

## SMART 핵연료봉의 지지건전성 평가

### Evaluation of Integrity for SMART Fuel Rods

임정식, 지성균, 장문희

한국원자력연구소

#### 요약

해수담수와 및 중 소형로에 적합한 SMART 핵연료집합체는 기존의 경수로용 17x17 국산핵연료의 제원을 사용하고 단지 열출력의 감소에 따라 연료봉의 길이가 줄어들어 지지격자는 기존의 8개에서 5개를 사용하는 특징을 가지고 있다. 이렇게 길이가 줄어든 SMART 핵연료봉의 지지격자 내 지지스프링에 의한 지지건전성을 고유진동과 관련하여 평가하였다. 지지격자의 위치, 지지격자 스프링의 스프링 상수, 냉각수의 온도, 연료봉 내압, 연료봉의 지지격자에서의 위치를 변수로 하여 각 각에 대한 고유진동수 및 모드형상, 이로부터 얻은 지지격자 위치에서의 스프링 반력을 얻고, 이들의 값이 연료봉의 건전성에 주는 스프링력의 변화를 예측하여 노내 운전 중 연료봉의 지지건전성을 평가하였다.

#### Abstract

As for the SMART fuel, the KOFA(Korean Fuel Assembly) 17x17 fuel was selected. Due to the reduced thermal power, its length is shorter than the KOFA, henceforth the fuel has 5 spacer grids instead of 8 grids as in the KOFA. Fuel rods integrity in relation with the vibrational characteristics was evaluated concerning the reaction forces of the SG spring that could be produced by the displacement of the normalized modes throughout its life time. Location of the SG, spring constants, coolant temperature, internal pressure of the fuel rod, the position of a rod in the SG were selected as main parameters that affect the behavior of the spring and fuel rod. The vibrational characteristics of a rod were calculated and from the maximum possible displacement of a rod in the core, the reaction force of each spring support was obtained and compared with the available spring force at that spring location.

#### 1. 서론

상용의 경수로 핵연료는 노심장전 2년 내지 3년 이상의 노내연소 기간을 가지며 이러한 장기간의 연소기간중 연료봉의 건전성 확보는 필수적인 핵연료 설계관심사이다. 핵연료의 건전성에 주는 영향 인자는 핵적, 기계적, 열수력적 및 재료적 인자가 상호 연관되어 복잡한 양상을 보이며 최종적인 건전성은 기계적 건전성의 형태로 보장되어야 하므로 핵연료의 건전성 평가에 있어서 연료봉의 기계적 건전성 평가는 그만큼 중요한 역할을 하게된다.

연료봉은 핵연료 집합체에서 지지격자 스프링에 의해 수직방향 위치가 고정되고 이는 연소

중의 연료봉의 열팽창, 조사에 의한 축방향 성장 및 위치 이동 등을 허용할 수 있도록 하며, 지지 스프링의 지지력에 의한 연료봉의 고정여부는 연료봉 진동에 기인한 연료봉의 건전성에 주는 결정적 요인이라 할 수 있다. 이러한 지지격자의 지지력에 대한 설계기준은 핵연료 설계/제조 회사별로 약간의 차이를 보이며, 수명 말에 연료봉의 프레팅을 방지할 최소의 지지격자 스프링력을 요구하거나 지지 스프링과 연료봉의 최소 간격을 지정하는 방법을 사용하여 연소 수명 말의 최소 지지조건을 확보하려는 노력이 있었다. 그러나 지지격자 스프링 및 연료봉의 노내 조사 거동은 연소도가 증가할수록 중성자 조사에 따라 비선형 거동을 하며 특히 스프링의 이완 및 소성변형의 영향으로 인해 연료봉의 지지거동을 예측하는 것은 어려움이 따르고 있다.

해수담수와 및 중 소형로에 적합한 SMART 핵연료집합체[1,2]는 기존의 경수로용 17x17 국산핵연료의 제원을 사용하고 단지 열출력의 감소에 따라 연료봉의 길이를 줄이게 되어 지지격자는 기존의 8개에서 5개를 사용하여 그림 1과 같이 그 길이가 줄어든 특징을 가지고 있다[3]. 맨 위 및 맨 아래 지지격자는 중성자 조사기인 스프링력 이완을 최소화 하기 위하여 Inconel 지지격자를 사용하고中间的 3개 지지격자는 중성자 경제성에 유리한 지르칼로이-4 지지격자를 이용하도록 예비설계 되었다. 연료봉이 지지격자에 삽입되어 축방향 및 횡방향의 위치를 유지하며 연소기간동안 건전성을 유지하여 보증연소도에 이르기까지 연소하도록 하는 것은 설계자의 관심사이다. 여기서는 이렇게 길이가 줄어든 SMART 핵연료봉의 지지격자내 지지스프링에 의한 지지건전성을 연료봉의 고유진동과 관련하여 평가하고자 한다. 이는 먼저 연료봉을 등가의 보 요소(beam element)로 형상화한 후 고유진동모드를 구하여 이 모드형상과 노내에서 실제적인 연료봉의 변위한계로부터 스프링 지지반력을 구하고 이 지지반력이 수명기간 동안의 스프링력 이상이 되면 연료봉은 스프링에 의해 지지된다고 가정하고 이 결과를 평가하는 것으로서 Premount[4]등에 의해 제안되었고 임정식[5], 강홍성[6]등에 의해 적용되었다.

이러한 계산결과에는 지지격자의 위치, 지지격자 스프링의 스프링 상수, 냉각수의 온도, 연료봉 내압, 연료봉의 지지격자에서의 cell 위치를 변수로 하며, 각 각에 대한 고유진동수 및 모드형상, 이로부터 얻은 지지격자 위치에서의 스프링 반력을 얻고, 이들의 값이 연료봉의 건전성에 주는 스프링력의 변화를 예측하여 노내 운전 중 연료봉의 지지건전성을 평가하는 것으로 되어 있다. 이 평가에는 온도 및 압력에 따른 물속에서의 유체부가 질량의 영향, 연료봉을 균등한 질량분포로 가정한 경우와 플레넘을 고려한 경우, 연소도에 따른 스프링 지지반력의 영향 및 고유진동수 변화 등을 포함하였다.

