

축방향 유속에 노출된 5x5 지지격자 스트랩의 진동특성

The Strap Vibration Characteristics in 5x5 Grid Exposed to Axial Flow

김경홍† · 박남규* · 김경주* · 서정민*

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

Words : Flow Induced Vibration(유체유발진동), Grid Strap Vibration Characteristics(지지격자 진동 특성), Nuclear Fuel bundle(핵연료 부분집합체), Operational Modal Analysis(운전 중 변형모드 분석)

ABSTRACT

It is important to identify dynamic characteristics of nuclear fuel components. Since the fuel always exposed to turbulent flow, the dynamic contact between grids and rods is one of the fuel failure modes. The dynamic behavior of grids in nuclear fuels is quite complex, since two pairs of spring support are placed in the limited space. The strap in a cell has single spring and double dimples and this paper focuses on investigation of the grid strap(Test Fuel Strap, TFS) vibration in one cell. To identify the grid strap vibration, modal analysis of the strap is performed using Finite Element Method (FEM). Modal testing on a 5x5 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 5x5 grid with rods under real contact condition in the air. Finally, the strap vibration of a 5x5 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 x 방향 길이
b	: TFS의 y 방향 길이
β	: 4 계 미분방정식의 근
E	: 재료의 세로탄성계수
I	: 단면 2 차 모멘트
ID	: Rod의 내부직경
L	: y 방향 길이
l	: Rod의 y 방향 길이
m	: y 방향 선 밀도
OD	: Rod의 외부직경
t	: TFS의 z 방향 길이
ω	: Y 함수의 모드 진동수
ω_1	: TFS의 모드 주파수

ω_2	: TFS2의 모드 주파수
Y	: 4 계 미분방정식

1. 서 론

건전성 평가 측면에서 모든 구조물 또는 기계적 시스템에서 정적 특성 및 동적 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 특히 핵연료의 정적 및 동적 특성은 원자력 발전소의 운전시의 고려되는 사항이다⁽¹⁾. 핵연료는 우라늄 펠렛을 감싸고 있는 연료봉(Rod), 연료봉을 잡아주는 지지격자, 제어봉이 장입될 수 있는 안내관, 그리고 상단 및 하단 고정체로 구성이 된다. 이 중 연료봉과 직접 접촉하는 지지격자는 스프링과 덤플로 구성되며, Fig.1 과 같이 한 개의 스트랩은 2 개의 덤플과 1 개의 스프링으로 연료봉을 지지한다. 원자로 안에 장입된 연료들은 빠른 속도의 유체에 노출되면서 핵연료 구성품에 진동을 유발시킨다. 그 중 연료봉과 접촉하는 지지격자는 판의 두께가 매우 얇고 세로방향의 길이가 상대적으로 길어 유체에 의한 고주파진동이 발생한다.

† 교신저자: 정희원, 한전 원자력 연료㈜
E-mail : kyounghong@knfc.co.kr
Tel :042-868-1367, Fax :042-868-1149
* 한전 원자력 연료㈜

지지격자의 고주파 진동으로 인하여 Fig.2 와 같이 연료봉의 마모를 유발시키며, 심하면 연료봉의 파손까지 일으킬 수 있다.

