

5x5 봉다발의 감쇄추정을 위한 실험적 연구 Experimental study on the damping estimation of the 5x5 rod bundle

이강희† · 윤경호* · 송기남*

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

Key Words : Rod Bundle(봉다발), Spacer Grid(지지격자), Damping Ratio(감쇄비), Pluck Testing(감쇄측정시험), Logarithmic Decrement Method(로그감소법), Nonlinearity(비선형성), Flow-Induced Vibration(유동유발진동)

ABSTRACT

The PWR Nuclear Fuel assembly consists of more than 250 fuel rods that are supported by leaf springs in the cells of more than 10 Spacer Grids (SG) along the rod length. Since it is not easy to conduct mechanical tests on a full-scale model basis, the small-scaled rod bundle (5x5) is generally used for various performance tests during the development stage. As one of the small-scaled tests, a flow test should be carried out in order to verify the performance of the spacer grid like the coolant mixing performance and to obtain the Flow-Induced Vibration (FIV) characteristics of the rod bundle over the specified flow range. A vibration test should be also performed to obtain the modal parameters of the bundle prior to the flow test. In this study, we want to develop the estimation procedure of the damping ratio for the small scaled test bundle. For the damping factor of the rod bundle and the grid cage at the first vibration mode, as one of the vibration tests, a so-called pluck testing has been performed in air as a preliminary test prior to in-flow damping measurement test. Logarithmic decrement method is used for calculation of the damping ratio. Estimated damping ratio of the rod bundle is about 0.7 % with reasonable error of 2 % for the previous results. Nonlinear behavior of the rod bundle might be stem mainly from the rod-grid support configuration.

기호설명

- F : Pluck force
- $f(f_j)$: Frequency(Fundamental frequency)
- ζ : Damping ratio
- c : Damping coefficient(rate of energy dissipation),
- c_c : Critical damping
- ω_f : Fundamental natural frequency
- $y_l(y_n)$: Amplitude of first(last significant) global peak
- $t_l(t_n)$: Time at initial(last) peak of $y_l(y_n)$
- τ : Associated period ($\tau=1/f_j$)
- D_0 : Initial pluck displacement
- D' : Normalized pluck displacement

1. 서 론

진동하는 구조물의 진동진폭이 감소되는 특성을 감쇄(damping)라 하며, 이것은 진동에너지의 점차적인 소산(dissipation)을 의미한다. 진동하는 구조물이 갖는 에너지는 다양한 방식의 감쇄기구(damping mechanism)에 의해 소산될 수 있는데, 노심 운전조건(고온/고압의 냉각재 유동분위기)에서 진동하게 되는 핵연료집합체의 감쇄기구는 집합체 자체의 구조감쇄, 유체유동에 의한 점성 및 동적(flow dependent)감쇄, 지지점에서의 간극감쇄

(squeeze film), 마찰감쇄 및 이상(two phase)에 의한 영향 등 다양한 형태로 분류될 수 있다⁽¹⁾.

핵연료 집합체의 설계를 위한 거동해석(FIV 해석 포함)을 위해서는 운전조건에서의 이론적인 혹은 실험적인 동적특성의 파악이 필수적이다. 이때, 실제 크기의 핵연료 집합체를 이용하는 것이 바람직하나 개발단계에 있는 구조부품의 시험에서는 통상 작은 크기의 봉다발 시편(통상 5x5 나 6x6 정도)을 사용하게 된다. 이를 이용한 다양한 기계·구조적 성능시험을 통해서 상용핵연료 크기의 시편제작의 필요성을 확보하고, 실제크기의 시험이전 이전에 충분한 기초 데이터를 확보할 수 있다⁽²⁾.

한편, 핵연료 집합체는 작용력의 크기에 따라 동특성이 변화되는 비선형성이 있는 것으로 알려져 있다. 노심 내 운전조건에서 집합체가 정적 혹은 동적으로 받는 작용력의 크기를 예측하기 어려우며, 이 때문에 집합체의 동특성 파악시험은 비선형성을 확인할 수 있도록 일정한 작용력(혹은 초기변위)의 범위에서 수행 되어져야 한다. 또한, 원전부품에 대한 유동조건에서의 감쇄측정은 특별히 고안된 장치와 표준화된 절차⁽³⁾에 의해서 이루어지며 운전조건을 모사한 실제 시험에 앞서 공기 중 및 정지 유체 내에서 시험 대상체의 감쇄비를 측정하는 예비시험이 필요하다.

