2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

FLUENT의 3차원 LES 난류모델을 이용한 가압경수로 연료봉다발에서 멱 스펙트럼 밀도의 해석

Analysis of Power Spectrum Density in the PWR Fuel Assembly Using the 3-D LES Turbulent Model of FLUENT 6.0

노희천, 김현민

한국과학기술원
원자력 및 양자공학과
대전광역시 유성구 구성동

요 약

유동 기인 진동 중 특히 난류에 의한 진동은 연료봉다발 사이에서 유체가 봉의 길이방향으로 유동할 때 그 영향이 두드러진다. 봉으로부터 열전달을 수반하면서 유동은 봉의 축 방향으로 흐른다. 이때 유속이 빨라 봉의 표면에서 점성경계층이 형성되나 봉과 봉 사이에는 형성된 점성경계층이 성장할 수 있는 공간이 충분하지 못하여 유동은 급격한 난류유동이 되며 이로 인해 경계층 내에서 압력변동이 발생한다. 이런 압력변동이 결국에는 봉에 진동으로 작용하게 된다. 본 연구에서는 이러한 난류에 기인하는 표면의 정체압력변동 성분이 봉의 진동에 미치는 영향을 연구를 하여 임계열유속을 증진시킬 경우 이러한 진동을 억제 시키는 방법을 강구하는데 그 목적이 있다. 난류에 의한 봉의 표면에서 압력의 시간변화를 전산유체역학 코드인 FLUENT 6에서 3차원 LES 난류모델을 사용하여 계산하였으며 이 압력변화에 대한 FFT 변환을 통한 멱 스펙트럼 밀도를 계산하였다. 멱 스펙트럼 밀도를 이용하여 봉의 진동을 구하는 알고리즘을 개발하여 임계 열유속을 증진시키기 위한 설계의 일환으로서 본 계산방법은 유용하다. 향후에는 spacer grid에 부착된 mixing vane을 사용해 임계 열유속을 증진시키는 경우 난류에 의한 진동 성분을 구하여 봉의 진동문제에 대한 영향을 알 수 있도록 하는 것이다.

Abstract

FIV(fluid-induced vibration) is an important concern in power and process plants especially in nuclear industry subject to high axial and cross flow causing serious problems. This study addresses the effects of random pressures due to turbulent flows upon the vibrational responses to PSD(power spectrum density) in one dimensional rod supported simply at both ends. Though TIV(turbulence-induced vibration) takes place under parallel flows where axial flow-induced vibration is a much

smaller problem than cross-flow vibration, FIV in axial flow generates random pressure fluctuations due to turbulence mainly around the rod surfaces forcing them vibrate randomly. Dynamic forces produced by the total pressure fluctuating on the rod surface are calculated by the 3 dimensional LES (large eddy simulation) turbulent model in FLUENT 6 to simulate the flow field in CFD code. To acquire response to fluctuating pressure, the response equation of vibration is used in case of a cylindrical rod in one dimensional case. The first modal longitudinal joint acceptance integral including coherence function is an important parameter affecting the vibrational responses in the form of root mean square modal response along with the damping ratio. And the fluctuating stagnation pressure PSD at the wall via FFT transformation in turbulent boundary layer is a key to increasing CHF(critical heat flux). The main goal is not only to enhance the CHF but also to reduce FIV simultaneously, and to apply to designing fuel rods and spacer grid assembly including mixing vanes.

1. 서 론

발전소나 원자로내부에서 유체에 의해서 일어나는 진동은 유체와 구조물이 만나는 영역에서는 반드시 고려되어야 되는 사항이다. 특히 원자로 내의 연료봉 다발의 경우에는 유동에 의한 진동이 구조물의 파손을 초래할 수 있는 중요한 사항으로서 설계 시 반드시 고려되어야 되는 부분이다. 이러한 유동에 의한 진동이 생기는 원인은 다양하지만 본 연구에서는 축에 가로지르는 유동(cross flow)에 의한 진동에 비해서는 지금까지 비교적 간과되어온 축 방향으로의 난류유동에 의한 진동을 그 대상으로 하였다. 최근에 NO 등은 환형모양의 연료봉 다발에서 유동에 기인하는 진동에 대해서 여러 가지 방법으로 해석을 수행하였다 [1]. 유동기인 진동에 대한 학술대회가 최근에 스위스에서 개최되어서 많은 연구가 소개 되었다 [2]. Païdoussis 는 특히 원자로에서 유동기인 진동에 대해서 지금까지의 경향을 총 망라하여 정리하였다[3]. 특히 Au-Yang 은 가압경수로에서 유동기인 진동분야에 많은 연구를 수행하였으며 봉의 횡 방향 유동에 대한 이론 및 실험적 연구를 많이 하였다 [4-13].