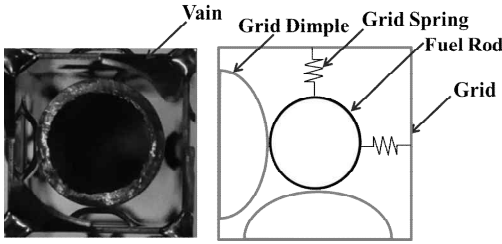


Fig.1 Grid one cell and Schematic contact diagram between rod and the grid cell

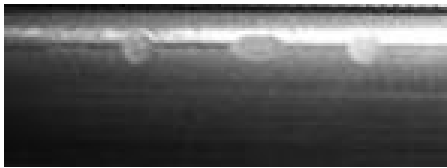


Fig.2 Rod wears cause by Grid Strap vibration

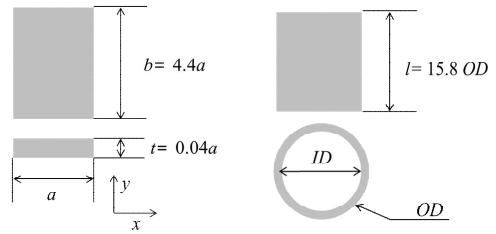
따라서 본 논문에서는 핵연료에 사용되는 지지격자의 여러가지 조건을 반영한 동적 특성을 비교 및 분석하였다. 먼저, 지지격자의 한 개의 스트랩 및 연료봉에 진동특성에 대한 이론적 해를 제시하고, ANSYS Workbench 12.0 을 이용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 5x5 지지격자의 모달 테스트 결과로 해석값을 검증하였다. 또한 연료봉이 장입된 지지격자의 동적특성을 파악함으로써 연료봉이 지지격자의 동적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 마지막으로 유체유발진동을 시험할 수 있는 시설인 INFINIT 에서 5x5 핵연료 부분 집합체의 지지격자 스트랩 진동을 고찰하였다.

2. 지지격자 스트랩의 진동특성

2.1 지지격자 스트랩 및 연료봉 1차 모델

수백만개의 자유도를 고려한 복잡한 형상의 지지격자 전체에 대해 유한요소모델링 및 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)을 수행하기 위해서는 고사양의 컴퓨터 및 장시간의 계산시간이 필요하며, 유체유발진동과 관련된 스트랩의 진동특성 결과를 구하지 못할 수 있다. 또한 연료봉에 발생하는 마모는 지지격자의 한 스트랩과 연료봉 사이에서 상대적 운동에 의해 발생한다. 따라서 본 논문에서는 지지격자 한 셀의 스트랩(Test Fuel Strap, TFS)

과 연료봉을 대상으로 이론적 모델을 수립하였다. 스프링 및 덤플이 없는 형태의 TFS 및 Rod 는 Fig.3 과 같이 표현된다. 지지격자는 2 차원배열로, x, y 값을 갖지만 x 방향 길이(a)가 y 방향길이(b)보다 배수이상으로 작으므로 y 방향 모드주파수에 비해 매우 높은 값을 갖는다. 또한 실제 지지격자 스트랩은 스트랩 간의 용접으로 x 방향의 움직임이 제한되므로 y 축을 길이 방향으로 하는 보(Beam)로 모사할 수 있다. Rod 는 x, z 방향이 대칭적인 원형형태로 TFS 와 같은 보의 형태로 모사할 수 있다. TFS 및 Rod 의 진동지배방정식은 식(1)과 같으며, 모드주파수 해는 식(2)와 같다.



(a) TFS basic model (b) Rod model

Fig.3 Geometry of the TFS and the rod

$$\frac{d^4 Y(x)}{dx^4} - \beta^4 Y(x) = 0 \text{-----(1)}$$

$$w = (\beta L)^2 \cdot \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \text{-----(2)}$$

식(2)를 이용하여 모드주파수를 구하면 Table 1 과 같다. TFS의 첫 번째 모드 주파수(ω_1) 기준으로 나머지 모드 주파수는 배수로 표현하였다. Rod 의 모드 주파수는 TFS의 모드 주파수보다 약 3배 정도 높은 영역에서 1차 모드가 발생한다.

2.2 지지격자 및 연료봉 유한요소 해석(FEA)

(1) 유한요소 해석결과

Fig.3의 모델 및 스프링 및 덤플이 없는 TFS 모델을 생성하여 ANSYS Workbench 12.0으로 유한요소해석을 수행하였다. 재질은 핵연료 부품의 주재료인 지르코늄 합금을 적용하였다. 해석결과를 Table1에 나타내었으며, 유한요소해석에 사용된 요소 및 노드의 수를 Table2와 같이 정리하였다. FEA결과는 4차 미분방정식 모델과 약 6.3%이내로 일치함을 알 수 있다.

