

핵연료 내구성 시험장치의 정상 및 과도 운전중 진동응답신호분석 Steady-State and Transient Vibration Response Analysis of Nuclear Fuel Endurance Testing Facility

이강희[†] · 강홍석* · 신창환* · 오동석*

Kang-Hee Lee, Heung-Seok Kang, Shin-Chang Hwan, Dong-Seok Oh

1. 서 론

핵연료 집합체 내구성시험은 천이노심에서 이웃하는 두 다발의 실물크기의 핵연료를 대상으로, 집합체와 구성 연료봉의 정상 및 과도 진동특성, 부수로 유동과 집합체의 수력 특성 및 최대유량으로 장시간 유지 후의 피복관 마멸량 등을 종합적으로 평가하여, 새로운 핵연료 설계의 내구성과 양립성을 평가 및 검증하는 시험이다. 상기 시험을 위하여 한국원자력연구원 내 특수연구동에 핵연료집합체 양립성시험 시설(PLUTO: Performance Test Facility for Fuel Assembly Hydraulics and Vibration Analysis)이 구축되었고, 새롭게 개발된 연료와 기존 연료를 대상으로 최초의 내구성 시험이 수행되었다.

2010년 3월 4일을 기점으로 시작된 PLUTO 500시간운전 핵연료 집합체 양립성 및 내구성 시험이 3월 25일로 종료되었고, 500시간 운전기간 동안, 고온 고압 냉각재 순환장치 장치는 특별한 이상 징후 없이 안정적으로 운전되었다. 시험의 전반부에 대부분의 진동측정 계통과 시험용기 내 일부 차압측정 계통이 손상되는 사고가 있었지만, 최종적인 내구성 시험결과인 프레팅 마멸거동에는 영향이 없을 것으로 판단된다.

대상 시험집합체와 유동체널 및 압력용기에 대한 진동신호의 측정은 72시간 간격으로 총 8회 수행되었으며, 시험 시작 후 73시간 전에 모든 가속도 봉 신호가 비정상화되었다. 이것은 이전의 경험으로 비추어볼 때, 신호선이 절단된 것으로 판단된다. 간극센서는 초기 손상된 일부 센서를 제외하고, 경과시간 147까지 대부분의 센서가 살아남았으나, 스펙트럼 관점에서 정상적이지 못한 신호가 대부분이었다.

본 논문은 내구성 시험 동안에 측정된 시험용기와 유동체널에 대한 진동응답신호로부터, 냉각재 순환장치의 건전성을 확인하기 위하여 주로 진동레벨의 관점에서 분석하였고, 장시간 수행되는 고온 고압 수력진동시험에서 진동신호를 안정적으로 취득하기 위한 방안에 대해서 토의하고자한다.

2. 시험시설과 운전조건

핵연료집합체 양립성 시험시설은 상업용 가압경수로 핵연료 집합체의 수력적 성능 및 내구성을 검증하기 위한 고온 고압 시험시설이다. 시험시설은 국내에서 운용중인 한국표준형 원전 및 웨스팅 하우스형 원전에 사용되는 핵연료집합체의 인허가를 위한 시험데이터 생산을 주목적으로 하고 있으며, 그 외 신개념 핵연료의 유관 성능시험에도 사용될 것이다. 주요 시험조건 다음과 같다.

- 시험 및 운전 조건

- 1) 정상 운전 온도 압력 : 193.2 °C, 2.5 MPa
- 2) Dwell 시험 : 유량 730~1160 m³/hr 범위에서 단속 운전
- 3) 유량 변동 과도 운전시험 : 유량 730~1160 m³/hr 범위에서 상향/하향 변속운전
- 4) 내구성 시험 정상 운전유량 : 1160 m³/hr
- 5) 작동유체 : 탈이온화 순수(Deionized water)
- 6) 운전유속의 범위 : 4~6.5 m/s(노심평균유속기준)

냉각재 순환장치의 주요구성은 주배관계통, 시험대, 계측 및 제어계통, 자료처리계통, 전원공급계통, 보조계통등으로 구성된다. 시험대는 다양한 목적을 위해 집합체 두 다발용(A)과 한 다발용(B)으로 각각 구성된다. 시험대 A는 서로 상이한 핵연료가 동시에 인접하여 원자로에 장전되는 경우인 천이 노심을 모사하기 위한 것이다. 시험대 B에서 시험 핵연료집합체 한 다발을 사용하는 시험 종류는 압력손실 시험, 집합체 들림유량 시험, 유체유발진동 시험, 감쇠 시험 그리고 이물질 여과성능 시험이다. 두 다발의 집합체 중 하나는 한 주기 혹은 두 주기 연소 후 연료를 모사해야 하므로, 구성 연료봉의 피복관은 인위적으로 산화시킨 피복관을 사용하거나, 지지격자체의 일부 스프링도 지지격자체(이완과 성장)와 피복관(크립-다운)의 조사변형을 감안하여, 인위적인 변형 혹은 지지점 간극을 갖도록 설계한다. 따라서, 실제 운전시간에 비해 상대적으로 짧은 시간 동안 수행되는 내구성 시험은 가속성 시험(accelerated testing)이어야 하므로, 간극과 산화층형성의 측면에서 다소 보수적으로 시험조건을 설정되었다.

