

유동혼합기에 의한 회전유동을 고려한 핵연료 봉의 동적 안정성해석

Dynamic Stability Analysis of the Nuclear Fuel Rod Affected by the Swirl Flow due to the Flow Mixer

이강희* · 김형규* · 윤경호*

Kang-hee Lee, Hyung-kyu Kim, Kyung-ho Yoon

Key Words : 동적안정성(Dynamic Stability), 유동유발진동(Flow-Induced Vibration), 핵연료 봉(Nuclear Fuel Rod), 유동혼합기 또는 난류발생기(Flow Mixer or Turbulent Booster), 회전유동(Swirl Flow), Argand선도(Argand diagram), 고유치(Eigenvalue)

ABSTRACT

Long and slender body with or without flexible supports under severe operating condition can be unstabilized even by the small cross flow. Turbulent flow mixer, which actually increases thermal-hydraulic performance of the nuclear fuel by boosting turbulence, disturbs the flow field around the fuel rod and affects dynamic behavior of the nuclear fuel rods. Few studies on this problem can be found in the literature because these effects depend on the specific natures of the support and the design of the system. This work shows how the dynamics of a multi-span fuel rod can be affected by the turbulent flow, which is discretely activated by a flow mixer. By solving a state-space form of the eigenvalue equation for a multi-span fuel rod system, the critical velocity at which a fuel rod becomes unstable was established. Based on the simulation results, we evaluated how stability of a multi-spanned nuclear fuel rod with mixing vanes can be affected by the coolant flow in an operating reactor core .

1. 서 론

기 호 설 명

a_i : 유체의 밀도, 수력직경 그리고 점성계수와 관련된 상수, c_i ($i=1\sim6$) : 각각 질량, Coriolis 및 점성력에 의한 감쇠, 원심력과 두 개의 점성 수력에 의해서 형성되는 탄성력과 관련된 상수, D : v 와 \dot{v} 에 의해서 정의되는 상태변수, d_h : 수력직경, EI : 보의 굽힘 강성, k_i : 지지격자 스프링의 스프링 상수, k_{sw} : 유동회전에 의한 탄성지지의 지지강성, m : 보의 단위길이당 질량, M : 유체의 단위길이 당 부가질량, N_i : 3차 다항식의 형태로 정의되는 특정 유한요소 에 대한 형상함수, q_{sw} : 회전유동량, r : 봉의 반경방향 차원, R 은 원형 채널의 반경 혹은 시험관의 수력반경, S_M : 회전유동 혼합인자, S_0 : S_M 의 초기값, U : 축방향 균일 외부 채널 유속, U_{cr} : 유체탄성 불안정 임계유속, v : 보의 횡방향 변위, V_{lat} : 횡방향 균일유속, β : 회전유동 감소율, γ : 회전유동에서 환상유로 간격과 유체밀도, 유속에 따른 상수, ξ : 길이차원(x)에 대한 무차원 변수

원자로 노심의 고온, 고압 냉각재 유동에 의하여 핵연료 봉은 유발유발진동(Flow-induced Vibration)하고, 이로 인해 핵분열 물질의 1차적인 방호벽인 핵연료 봉의 피복관에 지지부와의 상대운동에 의한 기계적인 마멸 손상이 발생하게 된다. 이에 따라, 핵연료봉의 동적특성과 주변 부수로 유동, 그리고 이들의 상호작용을 이해하는 것은 핵연료의 건전성을 확보하고 성능개선을 위해 필요하다.

핵연료봉은 굽힘 및 회전스프링으로 연속지지 된 다점지지 유연 탄성보(Eular-Bernoulli beam)로 취급이 가능하며, 경계조건은 양단 자유-자유 조건이다. 핵연료의 수명은 3주기(1주기는 약 18개월)의 대략 4년 정도인데, 노심 내부의 열과 중성자 조사(neutron irradiation)의 영향에 따른 지지격자체의 이완(relaxation) 혹은 취화(degradation)로 노심 장전초기에도 지지점 손실(support looseness)이 발생되며 이로 인하여 연료봉의 동적특성이 변화되고, 큰 비선형성이 유발된다.

