

가압중수로 핵연료 채널의 지지조건 결함과 가터 스프링의 손상 및
이동에 따른 동적 거동 연구

Analysis on the Dynamic Behavior of PHWR Fuel Channel with
Various Defects in the End Fitting Body and Garter Spring

박진호, 이정환, 김봉수, 박기용
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중수로 핵연료 채널의 결함증상에 따른 동적 거동을 예측하기 위해 3차원 유한요소 모델을 사용하여 garter spring의 이동 및 파손, end fitting body의 지지 베어링의 손상으로 인한 지지기능 상실에 대해 해석적으로 연구하였다. 또한 garter spring의 손상으로 인한 압력관의 요동과 냉각수 유입 시 발생하는 유체-유발 진동을 고려하여 결함증상에 따른 응답해석을 수행하였다. 해석 결과에서, garter spring의 손상은 2, 3차 모우드 주파수 변화에 영향을 미치고, in/out-board 지지 베어링 손상은 핵연료 채널의 관심 모우드 주파수 전역에 걸쳐 동적 거동 변화가 발생하였다. 그리고 랜덤 가진 응답해석을 통해 정상적인 핵연료 채널과 비교하여 결함증상에 따른 응답특성을 알아보았다.

Abstract

The dynamic behavior of PHWR fuel channel was analyzed by the use of 3-dimensional finite element method, under the various fault conditions such as a fault in the end fitting support and the removal/migration of the garter spring in the fuel channel, in order to predict the dynamic behavior for a degraded symptoms of PHWR fuel channel. Moreover, the frequency response analysis for possible fault conditions was also performed considering the effects of the pressure tube vibration and flow-induced vibration by the coolant flow. From the analysis of the frequency responses, defects in the garter spring have influenced the changes of 2nd and 3rd order modes and all the important modes are varied for the failure in the journal bearing in the end fitting body.

1. 서 론

원자력 발전소의 장기 운전으로 인한 원자로 계통의 동적 결함 발생 가능성이 증가함에 따라 예방정비를 위한 감시기술의 필요성이 증대되고 있다. 이러한 결함 발생 가능성의 예측을 위한 방편으로 원자로 잠음 신호를 이용하여 가동 중 핵연료 채널계통의 건전성 감시기술을 개발할 필요가 있다. ^{[1],[2]}

본 연구의 목적은 핵연료 채널계통의 건전성 감시기술 개발의 선행 연구로써 PHWR 핵연료 채널의 발생 가능한 결함조건에 대한 핵연료 채널의 동적 거동 및 응답 특성을 파악하여 핵연료 채널의 건전성 상태를 예측하는데 있다. 중수로 핵연료 채널의 지지조건 결함과 garter spring의 손상 및 이동에 따른 조건을 세 가지로 분류하였다. 첫 번째는 칼란드리아 관과 압력관 사이에 존재하는 4개의 garter spring 중 한 개 또는 그 이상 손상이 발생하는 경우이고, 두 번째는 end fitting body를 지지하고 있는 2개의 in-board journal 베어링과 2개의 out-board journal 베어링 지지의 결함발생이며, 마지막으로 핵연료 교환 시 압력관 내부에 핵연료가 존재하는 얇은 상태에서 지지조건 결함이나 garter spring의 손상이 발생한 경우가 있다. ^[2] 세 가지 분류의 결함조건 조합을 통한 13가지의 결함조건과 garter spring의 이동조건 두 경우를 원자로 운전온도, 265°C를 적용하였으며, 가동 중 정상적인 핵연료 채널과 가동 전, 40°C 핵연료 채널을 포함하여 17가지 조건을 해석하였다. 또한 garter spring의 손상으로 인한 압력관의 요동과 냉각수 유입 시 발생하는 유체-유발 진동을 고려하여 랜덤 가진 응답 해석을 하였다. 랜덤 가진 응답 해석은 17가지 조건에 대해 첫 번째 garter spring이 위치한 압력관에 랜덤 가진을 가하여 핵연료 채널의 응답 특성을 알아보았으며, 결함조건 중 대표적인 결함조건 4가지에 대하여 피더관을 통해 냉각수가 유입부분 end fitting body에 가진을 가하여 응답 특성을 살펴 보았다.

