

균일한 축방향 유동에 노출된 핵 연료봉의 진동특성 분석

Vibration Characteristics of a Nuclear Fuel Rod in Uniform Axial Flow

박 남 규† · 전 상 윤* · 서 정 민* · 김 규 태*

Nam-Gyu Park, Sang-Youn Jeon, Jung-Min Suh and Kyu-Tae Kim

(2006년 7월 28일 접수 ; 2006년 10월 10일 심사완료)

Key Words : Nuclear Fuel Rod(핵 연료봉), Vibration Characteristics(진동 특성), Axial Flow(축방향 유동), Stability(안정성), Critical Velocity(임계속도)

ABSTRACT

Nuclear fuel rods are exposed to axial flow in a reactor, and flow-induced-vibration due to the flow usually causes damage in the fuel rods. Thus a prior knowledge about dynamic behavior of a fuel rod exposed to the flow condition should be provided. This paper shows that dynamic characteristics of a nuclear fuel rod depend on axial flow velocity. Assuming small lateral displacement, the effects of uniform axial flow are investigated. The analytic results show that axial flow generally reduces fuel rod stiffness and raises its damping in normal condition. Also, the critical axial velocities which make the fuel rod behavior unstable were found. That is, solving generalized eigenvalue equation of the fuel rod dynamic system, the eigenvalues with positive real part are detected. Based on the simulation results, on the other hand, it turns out that the ordinary axial flow in nuclear reactors does not affect to stability of a nuclear fuel rod even in the conservative condition.

기 호 설 명

- x : 축방향 좌표
- v : 횡방향 변위
- E : 영 계수(Young's modulus)
- I : 단면 2차 모멘트
- U : 축방향 유속
- m_f : 단위길이당 유체 부가 질량
- m_r : 연료봉 단위 길이당 질량
- t : 시간

- Q : 전단력
- M : 모멘트
- $\frac{D}{Dt}$: 물질 미분
- δ : 디랙 델타 함수(Dirac delta function)

1. 서 론

핵연료집합체는 핵분열이 가능한 우라늄을 핵연료봉(이하 연료봉)에 저장하여 핵연료를 보호하고 운반이 용이하도록 고안된 구조물이다. 경수로형 핵연료집합체는 원자로 내에 수직으로 장착되며, 길고 가는 튜브 내에 핵연료 펠렛(pellet)을 저장한 다수의 연료봉 및 지지격자 등으로 구성되어 있다. 핵분열 시 발생하는 열을 운반하기 위한 냉각수는 원자

† 책임저자; 정회원, 한전원자력연료㈜
E-mail : nkpark@knfc.co.kr
Tel : (042)868-1197, Fax : (042)868-1149
* 한전원자력연료㈜

로 하부로부터 공급되며, 이러한 축방향 유동은 연료봉의 유체유발진동을 야기한다. 따라서 핵연료집합체는 유체유발에 의한 진동을 고려하여 설계되어야 하며, 통상 연료봉의 움직임을 구속하는 지지격자의 설계가 매우 중요하다.

유체유발진동에 의해 핵연료집합체 혹은 연료봉은 치명적인 손상을 입을 수 있으므로 많은 연구자들의 관심사였으나, 냉각수의 상태가 난류이고 고온의 조건을 고려해야 하므로 연료봉의 동적 거동에 대한 정해(exact solution)는 구하기가 어렵다. 따라서 확률론적 방법에 의한 난진동 해석 및 실험식으로 연료봉의 거동을 예측하는 것이 보편적이다(1,10,11). 일반적으로 원자로 내의 냉각수 흐름은 축방향 성분뿐 아니라 모든 방향으로의 성분이 존재하나, 축방향의 속도가 지배적임을 가정하여 Paidoussis⁽²⁻⁴⁾는 유체내에 존재하는 유연한 빔(beam)의 운동에 관한 분야에서 많은 업적을 남겼다. 특히 양쪽 끝 단이 구속된 유연한 빔이 축방향의 유동에 의해 좌굴 혹은 불안정하게 되는 임계속도에 관한 연구결과를 제시하였다. Chen과 Wambsganiss⁽⁵⁾은 Paidoussis의 연구를 토대로 양 끝 단이 스프링으로 지지된 유연한 빔으로 확장하였고, 난류에 의한 진동량 규명을 위해 확률론적 접근 방법을 이용하였다. 또, Chen⁽⁶⁾은 포텐셜 유동(potential flow)의 가정하에 서로 이웃하는 연료봉으로 인한 유체의 부가질량을 계산하여 축방향 유체에 의한 연료봉의 진동을 해석하였다. 유체에 의한 감쇠비 역시 연료봉의 안정성에 중요한 역할을 하는데, 냉각수에서의 감쇠는 공기중보다 매우 크다는 것이 실험적으로 제시된 바 있다⁽⁷⁾. 유체를 운반하는 파이프 구조물은 축방향 유동의 전형이며, 외팔 파이프의 플러터 운동 및 고유치 분기는 Ryu⁽¹²⁾ 등에 의해 연구되었다.