본 연구에서는 핵연료 집합체의 축소모형인 부분 핵연료 집합체의 유동조건에서의 감쇄측정을 위한 예비시험의 일환으로 봉다발과 골격구조물을

† 한국원자력연구소
E-mail : lckkh@kaeri.re.kr
Tel : (042) 868-2298, Fax : (042) 863-0565

* 한국원자력연구소

대상으로 공기 중 감쇄측정시험을 수행하고, 향후 수중과 유동조건에서의 시험을 위한 예비분석을 수행하였다. 또한 초기 굽힘변위와 작용력에 따른 봉다발 동특성에 있어서의 비선형 거동을 파악하기 위한 분석도 이루어 졌다.

2. 방법 및 결과

2.1 시험개요 및 시험시편

한국원자력 연구소에서는 개발단계에 있는 원전 부품의 기계·구조적인 성능을 평가하기 위한 여러 가지 노의 성능시험시설을 구축하고 있다⁽⁴⁾. 그림 1은 부분핵연료 집합체의 진동특성을 파악할 수 있도록 고안된 공기 중·수 중 집합체 진동시험장치 개략도를 나타낸다. 봉다발과 골격구조물의 감쇄측정시험은 별도의 가진 장비 없이 가는 철심으로 집합체 중심을 일정한 초기변위(D_0)만큼 끌어당기고(이때 철심의 장력을 측정), 순간적으로 철심을 절단하여 이완된 봉다발 중심의 진동진폭 감소이력(decay trace)을 측정하는 것으로 이루어진다. 감쇄측정 시험 간 시험조건은 다음과 같다.

- 시험시편 : 골격구조물(grid cage), 5x5 봉다발
- 가진방법/위치 : 인장철심 절단/봉다발 중심 지지격자
- 지지조건 : 안내관 양단 볼트고정
- 시험조건 : 공기 중

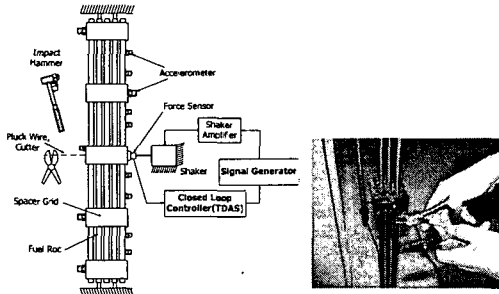


Fig. 1 Rod bundle vibration test overview (left) and pluck test picture (right).

그림 2는 시험시편인 부분집합체용 골격구조물과 5x5 봉다발의 단면구성을 나타낸다. 골격구조물의 경우, 대각선 상의 중심에 위치하는 두 개의 안내관(직경 12.5mm)이 5 개의 지지격자에 슬리프를 이용하여 용접·고정된다. 5x5 봉다발은 골격구조물에 상용 연료봉(직경 9.5 mm)과 동일 체원(단, 길이는 1/2)을 갖는 23 개의 모의 연료봉을 끼워서 제작된 것이다.

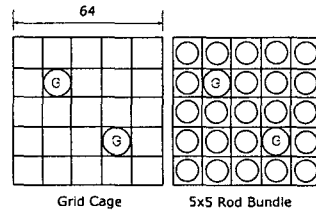


Fig. 2 Cross section of the rod bundle (G: Guide tube).

2.2 시험절차

두 시편의 안내관을 상하단 고정장치(both end clamped)에 설치하고, 중심 지지격자 중간에 힘센서를 접촉제로 부착한다. 철심은 연결용 소켓을 이용하여 힘센서의 한쪽 끝에 고정한다. 연결된 철심을 일정한 변위만큼 잡아당기고, 절단도구를 이용하여 순간적으로 철심을 자른다. 절단 이후의 봉다발 응답이력을 비접촉식 진동측정계(laser doppler vibrometer)로 측정하고, 측정된 응답이력과 작용력은 신호증폭기와 Breakout Box 를 거쳐 데이터 획득장치에 저장된다. 한번의 감쇄측정시험이 종료되면, 데이터 저장 후 준비된 초기 변위(또는 하중조건)에 따라 반복 시험하였다. 데이터 획득 장비는 B&K Nexus 신호증폭기와 HP/VXI Front End 시스템을, 데이터 획득 및 분석용 프로그램은 MTS/IDEAS-Pro 의 Transient measurement 와 Time history process module 을 각각 이용하였다. Sampling 조건으로 각 신호응답은 DC coupling 상태로 신호 획득 되었다.

