

〈논 문〉

## 기계적 결함이 있는 원자로 내부구조물의 유한요소해석

정승호\* · 박진석\* · 김태룡\*

(1996년 10월 23일 접수)

### Finite Element Analysis of Reactor Internals with Structural Faults

Seung Ho Jung, Jin Seok Park and Tae Ryong Kim

**Key Words :** Ulchin-1 Nuclear Power Plant(울진원전 1호기), Reactor Internals(원자로 내부구조물), Finite Element Analysis(유한요소해석), Ex-core Neutron Signal(노외중성자 신호)

#### Abstract

This paper concerns with the finite element analysis of reactor internals with structural faults. For Investigating the influence of hold-down spring faults on dynamic characteristics of CSB (core support barrel), reactor internals of Ulchin-1 nuclear power plant are modeled using finite element method and simulated with artificial defects on the hold-down springs. To prove the validity of the finite element models, the calculated natural frequencies of CSB in normal state are compared with those from the measurement results, which shows good agreement. According to results of finite element analysis, CSB beam mode natural frequency decreases by 4.5% in the case of 10% partial relaxation of hold-down springs, and decreases by 18.4% in the case of 20%. The range of shell mode natural frequency change is within 5.3%.

#### 1. 서 론

가압 경수로형 원자로 내부구조물은 핵연료와 제어관련 계통을 제외한 원자로 압력용기 내의 구조물로서 크게 CSB(core support barrel), upper guide structure, core shroud assembly, lower support structure 등으로 구성된다. 또한 원자로형에 따라서는 TS(thermal shield)가 포함되기도 한다. 이러한 원자로 내부구조물은 운전년수의 증가에 따른 경년열화(aging) 현상과 원자로 내부를 순환하는 고온 고압의 냉각수에 의한 유동유발진동(flow induced vibration)에 의해 내부구조물 구성 부품간의 체결력이 저하되기도 하고, 체결부품이 이탈

되어 냉각수 유로를 따라 이동함으로써 노심 유로를 차단할 뿐만 아니라 타기기에 손상을 주기도 한다. 따라서 원자로의 구조적 건전성을 확보하고 사고를 미연에 방지하기 위해서는 원자로 내부구조물의 결함을 조기에 탐지할 수 있는 감시활동이 필수적이다.

원자로 내부구조물 중 결함의 빈도가 높은 부위는 CSB와 원자로 압력용기의 결함부품인 hold down 스프링이다.<sup>(1)</sup> 이와 같은 결함이 발생하면 가장 민감하게 변하는 것이 내부구조물의 진동특성, 즉 고유진동수 및 고유진동모드이다. 따라서 원자로 내부구조물의 진동특성 변화를 감시함으로써 결함의 유무 및 위치 등을 파악할 수 있다. 현재까지 원자로 내부구조물 결함진단을 위해 국내에서 가장 보편적으로 이용되는 진동특성 변화의 감시방법은 원자로 압력용기의 바깥 원주 상에 설

\*회원, 한국원자력연구소

치된 노의 중성자 탐지기로부터 수집된 중성자속 신호의 주파수분석을 통한 CSB의 고유진동수 변화를 감시하는 것이다.<sup>(2,3)</sup> 이 때의 가장 큰 애로점은 변동한계치의 설정이다. 만약 정상상태뿐만 아니라 비정상상태, 즉 결합상태에서의 진동특성에 관한 데이터들을 수집할 수 있다면 이러한 변동한계치의 설정은 통계이론이나 판단이론 등을 통해 결정될 수도 있다.<sup>(4)</sup> 그러나 원자로 결합상태에서의 신호를 채취하여 그 진동특성을 파악하기란 현실적으로 거의 불가능하다. 따라서 정상상태에서의 원자로 내부구조물을 유한요소 모델링한 후, 이 모델에 대하여 인위적인 결합조건을 가해 줌으로써 결합에 따른 동특성 변화를 모사(simulation)할 수 있으며, 이러한 모사를 통해 얻은 결과들은 결합진단시에 매우 유용한 데이터로 이용될 수 있다. 이의 예로서, 미국 St. Lucie 1호기의 손상시 CSB/TS의 유한요소 모델에서 핀 및 고정 lug를 제거하여 동특성 변화를 모사함으로써 중성자신호 변화에 대한 이론적 근거 데이터로 활용한 적이 있다.<sup>(5)</sup> 본 연구에서는 울진 1호기의 원자로 내부구조물을 유한요소 모델링하고 이 모델에 대한 해석결과로부터 빈번히 발생하는 결합 중의 하나인 CSB와 원자로 압력용기 사이의 결합부 결합에 따른 진동특성 변화를 파악하였다. 또한 유한요소 모델의 타당성을 조사하기 위하여 울진원전 1호기의 노의 중성자신호를 측정, 분석하여 그 결과와 유한요소해석 결과를 비교, 검토하였다.

