

6×6 지지격자로 지지된 핵연료봉 튜브의 진동특성

Dynamic Characteristics of Nuclear Fuel Tube with 6×6 Spacer Grids

문효익* · 박남규† · 이희남** · 장영기*** · 이승태* · 김재익***

Hyoik Moon, Nam-gyu Park, Huinam Rhee, Youngki Jang, Seung-tae Lee, and Jae-ik Kim

Key Words : Clad Tube(피복관), Spacer Grid(지지격자), Dynamic Characteristics(동특성), Model Updating(모델개선), MAC(Modal Assurance Criterion)

ABSTRACT

우라늄을 내장한 연료봉은 핵분열이 일어나는 우라늄 펠렛(pellet)을 1 차적으로 차폐하는 중요한 구조물이다. 연료봉은 원자로 내에서 유체유발진동에 의해 손상될 수 있으며, 본 연구에서는 유동유발진동 특성을 예측하기 위해 핵연료봉의 동특성 규명을 위한 모드해석을 수행하였다. 핵연료봉의 진동특성을 규명하기 위해 제작한 시험장치를 이용하여 피복관(clad tube)의 진동특성실험과 유한 요소 해석을 수행하였다. 모드시험(Modal Testing)은 현재 상용 핵연료봉(튜브)을 대상으로 수행되었으며, 유한 요소 해석 모델을 개발하여 해석 결과와 시험 결과를 비교 분석하였다.

1. 서 론

핵연료집합체는 핵분열이 가능한 우라늄을 핵연료봉에 저장하여 핵연료를 보호하고 운반이 용이하도록 고안된 구조물이다. 경수로형 핵연료집합체는 원자로 내에 수직으로 장착되며, 길고 가는 튜브 내에 핵연료 펠렛(pellet)을 저장한 수백 개의 연료봉 및 지지격자 등으로 구성되어 있다.

핵분열 시 발생하는 열을 운반하기 위한 냉각수는 원자로 하부로부터 공급되며, 이러한 축방향 유동은 연료봉의 유체유발진동(flow induced vibration)을 야기한다. 이러한 진동현상은 연료봉과 지지격자 지지부에서의 상대운동에 의한 연료봉의 손상을 유발하여 핵연료봉의 수명을 단축시킬 수 있다. 따라서 연료봉의 거동을 예측한 부품 설계가 필요하다. 그러나 연료봉을 지지하는 지지격자는 고온 및 방사능에 의해 연료봉과 간극이 발생되고, 펠렛과 연료봉간의 간섭 및 심한 난류의 영향으로 연료봉은 비선형적으로 진동하여 연료봉의 진동특성을 정확히 예측하기 어렵다. 따라서 지금까지 실제모델을 근사화하여 핵연료봉의 거동에 대한 여러 연구들이 수행되었다^[1~6].

통상적으로 원자로 내 정상상태 운전조건에서 연료봉은 0.2 mm이하의 진폭으로 운동한다^[1]. 또한 연료봉의 매우 큰 세장비(slenderness ratio)와 에너지의 흐름이 지지격자에 의해 상당부분 차단이 되는 특성으로 가진 위치에서 멀어질수록 잡음의 영향을 많이 받는다.

본 연구에서는 상용 핵연료봉의 진동특성을 규명하기 위해 제작한 시험장치를 이용해 피복관(clad tube)의 진동특성에 대한 시험을 수행하였다. 또한 시험결과의 타당성을 입증하고자 유한요소모델과 비교, 분석하였다. 수치적 방법에 의한 해석은 유한 요소 프로그램인 ANSYS 10.0^[7]을 사용하였으며, 시험에는 가진력이 조절되는 가진기로 피복관을 정현파 가진(sine sweep)하였고, 데이터 후처리 과정에는 I-DEAS^[8]를 사용하였다.

본 연구를 통하여 향후 수행될 우라늄을 내장한 핵연료봉의 진동특성시험에 대한 실험 기술을 개발하고, 나아가 원자로 내에서 핵연료봉의 거동을 예측하는데 필요한 기초 자료를 확보 할 수 있다.

