

지지격자 스프링 강성 변화에 의한 연료봉 진동 특성

Vibration Characteristics of Fuel Rods due to Spring Stiffness Variations of Spacer Grids

류봉조† · 박남규* · 윤지환**

Bong-Jo Ryu, Nam-Gyu Park and Ji-Hwan Yoon

1. 서 론

원자력 발전소의 핵연료봉 지지격자는 연료봉의 간격을 일정하게 유지하고, 횡방향의 하중으로부터 연료봉의 동적 및 정적 안정성을 확보하는 구조물이다. 여러 가지의 환경조건에 의해 연료봉을 지지하는 지지격자는 초기에 장전되어 있을 때와는 달리, 수년간 사용하게 됨에 따라 지지격자 스프링의 힘이 약화되는 경향이 있다. 특히 하부 지지격자는 중간 지지격자와 달리 인코넬 소재로 제작되어 주기말 조건에서도 하부지지격자 스프링의 강성을 충분히 확보하여야 한다. 본 논문에서는 원자로 핵 연료봉을 지지하는 지지격자의 스프링의 하중변화에 따른 진동특성을 연구하였다.

2. 본 론

2.1 핵 연료봉 진동해석

(1) 해석방법

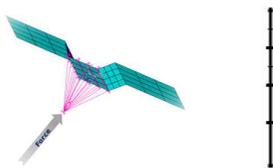


Fig. 1 Analysis approach and FEM model of Fuel rods.

첫째, 연료봉과 구성된 지지격자 모델의 딥플(dimple)부와 스프링부분에 해당되는 힘을 주어 변위

를 계산하여 강성을 도출하였다. 둘째, 연료봉 모델에 모델요소 대신 딥플과 스프링 위치에 스프링요소(combine14)를 사용하여 해석하였다. 셋째, Fig. 1과 같이, 연료봉에 각 부분 지지격자의 딥플과 스프링의 강성 값을 combine14 요소로 설정하였다. Table 1과 2는 각각 핵 연료봉과 지지격자의 물성치를 나타낸다.

Table 1 Material properties of a fuel rod.

| Elastic modulus E (Gpa) | Density(ρ) (kg/m^3) | Poisson's ratio (ν) | Diameter (mm) | Length (mm) |
|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------|-------------|
| 98.31 | 43,568 | 0.34 | 9.5 | 2,230 |

Table 2 Material properties for four parts of a fuel rod.

| | Elastic modulus(E_1) Gpa | Density (ρ_1) kg/m^3 | Poisson's ratio(ν_1) |
|--------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Top spacer grid | 200 | 8,193 | 0.34 |
| IFM grid | 98.3 | 6,430 | 0.34 |
| Middle spacer grid | 98.3 | 6,430 | 0.34 |
| Bottom spacer grid | 200 | 8,193 | 0.34 |

(2) 스프링 강성의 계산

지지격자의 스프링 강성을 도출하기 위해 다음과 같은 절차를 통하여 구하였다. 첫째, 딥플과 스프링의 절점(node)를 하나의 master 노드와 자유도를 연성시켰고, 둘째, master 절점에 1(N)의 힘을 적용시켰으며, 셋째, FEM 정적해석을 통해 힘에 적용되는 변형량을 도출하였다, 넷째, 지배적인 힘이 연료봉의 연직방향에 영향을 미치므로 탄성기초강성(elastic foundation stiffness)을 구하였다. Table 3~6은 각각 상부, IFM, 중간 및 하부지지격자에 있어, 딥플부와 스프링부에 대한 변형, 스프링강성, 접촉부의 등가강성 등을 나타낸다.

† 교신저자, 정회원, 한밭대학교 기계공학과

E-mail : bjryu701@hanbat.ac.kr

Tel : 042-821-1159, Fax : 042-821-1587

* 한전원자력연료(주)

** 한밭대학교 기계설계공학과 대학원

Table 3 Results for a top spacer grid of a fuel rod.

| Parts | Deformation (m) | Stiffness (N/m) | Contact length(m) | Elastic foundation stiffness (N/m) |
|--------|-----------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------|
| Spring | 5.45×10^{-6} | 1.83×10^5 | 1.30×10^{-3} | 1.41×10^8 |
| Dimple | 2.43×10^{-6} | 4.12×10^5 | 2.00×10^{-3} | 2.06×10^8 |

Table 4 Results for a IFM spacer grid of a fuel rod.

| Parts | Deformation (m) | Stiffness (N/m) | Contact length(m) | Elastic foundation stiffness (N/m) |
|--------|-----------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------|
| Dimple | 4.33×10^{-7} | 2.31×10^6 | 4.10×10^{-3} | 5.63×10^8 |

Table 5 Results for a middle spacer grid of a fuel rod.

