

핵연료봉 내압 및 지지조건의 변화가 핵연료봉의 진동모드에 미치는 영향

강홍석, 윤경호, 송기남, 전태현, 정연호

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 사서함 150

요 약

유한요소법을 이용하여 스프링으로 연속 지지되고 축방향 하중이 작용하는 핵연료봉의 자유진동 해석을 수행하였다. 본 해석에는 지지격자 지지점에서 핵연료봉의 변위가 구속되지 않는 실제 경계조건을 반영하였다. 이러한 경계조건은 지지점 스프링 상수에 의하여 핵연료봉 해석모델의 탄성항이 약화되는 현상을 반영할 수 있어서 지지점이 구속된 기존의 모델보다 고유진동수를 작게 예측한다. 스프링 상수가 어떤 임계값 이하를 갖는 경우 고유진동수 뿐만 아니라 모드형상도 크게 변하기 때문에 지지점을 구속한 모델에 의한 해석은 실제 진동현상을 상당히 왜곡할 수 있다. 핵연료봉에 작용하는 축방향력이 인장력에서 압축력으로 감소함에 따라 고유진동수도 감소하지만 핵연료봉의 고유형상은 변하지 않았다. 지지격자 스프링 상수의 점진적인 감소와 핵연료봉 축방향 압축력의 감소를 동시에 적용하는 경우 고유진동수는 두 변수를 별도로 적용했을 때 얻은 최소값의 변화에 따르는 경향을 나타내었다.

1. 서 론

가압 경수로 원자로 내 핵연료에는 냉각수 유동에 의한 유체유발진동 현상이 발생한다. 이러한 현상은 일종의 열교환기인 핵연료봉 주위로 냉각재인 물이 가압된 상태에서 빠른 속도로 유동하기 때문에 발생한다. 냉각재 유동에 의해 유발된 진동은 핵연료봉과 지지격자 스프링 사이에 상대운동을 일으키고 이러한 상대운동에 의하여 핵연료봉 표면에 프래징 마모가 발생하며 심한 마모는 핵연료봉 피복관을 천공시켜서 방사능 물질을 유출시키는 사고로 발전할 수 있다.

원자로 내에는 0-50 Hz 사이의 광대역 진동원이 존재한다고 알려져 있다[1]. 핵연료봉은 이런 진동원중 고유진동수 근처의 진동에너지를 마치 대역필터처럼 추출하여 반응한다. 구조재의 진동은 일반적으로 최저차 모드(기본 고유모드; 일차모드)가 지배적이다. 핵연료봉의 진동 응답도 기본 고유모드가 지배적이라고 알려져 있다. 따라서 핵연료봉의 진동해석에서도 기본 고유진동수 및 고유모드의 예측이 대단히 중요하다.

핵연료봉은 대개 8 개에서 11 개의 지지격자 스프링으로 연속 지지된 원형보의 형태로 원자로 내에 놓여지게 된다. 지금까지 많은 연구자들, Quinn, Burgreen, Paidoussis, Wambsganss 그리고 Chen 등, 에 의한 연구는 유체유발진동 기구의 규명에 초점이 맞추어져 있어서, 간단한 지지기구인 양

끝단이 단순지지된 혹은 고정된 실린더에 관한 연구결과가 대부분이다. Quinn[2]은 1962년 의 연구에서 지지점간 거리가 동일한 경우 양단지지 연료봉의 고유진동수와 세(3)점에서 지지된 연료봉의 고유진동수가 다르며, 그 이유는 중간 지지격자에 기인 한다고 하였다. 이러한 Quinn의 연구에 의존하지 않더라도 추론할 수 있는 바와 같이 연료봉의 고유진동수와 고유모드는 지지격자 지지점 수와 지지점 스프링의 강성도(스프링 상수)에 따라 변할 수 있다. 지지점의 수가 많아지고, 지지점에서의 스프링 상수가 커지면 전체 핵연료봉을 포함하는 계의 강성도가 커져서 고유진동수가 증가한다. 실제 사용중인 지지격자도 모델에 따라 설계된 스프링 강성도가 다르다. Premount[3]의 핵연료봉 모델에서는 큰 강성도를 갖는 인코넬 스프링($K_s=220 \text{ kN/mm}$)을 사용하였다. 반면 KOFA 핵연료의 경우는 $33 \text{ kN/mm} \sim 70 \text{ kN/mm}$ 의 강성도를 갖는 스프링을 사용한다. 만일 지지격자 지지점에서 핵연료봉의 변위를 구속하면 앞선 예의 스프링의 종류에 관계없이 고유진동수와 모드형상이 동일하게 된다.

