

난류도 여기에 의한 제어봉의 유동유발 진동 실험 및 메카니즘 분석

Control Rod Vibration by Turbulence Excitation

김상녕, 신 철

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

요 약

최근 울진 1, 2호기의 급정지 제어봉 E.C.T(Eddy Current Test) 결과 Fretting Wear가 심한 것이 관찰되었다.[1] 이는 유동유발 진동에 의해 제어봉과 그 지지물 간의 접촉으로 인한 손상이 주요인으로 추정되고 있다. 제어봉 손상은 제어봉 교체로 인한 비용뿐만 아니라 마모금속의 방사화로 인한 냉각재의 오염을 수반한다. 따라서 본 연구는 원자로의 유동유발진동을 선별하여 파손 위치 및 형태, 유동조건, 제어봉과 안내관의 기하학적 구조 등을 분석하였다.[3] 이를 바탕으로 실제 제어봉의 지배적인 Parameter를 도출한 결과 제어봉의 진폭은 Reynolds number와 무차원 감쇠계수(mass-damping parameter)의 함수임을 밝혀내었으며 이를 이용, 상사성을 유지하며 실험장치를 설계 및 축소 제작하였다. 모사 제어봉의 유동량 변화에 따른 변위 측정 실험과 각 안내관 위치에서의 변위 측정 결과 제어봉 진동의 주요 mechanism은 Turbulence Excitation임을 밝혔다. 또한 설계기준 유량(110 l/min) 이상에서는 제어봉 진동 mechanism이 Periodic Wake Shedding으로 접근함을 확인하였다.

ABSTRACT

In the Pressurized Water Reactor(P.W.R.) of Nuclear power plant, the Rod Cluster Control Assemblies(RCCAs) are used for controlling the reactivity by inserting or withdrawing them from the core. On normal operation, the RCCAs locate at the upper internals guide tube. The recent Eddy Current Test(E.C.T.) for the RCCAs of Ulchin #1, #2, showed very severe fretting wear on their surface of cladding which were resulted from contacting between RCCAs and their supports caused by Flow-Induced Vibration(F.I.V.). To find out the cause of the fretting wear, the geometrical characteristics of guide tube, flow path, mass flow rate, flow conditions around the RCCAs are carefully analyzed. Also the general features of flow induced vibration mechanism were scrutinized. From these effort, the causes of the FIV probably are from the turbulent excitation. To verify the causes of the vibration and the dominant FIV mechanism, an experimental rig was designed and installed to satisfy the governing nondimensional numbers, which are Reynolds number and damping parameter. The displacement and frequency measured quite good agreement with the analytical predicted values. Finally the experimental result of maximum vibration position had good agreement with the rodlets' wearing pattern issued Ulchin E.C.T. results and Framatome's report. Consequently the turbulence excitation is the governing mechanism of the RCCAs' fretting wear.

1. 서론

원자력 발전소 부품의 건전성은 발전소의 연속적인 운전에 매우 중요하며 특히 급정지용 제어봉의 손상은 원자로의 안전성을 크게 저하시킨다. 또한 원자력 발전소의 안정성 확보란 측면에서 직접적인 영향을 미치며 마모로 인한 냉각재의 오염뿐만 아니라 제어봉 교체시기를 앞당겨 부대 비용이 증대되는 등 경제적 손실 역시 크다. 최근 울진 1, 2호기 E.C.T. (Eddy Current Test)결과 제어봉 피복관 손상은 최대 마모율이 77%에 이를 정도로 심각하며 운전기간(1호기: 6주기, 2호기: 5주기)중 제어봉이 대부분 인출된 상태에서 발생했다는 점에서 상부 제어봉 안내관내로 유입된 유체에 의한 진동손상이라는 것이 유력하다. [1] 한주기 더 운전한 울진 1호기 제어봉 손상이 2호기에 비해 훨씬 덜하다는 것은 유동 유발 진동이 원자로 상부 구성물의 기하학적 구조, 운전중 제어봉의 위치변화 그리고 초기 제어봉의 Card내 위치 상태등에 대해서도 민감하게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. [2] 즉 출력 조절에 따른 제어봉 삽입, 인출시 발생하는 마찰과 최초 설치시 Rodlet가 안내관내 Card에서 한쪽으로 치우쳐짐으로 인해 발생하는 과도한 국부적 손상이 있을 수 있지만 보다 근본적인 원인으로서는 상부 안내관내로 유입된 냉각수의 유체력에 의한 유동유발진동이며 이를 분석하는 것을 본 연구의 목적으로 하겠다. 이를 위해 Plant data 수집 및 분석을 통해 도출된 제어봉 진동의 지배적인 parameter로 상사성을 유지하며 실험장치를 설계, 축소 제작하였다.