2. 진동 시험

2.1 시험 개요

피복관의 진동특성시험에 사용된 주요 장비로는 가진기를 제어할 수 있는 VR8500 과 가진기, 가속도계, 로드셀(load cell), I-DEAS 등을 활용

† 책임저자:한전원자력연료(주)

E-mail :nkpark@knfc.co.kr

Tel : (042) 868-1197, Fax : (042)868-1149

* 순천대학교 대학원 기계공학과 석사과정

** 순천대학교 기계우주항공공학부

*** 한전원자력연료(주)

하였다. 진동시험에 사용된 피복관은 약 4 m 의 핵연료봉(튜브)을 사용하였다. Fig. 1 과 같이 11 개의 6x6 지지격자(spacer grid)를 시험대에 설치 하여 피복관은 10 개의 스펠(span)으로 구성된 다점지지 구조물이다. 가진위치는 바닥으로부터 6 번째의 스펠(span) 중간부분이며, 각 스펠의 중간위치에서 가속도를 계측하였다.

지지격자는 Fig. 2 와 같이 단일 평면상에서 하나의 스프링(spring)과 반대쪽에 있는 두 개의 딥플(dimple)로 구성되고, 직각방향의 평면상에도 하나의 스프링과 두 개의 딥플로 구성되어, 연료봉을 기계적으로 지지한다.

피복관은 원형이므로 측정용 센서를 고정시키는 것이 매우 어렵고, 동일한 축방향에서 신호를 취득하기 또한 어렵다. 따라서 본 실험에서는 센서 고정위치에 보조물을 사용하여 센서의 고정을 용이하게 하고, 축방향 신호의 취득을 용이하도록 하였다.

또한, 가진력의 크기에 따른 영향을 비교하기 위하여 각각 0.3 N, 0.4 N, 0.5 N, 의 하중에서, 180 Hz/min 의 속도로 50 Hz~300 Hz 까지 정현파 가진 하였다.

핵연료봉의 구조 특성상 가진 위치에서 멀어질수록 신호가 미약하여 신호대 잡음비(S/N ratio)가 떨어졌고, 실험을 수행한 횟수가 증가할수록 지지격자의 강성이 변화되어 시험 수행 결과의 해석을 어렵게 만드는 요인으로 작용하였다.

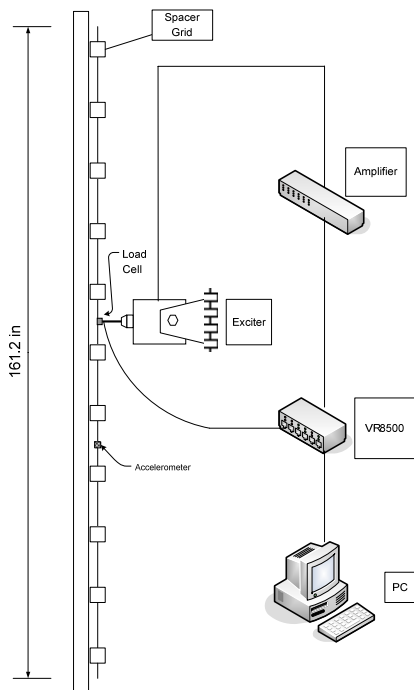


Fig. 1 Schematic of Test Apparatus

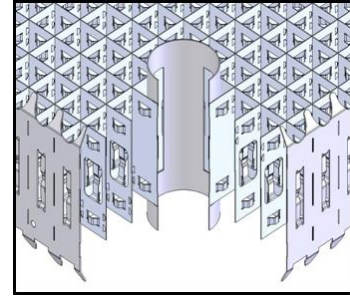


Fig. 2 Spacer Grid

3. 유한 요소 해석

3.1 유한요소모델 및 해석방법

시험결과의 비교 분석 및 설계활용을 위하여 유한 요소 프로그램인 ANSYS 10.0 을 사용하여 진동해석을 수행하였다. 유한 요소 모델에서 피복관은 ANSYS 에서 제공하는 보(beam)요소를 사용하였고, 지지격자의 스프링 및 딥플은 스프링(spring)요소를 사용하였다. 이들의 강성은 Table 1 과 같다.

