

격자 지지구조체에 묶여있는 실린더 형 봉의 삽입위치에 따른 진동특성

Vibration Characteristic of a Cylindrical Rod according to the Mounting Locations on the Grid Support Structure

이강희† · 윤경호* · 송기남* · 김재용*

Kang-Hee Lee, Kyung-Ho Yoon, Kee-Nam Song and Jae-Yong Kim

Keywords: Grid Support Structure(격자지지구조체), Cylindrical Rod(실린더형 봉), Vibration Characteristic(진동특성), Sine Sweep(정현파소인), Closed Loop Control(폐루프 제어), Natural Frequency(고유진동수), Mode Shape(모드형상)

ABSTRACT

A vibration test for a cylindrical rod inserted on the grid support structure was tested using the sine sweep excitation method with closed loop force control. The effect of the mounting location of a test rod on the vibration characteristics of a rod continuously supported by the full size (16x16) grid support was identified. An electromagnetic vibration shaker, non-contact displacement sensor and HP/VXI data acquisition device were used and TDAS software was also used as a data sampling and processing tools. The natural frequencies and mode shape of the test rod were consistent with the previous works of a rod vibration test with partial grids (3x3, 5x5 and 7x7). The frequency characteristics of the rod according to the mounting location were shown clear discrepancies, but mode shapes were nearly same. As the test rod closes to the bottom clamping region of the spacer grid, peak vibration amplitudes of the rod become smaller.

1. 서론

경수로용 핵연료 집합체는 판 스프링 형태의 지지격자 스프링으로 지지되는 250 개 가량의 핵연료봉과 10 개 이상의 지지격자체, 그리고 안내관 등의 기계부품으로 구성되는 복잡한 구조물이다. 이러한 핵연료의 기계/구조적인 건전성을 확보하는 문제는 원자력 발전소의 1 차 계통의 방사능 오염방지를 통한 안전성 확보는 물론, 원자력 발전소의 경제성 측면에도 매우 중요한 문제이다. 핵연료는 수명 동안 다양한 화학물질이 포함된 수 중에서 고온/고압 및 높은 유속의 난류 유동장 하에서 연소된다. 이에 따라 핵연료 집합체는 중방향 및 횡으로 랜덤하고 지속적인 유동유발 하중을 받게 되며 이로 인해 발생된 진동은 다시 지지격자와 핵연료 봉 사이의 지지점에 마멸을 촉진시켜 핵연료의 기계적 건전성을 위협하게 된다[1].

운전 중 노심에서 핵연료 집합체에 발생하는 과도한 진동과 기계적인 손상가능성을 감소시키기 위해서는 핵연료 개발단계에서부터 유동유발 진동에 관련된 상세실험과 해석을 수행하고, 이로부터 핵연료에 대한 고유 동특성 및 동적 응답특성을

파악하여 설계에 반영해야 할 필요성이 있다. 이를 위해서는 다시 핵연료 집합체의 고유한 동적특성을 잘 포함하는 해석모델의 개발이 기본적으로 필요하다. 이러한 해석모델이 확보되면, 많은 비용과 시간이 소비되는 어려운 시험을 통하지 않고도 유동유발 하중이 가해질 때의 응답특성을 쉽게 구할 수 있어 설계 개선 및 인허가 측면에도 큰 장점을 갖게 된다. 하지만, 핵연료 집합체는 이미 언급한 바와 같이 본질적으로 구조가 매우 복잡할 뿐 아니라 핵연료의 연소상태에 따라 부품간의 접촉/지지상태 및 기계적 물성이 변화되고, 부품간의 간극 및 마찰 등의 비선형성이 커 모델링 하기가 난해한 특성을 갖는다[2].