계산은 BEVIRA[7]를 이용하여 계산한 후 ANSYS[8]와의 계산결과를 비교하여 BEVIRA 계산의 적합성을 검토한 후 해석에는 이 BEVIRA를 이용하여 계산하였다.

## 2. 해석 모델

### 가. 연료봉의 유한요소 정식화

연료봉을 하나의 일차원 보로 가정하면 각 절점에는 수직변위 및 회전변위를 허용하는 2 자유도를 갖는 그림 1과 같은 요소로 가정할 수 있다[9]. 이때 해석하고자 하는 미분방정식은 전단변형의 영향을 무시하여 유도된 Euler-Bernoulli 보에 대한 다음의 방정식이다[10].

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}) - P \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + f = 0 \quad (1)$$

여기서 P는 연료봉과 같이 내부에 충전기체로 채워지고 연소중 핵분열 기체 방출에 의해 내압이 인가되는 압력으로서 연료봉 진동을 해석하기 위해 고려해 주는 축방향 인장력이다. 이때의 경계조건은 4계 미분방정식에 대하여 4개가 필요하며 이들은 다음과 같다.

$$w \Big|_x \quad (2.a)$$

$$\frac{\partial w(x)}{\partial x} \Big|_x \quad (2.b)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}) \Big|_x \quad (2.c)$$

$$EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \Big|_x \quad (2.d)$$

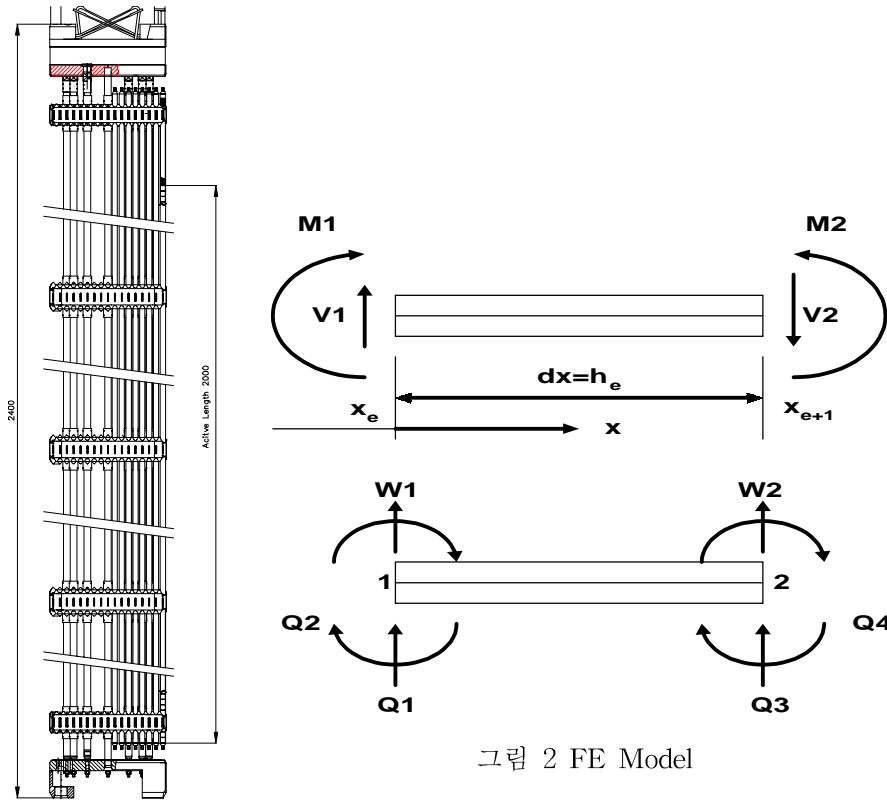


그림 1. 집합체

그림 2 FE Model

식 (1)의 Weak formulation을 취하여 정리하면 다음의 식 (3)이 된다.

$$0 = \left[ \int_{x_e}^{x_{e+1}} \left\{ EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \rho A \omega^2 v \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + P \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + vf \right\} dx \right] + \bar{Q} \quad (3)$$

여기서

$$\bar{Q} = -Q_3 v(x_{e+1}) - Q_1 v(x_e) + Q_4 \frac{dv}{dx}(x_e)$$

$$+ Q_2 \frac{dw}{dx}(x_e) - P\theta_2 v(x_{e+1}) - P\theta_1 v(x_e) \quad (4)$$

이고

$$Q_1^e = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right]_{x_e} \quad (5.a)$$

$$Q_2^e = \left[ EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right]_{x_e} \quad (5.b)$$

$$Q_3^e = - \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right]_{x_{e+1}} \quad (5.c)$$

$$Q_4^e = \left[ EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right]_{x_{e+1}} \quad (5.d)$$

이며

$$\theta_1 = \frac{\partial w(x_e)}{\partial x}, \quad (6.a)$$

$$\theta_2 = \frac{\partial w(x_{e+1})}{\partial x} \quad (6.b)$$

이다. 또 일차변수  $w$ 와 2차 변수  $\theta$ 의 두 변수를 사용하여 보간 함수는 Hermite 보간 함수(Interpolation function)를 사용한다. 각 절점에 두 개의 DOF가 있으므로 한 요소 내에는 4개의 미지수가 존재하고 이에 따라 변위  $w$ 를 다음과 같은 다항식으로 가정한다.

$$w(x) = C_1 + C_2 x + C_3 x^2 + C_4 x^3 \quad (7)$$

이를 이용하여 다음의 행렬식을 얻는다.

$$\begin{pmatrix} w_1 \\ \theta_1 \\ w_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_e & x_e^2 & x_e^3 \\ 0 & -1 & -2x_e & -3x_e^2 \\ 1 & x_{e+1} & x_{e+1}^2 & x_{e+1}^3 \\ 0 & -1 & -2x_{e+1} & -3x_{e+1}^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{pmatrix} \quad (8)$$

이로부터  $C_i$ 를 구하여 (7)에 대입하면

$$w(x) = \{ \phi_1^e w_1^e + \phi_2^e \theta_1^e + \phi_3^e w_2^e + \phi_4^e \theta_2^e \} \quad (9)$$

또는

$$w(x) = \sum_{j=1}^4 u_j \phi_j^e \quad (10)$$

여기서

$$u_1 = w_1, u_2 = \theta_1, u_3 = w_2, u_4 = \theta_2 \quad (11)$$

이다.