이 연구에서는 균일한 축방향 유동을 가정하여 연료봉의 동적 특성을 규명하였고, 연료봉의 운동이 불안정해지는 냉각수의 임계 속도에 관한 연구결과를 논하였다. 균일한 축방향 유동의 구현은 사실상 불가능하나, 전반적인 설계변수를 설정하는데 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다. 기존의 연구들은 양 끝 단에서 특정한 경계조건을 갖는 유연한 빔을 대상으로 하였으나, 이 연구는 여러 개의 불연속적으로 존재하는 지지격자를 선형 스프링으로 모사

하여 축방향 유동에 대한 동특성 변화를 다루었다. 이때, 양 끝단의 경계조건은 유체의 모멘트 플렉스를 방향이 변하는 비 보존력(non-conservative force)으로 가정할 경우 자유단 조건이 되며, 플렉스의 크기와 방향이 변하지 않는 조건에서는 전단력(shear fore)을 받는 경계조건으로 다룰 수 있음을 보였다. 또한 지지격자의 기능을 상실하여 탄성 지지대로서의 역할을 수행하지 못하는 경우에 대한 해석결과를 제시하였다. 이것은 원자로 내의 열팽창 및 중성자의 조사에 의한 응력이완에 의해 지지격자의 기능이 상실되어 연료봉을 더 이상 탄성적으로 지지할 수 없는 상태를 고려한 것이다.

2. 축방향 유동을 고려한 연료봉 모델

2.1 연료봉 기하 모델

한국표준형 핵연료집합체의 윤곽은 Fig. 1과 같다. 연료봉은 Fig. 2와 같은 수 백 개의 격자구조(cell)로 형성된 여러 개의 지지격자(spacer grid assembly)에 의해 기계적으로 지지된다. Fig. 3과 같은 각각의 셀은 안쪽에서 스프링 역할을 할 수 있는 형상으로 가공되어 연료봉을 탄성적으로 지지할 수 있는 구조이다. 연료봉은 상하부 봉단 마개와 우라늄 펠렛이 장입되는 튜브지역으로 나뉘어지므로, 단면의 속성은 균일하지 않다. 연료봉의 길이는 대략 4m 정도이며 직경은 약 1cm 정도이다.

축방향으로 흐르는 냉각수와 연료봉 및 지지격자를 고려한 하나의 연료봉은 Fig. 4와 같이 단순화 할 수 있다. 이것은 평면상의 운동만을 고려한 것이며, 지면과 수직방향으로의 운동과는 연성(coupling)되지 않음을 가정한 것이다. 실제의 경우, 두 방향의 운동은 유체의 흐름으로 연성이 될 수 있으나, 이 연구에서는 이러한 효과는 배제하였다. Fig. 3에서 보듯이 연료봉이 지지되는 패턴은 대칭적인 구조이므로 두 방향의 운동은 서로 독립적인 것으로 가정하였다.

2.1 연료봉의 유체 유발 진동

Paidoussis⁽²⁾는 균일한 축방향의 흐름 및 미소 변위를 가정하여 유연한 빔에 대한 방정식을 제안하였는데, 연료봉의 경우 불연속적으로 존재하는 지지격자가 있으므로, Fig. 4와 같은 탄성 지지대의 영향

이 반영되어야 한다. 따라서 Fig. 5와 같이 미소길이
의 빔에 대한 횡 방향 평형방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} - F_n - \sum_{i=1}^r k_i v \delta(x - x_i) - m_f \frac{D^2 v}{Dt^2} - m_r \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

여기서 좌변 세 번째 항은 불연속적으로 존재하는
탄성 지지대의 영향을 반영한 것이며, k_i 는 지지격자
의 위치 x_i 에서의 탄성 스프링 계수이다. 또,
 $\delta(x - x_i)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\delta(x - x_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } x = x_i \in \{x_1, x_2, \dots, x_r\} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

식 (1)에서 F_n 은 유체 항력의 수직성분이며 미소
변위를 가정한 빔에서 다음과 같이 쓸 수 있다⁽²⁾.

$$F_n = \frac{1}{2} \rho_f D U^2 c_f \frac{1}{U} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + U \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3)$$

위의 식에서 ρ_f , D , c_f 는 각각 유체의 밀도, 연료
봉의 직경, 유체 항력 계수를 의미한다. 또한 축방향
속도만을 갖는 유체의 경우에 대한 물질미분은 다음
과 같다.

