

핵연료 집합체 노외성능시험의 절차와 결과에 대한 신뢰성확보를 위한 예비고찰; 횡방향 진동특성시험(I)

이강희[†] · 윤경호^{*} · 김형규^{*}

Preliminary Study for the Reliability Assurance on Results and Procedure of the Out-pile Mechanical Characterization Test for a Fuel Assembly; Lateral Vibration Test(I)

Kang-Hee Lee, Kyung-Ho Yoon, Hyung-Kyu Kim

Key Words: Reliability Assurance and Assessment(신뢰성확보 및 평가), Out-pile Performance Test(노외성능평가시험), PWR Nuclear Fuel Assembly(경수로용 핵연료 집합체), Lateral Vibration Test(횡방향 진동시험).

Abstract

The reliability assurance with respect to the test procedure and results of the out-pile mechanical performance test for the nuclear fuel assembly is an essential task to assure the test quality and to get a permission for fuel loading into the commercial reactor core. For the case of vibration test, which is carried out to obtain basic dynamic characteristics of the fuel assembly, proper management and appropriate calibration of instruments and devices used in the test, various efforts to minimize the possible error during the test and signal acquisition process are needed. Additionally, the deep understanding both of the theoretical assumption and simplification for the signal processing/modal analysis and of the functions of the devices used in the test were highly required. Finally, to verify the test result to represent the accurate natural characteristics of the structure, the proper correlation analysis between the theoretical and experimental method has to be carried out. In this study, the overall procedure and result of lateral vibration test for the fuel assembly's mechanical characterization were briefly introduced. A series of measures to assure and improve the reliability of the vibration test were discussed.

1. 서론

한국원자력연구원에서는 국내 원자로형의 대부분을 차지하는 경수로형의 핵연료집합체를 원자로 외부에서 종합적인 성능검증을 할 수 있는 시험시설 및 기술을 개발해 왔다. 국내에서의 핵연료시험시설 및 기술의 개발은 수출을 지향하는 고유기술의 핵연료개발의 측면에서 매우 중요한

의미를 갖는다⁽¹⁾. 현재까지 한국원자력연구원에서 개발된 핵연료집합체 시험시설은 두 가지 종류로서 기계적특성 시험시설과 열수력특성 시험시설이 있으며, 실제 크기의 핵연료집합체를 시험으로 사용한다. 기계적특성 시험시설은 핵연료집합체의 진동, 강성 및 충격특성을 파악하는 것으로 시험결과는 핵연료 및 원자로의 안전해석 등을 위한 기초자료로 사용되며 시험결과 자체와 해석결과는 핵연료 사용인허가를 위한 평가자료로 이용된다. 열수력특성 시험시설은 원자로 내의 냉각수 유동장에서 핵연료집합체에 의해 발생하는 압력손실, 들림유량, 유체유발진동, 핵연료봉에 발생하는 마멸손상 등의 결과를 얻기 위한 것으로서 역시 핵연료 사용인허가를 위한 중요한 평

† 회원, 한국원자력연구원 선진경수로연료개발센터

E-mail : leekh@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2298 FAX : (042)863-0565

* 한국원자력연구원 선진경수로연료개발센터

가항목이다²⁾. 한편, 핵연료 노외성능시험시설에 대한 검증의 문제와 함께, 핵연료 개발을 위한 기반기술의 하나인 성능/특성평가에 대한 시험기법과 절차, 그리고 이로부터 얻어지는 시험결과에 대한 신뢰성을 확보의 문제는 시설과 결과에 대한 품질 보증과 핵연료 사용 인허가를 획득하기 위해 필수적인 사항이다. 본 연구에서는 경수로용 핵연료 집합체의 노외성능시험의 일환으로 수행되는 횡방향 진동특성 시험에 대해 시험수행 절차와 방법, 시험결과에 대해 소개하고, 이에 대한 신뢰성을 확보를 위한 일련의 조치와 방안들에 대해 간략히 토의한다.