Paidoussis^(1,2)는 1970년대 이후 반세기 동안 축류에 놓인 봉과 관군의 유동유발진동 분야에서 큰 업적으로 남겼고, 연료봉의 유동유발 진동과 증기발생기의 세관 진동 연구에 적

† 이강희, 한국원자력연구원 선진핵연료기술개발부
E-mail : leekh@kaeri.re.kr
Tel : (042) 868-2298, Fax : (042) 863-0565

* 한국원자력연구원 선진핵연료기술개발부

용가능 운동방정식을 유도하였으며, 이론과 실험적인 검증을 통하여 일반화된 이론모델을 제안하였다. 근래에는 비선형 이론모델과 고차불안정(post-instability)문제에 관한 다양하고 심도있는 연구들이 진행되고 있다^(3,4). Chen과 Wemsbgass^(5,6)는 Paidoussis의 연구를 바탕으로 봉이 관군의 내부에 confined되어있을 때, 유체에 의한 동적 연성(부가질량이론)과 관군의 유동유발 진동특성에 관하여 이론적/실험적 연구를 수행하였다. 다만, 중간 지지격자체로 묶여있는 핵연료 집합체의 경우는 견고한 구조적 결합으로 인해 봉과 봉사이의 동적 연성의 영향을 미미하다. 박남규⁽⁷⁾는 Paidoussis의 이론모델을 핵연료봉의 유동유발 진동에 적용하여 지지점 손실에 의한 극한 경계조건에서의 임계유속과 유속증가에 따른 동적특성을 분석하고, 노심운전조건에서 지지점의 손실에 따른 연료봉의 유체탄성 불안정이 발생할 수 있는 가능성에 대해 언급하였다.

축류에 놓인 가늘고 긴 봉의 유동유발 진동에 대한 유력한 유발기구(Flow-induced vibration mechanism)인 힘기인 진동모델⁽⁸⁻¹⁰⁾에 근거할 때, 횡방향으로 작용하는 작은 유속 성분에 의해서도 상기 유연봉은 쉽게 불안정화(unstable)될 수 있으며, 유체탄성 불안정 임계에 대한 설계여유를 감소시킨다. 또한 최근 핵연료의 개발동향에 따라 열적성능 향상을 위해 부가적으로 추가되는 유동혼합기는 부수로 주변 유동장에 난류발생과 확산을 가속화시켜 연료봉의 진동과 마멸 손상 관점에서 많은 문제점을 야기하고 있다.

한편, 유동혼합기(flow mixer) 혹은 난류발생기(turbulent booster)는 지지격자 후류에 강력한 유동회전(swirl flow)을 발생시켜 연료봉의 동적특성에 크게 변화시키는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 연료봉의 동특성 분석 시에 상기의 영향을 고려해야 하지만, 유동혼합기에 의해 2차적으로 발생된 회전유동은 설계조건에 따라 달라지므로 일반화가 어렵고, 정량화된 이론모델을 제안하고 검증하기 난해한 이유 때문에 이제까지의 연료봉 동특성 연구에서 유동혼합기나 난류발생기에 의해 변화된 유동장의 특성을 고려한 공개된 선행연구는 없는 것으로 보인다.

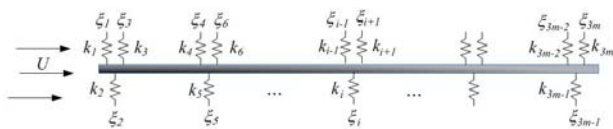


Fig. 1 Multi-span, elastically supported fuel rod model

본 연구에서는 노심 운전조건에 놓인 핵연료 봉을 균일한 비압축성 축류 유동장에 놓인 다점지지 유연 실린더 보로 가정하고, 유동혼합기에 의해서 발생된 유동회전을 음의 강성을 갖는 탄성기초 모델링 하였다. Paidoussis에 의해 제안된 기본운동방정식으로부터 지지격자의 탄성지지력과 유

동회전에 의한 수력항을 추가하고, 상태방정식 형태의 고유치 문제로 정식화 한 후, 유한요소법을 이용하여 핵연료봉의 고유진동수와 유동중 감쇄특성을 근사적으로 계산하였다. 계산된 결과로부터 운전 중 노심에서 핵연료봉이 불안정화되는 임계유속(critical velocity)을 추정하였고, 유동혼합기에 의한 유동회전의 영향을 고려하지 않은 경우와 비교하였다.