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + U \frac{\partial v}{\partial x} \quad (4)$$

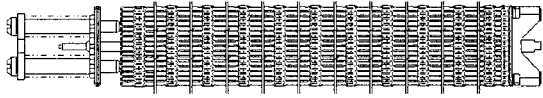


Fig. 1 A fuel assembly with several spacer grid assemblies

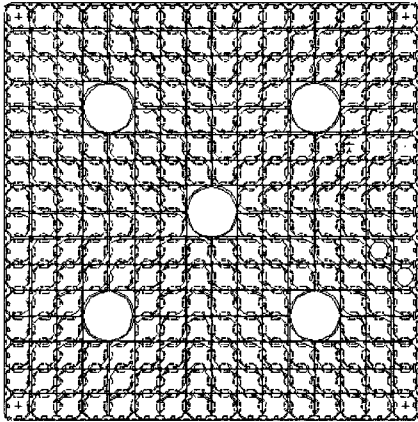


Fig. 2 Plane view of a spacer grid assembly

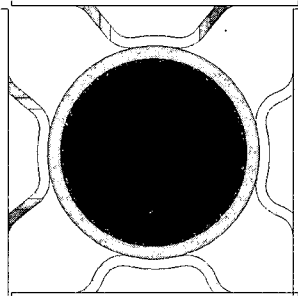


Fig. 3 Cross section of a cell in a typical grid assembly; solid dark circle is a cross section of an uranium pellet

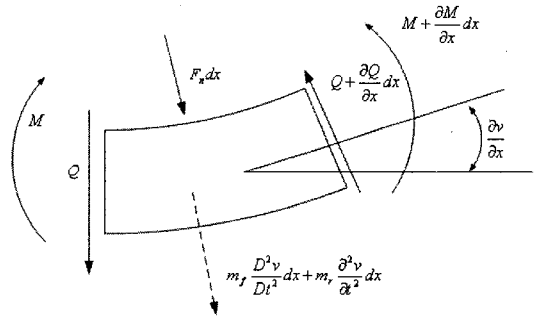


Fig. 5 Free body diagram of a beam element

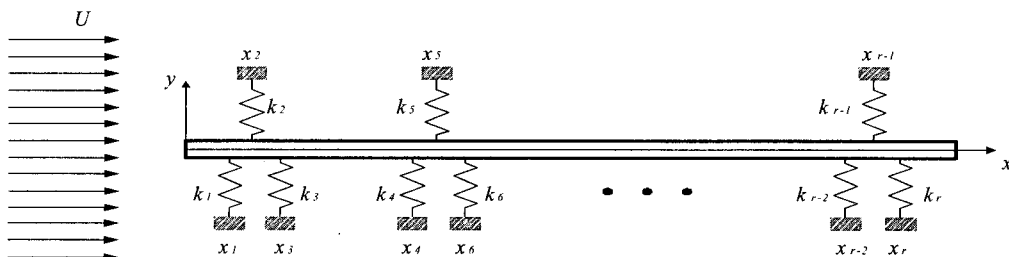


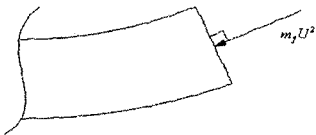
Fig. 4 A simplified fuel rod model which is exposed to uniform axial flow velocity

전단력 Q 는 변위의 세 번 미분임을 고려하고, 식 (3), (4)를 식 (1)에 대입하고 불연속적으로 존재하는 탄성지지대의 영향을 고려한 연료봉의 운동 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

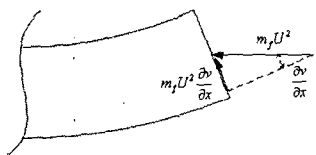
$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E(x)I(x) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + \sum_{i=1}^r k_i v \delta(x-x_i) + m_f U^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \\ & \alpha m_f U^2 \frac{\partial v}{\partial x} + 2m_f U \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial x} + \alpha m_f U \frac{\partial v}{\partial t} + \\ & (m_f + m_r) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\alpha = \frac{2c_f}{\pi D}$, $m_f = \rho_f \frac{1}{4} \pi D^2$ 이며, 유체에 의해 축방향으로 작용하는 항력은 무시하였다. 축방향으로 존재하는 항력은 유동의 속도가 증가하면서 나타날 수 있으나 항력계수의 함수이다. 특히 유체를 운반하는 파이프의 경우, 압력강하의 영향을 고려하면 실제로 계에 미치는 영향이 없음을 해석적, 실험적 방법으로 증명한 바 있다⁽⁸⁾.

축방향으로 압축력 p 를 받는 유연한 빔의 방정식은 식 (5)의 세 번째 항에서 $m_f U^2$ 대신 p 를 대입하면 얻을 수 있다. 즉 세 번째 항은 축방향으로 압축하중을 받는 빔의 경우에 등장하는 항과 등가임을 알 수 있고, 이러한 사실은 유체의 속도가 증가할수록 연료봉의 고유 진동수는 감소함을 의미한다^(2,5). 식 (5)의 다섯 번째 항은 코리올리 힘(Coriolis force)으로, 축방향으로 진행되는 유체가 횡방향의 연료봉의 운동과 작용하여 발생하고 감쇠 작용을 한다⁽⁸⁾.