2. 제어봉과 안내관의 형태

울진 1, 2호기의 경우 제어봉 집합체는 Spider에 24개의 Rodlet가 부착된 형태이고 각 Rodlet는 304SS 피복관내에 Ag-In-Cd를 함유하고 있다. 이들 집합체는 인출된 상태에서 원자로 상부 제어봉 안내관 내에 위치하게 되고 안내관내에는 각 Rodlet들이 삽입되는 Card들이 일정 간격으로 배치되어 있다. [1, 3] 안내관은 크게 3부분으로 나뉘어 있는데 아래로부터 차례로 Upper Core Plate 위에 위치한 Continuous Guide Tube, Intermediate Guide Tube, Upper Guide Tube이다. Continuous Guide Tube와 Intermediate Guide Tube 내경(I.D.)이 190,26mm인 1개의 관으로 이루어져 있고 Upper Guide Tube는 내경이 202,3mm로 Upper Support위에 고정되어 있다.

Continuous Guide Tube 표면에는 Flow Hole이 있다. 그림1은 안내관의 위치와 각 위치에 따른 안내관내 Card의 형태를 보여준다. [3]

3. 제어봉 진동 실험장치 설계

1) Renolds number 계산

관련논문 조사를 통해 제어봉 진동을 결정하는 두 가지 무차원 변수들은 Re, number와 Mass-damping parameter가 지배적임을 알 수 있었다.[3] 따라서 실험장치는 Renolds 수와 무차원 mass-damping parameter에 맞추어 설계하였다. 먼저 무차원 damping coefficient를 결정하기 위해 plant data 수집[6]을 통해 실제 제어봉의 damping factor와 진동수를 구하였다. 관련문헌[6] 조사 결과 제어봉의 진동수는 대략 5 Hz 범위에 있으며 제어봉의 damping factor는 다음과 같은 상관식으로 나타낼 수 있다.