한편 핵연료봉은 불활성가스로 내부를 충전(380 psi)하게 되므로 원자로 장전 전에는 핵연료봉에 인장력이 작용하며, 원자로 장전 후에는 냉각재 압력(2250 psi)에 의하여 커다란 압축력을 받게 되는데 이러한 압축력은 연소도에 따라 핵연료봉 내압이 커지는 관계로 수명말로 가면서 감소하게 된다. 이러한 축방향 힘도 지배방정식의 탄성항을 증가(혹은 감소)시키기 때문에 핵연료봉의 고유진동수를 변화시키게 된다.

Premount[4]은 지지점에서 변위를 구속한 모델로 핵연료봉의 고유진동수와 고유모드를 구하고, 실제 핵연료봉의 유체유발진동으로 가능하다고 공감되는 최대진폭 0.2 mm로 고유모드를 정규화(normalizing)하여 스프링 지지점에서의 반력을 구한 후 이를 설계에 반영할 수 있는 최소 스프링력으로 제안 하였다. 최근에 임정식[4]은 Premount의 제안을 수용하여 FEM으로 핵연료봉의 고유진동수와 스프링 지지점에서의 최소 스프링력을 계산하였다. 이러한 양자의 계산에서는 지지격자 지지점의 변위를 구속한 모델에 의한 것으로 스프링 강성도가 큰 경우에는 타당하지만 스프링 강성도가 어느 한계 이하에서는 오차를 유발 할 수 있다. 지지점이 고정된 모델의 고유진동수는 실제보다 크며 진동에 의한 진폭은 실제 진폭보다 작다. 이런 이유는 실제 스프링 지지점이 고정되지 않고 변위가 발생하기 때문이다. 더욱이 동일한 지지점수에서도 스프링 강성도의 변화에 따라 고유모드 자체도 변할 수 있음도 간과해서는 안된다.

본 연구는 지지격자 종류에 따라 다른 스프링 강성도와 연소도에 따라 변하는 축방향 하중 등이 핵연료봉의 고유진동수와 고유모드에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이런 평가를 위하여 FEM 프로그램을 개발하였고 Premount의 6점 지지 핵연료봉 모델[4]을 개발된 프로그램으로 계산하여 Premount 및 임정식의 결과와 비교하였다.

2. 수식의 전개

2.1 가정

- 1) 핵연료봉은 길이 대 반경비가 대단히 크기($l/d \approx 400$) 때문에 전단항을 무시한 Euler-Bernoulli(E-B)보로 간주한다.
- 2) 지지된 유체내에서 핵연료봉이 횡방향으로 움직인다고 가정하고 유체에 의한 영향은 단지 핵연료봉에 의하여 배제된 체적만큼의 냉각수 무게가 핵연료봉에 더해진다고 가정한다.
- 3) 핵연료봉의 진동모드는 제 1모드가 지배적이라고 가정한다.
- 4) 점성 댐핑은 경수로 냉각수 유속($< 6 \text{ m}$)에서 0.01 정도[5]로 작기 때문에 무시하고, 핵료

봉의 댐핑도 무시한다.

2.2 유한요소 모델의 정식화

핵연료봉을 축방향 하중을 받는 보로 가정하면 그림 1 (a)와 같은 요소모델로 표시할 수 있으며, 이를 E-B 보로 유한요소화 하면 각 질점당 횡방향 변위와 회전 변위(변위각), 2개의 자유도를 갖는 그림 1 (b)와 같이 된다. 그림에서 'U'는 변위를 표시하며, 'Q'는 그 변위에 에너지 공액(Conjugate)인 힘을 나타낸다.

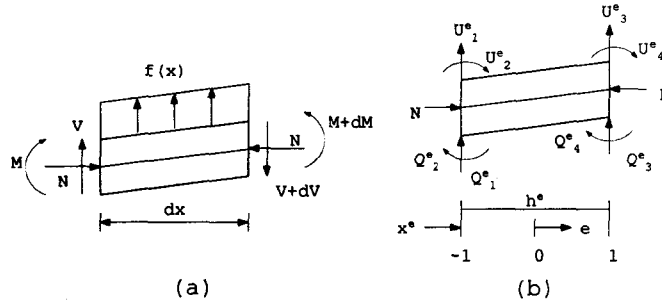


그림 1 핵연료봉의 유한요소 모델

E-B 보의 가정에 의하여 평형방정식으로부터 운동방정식을 유도하면 다음의 식 (1)과 같이 된다.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} [EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}] + N \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (\rho_B + \rho_c) A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - f = 0 \quad (1)$$

여기서 ρ_B 는 보의 밀도, 그리고 ρ_c 는 냉각재의 밀도를 나타낸다.

