2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

유한요소법을 이용한 중수로 핵연료채널의 동특성해석

Finite Element Analysis for the Dynamic Characteristics Analysis of The PHWR Nuclear Fuel Channel

박진호, 이정한, 김봉수
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

가압 중수로형 핵연료 채널의 동특성 파악을 위해 Pressure Tube의 요동과 손상에 따른 기능 상실을 예측할 수 있도록 핵연료 채널 Tube Spacer의 위치 변동과 기능 상실 모사에 따른 핵연료 채널의 고유진동수 변화를 해석하였다. 핵연료 채널의 동특성 해석결과 Tube Spacer의 존재 유무와 Pressure Tube 지지조건 변화에 따라 고유진동수가 변하며, 핵연료 채널은 Tube Spacer와 Pressure Tube의 기능을 상실할 경우에만 동특성이 변한다는 것을 알 수 있었다. Tube Spacer와 Pressure Tube의 기능 상실에 대한 고유진동수와 건전할 경우의 고유진동수를 무차원화하여 고유진동수의 변화 양상을 알아보았다.

Abstract

The effects of the support conditions of Tube spacer and pressure tube on the vibration characteristics of the PHWR fuel channel has been investigated in order to develop the faults database. The 3-dimensional free vibration analysis was performed for the simplified finite element model to the fuel channel system. It is found that the natural frequencies of the system remarkably decrease when the stiffness of the Tube spacer at each position is totally lost and/or the support condition of the pressure tube would be degraded more than 50%.

1. 서 론

원자력 발전소의 장기 운전으로 인한 원자로 계통의 동적 결함 발생 가능성이 증가함에 따라 예방정비를 위한 감시기술의 필요성 또한 증대되고 있다. 이러한 결함 발생 가능성의 예측을 위한 방편으로 원자로 잡음 신호를 이용하여 가동중 핵연료 채널계통의 건전

성 감시기술을 개발할 필요가 있다. 또한 핵연료채널 및 센서계통의 진동특성 변화를 이용한 가동중 동적 건전성 감시기술은 기존에 수행중인 비파괴 결함탐지 기술에 대한 보완적 수단이 될 수 있다.[1,2,3,4]

원자로의 잡음신호는 원자로의 정상상태 운전시 원자로 계통의 각종 동적 파라미터(핵적, 열수력적, 구조동역학적)들의 측정치 중에서 실제로 원자로의 보호 및 제어를 위하여 사용되는 시간평균치(DC 성분)에 수반되는 신호의 변동성분(AC 성분)을 의미하는데, 이러한 잡음 신호를 이용해 감시기술을 개발할 수 있다.

이러한 감시기술개발에 앞서 동적 거동에 따라 측정된 잡음신호를 분석하는데 시간과 비용을 절감하고, 구조적 건전성 평가에 부가적인 수단으로 제공하기 위해서는 먼저 핵연료 채널의 동적 거동 특성을 파악해야한다.

본 연구는 이러한 핵연료 채널의 동적 거동 특성 파악의 일환으로 원자로 가동 중에 발생하는 고열로 길이가 길고 두께가 얇은 shell 형상의 Calandria Tube가 변형하여 핵연료가 위치하고 있는 Pressure Tube의 손상을 예측할 수 있도록 핵연료 채널의 Tube Spacer(TS)와 Pressure Tube의 위치 변동과 기능 상실 모사에 따른 핵연료 채널의 고유진동수와 진동 모우드의 변화를 해석한 후 그 결과를 데이터베이스화하여 실제 핵연료 채널의 가동중의 결함을 예측하는데 이용하고자 한다.

2. 모델링 및 경계조건

핵연료 채널은 크게 Tube Spacer와 Calandria Tube, Pressure Tube, Fuel Bundle로 구성되어 있으며, 해석상 최대한 실제와 근사하도록 단순화하여 모델링 하였다. 특히 모델링시 핵연료 채널의 중점 부분인 Pressure Tube와 Calandria Tube의 경계부분과 Tube Spacer의 위치, 그리고 핵연료 번들 구성에 중점을 두고 모델링 하였다. 그림 1은 핵연료 채널을 단순화 모델링한 단면이다.

