5×5 핵연료 모의 집합체의 지지격자 스트랩 진동특성

The Grid Strap Vibration Characteristics of the 5×5 Nuclear Fuel Mock-up

김 경 홍† · 박 남 규* · 김 경 주** · 서 정 민**

Kyoung Hong Kim, Nam Gyu Park, Kyoung Ju Kim and Jung Min Suh

(2012년 3월 12일 접수 ; 2012년 6월 26일 심사완료)

Key Words : Flow Induced Vibration(유체유발 진동), Grid Strap Vibration Characteristics(지지격자판 진동 특성), Nuclear Fuel Bundle(핵연료 집합체), Operational Modal Analysis(운전 중 모드 분석)

ABSTRACT

Since the fuel is always exposed to turbulent flow, the grid strap shows flow induced vibration characteristics that impact on the nuclear fuel soundness. The dynamic behavior of grids in nuclear fuels is quite complex, since two pairs of spring and dimple support are contacted with rods by friction in the limited space. This paper focuses on investigation of the grid strap(test fuel strap, TFS) vibration in one cell. TFS consists of a single spring and double dimples. To identify the grid strap vibration, modal analysis of the strap is performed using finite element method(FEM). Modal testing on a 5×5 grid structure without rods is performed. The modal testing results are compared to analytic results. In addition, random test considering rod effect is performed about a 5×5 grid with rods under real contact condition in the air. Finally, the strap vibration of a 5×5 fuel bundle in investigation of flow induced vibration(INFINIT) facility is measured in real fluid velocity condition without heating. It is shown that modal frequencies from the test are almost equal to those peak frequencies in the INFINIT test.

기 호 설 명

a : TFS의 x방향 길이
 b : TFS의 y방향 길이
 ID : 연료봉 시편의 내부직경
 l : 연료봉 시편의 y방향 길이
 OD : 연료봉 시편의 외부직경

1. 서 론

건전성 평가 측면에서 모든 구조물 또는 기계적 시스템의 정적 특성 및 동적 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 특히 원자력발전소의 운전시 고속으로 순환하는 냉각수에 의해 원자로 구조물, 증기발생기, 배관계통, 핵연료 집합체 등에서 진동이 발생하여 구조물에 손상을 발생할 수 있기 때문에 구조물의 정적 특성 및 동적 특성을 파악하는 연구는 물론 냉각수에 의한 거동평가 등의 연구가 수행되었다⁽¹⁻³⁾. 핵연료 집합체는 우라늄 펠렛을 감싸고 있는 연료봉(rod), 연료봉을 잡아주는 지지격자, 제어봉이 장입될 수 있는 안내관, 그리고 상단 및 하단 고정체 등으로 구성된다. 원자로 안에 장입된 핵연료 집합체들은 빠른 속도

† 교신저자; 정회원, 한전 원자력 연료㈜
E-mail : kyounghong@knfc.co.kr
Tel : (042)868-1367, Fax : (042)868-1149

* 정회원, 한전 원자력 연료㈜

** 한전 원자력 연료㈜

이 논문의 일부는 2012년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

의 냉각수에 노출되면서 핵연료 구성품에 진동을 유발시킨다. 그 중 Fig. 1과 같이 덤플과 스프링으로 연료봉을 지지하며, 접촉하는 지지격자 한 셀의 스트랩은 두께가 매우 얇고 세로방향의 길이가 상대적으로 길며, 와류박리에 의한 고주파진동이 발생한다. 발생한 고주파 진동으로 인하여 스트랩의 스프링과 덤플이 Fig. 2와 같이 연료봉에 마모를 유발시킬 수 있으며, 심하면 연료봉의 파손 또는 지지격자 스트랩의 손상을 초래할 수 있다.

따라서 이 논문에서는 핵연료 집합체에 사용되는 지지격자 스트랩 및 연료봉 시편을 여러 가지 조건하에서 유한요소 해석 및 동적특성 시험을 통해 비교 및 분석하였다. 먼저, 지지격자 한 셀의 스트랩 및 연료봉의 이론적 진동특성을 ANSYS Workbench 12.0을 이용하여 유한요소 해석(finite element method, FEM)을 수행하였으며, 5×5 지지격자의 진동시험(modal testing) 결과로 해석값을 검증하였다. 또한 연료봉이 장착된 지지격자 스트랩의 동적특성을 파악함으로써 연료봉이 지지격자 스트랩의 진동특성에 미치는 영향을 확인하였다. 마지막으로 5×5 핵연료 부분집합체를 유체유발 진동을 시험할 수 있는 시설인 INFINIT를 이용하여 상온에서 원자로 유속변화에 따른 지지격자 스트랩의 진동특성을 고찰하였다.