2.3 감쇄비 계산

감쇄측정시험 결과인 응답 시간이력으로부터 구조 감쇄비를 계산하는 방법은 시간이력을 직접 이용하는 로그감소(logarithmic decrement)법과 지수함수 혹은 다항식의 형태로 곡선근사(curve fitting)하는 방법, 그리고 시간이력을 푸리에(Fourier) 변환하여 얻어진 응답스펙트럼을 이용하는 half power 방법 등이 있다. 이론적으로 어떤 방법을 사용하여도 결과는 동일해야 하나 감쇄계산법(주관적인 요소, 표본의 수, 분석 시간간격, 스펙트럼 계산시 생기는 신호처리 오차, averaging 수, Windowing type 등)에 따라 결과에 차이를 갖는다. 따라서 특정문제에 맞는 적합한 감쇄계산 방법이 결정되어야 한다. Chandler⁽⁵⁾는 증기발생기 튜브의 감쇄측정 시험에서 세 가지 계산방법을 비교하였고, 로그 감소법이 가장 일반되고 신뢰성 있는 결과를 내는 것으로 결론지었으며, Au-Yang⁽³⁾은 유동

분위기에서 진동하는 세장비가 큰 구조물의 경우 감쇄측정에서 역시 로그감소법이 적합한 방법임을 보였다. 본 연구에서는 앞선 문헌에 제시된 아래와 같은 로그감소법의 계산방법을 따르기로 한다. 진동진폭이 지수함수 적으로 감소될 때, 축적(cumulative) 감쇄비는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\zeta = c/c_c = \frac{\ln(y_1/y_n)}{2n\pi} , n = \frac{t_n - t_1}{\tau}$$

2.4 시험결과(1)- 굽힘강성, 응답 시간이력, 진동 스펙트럼

그림 3 은 봉다발과 골격구조물의 감쇄측정시험에서, 초기 굽힘변위와 작용하중에 대한 봉다발의 굽힘특성 곡선(초기굽힘 변위와 작용력에 대한 시험범위)을 도시하고 있다. 굽힘변위는 최대 10 mm 로 한정하였으나, 상대적으로 큰 굽힘강성을 갖는 5x5 봉다발의 초기변위 적용의 어려움과 손상우려 때문에 이에 대한 굽힘 변위는 최대 7 mm 정도로 설정하였다. 시험조건의 초기 굽힘변위는 상용핵연료의 노심에서 발생할 수 없는 과대변위이지만 시험용 봉다발의 기계적인 특성을 임계변형 수준까지 파악하기 위한 설정 값으로 볼 수 있다.

골격구조물은 연료봉이 없는 골격체이므로 작은 작용력에 대해서도 큰 변형량을 갖는다. 5x5 봉다발의 정적 굽힘강성은 대략 20 N/mm 로 파악되며, 넓은 정적변위 범위에서 근사 선형거동을 보이지만, 봉과 지지격자간의 지지조건에 의해 잠재적으로 큰 비선형성을 갖는다.

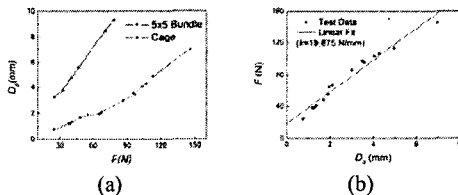


Fig. 3 Initial pluck displacement - force characteristic curve((a)) and bundle's bending stiffness((b)) of the bundle.

