

사용후핵연료 피복관 내압 크립시험 기술 개발

장정남, 김성근, 서항석, 김기하, 손영준, 김도식
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
 jeongnam@kaeri.re.kr

1. 서론

국내 가압경수로 사용후핵연료 발생량의 증가와 원전 저장수조 내 저장 포화시점이 가까워짐에 따라 이것에 대한 대안으로 사용후핵연료의 건식저장이 유력하게 제기되고 있다. 건식저장 중 사용후핵연료의 건전성과 관련된 여러 가지 기술적 이슈 중에 핵연료 피복관의 열화에 가장 주요한 인자로 대두되고 있는 것이 크립과 수소화에 의한 피복관의 기계적 특성 저하이다. 따라서 본 연구에서는 건식저장 중 사용후핵연료 피복관의 크립거동을 평가할 수 있는 시험 기반과 기술을 개발하였다.

2. 본론

2.1 조사 피복관 내압 크립 시험기 개발

본 연구에서는 사용후핵연료 피복관을 대상으로 건식저장 조건에서 발생하는 크립(creep out) 거동을 시험하기 위한 시험기를 제작하였다. 이를 위해 피복관 내부에 압력과 시험온도를 장기간 일정하게 유지할 수 있는 시스템을 갖추었으며, 사용후핵연료 피복관 시편으로부터 나오는 방사선을 차폐하기 위한 차폐설비를 갖추었다. 또한 크립시험의 특성상 장시간 시험이 이뤄져야함을 감안하여 그림 1과 같이 3개의 독립된 모듈을 구성하여 3개의 조사 피복관을 동시에 시험할 수 있도록 하였다.

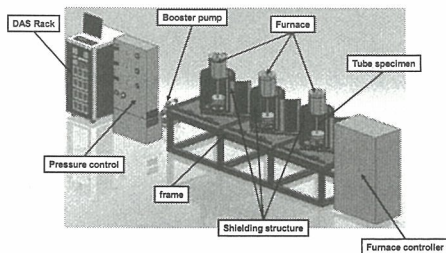


Fig. 1. Multi-channel irradiated clad tube creep tester.

이 장비는 크게 압력 및 온도를 제어하는 부분

과 시편의 직경변화 측정시스템, 그리고 조사시편 차폐부로 나누어져 있다.

2.1.1 압력 및 온도 제어

시편 내부에 가해지는 내압은 Ar 기체를 이용하여 부스터(Booster)에서 압력을 공급받아 시편에 일정한 하중을 유지하는 방식이다. 부스터 펌프는 Ar 기체용기에서 고압레귤레이터를 통해 공급받는 Ar 기체를 공압으로 압축시키며, 이때 펌프를 통해서 충전되는 기체는 압력유동이 많아서 시편 내압에 영향을 줄 수 있기 때문에 먼저 surge tank에 저장하고, 충전된 압력으로 고압레귤레이터를 사용하여 시편에 압력을 조절하는 방식이다. 부스터 최대 압축압력 130MPa까지 가능하며 surge tank는 1L용량의 130MPa까지 충전 가능하게 설계, 제작하였다.

시편의 온도제어를 위한 로(furnace)의 최대 시험온도(operating temperature)는 상온에서부터 600℃까지 구현할 수 있도록 제작되었으며, 250mm 시편 전구간에서 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내로 일정온도영역(uniform heat zone)을 만들기 위해 영역 온도 독립제어(two zone independent control)를 하였다. 이를 위해 상/하 피팅(fitting)부에 총 2개의 K-type 열전대를 설치하였고, 조사 피복관 시편의 장착을 용이하게 하기 위하여 로의 본체는 공압 실린더를 장착하여 상하로 개폐될 수 있게 하였다. 또한 시험 중 시편의 온도를 측정하기 위하여 시편의 상/중/하 3 곳에 총 3개의 K-type 열전대를 설치하였다.