(a) Applied force is always normal to the end section



(b) Applied force is always constant in direction and magnitude

Fig. 6 Expected boundary conditions

2.3 경계조건

여기서 제안된 모델은 Fig. 4에서 보듯이 자유경계조건임을 알 수 있다. 그러나 축방향으로 작용하는 힘이 존재하는 계에 대해서는 두 가지의 경우가 존재한다. 식 (5)의 세 번째 항은 유체의 플러스에 의한 압축력으로 생각할 수 있으며, 실제로 $m_f U^2$ 의 차원(dimension)은 힘의 차원이다.

첫 번째로 가능한 경계조건은 Fig. 6(a)와 같이 연료봉 끝단과 항상 수직으로 작용하는 경우이며 이때의 경계조건은 모멘트와 변위가 없음을 만족해야 한다. 두 번째는 끝단의 움직임과 무관하게 동일한 크기와 방향으로 작용하는 Fig. 6(b)와 같은 경우이다. 이때는 끝단면의 좌표를 기준으로 수직분력과 수평분력으로 나누어 쓸 수 있으며, 수직력은 전단력에 대한 경계조건을 만족해야 하며, 따라서 양 끝단에서는 다음 식의 경계 조건이 필요하다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E(x)I(x) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + m_f U^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

Fig. 6(b)에서 끝단에 작용하는 수평성분은 축방향의 운동방정식에 대한 경계조건이나, 횡 방향의 운동만을 고려하는 이 연구에서는 고려하지 않았다.

3. 고유치 문제의 정식화

식 (5)는 해석적으로 풀기 어려우므로 유한요소해석에 의한 방법으로 고유치 문제를 정의 할 수 있다. 즉 식 (5)의 양변에 두 번 미분 가능한 가중 함수 w 를 곱하고 적분하면 다음과 같은 변분 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \int_0^L E(x)I(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} dx + \int_0^L w \sum_{i=1}^r k_i v \delta(x-x_i) dx + \\ & m_f U^2 \int_0^L w \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} dx + \alpha m_f U^2 \int_0^L w \frac{\partial v}{\partial x} dx + \\ & 2m_f U \int_0^L w \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial x} dx + \alpha m_f U \int_0^L w \frac{\partial v}{\partial t} dx + \\ & \int_0^L w (m_f + m_r) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} dx = \\ & \left[\frac{\partial w}{\partial x} \left(E(x)I(x) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \right]_0^L - \left[w \left(\frac{\partial}{\partial x} E(x)I(x) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \right]_0^L \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 우변은 이 계에 대한 경계조건이며, 전술한 바와 같이 끝 단이 자유단인 경우에 해당한다. 세 번째 항의 부분적분을 고려하면, 이 항은 대칭행렬로 구성할 수 있으며, 식 (7)은 식 (8)이 됨을 알 수 있다.

$$\int_0^L E(x)I(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} dx + \int_0^L w \sum_{i=1}^r k_i v \delta(x-x_i) dx - m_f U^2 \int_0^L \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} dx + cm_f U^2 \int_0^L w \frac{\partial v}{\partial x} dx + 2m_f U \int_0^L w \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial x} dx + cm_f U \int_0^L w \frac{\partial v}{\partial t} dx + \int_0^L w (m_f + m_r) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} dx = \left[\frac{\partial w}{\partial x} \left(E(x)I(x) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \right]_0^L - \left[w \left(\frac{\partial}{\partial x} E(x)I(x) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + w m_f U^2 \frac{\partial v}{\partial x} \right]_0^L \quad (8)$$

식 (8)의 우변 마지막 항은 식 (6)과 동일함을 알 수 있는데, 유체에 의한 힘의 수직성분으로 경계조건이 부가됨을 알 수 있다. 이 연구에서는 균일한 축방향 유동을 가정하였는데, 이것은 유동의 크기와 방향이 항상 일정함을 의미하며 이에 상응하는 경계조건은 양 끝 단에서 다음과 같음을 알 수 있다.

$$E(x)I(x) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E(x)I(x) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + m_f U^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

다시 식 (8)을 3차 다항식(hermite polynomial)의 보간함수(interpolation function)를 이용하여 유한요소에 의한 대수 방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$([K] + [K]_l - [K]_b + [K]_r) \{d\} + ([C] + [C]_l) \{\dot{d}\} + [M] \{\ddot{d}\} = \{0\} \quad (11)$$

여기서 각각의 항은 식 (8)과 순서대로 대응되며, 축방향 유동에 의해 두 개의 강성과 두 개의 감쇠 항이 추가되었음을 알 수 있다.