Fig. 1 Grid one cell and schematic contact diagram between rod and the grid cell

Fig. 2 Rod wears caused by grid-to-rod vibration

2. 지지격자 스트랩의 진동특성

2.1 지지격자 스트랩 및 연료봉 시편모델링

복잡한 형상의 지지격자 전체에 대해 유한요소 모델링 및 유한요소 해석(finite element analysis, FEA)을 수행하기 위해서는 고사양의 컴퓨터 및 장시간의 계산시간이 필요하다. Fig. 3과 4는 지지격자 스트랩(test fuel strap, TFS) 및 연료봉 시편의 간략화된 모델이다. Fig. 3(a)와 (b)에 각각 나타내었다. Fig. 3(a)에서 가로방향 길이를 a , 세로 방향 길이를 b , 두께(t)를 a 의 배수로 표현하였다. Fig. 3(b)에서와 같이 연료봉의 내경을 ID , 외경을 OD 로 정의하고 연료봉의 길이(l)를 OD 의 배수로 표현하였다. 연료봉 시편의 길이는 $15.8 OD$ 이다.

TFS와 연료봉의 경계조건 및 유한요소 모델을 Fig. 4(a)와 (b)에 각각 나타내었다. TFS의 4곳 모서리에서 다른 TFS와 연결되는 부분은 레이저 용접이 되는 부분으로 병진 운동 구속(remote displacement)의 강체(rigid) 모드가 적용되었으며, TFS와 다른 TFS가 교차하는 부분에서는 병진 운동 구속(remote displacement)의 변형(deform) 모드가 적용되었다. 연료봉 시편의 질량은 약 0.02 kg 미만으로 시편의 질량이 미소하기 때문에 가진기를 이용한 시험을 하는 경우, 정확한 유한요소 해석을 하기 위해서 가진봉까지 고려한 유한요소 해석을 수행하거나 가진봉 대신 가진 지점의 유효질량(effective mass)은 고려하여야 한다. 여기서는 연료봉 시편에 가진봉까지 모델링하였다. TFS와 연료봉 시편의 재료는 지르코늄 합금이며 TFS 및 연료봉은 육면체요소 분할법(hex dominant method)이 적용되었으며,

Fig. 3 Geometry of the TFS and the rod

메쉬의 크기는 0.3 mm이다. 이때의 요소 및 노드 개수를 Table 1에 각각 나타내었다.

2.2 지지격자 스트랩 및 연료봉 시편의 유한요소 해석(FEA)

(1) TFS 유한요소 해석결과

TFS의 모드 주파수 및 모드 형상을 Table 2 및 Fig. 5에 각각 나타내었다. 여기서 TFS의 1차 모드 주파수는 ω 로 정의되며, 2차 모드 주파수는 1차 모드 주파수로 평균화되어 2.26 ω 로 나타내었다. TFS의 1차 모드는 스프링이 있는 가운데 부분의 변위가 가장 크게 나타나며, 2차 모드는 가운데 부분이 S자 형태로 휘어진 형태로 나타난다.

(2) 가진봉이 고려된 연료봉 시편 모델 해석 가진봉을 포함한 연료봉 시편의 모드 주파수 및

Fig. 4 Boundary condition of the TFS & rod

Table 1 Numbers of FE model element and node

	# of elements	# of nodes
TFS	25822	107212
Rod	34880	174438

Fig. 5 Mode shape of TFS

모드 형상에 대한 해석결과를 Table 2 및 Fig. 6에 각각 나타내었다. 유한요소 해석결과, 연료봉 시편의 모드형상은 TFS와 유사하며, 1차 모드 주파수는 1.94 ω 에서 발생한다. 2차 모드 주파수는 3.79 ω 이다.