2. 핵연료 채널의 유한요소 모델링

중수로 핵연료 채널의 결함해석을 수행하기 위해 월성 원자력발전소 1호기의 핵연료 채널을 대상으로 적용하였으며 해석상 최대한 실제와 근사하도록 단순화하여 모델링 하였다. 핵연료 채널의 주요 구성요소들은 압력관, 칼란드리아 관, Garter spring, Liner tubes, 그리고 End fitting body로 이루어져 있다. 그림 1은 단순화한 핵연료 채널모델의 단면이다. 핵연료 채널의 결함해석 모델은 기존에 개발된 모델을 CosmosM을 사용하여 개선하였다. ^[1] 기존 결함해석 모델은 두 개의 shell을 사용하여, 압력관, 칼란드리아 관, end fitting body 그리고 garter spring 구성요소만 3차원으로 구현하였으나, 본 연구에 사용된 결함해석 모델은 Liner tube을 고려하여 다음과 같은 제원, 물성치, 그리고 부가 질량 효과를 적용하였다.

압력관의 길이는 6.18m이며 물성치는 265°C의 Zr-2.5 wt% Nb를 사용하였다. 25.4kg 인 12개의 핵연료 번들과 냉각수가 pressure tube 내에 채워져 있으므로 pressure tube의 density를 증가시켜 모델링 하였다. 칼란드리아 관의 길이는 5.94m이며, zircalloy-2의 물

성을 사용하였고 칼란드리아 관을 감싸고 있는 중수의 유체역학적 질량 14.7kg/m를 고려하여 부가질량으로 사용하였다.^{[3],[4]} End fitting body와 Liner tube의 길이는 각각 2.36m와 1.97m이며, SS403 재질로 되어있다. closure plugs, shielding sleeves, 그리고 shield plug와 같은 세부 부품들은 강성은 제외하고 질량으로 End fitting body와 Liner tube에 부가질량으로 적용시켰다. 위 네 개의 관들은 4절점 탄성 shell 요소를 사용하였다. Garter spring의 위치는 압력관 중심선에서 약 0.5m 떨어진 곳에 위치하며 다음 스프링까지의 간격은 1.04m로써 스프링 요소를 사용하였다. Garter spring의 효과를 살펴보기 위해서는 무한개의 스프링 요소를 사용해야 하나 해석 코드 사용시 많은 시간이 소요되므로 적절한 요소개수를 요구한다. 본 연구에서는 예비해석을 통해 결과 값에 영향을 미치지 않는 요소 수인 24개를 원주 방향으로 15° 간격으로 생성시켰다. 또한 스프링의 강성은 압력관의 처짐 값을 계산하여 2.3×10^8 N/m의 강성을 적용하였다. 핵연료 채널 유한요소 모델에 사용된 요소 수는 3488개가 소요되었다. 그림 2에서 각 요소들의 유한요소 모델을 설명하고 있다.

3. 동특성 해석 및 검증 시험

핵연료 채널의 유한요소 모델을 이용하여 동특성 해석을 수행하였다. 핵연료 채널의 경계조건은 end fitting body의 in/out-board 저널 베어링으로 지지되므로, 경계부를 롤(rolled support)조건으로 설정하였으며, 부가질량으로 설정한 closure shield는 부가질량으로 처리하고 liner tube 끝 단을 축 방향으로 구속하였다. 그리고 liner tube와 압력관은 축 방향으로 커플링하였으며, liner tube와 end fitting body는 반경방향으로 커플링 한 다중 제약조건을 사용하였다. 그림 3은 해석에 사용된 경계조건과 다중제약의 위치 및 방향을 나타내었다.

핵연료 채널의 동특성 해석 결과 1차 모우드 주파수는 5.5Hz, 2차,3차 모우드 주파수는 각각 15.0Hz와 28.1Hz로 전형적인 빔 모우드 형상으로 나타났으며 그림 4-(a)에서 보여주고 있다. 이러한 핵연료 채널의 해석모델의 타당성을 검증하기 위해서 시험을 수행하였다. 검증 시험은 실제 발전소의 수직 중성자 탐지기를 통해 취득한 데이터를 분석 하였다. 그림 4-(b)의 검증시험 분석 결과를 보면, 약 6Hz와 16Hz에서 핵연료 채널의 1차, 2차 모우드 주파수로 판단되는 주파수 피크를 볼 수 있다. 따라서 해석 결과와 검증 시험 결과가 매우 유사함을 볼 때 핵연료 채널의 해석 모델이 적합하다는 것을 알 수 있다.