여기에서, 구조적으로 가장 취약한 부분은 핵연료 번들이 위치한 중공축 형상 부분으로 핵연료 번들이 위치한 Pressure Tube와 Calandria Tube 사이는 매우 협소하며 4개의 Tube Spacer로서 공간을 확보하고 있다. 단순히 두 가지 튜브의 응력과 변형률등 정적 구조해석을 수행하기 위해서는 2차원으로 모델링하여도 충분하나, Tube Spacer를 포함한 핵연료 채널의 동특성을 상세하게 해석하기 위해서 3차원으로 모델링을 수행하였다.

유한요소 생성은 취급하려는 대상을 해석에 적합하도록 적절한 요소로 분할 구성하여 절점과 요소들을 생성하였다. 본 해석에서는 상용 유한요소해석 코드인 CosmosM [5]을 사용하였으며, Pressure Tube와 Calandria Tube는 CosmosM의 shell4요소를 사용하였고, Tube Spacer는 spring요소를 사용하였다. 그리고 12.55개의 핵연료와 그 사이에 존재하는 유체는 핵연료가 위치하고 있는 Pressure Tube에 집중질량(Lumped mass)으로 부가하였다. Tube Spacer는 Pressure Tube와 Calandria Tube 사이에 spring요소를 사용하였

으며, 보다 정확한 Tube Spacer의 효과를 살펴보기 위해서는 무한개의 Spring 요소를 사용해야하나 해석 코드적용시 많은 시간이 소요되므로 본 해석에서는 Spring 요소 개수를 4의 배수로 늘려가며 해석하여 그 결과값의 변화가 없는 개수인 24개를 원주 방향으로 15° 씩 생성시켰고, 경계부는 Calandria와 Pressure Tube에 coupling시켰다. 실제 Tube Spacer는 Pressure Tube에 채워져 있고 Calandria Tube와 비접촉 상태이나 해석적 모델로 실제와 유사하게 구현하기 위해서 두 tube 사이에 coupled된 형태로 모델링하였다. 핵연료 채널 모델에 사용된 총 요소 수는 22,903개이며, 그림 2는 Calandria와 Pressure Tube의 생성된 요소 단면이고, 그림 2는 핵연료 채널의 생성된 유한요소 모델이다.

Tube Spacer의 강성은 Pressure Tube의 자중과 Tube내에 존재하는 핵연료 그리고 유체 하중을 고려하여 최대처짐 값을 통하여 가정하였다.

Calandria Tube의 경계조건은 Calandria side tube sheet를 기점으로 단순지지로 하였고 Pressure Tube의 경우 End shield lattice tube와 Shield plug 두 지점에서 단순지지 하였다. 그림 3은 Tube Spacer의 존재 유무와 Pressure Tube의 경계조건 변화에 따른 핵연료채널의 해석모델을 나타낸다.

3. 동특성 해석

핵연료 채널의 단순화 모델을 통해 Tube Spacer의 손상 및 이동에 따른 진동특성과 Pressure Tube의 경계조건 변화에 따라 핵연료채널의 진동특성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 자유진동해석을 수행하였다. 자유진동해석 방법은 유한요소법을 이용하였고 해석 프로그램으로는 범용구조해석 프로그램인 CosmosM을 사용하였다. 핵연료 채널 모델의 재질은 SUS304이며 사용된 물성치는 탄성계수 값이 1.95×10^{11} Pa, 프아송의 비가 0.3, 밀도가 7.9×10^{4} N/m^{3}이다. 핵연료 채널 단순화 모델의 자유진동해석에는 4절점 Shell요소를 사용하였다.

본 연구의 해석 과정은 다음과 같다.(그림 3 참조)

- ○ TS(Tube Spacer)가 모두 건전하게 존재할 경우
- ○ TS가 모두 존재하지 않을 경우
- ○ TS 1,2이 존재하지 않을 경우
- ○ TS 1,3이 존재하지 않을 경우
- ○ TS 1,4가 존재하지 않을 경우
- ○ TS 1,2,3이 존재하지 않을 경우
- ○ TS 1,2,4가 존재하지 않을 경우
- ○ Pressure Tube의 안쪽 경계조건 중 왼쪽 경계조건이 기능을 상실했을 경우
- ○ Pressure Tube의 안쪽 경계조건 두 개가 모두 기능을 상실했을 경우
- ○ Pressure Tube의 바깥쪽 경계조건 중 왼쪽 경계조건이 기능을 상실했을 경우