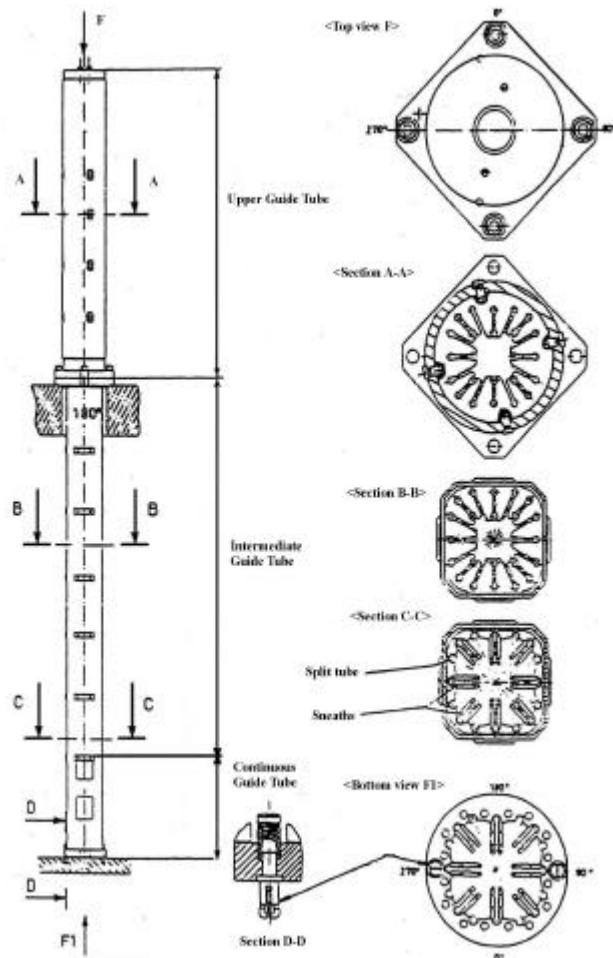


그림 1 노심상부 제어봉 안내관 및 Card

$$\xi = \frac{0.3267}{4\pi f_N} + 5.80E-5 \cdot \pi f_N$$

그러므로 $f_N = 5Hz$ 일 때 $\xi = 0.0061$ 이다.

실제 제어봉의 Drive Rod와 안내관 최상부의 Top 표 1 진동 실험 Pump의 재원 enclosure plate 사이를 통과한 유량이 제어봉 rodlet가 부착되어 있는 spider 근처에서의 유속은 대략 4 ft/sec ≈ 122 cm/sec 이다. 이 때의 Re, number는 $Re = 1.32 \times 10^5$ 이다.

실험장치 설계시 먼저 유동조건 결정을 위해 Renolds number로 상사성을 맞추었다. 배관이 직경 2 cm인 관과

항 목	재 원
출구 내경	8 cm
토 출 량	9.98 kg/sec
회 전 수	1750 rpm
전 양 정	13 m

모사 제어봉 안내관을 연결하였을 때 $Re = 1.32 \times 10^5$ 를 맞추기 위해서 안내관내의 유속을 580 cm/sec로 유지했다.

실험에 사용된 pump의 재원은 표 1과 같다.

2) Mass-damping parameter 계산

실제 제어봉의 damping parameter를 상관식에서 구한 damping factor를 이용하여 계산해보면 다음과 같다.

Mass-damping parameter는 $\eta = \frac{M\delta}{\rho D^2}$ 와 같이 정의되며 각 factor의 정의는 다음과 같다.[4]

M = rod의 modal mass

$$= m + \left(\frac{m_p}{l_o K}\right) \left\{1 + 2(K-1)\frac{l_o}{L}\right\}$$

where, m = 제어봉의 단위 길이당 질량 (g/cm)

m_p = added mass (g)

$$= \rho \pi a^2 K l_o = 6.89 \text{ g}$$

$$K = \frac{(b_o/a)^2 + 1}{(b_o/a)^2 - 1} = 5.35$$

b_o = 제어봉 안내판 hole의 반경 = 0.585 cm

l_o = 제어봉 안내판의 두께 (cm) = 2.36 cm

ρ = 원자로내 냉각수의 밀도 (g/cm³) = 0.742 g/cm³

a = 제어봉의 반경 = 0.484 cm

L = 제어봉의 길이 = 360.68 cm

δ = Logarithmic decrement

유동유발진동에 민감한 구조물의 경우 대부분 $\frac{\delta}{2\pi} = \xi$ 의 관계가 성립한다.

$f_N = 5\text{Hz}$ 일 때 damping factor $\xi = 0.0061$ 이므로 $\delta = 2\pi \times \xi = 0.0383$ 의 값을 가진다. [Ref. 5]

D = 제어봉의 직경 = 0.968 cm

이상의 factor를 사용하여 계산하면 $\eta = 0.3$ 이 된다.

모사 제어봉은 고유 진동수와 유속에 따른 damping coefficient가 실험적으로 측정된 brass

rod를 사용하였다. [Ref. 9] 봉의 축방향과 수평한 flow에 대한 실험결과 fluid damping factor는 다음의 그림과 같은 거동을 보인다.

그림 2에서 유속에 따른 fluid damping factor ξ 에 대한 상관식은 다음과 같다.

$$\xi = \xi_0 + b_1 U + b_2 U^2$$

where, $\xi = 0.003$, $b_1 = 2.44 \times 10^{-4}$,

$$b_2 = 3.44 \times 10^{-6}, U \text{ (ft/sec)}$$

이 때의 유속은 안내관 입구에서가 아니라 안내관내 봉 부근에서의 유속이 된다. 직경 2 cm의 관을 지난 유동은 직경 7 cm의 안내관내로 유입되면서 유속은 340 cm/sec로 강해진다. 이 때의 유속으로 fluid damping factor를 계산하면 $\xi = 0.00615$ 이다.