2. 기본운동방정식 및 회전유동 모델링

2.1 기본운동방정식

미소변위와 비압축성 균일 정상유동으로 가정하면, 연료봉(Fig. 1 참조)의 동적 안정성해석에 적용가능한 선형 운동방정식은 Paidoussis가 제안한 운동방정식을 근거로 아래와 같은 선형 편미분방정식으로 표현가능하다. 단, 문제의 단순화를 위해서 보의 점탄성, 중력, 축방향 하중, 외압의 영향은 무시한다.

$$Ebv'''' + (m + M)\ddot{v} + M^2v'' + 2M\dot{v}' + a_1U(\dot{v} + Uv') + a_2\dot{v} + \sum_{j=1}^n k_j v \delta(x - x_j) + F_{sw} = 0 \quad (1)$$

상기 식에서, (')와 (·)는 각각 위치와 시간에 대한 미분을 의미한다. 마지막에서 두 번째 항은 연료봉을 지지하는 지지격자 스프링에 의한 탄성력 항으로, k_i 는 개별 스프링의 스프링 상수를 의미하며, 단위스프링의 강성평가 시험을 통하여 실험적으로 결정된다. 연료봉의 경우, 지지점이 유한개의 이산(discrete) 위치에 존재하므로, Dirac delta함수를 이용하여 특이점함수(singularity function)로 스프링의 탄성지지력을 운동방정식에 포함하였다. 마지막 항의 F_{sw} 은 유동혼합기에 의해 발생된 유동회전에 의한 수력으로 다음 절에서 다루기로 한다. 유동에 의한 비점성수력과 점성수력은 각각 slender body 이론⁽¹¹⁾과 Taylor⁽¹²⁾의 unconfined flow relationship 이론을 이용하여 참고문헌에서와 같이 단순한 형태로 운동방정식에 반영하였다. 점성수력은 식 (1)에서 5번째와 6번째에 위치하는 두 개의 항으로 표현되었다.

상기의 편미분 방정식으로부터 직접 해를 도출하기 어렵기 때문에, 적절한 방식으로 이산화시킨 후 고유치에 대한 근사해를 얻어 낼 수 있다. 변분원리와 유한요소(Finite element) 근사방법을 이용하고, 몇 차례의 수학적 전개과정을 거치면, 아래와 같은 상태방정식 형태로 표현된 고유치문제로 유도할 수 있다. 상기 감쇄계의 복소 고유치는 Complex conjugate 형태로 나타나며, 허수부의 음수 값은 물리적으로 의미가 없어 통상 무시된다.

$$\{\dot{D}\} = [A]\{D\} \quad (2)$$

2.2 유동회전 모델링

여기서, $\{D\} = [v, \dot{v}]^T$, $[A] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix}$

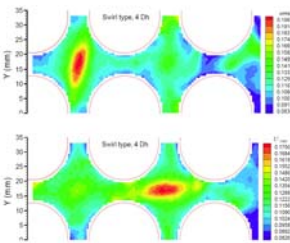
식(2)에서 $[M]$, $[C]$ 그리고 $[K]$ 는 각각 아래와 같이 표현된다. $[0]$ 과 $[I]$ 는 각각 n 차원의 정방 0행렬과 정방 단위행렬을 나타낸다. K_{ij} 에 관한 식의 마지막 항에서 적분구간으로 표기된 ξ 기호는 유동회전에 의해 영향을 받는, $x/d_h < 40$ 이내에 위치한 요소에 대한 적분을 나타낸다.

$$\begin{aligned} M_{ij} &= c_{1,ij} \int_{-1}^1 N_j'' N_i d\xi, \\ C_{ij} &= \int_{-1}^1 [c_{2,ij} N_j' + c_{3,ij} N_j] N_i d\xi, \\ K_{ij} &= \int_{-1}^1 [c_{4,ij} N_j'' N_i'' - c_{5,ij} N_j' N_i' + c_{6,ij} N_j N_i] d\xi \\ &+ k_i N_j(\xi_i) N_i(\xi_i) + \int_{-1}^* k_{sw,ij} N_j N_i d\xi \end{aligned} \quad (3)$$

축류에 잠겨 진동하는 유연봉의 동적안정성은 고유치의 실수부 부호에 의해서 판단된다. 즉, 실수부가 음의 값이면 보는 안정한 상태이고, 양의 값을 가지면 보는 불안정하다. 여기서, 허수부가 0이 아닌 값을 가지면 좌굴과 같은 정적 불안정현상(계의 강성이 0이 되어 발생됨)인 발산(divergence)형태의 불안정이, 0의 값을 가지면 동적 불안정인 flutter형태의 불안정이 발생한다고 말한다.