Figure 1 은 연료 봉의 모양을 보여준다. 연료봉다발 집합체에서 난류의 특성상 그 유동의 변화가 고체표면의 전압력의 변동을 야기시키며 이러한 압력의 시간적인 변화는 봉에 외력으로 작용한다. 그 결과 봉은 진동하며 그 특성은 난류의 특성과 마찬가지로 확률적인 특성을 보여준다. 즉 시간에 따라서 임의로 변하는 압력변화를 멱 스펙트럼 밀도(PSD, power spectrum density)로서 나타내어야 그 변화의 특성을 쉽게 알 수 있다. PSD 의 의미는 압력함수의 각 주파수에 따른 압력 에너지 분포를 나타낸다. 이로 인한 진동치는 진폭의 제곱 값의 평균의 제곱근에 비례하게 된다. 본 연구에서는 이러한 rms (root mean square) 형태로서 봉의 진폭을 구하는 것에 대한 알고리즘을 연구하였다. 한편 연료봉의 외경과 길이, 재료의 밀도 및 탄성계수가 주어지면 봉의 진동 모드와 고유진동수가 구해지는데 본 연구에서는 우선 1 차 모드(fundamental mode) 에서의 진동만을 고려하기로 하였다. 왜냐하면 일반적으로 2 차 모드이상은 1 차 모드의 진동치에 비해서 그 차수(order) 가 작아 결과적으로 진동에 기여하는 정도가 작기 때문이다. 하지만 2 차 모드 이상의 값이 작다고 해도 실지의 진동현상은 모든 모드를 중첩 된 결과로서 나타날 것이다. 이러한 난류에 의한 압력변이를 계산하기 위해서는 3 차원 CFD code 에서 LES (Large Eddy Simulation)의 난류모델을 사용하였다. 난류유동해석에 대해서는 다음 장에서 설명한다.

2. 격자형성과 LES 난류모델

난류에 의한 봉의 한 표면에서 정체압력(stagnation pressure)의 시간변화를 계산하기 위해서는 CFD solver 인 FLUENT 6.0 을 이용하였으며 비정상상태의 LES 모델로 난류유동을 계산하기 위해서는 3 차원에서만 계산이 가능하다. Figure 2 는 연료봉에서 spacer grid 주위와 mixing vane 을 보여준다. pre-processor 에서 격자형성은 GAMBIT 2.0 을 이용해 비정렬 격자와 Cooper mesh 를 사용하였다. Figure 3 은 연료봉과 지지격자의 조립상태를 보여주며, 지지격자 주위의 유동장에 대한 격자는 Figure 4 와 같이 구성하였다. 또 Figure 5 에서는 지지격자의 상태를 분해하여 지지격자의 구성을 나타내며, Figure 6 은 연료봉 표면에서 계산 격자점을 보여준다.

LES 난류모델에서도 유한체적법(FVM)을 기본으로 하는 SIMPLE 알고리즘을 사용하는 지배방정식에 공간적인 평균화를 하고, 유동장을 격자로 해상할 수 있는 성분과 그 이하의 작은 성분으로 분리하여, 해상할 수 있는 성분은 직접 계산하고, 격자크기 이하의 작은 성분은 모델링하는 것이다. 후자에서 모델링 격자가 충분하게 작으면 격자 이하의 난류구조는 균일하며 등방적이라 보편적인 모델을 구성하기 쉬운 특징을 갖고 있다. 기존의 $k-e$ 모델에서는 난류에 의한 변동량을 시간평균을 한 반면 본 연구에서의 LES 모델에서는 시간평균을 하지 않기 때문에 본 연구에서와 같이 시간변동이 빠른 비정상 유동에의 적용이 가능하다. 한편 격자로 해상되지 않는 크기의 와류에 대해서 SGS (Sub Grid Scale) 모델을 도입한다. 이 방법은 격자가 성긴 경우에는 SGS 모델의 적용한계를 넘어버리는 경우가 있다. 즉, 격자로 해상될 수 있는 응력에 비해서 SGS 응력은 충분히 작아야 된다. 고로 난류의 3 차원 구조를 표현하기위해서는 3 차원 계산을 적용하여야 하고 이 때문에 계산시간이 많이 걸린다. 지배방정식에 가우스 방법과 같은 공간적인 평균화 조작을 행하면, SCS 항으로 레이놀즈 응력 항, 교차 항 및 레오나드 항이 나타나며 이 각각에 대해서 모델링을 하여야 한다. 특히 레이놀즈 응력항에 대해서는 구배확산형의 스마고린스키 모델(Smagorinsky model)을 이용한다. FLUENT 에서는 default 값으로 스마고린스키 상수는 0.1 로, 난류강도는 0.1 로 가정하였다. Figure 7(a)는 봉의 구성이 5×5 일경우 봉과 봉사이 단면에서 유동의 속도벡터를 확대해서 보여주며, Figure 7(b)는 4×4 의 경우인데 축 방향으로 유동이 진행되면서 와류를 형성함을 보여준다. Figure 8 은 봉의 중간의 표면 한 지점에서 정체압력을 시간의 변화에 따른 변화를 보여주는 것이며 이는 실험과 비교하면 dynamic pressure transducer 로 실험측정한 결과와 비교할 수 있다. 특히 벽면에서는 속도가 0 이므로 압력은 정체압력(total pressure)으로서만 존재한다. 이 압력이 random 함으로 인해 통계적인 접근이 필요하며 평균과 분산이 시간의 변화에 따라 천천히 변하기 때문에 준 정적상태 인 동시에 준 에르고딕하며 또한 가우스 분포를 이룬다 [14].

