

# 5 × 5 부분핵연료 집합체의 감쇠추정을 위한 실험적 연구

## Experimental Study on the Damping Estimation of the 5 × 5 Partial Fuel Assembly

이강희\* · 윤경호\* · 송기남\*

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

(2005년 10월 17일 접수 ; 2006년 1월 16일 심사완료)

**Key Words** : Partial Fuel Assembly(부분핵연료집합체), Spacer Grid(지지격자), Damping Ratio(감쇠비), Pluck Testing(플럭시험), Logarithmic Decrement Method(로그감소법), Nonlinearity(비선형성)

### 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 (5 × 5) which is called partial fuel assembly 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 to obtain the Flow-Induced Vibration (FIV) characteristics of the scaled fuel assembly over the specified flow range. A vibration test should be also performed to obtain the modal parameters of the assembly prior to the flow test. In this study, we want to develop the estimation procedure of the damping ratio for the scaled test assembly. For the damping factor of the partial fuel assembly 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 partial fuel assembly is about 0.7 % with reasonable error of 2 % for the previous results. Nonlinear behavior of the partial fuel assembly might be stem mainly from the rod-grid support configuration.

### 기 호 설 명

$F$  : 플럭 가진력  
 $f(f_1)$  : 주파수(기본주파수)  
 $\zeta$  : 감쇠비  
 $c$  : 감쇠계수(에너지 감쇠율)

$c_c$  : 임계감쇠계수  
 $\omega_1$  : 기저고유진동수  
 $y_1(y_n)$  : 1차( $n$ 차) 변위응당 침점진폭  
 $t_1(t_n)$  : 1차( $n$ 차) 침점에서의 경과시간  
 $\tau$  : 진동주기 ( $\tau=1/f_1$ )  
 $D_0$  : 초기 플럭변위  
 $D^*$  : 정규화된 플럭변위

† 책임저자 : 정희원, 한국원자력연구소  
E-mail : leekh@kaeri.re.kr  
Tel : (042) 868-2298, Fax : (042) 863-0565  
\* 한국원자력연구소

### 1. 서 론

진동하는 구조물의 진동진폭이 감소되는 특성을 감쇠(damping)라 하며, 이것은 진동에너지의 점차적인

소산(dissipation)을 의미한다. 진동하는 구조물이 갖는 에너지는 다양한 방식의 감쇠기구(damping mechanism)에 의해 소산될 수 있는데, 노심 운전조건(고온/고압의 냉각재 유동분위기)에서 진동하게 되는 핵연료집합체의 감쇠기구는 집합체 자체의 구조감쇠, 유체유동에 의한 점성 및 동적(flow dependent) 감쇠, 지지점에서의 간극감쇠(squeeze film), 마찰감쇠 및 이상(two phase)에 의한 영향 등 다양한 형태로 분류될 수 있다<sup>(1)</sup>.

핵연료 집합체의 설계를 위한 거동해석을 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 5×5나 3×3정도)을 사용하게 된다. 이를 이용한 다양한 기계구조적 성능시험을 통해서 상용핵연료 크기의 시편제작의 필요성을 확보하고, 실제 크기의 시험 이전에 충분한 기초 데이터를 확보할 수 있다<sup>(2)</sup>.

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 감쇠측정은 특별히 고안된 장치와 표준화된 절차<sup>(3)</sup>에 의해서 이루어지며 운전조건을 모사한 실제 시험에 앞서 공기 중 및 정지 유체 내에서 시험 대상체의 감쇠비를 측정하는 예비시험이 필요하다.

이 연구에서는 핵연료 집합체의 축소모형인 부분 핵연료 집합체의 유동조건에서의 감쇠측정을 위한 예비시험의 일환으로 부분 핵연료 집합체와 골격구조물을 대상으로 공기 중 감쇠측정시험(플러시시험의 방법을 이용, 인장 후 순간적인 절단을 통한 구조물 잔류 진동이력 측정시험)을 수행하고, 향후 수중과 유동조건에서의 시험을 위한 예비분석을 수행하였다. 또한 초기 굽힘변위와 작용력에 따른 부분집합체 동특성에 있어서의 비선형 거동을 파악하기 위한 정성적인 분석도 이루어 졌다.