초기속도와 변위가 없을 때 식 (11)의 라플라스 변환은 다음과 같다.

$$(s^2 [M] + s [C]_l + [K]_l) \{Y\} = \{0\} \quad (12)$$

여기서 $[C]_l$ 와 $[K]_l$ 는 식 (11)에서 정의된 각 강성 및 감쇠의 합이며, Y 는 변위 d 의 라플라스 변환이다. 식 (12)를 다시 쓰면 다음과 같은 고유치 문제로 정식화 할 수 있다.

$$\left(\begin{bmatrix} [O] & [K]_l \\ -[M] & [O] \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} [M] & [C]_l \\ [O] & [M] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} s \{Y\} \\ \{Y\} \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (13)$$

여기서 $[O]$ 는 각 요소가 0으로 구성된 행렬을 의미한다.

식 (13)의 행렬식(determinant)이 0을 만족시키는 해는 n 개의 자유도인 경우 $2n$ 개 켈레복소수로 존재한다. 이때 실수부는 감쇠항에 해당되며, 허수부는 감쇠고유진동수를 의미한다⁽⁹⁾. 따라서 실수부가 양수이면 발산을 의미하며, 이 경우 연료봉의 운동은 불안정해 짐을 의미한다.

4. 수치해석 및 고찰

4.1 감쇠 및 유체 항력을 무시한 경우

축방향의 냉각수에 노출된 연료봉의 보수적인 평가를 위해, 감쇠 및 유체항력에 의한 영향을 무시하였을 때의 고유치 문제는 다음과 같이 쓸 수 있다. 유체의 속도에 의한 강성행렬은 다음 식 (14)에서 $[K]_b$ 에 해당한다.

$$([K] + [K]_l - [K]_b) \{Y\} + s^2 [M] \{Y\} = \{0\} \quad (14)$$

이때 밀도 및 물질 계수들은 원자로의 운전 온도 300℃를 기준으로 설정하였다.

원자로에 존재하는 구조물은 방사능에 노출되어 응력이 이완되므로 지지격자 구조물의 각 셀(탄성지대)과 연료봉 사이에 간격이 발생할 수 있다. 간격이 발생하면 지지격자는 더 이상 연료봉을 탄성적으로 지지할 수 없으며 오히려 연료봉과 충돌을 일으키게 된다. 이러한 현상을 세밀하게 모사할 수는 없으나 보수적인 평가를 위해 지지격자 셀의 탄성지대의 탄성계수가 없는 조건을 고려하여 평가할 수 있다.

탄성 지지대가 모두 온전히 존재할 때, 유체의 속도가 없는 경우로부터 시작해서 유체의 속도를 증가시키면서 식 (14)의 고유치(λ)를 구하고 첫 번째

고유치를 도시하면 Fig. 7과 같다. 가로축은 고유치의 실수부이며, 세로축은 고유치의 허수부에 해당한다. 유체의 속도가 증가하면 식 (14)에서 보듯이 전체 강성이 점차 감소되며, Fig. 7과 같이 고유치가 허수축을 따라 원점으로 이동하는 것을 알 수 있다. 그런데 특정속도(Table 1 및 Fig. 7 참조) 이상에서는 고유치가 실수축에 분포함을 관찰할 수 있다. 이것은 연료봉의 거동이 매우 불안정함을 의미하며, 탄성을 상실한 연료봉이 유체의 에너지를 더 이상 흡수하지 못하고 발산하는 것으로 이해할 수 있다.

발산이 일어날 수 있는 각 조건에서의 임계속도는 Table 1과 같다. 첫 번째 조건은 모든 지지격자가 온전히 지지하는 경우이다. 두 번째와 세 번째 경우는 중간부분의 지지격자가 모두 작용을 하지 않는 상태를 가정한 경우이다. 특히 세 번째의 경우는 최하부의 지지격자만이 존재하는 경우를 가정한 것이다. 실제로 상하부의 지지격자는 중간부분의 지지격자들에 비해 응력 이완이 낮은 재료(inconel)를 이용하여 제조하므로 통상적으로 쓰이는 가정이다.

Table 1에서 보듯이 모든 지지격자가 온전히 존재하는 경우의 임계속도는 초당 100 m 이상의 속도

인데, 이것은 실현 불가능한 값이다. 냉각수가 원자로에 공급되는 속도는 발전소별로 다르지만 원자로 하부에서 대개 12 m/sec(40 ft/sec)내외이다. 그러나 초기에 이런 속도를 갖는 냉각수는 원자로 하부 구조물들을 통과하면서 더 낮은 속도로 공급이 되는데, 연료봉에 유입되는 냉각수의 속도는 약 6 m/sec(20 ft/sec)내외이다. 따라서 이러한 사실을 감안하고, 감쇠까지 고려한다면 현재 상용로의 축방향 냉각수 유동에 기인하여 연료봉의 운동이 불안정하게 될 확률은 극히 희박한 것으로 판단된다.