4. 결함증상 시뮬레이션

검증된 중수로 핵연료 채널의 유한요소 모델을 통해 결함증상 시뮬레이션을 수행하였다. 핵연료 채널의 결함은 세 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째, Garter spring 위치 이동과 손상에 따른 기능 상실이 있다. garter spring의 결함은 girdle wire가 끊어지거나 스프링이 찌그러져 제 기능을 발휘하지 못하는 상황과 스프링이 움직이는 경우가 존재한다.^[5] 두 번째는 핵연료 채널의 지지 베어링의 결함이다. 핵연료 채널의 지지 베어링은

각 end fitting body에 두 곳씩 지지되어 있다. 원자로의 장기 운전으로 인해 지지 베어링이 파손되는 경우를 고려하였다. 마지막으로 핵연료 교체 시, 압력관 내에 핵연료가 존재하지 않는 경우 지지베어링의 손상이나 garter spring의 결함이 발생하는 경우이다. 핵연료 채널의 결함해석은 원자로 가동 중 온도 265°C를 적용하였다. 세 가지 분류의 결함 조건 조합과 원자로 가동 전 상태를 포함하여 14가지의 결함증상 별 해석을 하였으며, 건전한 핵연료 채널의 조건을 기준으로 하여 비교 하였다. 결함조건에 이해를 돕기 위해서 그림 5에서 결함증상 별 핵연료 채널의 상태를 모사하고 있다.

Case1은 4개 지지 베어링이 end fitting body에 견고히 지지되어 있으면, garter spring이 설계 기준에 맞게 위치하고 있는 건전한 상태의 핵연료 채널의 경우이다.

Case2에서 case5은 end fitting body 지지 베어링의 비정상 지지조건에 대한 경우이다. In-board 베어링 또는 out-board 베어링의 결함에 대한 시험이다.

Case6에서 case10은 garter spring의 결함 시나리오에 대한 시험이다. Case11과 case12는 지지 베어링과 garter spring의 다중 결함이 발생한 경우를 고려한 시험이다.

Case13과 case14는 핵연료 교환 시 압력관 내부에 단지 핵연료는 존재하지 않지만 핵연료 채널은 건전한 경우와 핵연료를 교체하는 과정에서 garter spring이 모두 결함이 발생한 경우에 대한 시험이다. Case15는 원자로 가동 전, 즉, 핵연료 채널의 온도가 40°C, 건전한 핵연료 채널에 대한 시험이다.

핵연료 채널의 결함해석 결과 비정상적으로 지지된 경우 중 in-board 베어링 결함 시 정상적인 핵연료 채널의 1차,2차,3차 모드 주파수가 각각 5.5Hz, 15.0Hz, 28.1Hz에 비해 1차 모드 주파수가 10~18%, 2차 모드 주파수는 25~35%, 3차 모드 주파수는 24~34%로 감소하였다. Out-board 베어링의 결함으로 인해 end fitting body의 약 20Hz 진동 모우드가 발생 하였다. 압력관의 진동 모우드가 핵연료 채널의 지배 모우드이기 때문에 압력관에 가까운 in-board 베어링의 결함 발생시 핵연료 채널의 압력관 동특성에 미치는 영향이 out-board 베어링의 결함에 비해 큰 것을 알 수 있다.

Garter spring 결함 시나리오 중 garter spring이 모두 손상된 경우 대한 1차 모드 주파수가 13%, 2차 12.7%, 그리고 3차는 9%로 감소하였다. garter spring의 결함증상은 1차 모드에서는 거의 변화가 없으며, 2차,3차 모우드의 변화를 통해 알 수 있다.