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Mixing vane, (b) flow distribution in a subchannel downstream, $4d_h$, of the mixing vane.

지지격자의 후미에 설치되는 유동혼합기는 부수로에 강력한 난류를 형성/확산시켜 부수로 내부와 부수로 간의 유동혼합을 촉진시킨다. 이제까지 난류발생과 부수로 사이의 유동혼합을 촉진시키기 위한 다양한 형태의 유동혼합기가 개발되었고, 특정 유동혼합기 설계와 관련된 부수로 유동분포를 이해하려는 많은 연구들이 있어왔다^(13,14). Fig. 2는 특정 형태의 유동혼합기와 유동혼합기 후류에서 발생하는 전형적인 유동분포를 도시한다. 부수로 내부는 회전유동이 지배적이며, 회전유동의 영향은 이격거리에 따라 지수함수적으로 감소한다.

환상유로 내부에 위치한 실린더의 유동유발 진동문제이기는 하지만 채널 내부에서 형성된 회전유동이 실린더의 동특성에 미치는 영향에 관한 연구로, Langthjem⁽¹⁵⁾은 평면진동과 비압축성 층류유동으로 가정하여, 환상유로에서 형성된 회전유동에 의해 실린더의 횡방향으로 작용하는(평면진동 가정에 의하여 실린더의 횡방향으로 작용한다고 볼수 있음) 수력을 음의 지지강성을 갖는 탄성기초(elastic foundation)로 식 (4)과 같이 모델링하였다. 여기서, 지지강성 k 는 유동회전되는 유량(swirl flow rate)의 제곱에 비례하고, γ 는 환상유로의 간극, 유체밀도, 유속의 함수로 표현된다.

$$F_{sw} = k_{sw} v = \gamma d_{sw}^2 v \quad (4)$$

그러나, 핵연료 내 부수로의 경우 혹은 단순한 환상유로 내 실린더라 해도, 유동은 난류이며 유동회전이 발생되면 실린더는 3차원(특정 패턴의 궤적을 만듦)으로 진동하게 되는데, 이것은 다시 문제를 복잡하게 하고, 운동방정식의 기본 가정에 위배된다. 결국, 유동회전에 의한 영향을 받는 연료봉의 진동문제를 층류유동과 평면진동의 문제로 가정하는 것은 지나친 단순화의 우려가 있으나, 연료봉의 동특성해석에 적용된 이제까지의 가정(미소진동, 균일 정상유동 등)을 고려할 때, 기초해석(preliminary study)과 유동에 대한 이론모델의 영향성 검토로 문제를 한정하면, 상기의 가정은 일견 타당하다.

식에 포함된 회전유동 인자인 회전유동 유량은 회전유동 혼합인자(S_M)⁽¹⁶⁾에 의해서 식 (5)와 같이 정의될 수 있다. 회전유동 혼합인자는 입구 축방향 균일유동과 부수로 중심선을 따라 적분한 회전유동의 비로 정의된다.

$$S_M = S_0 e^{-\beta x/d_h} \quad (5)$$

식 (5)에서 x 는 날개로 부터의 이격거리를, β 는 회전유동감소율을 나타내며, d_h 는 수력직경을 의미한다. 특정 형태의 혼합날개와 이로 인해 발생된 회전유동은 초기 회전유동 혼

합인자 S_0 와 감소율 β 에 의해서 유일하게 정의될 수 있다. 상기의 두 값(S_0 와 β)은 식 (6)과 같이 S_M 의 실험적인 상관식을 통해서 결정되는데, Fig. 3은 본 해석에서 이용된 실험 조건에 따른 두 가지의 S_M 모델곡선을 나타낸다. 동일한 유동혼합기 설계에 대해 모델 A는 부수로 환경(연료봉의 집합체 단위)에서 얻어진 결과이며, B는 원형채널에 놓인 단일봉(유동혼합기를 갖는 지지격자로 지지된)에 대한 모델시험⁽¹⁶⁾으로부터 얻어진 결과이다. 부수로 환경에서 시험된 모델 A의 감소율이 큰 이유는 인접 연료봉과 지지격자 등에 의한 영향(혼합유동의 소산)으로 판단된다.

$$S_M = \frac{\int_0^R r^2 V_{lat} U dr}{R \int_0^R r U^2 dr} \quad (6)$$

식 (6)에서 U 는 축방향 균일유속, V_{lat} 는 횡방향 균일유속, R 은 원형 채널의 반경 혹은 시험관의 수력반경을 의미한다.

