

건식저장시 사용후핵연료 피복관 크리프 거동 고찰

방계건, 김선기, 양용식

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

igbang@kaeri.re.kr

1. 서론

현재 국내 원자력발전소에서 연소후 방출된 핵연료는 발전소내 사용후핵연료 저장조에서 습식저장 방식으로 보관되고 있다. 그러나 발전소내 저장조의 저장능력의 한계가 있어 수년내 저장용량이 포화상태에 이를 것으로 예상되고 있다. 이에 따라 국내에서도 사용후핵연료의 처리가 이슈화되어 공론화가 추진되고 있어 조만간 사용후핵연료 관리에 대한 정책적인 방안이 수립될 것이다. 사용후관리방안의 하나인 건식저장시스템에 대한 연구가 현재 추진중에 있다.

건식저장방식이 확정되면 우선 저연소도 사용후핵연료부터 저장이 될 것으로 예상된다. 하지만 국내 사용후핵연료의 건식저장에 대한 시험자료를 확보하고 있지 않으므로 이들 사용후핵연료에 대한 건전성 평가 및 시험자료의 확보가 필수적이다. 사용후핵연료의 건식저장시 크리프 변형은 피복관 열화의 주된 요인중의 하나이다[1]. 본 논문에서는 국내 저연소도 사용후핵연료의 크리프 거동을 평가하기 위한 준비단계로 국내 사용후핵연료 현황, 열화기구, 인허가 기준에 대해 조사하였고 앞으로 수행할 크리프 특성 시험 및 크리프 모델 개발방향에 대하여 기술하였다.

2. 본론

2.1 국내 사용후핵연료 현황 및 인허가 기준

2.1.1 국내 사용후핵연료 현황 및 연소도

국내 경수로 원자력발전소에서는 표 1에서 보여주는 바와 같이 여러 가지 종류의 핵연료가 연소되었다. 표 1은 국내 사용후핵연료중 건식저장시 저연소도 핵연료로 건전성평가 수행되어야할 대상 연료의 범위를 정리한 것이다. 대상핵연료들은 NDR 상의 방출연소도가 봉최대 45,000 MWd/MtU, 집합체 평균 40,000 MWd/MtU 이하를 선정하였다. 이들 핵연료의 피복관 재질은 Zircaloy-4와 웨스팅하우스사의 improved Zircaloy-4가 사용되었다.

2.1.2 사용후핵연료 건식저장시 인허가 기준

사용후핵연료의 건식저장은 영구처분이 아닌 중간저장이며 영구처분 혹은 재처리를 위해서 저장 핵연료는 반드시 다시 인출되어야 하기 때문에 건식저장 중 핵연료의 손상이 발생하지 않도록 하여야 한다. 국내에는 아직 사용후핵연료 인허가기준이 설정되지 않은 상태이다. NRC에서 작성된 10CFR72는 저장기간동안 피복관의 건전성이 유지됨을 보이는 것을 의무화 하였으며 SRP (NUREG-1567)에서는 최소한 20년 이상 핵연료봉이 건전하기 위해서는 정상/비정상 상태에서 각각 피복관 허용온도가 380°C/570°C이하로 유지되어야만 할 것과 40년간의 저장시 손상확률이 0.5%이하임을 보이도록 하고 있다[2].

2.2 사용후핵연료 크리프 거동 평가

2.2.1 사용후핵연료 크리프 시험

핵연료 피복관은 노내에서 연소하는 동안 수소농도가 증가하게 되고, 피복관의 기계적 특성에 영향을 주게 된다. 사용후핵연료의 건식저장시 피복관의 크리프 특성을 평가하기 위해서는 이의 영향을 고려하여야 한다. 또한 핵연료 피복관은 피복관 부식 및 기계적 특성을 향상시킨 고연소도 피복관을 지속적으로 개발하여 사용하고 있다. 국내에서는 고연소도 핵연료의 개발시 국내의 사용후핵연료중 방출연소도가 높은 핵연료를 대상으로 건식저장 조건에서의 크리프 시험을 수행한 바가 있다[3]. 시험은 수소영향을 고려하여 수소미주입피복관, 수소주입피복관 및 조사피복관을 대상으로 수행하였다. 그림 1은 피복관 유형별 인가응력에 따른 Larson-Miller Parameter 값을 도시한 것이다. Larson-Miller Parameter는 다양한 온도에서의 크리프 변형특성을 종합적으로 평가하여 크리프 수명을 평가하는 것으로서 크리프 변형에 대한 저항성의 척도로서 사용될 수 있다. 그림 2에서는 피복관내 수소에 의해 2차 크리프 변형율이 증가하는 것을 알 수 있었다.