다중 결함조건, 즉 지지베어링과 garter spring의 손상이 동시에 발생한 경우로써, 22%~32%로 1차 모드 주파수 변화가 가장 큰 것을 볼 수 있다. 핵연료가 없는 핵연료 채널은 30~54%정도 모드 주파수가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 핵연료 채널의 질량이 핵연료 무게의 차만큼 감소하였기 때문이다.

원자로 가동 전 핵연료 채널의 모드 주파수는 고온과 저온에서 재료의 물성 차이로 인해 1차 5.67Hz, 2차 15.44Hz, 그리고 3차 29.26Hz로 운전 중인 상태보다 약간 크게 나타났다. 결함조건에 대한 모드 주파수 변화는 표 1를 통해 정리했다.

5. 랜덤 가진 응답 해석

핵연료 채널의 가진 형태는 기계 구조물 진동이나 압력관과 칼란드리아관 사이에 존재하는 garter spring의 손상으로 발생하는 압력관의 요동과 end fitting 요소 내에 냉각수 유입에 의한 유체에 관련된 가진에 의해 발생됨을 알 수 있는데 이는 랜덤가진의 형태를 갖는다.

이러한 랜덤 가진에 대한 정상적인 핵연료 채널과 비정상적인 경우의 응답특성을 살펴보고자 한다. 정상적인 핵연료 채널과 14개의 결합조건에 대해서 첫 번째 garter spring이 존재하는 위치의 압력관에 랜덤 가진을 부과한 응답 특성을 살펴 보았다. 그리고 정상적인 핵연료 채널과 대표적인 결합조건, case2, case4, case13에 대해서 end fitting body의 냉각수 유입 부분에 랜덤 가진에 대한 응답 특성을 알아 보았다.

압력관의 랜덤 가진 응답 곡선은 그림 6과 같다. 그림 6에서 보여지듯이 지지 베어링 결합에 대한 응답 특성은 1차, 2차, 3차 모드 주파수 변화하는 것을 볼 수 있으며, garter spring 손상 발생시에는 1차 모드 응답은 거의 변화가 없는 반면에 2차,3차 모드의 응답특성이 정상적인 핵연료 채널에 비해 차이가 나는 것을 알 수 있다. 또한 그림 7의 end fitting body의 랜덤 가진 응답 곡선을 보면 약 20Hz의 응답 주파수가 핵연료 채널의 동적 거동에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 8의 garter spring의 이동에 따른 응답 특성 또한 2차, 3차 응답 특성이 변한다는 것을 알 수 있다. 이러한 핵연료 채널의 결합에 대한 응답해석을 통해 핵연료 채널의 동적 거동에 영향을 미치는 주파수를 파악할 수 있었다.

6. 결 론

- 1) 중수로 핵연료 채널에 작용하는 전형적인 1차 및 2차 고유진동수는 약 6Hz와 16Hz이다.
- 2) 핵연료 채널이 비정상적으로 지지된 경우 in-board 베어링의 손상이 압력관의 동특성 변화에 지배적인 것을 알 수 있었다. Out-board 베어링의 결합은 end fitting body의 동적 거동에 영향이 크다는 것을 알 수 있었다.
- 3) Garter spring의 결합은 핵연료 채널의 2차 및 3차 고유 진동수에 영향을 미친다.
- 4) 랜덤 가진 응답 해석을 통해 핵연료 채널의 지지베어링 결합과 garter spring 손상 및 이동 발생시 동적 거동 특성을 예측할 수 있다.

결합조건에 대한 핵연료 채널의 동적 거동 해석과 랜덤 응답 해석 결과를 토대로 하여 핵연료 채널 계통의 건전성 감시 시스템의 참고 자료로 사용될 수 있으며, 정비영역 예측이 가능해진다. 따라서 이 결과를 통해 핵연료 채널의 치명적인 손상을 미연에 방지할 수 있을 뿐 아니라 정비시간 및 비용 절감을 기대할 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 박진호, 이정한, 김봉수, “유한요소법을 이용한 중수로 핵연료채널의 동특성 해석”
‘2002 원자력학회 춘계학술발표회 논문집
2. D.D Derksen, B.A.W. Smith, “Modeling of CANDU Fuel Channel Vibration to Support Neutron Flux Noise Analysis”, AECL, 1997
3. “Design Manual Fuel Channel Assembly”, Wolsong NPP 234, 86-31100-DM-000, AECL, 1995
4. 월성 1호기 최종안전성분석보고서, 한국전력공사
5. E.F. IBRAHIM, Examination of Garter Springs from CANDU Reactors, AECL-8767, 1985