## 2. 원자로 내부구조물의 유한요소 모델링

원자로 내부구조물은 매우 복잡하고 큰 구조물이다. 특히 CSB는 높이 8.3 m, 직경 3.5 m의 원통형 구조물로 다른 구조물들은 CSB의 안쪽에 위치한다. 이 모든 구조물들을 모두 유한요소 모델링한다는 것은 매우 어려운 작업일 뿐만 아니라 비효율적이다. 따라서 본 연구에서는 내부구조물 중 현저한 진동특성을 보이는 CSB 및 TS에 초점을 맞추어 모델링하였다. 즉, 울진원전 1호기의 원자로 내부구조물의 동특성 해석을 위한 유한요소 모델로 CSB와 TS, 그리고 CSB와 TS 사이의 냉각재(물)만을 대상으로 하였다. 따라서 CSB와 TS를 제외한 CSB 안쪽의 내부구조물 및 핵연료는 CSB에 미치는 질량효과만을 고려하였으며, CSB 내부의 물은 단순질량으로 처리하였다. 그러나

CSB와 원자로 압력용기 사이의 물에 대해서는 CSB에 미치는 영향을 고려하기 위해 유체요소로 모델링하였다. 본 연구에서는 CSB와 원자로 압력용기의 결합부 결합에 따른 진동특성 파악이 목적이기 때문에, CSB에 부착된 TS는 CSB와 한 몸체로 진동한다는 가정하에 CSB와 TS의 두께를 합한 두께를 가진 구조로 모델링하였다. CSB 바닥 구조에는 많은 구멍이 있으나 이를 무시하고 구멍이 없는 완전한 바닥으로 가정한 후, 그 부분의 밀도를 낮추어 구멍으로 인한 질량감소의 효과를 표현하였다. 그리고 노의 중성자신호를 측정, 분석한 결과(다음 절에 기술되어 있음)에 의하면 원자로 압력용기의 진동은 거의 나타나지 않으므로 고정된 경계로 간주하였다. 한편 CSB와 원자로 압력용기 사이의 결합부인 CSB의 플랜지부(hold-down 스프링으로 연결되어 있음)는 결합이 없는 정상상태의 경우에는 고정 경계조건으로 처리하였으며, 결합부에 결합이 존재하는 경우에는 플랜지 상의 일부 절점(node)의 결합조건을 해제함으로써 결합부의 결합을 모사하였다.

특히 유체요소의 절점생성시, 유체의 움직임은 반경방향으로 CSB의 움직임과 일치해야 하므로 이를 모사하기 위해 CSB의 절점과 유체의 절점을 CSB 반경방향으로 커플링하였다. 이외의 다른 방향, 즉 원주방향과 축방향으로는 유체와 CSB 사이에 미끄럼이 일어날 수 있도록 커플링을 하지 않았다.

유한요소해석에 사용된 프로그램은 ANSYS 5.0<sup>(6)</sup>이며, 모델링에 사용된 요소는 고체요소인 SHELL63이 1892개, 유체요소인 FLUID80이 2994개이다. 해석시의 계산시간 단축을 위하여 150개의 master 절점을 CSB의 beam 모드 및 shell 모드가 잘 나타나도록 고려하여 선정하였다.

## 3. 무결합시의 유한요소해석 결과

울진원전 1호기의 원자로 내부구조물의 동특성을 파악하기 위해 유한요소 방법을 통해 고유치해석을 수행하여 Table 1의 결과를 얻었다. Table 1에서 1, 2번 모드는 같은 진동모드로 서로 직각인 1차 beam 모드이며, Fig. 1는 해당 진동모드를 보인 것이다. 3, 4번은 같은 진동모드로 Fig. 2에서 보는 바와 같이 1차 shell 모드이다. 이와 같이 같은 진동모드가 방향에 따라 그 진동수가 상이한 것은 원

Table 1 CSB natural frequencies in normal state

Mode	Beam mode	Shell mode	Calculated natural frequency (Hz)	Measured natural frequency (Hz)
1	1	1	8.38	8.2
2	1	1	8.39	
3	1	2	18.00	20.5
3	1	2	18.67	
5	1	3	19.77	—
6	1	3	21.42	—
7	1	4	33.12	—
8	2	3	35.88	—