2.3 가진기를 이용한 지지격자 스트랩 및 연료봉 시편의 랜덤 가진 시험

(1) 5×5 지지격자의 TFS진동특성

5×5 지지격자를 이용하여 TFS의 접합부 강성을 실제 지지격자와 같은 조건 및 대칭성을 고려하였다. 5×5 지지격자는 Fig. 7과 같은 조건에서 랜덤 신호에 의해 가진이 되었다. 먼저 5×5 지지격자는 지면과의 평행을 유지하기 위해 강성이 약한 줄로 지지되었으며, 측정 면인 TFS의 한 지점에 질량이 0.1 g 미만인 PCB 가속도계(352C23)를 장착하였다. 5×5 지지격자가 가진기에 의해 가진이 되는 부분은 5×5 지지격자의 외각이므로 TFS의 한 측정 지점에 가속도계를 부착하여 운전 중 변형모드 분석(operational mode analysis, OMA)을 하였다. TFS는 Fig. 8과 같이 총 15개의 지점에서 각각 측정되었

Table 2 Mode frequencies

Result of		
Mode	FEM of TFS	Test of TFS
1st	ω	1.01 ω
2nd	2.26 ω	2.36 ω
Mode	FEM of rod	Test of rod
1st	1.94 ω	1.80 ω
2nd	3.79 ω	3.59 ω

* ω = First mode frequency about FE model of TFS

Fig. 6 Mode shape of rod considering stinger

으며, 1번선 집합은 [1,4,7,10,13], 2번선 집합은 [2,5,8,11,14], 3번선 집합은 [3,6,9,12,15] 지점으로 정의된다. 기준점에서 측정된 가속도계를 기준으로 15개 지점의 상대적 운동의 크기를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9는 가속도계를 기준으로 측정한 응답의 최대값을 기준으로 평준화하였다. TFS의 모드 주파수 시험결과는 FEA결과와 약 5% 이내로 일치하며, 4.00ω 이상의 주파수영역에서 기계적 진동의

Fig. 7 Random testing of the 5x5 grid

Fig. 8 Measurement point of TFS

Fig. 9 Result of the random testing without rod

Fig. 10 ODS of TFS

공진점이 존재하지 않는다. 1차 모드 및 2차 모드 주파수의 운전 중 변형 모드(operational deflection shape, ODS)를 Fig. 10에 나타내었다⁽⁴⁾.

(2) 연료봉 시편의 진동특성

연료봉 시편의 진동특성을 측정하기 위해 Fig. 11과 같은 조건에서 강제진동시험이 수행되었다. 연료봉 시편의 OMA조건을 구현하기 위해 가진봉 4번 지점 부분에 가속도계가 설치되었으며, 총 5개의 지점에서 LDV를 이용하여 진동을 측정하였다. 4번지점에서 부착된 가속도계에서 측정된 결과값을 기준으로 각각 지점에서 측정된 연료봉 시편의 진동은 Fig. 12와 같으며, 1차 및 2차 모드형상은 Fig. 13과 같다. 약 0.10ω 부근에서 연료봉 시편의 강제 모드가 나타났으며, 1.80ω 에서 1차 모드, 3.59ω 에서 2차 모드가 나타났다. 2차 모드는 가진봉에 의해 측정

Fig. 11 Random testing of the 5x5 grid

Fig. 12 Result of the random testing about the rod

Fig. 13 ODS of rod

지점 4번이 구속되어 Fig. 13(b)와 같은 모드 형상을 보인다. 가진봉이 고려된 연료봉 시편을 유한요소 해석한 결과와 약 8 %의 오차가 있다.

(3) Rod을 포함하는 5×5 지지격자 진동특성

5×5 지지격자의 여러 셀에 연료봉 시편을 지지하도록 경계조건을 구성한 뒤 Fig. 7과 같은 랜덤시험을 수행하였다. TFS의 스프링과 댐핑이 연료봉 시편과 접촉함으로써 인해 발생하는 TFS의 모드 주파수의 변화를 Fig. 14에 나타내었다. 5×5 지지격자를 구성하기 위해 사용된 TFS의 구조적인 특성은 용접된 연결부의 상태에 따라 모드 주파수에 차이가 발생하며, 연료봉 시편과 조립되어 있는 각각의 TFS의 진동이 측정하는 TFS면까지 전달되어 많은 첨두점(peak

Fig. 14 Result of the random testing about TFS with rods

point)이 발생한다. 이로 인해 Fig. 15와 같이 TFS의 1차 모드 주파수인 $1.01 \omega_2$ 는 연료봉 2.00ω 부터 2.80ω 까지로 확산된 것을 확인할 수 있다.