본 연구에서는 모의 시험용 핵연료 봉(길이 약 2.2 m)이 상용핵연료 크기의 16x16 지지격자체에 설치되어 있을 때, 봉의 삽입 위치에 따른 진동특성의 변화를 파악하였다. 새롭게 개발된 지지격자형상의 설계특성을 비교할 목적으로 수행되는 이전의 단위 봉 진동특성시험에서는 시험 연료봉이 격자체에 설치되는 삽입위치와 격자체의 크기(3x3, 5x5, 7x7)에 따라 진동특성(주파수특성 및 조화응답성분의 모드 별 크기)이 변화됨을 확인하였다. 지지격자 후보모형 간의 설계특성을 정량적으로 비교하고 시험의 신뢰성과 시험간 반복성이 확보하기 위해서는 동일한 시험조건의 구현이 전제되어야 하며, 시험수행 간 시험조건이나 방법의 차이로

† 한국원자력연구소

E-mail : leekh@kaeri.re.kr

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

* 한국원자력연구소

인해 발생하는 대상 구조체 특성변화에 대한 문제는 각 조건들에 대한 실험적 인자분석(parametric study)를 통해서 검증해야 할 필요성이 있겠다.

2. 시험방법 및 조건

그림 1 은 부분 지지격자체의 지지건전성 평가 시험 및 단위 시험봉 진동특성 시험의 개요도를 도시하고 있다. 부분 격자체 5 개로 연속 지지된 단일 시험봉(통상 부분격자체의 중심위치에 설치됨)의 변위응답은 1 차 진동모드 형상에서 최대의 상대 진동변위를 나타내는 3 번째 스펀의 중심위치에서 측정된다. 이전의 진동시험에서는 가속도 센서의 질량이 시험체 동특성을 변화시키지 않도록 충분히 작은 센서(0.3g)를 각 스펀(span) 위치에 설치하였고 이것으로 응답을 측정하여 단일 시험봉의 주파수 특성과 진동모드형상을 획득할 수 있었다.

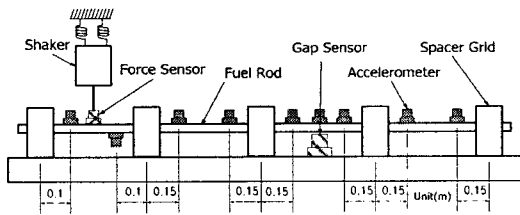


Fig. 1 Schematic diagram of the rod vibration test for evaluating support performance of the spacer grids

그림 2 는 상용핵연료 크기(16x16)의 시험 지지격자체를 이용한 단위 시험봉의 진동특성시험 사진을 도시하고 있다. 격자체의 고정위치 및 스펀 간격과 가진 및 응답측정 위치는 이전의 시험과 동일하게 설정하고 다만 시험 격자체를 상용핵연료 크기의 지지격자 체로 시험을 수행하였다.

16x16 시험 격자체 5 개는 일정스팬 간격(400, 560, 560, 560; 단위는 mm)을 유지하면서 하단부의 외각 스트랩(strap)을 고정된 하단고정판에 의해 진동절연 시험대(test stand)에 고정된다. 격자체 설치 시 격자체 사이의 비틀림 또는 휘어짐으로 인한 시험봉의 기변형(pre-deformation)을 방지하고, 시험 봉의 고정조건에 대한 반복시험 동안의 일관성을 유지하기 위하여 5 개의 격자체는 다시 5 개의 뼈대 시험봉으로 상호 연결된다. 시험 수행 간에 가진장치와 간극변위센서가 골격용 시험봉에 의해 간섭이 발생하는 경우에는 최대한 골격을 유지시키면서 일부 구간을 구분 조정하여 가진 또는

측정토록 하였다.

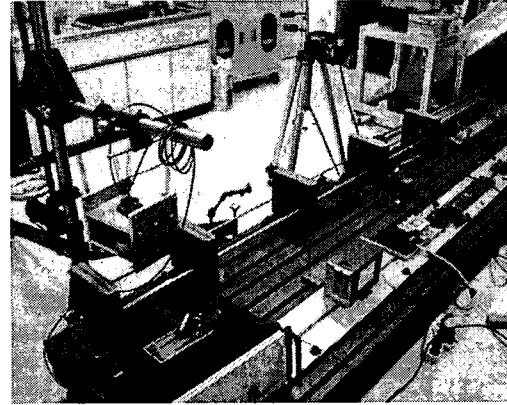


Fig. 2 Test setup for the parametric experimental studies on the mounting location of the rod to the spacer grids

진동특성시험과 정현파 소인시험 동안에 격자체의 하단부가 고정됨에 따라 시험 격자체에 고정되는 시험 봉의 경계조건은 좌/우 대칭만 남게 되고 중심선을 기준으로 상호 대칭 위치에 설치된 시험 봉 사이의 진동특성이 먼저 오차범위(5%) 안에서 동일한지를 확인/검토하였다.

