

축류에 놓인 환형 실린더 연료봉의 동적 안정성 기초해석

이강희*·김형규**·윤경호**·이영호**·김재용**

Dynamic Stability Analysis of Annular Cylindrical Fuel Rod in Axial Flow

Kang-hee Lee*, Hyung-kyu Kim**, Kyung-ho Yoon**, Young-ho Lee** and Jae-yong Kim**

Key Words : Dynamic Stability(동적안정성), Dual-Cooled(이중냉각), Nuclear Fuel Rod(핵연료봉), Annular Cylinder(환형실린더), Axial flow(축류유동), Eigenvalue(고유치), Finite Element Approximation(유한요소 근사법)

Abstract

Dual-cooled fuel with inner and outer flow channel was proposed for high burup, next generation nuclear fuel design. The annular cylinder of dual cooled fuel has higher structural strength compared to the conventional one, but also have concerns about flow induced vibration due to an additional flow of inner channel and the difference of flow velocity in between inner and outer channel. In this study, the dynamic stability of flexible, annular cylinder was evaluated according to the flow variation and compared to the that of the conventional PWR fuel rod. Centrifugal and Coriolis force by the additional flow in the inner channel were added in the dynamic equation of flexible beam in uniform, external, and axial flow. Complex eigenfrequency was calculated by the finite element method. Stability margin of annular cylinder compared to the solid cylinder and change of the dynamic characteristic are presented and discussed as a analysis results.

1. 서론

고연소도 고출력이 가능한 차세대 경수로용 핵연료의 후보형상으로 연료봉의 안과 밖에 유로를 갖는 환형 실린더형 이중냉각연료(Dual-Cooled Fuel)가 제안되었다[1]. 기존 연료봉에 비해 외부직경이 현저히 증가된 이중냉각 연료봉은 정적인 구조강성 측면에서 유리하나, 부가적인 내부유동과 내/외 부수로의 유속차이(또는 불균형)에 따른 영향으로 핵연료봉의 동적안정성과 진동설계 관점에서는 기술적인 문제점을 야기할 것으로 우려된다.

핵분열 물질의 1차적인 방호벽인 핵연료 피복관에 이산화우라늄(UO₂) 소결체를 압입시켜 구성하는 핵연료봉은 굽힘 및 회전스프링(지지격자 스프링과 덤플)으로 연속지지 된 다점지지 유연 탄성보(Eular-Bernoulli Beam)로 취급이 가능하며, 경계조건은 양단 자유-자유 조건이다. 핵연료의 수명은 3주기(1주기는 18개월)의 대략 4년 정도인데, 노심 내부의 열과 중성자 조사(neutron irradiation)의 영향에 따른 지지격자체의 이완(relaxation) 혹은 취화(degradation)로 장전초기에도 지지점 손실(support looseness)이 발생되며 이로 인하여 연료봉의 동적특성이 변화되고, 큰 비선형성이 유발된다.

Paidoussis[2, 3]는 1970년대 이후 반세기 동안 축류에 놓인 봉과 관군의 유동유발진동 분야에서 큰 업적으로 남겼고, 연료봉의 유동유발 진동과 증기발생기의 세관 진동 연구에 적용가능한 운동방정식을 유도하였으며, 이론과 실험적인 검증을 통하여 일반화된 이론모델을 제안하였다. 근래에는 비선형 이론모델과 고

차불안정(post-instability)문제에 관한 다양하고 심도있는 연구들이 진행되고 있다[4, 5]. Chen과 Wembsgass[6, 7]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[8]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.

이중냉각 연료봉의 유동유발 진동문제는 내부유동이 존재한다는 측면에서, 내부 유체흐름을 갖는 파이프의 진동문제와 유사성이 크지만, 내/외 간극의 형성과 변화, 그리고 내부 삽입 소결체의 영향으로 인하여 봉의 강성이 변화되고 단면이 비균질하여 상대적으로 복잡한 거동을 보인다.