3. 멱 스펙트럼 밀도 (PSD)

CFD 계산결과로 부터 압력의 시간에 따른 변화를 구하면 그 random data 를 FFT(Fast Fourier Transform) 변환을 통해서 pressure PSD 인 G_p 를 구한다. 여기서 FFT 는 J.W. Cooley 와 J.W. Tukey 가 1965 년에 개발한 방법을 사용하였다 [15]. 경계층에서 압력변동이 심하게 발생하며 이런 압력변동이 결국에는 봉의 진동의 원인이 된다. 이런 난류에 기인하는 압력변동 성분이 봉의 진동에 미치는 영향을 보기위해 난류에 의한 봉의 표면에서 압력변화를 계산하며 이에 대한 후리에 변환을 통한 멱 스펙트럼 밀도를 계산한다. 난류에 의한 압력은 random data 이며 가우스 분포를 이룬다. 멱 스펙트럼을 이용하여 봉의 진동을 해석하는 알고리즘을 개발하여 봉의 진동성분을 해석하는 것이 본 논문의 내용이다. 압력변화를 차분형 FFT 를 하면 다음과 같다.

$$P(k\,\Delta f) = \Delta t \sum_{i=0}^{n-1} p(i\,\Delta t)\, e^{-j2p\,(ik)/n} \tag{1}$$

이를 통해 PSD를 아래와 같이 구한다. PSD는 주파수에 따른 압력에너지의 분포를 나타낸다. 특히 주파수가 증가할수록 PSD값은 변화량이 증가하는데 그 평균값을 취하기 위해서는 smoothing 작업을 수행하였다. 데이터의 개수 n 는 2^{10} 개 단위로 취해야 된다. 본 연구에서는 2,048개로 하였고 시간증분 Δt 은 0.02초로 하였다. $n\Delta t$ 는 데이터의 취득에 걸리는 총시간이 된다. 그런데 single-sided PSD는 double-sided PSD의 2배 이므로 FFT와 PSD와의 관계는 다음과 같다.

$$G_p(f) = \frac{2\left|P(k\,\Delta f)\right|^2}{n\,\Delta t} \tag{2}$$

한편, 변위 $y(t)$ 를 FFT하면 $Y(f)$ 가 된다. 시간 T 동안 데이터를 계산하면 변위와 압력에 대한 PSD는 각각 $G_y(f) = \left|Y(f)\right|^2 / T$, $G_p(f) = \left|P(f)\right|^2 / T$ 가 된다. 그러므로 변위와 압력에 대한 모드 전달함수의 계수는 $G_y(f) = \left|H(f)\right|^2 G_p(f)$ 와 같이 정의된다. 봉의 진동을 스프링 질량계의 운동방정식을 따른다고 가정하면 $m\ddot{a} + c\dot{a} + ka = p(t)$ 의 비제차 상미분 방정식의 형태가 된다. 여기서 f_1 를 1차 모드 고유진동수, $c_{crit} = 2m(2p\,f_1)$ 일 경우 감쇠비(damping ratio) z 는 c/c_{crit} 가 된다. 모드 전달함수는 $H(f) = 1/(4p^2 m(f_1^2 - f^2 + i2z\; f_1 f))$ 이고, 간섭함수(coherence function) $\Gamma(f, x', x'')$ 가 $G_p(f, x', x'')/G_p(f, x')$ 이면 봉의 길이방향으로 1차 모드에 대한 동시 수락 적분치(joint acceptance integral)는 다음과 같다. 임의의 두 지점 x', x'' 에서

$$J_{11}(f) = 1/L \int_0^L y_1(x'')\,dx'' \int_0^{x''} y_1(x')\,\Gamma(f, x', x'')\,dx' \tag{3}$$

또 $f_{\max}$ 를 cutoff frequency라고 하면, 진동변위에 대한 PSD를 G_y 라 하면 진폭제곱의 평균치는 $< y^2 >= \int_0^{f_{\max}} G_y(f)\,df$ 가 되나, 실지로는 aliasing 현상 때문에 니퀴스트 진동수 f_N 범위 내에서만 FFT를 신뢰할 수 있다. 그러므로 신뢰 주파수범위는 반으로 줄어든다 [15].

4. 간섭함수와 동시수락 적분값

1 차원 봉은 양끝 단이 단순지지 되었을 경우 1 차 모드 고유진동수는 $(p/L)^2 \sqrt{EI/m_L}\,/(2p)$ 이며, 여기서 m_L 은 봉의 단위길이 당 질량(linear density)이고, I 는 $pD^4/64$ 이며 봉의 단면의 관성모멘트(moment of inertia of cross section) 이다. 한편 봉의 모드 해석을 위해서 모드 함수값을 다음과 같이 1로 무차원 하면, 즉 $\int_0^L y_1^2(x)\;dx = 1$ 여기서 1차 모드의 함수는 다음과 같이 구해진다. $y_1(x) = y_{\max}\sin(px/L)$ 여기서 $y_{\max}$ 는 $\sqrt{2/L}$ 이다. 1차원 봉에서 간섭함수는 임의의 두 지점 x', x'' 사이의 거리인 Δx 가 0이 되면 1이 되고, 무한대가 되면 0이 된다. 또 두 지점의 위치가 바뀌면 각각 두 간섭함수는 공액함수의 관계가 된다. 이들 조건을 만족하는 간섭함수는 다음과 같다고 가정한다 [4].