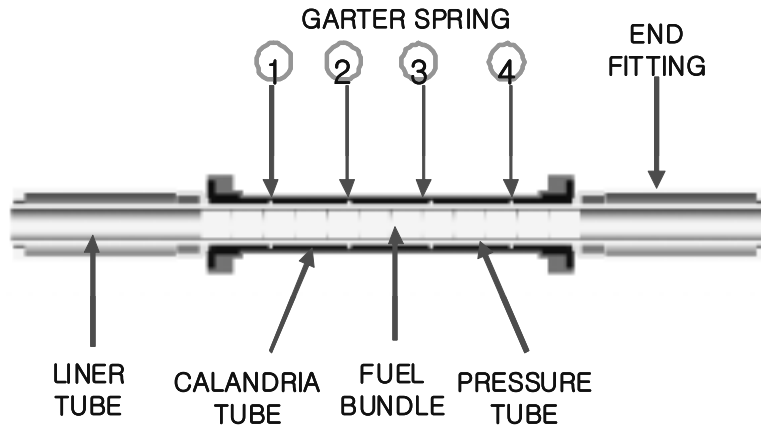


그림 1. 핵연료 채널의 단순화 모델

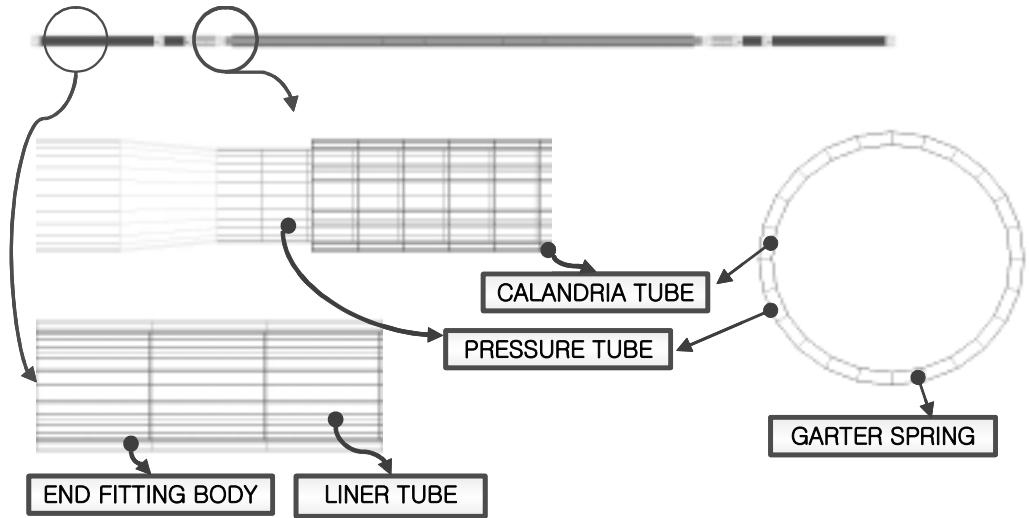


그림 2. 핵연료 채널의 유한요소

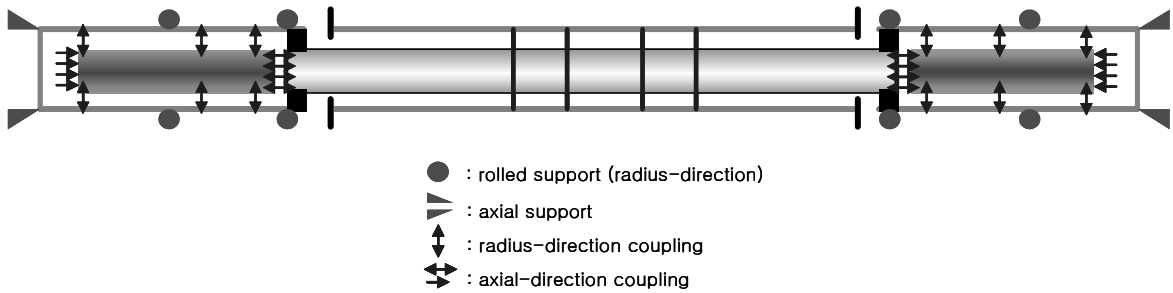