## 2. 방법 및 결과

### 2.1 시험개요 및 시험시편

한국원자력연구소에서는 개발단계에 있는 원전 부품의 기계구조적인 성능을 평가하기 위한 여러가지 노외 성능시험시설을 구축하고 있다<sup>(4)</sup>. Fig.1은 부분 핵연료 집합체의 진동특성을 파악할 수 있도록 고안된 공기 중수 중 집합체 진동시험장치 개략도를 나타낸다. 부분집합체와 골격구조물의 감쇠측정시험은 별도의 가진 장비 없이 가는 철심으로 집합체 중심을 일정 초기변위( $D_0$ )만큼 끌어당기고(이때 철심의 장력을 측정), 순간적으로 철심을 절단하여 이완된 부분집합체 중심의 진동진폭 감소이력(decay trace)를 측정하는 것으로 이루어진다. 감쇠측정 시험 간 시험 조건은 다음과 같다.

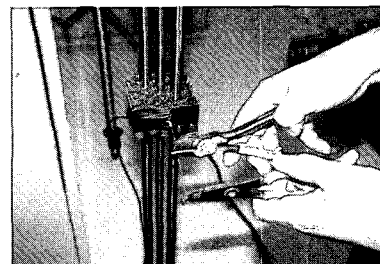
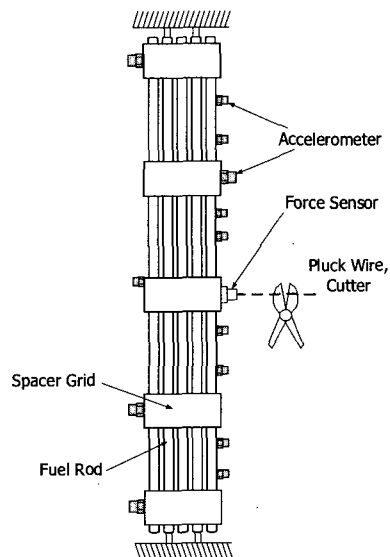


Fig.1 Rod bundle vibration test overview (upper) and pluck test picture (under)

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

Fig. 2는 시험시편인 부분집합체용 골격구조물과 5×5 부분집합체의 단면구성을 나타낸다. 골격구조물의 경우, 대각선 상의 중심에 위치하는 두 개의 안내관(직경 12.5 mm)이 5개의 지지격자에 슬리브(sleeve)를 이용하여 용접고정된다. 5×5 부분집합체는 골격구조물에 상용 연료봉(직경 9.5 mm)과 동일 제원(단, 길이는 1/2)을 갖는 23개의 모의 연료봉을 끼워서 제작된 것이다.

## 2.2 시험절차

두 시편의 안내관을 상하단 고정장치(both end clamped)에 설치하고, 중심 지지격자 중간에 힘센서(Rion Model PF-31)를 접착제로 부착한다. 철심은 연결용 소켓을 이용하여 힘센서의 한쪽 끝에 고정한다. 연결된 철심을 일정한 변위만큼 잡아당기고, 절단 도구를 이용하여 순간적으로 철심을 자른다. 절단 이후의 부분집합체 응답이력을 비접촉식 진동측정계(Polytec OFV-303 head and OFV-3001 controller)로 측정하고, 측정된 응답이력과 작용력은 신호증폭기와 breakout box를 거쳐 데이터 획득장치에 저장된다. 한번의 감쇠측정시험이 종료되면, 데이터 저장 후 준비된 초기 변위(또는 하중조건)에 따라 반복 시험하였다. 데이터 획득장치는 B&K Nexus 신호증폭기와 HP/VXI front end 시스템을, 데이터 획득 및 분석용 프로그램은 MTS/IDEAS-Pro의 transient measurement와 time history process module을 각각

