

사용후핵연료 건식저장시 핵연료 피복관의 열화거동과 연구방향

김현길, 양용식, 김일현, 최병권, 박정용
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
hgkim@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료 저장은 국내 원자력 산업의 중요문제로 인식되고 있는데, 이는 사용후핵연료의 안정적인 관리가 이루어져야만 원자력에 대한 대국민 수용성의 증대와 차후 사용후핵연료의 재활용을 위해서도 매우 중요하기 때문이다. 국내에서는 사용후핵연료 저장방식이 건식저장으로 구체화되고 있다. 건식저장시 발생할 수 있는 핵연료의 손상은 대부분 피복관의 손상에 기인되며, 이러한 손상기구는 연소에 의한 피복관의 산화, 조사손상, 수화물 생성을 기반으로 한다[1]. 연소된 피복관은 건식저장 중에 피복관의 외측으로 크립변형이 발생하는데, 이 문제가 핵연료피복관 파손의 주기가 된다. 따라서 건식저장 조건에서 연소피복관에 대한 피복관의 크립변형을 평가하는 것이 피복관 건전성을 예측하는 척도로 이용되고 있다. 건식저장 중 발생할 수 있는 다른 사고요인은 건식저장 Cask가 지진 등 외력에 의해 넘어지거나 이송 중 크레인 또는 차량에서 떨어지는 경우이다[2]. 이러한 상황에서는 피복관에 충격을 가하기 때문에 열화 된 피복관의 기계적 손상이 예측된다. 따라서 본 연구에서는 건식저장 피복관의 열화에 미치는 크립변형 거동과 충격에 의한 피복관의 손상요소를 분석하고 평가하여 건식저장시 안전규제에 필요한 연구방향을 도출하고자 하였다.

2. 본론

2.1 크립변형에 의한 피복관 손상

건식저장 중에 핵연료피복관의 크립변형은 핵연료의 온도와 피복관 내압에 의존한다. 피복관의 크립변형에 미치는 온도 및 압력기준은 미국의 규제요구에서 정의 하고 있는데 그림 1과 같다[3]. 즉 정상상태 저장 및 운송시 피복관의 온도는 400°C 이상으로 증가되지 않아야하고 원주방향응력은 90MPa 이하로 유지되어야 한다. 사고조건에서는 피복관의 온도가 570°C를 초과하지 말아야 한다. 이는 피복관의 크립변형량과 크립변형에 의한 수화물의 재배열을 주요인인으로 해석한 것이다.

피복관에 원주방향 응력이 90 MPa 이상으로 인가되면 원주방향으로 형성된 수소화물이 반경방향으로 재배열하게 되고[3], 반경방향으로 성장된 수소화물이 존재하면 피복관은 매우 낮은 변형에서도 파손이 발생하기 때문이다[4, 5].

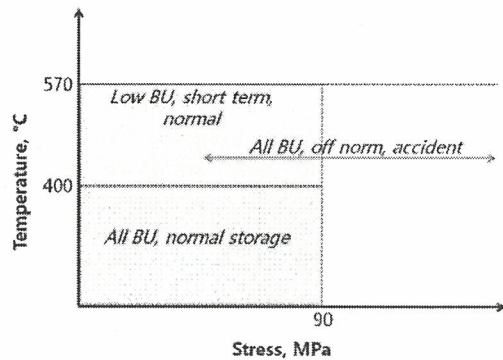


Fig. 1. Cladding Regulation Limits for Dry Storage in the USA.

건식저장 피복관에서 수소에 기인되는 열화거동중에 하나로는 크립변형과 병행하여 나타나는 DHC (Delayed Hydrogen Cracking) 현상이다. DHC는 중수로 압력관의 손상원인 중에 하나로 건식저장 조건에서 핵연료피복관이 장시간 노출시에 발생될 수 있을 것으로 분석되고 있다.

수소화물의 배열뿐만 아니라 수소화물 rim도 건식저장 피복관의 파손에 미치는 중요 인자로 작용한다. 수소화물 rim은 노내연소 중에 피복관의 특정부분에 응력이 높거나 산화막의 손상으로 온도가 낮은 부분에서 집중적으로 발생하게 되며 취성이 매우 강한 특성을 가지고 있다. 따라서 수소화물 rim이 발생된 영역은 피복관의 다른 영역에 비하여 더욱 낮은 충격/변형량에서 파손이 발생하기 때문에 반드시 고려해야하는 인자이다.