$$\Gamma(f, x', x'') = e^{-\left|x'-x''\right|/l}\cos(2pf\,(x'-x'')/U_C) \tag{4}$$

이때 l 는 상관관계길이로서 이 값이 0이면 압력변동의 가진함수(forcing function)는 봉 전

체에 걸쳐서 서로 간섭이 없으며, 반대로 상관관계길이가 무한대이면 압력의 가진함수가 봉 전체에 걸쳐서 완전히 간섭함을 의미한다. 이때 경계층의 배제두께 d^* (displacement thickness)에 따라 그 값을 다르게 한 것을 Bull’s representation 이라고 하며, $fd^*/L < 0.059$ 이면 $l = 27d^*$ 이고 $fd^*/L \geq 0.059$ 이면 $l = 1.6U_C/f$ 가 되는 실험식을 사용한다 [16]. 여기서 배제두께는 봉 사이 간격의 반이라고 가정하였다. 또 U_C 는 대류속도로서 얼마나 빠르게 난류와류가 하류로 이동하는가의 척도이며 다음과 같이 $U_C = V(0.59 + 0.3e^{-5.6fd^*/V})$ 이므로, 자유유선속도의 약 0.6 배 이다. 한편 1 차 모드에서 봉의 길이방향으로 동시 수락 적분치 J_{11} 는 모드 함수와 간섭함수로 식(3)은 다시 표현되며 경계층 배제두께와 간섭함수에 의해 값이 결정된다.

$$J_{11}(f) = 1/L\int_0^L y_1(x'')dx''\int_0^{x''} y_1(x')\, e^{-(x'-x'')/l}\cos(2pf(x'-x'')/U_C)dx'$$
$$+1/L\int_0^L y_1(x'')dx''\int_{x''}^L y_1(x')\, e^{-(x''-x')/l}\cos(2pf(x''-x')/U_C)dx' \quad (5)$$

위의 식은 2 차원 평판 위에 적용하는 식인데 1 차원 봉에도 적용할 수 있다.

5. 봉의 진동 방정식

난류에 기인하는 압력변동 성분이 봉의 진동에 미치는 영향을 연구하기 위해 변위와 압력에 대한 각각의 PSD 와 모드 전달함수의 관계에서 변위의 PSD 를 적분하면 $< y^2 >$를 구할 수 있다. 고로 압력 PSD 를 알고 있다면 전달함수의 적분을 하면 된다. 진동성분의 $< y^2 >$은 다음과 같이 PSD 를 적분한다.

$$\int_0^\infty G_y(f)df = G_p(f)\,L\,y_1^2(x)\,J_{11}(f)\int_0^\infty |H(f)|^2 df \quad (6)$$

전달함수를 적분할 때는 복소수 적분에서 유수(residue)를 이용해서 적분경로를 단일폐곡선 상에서 특이점(singular points)을 중심으로 시계방향(cw)으로 적분한다 [4].

$$<y^2_{(x=L/2)}> = \frac{L\,G_P(f_1)\,y_1^2(x)\,J_{11}(f_1)}{64p^3\,m_A^2\,f_1^3\,z} \quad (7)$$

한편 봉의 길이방향으로 단위표면적 당 질량 m_A 는 m_L 을 봉의 둘레 pD 로 나눈 값이 된다. 식(7)은 다음과 같이 된다.

$$<y^2_{(x=L/2)}> = \frac{L\,D^2\,G_P(f_1)\,y_1^2(x)\,J_{11}(f_1)}{64p\,m_L^2\,f_1^3\,z} \quad (8)$$

여기서 모드 함수와 봉의 길이 및 단위길이 당 질량은 서로 상쇄된다. 봉의 중앙의 한 점에서 측정한 압력에 대한 PSD 를 이용하여 이점에 대한 진동치에 대한 제곱평균치에 대한 방정식은 다음과 같이 간단히 된다.

$$<y^2_{(x=L/2)}> = \frac{G_p(f_1)\,J_{11}(f_1)}{2p^3\,f_1^3\,r^2\,D^2\,z} \quad (9)$$

이때 z 는 진동 감쇠비이며 시스템이 보존적일 경우 0.01~0.05 의 범위에 있다. 여기서 G_P 값과 J_{11} 값을 구해야 진폭에 대한 값을 구할 수 있다. 봉의 진동에 대한 root mean square y_{rms} 값은 위의 식에 제곱근을 취한다.