2. 핵연료 집합체의 노외성능 시험과 횡방향 진동특성시험

2.1 핵연료 집합체의 노외성능 시험

핵연료집합체 기계적특성 시험시설(Fuel Assembly Mechanical Characterization Tester ; FAMeCT)의 목적은 실물크기의 시험용 혹은 상용 핵연료집합체 한 다발에 대해 상온 공기 중에서 축방향과 횡방향의 진동, 강성 및 충격특성 데이터를 취득하는 것이다. 시험결과는 핵연료 및 원자로의 안전해석 등을 위한 기초자료로 사용되며 시험결과 자체와 해석결과는 핵연료 사용 인허가를 위한 평가자료로 이용된다. 이때 시험대상인 핵연료집합체는 길이 약 4.5 m, 단면의 크기 약 20 cm x 20 cm, 무게 약 650 kg 의 세장비가 매우 큰 구조물이다. 시험 중 얻게 되는 데이터는 시험 집합체에 작용시킨 하중과 이에 따른 시험체의 응답인 정적/동적 변위들이므로 각각의 목적에 맞는 하중센서(Loadcell)와 변위게이지(Linear Gauge)를 해당 측정점(지지격자체의 중심)의 높이에 따라 블라켈 고정치구(blacket holder)를 이용하여 설치하였다. 한편, 원자로 내에서 핵연료집합체가 장전되어 있는 상황을 모사하기 위해 시험핵연료집합체의 상부에서 연직하방으로 압축하중을 인가할 수 있는 가중장치(Carriage)와 하단에는 하중측정 센서가 설치되어 있다. 100여 개의 정적/동적 변위응답과 하중신호를 동시에 측정/저장할 수 있도록 안정적인 데이터 획득장치(Data Acquisition System, System

5000/6000)를 구축하였고, 계측기기의 위치와 무관하게 연결하여 사용수 있는 별도의 접지시스템을 갖추고 있다.

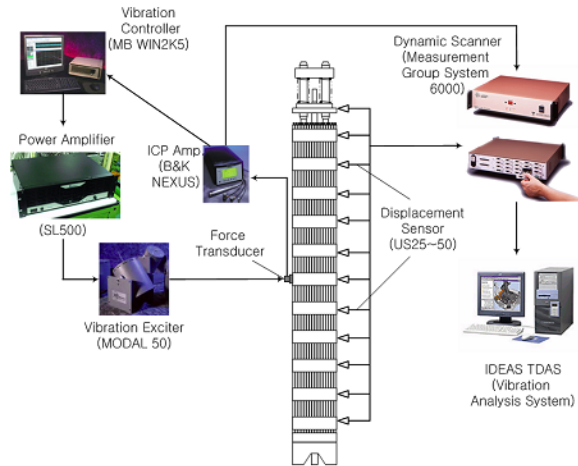


Fig. 1 Schematic diagram of the lateral vibration test for the fuel assembly's out-pile mechanical characterization.

2.2 횡방향 진동특성시험

상온 공기 중에서 수행되는 횡방향 진동특성 시험은 대상 시험체인 핵연료 집합체의 횡방향 고유진동수와 모드형상, 그리고 감쇄비를 측정하기 위한 시험이다. 핵연료 집합체는 2백 여개의 단위 연료봉이 지지격자체 스프링의 탄성 지지력으로 서로 묶여있는 클러스터(cluster)형 구조물로서 단위 봉들에 의한 국부모드의 영향과 함께 지지격자 판 스프링의 접촉조건으로 인한 비선형성을 포함하는 복잡한 형태의 유연 구조물이다. 횡방향 진동시험에 적용되는 두 가지 경계조건(양단지지와 한단지지)은 핵연료집합체가 노심에 장전되는 초기 상황(Hot BOL)에 대한 것과 사용후 핵연료가 저장조에서 아래쪽 하단부만 지지된 상태로 보관되는 상황을 모사한 것이다. BOL 조건에서의 횡방향 진동특성시험에서는 상단 고정체 모사장치를 연직하방으로 10.92 mm 압축시켜(8.3 kN) 원자로 내에서 핵연료집합체가 상부노심판에 의해 눌러지는 상황을 모사한 후 6번 중간 지지격자체(하단고정체 하단면으로부터의 높이는 2.156 m, 핵연료 집합체의 정중양이 아님, 정중양점의 높이는 2.263 m)에 전자기 방식의 가진기를 철심