상기의 결과와 같이 건식저장시 피복관에서 발생하는 열화는 매우 다양하기 때문에 피복관에 대한 안전요건은 개개의 열화요소 뿐만 아니라 복합적으로 작용할 경우를 고려하여 평가해야만

한다.

2.2 Cask의 기계적 충격에 의한 피복관 손상

미국 NRC에서 제시한 사용후핵연료 저장용 Cask의 사고기준 중에 하나는 9m 높이에서 자유낙하한 충격량에 의해 Cask 내부의 핵연료가 안전성을 유지해야 한다는 것이다[2]. Cask의 자유낙하에 의한 충격량은 내부 핵연료집합체의 변형을 유발하고 핵연료집합체를 구성하는 피복관에 그림 2와 같은 형태의 손상을 유발하게 된다[6].

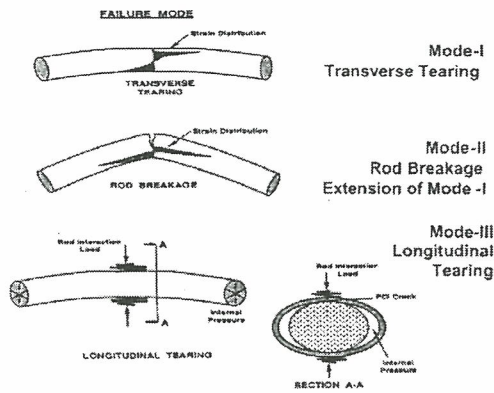


Fig. 2. Possible modes under cask drop in horizontal orientation.

그림에서 나타난바와 같이 피복관은 세가지 모드의 파손이 발생할 수 있다. 이와 같은 파손에 영향을 미치는 주요요인은 연소된 피복관의 연성을 감소시키는 산화막 두께, 수소화물 rim, 반경 방향으로 배열된 수소화물 그리고 크립변형량으로 생각할 수 있다. 그러나 현재까지는 cask 사고시 연소 피복관에 대한 평가결과가 정립되지 않은 실정이다. 따라서 연소 피복관을 모사할 수 있는 시편을 제작하여 이에 대한 굽힘, 인장, 뒤틀림 등을 평가하는 것이 당면과제로 남아 있다.

건설적저장을 위한 핵연료피복관의 실험적 근거 마련을 위해서는 국내 연소 피복관에 대한 다음과 같은 평가 연구를 제안할 수 있다.

- Construction of creep deformation map
 - Maximum cladding temp. < 600°C
 - Maximum cladding hoop stress < 100MPa
- Analysis of hydrogen induced cladding failure
 - Hydride re-orientation threshold
 - DHC behavior in dry storage condition

- Effect of hydride rim on cladding ductility
- Mechanical behavior of cladding with creep deformation and hydride effect
 - Transverse tearing test
 - Transverse tearing with extension test
 - Ring compression and Impact test

3. 결론

국내에서는 사용후핵연료에 대한 건설적저장의 필요성을 인지하고 이를 실행하기위한 준비가 진행되고 있으며, 사용후핵연료에 대한 안전규제조건은 원전선진국에서 제시한 기준 및 규정을 준용하고 있다. 그러나 국내 상용로에서 연소된 핵연료의 연소도 및 환경이 다르기 때문에 이를 검증할 실증자료가 확보에 대한 연구가 요구된다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

[1] H.G. Kim, Y.H. Jeong, K.T. Kim, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 42 No. 3, pp. 249-258, 2010.
 [2] G. Bjorkman, Paper CO 3/2, SMiRT 19, Toronto, Aug. 2007.
 [3] R. Einziger, C. Brown, G. Horneth, and C. Interrante, Radwaste Solutions, Apr. 2005
 [4] A. Racine, M. Bornert, D. Caldenmaison, C. C. Sainte, and C. Cappelaere, Proc. 18th International Conference in Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT 18-C04-6, Beijing, China, Aug. 2005.
 [5] 김현길 외, 한국방사선폐기물학회 추계학술대회, Nov. 2009.
 [6] T. Sanders et al., SANDIA Report 90-2406, TTC 1019, UC-820, Nov. 1992.