모사 제어봉의 mass-damping parameter를 실제 제어봉의 mass-damping parameter와 일치시키는 과정에서 안내관 hole 직경과 두께가 결정된다. 즉 실험장치의 안내관 hole 직경과 두께가 각각 1.5 cm, 1 cm일 때 $\eta = 0.3$ 이 된다.

3) 모사 제어봉 안내관 설계

안내관의 직경은 fluid damping factor 계산시 요구되는 유속을 340 cm/sec로 유지하는 과정에서 7 cm로 결정된다. 안내관의 길이는 실제 안내관의 직경 대 길이의 비에 맞추어 축소되었다. 즉 Upper guide tube는 내경 20.6cm, 길이 158.45 cm인데 실험장치 안내관 내경이 7 cm가 되면 길이는 53.8 cm가 된다. 6번 안내관 이하의 Intermediate guide tube와

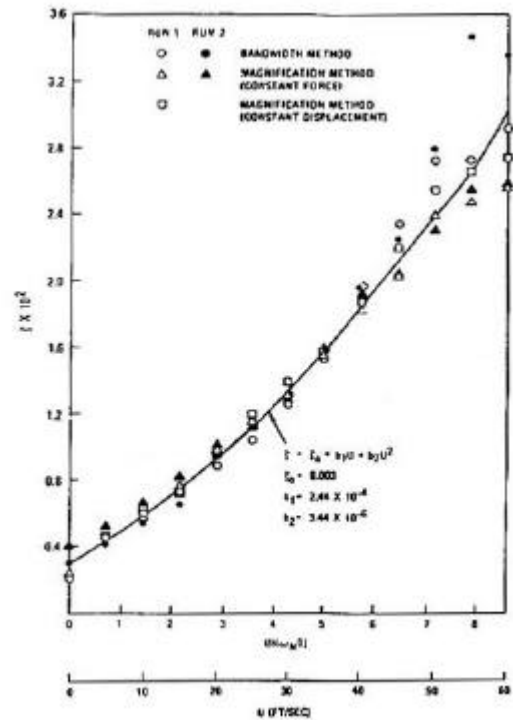


그림 2 모사 제어봉에 대한 Equivalent viscous damping factor (ξ)

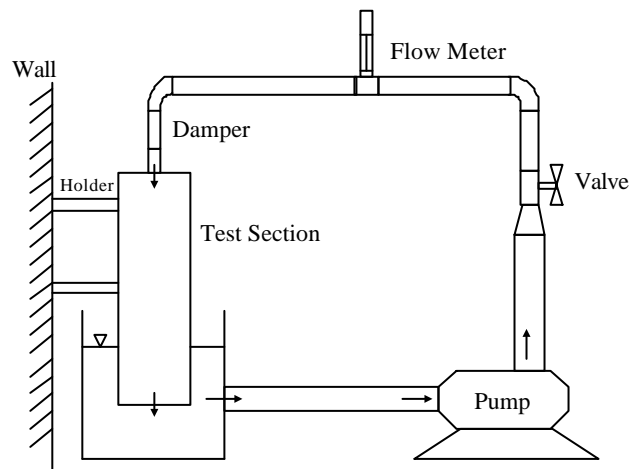


그림 3 실험장치 개략도

Continuous guide tube는 Upper guide tube와는 달리 사각형 단면의 관이다.

Upper guide tube의 단면적 (334.6 cm²)은 6번 안내판을 지나며 Intermediate guide tube와 Continuous guide tube에서는 300.2 cm²로 감소하게 된다. 이와 같은 단면적 감소량을 고려하여 실험장치의 Intermediate guide tube와 Continuous guide tube는 한 변이 5.87cm인 정사각형 관으로 설계하였다. 상부에서와 마찬가지로 직경과 길이의 비로 축소하게 되면 Intermediate guide tube와 Continuous guide tube의 길이는 82.3cm로 축소된다.