| Parts | Deformation (m) | Stiffness (N/m) | Contact length(m) | Elastic foundation stiffness (N/m) |
|--------|-----------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------|
| Spring | 3.52×10^{-7} | 2.84×10^5 | 2.50×10^{-3} | 1.14×10^8 |
| Dimple | 2.52×10^{-7} | 3.52×10^5 | 4.60×10^{-3} | 8.62×10^8 |

Table 6 Results for a bottom spacer grid of a fuel rod.

| Parts | Deformation (m) | Stiffness (N/m) | Contact length(m) | Elastic foundation stiffness (N/m) |
|--------|-----------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------|
| Spring | 6.24×10^{-7} | 1.60×10^5 | 1.87×10^{-2} | 8.58×10^8 |
| Dimple | 1.86×10^{-7} | 5.39×10^5 | 2.50×10^{-3} | 2.16×10^8 |

(3)시뮬레이션 모델

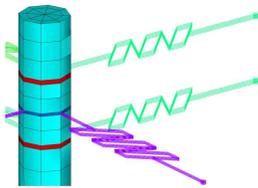


Fig. 2 A finite element model of a fuel rod with equivalent springs.

핵 연료봉을 모델링 하는데는 Beam44요소를 이용하여 모델링 하였으며, Solid 요소에 비해 신속하고도 정확한 해석결과를 도출할 수 있었고, 지지격자와 핵 연료봉 사이의 등가강성 효과를 combine14요소로 묘사하였다. 각 접촉면 당 5개의 스프링을 생성시켰으며, 실제 접촉길이와 동일하게 모델링하여 해석의 정확성을 확보하였다. Fig. 2는 Beam44요소와 등가스프링을 combine14로 묘사한 한 예를 보여준다.

2.2 조화해석

(1)Ansys 모델

Fig. 3은 다양한 값의 지지격자 스프링의 힘 변화를 핵 연료봉에 가하기 위한 ANSYS 모델을 보여준다. Fig. 3에서 힘은 Mid2와 IFM1 사이에 그림과 같은 방향(x 방향으로) 입력이 된다. 응답결과는 하부 지지격자에 각각 0.5lb, 1lb, 10lb의 힘이 작용할 때에 대한 강성(stiffness)을 적용시켰으며, 스패 1부터 6까지의 응답을 출력하였다.

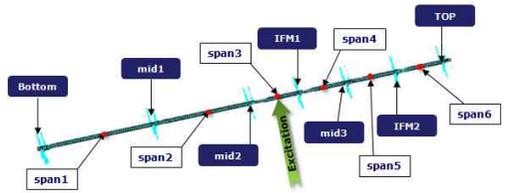


Fig. 3 A fuel rod model due to force excitation.

3. 결과해석 및 고찰

3.1 핵 연료봉 진동해석 결과

(1)모드해석 결과

Fig. 4는 각각 지지격자 스프링에 가해지는 힘이 1lb와 0.5lb의 힘의 경우, 핵 연료봉의 모드형상을 1차부터 6차까지 보여주는 그림이다. 각 모드들의 경우, 좌측이 1lb의 힘, 우측이 0.5lb 힘의 경우에 대한 모드를 보여준다. 모드형상은 비슷하지만 6차 모드에서 형상의 차이가 있음을 알 수 있다.

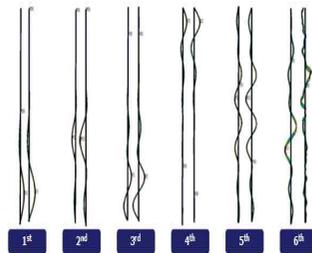


Fig. 4 Comparison mode shapes of a fuel rod due to 1lb force support with 0.5lb force support.

Table 7은 지지격자 스프링 힘이 0.5lb부터 10lb까지 다양한 힘의 경우에 대해 모드별 고유진동수를 나타낸 것이다.

Table 7 Natural frequencies for a fuel rod with various spring force variations of a spacer grid.

| Mode | Natural frequencies | | | | | | |
|------|---------------------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | 0.5lb | 0.75lb | 1.0lb | 1.25lb | 1.5lb | 5lb | 10lb |
| 1 | 43.06 | 43.60 | 44.05 | 44.46 | 44.83 | 48.54 | 51.48 |
| 2 | 75.14 | 75.26 | 75.35 | 75.41 | 75.48 | 76.14 | 77.08 |
| 3 | 142.3 | 145.0 | 146.5 | 147.5 | 148.3 | 154.1 | 158.9 |
| 4 | 173.7 | 173.8 | 173.8 | 173.8 | 173.8 | 173.8 | 173.8 |
| 5 | 199.1 | 199.5 | 199.7 | 199.8 | 199.9 | 200.3 | 200.7 |
| 6 | 206.5 | 206.5 | 206.5 | 206.5 | 206.5 | 206.5 | 206.5 |

3.2 조화해석 결과

Fig. 5부터 Fig. 10까지는 하부 지지격자에 각각 0.5lb, 1lb, 10lb의 힘이 작용할 때에 대한 강성을 적용시켜, 스펠 1부터 6까지의 응답을 나타낸 그림들이다. 하부지지격자에 10lb의 힘을 준 경우, 전 스펠에 있어, 저주파 대역에서의 peak 특성이 좋지 않은 응답을 보이고 있음을 알 수 있고, 전반적인 응답은 힘이 작아짐에 따라 좋지 않은 특성을 보여준다.