(stinger, 직경 2 mm)을 이용하여 연결/고정하고 힘조절 정현파 가진시험을 수행하였으며 이때 목표 가진력은 5 ~ 50 N 사이의 이산 가진하중 (discrete excitation force)을 인가하였고, 가진주파수 범위로는 1 Hz로부터 55 Hz까지 일정한 속도 (0.01~0.1 Hz/s)로 증가되도록 하였다. 가진기에 의해 구조물에 작용되는 가진력과 집합체의 응답인 진동변위는 해당 계측기에 의해서 측정되고 신호증폭기를 거쳐 Dynamic scanner에 수집되며 PC에 저장되었다. 저장된 신호의 분석과 후처리 분석을 위해서는 IDEAS T-DAS를 사용하였다. 그림 1은 핵연료 집합체에 대한 정현파 가진시험의 개략도를 도시하고 있다.

3. 시험결과 및 토의

3.1 진동응답과 주파수 응답함수

그림 2는 정현파 가진시험 동안 측정된 집합체의 길이방향 위치에 따른 응답 시간이력을 도시한다. 인가된 가진력의 주파수가 구조물의 고유진동수에 근접하게 되면, 일정한 크기의 가진력에 대해서도 구조물의 변위가 점차 증가되는(이론적으로는 무한대로 발산하는) 소위 공진현상(resonance)을 만나게 된다. 또한 각 위치에서 측정된 공진점에서의 진폭으로부터 시험집합체의 개략적인 모드형상을 유추할 수 있다. 그림 3은 정현파 소인시험동안 측정된 집합체의 변위응답과 가진력에 대한 시간이력데이터를 이용하여 IDEAS/TDAS 프로그램의 후처리분석기능(Sine Post Process)을 이용하여 얻어낸 시험 집합체에 대한 주파수 응답함수를 도시하고 있다. 시험집합체의 고유진동수는 모달분석과 같은 고차원적인 해석과정(모달분석은 대상 구조물이 선형이라는 가정으로부터 구조물의 주파수 응답함수를 이론적인 수학적함수의 형태로 곡선근사하고 이로부터 유한차원에 대한 자유진동특성을 추정함)을 거치지 않고도 간단하게 이러한 주파수 응답함수의 첨점(peak)특성으로부터 결정되어질 수 있다.

핵연료 집합체는 작용력의 크기에 따라 동특성이 변화되는 비선형성이 있는 것으로 알려져 있다. 노심 내 운전조건에서 집합체가 정적 혹은 동적으로 받는 작용력의 크기는 이론적/실험적인

예측이 어려우며, 이 때문에 집합체의 동특성 파악시험은 비선형성을 확인할 수 있도록 일정한 작용력(혹은 초기변위)의 범위에서 수행 되어져야 한다. 표 1은 상기의 주파수 응답함수를 근거로 추정된 시험집합체의 가진력에 따른 고유진동수를 나타낸다.

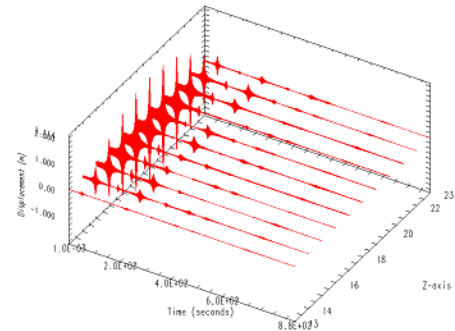


Fig. 2 Vibration response time trace of the test fuel assembly during the sine test.

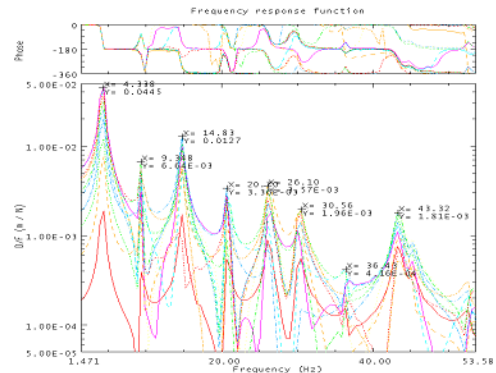


Fig. 3 Frequency response function of the test fuel assembly.

Table 1. Natural frequency of the test fuel assembly according to the excitation force.