(2) 스프링 및 딤플이 있는 TFS1, 2 모델 해석

스프링 및 딤플이 적용된 TFS1모델의 자유진동 해석과 더불어 경계조건이 적용된 모델(TFS2)에 대한 FEA를 수행하였다. TFS1과 TFS2의 해석에 이용된 모델은 Fig.4와 같으며, 가운데 연료봉을 지지하는 판 형태의 스프링 1개와 양 옆의 강성이 강한 딤플로 구성된다. TFS1과 TFS2의 모드 주파수 및 사용된 요소 수를 Table1과 Table2에 나타내었으며, TFS 및 TFS2의 모드 형상을 Fig.5에 나타내었다. TFS1은 스프링과 딤플 형상으로 인해 구조체의 강성이 감소하였으며 이로 인해 TFS보다 약 33%의 모드 주파수가 낮아진다. 지지격자에서 스트랩과 스트랩 사이에 용접으로 연결되는 경계조건을 Remote Displacement로 구현함으로써 TFS2는 모드 주파수가 약 24% 높아진다. 여기서 TFS2의 첫 번째 모드 주파수를 ω_2 로 정의한다.

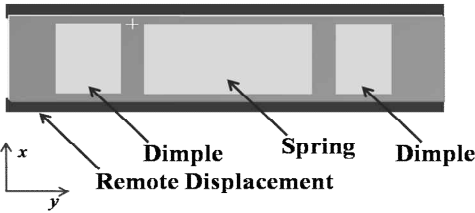


Fig.4 Boundary condition of the TFS

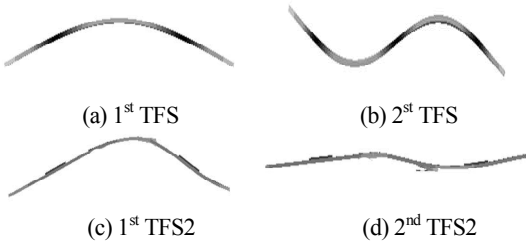


Fig.5 Mode shape of TFS

(3) 가진봉(Stinger)가 고려된 Rod1 모델 해석

실제 연료봉에 4.6% 길이의 Rod 질량은 약 0.02 kg미만이며 가진기를 이용한 시험을 하는 경우, 가진봉의 질량이 Rod질량에 1/4이상이므로 가진봉이 포함된 형태(Rod1)의 모델링 및 모드 해석이 필요하다. Rod와 Rod1의 모드 주파수 및 모드 형상에 대한 해석결과를 Table1 및 Fig.6에 각각 나타내었다. Rod1의 모드 주파수는 가진봉의 질량으로 인해 최대 41%의 감소한다.

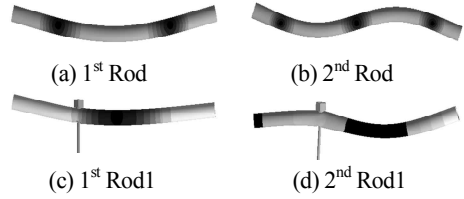


Fig.6 Mode shape of Rod

2.3 지지격자 스트랩 가진 시험

(1) 5x5 지지격자의 TFS2 진동특성

TFS의 접합부의 강성을 실제 지지격자와 같은 조건 및 대칭성을 고려한 5x5 지지격자를 이용하였다. 5x5 지지격자는 Fig.7과 같은 조건에서 랜덤 신호에 의해 가진되었다. 먼저 5x5 지지격자는 지면과의 평행을 유지하기 위해 강성이 약한 줄로 지지되었으며, 측정면인 TFS2의 한 지점에 질량이 0.1g 미만인 PCB 가속도계(352C23)를 장착하였다. 5x5 지지격자가 가진기에 의해 가진되는 부분은 5x5 지지격자의 외각이므로 TFS2의 한 측정 지점에 가속도를 설치하여 운전 중 변형모드 분석(Operational Mode Analysis, OMA)을 하였다. TFS2는 Fig.8과 같이 총 15개의 지점에서 각각 측정되었으며, 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 측정된 응답의 최대값을 기준으로 평준화하였다. TFS2의 모드 주파수 시험결과는 FEA결과와 약 5% 이내로 일치한다. 1차 모드 및 2차 모드 주파수의 동작 변위 형상(Operational Deflection Shape, ODS)을 Fig.10에 나타내었다⁽²⁾.