그림 4 는 골격체와 봉다발의 전형적인 진동 시간이력을 나타낸다. 왼쪽의 그림은 비교적 넓은 시간범위(18 sec)에 대한 이력이고, 오른쪽의 그림은 철심 절단 이후의 짧은(2 sec) 시간이력을 나타내는데, 지수함수적으로 감소(점성감쇄)하는 전체 응답 시간이력은 음파의 공명현상처럼 일정 주기로 증감을 반복하는 형태를 가지며, 철심절단 직후의 짧은 시간 동안 혹은 이후의 반복된 증가와

감소 동안은 응답이 선형적으로 감소(반복주기는 집합체의 1 차 고유진동수와 근접) 혹은 증가되는 쿨롱(Coulomb)감쇄 특성을 보인다. 통상 구조물의 감쇄특성은 취급이 간편하고 해석이 용이한 점성감쇄로 가정하여 모델링하지만, 핵연료 집합체의 봉다발 구조물은 참고문헌(6)에서처럼 점성감쇄와 쿨롱감쇄 특성을 적절한 혼합한 형태의 감쇄 모델링이 요구될 것으로 보인다.

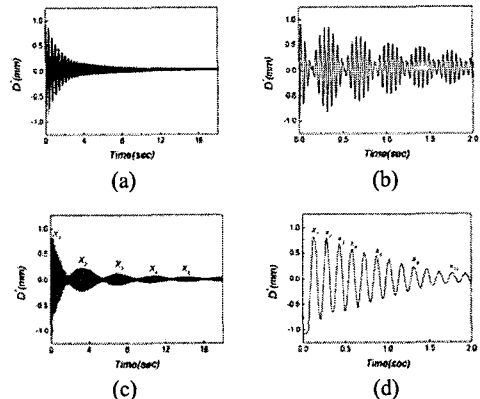


Fig.4 Typical pluck displacement traces of the grid cage((a), (b)) and 5x5 rod bundle((c), (d)) until 18 seconds((a), (b)), and 2 seconds((c), (d)).

그림 5(a), (b)는 각각 골격구조물과 5x5 봉다발의 진동응답 스펙트럼을 보여준다. 골격구조물의 집합체 1 차 모드형상에 대응되는 기본 고유진동수는 19.19, 21.91 Hz 이며, 3 차 모드까지 80 Hz 미만에 존재한다. 집합체 3 차까지의 진동모드가 두 개의 주파수가 근접한 형태로 존재하는 이유는 봉다발 단면이 가진방향으로 비대칭(두 방향으로의 굽힘강성이 다름)이기 때문이며, 이 때문에 하나의 길이방향모드에 대해서 봉다발 단면의 대각방향 모드와 그 수직방향모드가 동시에 나타나게 된다. 집합체 단면의 비대칭으로 인한 복합 진동모드(dual vibration mode) 특성은 5x5 봉다발의 경우도 마찬가지이며, 안내관 주위로 채워지는 23 개의 연료봉으로 인해 봉다발 단면의 비대칭효과는 많이 상쇄되는 것으로 보인다.

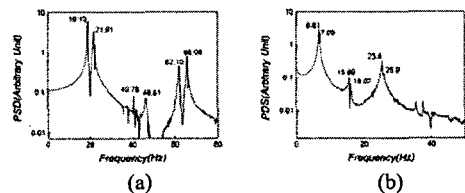


Fig. 5 Vibration spectrum of the cage and rod bundle

2.5 시험결과(2) - 고유진동수 및 감쇄비

그림 6은 골격구조물과 5x5 봉다발의 초기 굽힘변위에 따른 기본 고유진동수 변화를 나타낸다. 5x5 봉다발은 굽힘변위의 증가에 따라 고유진동수가 점차 감소되는 경향을 갖는 반면 골격구조물은 굽힘변위가 커져도 기본 고유진동수에 큰 변화가 없다. 이것은 작용력에 따른 비선형성의 차이로, 봉다발의 경우 안내관을 제외한 23개의 연료봉이 각각 5개의 지지격자에 고정되어 마찰과 미끄럼 등 접촉 지지조건에 의해 지지되고 있으므로 골격구조물에 비해 비선형성을 크게 내포하고 있기 때문이다.

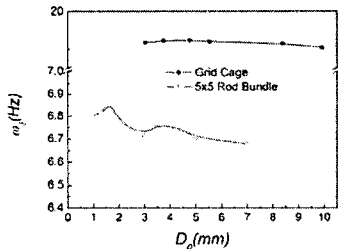


Fig. 6 Fundamental natural frequency of the grid cage and 5x5 rod bundle according to the initial pluck displacement.