이후, 각 삽입위치에 따른 시험봉들을 하나씩 끼워가면서 충격가진 시험을 통해 주파수 응답함수를 측정하고, 이것으로부터 대략의 주파수 특성을 확인한 후 소인 범위를 결정하였다. 충격 가진 시험 후, 가진위치에 가진기를 연결/설치하고 일정 주파수 간격(step sine)으로 가진력(0.5 N)을 소인하면서 응답 측정점에서 비접촉식 간극변위센서를 이용하여 해당 시험봉의 변위응답을 획득하였다.

3. 시험결과 및 토의

3.1 충격가진 주파수 응답함수

대상 시험체에 대한 충격 가진 주파수 응답함수의 측정과 부분 격자체를 이용한 이전의 단위 봉 진동특성에 대한 연구결과[3,4]를 근거로 16x16 격자체로 연속 지지된 대상 시험 봉들의 주파수 특성을 확인하였다. 그림 3 는 시험봉의 세 번째 스펀 중심에서 측정된 충격가진 입력에 대한 주파수 응답함수를 도시하고 있다. 부분격자체로 연속 지지된 단위 시험봉은 45 Hz 전후의 주파수 범위에서 기저 고유진동수를 갖고 대응되는 진동모드는 짧은 스펀을 기준으로 봉의 3 번째 스펀 중앙에서 최대 상대 진동변위 나타나는 전형적인 연속지지

보의 1 차 모드형상을 나타낸다. 이후로 2 차와 3 차 진동모드는 각각 50 Hz 초반과 50 Hz 는 중/후반 대역의 주파수 범위에 나타나며 대응되는 진동 모드 형상은 그림 4 와 같다. 그림 4 은 지지격자 체로 연속 지지된 단위 시험봉의 5 차까지의 진동 모드 형상을 도시한다.

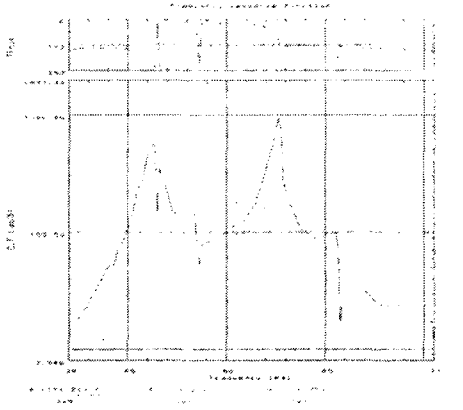


Fig. 3 Frequency response functions of the test rods from the impact excitation, which is measured at the center of the third rod span.

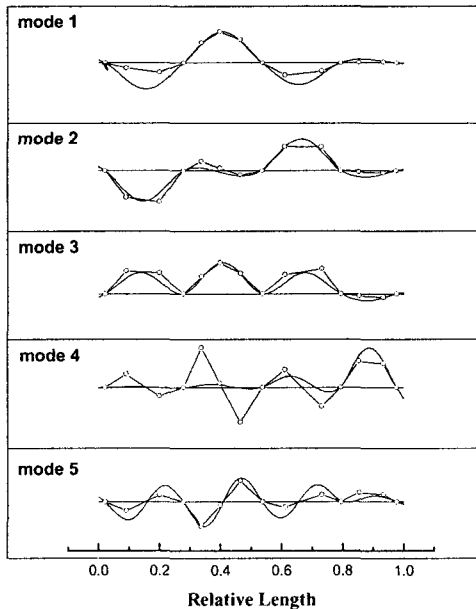


Fig. 4 Vibration mode shapes of the single rod consecutively supported by the spacer partial grids.