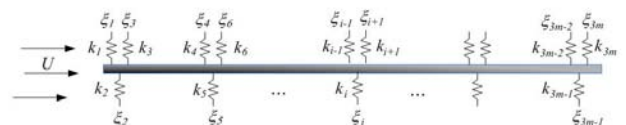


Fig. 1 Multi-span, elastically supported fuel rod model

본 연구에서는 환형 연료봉의 축방향 유속변화에 따른 동적 안정성을 평가하여 기존연료봉과 비교하고, 내외 유속차에 따른 동특성 변화를 분석하였다. 기초해석의 관점에서 이중냉각 봉이 균질한 환형 단면을 갖는 것으로 가정하고, 간극과 내 삽입 소

* 한국원자력연구원 선진핵연료기술개발부, leekh@kaeri.re.kr

** 한국원자력연구원 선진핵연료기술개발부

결체에 의한 영향을 제외하였다. 축류에 놓인 유연 보의 진동에 대한 기본 유동유발진동 방정식에, 내부 유동에 의한 원심력과 Coriolis력을 포함하고, 유한요소법을 이용하여 다점지지 유연보의 복소 고유치를 계산하였다. 계산된 결과로부터 기존 연료형상 대비 환형 실린더의 유동유발 진동에 대한 안정성 여부를 평가하고, 최대 내/외 유속 차에서의 환형봉 동적특성을 평가하였다.

2. 기본운동방정식 및 안정성해석

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

$$EIv'''' + (m + M)\ddot{v} + M(U^2 + V^2)v'' + 2M(U + V)\dot{v}' \quad (1)$$

$$+ a_1 U(\dot{v} + Uv') + a_2 \dot{v} + \sum_{j=1}^n k_j v \delta(x - x_j) = 0$$

상기 식에서, (1)와 (1)는 각각 위치와 시간에 대한 미분을 의미하며, 사용된 기호의 의미는 아래와 같다.

- EI : 보의 굽힘 강성,
- m : 보의 단위길이당 질량,
- M : 보의 단위길이당 부가질량,
- U : 축방향 균일 외부체널 유속,
- V : 축방 균일 내부체널 유속,
- v : 보의 횡방향 변위,
- a_i : 유체의 밀도, 수력직경 그리고 점성계수와 관련된 상수

마지막 항은 연료봉을 지지하는 지지격자 스프링에 의한 탄성력 항으로, k_i 는 개별 스프링의 스프링 상수를 의미하며, 단위 스프링의 강성평가 시험을 통하여 실험적으로 결정된다. 연료봉의 경우, 지지점이 유한개의 이산(discrete) 위치에 존재하므로, Dirac delta 함수를 이용하여 특이점함수(singularity function)로 스프링의 탄성지지력을 운동방정식에 포함하였다. 유동에 의한 비점성수력과 점성수력은 각각 slender body 이론[7]과 Taylor[8]의 unconfined flow relationship 이론을 이용하여 참고문헌에서와 같이 단순한 형태로 운동방정식에 반영하였다.

내부 유동에 의해 추가되는 Coriolis력과 원심력(내부유동의 점성력에 의한 횡방향 작용력은 무시함)은 각각 균일, 정상 내부 유동에 의해 파이프 내면에 작용하는 비점성 수력의 형태로 가정하여 운동방정식에 포함시키고, 외부유동과의 유속차이는 경유의 수로 구분하여 최대 30 % 까지 차이가 발생한다고 가정하였다. 이것은 연료봉의 내/외 부수로에서 발생하는 압력손실에 기인된 것으로, 핵연료의 부수로 열수력 해석코드를 이용하여 계산된 결과를 보수적인 해석관점에서 확장한 (10%) 수치이다.

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 고유치문제에 유도할 수 있다. 상기 감쇄계의 복소 고유치는 Complex conjugate 형태로 나타나며, 허수부의 음수 값은 물리적으로 의미가 없어 통상 무시된다.