6. 결과 및 고찰

연료봉은 밀도 r 가 8,470 kg/m^3, 탄성계수(Young's modulus) E 가 2×10^{11}Pa 이고 직경이 9.5 mm, 길이가 0.6 m 이며 양끝 단이 단순지지 되었다고 가정한다. 이 경우 1 차 모드의 고유진동수 f_1 는 50.3 Hz 이고, 2 차 모드의 고유진동수 f_2 는 이의 4 배 이다. 연료봉 사이를 흐르는 유체는 보통의 물로서 밀도 r_{fluid} 가 998.2 kg/m^3 이며 입구에서 유속 V 가 6.08 m/s 이다. Figure 8 은 FLUENT code 를 사용하여 봉의 표면의 한 중간지점에서 시간에 따른 정체압력이며 random data 의 특성을 보여준다. 이 압력 데이터를 이용하여 FFT 를 이용해 PSD 를 구하면 Figure 9 와 같이 된다. 각 주파수 영역에서 PSD 를 보여주며 주파수가 증가 할수록 PSD 변화는 심하게 일어난다. 이는 난류유동에서 흔히 볼 수 있는 현상이다. 어느 특정한 주파수 영역이상에서는 PSD 값이 일정하게 줄어드는 양상을 보여준다. 이것을 smoothing 작업을 하면 Figure 10 과 같이 매끄러운 곡선을 얻을 수 있다. 여기에서도 마찬가지로 어느 진동수 이상에서는 PSD 값이 f^{-3} 에 비례하게 감소함을 보여준다. Figure 10 에서 현재의 1 차 고유진동수 조건에서 pressure PSD $G_p(f)$ 가 65.3 Pa^2/Hz 임을 알 수 있다. 한편 $J_{11}(f_1)$ 의 값을 기존의 표에서 읽었을 경우 약 0.01 이다 [12]. 진동방정식으로부터 1 차 모드에 대한 값을 대입하면 봉의 중앙지점의 진폭의 root mean square 의 범위는 감쇠비의 범위에 따라서 15.9647~35.698m m 가 나온다. Figure 10 에서 empirical 의미는 S.S. Chen 등이 아르곤 연구소에서 1972 에 발표한 실험 데이터로서 현재의 계산하고 약간의 차이를 보이나 기울기는 일치한다 [17]. FLUENT 계산 시 시간증분을 0.02 초로 하였다. 이를 경우 cutoff frequency 는 50 Hz 이나 실지로는 aliasing 현상 때문에 니퀴스트 진동수 f_N 까지만 신뢰할 수 있기 때문에 25 Hz 까지만 데이터가 존재한다. 그러나 봉의 고유진동수는 50.3 Hz 이므로 이 구간까지의 데이터를 유추하기 위해서 S.S. Chen 이 구한 기울기를 이용해서 고주파 영역까지근사치를 구하였는데, Figure 10 에서는 approximation 으로 나타내었다. 여기서는 근사치의 결과를 이용하여 계산을 수행하였다. 봉의 고유진동수는 봉의 물성치와 크기에 의해서 결정되어지는 한편 진폭의 제곱의 평균치 $< y^2 >$ 는 압력 PSD 와 J_{11} 에 비례하는 반면 감쇠비 z 에 반비례함을 보여준다. 봉의 고유진동수가 높을 수록 압력에 의한 에너지가 작아 진폭은 작아지므로 진동문제를 피하기 위해서는 고유진동수를 높이는 방안이 필요하다. Table 1 에 계산의 기본 인자를 요약하였다.

7. 결론 및 향후 연구

유동 기인 진동 중에서 난류에 의한 진동은 연료 봉에서와 같이 길이방향으로 유동이 지배적일 때 특히 두드러진다. 이때 축 방향으로 유동하는 유체내부로 열전달이 발생하면서 봉의 표면으로부터 난류경계층이 형성되며 이러한 경계층이 충분이 성장할 수 있는 공간이 부족해서 유동은 급격히 난류유동이 되며 이로 인해 봉의 표면은 압력변동을 받게 된다. 이와 같은 난류경계층에 의한 압력변동이 결국에는 봉의 진동의 외력으로 작용한다. 특히 난류에 기인하는 정체압력의 변화는 random 하기 때문에 봉에 미치는 영향은 확률적으로 해석하여야 되며 가우스 정규분포를 따르기 때문에 압력변동에 대한 멱 스펙트럼 밀도를 이용하여야 한다. 난류에 의한 봉의 표면에서 압력변화를 시간에 따라 구하기 위해 수치해석코드 FLUENT 6.0 를 이용하였으며 비정상상태의 난류해석을 위해서는 3 차원 LES 모델을 사용하

였다. 봉의 표면에서 압력변화를 이용하여 압력에 대한 멱 스펙트럼 밀도를 계산한다. 난류에서 멱 스펙트럼 밀도는 저주파 영역에서는 일정하나 고주파 영역에서는 주파수가 증가할수록 감소함을 보여주기 때문에 FLUENT 의 LES 난류모델이 일정한 주파수 범위 내에서는 해가 타당하다고 생각한다. PSD 를 이용하여 봉의 진동해석을 1 차원에 대해서 고유진동수에서 진폭의 root mean square 의 형태로 구하였으며 이 값은 *mm* 단위로 나타났다. 향후 연료봉의 임계열유속을 증진시키기 위한 봉의 설계의 일환으로서 본 계산방법은 유용할 것이라고 생각한다. 특히 spacer grid 에 부착된 mixing vane 을 사용해 임계열유속을 증진시키는 경우 난류에 의한 진동성분을 구하여 봉의 진동문제에 대한 영향을 알 수 있도록 하며 나아가서는 진동을 유발시키지 않으면서 임계열유속을 증진시킬 수 있는 연료봉 및 spacer grid 및 mixing vane 을 설계함을 그 목표로 한다. 계산방법에서는 감쇠비와 동시수락 적분치에 대한 더 정밀한 계산방법의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