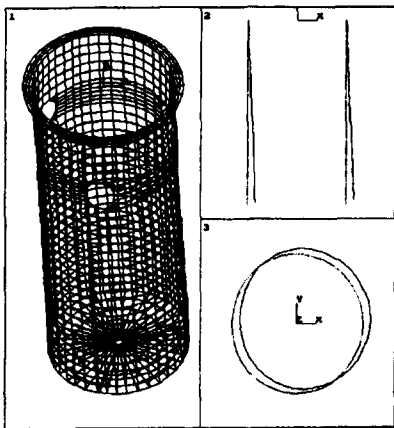


Fig. 1 Fundamental beam mode shape of CSB

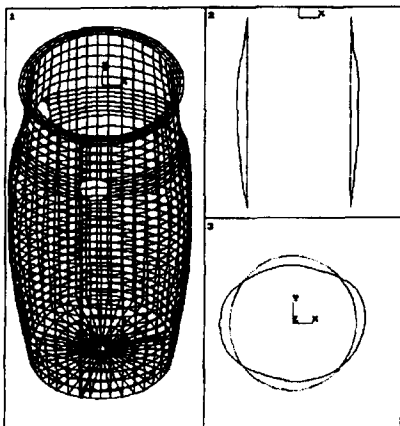


Fig. 2 Fundamental shell mode shape of CSB

자로 내부구조물이 완전한 축대칭이 아니기 때문이다. 5, 6번도 같은 진동모드로 beam 1차 shell 3차, 7번은 beam 1차 shell 4차, 8번은 beam 2차 shell 3차 모드이다. 이 결과를 다음 절에 기술하는 울진원전 1호기의 노외 중성자신호를 측정, 분석한 결과인 CSB 1차 beam 모드 고유진동수 8.2 Hz, CSB 1차 shell 모드 고유진동수 20.5 Hz와 비교해 보면, CSB beam 모드의 고유진동수는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타난 반면, CSB shell 모드의 경우는 약간의 차이를 보이고 있다. 이것은 원자로 내부구조물에 대한 유한요소 모델의 간략화에 기인하는 것으로 생각되기는 하나, 원자로 내부구조물이 거대한 구조물이고, 특히 수중구조물인 것을 감안하면 이 정도의 차이는 나타날 수 있으리라 생각된다. 따라서 본 연구의 초점인 CSB beam 모드에 대한 일치성을 근거로 하여 울진원전 1호기 내부구조물의 유한요소 모델의 타당성을 입증할 수 있었다.

#### 4. 노외 중성자신호 분석결과

원자로 내부구조물의 유한요소 모델의 타당성을 조사하기 위해서는 모달 테스트를 통한 모드해석 방법이 적합하나 현재 가동중인 원자로에 대한 모달 테스트는 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 현재 가동중인 울진원전 1호기 원자로의 노외중성자신호를 수집, 분석하여 내부구조물의 진동모드를 추출한 후, 이들 결과를 유한요소해석 결과와 비교, 검토하는 간접적인 방법을 이용하였다.

노의 중성자신호는 원자로 압력용기 둘레에 설치되는 중성자속 탐지기들로부터 수집되는 신호로 내부구조물의 진동에 의한 성분뿐만 아니라 핵 반응도의 변동성분 및 여러가지 열수력학적 요인들에 의한 성분들도 내포하고 있기 때문에 이들 신호로부터 내부구조물의 진동특성을 정량적으로 파악하기란 용이하지 않다. 그러나 열수력학적 요인에 의한 성분이 0.5~2 Hz 대역에 나타나며, 내부구조물의 진동에 의한 성분은 2.0~25 Hz 대역에서 나타난다는 점<sup>(7)</sup>에 착안하여 주파수분석을 통한 정성적 접근방법, 즉 원자로 내부를 순환하는 냉각수에 의한 가진력이 랜덤하다는 가정하에 중성자신호들의 파워스펙트럼, 상호 신호들 사이의 phase 및 co-

herence들로부터 진동모드를 파악할 수 있다.<sup>(2,3)</sup>

본 연구에서는 울진원전 1호기의 원자로 둘레에 90° 간격으로 상하로 설치된 8개의 중성자 탐지기들중 하부 4개의 탐지기로부터 신호를 수집하여, 이들 신호들로부터 통상적 주파수분석방법 대신에 본 저자가 개발한 phase가 분리된 스펙트럼 계산 알고리즘<sup>(8)</sup>에 의해 CSB beam 모드 성분, CSB shell 모드 성분, 그리고 전역(global) 성분에 대한 각각의 스펙트럼을 계산하였다. Fig. 3은 그 결과를 보여주는 것으로 8.2 Hz 부근에서 CSB beam 모드가, 20.5 Hz 부근에서 CSB shell 모드가 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 여기서 beam1과 beam 2는 서로 직각인 방향의 CSB beam 모드를 의미한다. 그리고 3 Hz와 6 Hz 부근에서 나타난 봉우리는 핵연료집합체의 제 1차 및 2차 bending 모드로 성분이며, 19.9 Hz의 날카로운 봉우리는 내부구조물의 진동성분이 아니라 냉각펌프의 회전수인 1192 rpm(=19.87 Hz) 성분이다.<sup>(9)</sup>