골격용 보조 시험봉을 갖는 16x16 격자체에 삽입된 상태로 부분 격자체의 봉 단위 진동특성 시험과 동일한 방식으로 수행된 충격 가진 시험결과, 대부분의 시험 봉에서 이전의 시험결과(부분격자체를 이용한 단위 봉 시험)와 유사한 (충격응답

주파수 응답특성) 진동특성을 나타내고 있다. 즉, 40 Hz 중반에 나타나던 시험 봉의 1 차 고유진동수가 해당 주파수 대역에서 지배적으로 나타나며, 기저 고유진동수 주변(1~2 Hz 근방)에 위치하는 인접모드 들(주로 진동방향을 달리하는)의 영향이 가시적이다. 이것은 그림 5 와 같이 봉의 지지 단면에 대해서 비대칭을 이루는 지지격자의 지지형상에 있어서의 특징에 기인된 것으로 보인다. 2 차 고유진동수에 대응되는 첨점(peak)특성은 측정점이 시험봉의 2 차 진동모드 형상에서 변위의 영점(절점, nodal point)에 가까이 있기 때문에 대부분의 주파수 응답에서 2 차 진동모드에 대한 주파수 특성은 가시적이지 못하다. 다만, 예상되는 2 차 진동 주파수에서 두드러지게 보여지는 첨점 특성은 시험오차이거나 가진위치나 측정위치가 offset 상태로 측정되었기 때문이라고 생각된다.

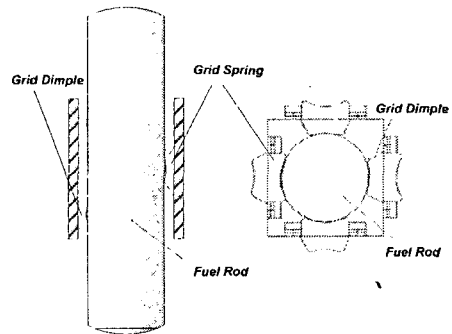


Fig. 5 Schematic diagram of a fuel rod supported by spacer grid

3.2 작용력 소인 스펙트럼

그림 6 는 목표 가진력을 0.5N (가진력 조절 오차범위 20 %)으로 설정하고 수행된 단위 시험봉에 대한 힘조절 정현파 가진 시험에서의 작용력 스펙트럼을 도시하고 있다. 통상 구조물의 공진주파수 부근에서 대상 구조물에 가해지는 작용력의 크기를 목표 가진력 만큼 일정하게 유지하기 어려우며 (이것은 가진장치가 구조물에 연결되어 있기 때문임) 일부의 시험봉에서는 특성 주파수 대역에서 가진력 조절에 실패하는 경우도 관찰된다. 이 경우에는 해당 주파수 범위에서 가진력 조절을 포기하고 다음 단계의 주파수 범위로 건너뛰는 형태로 시험이 진행되었다.

힘조절 정현파가진 시험에서 대상 구조물의 공진 주파수 대역 부근에서의 작용력을 일정하게 유지하는 기술은 모달시험에서 극복해야 할 하나의 과제이며, 본 연구에서는 시험봉에 대한 가진

위치를 일부 변경함으로써 상당부분의 문제점을 해결할 수 있었다.

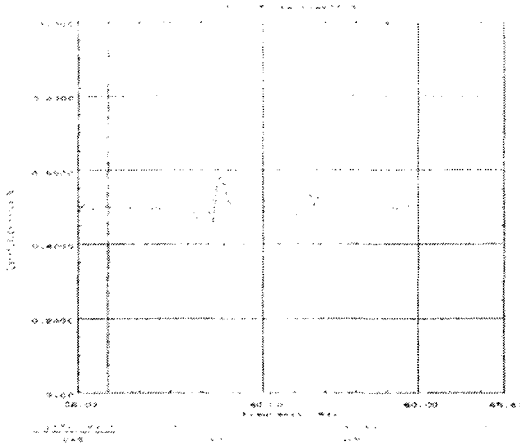


Fig. 6 Excitation force spectrum during the sine sweep test of the target force 0.5 N with 20% tolerance level.

