

# 환형 핵연료 4x4 시험 집합체의 유체유발진동 및 압력강하 측정시험 Flow-Induced Vibration and Pressure Drop Measurement Testing for the 4x4 Annular Fuel Test Bundle

이강희<sup>†</sup> · 강홍석\* · 김형규\* · 김재용\* · 이영호\* · 윤경호\*

Kang-Hee Lee, Heung-Seok Kang, Hyung-Kyu Kim, Jae-Yong Kim, Young-Ho Lee, Kyung-Ho Yoon

## 1. 서 론

연료봉의 내측과 외측에 냉각재 유동체널을 갖는 환형 핵연료는 고출력·고연소·저온 핵연료를 목표로 원자력 연구원에서 개발되고 있는 차세대 핵연료다. 본 실험은 환형 핵연료 구성요소들에 대한 유체유발 진동 특성을 실험적으로 확인하고, 삽입형 지지격자체 대한 압력손실계수를 측정하기 위한 실험이다. 삽입형 지지격자체로 구성된 환형핵연료 4x4 모의 시험용 집합체를 제작하고, 상온상압 냉각재 순환루프를 이용하여, 수력진동시험(hydraulic vibration testing)을 수행하였다. 특성시험은 봉다발 유속을 기준으로 3~7 m/s의 운전범위에서 1 m/s 간격으로 단속적으로 수행되었다. 유속증가에 따른 집합체와 연료봉의 진동스펙트럼과 지지격자 압력손실 계수를 측정하였고, 두 가지 지지격자 시험집합체에 대하여 진동 및 수력특성을 비교하였다.

## 2. 시험시설과 시험집합체

시험용 핵연료 부분 집합체를 이용한 유동유발진동 시험의 목적은 원자로 노심에 위치하는 핵연료의 유동유발진동 현상과 부수로 냉각재 유동의 수력현상을 노외, 상온, 상압 조건에서 모사하여, 핵연료 주요 구조부품의 유동유발진동 및 수력특성을 평가/비교하는 것이다. 그림 1은 냉각재 순환장치 개략도를 나타낸다. 순환유체는 펌프 송출력에 의해서 수조의 하단으로부터 공급관을 통하여 유동관 하단의 분배기와 노즐관을 거쳐 유동관 내부를 수직상승하면서, 시험집합체의 길이방향과 나란하게 유동한 후 노즐 상관을 통해 대기압 조건의 수조로 다시 향하게 된다. 유동관은 투명한 아크릴 관으로 제작하여 비접촉식 레이저 진동센서를 이용하여 유동관의 내부에 위치하는 시험집합체의 횡방향 진동을 측정할 수 있는 구조로 되어 있다.

환형 핵연료 기본제원에 대한 시험용 모의 집합체의 스펙길이 및 지지점 위치는 기존연료의 스펙길이와 비율을 우

선적으로 모사하고, 기존연료에 대한 시험결과와의 비교를 위하여 중심 지지격자 위치를 기준으로 압력측정 공의 배열을 감안하여 지지격자의 위치를 설정하였고, 최하단 자유길이는 기존연료와 같이 20~25 mm로 유지할 수 있도록 설정한 것이다. 그림 2는 시험집합체의 지지점 위치와 스펙길이를 나타낸다. 시험집합체는 12 개의 dummy 시험봉(빈 이중관 조립체), 2 개의 고정봉, 2 개의 계측봉(빈 봉 및 펠렛삽입 봉)으로 총 16 개의 시험봉과 6 개의 지지격자의 조합으로 구성된다. Dummy 시험봉은 두 개의 스테인리스 표준 관에 봉단 마개를 용접하여 조립하였다. 고정봉은 시험집합체 단면의 대각선 중심에 위치하여 시험집합체를 FIVPET loop에 고정할 수 있도록 양단에 나사 체결부를 구비하며, 내측유로를 갖지 않는다. 두 개의 계측관은 내측관 FIV 확인 시험용으로, 구리 펠렛을 장입시킨 봉과 빈 봉에 내측봉의 진동측정이 가능하도록 관측창(view hole)을 구비시켰다. 지지격자체는 스테인리스 재질의 4x4 지지격자체를 제작하였으며, 그림 3은 개별 격자관들의 교차점에 원통형 삽입물을 구비하는 삽입형 지지격자체와 외팔형 지지격자 시험시편을 나타낸다.

## 3. 시험방법

정상조건의 응답측정시험에서는 시험 집합체 통과(bare bundle 위치) 평균유속을 기준으로 3에서 7 m/s까지 1 m/s 간격으로 일정하게 증가시키면서, 대상 시험체와 시험봉의 진동응답과 지지격자 부수로 압력손실을 측정하였다. 유동관 내부를 수직상승하는 순환유체는 순수를 사용하며, 냉각재 온도는 동절기 운전조건을 감안하여 상온보다 약 5~10도 높은 온도에서 운전하였다. 시험집합체 및 그 구성요소들의 진동측정은 비접촉식 레이저 진동계를 이용하여 광학적인 방식으로 측정하며, 지지격자의 압력강하량은 차압계로, 관내 동압은 미소동압계를 이용하여 각각 측정하되, 필요에 따라 측정기에 대한 교정정보를 확인 및 간이교정을 수행하고, 오차발생가능성에 관해 사전분석을 수행하였다.