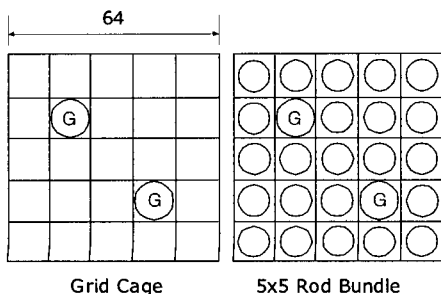


Fig. 2 Cross section of the rod bundle (G: guide tube)

이용하였다. Sampling 조건으로 각 신호응답은 DC coupling상태로 신호획득 되었다.

## 2.3 감쇠비 계산

감쇠측정시험 결과인 응답 시간이력으로부터 구조 감쇠비를 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 감쇠계산법(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 감쇠계산 방법이 결정되어야 한다. Chandler<sup>(5)</sup>는 증기발생기 튜브의 감쇠측정 시험에서 세 가지 계산방법을 비교하였고, 로그 감소법이 가장 일관되고 신뢰성 있는 결과를 내는 것으로 결론지었으며, Au-Yang<sup>(3)</sup>은 유동분위기에서 진동하는 세장비가 큰 구조물의 경우 감쇠측정에서 역시 로그감소법이 적합한 방법임을 보였다. 이 연구에서는 앞선 문헌에 제시된 아래와 같은 로그감소법의 계산방법을 따르기로 한다. 진동진폭이 지수함수 적으로 감소될 때, 축적(cumulative) 감쇠비는 다음과 같은 식으로 정의된다.

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

## 2.4 시험결과(1) - 굽힘강성, 응답 시간이력, 진동스펙트럼

Fig. 3은 부분집합체와 골격구조물의 감쇠측정시험에서, 초기 굽힘변위와 작용하중에 대한 부분집합체의 굽힘특성 곡선(초기굽힘 변위와 작용력에 대한 시험변위)을 도시하고 있다. 굽힘변위는 최대 10 mm로 한정하였으나, 상대적으로 큰 굽힘강성을 갖는 5×5 부분집합체의 초기변위 적용의 어려움과 손상우려 때문에 이에 대한 굽힘 변위는 최대 7 mm 정도로 설정하였다. 시험조건인 초기 굽힘변위는 상용핵연료의 노심에서 발생할 수 없는 과대변위이지만 시험용 부분집합체의 기계적인 특성을 임계변형 수준까지 파악하기 위한 설정 값으로 볼 수 있다.

골격구조물은 연료봉이 없는 골격체이므로 작은 작

용력에 대해서도 큰 변형량을 갖는다. 5×5 부분집합체의 정적 굽힘강성은 대략 20 N/mm로 파악되며, 넓은 정적변위 범위에서 근사 선형거동을 보이지만, 연료봉과 지지격자 간의 지지조건에 의해 잠재적으로 큰 비선형성을 갖는다.

Fig. 4는 골격체와 부분집합체의 전형적인 잔류 진동 시간이력을 나타낸다. Fig. 4(a), (c)는 비교적 넓은 시간범위(18 sec)에 대한 이력이고, Fig. 4(b), (d)는 철심 절단 이후의 짧은(2 sec) 시간이력을 나타내는데, 두 구조물의 응답이력은 각각의 구조물에 대한 인접한 두 공진 주파수의 차이(골격체의 경우,  $1/(21.91 \text{ Hz} \sim 19.19 \text{ Hz}) = 0.37 \text{ sec}$ ; 부분집합체의 경우,  $1/(7.09 \text{ Hz} \sim 6.81 \text{ Hz}) = 3.57 \text{ sec}$ )에 기인된 전형적인 맥놀이(beat)특성을 나타낸다. 통상 구조물의 감쇠특성은 취급이 간편하고 해석이 용이한 점성 감쇠로 가정하여 모델링하지만, 핵연료 집합체의 봉다발 구조물은 참고문헌<sup>(6)</sup>에서처럼 점성감쇠와 쿨롱감쇠 특성을 적절한 혼합한 형태의 감쇠 모델링이 요구될 것으로 보인다.