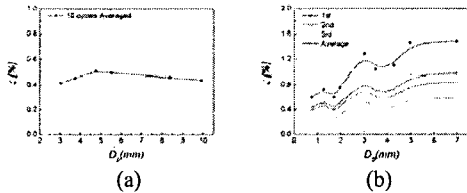


Fig. 7 Estimated damping ratio of (a) the grid cage and (b) the 5x5 rod bundle.

그림 7(a)와 (b)는 각각 골격구조물과 5x5 봉다발의 감쇄측정시험과 계산으로부터 얻어진 결과를 나타낸다. 골격구조물의 감쇄는 평균 0.45% 정도로 초기 굽힘변위의 증가에 따라 큰 차이가 없다. 5x5 봉다발의 감쇄비는 초기 굽힘변위에 따라 점차 증가되는 경향을 갖는데, 굽힘변위에 따른 감쇄특성의 변화 역시 봉다발이 갖는 비선형 특성 중에 하나이다. 봉다발의 평균적인 감쇄비는 0.67% 정도로 계산되었다. 이 값은 이전의 부분 집합체의 엄밀한 모달분석⁽⁷⁾을 통해서 얻어진 1차 모드에 대응되는 감쇄비 값과 오차범위(2.2%) 안에서 일치하는 값으로 골격구조물 및 5x5 봉다발에 대해 굽힘변위를 변화시키면서 수행된 감쇄측정 시험절차와 계산방법은 충분히 타당하다.

3. 결론

부분집합체 골격구조물과 5x5 봉다발의 감쇄측정시험을 통하여 부분핵연료 집합체의 FIV 해석에 필요한 감쇄비를 추정하기 위한 일련의 시험 및 분석을 수행하였다. 5x5 봉다발의 구조 감쇄비는 평균적으로 0.7% 이하로 판단되며, 봉이 끼워지지 않은 골격구조물과는 달리 초기 굽힘변위가 증가됨에 따라 고유진동수와 감쇄 특성이 각각 감소 및 증가되는 비선형 거동을 보이며, 집합체의 비선형성은 대부분 연료봉과 지지격자 간의 지지조건(접촉조건)에 의한 것으로 판단된다. 향후 유동조건에서의 봉다발 감쇄를 측정할 수 있는 장치구축과 분석법의 개발이 필요하다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업인 경수로용신형핵연료개발(대과제) 고성능지지격자개발과제(세부과제)의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) M.J. Pettigrew and C. E. Taylor, "Vibration analysis of shell-and-tube heat exchangers: an overview-Part1: flow, damping, fluidelastic instability", "Part2: vibration response, fretting-wear, guidelines", Journal of the Fluids and Structures, 18, p. 469 and p. 485., 2003.
- (2) Kang-Hee Lee, Heung-Seok Kang, Kyung-Ho Yoon, Kee-Nam Song, "Experimental study on the vibration characteristics of the 5x5 rod bundle; Pre-characterization test of the test bundle", Proceedings of the KNS autumn annual meeting, 2005.
- (3) Au-Yang, M. K. "Flow-Induced Vibration of power and process plant components", New York, ASME Press, 2001.
- (4) Kee-Nam Song, Kyung-Ho Yoon, Heung-Seok Kang, Kang-Hee Lee, "Mechanical/Structural Characteristics Evaluation of the Spacer Grid Shapes for PWR fuels", Proceedings of the KSME material and fracture division annual meeting, p. 31~37., 2005.
- (5) P. E. Cordelia Kaye Chandler, "Methods of determining a damping ratio from a simple impact test", Proceedings of PVP2005, July 17-21, Colorado, Denver, USA, Paper number 7104, 2005.
- (6) Heung-Seok Kang, Kang-Hee Lee, Kyung-Ho Yoon, Kee-Nam Song, Youn-Ho Jung, "Investigation of the Damping for 5x5 rod bundle", Proceedings of the 12th ICSV, Portugal, Lisbon, paper number FP0305, 2005
- (7) Kang-Hee Lee, Heung-Seok Kang, Kyung-Ho Yoon, Kee-Nam Song, "Comparison of the Flow-Induced Vibration Characteristics of the 5x5 Rod Bundle with Optimized H Type Spacer Grids", Proceedings of the KSME autumn annual meeting, 2005