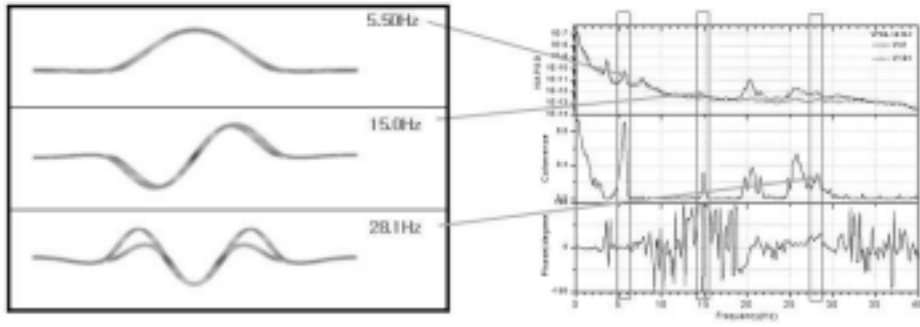


그림 3. 경계조건 및 다중제약 조건



(a) 동특성 해석 결과 (b) 측정 결과
 그림 4. 핵연료 채널 동특성 해석 및 검증 시험

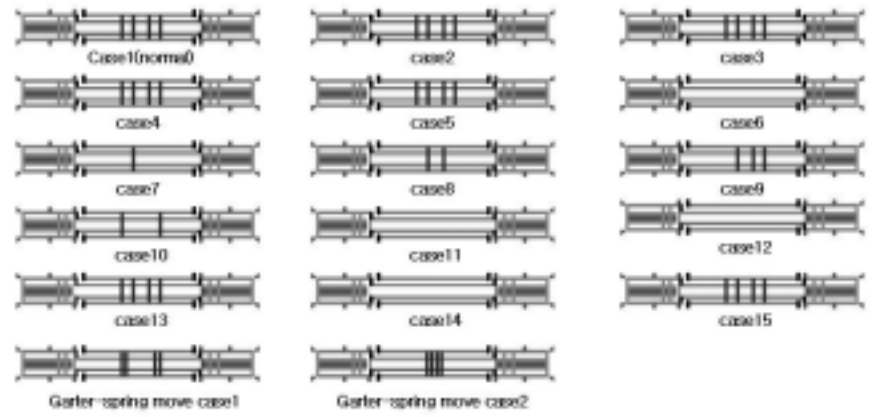
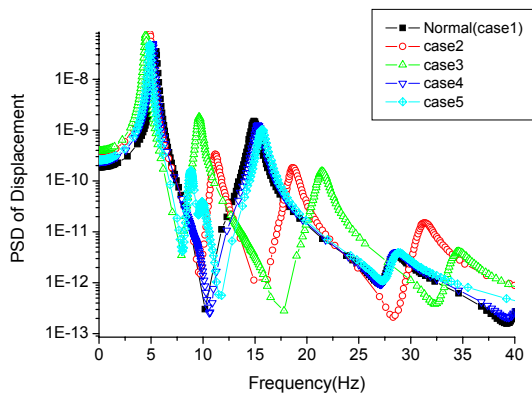