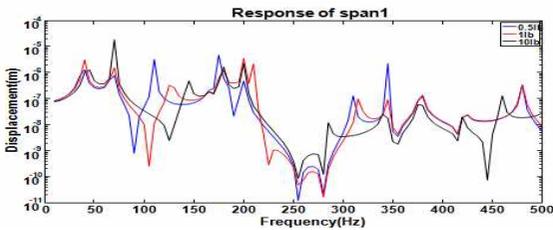


Fig. 5 Response of span 1 depending upon various spring forces to a bottom spacer grid.

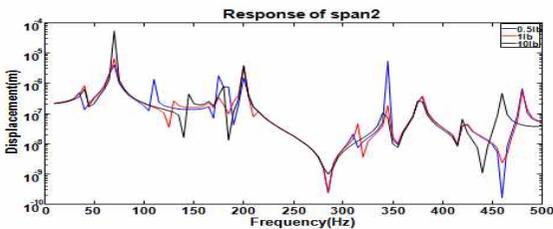


Fig. 6 Response of span 2 depending upon various spring forces to a bottom spacer grid.

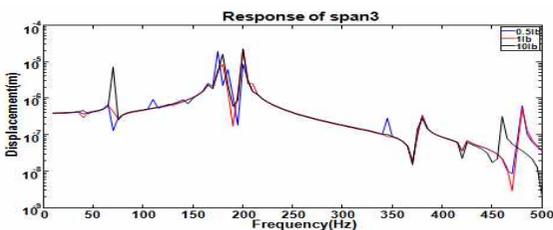


Fig. 7 Response of span 3 depending upon various spring forces to a bottom spacer grid.

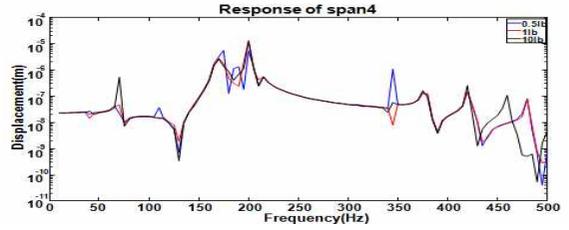


Fig. 8 Response of span 4 depending upon various spring forces to a bottom spacer grid.

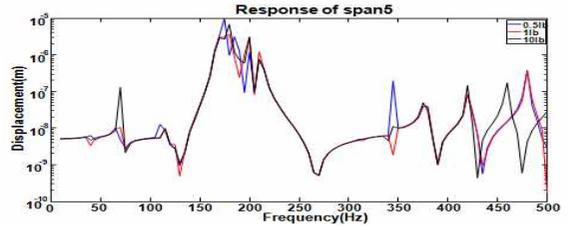


Fig. 9 Response of span 5 depending upon various spring forces to a bottom spacer grid.

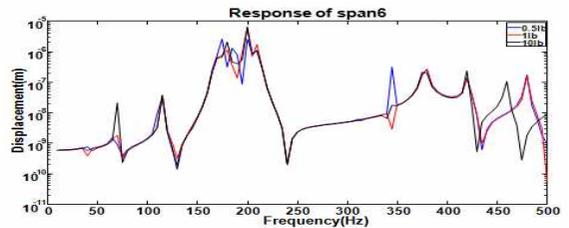


Fig. 10 Response of span 6 depending upon various spring forces to a bottom spacer grid.

4. 결 론

첫째, 원자로 핵 연료봉 지지격자의 스프링 강성 변화에 따른 동특성 해석결과 1lb 이상의 힘에 대해서는 모드형상의 변화가 거의 없었고, 1lb이하의 힘에서는 모드형상의 변화가 있음을 확인하였다.

둘째, Mid2 와 IFM 사이에 힘이 주어질 때, 하부 지지격자에 10lb의 힘이 가해진 경우, 전 스펠에 있어, 저주파 대역에서의 peak 특성이 좋지 않은 응답을 보였고, 전반적인 응답은 힘이 작아짐에 따라 좋지 않은 특성을 보였다.

후 기

본 논문은 2009-2011년 KNFC의 연구비지원에 의한 부분결과이며 관계자 분들께 감사드립니다.