일정한 간격을 두고 설치된 지지격자의 스프링과 딥플이 연료봉의 길이 방향으로 동일한 위치에서 동일한 하중으로 핵연료봉을 지지하고 있지 않고, 심지어 지지기능을 하지 못하는 지지격자도 존재한다. 이런 불규칙성을 반영하기 위하여 회전스프링을 추가하고, 최적화 기능을 적용하여 모델을 개선하였다. 제어변수는 회전스프링 강성이고, 목표치는 주파수와 MAC(Modal Assurance Criterion)값을 대상으로 모델 최적화를 수행하였으며, 피복관과 지지격자 사이에서 발생하는 마찰에 의한 영향과 접촉부위에서 발생하는 감쇠등은 무시하였다.

MAC은 시험과 해석에 의한 두 모드의 상관관계를 평가하는 기준으로서, 식 (1)과 같이 비교하고자 하는 두 벡터의 방향 여현을 의미하고, 동일한 벡터는 1 이 되며, 유사성이 없는 벡터에 대해서는 0 으로 접근한다^[9].

$$MAC(\{\Phi_t\}_i, \{\Phi_a\}_j) = \frac{|\{\Phi_t\}_i^T \{\Phi_a\}_j|^2}{(\{\Phi_t\}_i^T \{\Phi_t\}_i)(\{\Phi_a\}_j^T \{\Phi_a\}_j)} \quad (1)$$

여기서 Φ_t 는 시험모드형상 벡터이고, Φ_a 는 해석모드형상 벡터이다.

Table 1 Stiffness of Dimple and Springs

Top (lb/in)	Dimple	2496.9
	Spring	357
Middle (lb/in)	Dimple	3036.9
	Spring	520
Bottom (lb/in)	Dimple	2794.9
	Spring	480

4. 해석 및 실험 결과

4.1 모드 형상 및 고유진동수

작용하중에 따른 시험결과와 유한 요소 해석의 결과를 Table 2 에 비교하였다. 0.3 N 작용하중 시험에 의한 1 차 고유진동수가 124 Hz로 해석에 의한 127Hz보다 약 2.4% 낮은 값을 보였으며, 2 차 모드를 제외한 모든 모드에서 동일하였다. 또한, 작용하중의 세기가 커짐에 따라 고유진동수가 낮아졌다. 하중의 세기가 커짐에 따라 고유진동수가 낮아짐은 Premount^[1]에 의해서 처음으로 보고되었는데, 이것은 핵연료봉과 같은 비선형 특성을 지닌 구조물에 나타나는 전형적인 현상으로 연료봉을 지지하고 있는 지지격자의 스프링특성을 간접적으로 나타낸다^[4].

한편 해석결과와는 달리 시험에서는 3 차 모드가 검출되지 않았다. 이것은 가진기가 6 번째 스펙구간에 위치해 있고, Fig. 5 에서 보듯이 이 위치가 3 차 모드의 노드점과 동일하여 3 차 모드를 가진 시킬 수 없었던 것으로 판단된다.

모드에 대한 정량적 비교를 위해 시험결과와 해석결과 모두 10 곳의 측정값 중 가장 큰 값으로 정규화(Normalization)하여 나타내었다. 하중이 작용하는 곳에서는 시험과 해석의 결과가 비교적 잘 일치 하고 있으나 작용점에서 멀어질수록 일치 하지 않고 있다.

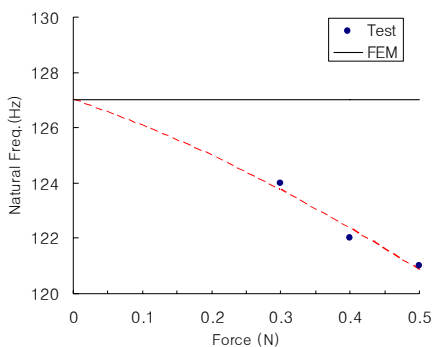


Fig. 3 Natural freq. with Force

Table 2 Natural Frequencies

Force (N)	Mode	Natural Freq. (Hz)		Error* (%)
		Test	FEM	
0.3	1 st	124	127	2.42
	2 nd	181	177	-2.21
	3 rd	-	184	
	4 th	187	191	2.14
	5 th	194	214	10.31
0.4	1 st	122	127	4.10
	2 nd	179	177	-1.12
	3 rd	-	184	
	4 th	188	191	1.60
	5 th	194	214	10.31
0.5	1 st	121	127	4.96
	2 nd	178	177	-0.56
	3 rd	-	184	
	4 th	180	191	6.11
	5 th	194	214	10.31

$$* : Error = \frac{FEM - Test}{Test} \times 100(\%)$$

Fig. 3 에는 작용하중에 따른 1 차 고유진동수의 변화를 도시하였고, 작용하중이 커짐에 따라 고유진동수가 감소함을 관찰 할 수 있다. 또한 시험결과를 기초로 작용하중이 없을때(자유진동)의 고유진동수를 예측하면 유한 요소 해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