#### 나. 유한요소 모델화

식 (3)의 시험함수(trial function)  $v$ 와 변위  $w$ 를 다음과 같이 가정한다.

$$v = \phi_i, w = \sum_{j=1}^4 u_j \phi_j \quad (12)$$

이들을 식 (3)에 대입하면

$$\sum_{j=4}^4 \left( \int_{x_e}^{x_{e+1}} EI \ddot{\phi}_i \ddot{\phi}_j dx - P \int_{x_e}^{x_{e+1}} \dot{\phi}_i \dot{\phi}_j dx - \rho A \omega^2 \int_{x_e}^{x_{e+1}} \phi_i \phi_j dx \right) U_j^e = \overline{Q}_i^e + P\theta_1 - P\theta_2 \quad (13)$$

또는

$$\sum_{j=1}^4 \left\{ \int_{x_e}^{x_{e+1}} (EI \ddot{\phi}_i \ddot{\phi}_j + P \dot{\phi}_i \dot{\phi}_j) dx - \lambda \int_{x_e}^{x_{e+1}} \phi_i \phi_j dx \right\} U_j^e = \overline{Q}_i^e + P\theta_1 - P\theta_2 \quad (14)$$

이며 간단히 표현하면 다음 식이 된다.

$$\sum_{j=1}^4 K_{ij}^e u_j^e + \sum_{j=1}^4 M_{ij}^e u_j^e - F_i^e = 0 \quad (15)$$

여기서

$$K_{ij}^e = EI \int_{x_e}^{x_{e+1}} (\ddot{\phi}_i \ddot{\phi}_j + P \dot{\phi}_i \dot{\phi}_j) dx \quad (16)$$

$$M_{ij}^e = -\rho A \omega^2 \int_{x_e}^{x_{e+1}} \phi_i \phi_j dx \quad (17)$$

$$F_i^e = -\overline{Q}_i^e - P\theta_1 + P\theta_2 \quad (18)$$

이며 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$[K_{ij}^e] - \lambda [M_{ij}^e] \{u\} = \{F\} \quad (19)$$

만약 보 요소에 스프링으로 구속이 되면 변위에 비례하는 하중 또는 모멘트가 하중 항에 작용하며 변위벡터 항에 해당하는 항을 이항하여 강성 행렬을 수정해 주어야 한다.

#### 다. 고유값 및 모드형상

고유치 문제는 식 (19)에서 하중 항을 영(zero)으로 하고 해석하면 구할 수 있으며 여기서 구한  $\lambda$ 는 고유치로서 고유진동수는  $\lambda = \rho A \omega^2$  에서 구한다.  $\{u_j\}$ 는 고유벡터가 되며 모드형상을 구하기 위해 다시 사용된다.

한 요소내의 모드형상은 다음 식 (20)으로부터 구할 수 있다.

$$w^e(x) = \sum_{j=1}^4 u_j^e \phi_j^e \quad (20)$$

이때  $u_j^e$ 는 각 요소의 절점 값으로서 고유치가 되며 해당하는 요소에서의 보간 함수  $\phi_j^e$ 를 사용하여 모드형상을 구할 수 있다.

#### 라. 지지반력

연료봉이 노심에서 운전 중에는 냉각수의 흐름에 의해 외부 가진력을 받아 진동하게 되며 이 진동의 크기는 유속과 지지 스프링력에 크게 좌우된다. 정상상태 진동진폭과 지지반력의 관계는 다음과 같이 하여 얻을 수 있다.

연료봉에 가해지는 조화 가진(harmonic excitation)을 일반적으로 알려지지 않은 시간의 함수  $f e^{j\omega t}$ 라

하고, 어떤 지지점에서의 지지반력을 구하고자 하는 곳의 회전 DOF를 자유로 두어 미지의

반력  $Re^{j\omega t}$ 를 받는 것으로 가정하면 수정된 계의 응답은 역시 조화함수인  $q=x e^{j\omega t}$ 로 표현할 수 있으며 여기서의 변위  $x$ 는 다음과 같다.

$$x=(x_1, x_2)^T \quad (21)$$

행렬식을 이용하여 전체 계의 운동방정식을 표시하면 다음과 같다.

$$\left[ \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{pmatrix} + j\omega \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} - \omega^2 \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f \\ R \end{pmatrix} \quad (22)$$

여기서  $x_2$ 는 계산되어야 할 반력에 해당하는 DOF이며,  $x_1$ 은 반력을 제외한 연료봉의 다른 DOF이다.

지지반력은 변위  $x_2$ 를 소거하여 얻은 하중 R의 집합이다. (22)에서  $x_2$ 를 소거하면

$$(K_{11} + j\omega C_{11} - \omega^2 M_{11})x_1 = f \quad (23)$$

$$(K_{21} + j\omega C_{21} - \omega^2 M_{21})x_1 = R \quad (24)$$

실제로는 유체 유발 진동(Flow Induced Vibration) 하중  $f$ 와 연료봉의 댐핑  $C_{ij}$ 는 알 수 없다. 그러나 연료봉 진동이 진동모드 1에 따라 진동한다고 가정하면 식 (24)로부터 댐핑을 무시하고 근사해를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R=(K_{21} - \omega_1^2 M_{21})\delta_1 \quad (25)$$

여기서  $\omega_1$ 은 연료봉의 일차 고유진동수이고,  $\delta_1$ 은 실험에서 구하여 사용하고 있는 경수로 핵연료봉의 최대 진폭인  $\delta_{\max}=0.2$  mm에 정규화시킨 일차모드  $x_1$ 이다[4].

