

사용후핵연료 피복관 내압피로파괴시험 시스템 개발

김성근, 장정남, 권형문, 서항석, 김도식, 전용범, 주용선
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
 sg316@kaeri.re.kr

1. 서론

가압경수로에서 운전 중 피복관은 온도, 압력 및 외부하중 등에 의하여 반복적인 응력 및 변형을 받게 된다. 특히 사용후 핵연료봉은 부하추종 운전(load following operation) 및 주파수제어 운전 시 봉 내압이 주기적으로 변화하며, 이로 인하여 반복응력에 의한 피로를 겪게 된다.

출력이 증가하면, 온도 증가에 의하여 소결체(pellet)가 팽창하고 내압이 증가한다. 출력이 일정할 때는 피복관의 내면에 소결체와 접촉하고 있으며, 피복관의 원주방향 인장응력은 이완된다. 출력이 감소하면, 소결체의 수축이 일어나 소결체와 피복관 사이에 간극(gap)이 형성된다. 이 경우 피복관은 외부 냉각수 압력에 의하여 압축응력(외압)이 작용하고, 피복관이 소결체와 다시 접촉할 때까지 크립 다운(creep down)되어 압축응력이 이완된다. 그 후 출력의 증감이 계속되면, 피복관에는 저주기피로와 같은 응력-변형의 히스테리시스 루프(hysteresis loop)가 누적된다. 따라서 핵연료 설계 및 사용 중 건전성 확보를 위하여 내압을 받는 피복관의 중성자 조사에 따른 원주방향 피로특성이 정확하게 평가되어야 하며, 이를 위해 본 연구에서는 사용후핵연료 피복관에 대한 내압 피로파괴시험 시스템을 개발하였다.

2. 본론

2.1 시스템 설계 및 제작

사용후 핵연료 피복관의 조사 피로파괴거동은 조사 피복관 절편을 준비하고 고온으로 가열한 후 피복관 내부에 반복적인 압력을 가하여 시간에 따른 피복관의 파열시간을 측정함으로써 평가할 수 있다. 본 시스템(그림 1)은 시편을 고정하고 지지하는 본체, 시편 내부에 내압을 가하기 위한 가압부, 시편을 시험온도로 가열하기 위한 로, 그리고 가압부 및 로를 제어하기 위한 제어부와 차폐를 위한 차폐부(그림 2)로 구성된다. 상세 사양은 Table 1 과 같다.

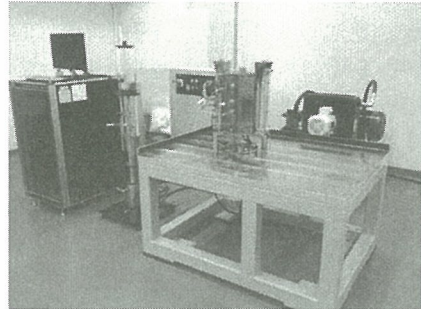


Fig. 1. Fatigue fracture test system.

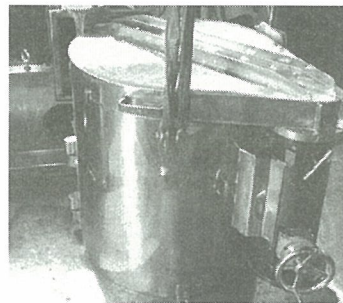


Fig. 2. Shielding part.

피복관의 내압은 실리콘 오일을 매체로 가해지며, 외부에서 펌프를 사용하여 가압 후 조사 피복관 시편 내부로 실리콘 오일을 보낸다. 피복관 내부 공급압력은 21 MPa 이며 자동제어방식의 압력제어기를 사용하여 피복관 내부의 안정 압력이 목표 압력의 ± 0.1 MPa 이내로 유지된다. 시편 가열을 위한 로(furnace)는 시험온도에서 ± 1 °C 이내로 유지되며, 조사 피복관 시편의 용이한 장착을 위하여 상/하 개폐형으로 구성된다.

Table 1. Hardware Specification.