작용하중 0.3 N 에서의 모드형상과 MAC 값을 Fig. 4 과 5 나타내었다.

Table 3 Modal Assurance Criterion

	0.3 N	0.4 N	0.5 N
1 st	0.77	0.79	0.80
2 nd	0.84	0.77	0.73
3 rd	0.85	0.88	0.40
4 th	0.61	0.61	0.64

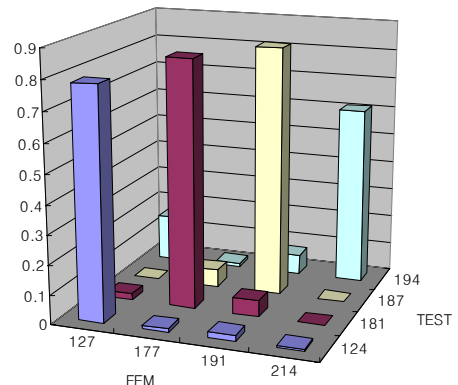


Fig. 4 Modal Assurance Criterion (0.3 N)

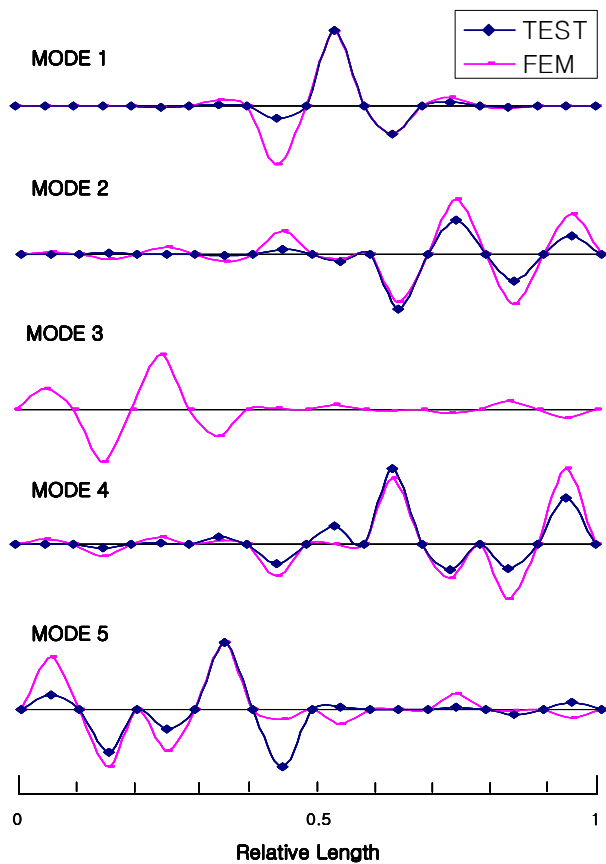


Fig. 5 Mode Shape (0.3 N)