Mode	Excitation Force				
	8.9N	15N	22.2N	30N	44.5N
1	4.53	4.37	4.34	4.25	3.88
2	9.39	9.73	9.35	9.56	9.34
3	14.79	14.62	14.83	14.58	14.76
4	20.74	21.00	20.20	20.90	20.69
5	26.61	26.43	26.10	26.22	26.17
6	30.52	30.29	30.56	30.31	29.97

3.2 모드형상과 감쇠계수

시험 집합체의 각 고유진동수에 대응되는 진동 모드형상(mode shape)은 앞서 주파수 응답함수로부터 확인된 고유주파수로 시험집합체를 일정시간 동안 가진하고 이에 따라 발생하는 각 위치에서의 진동변위 진폭 값을 측정하여 동일시점에서의 진폭을 정규화하여 결정된다. 그림 4는 6차 진동모드까지의 정규화(normalized)된 집합체의 진동모드 형상을 도시한다. 시험집합체의 가진위치가 짝수차 모드의 절점(nodal point)에 가까운 이유로 짝수차 모드형상은 홀수차 모드에 비해 완전한 파형을 나타내지 못하고 일부영역에서 진동모드형상의 왜곡이 발생하게 된다. 이러한 문제는 가진점의 위치를 적절히 조정함으로써 해결이 가능하다.

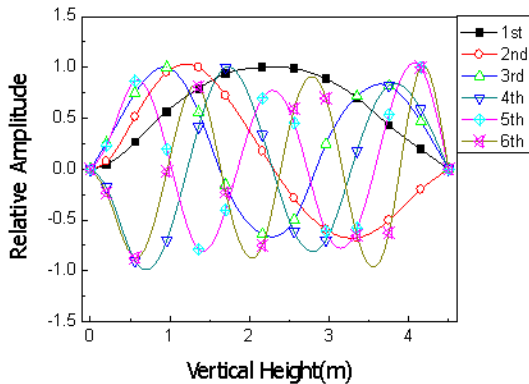


Fig. 4 Normalized mode shape of the test fuel assembly

핵연료 집합체에 대한 감쇠측정시험은 집합체의 횡방향 굽힘시험에 사용되는 가중기(loader)와 철심(twisted wire)을 이용하여 집합체 중심을 일정 초기변위(D_0 , 초기플럭변위)만큼 끌어당기고(이때 철심의 장력을 측정), 순간적으로 철심을 절단하여 이완된 집합체 중심의 진동진폭감소이력(decay trace)을 측정하는 것이다. 그림 5는 플럭초기 변위 5mm 일 때, 중간지지격자의 진폭감소이력을 도시한다.

감쇠측정시험 결과인 응답 시간이력으로부터 1차 진동모드에 대응되는 구조 감쇠비를 계산하는 방법은 시간이력을 직접 이용하는 로그감소(logarithmic decrement)법(임계 감쇠비 ξ

$=c/c = \ln(y_1/y_n)/(2n\pi)$, $n=(t_n-t_1)*f_0$, f_0 는 고유진동수)과 지수함수 혹은 다항식의 형태로 곡선근사(curve fitting)하는 방법(지수곡선 근사함수 $y=Ce^{-Bt}$, $\xi=c/c = B/(2\pi f_0)$), 그리고 시간이력을 푸리에(Fourier) 변환하여 얻어진 응답스펙트럼을 이용하는 half power 방법($\xi=c/c = (f_2-f_1)/(2f_0)$) 등이 있다. 이론적으로 어떤 방법을 사용하더라도 결과는 동일해야 하나 감쇠계산법(주관적인 요소, 표본의 수, 분석 시간간격, 스펙트럼 계산시 생기는 신호처리오차, averaging 수, Windowing type 등)과 시험수행 조건에 따라 결과에 상당한 차이를 갖는다.

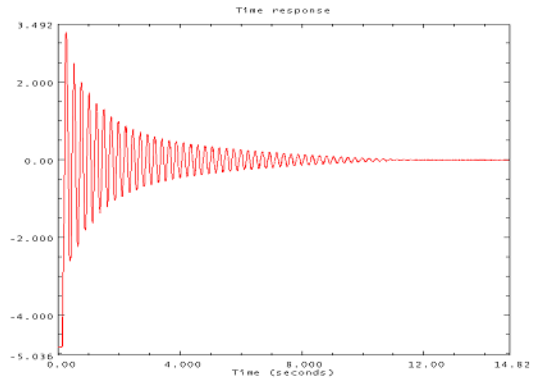


Fig. 5 Typical pluck displacement traces of the test fuel assembly.