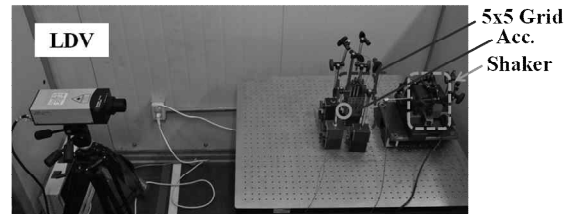


Fig.7 Random testing of the 5x5 Grid

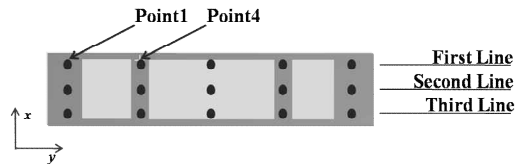


Fig.8 Measurement point of TFS2

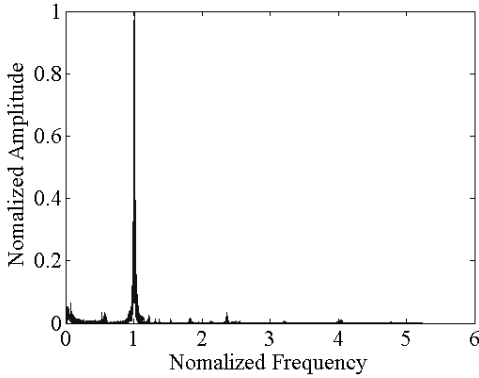


Fig.9 Result of the random testing without Rod

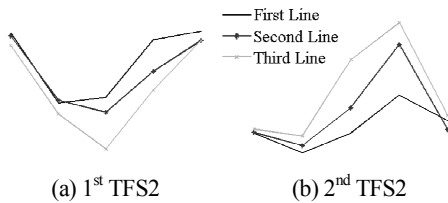


Fig.10 ODS of TFS2

(2) Rod1 진동특성

Rod1의 진동특성을 시험적으로 해석하기 위해 Fig.7과 동일한 조건에서 5x5 지지격자만 Rod 1로 대체되었다. Rod1의 OMA조건을 구현하기 위해 가진봉 끝부분에 가속도계가 설치되었으며, 총 5개의 지점에서 LDV를 이용하여 진동을 측정하였다. 가속도계를 평균으로 Rod1의 진동은 Fig.11과 같으며, 1차 및 2차 모드형상은 Fig.12와 같다. 약 $0.10 \omega_2$ 에서 부근에서 Rod1의 강제 모드가 나타났으며, $1.80 \omega_2$ 에서 1차 모드, $3.59 \omega_2$ 에서 2차 모드가 나타났다. Rod1의 결과는 FEA의 결과와 약 8%의 오차가 있다.