### 3. 계산 결과 및 고찰

#### 가. 계산모델 검증

계산결과의 타당성을 확인할 목적으로 SMART 연료봉을 하나의 보로 증가하여 계산하고 ANSYS의 결과와 비교하여 BEVIRA 적용의 적합성을 검토하고자 하였다. 연료봉 등가보에 대한 필요 입력자료의 값은 다음과 같이 계산된다.

- Area of Cross-Section :  $A=\pi/4 \cdot [9.5]^2 \cdot 10^{-6} = 70.882184 \cdot 10^{-6} m^2$
- Area of Moment Inertia :  $\pi/64 \cdot [9.5]^4 \cdot 10^{-12} = 3.9981982 \cdot 10^{-10} m^4$
- Mass per Unit Length :  $1.2681 / (\pi/4 \cdot [9.5^2 - 8.22^2] \cdot 10^{-6}) = 7.1185 \cdot 10^4 kg/m^3$
- Displaced Volume : 153.5 cm<sup>3</sup>[11].
- Added Mass : at 20℃ ;  $\pi/4 \cdot [9.5]^2 \cdot 1000 kg/m^3 \cdot 10^{-6} N/m = 0.07088 kg/m$
- at 310℃ ;  $\pi/4 \cdot [9.5]^2 \cdot 678 kg/m^3 \cdot 10^{-6} N/m = 0.04806 kg/m$

Inconel 718과 Zircaloy-4 의 온도에 따른 Young's Modulus는 다음의 표 1의 자료[12]를 내삽보간하여 사용하였다. 표 2의 자료를 이용하면  $EI=17.2373472$  Nm<sup>2</sup>,  $\rho \cdot A=0.598446$  kg/m이다.

표 1. 온도에 따른 Inconel 및 Zircaloy-4 재료의 Young's Modulus

온도	Inconel (718 *10 <sup>6</sup> )	Zircaloy-4(*10 <sup>6</sup> )
20	20	9.81
100	19.6	9.29
200	19.0	8.63
300	18.5	7.98
400	17.9	7.32

표 2. 입력자료 계산에 사용된 값

Young's Modulus (N/m <sup>2</sup> )	Area Moment of Inertia(m <sup>4</sup> )	Area(m <sup>2</sup> )	Density(kg/m <sup>3</sup> )	Mass/m
9.81x10 <sup>10</sup>	1.75712x10 <sup>-10</sup>	1.78141x10 <sup>-3</sup>	3.3594x10 <sup>4</sup>	0.598446779

한편 스프링은 지지격자 cell의 위치에 따라 형상과 재원이 다르며 스프링력도 상이하므로 계산에는 내부 cell, 외곽 cell, Corner cell의 위치에 따라 구분하였고, 스프링력도 시방서의 공차를 고려하여 최소, 정규, 최대의 3개로 구분하여 계산하였다.

BEVIRA의 계산결과의 정확성은 참고문헌 [5]에서 언급한대로 참조계산의 결과와 잘 일치하며 각 지지격자 사이의 경간에서 요소 수에 따른 결과는 표 3과 같이 요소가 많을수록 작은 쪽으로 수렴함을 보이며 한 경간에서 8개의 요소로 계산했을 경우 충분히 수렴된 것으로 가정하고 차후의 계산에 8개/Span의 요소를 두고 계산하였다. ANSYS와의 비교를 위해 경간에 하나의 요소를 갖는 경우로 계산하면 연료봉의 플레넘을 고려하지 않고 균일한 봉으로 가정하고 계산할 결과를 표 4에 보이고 이 계산의 고유진동 모드형상을 비교하면 그림 2(BEVIRA)와 그림 3(ANSYS)과 같이 모드형상의 역상(phase)을 제외하면 상호 잘 일치함을 보인다.

표 5에는 각 지지격자 간격에서 요소 수를 8개를 사용하여 계산된 지지격자 스프링에서의 반력을 나타내고 있다.

표 3. 지지격자 경간에서 사용된 요소 수에 따른 결과비교 (Hz)

Mode Number	Numer of Elements per SG Span			
	2	4	6	8
1	39.06	38.85	38.80	38.80
2	45.67	45.43	45.32	45.32
3	54.54	53.99	53.89	53.88
4	82.26	81.36	81.30	81.29
5	135.73	124.63	123.53	123.41
6	156.19	141.70	139.60	139.38

표 4. BEVIRA 및 ANSYS와의 고유진동수 계산결과 비교

Mode Number	BEVIRA(A)	ANSYS(B)	deviation (A/B) %
1	39.82	39.84	0.05
2	46.46	46.33	0.28
3	55.63	55.59	0.07
4	89.66	89.41	0.28
5	142.58	142.72	0.09
6	164.65	164.21	0.27

표 5. 지지격자 위치에서의 스프링 지지반력

SG 위치	1	2	3	4	5
지지반력	-0.2624	1.016	-0.4076	-0.2984	0.9410

#### 나. 상온 상압, 0 연소도에서의 지지격자 스프링 반력

대기압, 상온(21℃)에서 0-연소도일 때 각 지지격자 위치 및 cell의 위치에 따른 고유진동수 및 지지격자 스프링 반력의 계산결과는 표 6과 같다. 표 6에는 지지격자 내부 cell, 외곽 cell, 모서리 cell에 위치한 스프링의 설계 최대, 최소 및 nominal 스프링력에 따른 고유진동수 및 스프링 반력을 표시하였고, 이들을 진동모드 수에 따른 진동수로 표시하면 그림 5, 그림 6, 그림 7과 같다. 또 지지격자 위치에서의 스프링 지지반력을 내부 cell, 외곽 cell, 코너 cell별로 도시하면 각 각 그림 8, 그림 9, 그림 10과 같다.