4.2 감쇠 및 유체 항력을 고려한 경우

유체에 의한 감쇠 등을 모두 고려한 경우에 대해서는 식 (13)의 고유치 문제를 구하여 안정성을 파악할 수 있다. 또한 유체와 상호작용을 하는 구조물은 감쇠의 영향을 많이 받으며, 건전성을 확보할 수 있는 냉각수의 공급속도 및 핵연료의 설계를 위해 정량적으로 어느 정도의 감쇠효과가 있는지에 대한 평가가 필요하다. 이 경우는 상기 해석에서 가장 취약한 조건인 하부 지지격자만 있는 구조물을 대상으로 하였다. 또한 연료봉 자체의 감쇠는 무시하였고, 유체의 항력계수를 0.2로 가정하였다.

복소 고유치(complex eigenvalue)로부터 감쇠비를 구할 수 있으며⁽⁹⁾, Table 2는 유체의 속도가 약 10 m/sec에 도달할 때까지의 감쇠량의 변화를 처음 다섯 개의 모드에 대하여 기록한 자료이다. 감쇠의 정도는 모드의 차수가 높을수록 저차 모드에 비해 낮아지나, 전반적으로 감쇠의 효과가 많다는 사실을 알 수 있다. 특히 첫 번째와 두 번째의 모드의 경우 최대 70%까지 감쇠됨을 알 수 있다. 그러나 유체의 속도가 계속해서 커지면 강성 혹은 감쇠가 음의 방향으로 증가하여 연료봉의 운동이 불안정해지는 경우가 발생할 수 있다.

Fig. 8은 처음 네 개의 모드에 대한 고유치의 변화를 도시한 그림이다. 가로축은 고유치의 실수부이며, 세로축은 고유치의 허수부에 해당한다. 유체의 속도가 없는 경우는 실수부가 모두 0임을 확인할 수 있다. 두 번째 모드의 경우 실수부가 양의 값을 갖는 경우가 발생하는데, 약 10.6 m/sec에서 실수부의 값이 점차로 증가하면서 약 19.8 m/sec에서 양의 값으로 향하고 있음을 알 수 있다. 즉, 전술했듯이 강성 혹은 감쇠가 음의 방향으로 증가하여 연료봉의

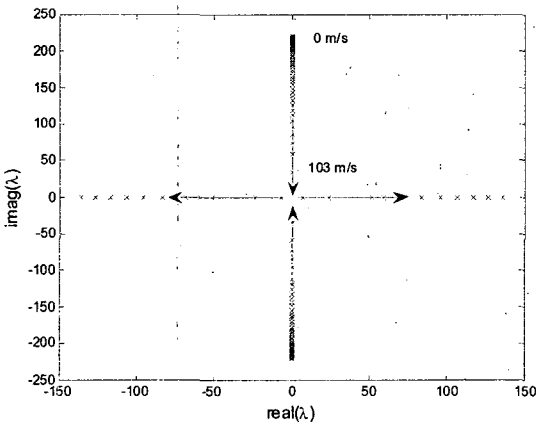


Fig. 7 Variation of the first modal frequency(X) in a fully supported condition

Table 1 Critical velocity

Case	Critical velocity (m/sec)
Fully supported	106.6
Top & Bottom grid supports only	18.2
Bottom grid support only	7.6

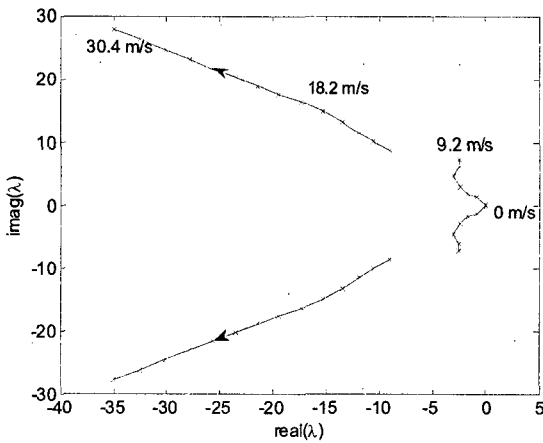
운동이 점차 불안정해짐을 의미한다. 그러나 19.8 m/sec의 임계 속도는 연료봉으로 유입되는 냉각수 속도 6 m/sec보다는 3배 이상 큰 값이므로 연료봉의 운동이 불안정해질 가능성은 작다.