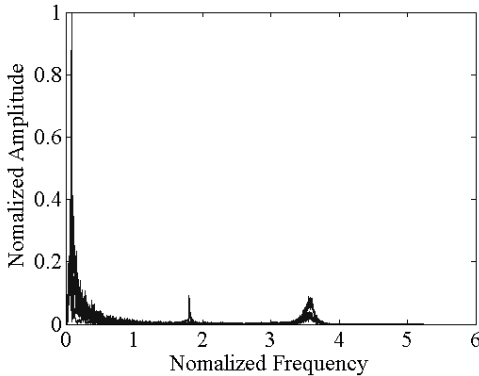


Fig.11 Result of the random testing about the Rod1

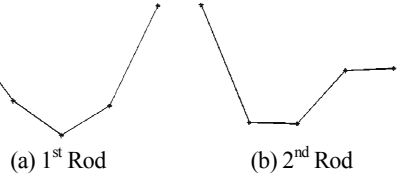


Fig.12 ODS of TFS2

(3) Rod을 포함하는 5x5 지지격자 진동특성

5x5지지격자에 25개의 Rod를 지지하는 조건에서 Fig.7과 같은 랜덤시험을 수행하였다. TFS2의 스프링과 덤플이 Rod와 접촉함으로써 인해 발생하는 모드 주파수의 변화를 Fig.13에 나타내었다. 5x5 지지격자를 구성하기 위해 사용된 TFS2의 구조적인 특성은 용접된 연결부의 상태에 따라 모드 주파수에 차이가 발생하며, Rod와 조립이 되어 각각의 TFS2진동특성이 측정하는 TFS2면까지 전달되어 많은 첨두점(Peak Point)이 발생한다. 이로 인해 Fig.14와 같이 TFS2의 1차 모드 주파수인 $1.01 \omega_2$ 는 연료봉 $2.00 \omega_2$ 부터 $2.80 \omega_2$ 까지로 확산된 것을 확인할 수 있다.

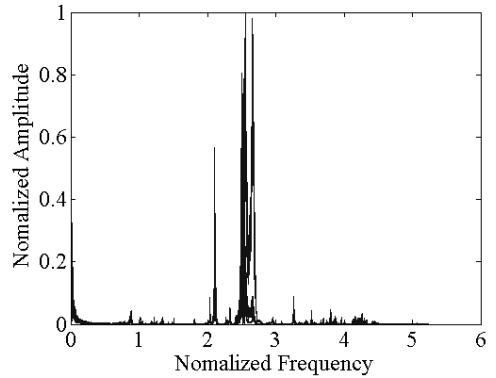


Fig.13 Result of the random testing about TFS2 with rods

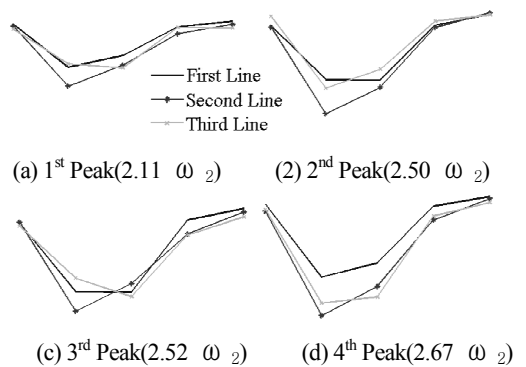


Fig.14 ODS of TFS2 with Rod

2.5 지지격자의 스트랩의 유체유발 진동 특성

(1) 유체유발 진동 시험시설(INFINIT)

TFS의 유체유발 진동시험을 하기 위한 시설인 INFINIT의 개략도를 Fig.15와 같이 나타내었다. TFS2의 y축 방향으로 유체가 흐르며, 시수가 사용되었다. 특히, 유체의 온도는 히터와 냉각기에 의해 $25.0 \pm 1.0^\circ$ 로 제어된다. 펌프는 PID 제어를 조정되며 유체의 속도는 $\pm 1.0\%$ 이내의 오차로 조절된다. INFINIT의 시험 측정구간에는 Fig.16과 같이 5x5 핵연료부분 집합체를 장입한 아크릴 하우징이 조립되며, LDV로 5x5 지지격자의 진동을 측정한다⁽³⁾.