그림 5, 그림 6 및 그림 7에서 보는 것과 같이 각 cell 위치에서 모드 수에 따른 고유진동수는 각기 큰 차이를 보이지 않으며, 지지격자 스프링력의 최소, 중간, 최대값의 조합에 따른 고유진동수 차이도 크지 않음을 보인다. 이로 인해 나타나는 지지격자 위치별, cell 위치별 지지 반력도 그림 8, 그림 9, 그림 10에서 보는 것과 같이 큰 차이를 보이지 않으나 외곽 지지격자 cell에서 상대적으로 큰 지지반력을 나타냄을 알 수 있다. 이때의 최대 지지반력은 약 1.4 N을 보인다.

한편 운전조건에서의 고유진동수 및 지지격자 스프링 반력을 나타내면 표 7과 같고, 지지격자 위치별, cell 위치별 스프링 지지반력을 그림으로 나타내면 그림 11, 그림 12, 그림 13과 같다. 여기서도 공기 중에서도 마찬가지로 지지격자 스프링 반력은 각 cell 위치별로 큰 차이를 보이지 않으며, 최대 지지격자 스프링 반력은 약 1.4 N을 나타내고 있다.



표 6. 대기압, 21℃에서 0-연소도일 때 고유진동수 및 지지격자 스프링 반력

		Inner			Outer			Corner			
		최소	중간	최대	최소	중간	최대	최소	중간	최대	
Zry SG	Spring Force(N)	25	35	45	25	35	45	12	18	24	
	Rotationaly Stiff(N/Rad)	200	280	360	200	280	360	102	153	204	
Inc. SG	Spring Force(N)	12	18	24	12	18	24	12	18	24	
	Rotationaly Stiff(N/Rad)	168	252	336	102	153	204	102	153	204	
모드	진동수 (Hz)	1	38.56	40.80	42.52	37.95	40.20	41.97	35.09	37.18	38.88
		2	44.49	46.28	47.61	43.68	45.42	46.76	41.86	43.55	44.900
		3	52.57	53.35	53.91	52.12	52.90	53.46	51.37	52.18	52.79
		4	78.04	81.74	84.62	75.12	78.41	81.12	73.73	76.79	79.35
		5	119.11	122.42	125.13	118.37	121.70	124.42	114.39	117.16	119.55
		6	133.72	136.29	138.33	132.46	134.87	136.87	130.37	132.52	134.34
SG 위치	지지반력 (N)	1	-0.258	-0.252	-0.24	-0.212	-0.215	-0.213	-0.272	-0.272	-0.268
		2	1.029	1.135	1.22	0.850	0.971	1.072	0.916	1.002	1.073
		3	-0.522	-0.527	-0.53	-0.564	-0.610	-0.646	-0.476	-0.486	-0.495
		4	-0.208	-0.331	-0.42	0.113	0.049	-0.009	-0.159	-0.246	-0.315
		5	1.113	1.150	1.18	1.169	1.309	1.415	0.972	1.203	1.068

표 7. 운전조건에서 0-연소도일 때 고유진동수 및 지지격자 스프링 반력

		Inner			Outer			Corner			
		최소	중간	최대	최소	중간	최대	최소	중간	최대	
Zry SG	Spring Force(N)	25	35	45	25	35	45	12	18	24	
	Rotationaly Stiff(N/Rad)	200	280	360	200	280	360	102	153	204	
Inc. SG	Spring Force(N)	12	18	24	12	18	24	12	18	24	
	Rotationaly Stiff(N/Rad)	168	252	336	102	153	204	102	153	204	
모드	진동수 (Hz)	1	38.78	41.02	42.75	38.16	40.42	42.20	35.29	37.38	39.09
		2	44.74	46.53	47.88	43.93	45.67	47.02	42.09	43.80	45.15
		3	52.86	53.65	54.20	52.41	53.19	53.75	51.65	52.47	53.08
		4	78.46	82.19	85.08	75.53	78.84	81.56	74.13	77.21	79.78
		5	119.78	123.10	125.83	119.04	122.35	125.12	115.04	117.82	120.22
		6	134.49	137.07	139.12	133.23	135.65	137.66	131.13	133.29	135.12
SG 위치	지지반 력 (N)	1	-0.258	-0.252	-0.243	-0.212	-0.215	-0.213	-0.272	-0.272	-0.268
		2	1.029	1.135	1.218	0.851	0.972	1.073	0.917	1.003	1.074
		3	-0.522	-0.527	-0.533	-0.564	-0.610	-0.645	-0.476	-0.486	-0.495
		4	-0.209	-0.332	-0.422	0.112	0.047	-0.011	-0.160	-0.247	-0.317
		5	1.110	1.147	1.173	1.168	1.307	1.411	0.970	1.025	1.066

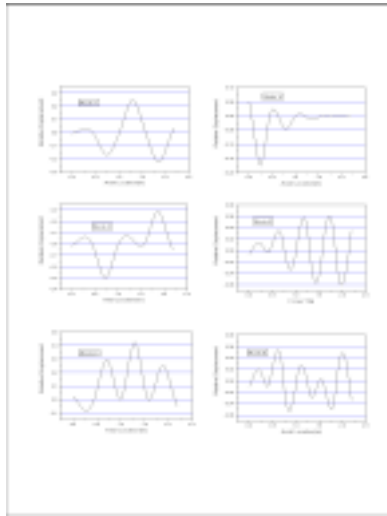


그림 3 연료봉 질량  
균등분포시의 고유진동 모드  
(BEVIRA)