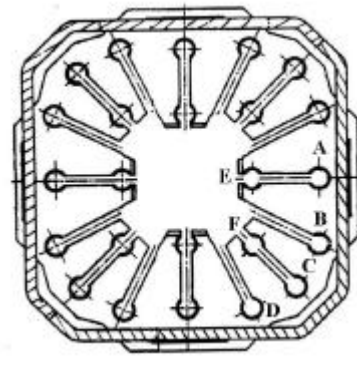


그림 4 안내판(Guide Card)

4) 모사 제어봉 안내판 설계

올진 1, 2호기의 E.C.T. 결과[1] 및 제어봉 손상 보고서[2]에서 보고된 최대 마모 위치인 제어봉 다발 내 24개의 봉들 중 그림 4[8]의 E(Inside face)위치의 제어봉을 측정 대상 제어봉으로 결정하였다. 실제 제어봉은 24개의 봉이 대칭적으로 배치된 다발 형태로 구성되어 있으나 실험에서는 1개의 제어봉 모사 장치에 대해서만 측정하였다. 그 이유는 제어봉의 직경과 각 제어봉 간의 pitch의 비가 상당히 커서 봉간의 coupling 효과가 미약하기 때문이다.[9]

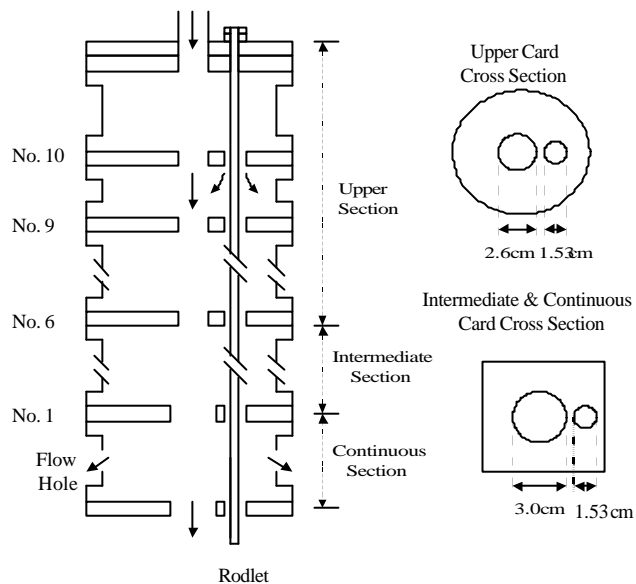


그림 5 제어봉 진동 모사 장치

이상과 같은 무차원 parameter에 맞춰 유사성을 유지하며 설계한 결과 그림 5와 같은 실험 장치를 완성하였다.

4. 제어봉 진동 모사 실험

1) 진동 측정 장치

진동 측정장치는 비접촉식 Laser 진동 측정 센서와 oscilloscope를 사용하여 실시간으로 진

동을 측정하였다. 비접촉 방식의 측정이 이루어진 이유는 실험대상 제어봉이 밀폐된 안내판내에서 진동을 하고 진동의 크기가 미약하기 때문에 접촉식 진동 측정장치로는 정확한 측정 및 장치의 설치가 상당히 힘들기 때문이다. 측정 장치의 재원은 표 2와 같다.

표 2 CLV-700 Sensor Head

항 목	재 원
Weight	500 g
Dimensions	228×48 mm
Laser output	<1mW, HeNe (633 nm) Laser safety class II
Fiber cable	3 m to laser module (up to 10 m optical)
Laser spot size	45 μm @ 316 mm
Operating temp.	0 - 40 °C

2) 진동 측정 실험 결과

제어봉 진동 측정 실험은 최초 설계시 Reynolds number 계산에 사용되었던 유량(110 l/min)을 기준으로 하여 10 l/min씩 줄여가면서 진동의 변화를 실시간으로 측정하였다. 특히 울진 1, 2호기 제어봉 E.C.T. 결과 제어봉의 최대 마모지점인 6번 card 부근을 중심으로 측정하였으며 유동량의 변화, 즉 유속의 변화에 따른 제어봉의 진동 변화를 중점적으로 측정하였다. 또한 제어봉의 시간에 따른 진폭 변화를 측정하여 모사 제어봉과 안내판의 접촉이 발생하는 영역까지 묘사하였다. 그림 6, 7은 실험결과를 나타낸 것이다.