1. NO, Hee Cheon, “Analysis of Flow-induced Vibration in the Annular-fuel Assembly”, MIT Report (2002)
2. editors Ziada, Samir and Staubli, Thomas, *Flow-induced Vibration*, Proceedings of the 7th International Conference on Flow-induced Vibration – FIV 2000/Switzerland, pp. 327- , (2000)
3. Païdoussis, M.P., “A Review of Flow-induced Vibrations in Reactors and Reactor Components”, Nuclear Engineering and Design, vol. 74, pp. 31-60 (1982)
4. Au-Yang, M.K., *Flow-induced Vibration of Power and Process Plant Components, A Practical Workbook*, Chapter 8 and 10, ASME Press, Professional Engineering Publishing (2001)
5. Au-Yang, M.K., “Response of Reactor Internals to Fluctuating Pressure Forces”, Nuclear Engineering and Design, vol. 35, pp. 361-375 (1975)
6. Au-Yang, M.K. and Connelly, W.H., “A Computerized Method for Flow-induced Random Vibration Analysis of Nuclear Reactor Internals”, Nuclear Engineering and Design, vol. 42, pp. 257-263 (1977)
7. Au-Yang, M.K. and Jordan, K.B., “Dynamic Pressure inside a PWR - A Study based on Laboratory and Field Test Data”, Nuclear Engineering and Design, vol. 58, pp. 113-125 (1980)
8. Au-Yang, M.K., “Turbulent Buffeting of a Multispan Tube Bundle”, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Transactions of the ASME, vol. 108, pp. 150-154 (1986)
9. Au-Yang, M.K., “Dynamics of Coupled Fluid-Shells”, Transactions of the ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, vol. 108, pp. 339-347 (1986)
10. Au-Yang, M.K. “Development of Stabilizers for Steam Generator Tube Repair”, Nuclear Engineering and Design, vol. 103, pp. 189-197 (1987)
11. Au-Yang, M.K., Brenneman, B., and Raj, D., “Flow-induced Vibration Test of an Advanced Water Reactor Model Part 1: Turbulence-induced Forcing Function”, Nuclear Engineering and Design, vol. 157, pp. 93-109 (1995)
12. Au-Yang, M.K., “Joint and Cross Acceptances for Cross-flow-induced Vibration - Part I: Theoretical and Finite Element formulations”, Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, vol. 122, pp. 349-354 (2000)
13. Au-Yang, M.K., “Joint and Cross Acceptances for Cross-flow-induced Vibration-Part II: Charts and Applications”, Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, vol. 122, pp. 355-361 (2000)
14. Sagaut, Pierre, *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows, An Introduction*, 2nd edition, Springer (2002)

15. Blevins, Robert D., *Flow-Induced Vibration* ,Chapter 7 and Appendix D, Krieger Publishing Company (1994)
16. Bull, M.K., "Wall-pressure Fluctuations Associated with Subsonic Turbulent Boundary Layer Flow", Journal of Fluid Mechanics, vol. 28, pp. 719-754 (1967)
17. Chen, Shoei-sheng and Wambsganss, M.W., "Parallel-flow-induced Vibration of Fuel Rods", Nuclear Engineering and Design, vol. 18, pp. 253-278 (1972)