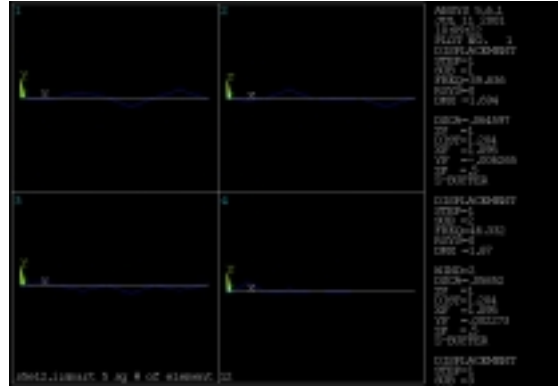


그림 4 연료봉 질량 균등분포시  
고유진동모드(ANSYS)

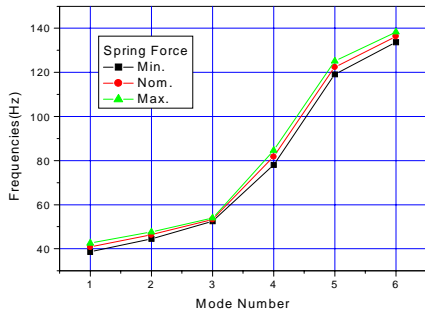


그림 5 대기중, 21°C, 0연소도 inner  
cell의 고유진동수

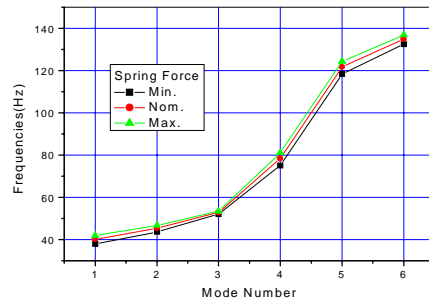


그림 6 대기중, 21°C, 0연소도 outer  
cell의 고유진동수

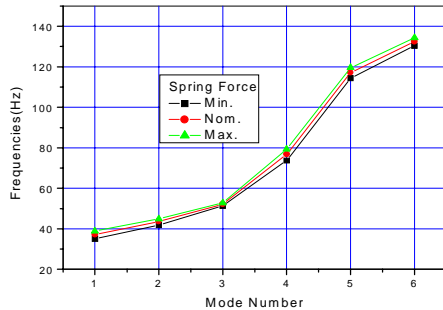


그림 7 대기중, 21°C, 0연소도 Corner  
cell의 고유진동수

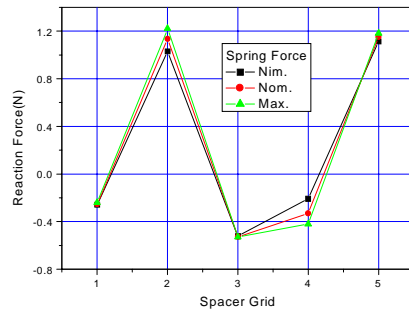


그림 8 대기중, 21°C, 0연소도 Inner  
cell의 지지격자 위치에서의 반력

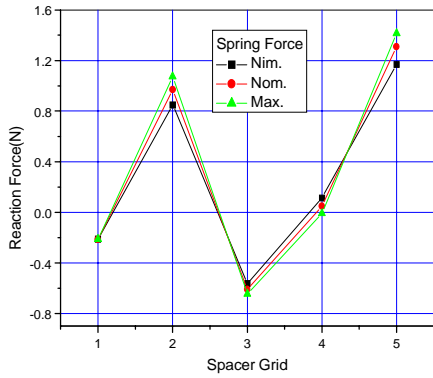


그림 9 대기중, 21°C, 0연소도 Outer cell의 지지격자 위치에서의 반력

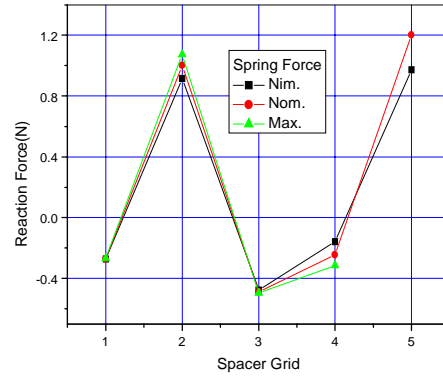


그림 10 대기중, 21°C, 0연소도 Corner cell의 지지격자 위치에서의 반력

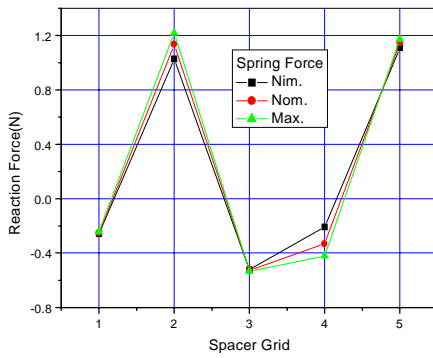


그림 11 운전조건에서의 내부 Cell 지지 스프링반력

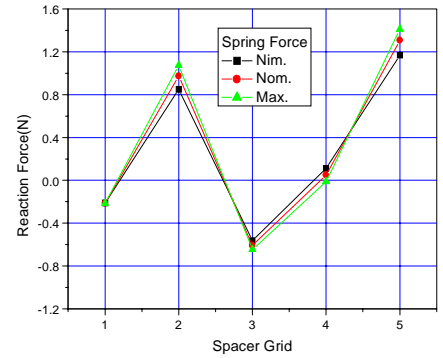


그림 12 운전조건에서의 외곽 Cell 지지 스프링반력

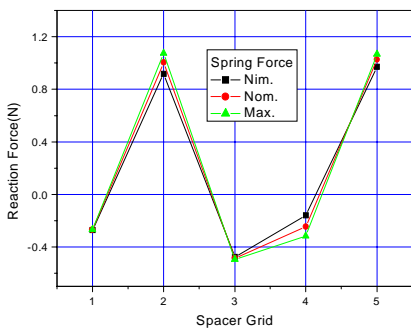


그림 13 운전조건에서의 Corner Cell 지지 스프링반력

#### 다. 연소도에 따른 고유진동수 및 반력

지지격자 스프링은 연료봉의 연소와 함께 중성자 조사에 기인한 응력이완으로 인해 연소도에 따라 점차 지수적인 스프링력의 상실을 보이게 되고 이는 연료봉을 지지해주는 역할에 중대한 지장을 초래하게 하는 원인이 된다. 여기서는 SMART 연료에 대한 연소자료가 없으므로 기존의 노내조사에 기인한 스프링력의 변화자료[13]를 이용하여 연소도에 따른 스프링력의 변화와 이로인한 연료봉의 고유진동수 변화 및 지지반력의 변화를 간접적으로 평가하고자 한다.