2.4 지지격자의 스트랩의 유체유발 진동 특성

(1) 유체유발 진동 시험시설(INFINIT)

TFS의 유체유발 진동시험을 하기 위한 시설인 INFINIT의 개략도를 Fig. 16과 같이 나타내었다. TFS의 y축 방향으로 유체가 흐르며, 유체의 온도는 히터와 냉각기에 의해 $25.0 \pm 1.0^\circ$ 로 제어된다. 펌프는

Fig. 15 ODS of TFS with rod

Fig. 16 Schematic diagram of INFINIT

Fig. 17 Test section of INFINIT

(a) Point 2

(b) Point 14

(c) Point 2 at coolant velocity of normal condition

Fig. 18 Fluid induced vibration of TFS

PID 알고리즘으로 제어되며 유체의 속도는 $\pm 1.0\%$ 이내의 오차로 조절된다. INFINIT의 시험 측정구간에는 Fig. 17과 같이 5×5 핵연료부분 집합체를 장입된 아크릴 하우징이 조립되며, LDV로 5×5 지지격자 스트랩의 진동이 측정된다^(5,6).

(2) 지지격자 스트랩의 유체유발 진동 특성

TFS의 2번, 14번 지점에서 측정된 유체유발 진동을 Fig. 18의 (a), (b), (c)에 각각 나타내었다. Fig. 18(a), (b)의 x축은 ω 로 평균화된 주파수, y축은 일반적인 발전소의 냉각수의 속도로 평균화된 유속, 그래프상의 점들은 유속 및 주파수의 변화에 따른 진동의 크기를 의미한다. Fig. 18(c)는 원자로의 정상 운전조건(normalized fluid velocity=1)에서 2번 지점의 진동을 측정한 것이며, 진동의 크기는 Fig. 17(a)의 최대값으로 평균화되었다. Fig. 17에서와 같이 $2.00\omega \sim 3.00\omega$ 사이에서는 유체에 의해 TFS의 모드 주파수가 가진이 된 것을 확인할 수 있으며, 4.50ω 이후부터 TFS의 모드 주파수가 미미하므로 4.50ω 이후에 진동은 유체의 와류박리(vortex shedding)에 의해 발생한 진동으로 정의할 수 있다. 와류에 의한 진동이 발생하는 시점은 유체를 혼합을 시키기 위한 TFS의 Vain의 각도(θ)와 밀접한 관계가 있을 것으로 예상되며, 와류방출로 가진이 되는 주파수영역에 TFS의 모드 주파수가 정확히 일치한다면 연료봉의 마모의 발생확률이 증가될 수 있다. 또한 원자로와 같은 유속 조건에서 TFS는 냉각수에 의해 Fig. 18(c)와 같은 진동형태를 보이며, 그 크기는 구조적 진동 및 유체유발 진동에 비해 매우 미미하다.

3. 결 론

이 논문에서는 핵연료 지지격자의 스트랩 진동특성을 유한요소 해석 및 시험결과를 이용해 분석한 결과를 논하였다. TFS 및 연료봉 시편의 유한요소 모델 해석하여 이론적 모델의 합리성을 증명하였다. 연료봉 시편이 없는 5×5 지지격자, 가진봉이 장착된 연료봉 시편, 연료봉이 장입되어 있는 5×5 지지격자에 관하여 강제진동 시험을 수행하였다. TFS는 5% 이내, 연료봉 시편은 8% 이내의 오차가 발생함을 알 수 있다. 또한 핵연료 부품의 유체유발 진

동시시험시설인 INFINIT시설을 이용하여 5×5 연료 부분집합체에 조립된 TFS의 유속에 따른 진동특성을 해석하였으며, 흐르는 상온 유체의 속도에 따라 구조적 진동특성 또는 와류박리 진동이 나타날 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Kato, M., Endo, R., Fujita, K. and Tabuchi, M., 1988, Field Vibration Test of PWR Nuclear Power Plant Reactor Coolant Loop, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 6, pp. 723~728.
- (2) Ryu, K. W., Kim, H. J., Park, C. Y. and Park, M. H., 2005, FIV Analysis of SG Tubes for Various Location, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 9, pp. 1009~1015.
- (3) Ryu, K. W., Park, C. Y. and Rhee, H. N., 2010, Effects of Support Structure Changes On Flow-induced Vibration Characteristics of Steam Generator Tubes, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 42, No. 1, pp. 97~108.
- (4) Batel, M., 2002, Operational Modal Analysis Another Way of Doing Modal Testing, Sound and Vibration, pp. 22~27.
- (5) Ha, D. G., Park, N. G., Suh, J. M., Jeon, K. L. and Lee, W. J., 2011, Optimal Experiment Environment for Flow-induced High Frequency Vibration Test Facility, Transaction of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, pp. 313~314.
- (6) Kim, K. H., Park, N. G., Suh, J. M. and Jeon, K. L., 2011, Investigation of Grid Strap Vibration Subjected to Axial Flow Condition, Transaction of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, pp. 241~242.