

HANA-6 피복관의 사용후핵연료 안전성 평가를 위한 크립모델링

정양일, 김현길, 최병권, 박동준, 박정용, 정용환
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
 yjiung@kaeri.re.kr

1. 서론

국내 경수로에서 배출되는 사용후핵연료는 전량 원전부지 내의 수조에 임시 보관되고 있으며, 고준위 폐기물처분장의 완공 후에 영구 처분될 것이다. 현재 저장 수조의 용량은 한계에 다다르고 있으며, 빠른 시일 안에 선진국에서와 같이 건식저장에 대한 방안이 마련되어야 한다. 건식저장은 오염원의 배출, 대테러 안전성, 사용후핵연료 관리, 소요부지 측면에서 습식저장에 비하여 장점이 있다. 그러나 사용후핵연료의 건식저장 중에 핵연료 피복관은 핵분열 열에너지와 반응가스에 의한 온도와 압력에 지속적으로 노출된다. 따라서 피복관의 크립파단, 응력부식균열, 수소지연파괴 등과 같은 안전성 저해요소에 대한 연구가 수행되어야 한다. 본 연구에서는 한국원자력연구원에서 개발한 HANA-6 피복관 소재를 이용하여, 피복관의 장기열화손상을 예측하기 위한 크립모델링을 수행하였다.

2. 크립 모델링

사용후핵연료에 대한 크립모델링은 조사제를 이용하여 예측하는 것이 바람직하다. 그러나 비조사제는 조사제에 비하여 크립변형율이 크기 때문에 비조사제를 이용한 예측은 더욱 보수적인 결과를 제공할 수 있다 [1]. 또한, 조사제를 모사하기 위하여 수소장입을 할 수도 있다. 연소 후 피복관에 대한 크립모델링의 특징은 연소 중 크립모델에 포함되는 중성자속에 대한 정보가 포함되지 않는 것이다. 이는 연소 후 피복관에서 추가적인 조사효과가 기대되지 않기 때문으로 판단된다.

2.1. Spilker 모델

Spilker et al. [1]은 지르칼로이-4의 크립거동을 모델링하기 위하여 비조사제를 이용하여 100~400°C의 온도와 80~150 MPa의 압력조건에서 실험을 수행하였다. Spilker et al. [1]은 시간에 따른 크립변형량을 아래 식(1)과 같이 근사하였다.

$$\epsilon = A \cdot t^m \quad \dots \dots \dots (1)$$

여기서 A는 상수이며, t는 시간, m은 식 (2)와 같이 표시되며,

$$m = c_0 + c_1 T_f + c_2 T_f^2 + \dots + c_{10} T_f^{10} \quad \dots \dots \dots (2)$$

c_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 10$)는 상수, T_f 는 온도(T)와 응력(σ)의 함수로, $T_f = T + (\sigma - 80) \cdot 45/70$ 로 표시된다. 독일의 CASTOR 시범 성능실험에서 40 GWd/tHM 이하의 핵연료는 1% 이하로 변형량이 제한된다면 파괴가 일어나지 않는 것을 실험적으로 확인하였고, 이들의 연구를 통하여 수식적으로 해당 조건의 안전성을 예측하여, CASTOR 인허가를 득하였다.

2.2. Mayuzumi-Onchi 모델

Mayuzumi와 Onchi [2-4]는 비조사제 지르칼로이-4의 크립거동을 다음과 같은 수식으로 표현하여, 건식저장환경에서의 크립거동을 예측하였다.

$$\epsilon = \epsilon_p + \dot{\epsilon}_s \cdot t \quad \dots \dots \dots (3)$$

여기서 ϵ_p 는 일차크립 변형량이며, $\dot{\epsilon}_s$ 는 이차크립 변형속도, t는 시간이다. 이때, ϵ_p 는 식(4)와 같이 가정하였고,

$$\epsilon_p = \epsilon_{sat} [1 - \exp(-at^b)] \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

여기서 ϵ_{sat} 는 이차크립 변형속도를 시험원점으로 외삽한 변형량이며, ϵ_s 와 실험적인 관계식으로써 도출된다. 또한, a와 b는 실험에 의하여 결정되는 상수이다. ϵ_s 는 식(5)와 같이 고전적인 크립변형률 식을 따랐다.

$$\dot{\epsilon}_s = A \cdot \frac{E}{T} \cdot \exp\left(\frac{B\sigma}{E}\right) \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

여기서 A와 B는 상수, E는 영률, Q는 크립에 대한 활성화 에너지이다. Mayuzumi와 Onchi는 크립변형률에 대한 응력의 지수함수 의존성을 채택하였다.

3. HANA-6 크립거동

건식저장환경에서 정상상태 온도는 400°C 이하이며, 압력은 150 MPa 이하이다. 기존 보고에 의하면, 지르코늄 합금의 크립은 상기 조건에서 멱수법칙(power-law)을 따른다. 즉, Mayuzumi-Onchi 모델은 멱수법칙으로 수정될 필요성이 있으며, 식(5)는 다음과 같이 표현되어야 함당하다.

$$\dot{\epsilon}_s = A \cdot \frac{E}{T} \cdot \left(\frac{\sigma}{E}\right)^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

본 연구에서는 상기 수식을 활용하여, HANA-6 핵연료피복관 소재에 대한 크립모델링을 수행하였다. 크립시험은 345~460°C, 30~180 MPa에서 수행하여 모델링의 자료로서 활용하였다. 크립모델링을 통하여, 임의의 실험 온도와 압력조건에서 크립변형량과 변형속도를 예측할 수 있었다. 또한 발표에서는 동 피복관의 건식저장에 대한 안전성에 대하여 논의될 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] H. Spilker, M. Peehs, H.-P. Dyck, G. Kaspar, K. Nissen, Spent LWR fuel dry storage in large transport and storage casks after extended burnup, J. Nucl. Mater, 250 (1997) 63-74.
 [2] M. Mayuzumi, T. Onchi, Creep deformation of an unirradiated zircaloy nuclear fuel cladding tube under dry storage conditions, J. Nucl. Mater, 171 (1990) 381-388.
 [3] M. Mayuzumi, T. Onchi, Creep deformation and rupture properties of unirradiated Zircaloy-4 nuclear fuel cladding tube at temperatures of 727 to 857K, J. Nucl. Mater, 175 (1990) 135-142.
 [4] M. Mayuzumi, T. Onchi, The applicability of the strain-hardening rule to creep deformation of Zircaloy fuel cladding tube under dry storage condition, J. Nucl. Mater, 178 (1991) 73-79.