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

여기서,

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

상기 식에서 $[M]$, $[C]$ 그리고 $[K]$ 는 각각 아래와 같이 표현된다.

$$M_{ij} = c_{1,ij} \int_{-1}^1 N_j'' N_i d\xi,$$

$$C_{ij} = \int_{-1}^1 [c_{2,ij} N_j' + c_{3,ij} N_j] N_i d\xi, \quad (3)$$

$$K_{ij} = \int_{-1}^1 [c_{4,ij} N_j'' N_i'' - c_{5,ij} N_j' N_i' + c_{6,ij} N_j N_i'] d\xi$$

$$+ k_i N_j(\xi_i) N_i(\xi_i)$$

식(3)에서 사용된 기호의 의미는 아래와 같다.

- D : v 와 \dot{v} 에 의해서 정의 되는 상태변수,
- $[0]$ 과 $[I]$: 각각 n차원의 0과 단위행렬,
- N_i : 3차 다항식의 형태로 정의되는 특정 유한요소에 대한 형상함수,
- $c_{i(i=1 \sim 3)}$: 각각 질량, Coriolis 및 점성력에 의한 감쇄와 관련된 상수,
- $c_{i(i=4 \sim 6)}$: 각각 원심력과 두 개의 점성 수력에 의해서 형성되는 탄성력과 관련된 상수,
- k_i : 지지격자 스프링의 스프링 상수.

축류에 잠겨 진동하는 유연봉의 동적안정성은 고유치의 실수부(보의 고유치 실수부는 계의 감쇄특성을 나타냄) 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.

3. 해석 및 결과

3.1 환형 연료봉의 동적안정성

Fig. 2는 내외 부수로 유속차이가 없고, 모든 지지점에서 안정적으로 지지된 환형 연료봉의 1 ~ 3차 고유치에 대한 Argand 선도를 도시한다. Fig. 2(a)는 고유치의 궤적을 무차원 유속범위 0 ~ 23.27(100 m/s)까지 0.465(약 2 m/s) 간격으로, Fig. 2(b)는 불안정 임계유속 근방에서 0.116(약 0.5 m/s) 간격으로 도시한 그림이다. 단, 상기 수치에서 무차원 유속은 $u = (MEI)^{1/2} UL$ 로 정의하며, M 과 L , 그리고 EI 는 각각 유체에 의한 부가질량과 봉의 길이, 그리고 보의 굽힘강성을 나타낸다. Argand 선도는 계(system)의 고유치 실수부와 허수부를 각각 x축과 y축으로 도시하여, 유속변화에 따른 봉의 동특성을 나타내는 선도이다. 상기 선도에 표시된 복소 고유치의 유속에 따른 궤적으로부터 계의 선형 안

정성과 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. 상기 선도에서 고유치 실수부가 음의 값에서 양의 값으로 변화되는 위치인 무차원 유속 $u = 20.19$ (86.78 m/s)에서 봉의 1차 모드에 대한 divergence형의 유체탄성 불안정이 발생되고 있다. 안정적으로 지지된 환형 실린더 연료봉의 임계유속 값은 원자로 내 운전유속(약 4-5 m/s)과 비교했을 때 비현실적으로 큰 값이지만, 기존 연료봉에 대한 임계유속 28.57(119.4 m/s)에 비해서 약 30 % 정도 감소된 값으로 계산되었다. 이것은 진동설계 관점에서 이중냉각 연료봉이 기존 연료봉에 비해 약 30 % 정도 작은 설계여유를 갖음을 의미한다.