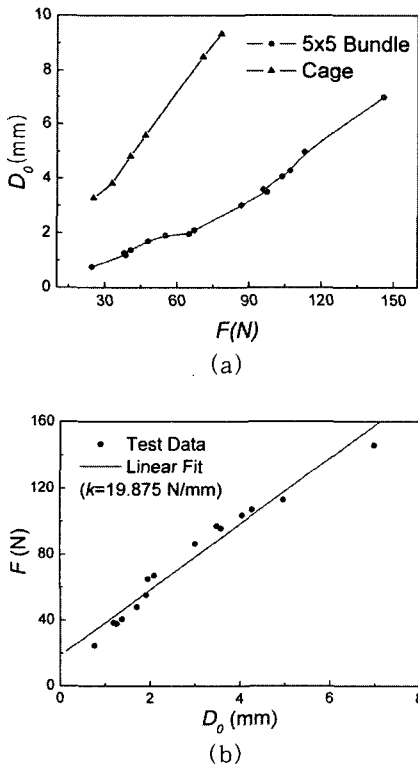


Fig. 3 Initial pluck displacement-force characteristic curve((a)) and bundle's bending stiffness ((b)) of the bundle

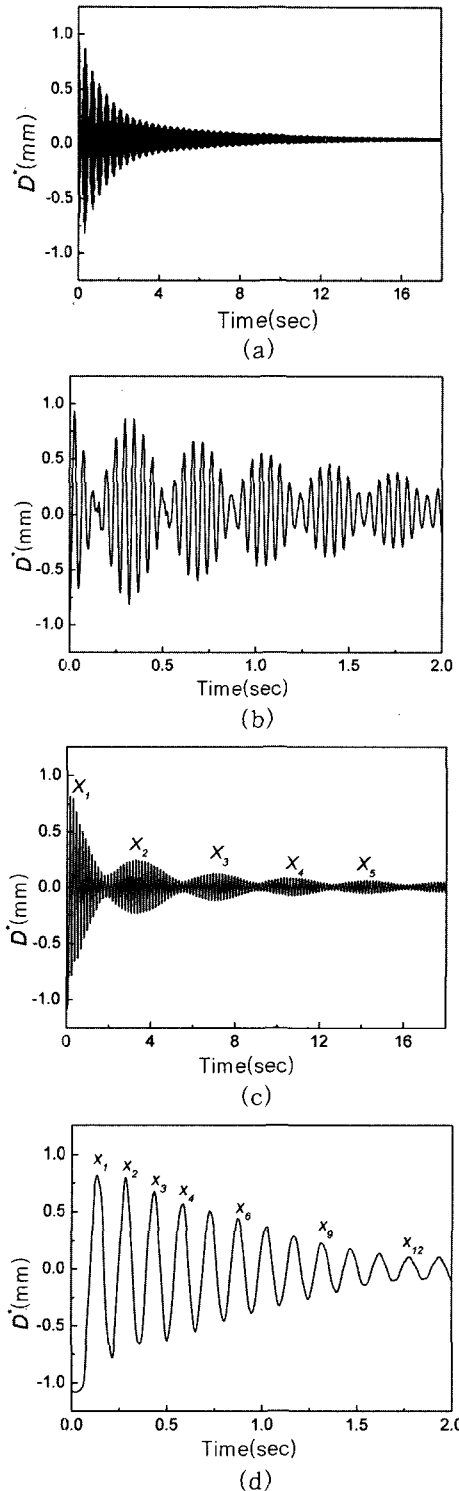


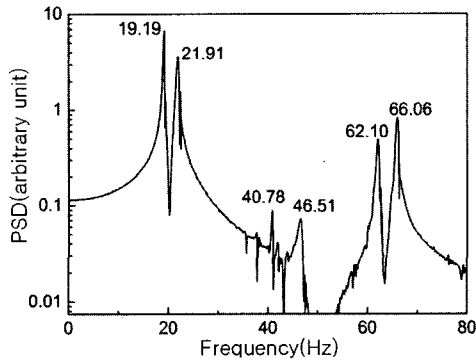
Fig. 4 Typical pluck displacement traces of the grid cage((a), (b)) and 5×5 rod bundle((c), (d)) until 18 seconds((a), (b)), and 2 seconds((c), (d))

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

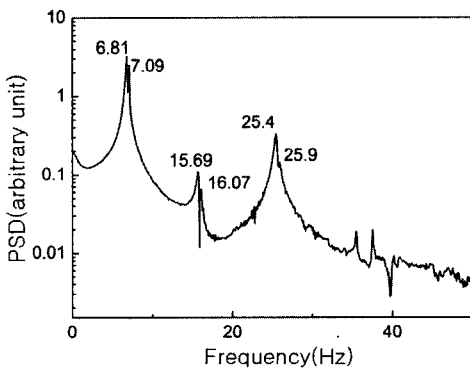
### 2.5 시험결과(2) - 고유진동수 및 감쇠비

Fig. 6은 골격구조물과 5×5 부분집합체의 초기 굽힘변위에 따른 기본 고유진동수 변화를 나타낸다. 5×