[†] 이강희; 한국원자력연구원
E-mail : leekh@kaeri.re.kr
Tel : (042) 868-2298, Fax : (042) 863-0565

* 한국원자력연구원

운전 중 시험장치 압력용기와 유동체널의 진동을 측정하기 위하여, 일반목적의 압전형 단축 가속도 센서(PCB Model 357B03, 04)와 고온용 가속도 센서(Endevco Model 6240M10)를 각각 용기와 유동관의 몸체에 부착(stud mounting)하였다. 압력용기의 진동 측정위치는 최대진폭 예상 위치(상단부 출구배관 쪽 2개소)와 공급관이 연결되는 유입부 용기 하단부(2개소) 플랜지이다. 유동체널의 진동측정 위치는 중심부와 상단부 3/4위치를 단면상의 수직한 방향으로(90°와 270°) 총 4개소에서 측정한다. 용기와 유동관의 진동측정위치를 그림 2에 도시하였다. 각 진동센서로부터 측정된 전압신호는 신호조정기와 증폭기를 거쳐 데이터 획득장치와 IDEAS/TDAS 프로그램을 이용하여 저장 및 신호분석되었다.

3. 측정결과 및 신호분석

유동체널 외면에 설치된 가속도 센서는 73시간까지 하나의 센서가 살아남았고(최대 진동레벨은 1.4 m/s^2), 143시간에는 모든 신호가 비정상화되었다. 표1은 시험 경과시간에 따른 압력용기와 유동체널의 가속도 레벨을 최대-최소 진폭의 값으로 나타낸 것이다. 압력용기의 정상운전 가속도 진동레벨은 최대 9.8 m/s^2 (용기 상단 동쪽방향)이하로 안정적으로 운전되었으며, 500시간 경과시점에서 장치용기의 최대 가속도 레벨은 3.57 m/s^2 로 측정되었다. 그림 1과 2는 변동유속 조건에서 유량변화에 따라 측정된 각각 유동체널과 압력용기의 진동응답 스펙트럼을 나타낸다. 장치 진동응답의 주요한 주파수 성분은 펌프회전수 증가에 따라 일정하게 변화되는 펌프회전맥동(pump blade passing frequency)과 유량이 증가되어도 일정한 주파수 대역에 나타나는 주파수 성분으로 구성되어 있다. 이러한 주파수 성분은 장치의 고유진동수일 가능성이 높다. 과도상태의 운전조건에서도, 장치는 안정적인 응답 스펙트럼 분포와 변화를 나타내고 있다.

4. 결 론

PLUTO 500시간운전 핵연료 집합체 양립성 및 내구성 시험이 성공적으로 종료되었다. 500시간 운전기간 동안, 고온 고압 냉각재 순환장치 장치는 특별한 이상 징후 없이 안

정적으로 운전되었다. 시험의 전반부에 대부분의 진동측정 계통과 시험용기 내 일부 차압측정 계통이 손상되는 사고가 있었지만, 최종적인 내구성 시험결과인 프레팅 마멸거동에는 영향이 없을 것으로 판단된다. 본 논문은 내구성 시험 동안에 측정된 시험용기와 유동체널에 대한 진동응답신호를 진동레벨의 관점에서 분석하였고, 장치건전성에 관하여 기술하였다.

후 기

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다(연구과제 관리 코드: M20706020005-08M0602-00510).

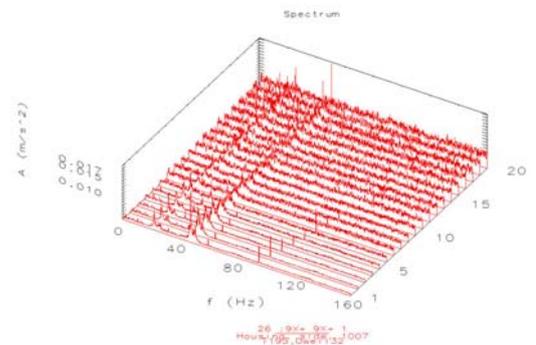


그림 1. 변동유속(과도운전시) 유동체널 진동응답 스펙트럼

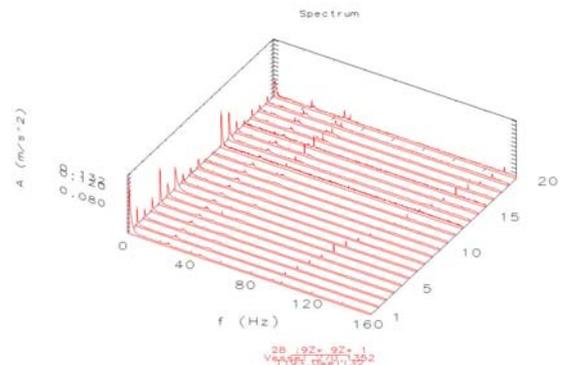


그림 2. 변동유속(과도운전시) 압력용기 진동응답 스펙트럼

Elapsed Time (hour)	Flow Housing Center		Pressure Vessel			
			Lower Flange	Lower flange	Upper flange	Upper flange
	Front, West	Side, North	x, 0°(West)	y, 270°(North)	x, 180°	y, 270°
1	0.75	1.4	1.5	1.4	4.4	1.5
73	0.9	813(fault?)	2.3	0.63	9.8	3.2
147	910(fault?)	830(fault?)	1.9	0.63	5.9	3.4
289	810(fault?)	17300(fault?)	3.0	0.6	1.6	3.3
358	-	-	2.61	0.62	1.49	3.62
433	-	-	1.51	1.81	1.18	3.65
500	-	-	2.1	2.36	1.54	3.57