○ Pressure Tube의 바깥쪽 경계조건 두 개가 모두 기능을 상실했을 경우

위에서 제시한 11가지 경우에 대한 해석을 Subspace Iteration Method을 사용하여 수행하였고, Tube Spacer은 Pressure Tube 표면에 동일하게 일정간격으로 배치되어 있고, 2개의 Tube 경계조건은 대칭이기 때문에 상기 제시된 11가지 경우에 대한 해석만 수행하여도 전반적인 핵연료 채널의 동적 거동을 살펴 볼 수 있다. 해석 결과 Tube Spacer가 모두 건전하게 존재하는 핵연료 채널의 경우 기본 고유진동수가 6.19Hz, 2차 모드는 17.51Hz, 3차 모드는 32.25Hz였으며, Tube Spacer 존재 유무에 따른 고유진동수 변화 값은 최대 24%정도 감소함을 알수 있었고, Pressure Tube의 지지조건 변화에 따른 고유진동수 변화 값은 약 28% 감소함을 알수있었다. 표 1과 그림 4 ~그림 10은 Tube Spacer에 존재 유무에 따른 해석 결과이며, 핵연료 채널의 진동 모우드 해석에서 관심영역인 1, 2, 3차 모드에 대한 해석결과 중 형상변화가 뚜렷한 경우에 대해서 제시하였다. 또한 Tube Spacer 존재 유무에 따른 해석은 Pressure Tube 지지조건 변화는 배제하여 수행하였고, Pressure Tube의 지지조건별 해석에서는 Tube Spacer는 건전한 것으로 가정하였다.

상기 해석에서는 단지 Tube Spacer가 원래 존재하는 위치에서 제거한 후에 진동 모드 해석을 수행하였으나, 본 단계에서는 Tube Spacer의 강성이 50% 감소, 즉 손상된 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. Tube Spacer는 고정되어 있는 구조물이 아니라 Pressure Tube 축방향으로 이동이 가능하다. 그리고 크리프나 기타 환경적인 요인으로 강성이 감소될 수 있다. 이러한 상태를 고려하여 핵연료 채널의 동특성 해석을 수행하였다. Tube Spacer(TS) 손상 해석시 앞 절에서 수행한 해석과 동일한 조건을 가지고 단지 TS의 강성만 50% 감소 시켜 해석하였다. 해석결과 Tube Spacer가 모두 존재할 경우 기본고유진동수는 6.05Hz이고, 2차 고유진동수는 16.20Hz, 3차 고유진동수는 31.37Hz 였다. Tube Spacer의 강성변화에 대해 고유진동수 변화값의 차이가 거의 없는 것으로 나타났으며, 이는 핵연료 채널의 TS는 강성이 변하여도 Spacer로서의 기능만 상실하지 않는다면 핵연료 채널의 동적 거동에 크게 영향을 미치지 않음을 알수 있었다. 표 2와 그림 11 ~ 그림 14은 각각의 경우에 대한 해석 결과이다.

표 3은 상기 수행한 핵연료 채널의 동특성 해석 결과를 통해 Tube Spacer가 건전하게 존재하는 경우와 Tube Spacer 일부 또는 전체 손상이 있는 경우, Pressure Tube의 지지조건 손상에 대한 비율로 무차원 해석을 수행한 결과이며, 그림15 ~18은 표 3의 변화율을 다항 회귀 곡선(Polynomial regression)방법을 사용하여 curve-fitting한 결과이다.

4. 결 론

1. 핵연료 채널의 동특성 해석결과 Tube Spacer(TS) 존재 유무와 Pressure Tube 지지조

건 변화에 따른 모우드 형상과 고유진동수가 변화하는 것을 알 수 있었다.
- Tube Spacer(TS) 존재 유무에 따른 고유주파수 변화가 건전한 핵연료 채널에 비해 최대 24%정도 감소
- Pressure Tube의 지지조건 변화시 건전한 핵연료 채널의 고유진동수 보다 약 28% 감소