그림 14는 참고문헌 [13]에서 얻은 연소도에 따른 스프링력의 변화를 보인다. 이 스프링력은 연소도에 따라 지수적인 감소를 하며 약 25 MWd/kgU 정도의 연소도에 도달하면 집합체 중간에 위치한 지지격자의 스프링력은 완전히 상실되어 연료봉은 최상, 하단의 Inconel 지지격자의 스프링에 의해 지지됨을 나타내고 있다. 이 스프링력 이완을 적용하여 계산된 SMART 연료봉의 고유진동수는 그림 15와 같으며 이는 연소도에 따른 진동수 변화로서 연소도가 증가할수록 지지 스프링력이 감소하게 되어 연료봉의 고유진동수도 상대적으로 연소도에 따라 감소함을 보이지만 스프링력의 감소와 같은 지수적인 감소는 보이지 않는다. 그림 16은 연소도에 따른 지지격자 스프링 반력의 변화로서 지지격자 스프링력의 감소 및 진동수 감소에 기인하여 연소가 진행될수록 스프링 지지반력의 감소가 나타나고 있음을 보인다. 따라서 연소도에 따라 지지격자 스프링력의 최소 요구되는 지지력은 그림 16에서 보이는 지지반력 이상이 되어야 하지만 연소도에 따른 스프링력을 보이는 그림 14의 스프링력은 연소도 25MWd/kgU 이상에서는 스프링력의 상실을 초래하여 연료봉의 지지건전성이 확보되지 않을 수도 있음을 의미하고 있다. 여기서는 단순하게 연료봉의 연소도에 따른 반경변화는 무시하였으며 스프링력에 영향을 주는 제조공차도 무시하여 계산한 결과로서 보다 엄밀한 평가를 위해서는 이러한 변수에 대한 상세 해석과 고려를 필요로 하고 있다.

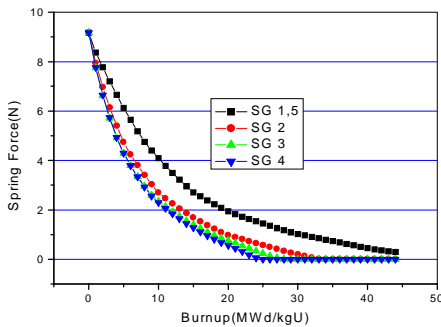


그림 14 연소도에 따른 스프링력 변화

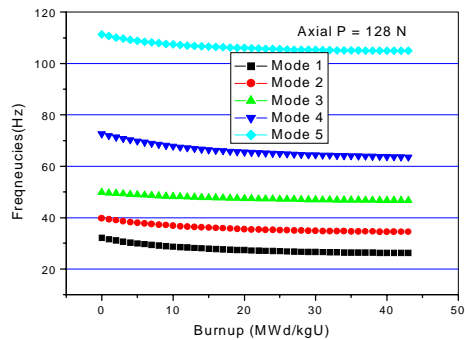


그림 15 연소도에 따른 진동수 변화

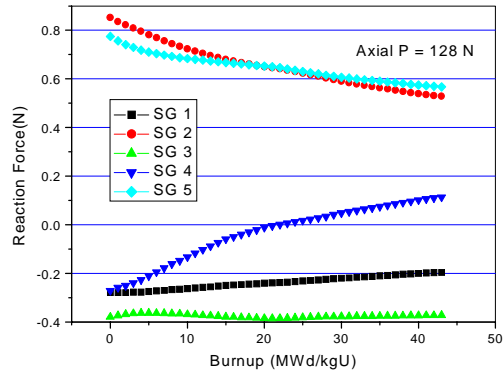


그림 16 연소도에 따른 반력변화

라. 지지격자 위치를 등간격으로 했을 경우

지금까지의 계산에서는 지지격자의 위치는 최하단 지지격자와 2번째 지지격자 사이의 간격이 다른 곳보다 작은 경우이었으며 지지격자의 위치를 등간격으로 했을 경우 내부 cell 에 위치한 연료봉의 모드형상은 그림 17과 같고, 이때의 지지격자 반력을 나타내면 그림 18 및 표 8과 같이 최대 지지반력 1.4 N을 보인다. 이는 비등간격의 이전 지지격자 위치의 경우에서 내부 cell의 지지반력 1.2 N 과 비교하면 비록 작지만 보다 큰 지지반력을 요구하게 되어 연료봉의 지지건전성 측면에서는 등간격의 경우가 반드시 좋은 지지격자 배치라고는 볼 수 없음을 나타낸다.

