

사용후핵연료 안전성 예측을 위한 피복관 재료열화 거동 평가

김현길, 김일현, 정양일, 박상윤, 박정용, 정용환
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
hgkim@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료의 안전한 관리는 원자력에 대한 대국민 수용성을 증대시키고 차후 사용후핵연료의 재활용 측면에서도 매우 중요하다. 건식저장중인 사용후 핵연료의 손상은 핵연료의 연소도 및 수조저장기간과 상관성이 있는데, 경제성 향상을 위해 핵연료를 고연소도 연소후에 수조저장시설의 포화로 인하여 충분한 냉각이 진행되지 않은 상태에서 건식저장하면 핵연료의 안전성을 보장하기 어려울 것이다. 핵연료의 손상의 대부분은 피복관의 손상에 기인되는데, 고연소도 운전에 의한 피복관의 조사손상, 크립변형, 산화막 두께 증가 및 수소흡수는 피복관의 건전성을 크게 저하시키는 주요인이다. 따라서 피복관의 손상에 미치는 요인에 대한 연구가 필요하지만 조사 피복관을 이용한 직접적인 평가는 물적, 시간적 제약이 따르게 된다. 본 연구에서는 조사 피복관을 모사하여 수소장입, 크립변형된 피복관 소재에 대한 기계적 성능을 평가함으로써 사용후핵연료의 안전성 예측을 위한 기초연구를 수행하였다.

2. 시험방법 및 결과

사용후핵연료에 피복관 대한 기계적 성능평가는 조사 피복관을 이용하여야 하지만 조사제 시편의 취급 및 시간적 물적 제한으로 인하여 시험 수행에 제약이 따르며, 수소 또는 크립변형 등 독립적인 변수에 대한 영향 분석이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 표 1과 같이 표준시편(ZN)과 수소농도(ZH1, ZH2)와 크립변형량(ZC1, ZC2)을 독립변수로 한 고연소도 모사 피복관의 시편을 준비하여 기계적 건전성을 평가하였다. 사용후핵연료 피복관의 손상은 반경방향 응력으로 인하여 파손되기 때문에 링인장 시험을 통하여 피복관의 반경방향 연신율과 강도를 측정하였다.

표 1. 고연소도 모사 피복관의 합금 조성, 수소농도 및 크립변형량

피복관 조성	ID	수소농도(ppm)	크립변형량(%)
Zr-1Nb-1Sn-0.1Fe	ZN	6	0
	ZH1	512	0
	ZH2	1659	0
	ZC1	40	2.6
	ZC2	120	7.0

수소장입은 150 mm 길이의 피복관에 대하여 기상법으로 목표 수소량을 잡입하여 균질한 수소화물이 형성되도록 400℃에서 시효 열처리를 수행하였다. 수소장입 및 시효열처리 중에 피복관의 원주방향으로 응력을 인가하지 않아 수화물이 원주방향으로 생성되도록 하였다. 피복관의 크립시험은 150 mm 길이의 피복관에 150 MPa의 원주방향 응력이 인가되도록 내압을 가한 후 350℃에서 시험하여 변형량이 각각 2.6% 및 7%가 되도록 하였다 [1]. 인가응력은 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma_{\theta} = PD_m/2w \quad \dots \dots \dots (1)$$

여기서, σ_{θ} 는 hoop stress(MPa), P는 internal pressure(MPa), D_m 은 mid-wall thickness of cladding in diameter(mm) 그리고 w는 thickness of cladding(mm)이다. 크립시험 중 시험온도에서 산화반응이 진행됨에 따라 수소가 피복관 내부로 유입되어 초기 10 ppm 이하의 수소량이 크립시험 시간이 증가되면 증가되었다.

링인장 시험은 수소가 장입되고 크립시험이 완료된 피복관을 2mm 길이로 절단하여 Instron-3366 모델로 0.1 mm/min의 속도로 상온에서 수행하였다. 그림 1은 각각의 시편에 대한 링인장 시험 결과로 최대인장강도와 연신율이 시편조건에 따라 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 표준시편 대비 수소농도의 증가에 따라 연신율은 감소되는 것으로 나타났고, 크립변형량이 증가됨에 따라 연신율이 달라지는 것이

확인되었다. 수소량의 증가와 원주방향에서 반경방향으로 수화물이 생성되면 피복관의 연신율을 감소시킨다는 보고 [2]는 있지만, 크립변형량에 의한 연신율 감소는 보고된바 없다. 본 시험결과에 의하면 1659 ppm까지 장입된 수소에 의해 원주방향으로 수소화물이 형성된 것 보다는 7%의 크립변형이 피복관의 연신율을 크게 더욱 감소시키는 것으로 분석되었다.

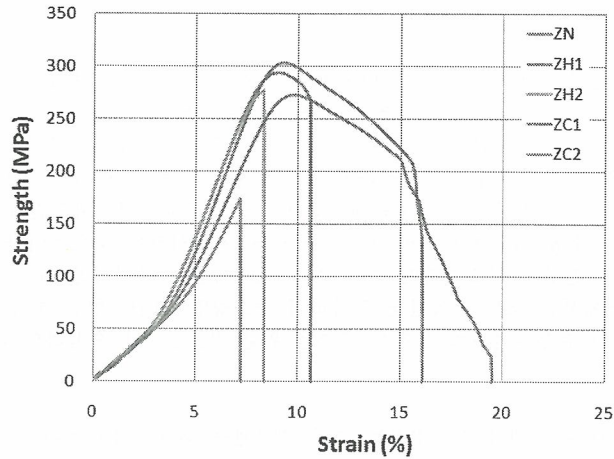


그림 1. 고연소도 모사 수소농도 및 크립변형량에 따른 Zr-1Nb-1Sn-0.1Fe 피복관의 링인장 특성

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] H.G. Kim, B.K. Choi, Y.H. Jeong, Effect of alloying elements on creep behavior of zirconium alloy for fuel cladding, J. Kor. Inst. Met. & Mater, 45 (2007) 500-505.
 [2] A. Racine, M. Bornert, D. Caldemaison, C.C. Sainte, C. Cappelaere, Experimental investigation of strain, damage and failure of hydrided Zircaloy-4 with various hydride orientations, Proc. 18th SMiRT 18-C04-6, Beijing, China, August 7-12, 2005