2. 크리프나 환경적 요인, 열변형등으로 인해 Tube Spacer의 강성이 감소할 경우(해석시 50% 강성 감소) 핵연료 채널의 고유진동수 변화는 거의 없었다. 따라서 핵연료 채널의 Tube Spacer는 강성이 변하여도 Spacer로서의 기능을 상실하지 않는다면 핵연료 채널의 동적 거동에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.
3. Tube Spacer나 Pressure Tube의 경계조건이 일부 또는 전체의 기능이 상실한 경우에 대한 고유진동수 변화 양상을 알아보았다. 그 결과 핵연료 채널의 동특성은 Tube Spacer와 경계조건의 기능 상실의 경우에 동특성이 현저하게 변한다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 박진호,류정수,김희령,남호윤,김태룡 "영광 3&4호기 원자로내부구조물의 동특성 해석 및 검증", '99 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집
2. 월성 2,3,4호기 최종안전성분석보고서 ,한국전력공사
3. Integrity Evaluation of Wolsung Reactor / Fuelling Machine's Components and Fuel for Ambient Temperature Fuelling, 한국에너지 연구소 1986
4. “Design Manual Fuel Channel Assembly”, Wolsong NPP234, 86-31100-FM-000, Revision 0
5. “CosmosM User's Manual for Revision 2.7, Advanced Dynamics”, 2001