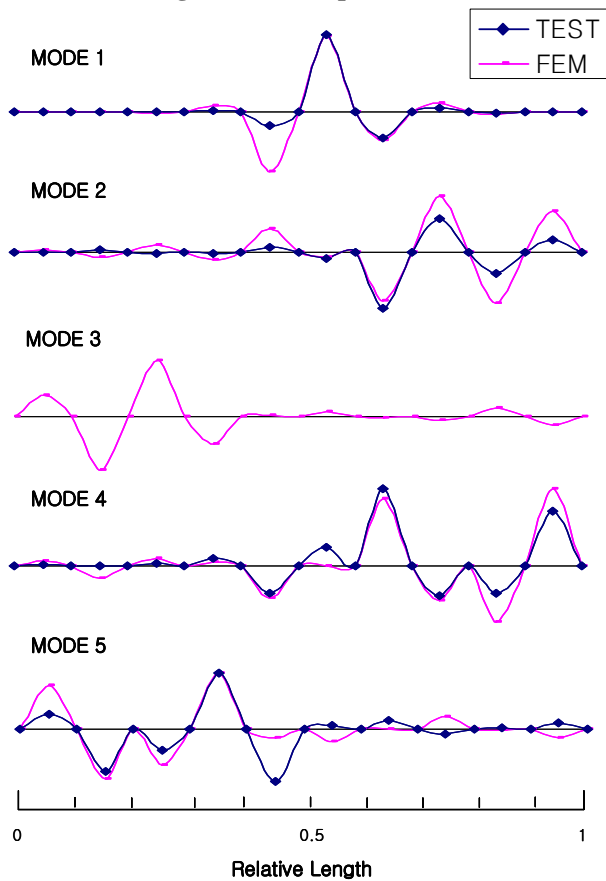


Fig. 6 Mode Shape (0.4 N)

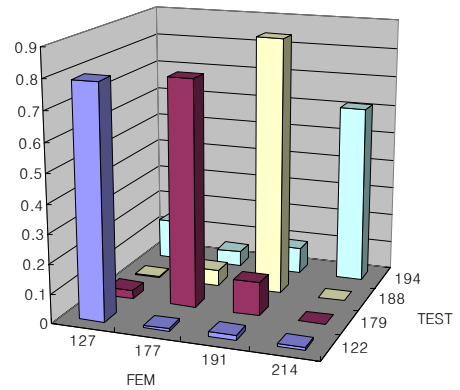


Fig. 7 Modal Assurance Criterion (0.4 N)

Fig. 6 과 7 은 작용하중 0.4 N 에 대한 결과이며, Table 2 에서 보듯이 0.3 N 에 비하여 첫번째 고유진동수의 경우 약 2% 감소하였다.

작용하중 0.3 N 에 비하여 0.4 N 의 MAC 값도 근소하게 변화했지만, 0.3 N 과 0.4 N 의 작용하중에 대한 시험결과의 차이는 매우 미미하다고 판단된다. 그러나 Fig. 8 의 0.5 N 의 작용하중에서의 4 차 모드를 보면 9 번째 스패ン구간에서 모드형상이 0.3 N 과 0.4 N 의 4 차 모드와는 다르고, 5 차 모드의 9, 10 번째 스패ン구간의 모드형상 또한 다르게 나타났다.

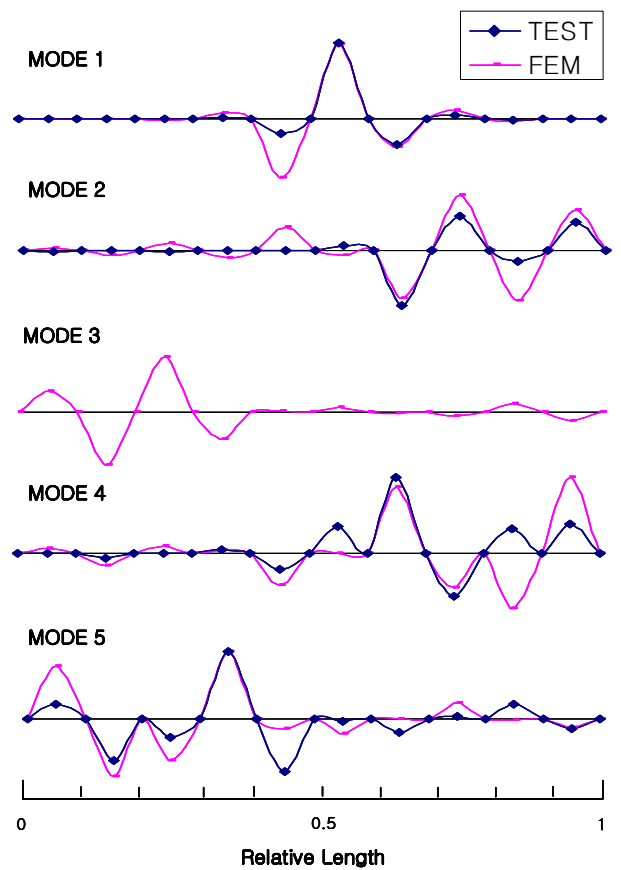


Fig. 8 Mode Shape (0.5 N)