표 2는 상기에 기술된 3가지 계산법을 이용하여 계산된 시험용 핵연료집합체의 감쇠비를 나타낸다. 핵연료 집합체의 1차 진동모드에 대응되는 감쇠비는 감쇠계산법과 초기 플럭변위에 따라 차이가 있으나 평균적으로 3.5% 정도의 임계 감쇠비를 갖는 것으로 판단된다.

Table 2. Damping ratio according to the calculation method and initial pluck displacement.

Initial Pluck Disp.(mm)	Log Decrement (10 cycles averaged),%	Exponential Decay,%	Half Power,%
2	2.78	4.02	2.11
5	3.64	3.50	3.24
7.5	4.92	3.38	3.34
10	5.30	2.66	3.12

4. 신뢰성확보를 위한 시험수행 및 결과분석 상의 개선점 토의

핵연료 집합체의 기본적인 동적특성을 파악하는 진동특성 시험의 경우, 시험결과 및 수행절차상의 신뢰성을 확보하기 위하여 시험에 사용되는 계측기와 시험장치(가진기, 신호조절기, 신호획득장치 포함) 등에 대한 엄정하고 체계적인 검/교정관리와 이들에 대한 기본적인 특성과 성능을 충분히 이해해야 한다. 이를 위해서는 교정서의 유지/관리(보정포함)와 장비사용 매뉴얼의 면밀한 검토와 이해가 필수적이며, 계측기를 교정할 수 있는 자체의 인증된 장비와 검증기술의 확보가 강력히 요망된다. 또한, 대상 구조체의 기본적인 동적 특성을 사전에 이해하는 것(해석과 시험을 통한 예비분석과정)과 유사한 시험대상체의 시험수행의 경험도 필요에 따라 최종적인 시험결과의 신뢰성을 향상시키는 초석이 될 수 있다. 아울러, 시험수행 및 응답 신호의 획득과정에서 발생가능한 오차의 분석(bias 및 precision 오차 등)과 이를 최소화하기 위한 일련의 노력이 필요하다. 이것은 신호처리(신호획득, Windowing, 저/고주파 필터, DC신호 등)와 결과분석 과정에서 발생하는 이론적인 가정이나 단순화(선형모델 가정 등)에 따른 차이 등을 올바르게 인식하고, 최종적인 시험결과가 본래 목적했던 구조체의 고유특성을 정확히 나타낼 수 있도록 이론적-실험적 상관관계 분석을 통한 시험결과의 개선노력과 이를 검증하기 위한 방안들에 대해 심사숙고해야함을 의미한다.

5. 결론

신형 경수로용 핵연료 집합체에 대한 노외성능 시험의 일환으로 수행되는 횡방향 진동특성 시험에 대해 시험수행 절차와 방법, 시험결과에 대해 소개하고, 이에 대한 신뢰성을 확보를 위한 일련의 조치와 방안들에 대해 토의하였다. 국내에도 실제 크기의 경수로핵연료집합체에 대한 진동, 강성 및 충격특성을 분석할 수 있는 시험시설이 구축되어 고유기술의 핵연료개발 및 수출을 지향할 수 있는 토대가 마련되었으며, 시험절차와 결과에 대한 검증과 품질보증/인증을 위한 제반 절차가 마련되면, 실제 상용 핵연료집합체의 인허가용 데이터를 생산하게 됨으로서 국내 원자력 연구개발 분야에서도 큰 진전을 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 기술개발사업인 초고연소도 고성능 핵연료 기술개발(대과제) 이충냉각핵연료 구조설계기술개발(세부과제)의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) H.-K. Kim, K.-H. Yoon, K.-H. Lee, Y.-H. Lee, T.-H. Chun, S.-S Lee, 2006, Characterization test and analysis of LWR fuel assembly mechanical behavior, *Proceedings of KSME 2006 Spring Annual Meeting*, pp. 3625~3630.
- (2) H.-K. Kim, K.-H. Yoon, K.-H. Lee, Y.-H. Lee, T.-H. Chun, S.-S Lee, 2006, Characterization test and analysis of LWR fuel assembly mechanical behavior, *2006 International Meeting on LWR Fuel Performance*, Salamanca, Spain, pp. 406-410.