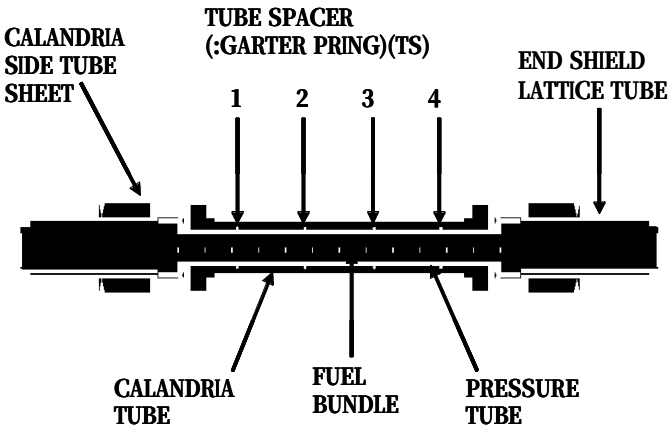


그림 1 핵연료 채널의 단순화 모델 단면

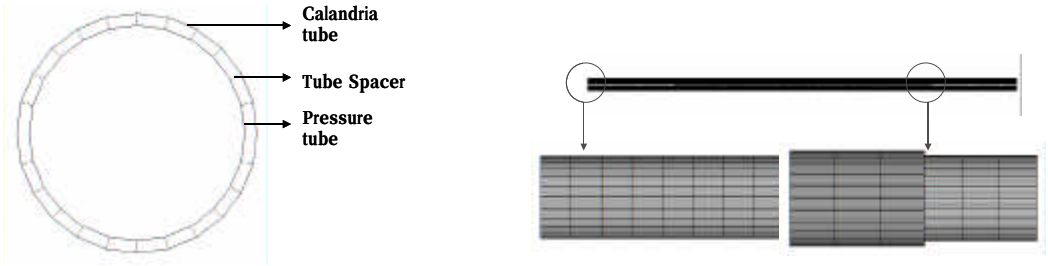


그림 2. Calandria 및 Pressure Tube 모델 단면과 핵연료 채널의 유한요소 모델

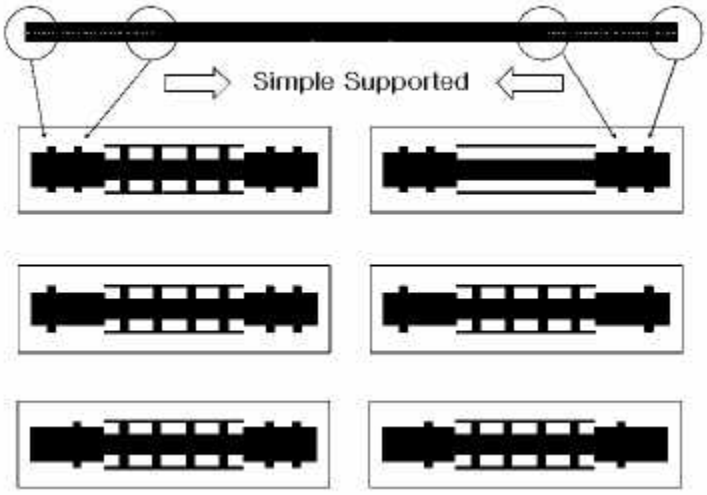


그림 3. 핵연료 채널의 경계조건

표 1. 핵연료 채널의 고유진동수 해석 결과

Mode No.	With TS all	Case without TS						Case without Pressure Tube BC			
		TS all	TS1,2	TS1,3	TS1,4	TS 1,2,3	TS 1,2,4	Inner BC_L	Inner BC_all	Outer BC_L	Outer BC_all
1st	6.19	5.35	6.10	6.12	6.07	5.72	6.03	4.71	3.83	5.21	4.74
2nd	17.51	15.42	14.35	16.57	16.25	15.42	15.02	10.82	8.36	12.85	11.41
3rd	32.25	30.85	31.5	31.34	31.45	30.87	29.65	21.16	13.68	19.96	15.29