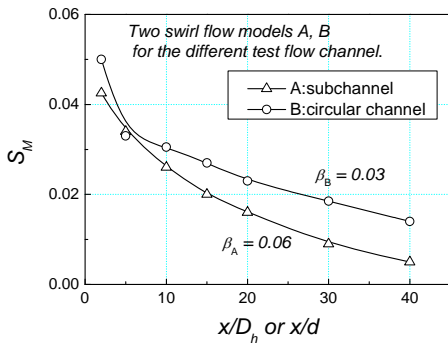
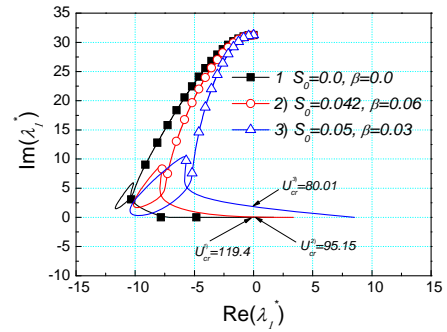


Fig. 3 Two swirl flow models characterized by S_0 and β .

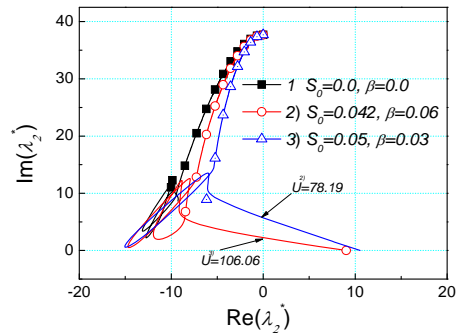
3. 해석결과

Fig. 4는 모든 지지점에서 안정적으로 지지된 연료봉의 1차와 2차 고유치에 대한 Argand 선도를 통하여, 유동혼합기에 의한 회전유동의 고려와 회전유동 혼합인자의 값이 연료봉의 동특성에 미치는 영향을 보여준다. Argand 선도는 계(system)의 고유치 실수부와 허수부를 각각 x축과 y축으로 도시하여, 유속변화에 따른 봉의 동특성을 나타내는 선도이다. Argand 선도에 표시된 복소 고유치의 유속에 따른 궤적으로부터 계의 선형 안정성과 1차적인 임계유속을 평가할 수 있다. 복소 고유치의 허수부와 실수부는 각각 보의 고유진동수와 감쇄특성을 의미하는데, 허수부의 경우 해당 주파수 값(Hz)을 나타낼 수 있도록 수치화하여 표현하였다. 유속에 따른 고유치 허수부와 실수부 거동은 임계유속 이전에 허수부가 0의 값을 갖는 유속까지 각각 일정하게 감소되

거나 증가되는 경향을 보이다 임계유속 근방과 이후에서 도약과 모드교환에 따라 급격히 변화된다.



(a) first mode



(b) second mode

Fig. 4 Argand diagram of the lowest two eigenvalues for the fully supported fuel rod; (1) the swirl effect is neglected, (2) $S_0=0.042$, $\beta=0.06$ (subchannel test) and (3) $S_0=0.05$, $\beta=0.03$ (circular channel test).

Fig. 4(a)에서 고유치 실수부가 음의 값에서 양의 값으로 변화되는 위치인 각각 유속 $U = 119.1, 94.6, 75.5$ m/s에서 봉의 1차 모드에 대한 divergence형의 유체탄성 불안정이 발생되고 있으며, 각 경우의 임계유속 차이는 회전유동을 고려하지 않은 경우를 기준으로 각각 20.6%, 36.6%이다. 결과적으로, 연료봉의 임계 동특성은 회전유동을 고려함에 따라, 그리고 회전유동 혼합인자의 감소율이 증가됨에 따라 각각 21%와 약 37%의 임계유속 값의 감소를 나타내었다. 흥미로운 점은 주어진 시험유속의 범위에 대하여 회전유동을 고려하지 않은 경우는 Fig. 2(b)에서와 같이 2차 모드의 불안정이 나타나지 않으며, 회전유동에 의한 영향이 클수록 (회전유동 혼합인자와 감소율) 고유치 허수부의 감소비율이 크다. 이것은 연료봉의 동특성 분석을 수행할 때, 회전유동을 고려하는 것은 해석결과의 보수성을 증가시키는 방향으로 작용함을 의미한다. 모든 지지점에서 안정적으로 지지된 환