2.1.2 크립 변형량 측정기술

본 연구에서 선정한 크립시험 방법에서는 내압이 가해진 피복관 시편을 로(furnace) 내부에서 가열하며, 일정한 주기에 따라 시편 총길이를 3~5 등분한 위치에서 직경의 변화를 측정하여 크립변형량을 측정한다. 이 때 직경은 레이저 익스텐소미터를 사용한 비접촉식 측정법으로 측정한다. 레이저 익스텐소미터는 다양한 종류가 시판되고 있으며, 이들 중 내압 크립시험기의 가열로 크기 등

사용조건과 시험 자료의 안정성을 가지고 있는 Micro-Epsilon사의 Model ODC 2500-35를 선정하였다. 또한 시험 중 로 내부에 장착한 크립 시편의 직경 변화량을 연속적으로 측정하기 위하여 가열로에는 대각선으로 두 개의 Quartz window(광대역 AR coating quartz, 50×50 mm)를 설치하였다. 그림 2의 레이저 광원(laser light source) 및 리시버(CCD-camera)는 방사선에 취약하므로 이 부품들을 보호하기 위하여 그림 2와 같이 “C”자형의 광로를 사용하고, 납 차폐벽을 설치하였다. 이 경우는 레이저 광을 반사하기 위한 미러가 필요하므로 elliptical flat mirror(silver coating, 50×50 mm)를 선정하여 광로 상에 설치하였다.

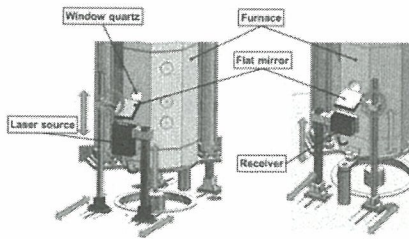


Fig. 2. Shielded laser extensometer for measurement of diametral creep strain.

2.1.3 조사 피복관 차폐 기술

본 장비는 실제 사용후핵연료의 소결체를 제거하고 피복관만을 대상으로 시험을 수행한다. 그렇다 하더라도 방사화된 피복관으로부터 고방사선이 나오게 된다. 이를 위해 차폐설비의 구축이 불가피하다.

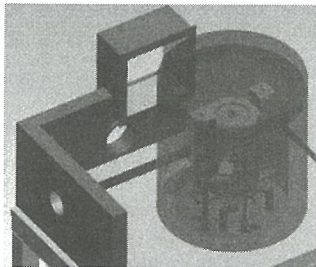


Fig. 3. Shielding structure design.

본 연구에서는 초기 농축도 U-235 4.5wt%, 연소도 60,000 MWd/MTU, 냉각기간 5년 된 사용후핵연료 피복관 250mm로부터 나오는 약 2 Sv/hr (시편표면 접촉선량)을 방사선원으로 삼아 차폐설계를 수행하였다. 시험기가 설치된 장소(방사선구

역)의 허용선량 제한치를 차폐체 표면에서 1m 이격거리에서 25 μ Sv/hr 로 설정하고 이 기준을 만족하도록 그림 3과 같이 차폐설비를 구축하였다. 구축된 차폐설비의 납두께는 모든 부분에서 8cm 로 설계, 제작되었다.

2.2 비조사 피복관 대상 성능시험

비조사 PLUS7 피복관 시편을 대상으로 개발된 내압 크립시험장비에 대한 성능시험을 수행하였다. 시편의 양단에 인서트를 삽입한 후 고압 피팅을 체결하였으며 시험기 본체와 시편 피팅부를 연결할 수 있는 연장봉과 가압 피팅을 그림 4와 같이 체결하여 최종 내압 크립시편을 준비하였다. 내압 크립시험은 400 °C에서 150 MPa의 원주응력(hoop stress)이 가해질 수 있도록 내압을 약 19 MPa을 인가하여 유지하였다. 약 12시간 시험이 진행된 시점에서 온도를 500°C로 승온하였고 30분만에 파열(rupture)이 발생되었다.



Fig. 4. Internal creep specimen

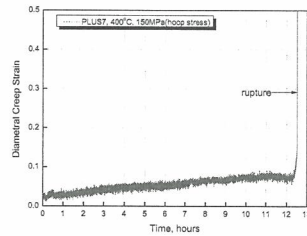


Fig. 5. Diametral creep strain of unirradiated PLUS7 cladding

3. 결론

비조사 피복관을 대상으로 개발된 장비의 성능시험을 성공적으로 수행하였으며 추가적으로 보다 장시간에 걸친 장비의 성능시험이 필요하다. 이후에 조사 피복관에 대한 시험을 수행할 예정이다.

4. 감사의 글

본 연구는 지식경제부가 시행한 방사성폐기물 관리기술개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.