5 부분집합체는 굽힘변위의 증가에 따라 고유진동수가 점차 감소되는 경향을 갖는 반면 골격구조물은 굽힘변위가 커져도 기본 고유진동수에 큰 변화가 없다. 이것은 작용력에 따른 비선형성의 차이로, 부분집합체의 경우 안내관을 제외한 23개의 연료봉이 각각 5개의 지지격자에 고정되어 마찰과 미끄럼 등 접촉 지



(a)



(b)

Fig. 5 Vibration spectrum of the cage and rod bundle

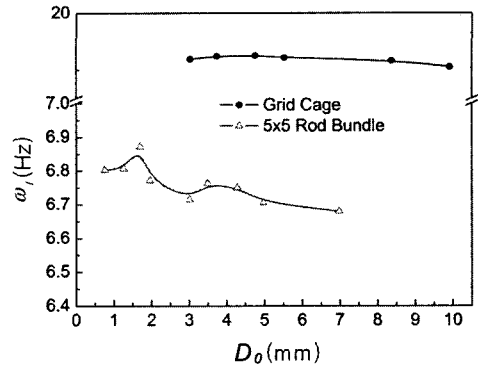
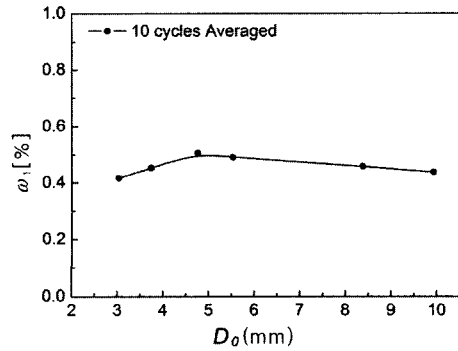
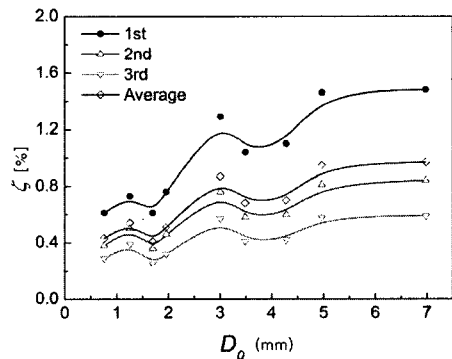


Fig. 6 Fundamental natural frequency of the grid cage and 5×5 rod bundle according to the initial pluck displacement



(a)



(b)

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

지조건에 의해 지지되고 있으므로 골격구조물에 비해 비선형성을 크게 내포하고 있기 때문이다.

