인 특성으로서, 이는 노심중대사고시 대량 방사능물질의 종류와 방출양과는 매우 다를 수 있다.

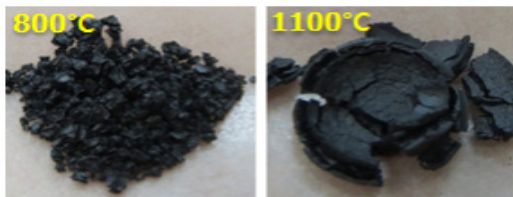


Fig. 2. Fragmentation of UO₂ pellet by oxidation.

3. 결론

본 연구에서는 사용후핵연료 저장조 사고 시 냉각기능상실 혹은 냉각수상실 사고가 발생할 경우 예측되는 주요 안전 이슈에 대해 고찰하였다. 주요 안전 관점의 이슈는 다음과 같다.

첫째, 피복관 공기산화에 의한 열화이다.

둘째, 피복관 수증기산화에 따른 수소발생 및 수소폭발(hydrogen explosion)이다.

셋째, UO₂ 산화에 따른 파편화/분말화에 의한 대량 방사능 물질 방출이다.

특히, 저장조 건물의 경우 노심과 달리 격납용기가 없으므로, 수소폭발에 의해 건물내부가 대기중으로 노출되기 쉽고, 건물내부가 대기중으로 노출된다는 것은 사용후핵연료 피복관 파손에 따라 대량의 방사능물질의 환경누출을 의미하므로 수소폭발과 UO₂ 산화에 의한 파편화/분말화 특성은 사용후핵연료 저장조 안전과 관련한 매우 중요한 이슈로 볼 수 있다.

4. 감사의 글

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

5. 참고문헌

- [1] E.T. Hayes and A.H. Roberson, J. Electrochem. Soc. 96 (1949) 142.
- [2] S. Leistikow and 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 and 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, and F. Enoch, Zircaloy-4 and M5 high temperature oxidation and nitriding in air, Journal of 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, and 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).
- [7] M. Leyse, Preventing Hydrogen Explosions in Severe Nuclear Accidents, NRDC Report(March) (2014).
- [8] S.K. Kim, J.G. Bang, T.H. Chun, D.H. Kim, and I.S. Lim, Analysis of Zircaloy-4 Cladding Failure Behaviors During an Accident in a Spent Fuel Pool, Proceedings of Korean Journal of Metals and Materials, (Spring) 2016.