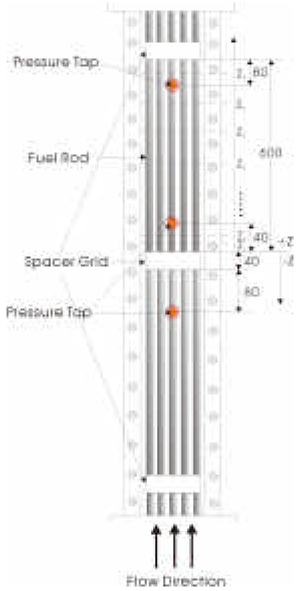

Figure 1. Fuel Rod Bundle Model

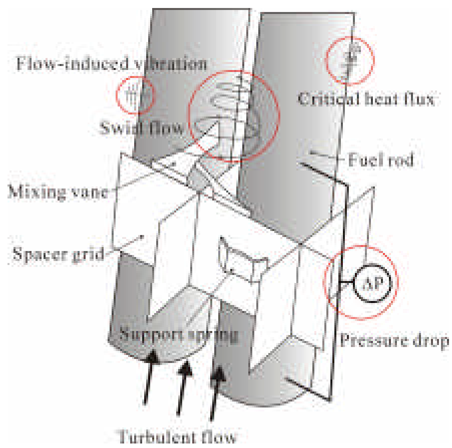

Figure 2. Spacer Grid Assembly with Mixing Vane and Spring

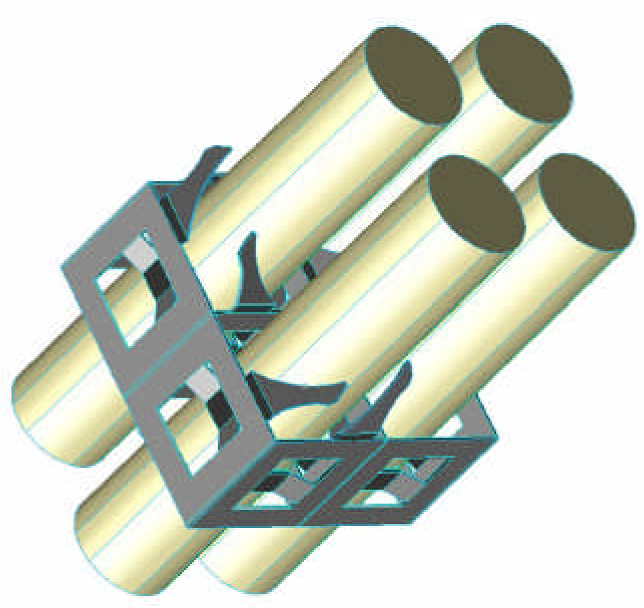

Figure 3. Geometry Model of Fuel Rod and Spacer Grid Assembly

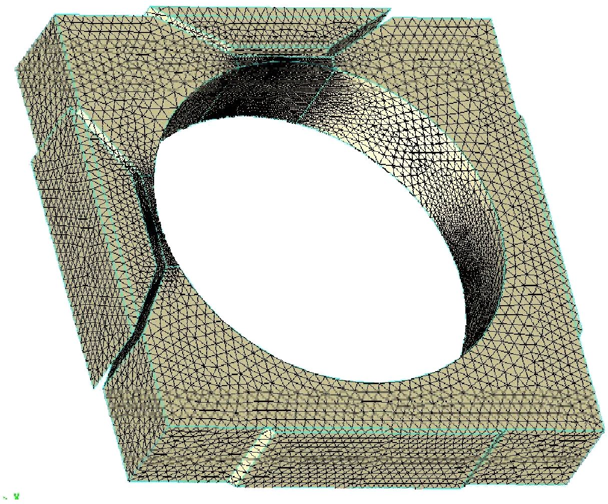

Figure 4. Volume Mesh on Spacer Grid

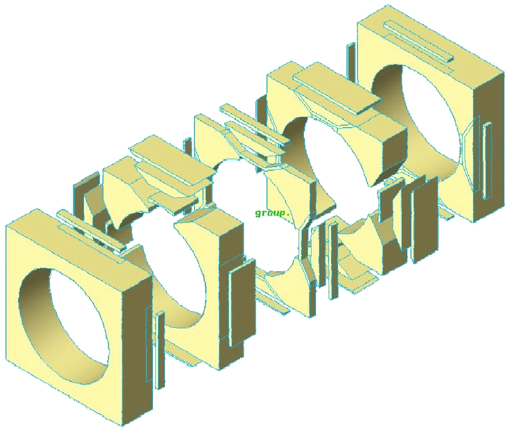

Figure 5. Volume Decomposition of Spacer Grid Assembly

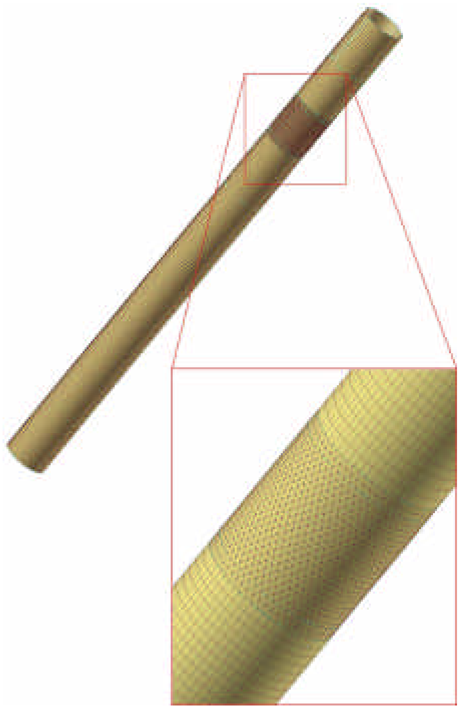

Figure 6. Mesh Nodes of Rod Surface on Mixing Vane Part

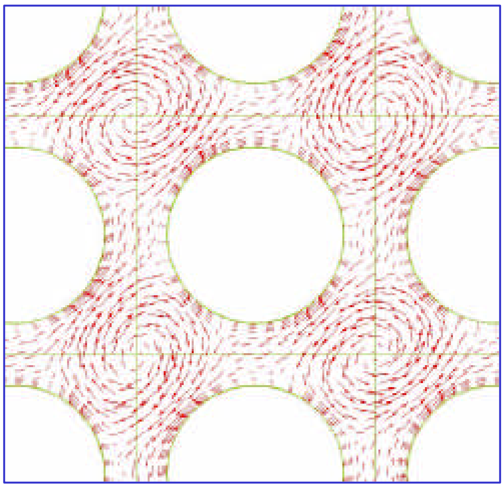