힘과 변위를 조화함수로 가정하고 시간과 공간함수의 곱으로 이루어져 변수 분리가 가능하다고 가정하면, $w(x, t) = w(x) e^{-i\omega t}$, 그리고 $f(x, t) = F(x) e^{-i\omega t}$ 라고 쓸 수 있다. 이를 식 (1)에 대입하고 정리하면 다음의 식 (2)를 얻는다.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} [EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}] + N \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \omega^2 (\rho_B + \rho_c) A w - F = 0 \quad (2)$$

식 (2)를 Weak Form으로 나타내고 부분적분하면 다음과 같은 간단한 형태의 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{j=1}^4 [K_j^e + M_j^e] u_j^e - F_j^e = 0 \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} K_j^e &= \int_{-1}^1 [EI \cdot \frac{d^2 \phi_i^e}{dx^2} \cdot \frac{d^2 \phi_j^e}{dx^2} - N \cdot \frac{d\phi_i^e}{dx} \cdot \frac{d\phi_j^e}{dx}] dx \\ M_i^e &= -\omega^2 \int_{-1}^1 \rho A \phi_i^e \phi_j^e dx \\ F_i^e &= \int_{-1}^1 \phi_i^e F dx + Q_i^e \end{aligned} \quad (4-6)$$

또한 ϕ 는 형상함수로서 natural 좌표로 다음과 같이 표현된다

$$\begin{aligned} \phi_1^e &= \frac{1}{4}(2-3\varepsilon+\varepsilon^3), & \phi_2^e &= -\frac{h}{8}(1-\varepsilon)(1-\varepsilon^2) \\ \phi_3^e &= \frac{1}{4}(2+3\varepsilon-\varepsilon^3), & \phi_4^e &= \frac{h}{8}(1+\varepsilon)(1-\varepsilon^2) \end{aligned}$$

고유치 문제는 식 (3)에서 하중항이 영인 경우로서 ω 가 고유진동수가 되고 이에 대한 U 가 모드

형이 된다. 이때 하중항에 있는 Q^* 는 해당 요소에서 경계조건이 있는 경우 강성항 K^* 에 더해지게 된다. 즉 스프링 지지점이 점점인 경우 스프링상수 만큼 계의 강성을 가감시키게 되고 따라서 고유치(고유진동수)를 변하게 한다. 결국 스프링 상수가 작아지면 계의 강성항이 작아져서 고유치를 작게 한다. 또한 식 (4)에서 봉내압 N 는 압축일때 강성항을 감소시키고 인장 일 때 강성항을 증가시키게 되므로 인장일 때 고유진동수를 증가시키고, 압축일때 고유진동수를 감소 시킨다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 계산모델의 검증

앞에서 유도된 식에 의해 개발된 프로그램 (RODVIB1)으로 그림 1 과 같은 Premount[4]의 핵연료봉 모델의 고유진동수를 계산하였다. 그림 1의 모델에서 스프링의 횡변위상수는 $k_t = 220 \text{ kN/mm}$, 회전변위상수는 $k_\theta = 200 \text{ Nm/rad}$ 이다.

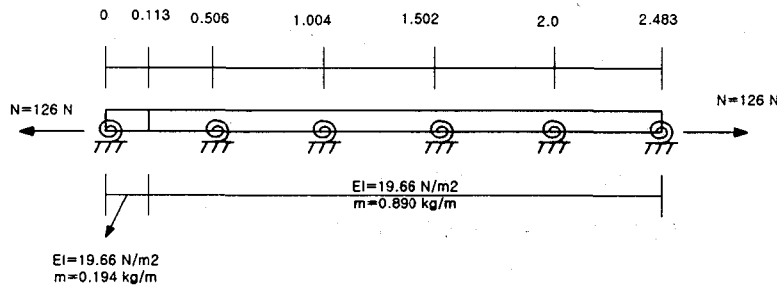


그림 2 Premount의 핵연료봉 모델

계산 결과는 다음의 표 1 과 같이 저차 모드에서는 임정식 모델 및 ANSYS 결과의 중간 값을 나타 내었고, 고차모드로 갈수록 그 차가 커지는 것을 확인하였다. 앞서 예상한 바와 같이 지지점을 구속한 모델은 계의 강성항을 크게하여 고유진동수가 큰 경향을 나타내었다.