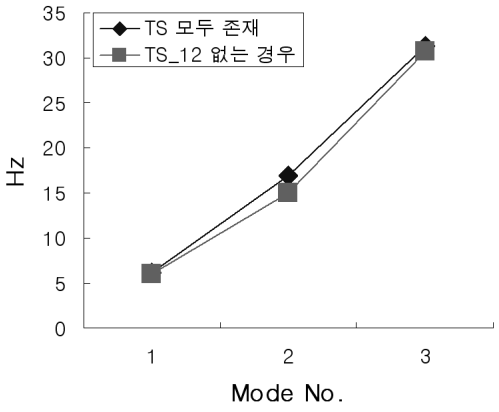


그림 4. TS가 모두 존재 & 모두 존재하지 않을 경우

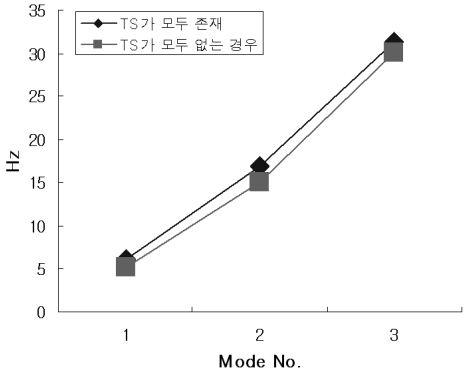


그림 5. TS 1,2가 없는 경우

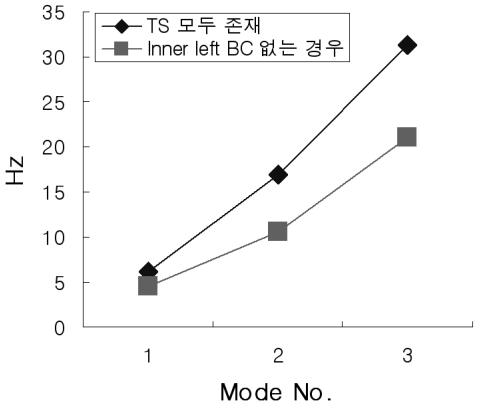


그림 6. TS 1,2,3이 없는 경우

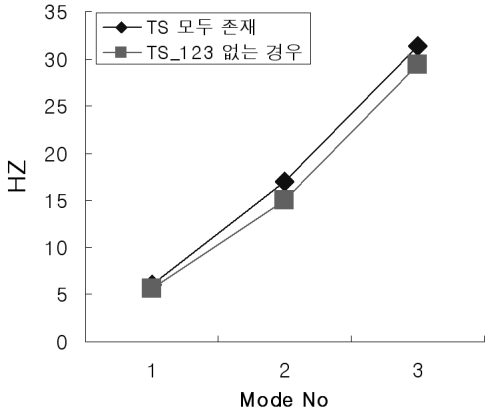


그림 7. Pressure Tube 안쪽 경계조건 중 왼쪽 경계조건이 기능을 상실했을 경우

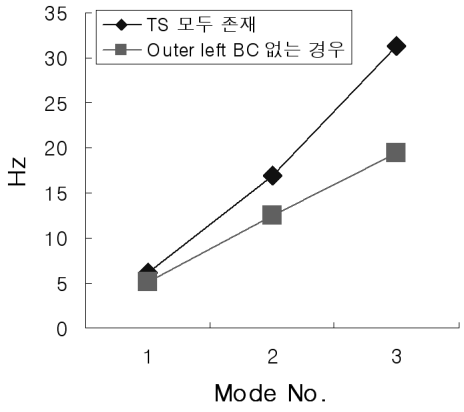


그림 8. Pressure Tube 안쪽 경계조건이 모두 상실했을 경우

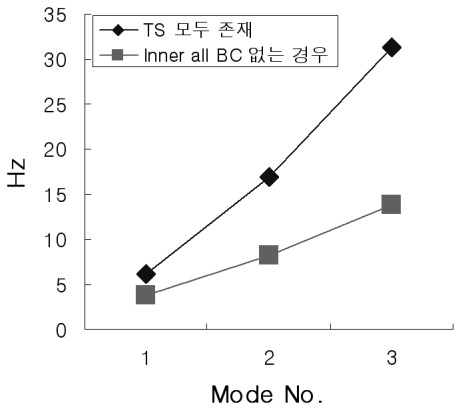


그림 9. Pressure Tube의 바깥 왼쪽 경계조건이 기능을 상실했을 경우

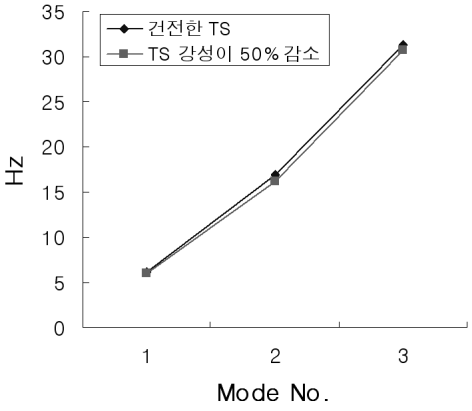


그림 10. Pressure Tube의 바깥쪽 경계조건 두 개가 모두 기능을 상실했을경우

표 2. TS 강성이 50% 감소 했을 경우

Mode No.	With TS all	Case without TS					Case without Pressure Tube BC			
		TS1,2	TS1,3	TS1,4	TS 1,2,3	TS 1,2,4	Inner BC_L	Inner BC_all	Outer BC_L	Outer BC_all
1st	6.05	5.90	5.93	6.03	5.52	5.87	4.33	3.51	5.05	4.28
2nd	16.20	15.06	15.67	15.45	15.17	15.02	10.03	7.15	12.18	10.45
3rd	31.37	30.45	30.43	29.81	29.88	29.97	20.50	13.40	18.97	14.89

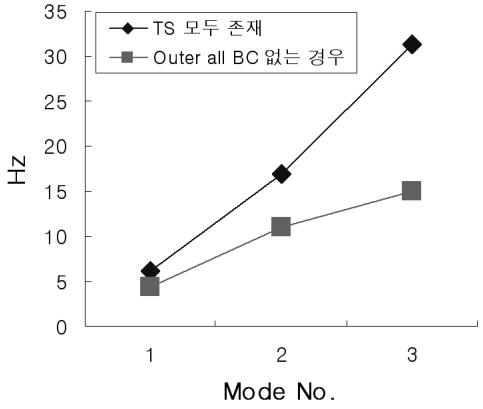
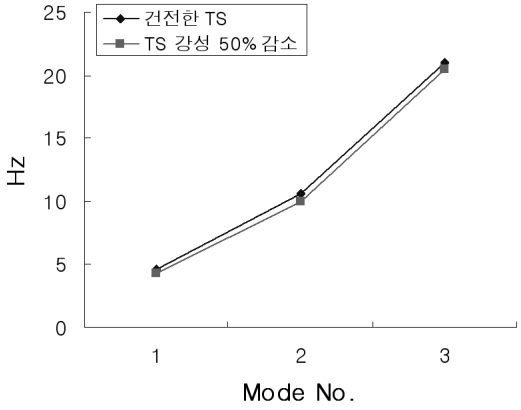