정지유체 내에서 최초 40.72 Hz이던 1차 고유진동수는 유속 증가에 따라 일정하게 감소하여 무차원 유속 $u = 18.2$ (78.0 m/s)에서 고유치 허수부가 0이 되고, 계의 1차 모드 감쇄비는 $u=18.8$ 까지 증가된다. 허수부가 0이 된 이후에 복소 고유치가 x 축 상의 순(pure) 실수로만 나타나는 것은 흥미로운 일이다. 무차원 유속 $u = 18.8$ (80.8 m/s)에서 2차 모드와의 모드교환(mode exchange, 2차 모드의 허수부가 0이 되고, 1차 모드였던 고유치의 값이 2차 모드의 값으로 바뀌어 나타남)이 발생되며, 교환된 1차 모드의 허수부는 무차원 유속 $u = 19.9$ (85.54 m/s)에서 다시 0이 된다. 유속이 임계유속까지 증가된 이후, 무차원 유속 20.79 (89.15 m/s)에서 1차 모드가 다시 안정되는 것처럼 보이나 이것은 이미 불안정화 된 1차가 모드가 2차 모드로 다시 재 변환(mode re-exchange)되는 것이다. 이것은 Fig. 3(a, b)에서 차원 유속범위 75~95 m/s까지 도시한 고유치 허수부 및 실수부의 유속에 따른 변화도에서 확인할 수 있다. 임계유속 이전에 유속변화에 따른 모드 간의 교차와 도약현상은 참고문헌[8]의 기존 연료봉에 대한 안정성 평가 및 동특성 해석결과에서도 관찰되며, 이러한 이상 불안정 현상의 추론과 원인규명에 대한 추가적인 연구가 요망된다.

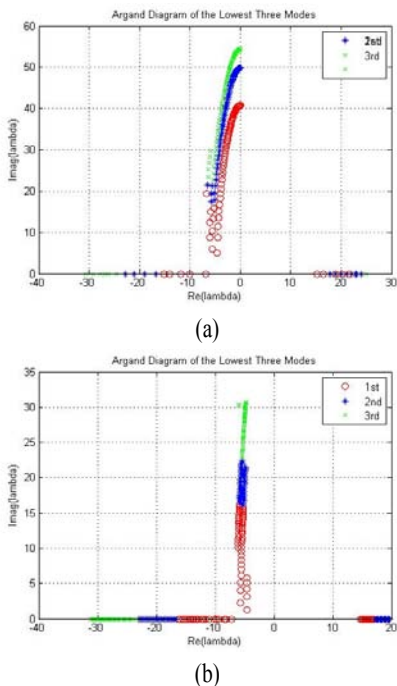


Fig. 2. Argand diagram of the first three eigenvalues for the fully supported, dual-cooled fuel rod with the flow velocity range of (a) 0~100 m/s by 2 m/s and (b) 75~92 m/s by 0.5 m/s.

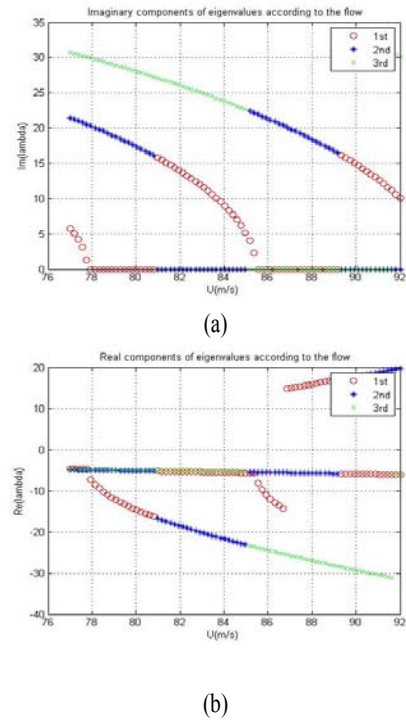


Fig. 3. Imaginary(a) and real(b) components of the eigenvalues around the critical flow velocity(75~92 m/s, fine plot).