2.2.2 사용후핵연료 크리프 거동 평가 모델

한국원자력연구원에서는 정상운전조건에서 핵연료 성능평가코드를 개발한 경험이 있으며, 사용후핵연료의 건식저장동안 예상되는 크리프 변형을 계산하기 위한 크리프 해석 방법 및 해석모델 개발하고자 한다. 조사후피복관의 크리프 변형은 1차 크리프변형과 2차 크리프변형으로 구성되며, 시간, 온도 및 응력에 의해 결정된다. 크리프 모델식은 2.2.1에서 기술한 크리프 시험을 수행하여 확보한 시험자료로부터 도출할 수 있다.

3. 결론

우리나라 원전에서 연소된 사용후핵연료는 발전소내 사용후핵연료 저장조에서 습식방법으로 저장되고 있으나 2016년도에 저장용량이 포화상태에 이를 것으로 예상되고 있으며, 이에 대한 방안으로 건식저장방식이 고려되고 있다. 저장방식의 변경으로 건식저장시 사용후핵연료의 건전성 평가가 이루어져야 하며, 사용후핵연료 피복관의 건전성에 가장 영향을 끼치는 요인중의 하나가 크리프 변형으로 건식저장시 사용후핵연료의 거동을 예측할 수 있어야 한다. 따라서 국내의 다양한 사용후핵연료를 대상으로 시험매트릭스를 결정하고 건식저장 조건에서의 크리프시험을 수행하고, 크리프 시험결과를 활용하여 크리프 거동을 예측할 수 있는 모델이 개발되어야 한다.

4. 참고문헌

- [1] L. D. Blackburn, D. G. Ferwick, S. R. Fields, L.A. James, and R. A. Moen, Hanford engineering Development Laboratory Report, HEDL-TME 78-37 (May 1978).
- [2] A. B. Johnson, Jr et al., "Technical basis for storage of Zircaloy-Clad spent fuel in inert gas", PNL-4835.
- [3] S. K. Kim, J. G. Bang, D. H. Kim, I. S. Lin, Y. S. Yang, and Y. H. Koo, "Hydrogen effects on creep behavior of Zr alloy nuclear fuel cladding under dry storage condition", Transactions of the Korean Nuclear Social Spring Meeting, Jeju, Korea (Oct. 2010).

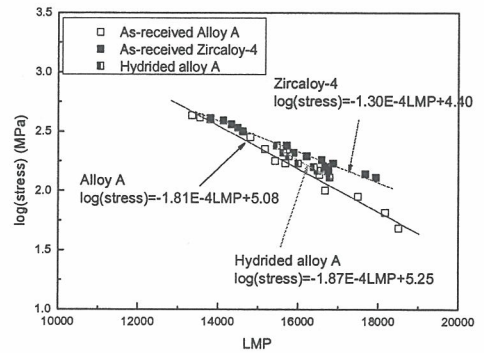


Fig. 1. 피복관 유형별 인가응력에 따른 Larson-Miller Parameter

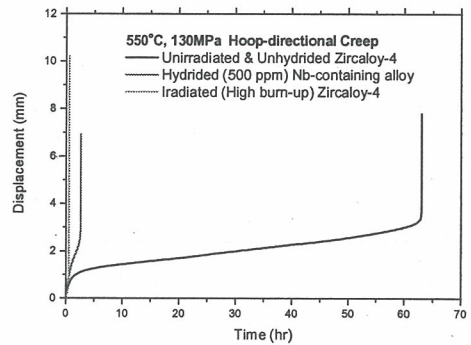


Fig. 2. 미조사, 수소주입, 조사 피복관의 크리프 특성 비교 (H=500ppm, 550°C)

Table 1. 건전성평가 대상 사용후핵연료 범위

발전소	집합체 형태	주기	핵연료종류	피복관
고리 1	14x14	1~13	STD-WH OFA-WH KOFA	Zry-4
고리 2	16x16	1~12	STD-WH KOFA STD-WH STD-KNF	Zry-4 Zry-4(W)*
고리 3	17x17	1~8	STD-WH OFA-WH KOFA	Zry-4
고리 4	17x17	1~7	STD-WH OFA-WH KOFA	Zry-4
영광 1	17x17	1~9	OFA-WH KOFA	Zry-4
영광 2	17x17	1~9	OFA-WH KOFA V5H	Zry-4
울진 1	17x17	1~6	STD-FRA KOFA	Zry-4
울진 2	17x17	1~6	STD-FRA KOFA	Zry-4(W)*

주) * : Improved Zircaloy-4