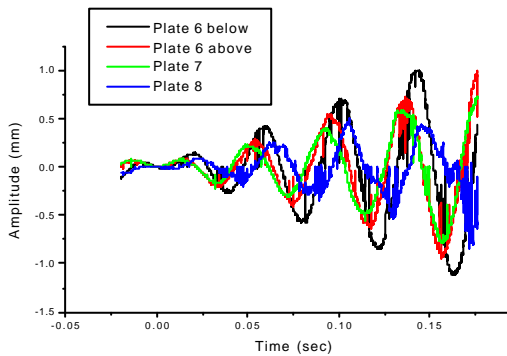


그림 6 각 Plate에서의 제어봉 진폭

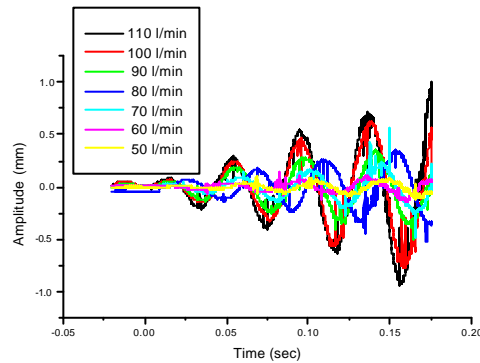


그림 7 Plate 6에서의 유량변화에 따른 제어봉 진폭의 변화

5. 실험 결과 분석 및 향후 과제

모사 제어봉 진동 측정 결과는 울진 1, 2호기 E.C.T. 결과와 매우 유사한 현상을 보여주고 있다. 즉 E.C.T. 결과는 제어봉 마모가 6, 7번 안내판 위치의 제어봉 손상이 가장 심하며 6번 안내판 위치의 제어봉 마모는 Cladding 두께의 42%에 이른다. 이와 같이 모사 제어봉

역시 6번 안내판 근처에서의 진폭은 안내판과 접촉을 발생할 정도로 여기됨을 보여준다.

또한 6번 안내판의 바로 아래에서 측정된 위치가 최고의 진폭을 기록했다는 것은 Upper guide tube에서 Intermediate guide tube 이어지는 위치에서 안내판의 변화가 유체의 난류도를 증가시킴을 예측할 수 있다. 즉 6번 안내판 위치에서 원형 단면적의 Upper guide tube에서 사각단면적의 Intermediate guide tube로 변함으로써 유동장의 변화를 초래하고 유동 단면적의 감소로 인한 난류도 증가가 모사 제어봉 진동을 여기 시킨다.

그림 8은 안내판과 제어봉의 좁은 Gap에서의 유동을 전산 프로그램으로 모사한 결과인데 하류측 Gap에서 국부적인 횡방향 유동이 관찰된다. 이런 사실로 보아 안내판(Card)에서 제어봉과 안내판 사이의 좁은 틈을 유동이 빠른 속도로 통과하는 Jet expansion 현상을 발생시킴을 예측할 수 있다. 이런 유동은 제어봉 System의 Positive damping force를 넘어서는 Negative damping force를 초래하여 큰 폭의 진동이 유발된다. 이러한 진폭의 증가는 유량이 90 l/min에서 100 l/min이 될 때 큰 폭으로 증가됨을 실험결과(그림 9)를 통해 확인할 수 있다.

