

부분 횡류조건에 놓인 세다발 핵연료 집합체의 유체유발진동실험 Flow-Induced Vibration Testing of 3 Fuel Assemblies with Partial Cross-Flow

이강희* · 강홍석* · 김재용* · 권태순**

Kang-Hee Lee, Heung-Seok Kang, Jae-Yong Kim and Tae-Soon Kwon

1. 서 론

가압경수로형 원자로 노심은 설계특성과 연소이력이 다른 이종 핵연료들의 조합으로 구성될 수 있고, 이 때문에 노심의 횡단면에 걸쳐서 핵연료의 압력손실 특성과 분포가 균일하지 않을 수 있다. 원자로 노심하부에서 핵연료 채널로 유입되는 입구유량은 핵연료의 압력손실 특성에 의해서 결정되며, 상기와 같은 이유로 핵연료 집합체 하부로 유입되는 채널 입구유량이 변화되면 노심 하부의 일정 높이까지 유동의 기울어짐 현상, 즉 횡류유동이 발생된다. 원자력 연구원은 세 다발의 실물크기 핵연료 집합체를 대상으로, 각 핵연료의 입구유량을 독립적으로 제어하고, 시험 핵연료의 인접면에 위치하는 유동차단 막(격리판)을 이용하여 인위적인 횡류발생과 함께 냉각재가 혼합되는 영역의 높이를 조절할 수 있는 냉각재 순환장치를 개발하였다. 본 실험의 목적은 세 다발의 실물크기 핵연료 집합체를 대상으로, 이들이 인위적인 횡류발생 조건에 놓일 때, 관심 시험 집합체의 유체유발진동 응답특성을 파악하고, 횡류발생조건과 혼합길이의 변화에 따른 진동특성의 차이를 확인하는 것이다. 아울러, 원자로 천이노심에서 발생가능한 냉각재 유동조건에 불균형 및 횡류조건에 따른 핵연료의 유체유발진동 특성에 대한 기초 실험자료 획득함을 목적으로 한다. 본 논문은 실험의 전반적인 내용과 예비 실험 결과에 대해서 기술한다.

2. 실험준비

그림 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 시험장치는 3개의 주 순환펌프를 가지며, 각 채널별로 입/출구 유량(초음파 유량계 및 Vortex 유량계), 압력, 온도를 측정할 수 있도록 유동계측 장치를 갖추고 있다. 유량은 펌프구동 진동기를 인버터 제어를 통해서 조절하였다. 시험 집합체 사이에 위치하는 격리판(판두께 1mm)은 와이어와 도르레를 이용하여 단계적으로 개폐가 가능하도록 시험관 상부에

설치되어져 있다. 실험은 세 가지 혼합길이(격리판의 높이)에 대하여 각각 유동이 균일할 때와 불균일할 때의 진동응답 스펙트럼을 측정하였다. 시험집합체 내부에는 5개의 가속도 계측봉을 그림 2와 같이 집합체 횡단면의 중심부와 외각부에 위치시켰고, 가속도 계측봉 내부에서 모의 텅스텐 펠렛과 시험연료의 진동을 측정하기 위한 실린더 형상의 2축 가속도 센서를 장입시켰다.

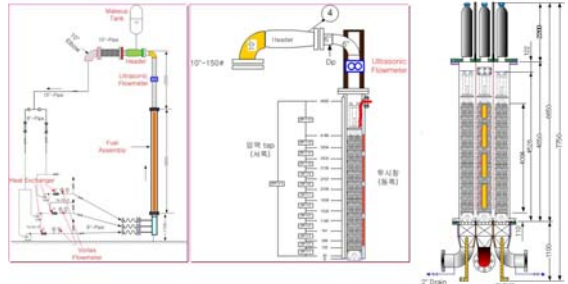


그림 1 실험장치 개략도(측면도, 상세도, 정면도)

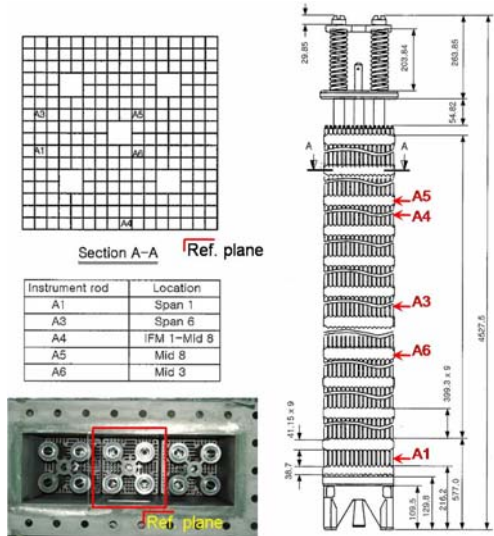


그림 2 가속도 계측봉 설치 위치 및 실험집합체

† 교신저자 ; 정회원, 한국원자력연구원
E-mail : leekh@kaeri.re.kr

Tel : 042-868-2298, Fax :042-863-0565

* 한국원자력연구원 경수로핵연료기술개발부

** 한국원자력연구원 열수력안전연구부

시험관의 기준면에는 내부 시험 집합체를 관찰 및 가시화측정할 수 있도록, 각 지지격자 위치에 투명한 가시화

창이 형성되어 있고, 이를 통하여 2대의 레이저 진동 계측 센서를 이용하여 대상 시험집합체의 진동속도를 실사 계측하였다. 입구유량은 $86.9\sim 106.2\pm 0.1$ kg/s범위에서 수행되었고, 순환유체의 온도는 60 ± 0.5 °C범위에서 일정하게 유지되었다.