이때 네 개의 고유치는 Fig. 8에서 보듯이 유체의 속도증가에 따라 연속적으로 변하지 않고 불연속 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉 첫 번째와 두 번째 모드는 유체의 속도가 9~10 m/sec 부근에서 도약(jump)이 발생하고, 세 번째와 네 번째 모드는 28~29 m/sec 부근에서 도약이 발생하고 있다. 이것은 서로 인접하는 모드간의 교차로 인해 발생하는 현상이며, Fig. 9와 같이 인접하는 모드를 겹쳐보면 명확히 알 수 있다. 이러한 모드간의 교차가 일어나는 구간의 냉각수 속도는 상용 원자로에서 공급되는 냉각수의

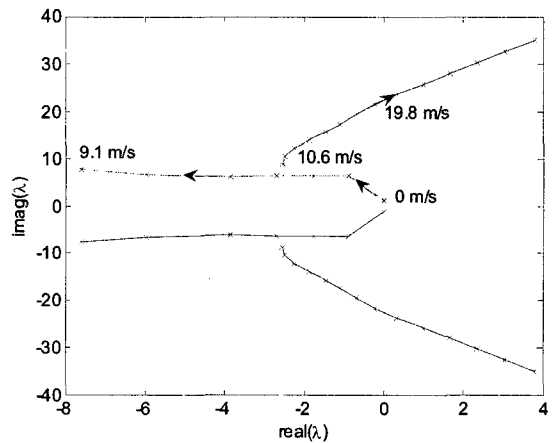
속도(약 6 m/sec) 보다는 높은 구간에서 발생하므로 실제로 일어날 확률은 희박할 것으로 평가된다.

Table 2 Expected damping ratio with respect to axial flow velocity

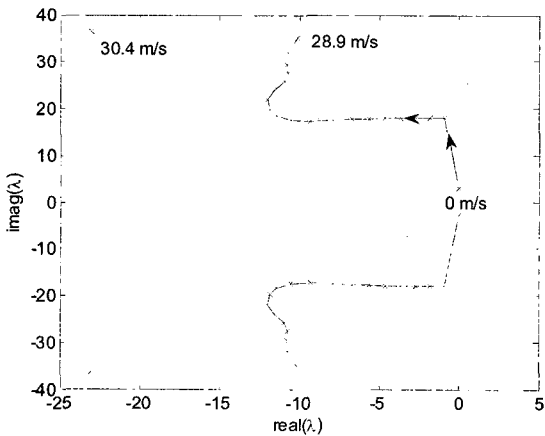
U (m/sec)	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4	ζ_5
1.5	0.562	0.135	0.050	0.026	0.026
3.0	0.664	0.263	0.099	0.052	0.052
4.6	0.639	0.383	0.149	0.078	0.078
6.1	0.538	0.527	0.199	0.105	0.105
7.6	0.385	0.670	0.250	0.132	0.132
9.1	0.324	0.709	0.302	0.159	0.159
10.7	0.721	0.279	0.356	0.187	0.187