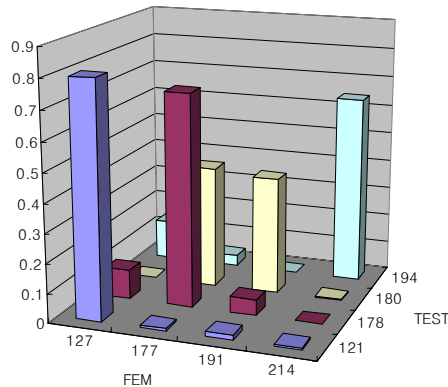


Fig. 9 Modal Assurance Criterion (0.5 N)

형상 변화가 발생한 모드의 작용으로 Table 3에서 보듯이 MAC 값에서도 0.3 N 과 0.4 N 에 비하여 낮은 값을 나타내었다. 이것은 작용하중의 증가에 의해 지지격자 스프링의 비선형 특성 영향이 증가했기 때문인 것으로 판단되며, 이러한 하중에 의한 영향을 파악하기 위해 0.5 N 이상의 작용하중에 대해서 보다 더 정밀한 시험이 필요한 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 상용 핵연료봉의 진동특성을 규명하기 위해 제작한 시험장치를 이용해 피복관 (clad tube)의 진동특성에 대한 시험을 수행하였다. 핵연료봉 튜브의 1 차 고유진동수는 120 Hz~125 Hz 의 범위에 있으며, 여러 작용하중에 따른 모드해석을 수행하였다. 하중이 증가 할수록 고유진동수가 낮게 나타났으며, 시험결과와 해석모델의 비교값인 MAC 값도 고차 모드로 갈수록, 하중의 세기가 증가 할수록 낮은 값을 나타내었다.

하중 작용점에서 먼 지점은, 가진 에너지가 도달할 수 없는 연료봉의 특성상 측정 자료의 신뢰

성이 낮은 것으로 평가되었고, 신뢰성 있는 데이터를 계측하기 위한 시험기술 개발이 필요할 것으로 판단된다.

유한 요소 모델의 신뢰성을 높이고자 실험 결과를 바탕으로 모델을 최적화 하였다. 그 결과 처음 4 개의 고유진동수에 대해 최대 10%이내의 오차범위에 존재하는 모델을 구현 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2006 년도 교육인적자원부의 지방대학혁신역량강화사업(NURI)및 2006 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-511-D00446).

참고문헌

- (1)Premount, A., 1982, "On the Vibrational Behavior of Pressurized Water Reactor Fuel Rods," Nuclear Technology, Vol. 58, pp. 483~491.
- (2)LI.R. Curling, M.P. Paidoussis, 2003, "Analysis for Random Flow-Induced Vibration of Cylindrical Structures Subjected to Turbulent Axial Flow," Journal of Sound and Vibration, Vol. 264, pp. 795~833.
- (3)D.T. Yamamoto, J.R. Meneghini, F. Saltara, R.A. Fregonesi, J.A. Ferrari Jr., 2004, "Numerical simulation of Vortex-Induced Vibration on Flexible Cylinders," Journal of Fluids and Structures, Vol. 19, pp. 467~489.
- (4)최명환 등, 2003, "지지격자로 지지된 모의 연료봉의 진동특성," 대한기계학회 A 권 제 27 권 제 3 호, pp. 424~431.
- (5)박남규 등, 2006, "균일한 축방향 유동에 노출된 핵 연료봉의 진동특성 분석," 한국소음진동공학회 제 16 권 제 11 호, pp. 1115~1123.
- (6)최명환 등, 2002, "접촉해석이 연계된 스프링 지지보의 진동해석", 춘계학술대회논문집, 한국소음진동공학회, pp. 1215~1221.
- (7)User's Manual, SAS IP, ANSYS Ver.10.0.
- (8)User's Manual, MTS, IDEAS Ver.10.0, 2002.
- (9)Maia, Silva, 1997, "Theoretical and Experimental Modal Analysis," Research Studies Press.