형 실린더 연료봉의 임계유속은 원자로 내 운전유속(약 4~5 m/s)과 비교했을 때 비현실적으로 큰 값이지만, 다른 요인들, 예를 들어 지지점 손실에 따른 연료봉 지지강성 저하 등에 의하여 임계유속이 급격히 감소하게 될 경우, 진동설계 관점에서 핵 연료봉의 동적안정성은 중요한 건전성 평가 사항이 된다.

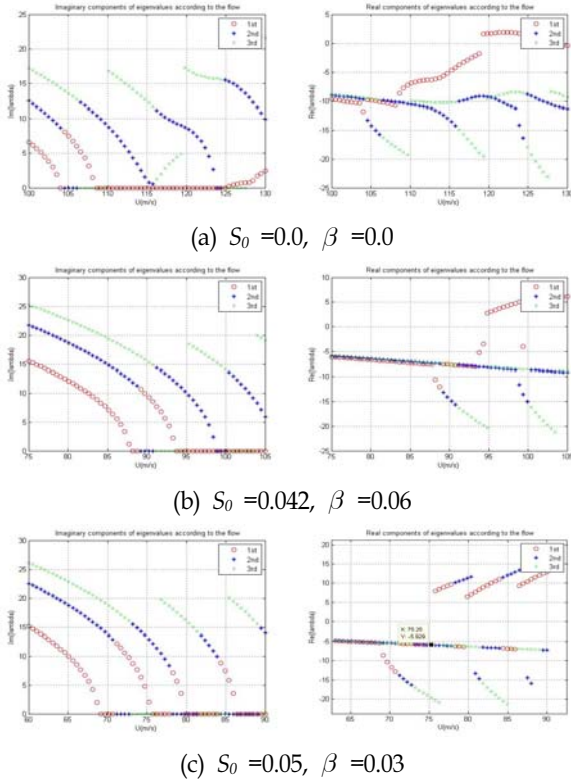


Fig. 5 Imaginary and real value of the first three eigenvalues for the fuel rod around critical velocity, U_{cr} .

Fig 5는 상기 문제에서 논의된 세 가지 경우, 즉 회전유동의 영향을 고려하지 않은 경우(경우1), 회전유동을 고려하되 회전유동혼합인자를 $S_0=0.042$, $\beta=0.06$ 으로 설정한 경우(경우2), 회전유동혼합인자를 $S_0=0.05$, $\beta=0.03$ 으로 설정한 경우(경우3)에 대하여 불안정 임계유속 근방에서의 연료봉 동적거동을 나타낸다. 이것은 유속에 따른 고유치 허수부(연료봉의 고유진동수)와 실수부(감쇄비)의 변화를 확인하기 위하여 Argand선도 대신에 “유속대 고유치 변화”선도를 이용하여 표현하였다. 정지유체 내에서 최초 31.3 Hz이던 1차 고유진동수는 유속증가에 따라 일정하게 감소하여 각각 유속 $U = 110.8$ m/s, 94.9 m/s, 69.23 m/s에서 고유치 허수부가 0이 되고, 계의 1~3차 모드 감쇄비는 상기 유속까지 동일한 값으로 증가(감쇄비는 고유치 실수부의 음수로 표기됨)되다가 각 모드별로 모드교환과 도약(jumping)이 발생된다. 임계유속 이전에 유속변화에 따른 모드 간의 교차와 도