Fig. 4는 지지점 손실에 의하여 경계조건이 변화되었을 때, 환형 연료봉의 두 가지 심화된 지지조건에 대한 Argand 선도를 도시한다. 심화된 경계조건이란 출력이 상대적으로 높아 지지점 간극 형성(지지격자체의 열 및 조사변형에 의한) 가능성이 큰 중간 지지점에서 심각한 지지점 손실(양 끝단을 제외한 모든 지지점에서)이 발생되어, 결국에는 양단 탄성지지 혹은 한 단 외팔탄성지지로 대상 연료봉이 지지된 경우를 말한다. 실제, 핵연료봉의 하단 지지격자 체는 열 또는 중성자 조사에 의한 변형저항성이 중간 지지격자체(지르코늄 합금)에 비해 상대적으로 큰 재료(인코넬 계열의 합금)를 사용하고 있다.

두 가지 지지조건에 대하여 독립적으로 계산된 임계유속은 각각 무차원 유속 5.68(24.4 m/s), 4.7(20.2 m/s)로 모든 지지점에서 안정적으로 지지된 경우(20.19)에 비하여 약 60 % 정도 작은 값으로 예측되었다. 환형 연료봉 역시(기존연료봉과 마찬가지로) 지지점 손실 등으로 인하여 불안정 임계유속이 운전유속의 범위까지 낮아질 수 있는 가능성이 존재하나, 기존 연료봉에 대한 감소비율(80 % 이상)보다는 상대적으로 크지 않아 지지점 손실에 따른 상대적인 안정성 여유는 큰 것으로 판단된다.

3.2 내/외 수로 유속차이에 따른 영향

상기 해석의 양단 탄성 지지 경계조건에 대해 내외 부수로 유속차이에 따른 동특성 변화를 파악하기 위해서 최대 30 % 까지 내/외부수로 간의 유속차이가 발생될 때 독립적인 동특성 해석을 수행하고 임계유속을 평가하였다. 인수변화에 대한 감도특성을 확인하기 위해 내/외 부수로 유속차이를 5 %, 10 %, 20 %, 30 %로 설정하여 해석을 수행하였다.

Fig. 5는 내부수로의 유속이 외부수로의 유속 대비 20 % 클 때, 유속증가에 대한 환형 연료봉의 고유치 실수부 선도를 도시한다. 임계유속의 상기 내/외 유속차이(5 %, 10 %, 20 %, 30 %)에 대하여 각각 차원유속 22.95 m/s, 23.12 m/s, 23.52 m/s, 23.94

m/s로 계산되었으며, 해석결과와 경향은 대동소이하다. 따라서, 기초 및 선행해석의 관점이기는 하나 환형봉의 내/외 유속 차이가 봉의 안정성이나 동특성에 미치는 영향은 무시할 만큼 작은 것으로 판단된다. 다만, 앞서 언급하였던 바와 같이 이중냉각 연료봉의 내/외 부수로 유속차이와 유동분포는 주로 내/외 수로의 압력손실(pressure loss)과 지지격자 설계형상에 의해서 결정되기 때문에 지지격자 설계에 대한 구체적인 정보를 필요로 한다. 이 때문에, 이중냉각 핵연료의 지지 구조체에 대한 개념형상만이 결정된 현시점을 고려할 때, 향후 입력조건과 해석결과가 변화될 수 있는 가능성이 충분히 있음을 밝힌다.

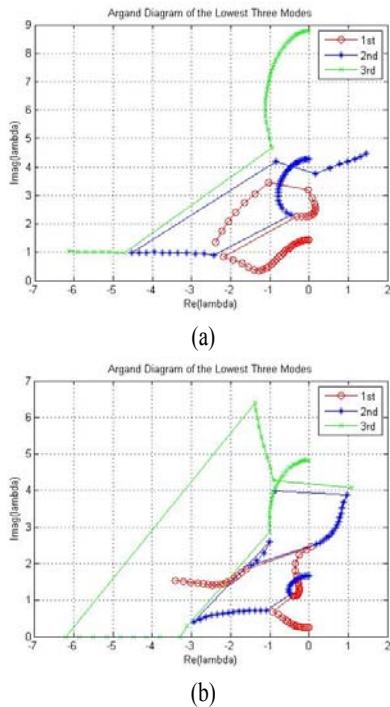


Fig. 4. Argand diagram of the first three eigenvalues of the dual-cooled fuel elastically supported (a) at both ends, (b) at the bottom one end.