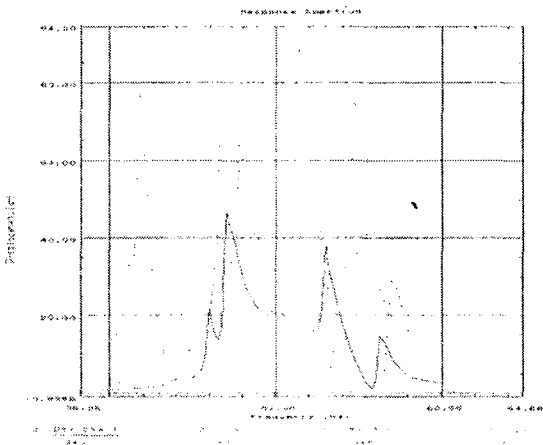


Fig. 7 Measured displacement response spectrum at the center of 3rd rod span during the sine sweep test

3.3 정현파 변위응답 스펙트럼

정현파 소인시험은 16x16 격자체의 봉 삽입위치 중 5 개 평가후보 위치(상/하/좌/우/중심 부)를 대상으로 앞선 충격가진 시험에서 확인된 시험봉의 1 차에서 3 차 고유진동수를 포함하는 주파수 범위에 대하여 일정한 주파수 간격(0.2 Hz)에 따라 목표가진력(0.5 N)을 되먹임 제어(feedback control)하면서 수행되었다.

그림 7 은 동일한 크기의 정현파 가진력에 대하여, 격자체 내 삽입(고정) 위치가 다른 시험봉들의 변위응답 스펙트럼을 도시하고 있다. 측정된 최대 변위진동 진폭의 크기는 0.1 mm 미만의 값을

나타내며 격자체의 고정면인 하단부에 시험봉이 가까이 위치할 수록 자체 지지강성의 증가로 인하여 진동진폭이 일정하게 감소되는 경향을 보인다. 최대 진폭에 대응되는 진동주파수는 1 차 기저고유진동수에서 3 차까지의 고유진동수에 대응되는 값으로 나타나며, 시험 봉의 삽입위치에 따라 일반적인 경향을 보이지 않는다. 통상의 구조진동계의 경우 1 차 진동모드에 대응되는 정현파 응답이 최대 진폭을 갖는 것이 일반적이나 당 시험모델과 같이 복잡한 형태의 진동모드 형상을 갖는 시험체의 경우 특정 점에서의 모드 간 상태 진폭이 시험 조건(시험봉의 설치위치, 고정조건 및 가진조건) 따라 변화될 수 있음을 알았다.

4. 결론

상용핵연료 크기의 16x16 격자체로 연속지지된 시험용 연료봉의 삽입(고정)위치에 따른 진동특성을 부분 격자체의 지지건전성 평가시험방법을 토대로 평가/분석하였다. 시험봉이 격자체의 고정면인 하단부에 가까이 위치할 수록 자체 지지강성의 증가로 인하여 진동진폭이 일정하게 감소되는 경향을 보이며 최대 진동주파수는 시험봉의 삽입위치에 따라 일반적인 경향을 보이지 않는다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 증장기계획사업인 경수로용 신형핵연료 개발과제(대과제)의 고성능지지격자개발(소과제)의 일환으로 이루어졌음.

참고문헌

- (1) 이희남, 조원익, 이승태, 2004, “부분핵연료 집합체의 상세 유한요소 모델링 및 진동해석”, KAERI/CM-862/2004, 순천대학교.
- (2) 이강희, 윤경호, 송기남, 김재용, 이희남, 2006, “부분구조법을 이용한 부분핵연료 집합체의 수중 자유진동해석”, 한국소음진동공학회 추계학술대회는문집 CD, 논문번호-A038.
- (3) 강홍석, 윤경호, 김형규, 송기남, 2000, 지지격자 스프링으로 다점지지된 환형 핵연료봉의 고유진동해석”, 한국소음진동공학회 추계학술대회는문집, pp. 639-649.
- (4) 최명환, 강홍석, 윤경호, 김형규, 송기남, 2003, “새이중관 지지격자로 지지된 경수로용 연료봉의 진동특성”, KAERI/TR-2452/2003, 한국원자력연구소.