약현상은 참고문헌⁽⁷⁾의 기존 연료봉에 대한 안정성 평가 및 동특성 해석결과에서도 관찰되며, 이러한 이상 불안정 현상의 추론과 원인규명에 대한 추가적인 연구가 요망된다. 불안정 임계유속 이상의 유속범위에서 발생하는 모드교환과 도약현상은 회전유동을 고려한 경우, 또 큰 회전유동 혼합인자를 사용한 경우 빈번하게 발생되고 있다. 그러나, 연료봉 동적 평형점(equilibrium point)을 근거로 확장된 선형 운동방정식을 기본으로 수행된 안정성 분석이기 때문에, 임계유속 이상의 동적거동은 물리적인 의미를 갖지 못한다. 불안정 이후 불안정발생과 동적거동에 관해서는 비선형 운동방정식을 이용한 임계유속의 추정과 해석이 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 유동혼합기에 의한 회전유동의 영향을 고려하여 핵연료봉의 동특성 분석을 수행하였다. 계산된 결과로부터 운전 중 노심에서 핵연료 봉이 불안정화되는 임계유속(critical velocity)을 추정하였고, 유동혼합기에 의한 영향을 고려하지 않은 경우와 비교하였다. 모든 지지점에서 안정적으로 지지된 연료봉의 임계유속은 유동회전의 영향을 고려한 경우, 약 37 % 까지 감소되는 것으로 예측되었다. 결국 핵연료봉의 동특성을 분석할 때, 부수로의 유동분포에 큰 영향을 미치는 유동혼합기에 대한 2차 적인 영향을 반영할 필요성이 있다. 향후, 부수로 내 유동장애물과 이에 따른 영향, 그리고 가정된 회전유동 이론모델을 검증하고 개선/보완하기 위한 노력이 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 기술개발사업인 초고연소도 고성능 핵연료 기술개발(대과제) 이중냉각핵연료구조 설계기술개발(세부과제)의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- (1) Paidoussis, M.K., 1998, "Fluid-Structure Interactions; Slender structure and axial flow", Academic Press, Vol. 1.
- (2) Paidoussis, M.K., 2004, "Fluid-Structure Interactions; Slender structure and axial flow", Elsevier Academic Press, Vol. 2, pp. 787-1220.
- (3) Lopes, J.-L., Paidoussis, M.P., Semler, C., 2002, "Linear and nonlinear dynamics of cantilevered cylinders in axial

- flow. Part 2: the equation of motion, *Journal of Fluids and Structure*", Vol. 16, pp. 715-737.
- (4) Paidoussis, M. P., 2005, "Some unresolved issues in fluid-structure interactions", *Journal of Fluids and Structure*, Vol. 20, pp. 871-890.
- (5) Chen, S.S., Wambsganss, M.W., 1972, "Parallel flow induced vibration of the fuel rods", *Nuclear engineering and design*, Vol. 18, pp. 253-278.
- (6) Chen, S.S., 1975, "Vibration of nuclear fuel bundles, *Nuclear Engineering and Design*", Vol. 35, pp. 399-422.
- (7) Park, N.K. et al, 2007, "Eigenvalue variation of fuel rod exposed to uniform axial flow", *ICSV14 : 14th Int. Congress on Sound and Vibration*, Cairns, Australia.
- (8) Kang, H.S., Song, K.N., Kim, H.K., Yoon, K.H., 2003, "Axial-flow-induced Vibration for a rod supported by the translational springs at both ends, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 220, pp. 83-90.
- (9) Reavis, J.R., 1969, "Vibration correlation for maximum fuel-element displacement in parallel flow", *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 38, pp. 63-69.
- (10) Kang, H.S., 1998, "Vibration mechanism of fuel rod in axial flow", *KAERI/TR-1124/98*, KAERI, pp. 18-48.(In Korean)
- (11) Lighthill, M. J., 1960, "Note on the swimming of slender fish", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 9, No. 19, pp. 305-317.
- (12) Taylor, G.I., 1952, "Analysis of the swimming of long and narrow animals", *Proceedings of the Royal Society(London)*, A. 214, pp. 158-183.
- (13) Chang, S. K., 2006, "Experimental Study on the Turbulent Mixing in a Rod Bundle Array with Vaned Spacer Grid", Thesis of Ph. D, The Graduate School of Korea Univ.(In Korean).
- (14) Yang, S. K., Chung, M. K., 1998, "Turbulent flow through spacer grids in rod bundle", *Journal of Fluids Engineers*, Vol. 120, pp. 786-791.
- (15) Langthjem, M. A., 2006, "Influence of swirl on the stability of a rod in annular leakage flow", *Journal of fluids and Structures*, Vol. 23, pp. 329- 337.
- (16) In, W. K., et al, 2000, "CFD Application to the optimal design of flow mixing devices in a nuclear fuel assembly", *NTHAS2:2nd Japen-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulic and Safety*, Fukuoka, Japen, October 15-18.