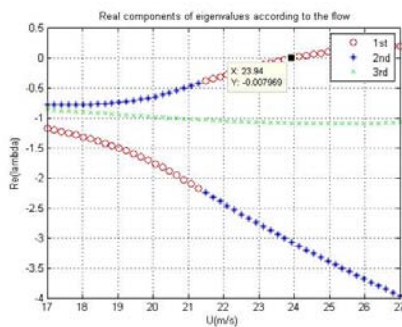


Fig. 5. Imaginary and real value of the first three eigenvalues for the both ends spring supported dual-cooled fuel rod according to the differences in flow velocity in-between inner and outer subchannels.

4. 결론

차세대 고연소도 고효율 핵연료의 후보형상으로 제안된 환형 실린더의 내/외 유속변화에 따른 동적 안정성 기초해석을 수행하였다. 해석된 결과를 근거로, 환형 실린더형 연료봉의 불안정 임계유속은 기존 연료의 값에 비해 30 %정도 작게 예측되어 운전유속에 대한 설계여유가 감소하지만, 지지점 손실에 따른 상대적 안정성 여유는 증가되는 것으로 예측되었다. 또한, 환형봉의 내/외 유속차이에 따른 동특성 해석을 통하여 내/외 부수로 유속차이는 환형봉의 동특성에 대한 민감도가 무시될 만큼 작음을 알았다. 향후, 이산화우라늄 핵연료 펠렛의 열/조사변형에 따른 이중냉각연료의 내/외 간극에 변화될 때, 연료봉의 강성변화에 대한 영향과 지지조건의 손실 및 부수로 내 비정상 유동과 이들이 연료봉의 동적특성에 미치는 영향에 관하여 심화된 연구들이 필요하다.

후기

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 저자는 고마운 마음을 표합니다.

참고문헌

- [1] Lee, K.H., Kim, J.Y., Lee, Y.H., Yoon, K.H. and Kim, H.K., Vibration characteristic analysis of a dual-cooled fuel rod according to the cross-sectional dimensions and the span length, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 9(2007), pp. 819-825.
- [2] Paidoussis, M.K., Fluid-Structure Interactions; Slender structure and axial flow, Academic Press, Vol. 1(1998).
- [3] Paidoussis, M.K., Fluid-Structure Interactions; Slender structure and axial flow, Elsevier Academic Press, Vol. 2(2004), pp. 787-1220.
- [4] Lopes, J.-L., Paidoussis, M.P., Semler, C., Linear and nonlinear dynamics of cantilevered cylinders in axial flow. Part 2: the equation of motion, Journal of Fluids and Structure, Vol. 16(2002), pp. 715-737.
- [5] Paidoussis, M. P., Some unresolved issues in fluid-structure interactions, Journal of Fluids and Structure, Vol. 20(2005), pp. 871-890.
- [6] Chen, S.S., Wambsganss, M.W., Parallel flow induced vibration of the fuel rods, Nuclear engineering and design, Vol. 18(1972), pp. 253-278.
- [7] Chen, S.S., Vibration of nuclear fuel bundles, Nuclear Engineering and Design, Vol. 35(1975), pp. 399-422.
- [8] Park, N.-K., Park, J.-K., Suh, J.-M., Kim, K.-T., Eigenvalue variation of fuel rod exposed to uniform axial flow, ICSV14:14th Int. Congress on Sound and Vibration, Cairns, Australia (2007).
- [9] Lighthill, M. J., Note on the swimming of slender fish. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 9(1960), pp. 305-317.
- [10] Taylor, G.I., Analysis of the swimming of long and narrow animals, Proceedings of the Royal Society(London), A. 214(1952), pp. 158-183.