## 4. 시험결과 및 토의

그림 4는 삽입형 지지격자체와 외팔형 지지격자체로 구성된 두 시험집합체에 대한 유체유발진동 시험결과로, 시험

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

\* 한국원자력연구원

유속 3에서 7 m/s까지, 정상상태 유동조건에서 측정된 대상 시험봉의 진동응답 스펙트럼을 나타낸다. 집합체와 개별 구성봉의 유동유발진동 응답은 외부 가진 주파수에 대하여 일종의 대역필터처럼 반응하게 되는데, 펌프회전 맥동주파수를 제외한 축방향 유동에 의한 가진 에너지가 백색잡음(white noise)에 가까운 스펙트럼 특성을 나타내므로, 시험 집합체와 시험봉의 응답 스펙트럼은 자신의 고유 진동수 주파수 대역에서 큰 에너지의 진폭을 나타낸다. 즉, 100 Hz를 기준으로 그 이하에서는 시험집합체의 주요한 저차모드에 해당되는 주파수 성분들이 나타나고, 그 이상의 주파수 범위에서는 시험봉의 주요 저차 모드들이 일정한 인접 주파수 성분(side band)을 가지면서 나타나고 있다. 일정한 폭의 인접 주파수 성분들은 인접한 시험봉 들 사이의 연성(coupling)에 따른 결과로 보인다. 집합체와 개별 시험봉의 진동응답은 시험봉의 고유진동수 주파수 대역에서의 신호 성분들로 명확히 구분되는 특징을 갖게 된다. 즉, 시험봉의 응답은 집합체와 시험봉 자체의 주파수 성분들을 모두 포함하나, 중심 지지격자에서 측정된 시험집합체의 응답 스펙트럼에서는 개별 구성 시험봉들의 모드 주파수 성분을 포함하지 않는다. 외팔형과 삽입형 시험집합체 내부의 대상 시험봉에 대한 진동응답 스펙트럼은 전반적으로 유사한 스펙트럼 분포를 보이지만, 상대적으로 약한 스프링 지지력을 갖는 외팔형 시험집합체의 경우가 관심과수 범위에서 비교적 큰 진동진폭을 나타내는 것으로 보여진다. 압력손실의 측정은 4번째와 5번째 중간 지지격자를 기준으로, 두 개의 측정구간에 대하여 측정하고, 이 두 구간의 합 차압을 측정하여 중첩 특성을 확인하였으며, 이들을 근거로 손실계수를 평가하였다. 수력특성에 대한 이러한 측정결과는 유동시험조건에 대한 반복성 확인과 시험장치의 검증에 활용할 수 있다. 그림 5는 두 지지격자에 대한 손실계수를 비교한 것이다. 개별구간에서의 압력손실은 스펀 구간의 봉 마찰 손실과 지지격자가 위치하는 구간에서의 형상손실에 의해서 결정되는데, 이 두 구간의 압력손실 차이를 이용하여 단위길이 당 봉 마찰 손실값을 추정할 수 있다. 반복시험 시의 데이터 일관성과 참조 데이터와의 상대비교를 통하여, 냉각재 순환장치와 환형연료 시험 집합체를 이용한 삽입형 지지격자체의 압력손실 측정시험 방법 및 결과가 충분히 신뢰할 수 있다고 판단된다.

### 5. 결 론

환형연료 4x4 시험집합체의 수력진동시험을 통하여, 집합체 단위의 유체유발진동과 부수로 압력손실 특성을 확인할 수 있었고, 환형 연료봉의 지지용으로 개발된 두 가지 지지격자 모형에 대한 진동과 수력특성을 비교할 수 있었다. 두 가지 지지격자 시험 집합체에 대한 유체유발 진동응답 스펙트럼의 진동 에너지 분포는 유사하나, 압력손실의 관점에서 외팔형 지지격자체가 좋은 특성을 보임을 알았다.

### 후 기

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

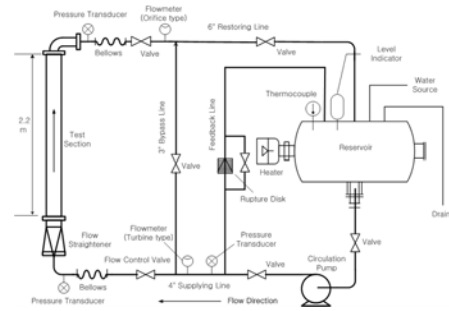


그림 1. FIVPET장치 개략도.

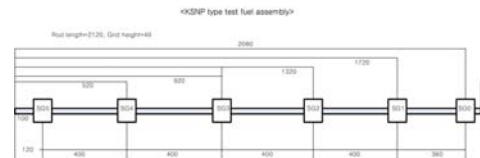


그림 2. 시험집합체 지지점 위치와 스펀길이



그림 3. 삽입형 및 외팔형 4x4 지지격자체.

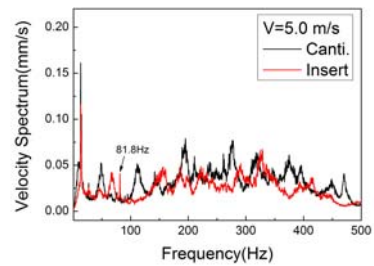


그림 4 환형연료 시험집합체 유체유발진동 응답(5m/s)

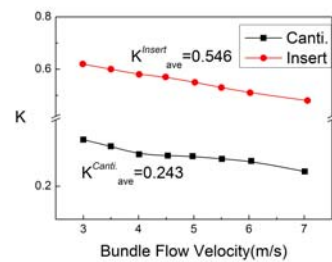


그림 5. 지지격자 압력손실 계수 비교