표 1 고유진동수 계산 결과 비교 (Unit = Hz, $K_t = 220000 \text{ N/m}$, $K_\theta = 200 \text{ Nm/rad}$)

MODE	공기중		수중		
	PREMOUNT [3]	RODVIB1	임정식 [4]	ANSYS [4]	RODVIB1
1	49.15	48.9	43.0	41.3	42.8
2	53.66	52.2	46.6	44.9	45.7
3	61.50	57.4	52.6	50.0	50.3
4	71.75	63.2	59.9	58.3	55.3
5	79.81	67.6	66.2	64.7	59.2

3.2 봉내압 및 지지격자 스프링 상수 k_t 변화가 진동 모드에 미치는 영향

Premount 은 핵연료봉 모델에서 강성도가 상당히 큰 ($K_t=220 \text{ kN/m}$) 인코넬 스프링을 사용하였다. 이 값은 같은 인코넬 스프링을 사용한 KOFA 스프링의 $33 \sim 70 \text{ kN/m}$ 보다 3~7 배 큰 값이다. 이런 이유에서 Premount의 스프링 상수에서부터 최소 KOFA 스프링 상수 까지의 값을 사용하여 지지격자 고유진동수 및 고유모드의 변화를 살펴보고, 원자로 내 냉각수 압력과 연소도에 따라 변하는 핵연료봉 내부 압력의 차에 의해 발생하는 핵연료봉 내압의 변화가 핵연료봉의 고유진동수와 고유모드에 미치는 영향을 살펴보고자 다음의 표와 같은 변수를 독립적으로 Premount의 핵연료봉 모델에 적용하였다.

표 2. 지지격자 스프링 상수 및 핵연료봉 축하중

변 수	조건 1	조건 2	조건 3	조건 4	조건 5
스프링 상수 (N/m)	220000	110000	70000	50000	33000
축 하중 (N)	+126	-600	-400	-200	0

스프링 상수의 감소에 따른 핵연료봉의 고유진동수는 변화는 그림 3 과 같이 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 일차 고유진동수는 스프링 상수가 감소함에 따라 점차 큰 폭으로 감소하였으며, 이러한 경향은 고차로 가면서 반전되어 5 차 모드에서는 스프링 상수가 감소함에 따라 고유진동수의 감소폭이 작아졌다. 모드형상의 변화는 그림 4 와 같았다. 모드형상은 스프링 상수 50 kN/mm 까지 지지격자 지지점이 고정점과 같이 작용하여 모드형상의 변화가 거의 없으나 그 이하로 스프링 상수가 감소하면 점차 중간 지지격자의 영향이 상실되어 중간 지지격자에서도 큰 진폭으로 진동하게 되는 양상을 나타내었다.

핵연료봉 내압의 변화에 의해 발생하는 축방향력이 고유진동수에 미치는 영향은 그림 5 와 같았다. 축방향력이 감소(인장력에서 압축력으로)는 저차 고유진동수를 상대적으로 크게 감소시키는 것으로 나타나서 일차고유진동수는 41.3 Hz 에서 31.7 Hz 까지 감소하였다. 그러나 이러한 축방향력의 변화는 모드형상을 변화시키지 못하였다.

4. 결론 및 토의

핵연료봉 내압 및 지지조건이 변화가 핵연료봉의 진동 모드에 미치는 영향을 연구하고자 스프링으로 연속 지지되는 E-B 보의 자유진동을 해석하기 위하여 Fortran 프로그램을 개발하였다. 실제 핵연료봉의 진동은 지지격자 지지점에서 횡방향 변위가 구속되지 않는다. 해석의 편의를 위하여 각 지지점에서 핵연료봉을 구속하게 되면 실제와 크게 다른 진동현상을 얻게 된다. 그림 4 와 같이 스프링 상수가 어떤 임계값이하에서는 모드형상을 변하게 하며, 그림 3 과 같이 스프링 상수가 변함에 따라 고유진동수도 변한다. 만일 스프링 지지점의 영향을 무시하면 스프링 지지점의 변위를 무시하게 되고 이에 따라 핵연료봉의 고유진동수와 모드형상이 실제와 달리 외곡될 수 있음에 주의하여야 한다.