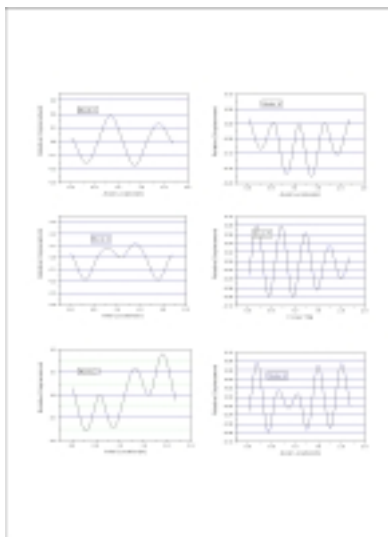


그림 17 지지격자 등간격 경우의 모드형상

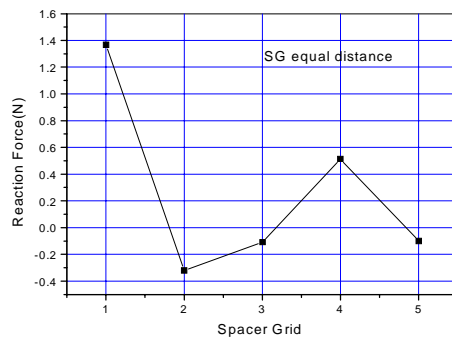


그림 18 등간격 지지격자의 스프링 반력

표 8. 등간격 지지격자일 때의 지지격자 스프링 반력(N)

지지격자 위치	1	2	3	4	5
지지반력(N)	1.368	-0.31936	-0.10825	0.51374	-0.10080

#### 4. 결 론

SMART 연료봉의 지지격자내의 지지건전성 평가를 위해 연료봉을 하나의 등가보로 가정하고 고유진동 및 이때 나타나는 최대 허용 변위로부터 각 지지격자 cell 에서의 지지격자 스프링 반력을 구하여 공기 중, 운전조건 및 연소도에 따른 연료봉의 지지건전성을 평가하였다. 평가에는 보에 대한 모달해석 유한요소 프로그램인 BEVIRA를 이용하였으며 계산하기 전에 ANSYS의 계산 결과를 이용하여 BEVIRA의 계산타당성을 확인하고 해석하였다. 지지격자 내부, 외곽 및 모서리 cell에서 사용되는 스프링이 다르고 이에 따라 스프링력도 다르므로 각 cell에서 스프링의 최대, 중간, 최소 스프링력의 조합을 이용하여 계산하고 이때의 고유진동수 및 지지반력으로부터 지지건전성을 유추하였다. 연소초기의 공기 중 및 운전중의 요구되는 지지격자 스프링력은 약 1.2 ~ 1.4N 이며 이는 초기 지지격자 스프링력의 크기가 최소 Inconel 지지격자 스프링에서 12N, Zircaloy 지지격자의 복합 스프링에서 25N 임을 감안하면 초기에 연료봉의 진동에 의해 fretting 마손이 일어날 가능성은 없음을 보인다. 반면 연소도에 따라 지지격자 스프링의 급격한 조사 이완으로 인한 스프링력 감소에 기인하여 고유진동수 및 지지반력의 급격한 감소를 예측할 수 있다. 실제로 참조발전소의 가상 스프링 이완자료를 이용했을 경우 연소도 25M\MWd/kgU에서 0.6N ~ 0.4N 이상의 스프링 지지반력을 보이므로 잔존 스프링력과 스프링 반력을 비교했을 경우 연소도 30 MWd/kgU 이상에서 요구되는 스프링력 이하를 보이는 스프링위치에서는 연료봉의 지지건전성에 위해가 일어날 수도 있음을 보인다. 따라서 주기말의 고연소에 대한 연료봉의 지지조건에 종합적 변수 영향 연구를 통해 보다 상세한 해석과 분석이 요구된다고 할 수 있다.

#### Acknowledgement

The authors would like to express their appreciation to the Ministry of Science and Technology (MOST) of the Republic of Korea for the support of this work through the mid- and long-term nuclear R&D Project.

#### 참 고 문 헌

1. C.C.Lee, S.Y.Park, K.B.Lee, S.Q.Zee, Nuclear Design Characteristics of SMART, Proc. of the '98 Korea Nuclear Society Spring Conference, p19, 5, 1998
2. T.W.Ki, K.B.Park, K.H.Jeong, G.M.Lee, S.Choi, Dynamic Characteristics of the Integral Reactor SMART, Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 33, No. 1, PP111~120, Feb, 2001
3. 임정식, 지성균, Smart-CA-DW-160-02(R0), 핵연료집합체 도면, KAERI, 2001.
4. A. Premount, On the Vibration Behaviour of Pressurized Water Reactor Fuel Rods,

- Nuclear Technology, Vol. 58, pp. 482-491, Sep., 1982
5. 임정식, 구양현, 윤경호, 손동성, 경수로 핵연료봉 노내지지 건전성 해석, 한국소음진동공학회 '97 추계학술발표회 논문집, pp.177~183, Nov., 1997
  6. 강홍석, 송기남, 윤경호, 정연호, 임정식, 회전 및 굽힘 스프링 기구로 연속 지지된 핵연료봉의 진동연구, 한국소음진동공학회, 1998년도 춘계학술대회 논문집, pp 454~460, 1998
  7. 임정식, 손동성, 연료봉 고유진동해석 프로그램 BEVIRA의 개발 및 응용, KAERI/TR-1168/98
  8. ANSYS Inc., ANSYS Release 5.6.0, Aug. 2000
  9. J.N.Reddy, An introduction to the Finite Element Method, McGraw Hill Book Co., 2nd edition, 1984
  10. S. Rao, Mechanical Vibrations, Addison Wesley Publishing Co., 1986
  11. 임정식, 이찬복, 김대호, 지성균, SMART-CA-DD16001-01,Rev 00, SMART-L 핵연료 예비 엔지니어링 자료
  12. B.K.Na, Kunz, Design of the Fuel Assembly Structural with Zircaloy Spacer Grids, B112/87/e268a, Erlangen, 1987
  13. 김형구, 김규태, 핵연료집합체 지지격자 스프링의 노내 거동분석용 프로그램 BOSCREX의 개발, KAERI/TR-337/93, 한국원자력연구소