Figure 7 (a). Velocity Vectors of a 5×5 Channel

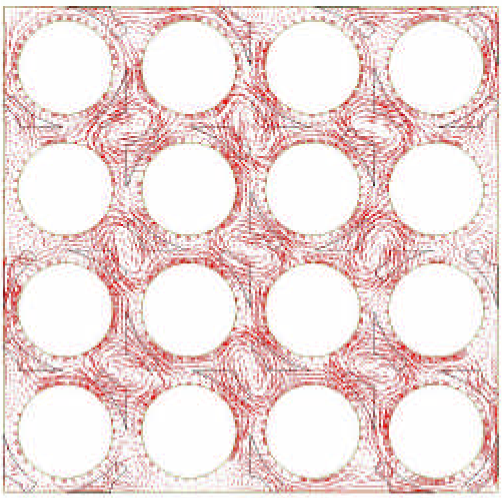

Figure 7 (b). Velocity Vectors of a 4×4 Channel

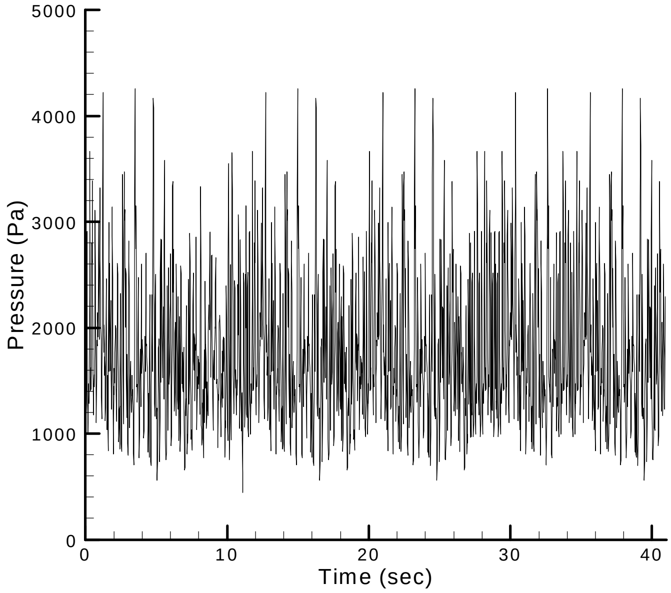

Figure 8. Total Pressure Fluctuation at the Rod Surface Point

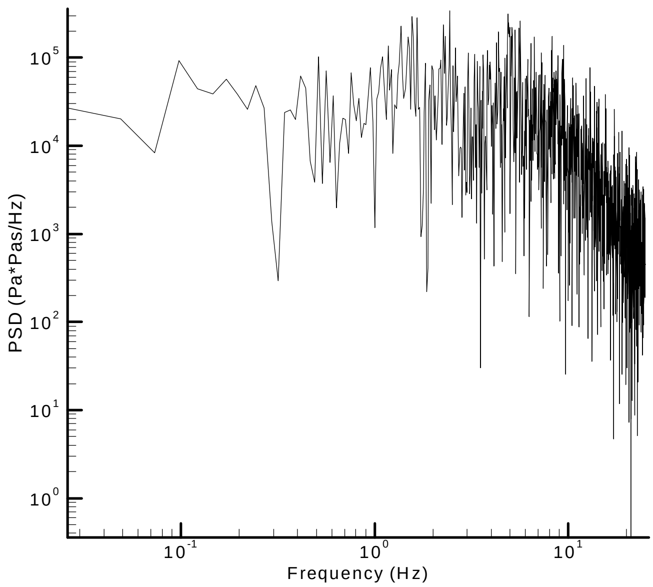

Figure 9. Random Pressure PSD on Turbulent Boundary layer

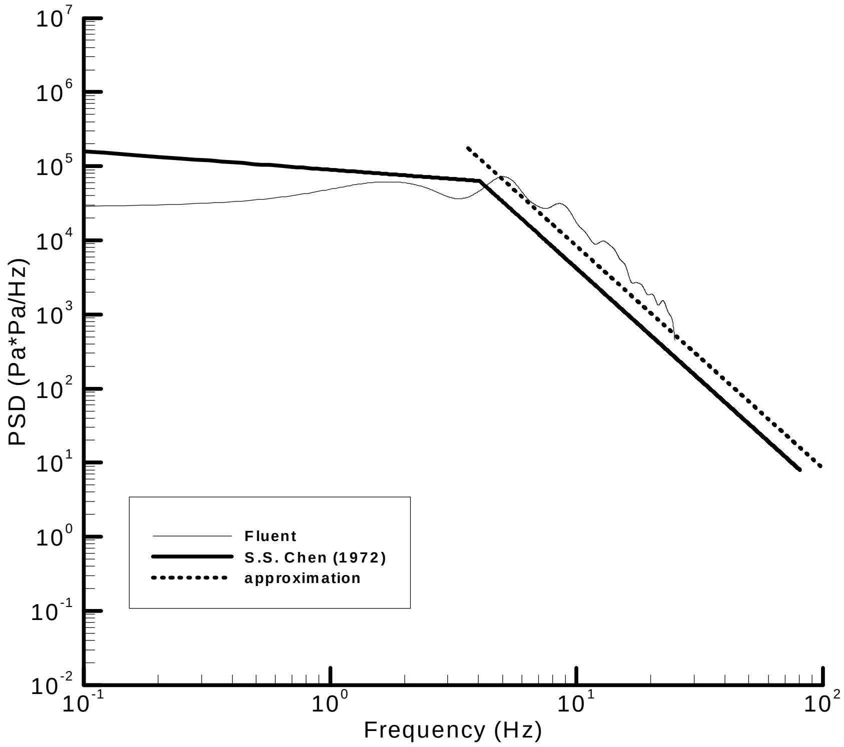

Figure 10. Smoothed PSD and empirical result of S.S. Chen (1972)

Table 1. Main Parameters

f_1 [Hz]	z	U_C [m/s]	J_{11}	G_p [Pa ^{2} /Hz]	y_{rms} [m m]
50.3	0.01	3.65	0.01	65.3	35.7