횡방향 유동에서 봉다발내 봉의 이상화된 진동 반응(그림 10)[9]과 비교해 보면 이런 현상은 유속이 증가함에 따라 진동 메카니즘이 Turbulence excitation에서 Periodic wake shedding으로 접근함을 예측할 수 있다. 제어봉과 안내판 사이의 Gap 위치에서의 국부 유속을 측정함으로써 보다 정확한 원인 분석이 가능할 것이다. 따라서 본 연구는 Laser를 사용하는 Particle Image Velocimetry System(P.I.V.)과 고압 Pump를 사용하여 안내판 부근의 국부 유속과 설계기준 유량이상에서의 모사 제어봉 진동 거동을 측정할 계획에 있다. 향후 실험을 통해 획득한 Data로 제어봉 진동 반응 곡선을 작성, 그림 10과 비교하여

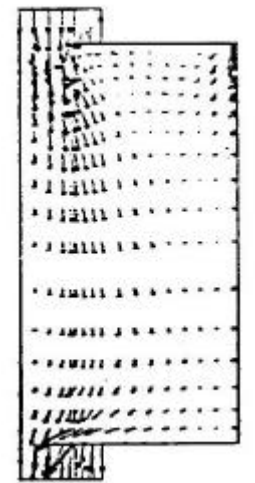


그림 8 upper guide tube내 안내판 사이의 냉각수유동

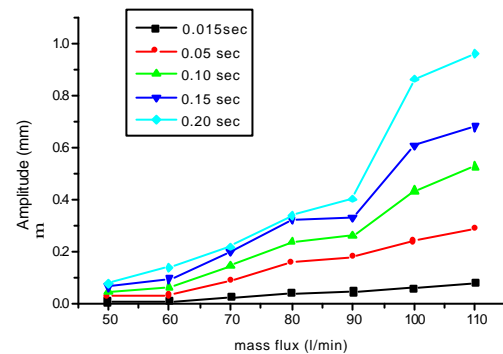


그림 9. 6번 안내판에서의 유량변화에 따른 봉의 진폭 변화

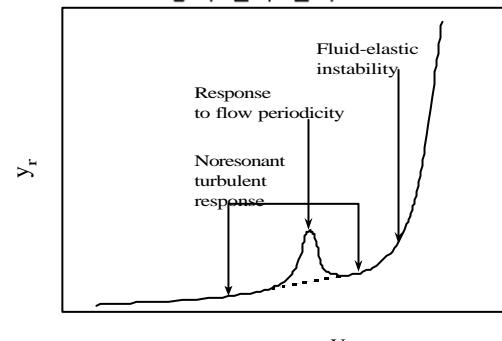


그림 10 쥘류조건에서 봉 집합체에 대한 단일 봉의 이상적인 진동

Periodic wake shedding 메카니즘이 발생할 때의 유속을 규명할 것이다.

6. 참고 문헌

- [1] 울진 원자력 본부 발전소 기술부, "제어봉 관리사례, 울진 2호기 ECT 경험"
- [2] 울진 원자력 본부 발전소 기술부, "울진 1, 2호기 제어봉 검사 후속조치(안)"
원발단(노) 743.06-붙임 1995. 6
- [3] 김상녕, 신철, "유동유발 진동에 의한 제어봉 Fretting Wear의 열수력학적 원인분석", '98 춘계 원자력학회 학술 발표, Vol 1, p.489 - 495
- [4] A. Yasuo, M.P. Paidoussis, "Flow-Induced Instability of Heat-Exchanger Tubes due to Axial Flow in a Diffuser-Shaped, Loose Intermediate Support", Journal of Pressure Vessel Technology, Nov, 1989, vol, 111, p. 428 - 434
- [5] Robert D. Blevins "Flow-induced vibration" 0-442-20828-6
- [6] J. Leclercq "Mechanical behaviour of Control Rod of 900 MWe PWR"
Report No. RC/1-Revision 0 March 1995
- [7] 전력연구원 재료 부식 연구소 "제어봉 상태 진단 기술 개발 " 중간 보고서 1997. 4
- [8] B. S Park, K. L. Jeon, S. K. Chung, H. T. Lim "Computational Fluid Dynamics Analysis for Spacer Grid Design" KNFC
- [9] M.P. Paidoussis, "Fluidelastic Vibration of Cylinder Arrays in Axial and Cross Flow : State of the Art.", Journal of Sound and Vibration (A81), 76(3), p. 329 - 360