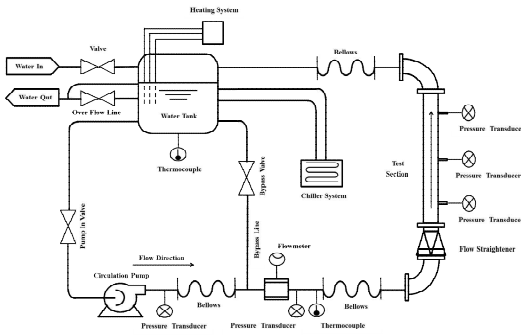


Fig.15 Schematic diagram of INFINIT

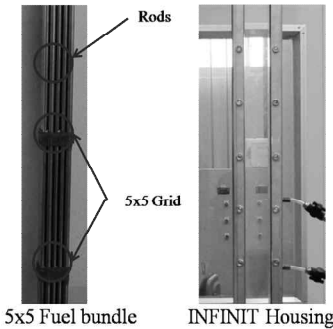
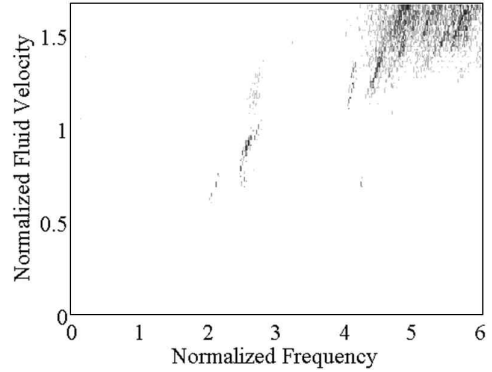


Fig.16 Test section of INFINIT

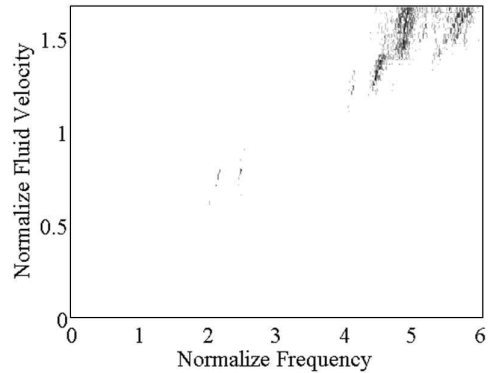
(2) 유체유발 진동 특성

TFS2의 2번, 14번 측정지점에서 측정한 유체유발 진동을 Fig.16의 (a),(b)에 각각 나타내었다. Fig.17의 x축은 평균화된 주파수, y축은 평균화된 유속, 그래프상의 점들은 유속 및 주파수의 변화에 따른 진동의 크기를 의미한다. 유속은 일반적인 발전소의 냉각수의 속도로 평균화하였다. $2.00 \omega_2 \sim 3.00 \omega_2$ 사이에서는 유체에 의해 TFS2의 모드 주파수가 가진이 된 것을 확인할 수 있으며, $4.50 \omega_2$ 이후부터 TFS2의 모드 주파수가 미미하므로 $4.50 \omega_2$

이후에 진동은 Fig.17과 같이 유체의 와류박리(vortex shedding)에 의해 발생한 진동으로 정의할 수 있다. 와류에 의한 진동이 발생하는 시점은 유체를 혼합을 시키기 위한 TFS2의 Vain의 각도(θ)와 밀접한 관계가 있을 것으로 예상되며, 와류방출로 가진되는 주파수영역에 TFS2의 모드 주파수가 정확히 일치한다면 연료봉의 마모의 발생확률이 증가될 수 있다.