3. 실험결과

격리판이 최저위치일 때, 각 핵연료 채널로 유입되는 입구유량은 횡류형성 없이 곧바로 채널 상부로 흘러 들어가게 된다. 측정대상 시험 집합체의 진동 응답에서의 차이는 입구유량의 크기에 따른 차이만이 측정결과로 나타났다. 유동의 크기가 90%로 감소됨에 따라, 시험 집합체의 주요한 저차 진동모드에 대응되는 주기성분 들의 진폭이 일정하게 감소되는 것을 확인할 수 있었고, 전반적인 스펙트럼 응답의 파형은 대동소이하었다. 시험봉의 속도 응답은 집합체 중심부에서 측정하는 시험 집합체의 속도 응답에 비해 전반적으로 작은 진동진폭을 보여주었으며, 주파수 특성은 30 Hz 이상 중주파수 대역의 지배적인 주기성분들을 보여주고 있다. 스펙 영역에 위치하여 연료봉의 중주파수 대역의 진동응답을 주로 측정하는 A1, A3 가속도 봉의 응답에서는 연료봉의 저차 진동모드 주파수 대역(80Hz~150Hz)과 일부 펌프회전에 의한 주파수 및 전원잡음성분을 포함하고 있었다. 전반적인 시험집합체 가속도 응답의 크기는 비균일 유동일 때, 크게 나타나고 있으며 이것은 장치와 펌프여기 맥동 주파수의 공진에 따른 결과로 사료된다. 중간 지지격자 위치에서 주로 집합체의 저주파 진동응답을 측정하는 A5, A6번 계측봉 응답은 이전의 측정결과와는 상이한 응답 스펙트럼 분포를 보여주었다. 격리판이 지지격자 2번 위치에 있을 때, 레이저 진동계를 이용하여 관측창을 통해 측정된 시험집합체의 진동속도 응답은 시험집합체 하부에 횡류가 형성됨에 따라, 시험 집합체의 주요한 저차 진동모드에 대응되는 주기성분들의 진폭이 전반적으로 증가됨을 확인할 수 있었고, 전반적인 스펙트럼 응답의 파형은 이전의 결과와 대동소이하었다. 스펙 영역에 위치하여 연료봉의 중주파수 대역의 진동응답을 주로 측정하는 A1, A3 가속도 봉의 응답에서는 연료봉의 저차 진동모드 주파수 대역(80Hz~150Hz)과 일부 펌프회전에 의한 주파수 및 전원잡음성분을 포함하고 있었다. 결과적으로, 기저 격리판 위치의 시험조건일 때와 응답차이는 대동소이하었다. 대상 핵연료집합체의 유체유발진동 응답특성은 측정 위치에 따라 다소 복잡한 응답 스펙트럼 분포를 보여주고 있으며, 스펙영역에서 측정된 진동응답은 공통적으로 80~150Hz까지 연료봉의 저차 고유진동수에 해당되는 중주파수 대역의 응답성분들에 에너

지가 집중되고 있었다. 전체적으로 입구유량이 균일 및 비균일한 차이에 따른 대상 시험집합체의 응답특성은 일부 펌프회전 여기주파수의 차이와 국부적인 공진주파수를 제외하고, 대동소이하었다.

4. 결 론

본 논문에서는 3가지 경우의 격리판의 위치에 따라, 레이저 진동계로 측정된 집합체 및 시험봉 진동속도 응답, 계측용 시험봉 내부로 삽입된 가속도계로 측정된 시험봉 가속도 응답 순으로, 측정결과를 기술하였다. 균일 및 비균일 입구유량 조건일 때, 시험장치 하우징의 횡방향 가속도 응답에서 나타난 주기성분은 주로 펌프회전 맥동에 의한 조화성분으로 나타났다. 100 Hz 이상 고주파수 영역에서 나타나는 에너지가 크고 복잡한 주파수 특성을 갖는 다수의 장치 진동모드 성분들은 100 Hz 이하의 주된 집합체 응답성분에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다. 격리판의 위치에 따라 측정된, 시험집합체의 진동속도 응답의 전반적인 스펙트럼 특성은 대동소이하었다. 시험봉의 속도 응답은 집합체 중심부에서 측정하는 시험 집합체의 속도 응답에 비해 전반적으로 작은 진동진폭을 보여주고 있으며, 주파수 특성은 50 Hz 이상 중주파수 대역의 지배적인 주기성분들을 다수 보여주고 있었다. 대상 핵연료집합체의 유체유발진동 응답특성은 측정 위치에 따라 다소 복잡한 응답 스펙트럼 분포를 보여주고 있으며, 스펙영역에서 측정된 진동응답은 공통적으로 80~150Hz까지 연료봉의 저차 고유진동수에 해당되는 중주파수 대역의 응답성분들에 에너지가 집중되고 있었다. 전체적으로 입구유량이 균일 및 비균일한 차이에 따른 대상 시험 집합체의 응답특성은 일부 펌프회전 여기주파수의 차이와 국부적인 공진주파수를 제외하고, 대동소이하었다. 중간 지지격자 위치에서 주로 집합체의 저주파 진동응답을 측정하는 계측봉 응답은 스펙영역에 설치된 계측봉의 측정결과와는 명확히 구분되는 응답 스펙트럼 분포를 보여주었는데, 이것은 측정위치에 따른 유동분포의 차이에 기인되는 것으로 판단된다. 상세한 실험결과는 참고문헌⁽¹⁾을 참고하시길 바란다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 이강희, 강홍석, 권태순, 3-F/A 유체유발진동 실험결과, KAERI/TR-4553/2012, p. 6-16, 2012