그림 11. TS 모두 존재 - TS강성 50% 감소한 경우그림



12. TS 1,3 존재하지 않는 상태에서 TS강성 50% 감소한 경우

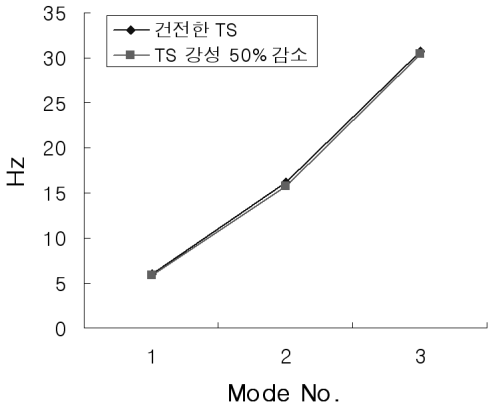


그림 13. Pressure Tube의 안쪽 경계조건 중 왼쪽 경계조건이 기능을 상실한 상태에서 TS 강성 50% 감소한 경우그림

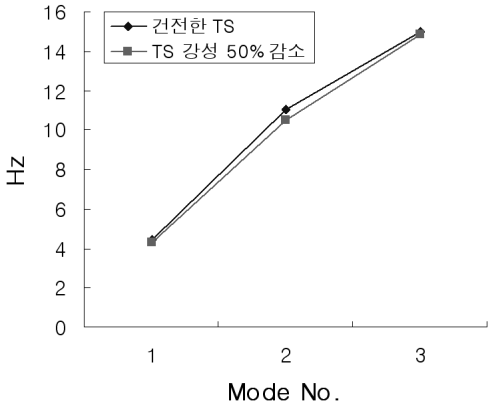


그림 14. Pressure Tube의 바깥쪽 경계조건 모두 기능을 상실한 상태에서 TS 강성 50% 감소한 경우

표 3. 핵연료 채널의 고유주파수 무차원 해석

Mode No.	With TS all	Case without TS						Case without Pressure Tube BC			
		TS all	TS1,2	TS1,3	TS1,4	TS 1,2,3	TS 1,2,4	Inner BC_L	Inner BC_all	Outer BC-L	Outer BC_all
1st	1	0.86	0.99	0.99	0.98	0.92	0.98	0.76	0.62	0.85	0.72
2nd	1	0.88	0.82	0.95	0.93	0.89	0.88	0.62	0.48	0.74	0.65
3rd	1	0.96	0.98	0.94	0.98	0.94	0.95	0.66	0.42	0.62	0.47

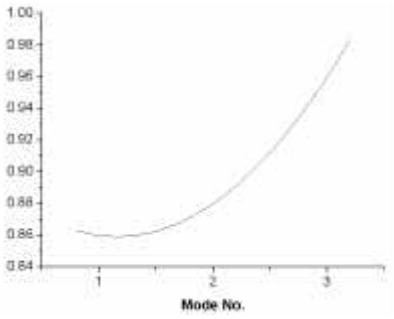


그림 15. TS가 모두 손상된 경우에 대한 무차원 해석

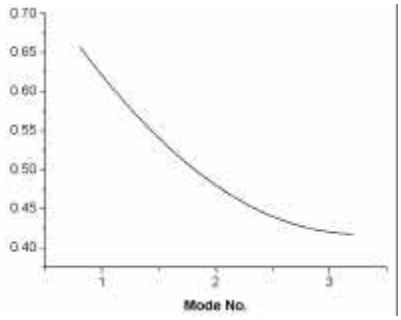


그림 16. Pressure Tube의 안쪽 경계조건이 모두 기능을 상실한 경우에 대한 무차원 해석

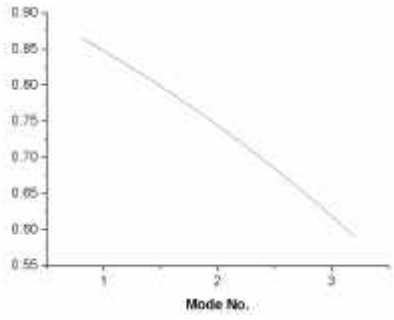


그림 17. Pressure Tube의 바깥쪽 경계조건 중 왼쪽 경계조건이 기능을 상실한 경우에 대한 무차원 해석

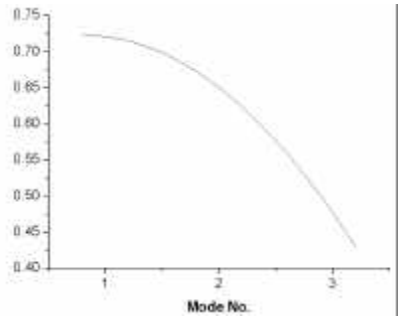


그림 18. Pressure Tube의 바깥쪽 경계조건이 모두 기능을 상실한 경우에 대한 무차원 해석