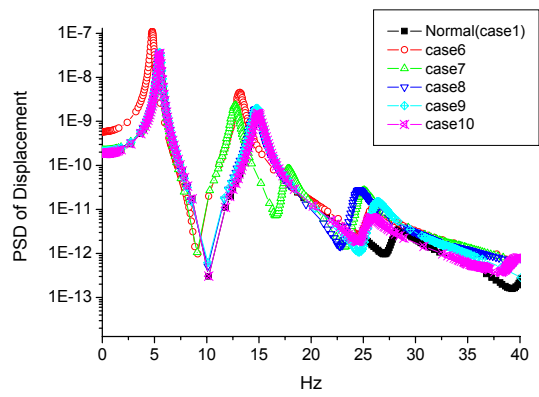
그림 5. 핵연료 채널 결함해석 조건

표 1. 결함조건에 따른 대한 고유 진동수

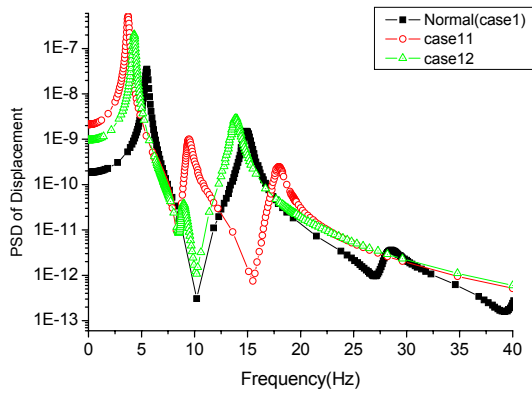
CASE	NATURAL FREQUENCIES (Hz)		
	1st	2nd	3rd
1	5.49	14.93	28.09
2	4.92	11.17	18.63
3	4.49	9.62	21.44
4	5.17	15.32	28.23
5	4.89	15.67	28.37
6	4.79	13.16	25.64
7	5.46	12.72	24.79
8	5.48	14.68	24.37
9	5.49	14.78	26.11
10	5.49	14.92	25.42
11	3.73	7.16	17.85
12	4.31	7.16	13.88
13	7.89	21.62	45.41
14	7.16	23.62	41.66
15	5.67	15.44	29.26



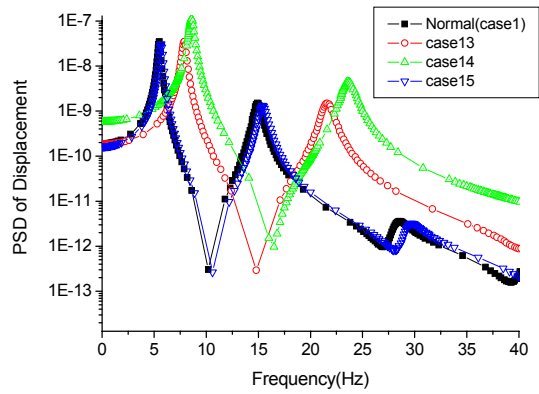
(a) 비정상 지지조건



(b) garter spring 시나리오



(c) 다중결합 조건



(d) 핵연료가 없을 경우 및 40°C

그림 6. 압력관의 랜덤가진 응답 특성 그래프

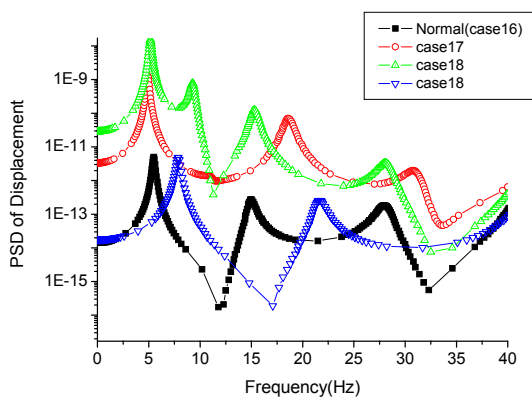


그림 7. end fitting 가진 응답 특성

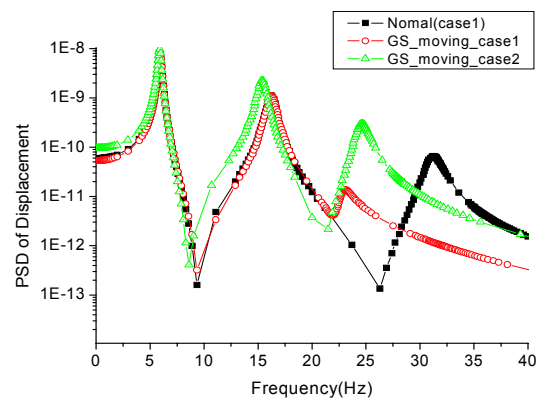


그림 8. garter spring 이동 조건