핵연료봉 내압의 변화는 고유진동수, 특히 일차고유진동수를 상당히 변화시키지만 모드형상의 변화에는 기여하지 않음을 알게 되었다. 핵연료봉의 유체유발진동은 일차모드가 지배적이기 때문에 일차고유모드의 정확한 예측은 유체유발진동 기구를 연구하는데 가장 기초적인 작업이다. 이런 이유로 앞선 두 변수를 동시에 적용하면 노내연소에 따른 핵연료봉의 진동모드의 변화 추이를 예측할 수 있다. 지지격자 스프링 상수는 노내 연소도에 따라 고온 및 조사 이완 등의 영향으로 감소하게 되므로 핵연료봉 고유진동수가 감소하리라고 예측할 수 있고 핵연료봉 봉내압은 원자로 장전 전 인장력에서 장전직후 냉각수 압력에 의하여 최대 압축력을 받게 되고 그후 연소도가 증가함에 따라 서서히 압축력이 감소하게 되는 형태가 될 것이다. 이런 이유로 앞의 표 2 에 있는 봉내압 및 스프링 상수변화를 원자로 내 연소에 따른 연료봉 경계조건의 변화 추이로 가정할 수 있다. 이렇게 두 가지 조건이 연계되는 경우 일차 고유진동수의 변화를 보면 그림 6 과 같다. 고유진동수는 원자로 장전 전 최대값을 갖고 장전직후 최소값을 갖다가 서서히 증가하는 양상을 띄게 되리라고 예측할 수 있다. 흥미 있는 사실은 일차고유진동수는 두 변수를 별도로 적용했을 때 얻은 최소값 보다 작은 범위에서 변한다는 사실이다.

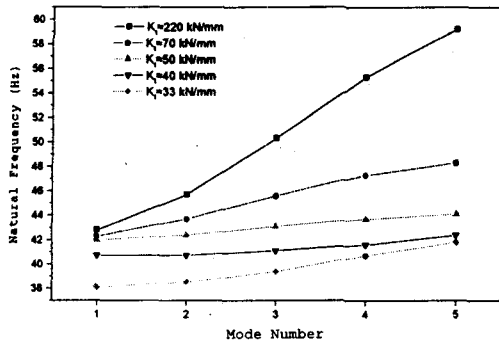


그림 3 스프링 상수 변화에 따른 핵연료봉 고유 진동수 변화 (축력 = 126N)

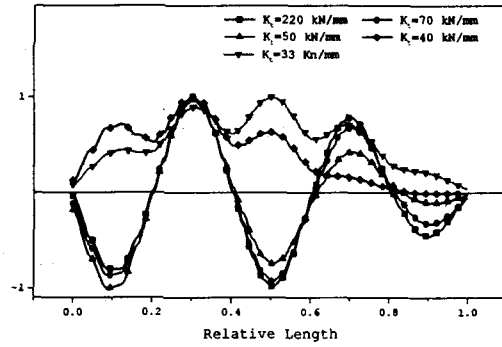


그림 4 스프링 상수 변화에 따른 고유형상의 변화 (축력 = 126 N)

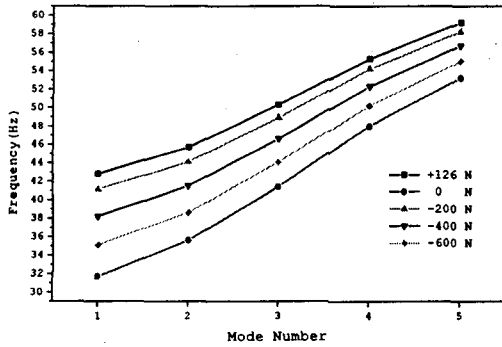


그림 5 축력의 변화에 따른 핵연료봉의 고유 진동수 변화 ($K_s=220$ kN/mm)

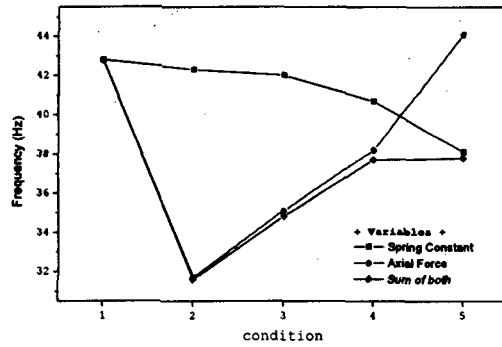


그림 6 스프링 상수와 축력의 동시 변화에 따른 고유진동수 변화

참고문헌

- [1] Stoller Report, "A study of grid-to rod fretting wear in PWR fuel assemblies", The stoller Corporation, April 1995.
- [2] E. P. Quinn. "Vibration of fuel rods in parallel flow", GEAP-4059, July 1962
- [3] A. Premount, "On the vibrational behavior of pressurized water reactor fuel rods", Nuclear Technology, Vol. 58, SEP. 1982.
- [4] J. S. Yim, "Analysis on the supporting integrity of the PWR fuel rods", 한국소음진동학회 추계학술대회 논문집, pp 177 to 183, 1997.
- [5] M. W. Wambsganss, "Flow-induced vibration of nuclear reactor fuel, Part I: modeling", Shock and Vibration Digest, Vol. 11, 1979.