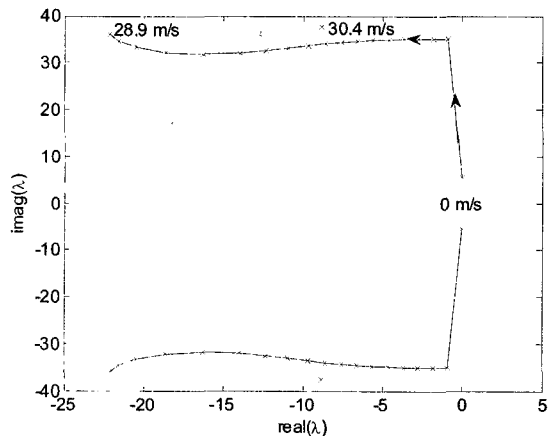
(a) First mode



(b) Second mode

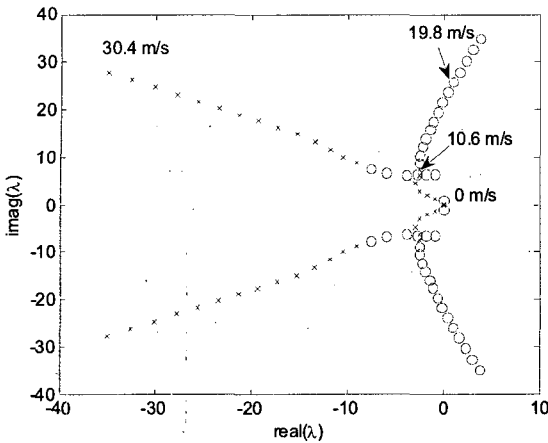


(c) Third mode

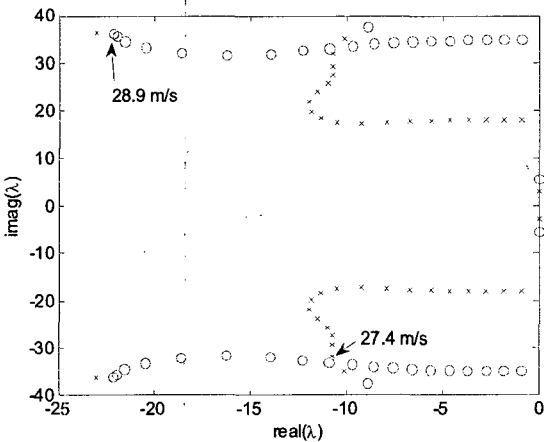


(d) Fourth mode

Fig. 8 Variation of modal frequency



(a) The first(X) and the second(O) modes



(b) The third(X) and the fourth(O) modes

Fig. 9 Crossing modes

5. 결 론

이 연구에서는 축방향 유체에 노출된 연료봉의 진동특성에 관한 연구를 수행하였다. 연료봉에 장입된 우라늄 펠렛의 핵분열시 발생하는 열을 운반하기 위하여 축방향으로 공급되는 냉각수는 연료봉의 진동을 야기한다. 이때 연료봉의 진동 특성을 규명하고자 연료봉을 불연속적으로 존재하는 스프링으로 지지된 시스템으로 모사하고, 축방향 유체의 영향을 반영하여 자유진동하는 계의 운동방정식을 도출하였다. 또한, 이 계를 축방향 압축하중을 받는 계와 등가임을 가정하면, 냉각수 속도의 크기와 방향이 일정한 경우, 제안된 모델의 경계조건은 모멘트는 없

으나 전단력이 존재함을 유추할 수 있었다.

도출된 운동방정식의 유한요소 해석 결과, 연료봉의 진동 특성은 축방향으로 공급되는 냉각수 속도에 의존함을 알 수 있었다. 연료봉의 운동이 불안정해질 수 있는 유체의 임계속도를 보수적으로 유추하고자 감쇠가 없는 경우로 해석했고, 이때의 임계속도는 최악의 조건을 고려했을 때보다 높아 설계여유가 있음을 알 수 있었다. 또한, 감쇠의 영향을 고려하면 임계속도는 실제보다 더욱 높아지므로 축방향 유동에 의한 연료봉의 불안정성이 나타날 확률은 매우 희박한 것으로 평가된다. 그러나 이러한 결과는 균일한 축방향의 유동을 가정하였을 때이며, 횡방향의 속도를 무시할 수 없을 때나 기포가 혼합된 이상유체(two phase)의 경우는 다른 상세한 해석으로부터 결과를 유추해야 할 것이다.

끝으로, 특정한 냉각수속도에서 서로 인접하는 모드간의 교차가 일어남을 확인할 수 있었으며, 교차가 일어나는 구간의 냉각수 속도는 상용 원자로에서 공급되는 냉각수의 속도 보다는 높은 구간에서 발생함을 확인하였다.

후 기

이 연구는 산자부(과제번호 : R-2005-1-391)의 지원으로 수행되었으며, 저자들은 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Au-Yang, M. K., 2001, "Flow-induced Vibration of Power and Process Plant Components, Professional Engineering Publishing".
- (2) Paidoussis, M. P., 1966, "Dynamics of Flexible Slender Cylinders in Axial Flow; Part 1 Theory", J. Fluid Mech. Vol. 26, No. 4, pp. 717~736.
- (3) Paidoussis, M. P., 1966, "Dynamics of Flexible Slender Cylinders in Axial Flow; Part 2 Experiments", J. Fluid Mech. Vol. 26, No. 4, pp. 737~752.
- (4) Paidoussis, M. P., 1969, "An Experimental Study of Vibration of Flexible Cylinders Induced by Nominally Axial Flow", Nuclear Science and Eng.,

Vol. 35, pp. 127~138.

(5) Chen, S. S., Wambsganss, M. W., 1972, "Parallel Flow Induced Vibration of Fuel Rods" ; Nuclear Eng. and Design, Vol. 18, pp. 253~278.

(6) Chen, S. S., 1975, "Vibration of Nuclear Fuel Bundles" ; Nuclear Eng. and Design, Vol. 35, pp. 399~422.

(7) Jang, Y. K., Kim, K. T. and Cho, K. Z., 2003, "An Experimental Study on PWR Nuclear Fuel Assembly Vibration" ; Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 82~87.

(8) Paidoussis, M. P., 1988, "Fluid-structure Interactions ; Slender structures and Axial Flow Volume 1" ; Academic press.

(9) Maia, N. M. M., Silva, J. M. M., 1988, "Theoretical

and Experimental Modal Analysis" ; Research Studies Press LTD.

(10) Blevins, R. D., 1977, "Flow-induced Vibration" ; Van Nostrand Reinhold Company.

(11) Ryu, K. W. and Park, C. Y., 2002, "Analysis of Fluid-elastic Instability in the CE-type Steam Generator Tube" ; Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 261~271.

(12) Ryu, B. J., Ryu, S. U. and Yim, K. B., 2004, "Eigenvalue Branches and Flutter Modes of a Discontinuous Cantilevered Pipe Conveying Fluid" ; Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 1041 ~1047.