(a) point 2



(b) point 14

Fig.16 Fluid induced vibration of TFS2

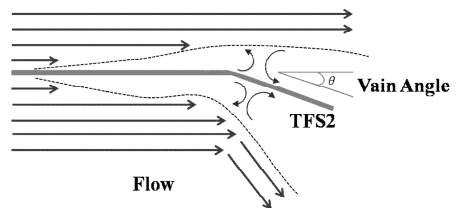


Fig.17 Vortex shedding of TFS2

3. 결 론

본 논문에서는 핵연료 지지격자의 스트랩 진동특성을 이론, 유한요소 해석 및 시험결과를 이용해 분석하였고, 그 과정을 정리하면 Fig.18과 같다. TFS 및 Rod의 지배방정식인 4차 미분방정식의 해를 이용하여 모드 주파수를 구하였으며, TFS 및 Rod의 유한요소모델을 생성하여 이론적 모델의 합리성을 증명하였다. 자유경계조건에서 스프링과 댐퍼가 존재하는 TFS1, 용접으로 접합되는 스트랩과 스트랩 사이의 경계조건을 적용한 TFS2, Rod의 가진력을 가하는 가진봉의 질량에 의해 변동되는 Rod1의 유한요소 해석하였으며, 제안된 모델이 적절함을 알 수 있다. Rod가 없는 5x5 지지격자, 가진봉이 장착된 Rod1, Rod가 장입되어 있는 5x5지지격자에 관하여 랜덤 시험을 수행하였다. TFS2는 5%이내, Rod1는 8%이내의 오차가 발생함을 알 수 있다.

끝으로 INFINIT 시험시설을 이용하여 5x5 연료 부분집합체에 조립된 TFS2의 유속에 따른 진동특성을 해석하였고, 흐르는 유체의 속도에 따라 구조적 진동특성 또는 와류박리 진동이 나타날 수 있음을 확인하였다.

결론적으로 본 논문에서는 TFS 및 Rod의 진동특성을 분석하였고, 지지격자 및 연료봉 사이에서 발생하는 진동특성의 해석 및 주된 마모현상의 원인을 분석하기 위해서는 TFS 및 Rod의 모드 주파수 해석 및 유체유발진동시험을 반드시 수행해야 한다.

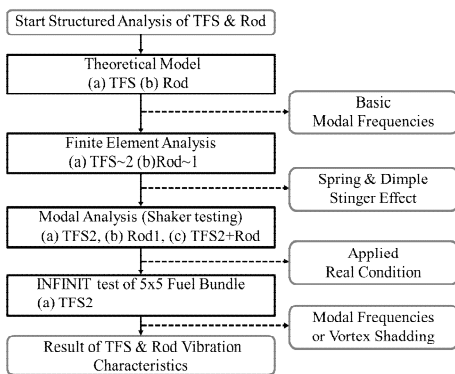


Fig.18 Research Sequence of TFS & Rod

참 고 문 헌

(1) K. W. Ryu, H. J Kim, C. Y. Park, M. H. Park, 2005, FIV Analysis of SG Tubes for Various Location,

Journal of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No.9, pp.1009~1015.

(2) Mehdi Batel, 2002, Operational Modal Analysis Another way of Doing Modal Testing, Sound and Vibration, pp. 22~27.

(3) K. H. Kim, N. G Park, J. M. Suh, K.L. Jeon, 2011, Investigation of Grid Strap Vibration Subjected to Axial Flow Condition, Transaction of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, pp.241~242.

Table 1 Modal frequencies

Theoretical models		
Mode	TFS	Rod
1 st	ω_1	3.09 ω_1
2 nd	2.75 ω_1	8.51 ω_1
FE models		
Mode	TFS	Rod
1 st	1.00 ω_1	3.01 ω_1
2 nd	2.78 ω_1	7.97 ω_1
Mode	TFS1	TFS2
1 st	0.67 ω_1	1.24 ω_1
2 nd	1.79 ω_1	2.80 ω_1
Mode	Rod	Rod1
1 st	3.01 ω_1	2.40 ω_1
2 nd	7.97 ω_1	4.70 ω_1
Result of Random test		
Mode	TFS2	Test of TFS2
1 st	ω_2	1.01 ω_2
2 nd	2.26 ω_2	2.36 ω_2
Mode	Rod1	Test of Rod1
1 st	1.94 ω_2	1.80 ω_2
2 nd	3.79 ω_2	3.59 ω_2

* ω_1 = First mode Frequency about Theoretical model of TFS

* ω_2 = First mode Frequency about FE model of TFS2

Table 2 Numbers of FE model element and Node

	# of Elements	# of Nodes
TFS	2675	19388
TFS1	25822	107212
TFS2	25822	107212
Rod	14696	95769
Rod1	34880	174438