Fig. 7(a)와 (b)는 각각 골격구조물과 5×5 부분집합체의 감쇠측정시험과 계산으로부터 얻어진 결과를 나타낸다. 골격구조물의 감쇠는 평균 0.45% 정도로 초기 굽힘변위의 증가에 따라 큰 차이가 없다. 5×5 부분집합체의 감쇠비는 초기 굽힘변위의 증가에 따라 점차 증가되는 경향을 갖고, 감쇠비 계산결과에 나타난 불규칙한 ripple은 인장과 절단시에 포함된 실험적인 오차로 생각된다. 부분집합체의 평균 감쇠비(3차까지의 맥놀이 대한 local 감쇠비의 평균)는 0.67% 정도로 계산되었다. 이 값은 이전의 부분집합체의 모달시험과 분석<sup>(7)</sup>을 통해서 얻어진 집합체1차 굽힘모드에 대응되는 감쇠비 값과 오차범위(2.2%) 안에서 일치하는 값으로 골격구조물 및 5×5 부분집합체에 대해 굽힘변위를 변화시키면서 수행된 감쇠측정 시험결과와 계산방법은 충분히 타당한 것으로 보인다.

### 3. 결 론

부분집합체 골격구조물과 5×5 봉다발의 감쇠측정 시험을 통하여 부분핵연료 집합체의 유동유발진동 해석에 필요한 감쇠비를 추정하기 위한 일련의 시험 및 분석을 수행하였다. 5×5 부분집합체의 구조 감쇠비는 평균적으로 0.7% 이하로 판단되며, 봉이 끼워지지 않은 골격구조물과는 달리 초기 굽힘변위가 증가됨에 따라 고유진동수와 감쇠 특성이 각각 감소 및 증가되는 비선형 거동을 보이며, 집합체의 비선형성은 대부분 연료봉과 지지격자 간의 지지조건(접촉조건)에 의한 것으로 판단된다. 연료봉과의 접촉조건이 없는 골격구조물의 고유진동수는 초기 굽힘변위에 따라 큰 차이가 없다. 향후 유동조건에서의 부분집합체의 감쇠를 측정할 수 있는 장치 구축과 분석법의 개발이 필요하다.

### 후 기

이 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업인 경

수로용신형핵연료개발(대과제) 고성능지지격자개발과 제(세부과제)의 일환으로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

- (1) Pettigrew, M. J. and Taylor, C. E., 2003, "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.
- (2) Lee, K. H., Kang, H. S., Yoon, K. H., Song, K. N., 2005, "Experimental Study on the Vibration Characteristics of the 5×5 Rod Bundle Pre-characterization Test of the Test Bundle", Proceedings of the KNS Autumn Annual Meeting.
- (3) Au-Yang, M. K., 2001, "Flow-induced Vibration of Power and Process Plant Components", New York, ASME Press.
- (4) Song, K. N., Yoon, K. H., Kang, H. S. and Lee, K. H., 2005, "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.
- (5) Cordelia Kaye Chandler, P. E., 2005, "Methods of Determining a Damping Ratio From a Simple Impact Test", Proceedings of PVP2005, July 17~21, Colorado, Denver, USA, Paper Number 7104.
- (6) Kang, H. S. Lee, K. H., Yoon, K. H., Song, K. N. and Jung, Y. H., 2005, "Investigation of the Damping for 5×5 Rod Bundle", Proceedings of the 12th ICSV, Portugal, Lisbon, Paper Number FP0305.
- (7) Lee, K. H., Kang, H. S., Yoon, K. H. and Song, K. N., 2005, "Comparison of the Flow-Induced Vibration Characteristics of the 5×5 Rod Bundle with Optimized H Type Spacer Grids", Proceedings of the KSME Autumn Annual Meeting.