Content	Specifications
* Pressure part	
Material	Silicon oil
Pressure	Max. 80 ± 0.1 MPa
* Furnace	
Size	$\phi 255 \times 425$ mm
Temp.	Max. 700 ± 1 °C

2.2 시스템 성능 시험

비조사 PLUS7 피복관 시편을 대상으로 내압 피로파괴 시험장비에 대한 성능시험을 수행하였다. 사용한 시편은 길이 250 mm인 비조사 PLUS7 피복관 절편이며, 시편의 양단에는 시편의 밀봉 및 시험기로의 장착을 위하여 그림 3과 같이 튜브 피팅을 체결하였다. 시스템에 시편 장착 후 (그림 4), 350 °C에서 1 Hz의 하중부하주기로 최소 원주방향 응력 3.9 MPa 및 최대 원주방향 응력 450 MPa의 삼각파 반복하중을 부하하여 성능시험을 수행하였다.

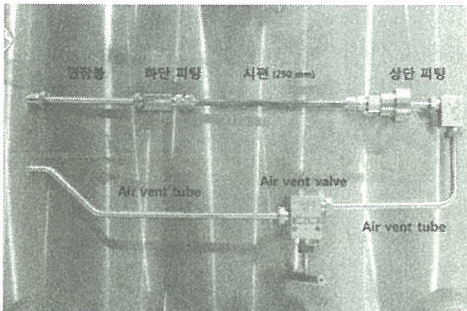


Fig. 3. Test specimen (nonirradiate).

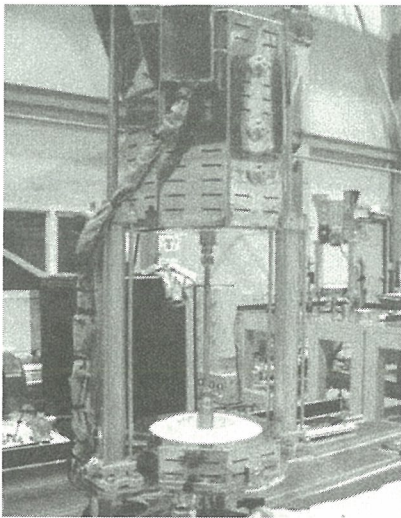


Fig. 4. Installed specimen in furnace.

그림 5~6은 내압 피로하중에 의하여 파열된 피복관 시편으로 상단부에서 파열이 발생함을 확인하였는데 이는 시편 내 온도 차이로 인한 현상으로 판단된다.

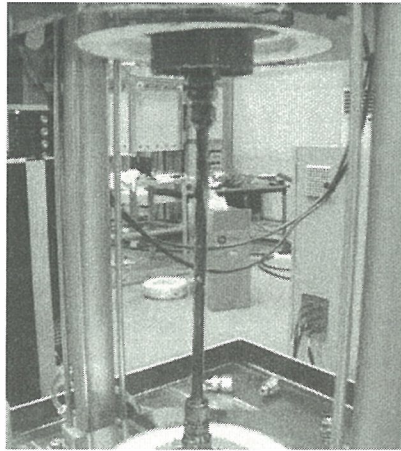


Fig. 5. Result of fatigue fracture test.

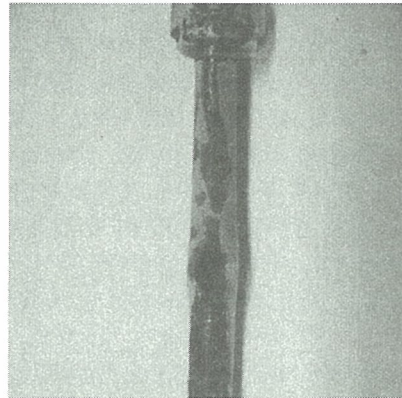


Fig. 6. Fractured specimen.

3. 결론

본 연구에서는 내압피로파괴시험 시스템을 개발하였고 이를 통해 비조사 시편에 대한 성능시험을 수행하였다. 추후 시스템 보완 및 이를 활용하여 한국표준원전용 개량핵연료(PLUS7) 및 웨스팅하우스형 원전용 개량핵연료(16x16 및 17x17 ACE7)의 비조사/조사 피복관에 대한 내압 피로파괴시험을 수행할 계획이다.

4. 감사의 글

본 연구는 지식경제 기술혁신사업으로 수행되었습니다.