Fig. 4는 phase 분리 스펙트럼 계산에 사용된 중성자신호들의 스펙트럼을 보여주고 있다. Fig. 3, 4의 결과를 비교하여 볼 때, phase 분리방법은 각 모드들의 구별을 용이하게 하며 또한 그 기여도의 추정이 가능하다는 점에서 매우 유용하다.

### 5. CSB 결합부 결합시의 동특성 변화

원자로 압력용기와 CSB와의 결합부품인 hold-down 스프링 상의 결합은 장기간의 운전에 따른 체결력의 저하로 나타나며, 이것의 수학적 모델은 CSB의 상부 고정 경계조건의 완화로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 CSB 상부의 원주방향으로의 44개의 절점중 일부 절점의 고정 경계조건을 해제시켜가며 고유진동수의 변화를 계산하였다. Table 2는 총 절점중 2개(5%), 4개(10%), 6개(15%), 그리고 8개(20%)의 절점에 대한 고정 경계조건을 해제시켰을 때에 계산된 CSB의 고유진동수 변화를 보인 것이다. 앞서와 마찬가지로 모드 1, 2번은 제 1차 beam 모드이며, 모드 3, 4번은 제 1차 shell 모드이다. Table 3은 4차 모드까지의 변화를 백분율로 정리한 것이다. Table 3으로부터 10% 경계조건 완화시 CSB 제1차 beam 모드에 대하여 4.5%의 감소를 보이며, 20% 완화시에는 18.4%가 감소된다. CSB shell 모드에 대하여서는 그 변화율이 5.3% 이내이다. 이들 결과로부터 원자로의

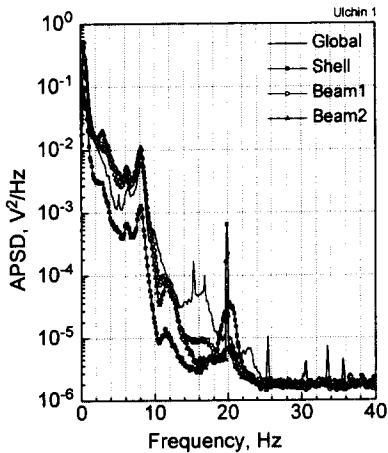


Fig. 3 Phase separated power spectral density of neutron signals of Ulchin-1 NPP

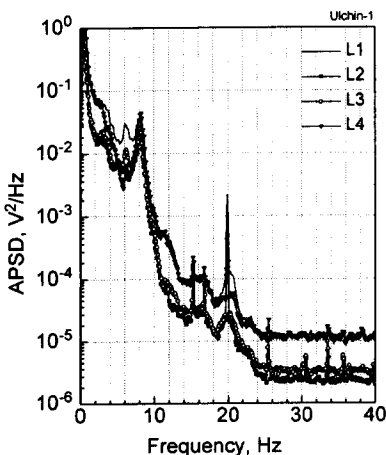


Fig. 4 Power spectral density of Neutron signals of Ulchin-1 NPP

hold-down 스프링 상의 결함으로 야기되는 CSB의 진동특성 변화는 CSB의 1차 beam 모드 진동수의 변화로 나타나며, CSB shell 모드 고유진동수의 변화는 CSB beam 모드에 비해 크지 않음을 알 수

있다. 따라서 CSB의 beam 모드의 변화는 hold-down 스프링의 결함진단에 활용될 수 있으며, 더 나아가 제 1차 beam 모드 고유진동수의 변화율로부터 손상의 정도를 대략적으로 예측할 수 있다.

**Table 2** The change of CSB natural frequencies according to defecting rate (unit : Hz)

Mode	Normal	5% Defected	10% Defected	15% Defected	20% Defected
1	8.38	8.30	8.00	7.47	6.84
2	8.39	8.38	8.37	8.35	8.29
3	18.00	17.90	17.80	17.38	17.04
4	18.67	18.61	18.53	18.51	18.34
5	19.77	19.77	19.72	19.53	19.43
6	21.42	21.35	21.20	21.17	21.10
7	33.12	33.06	32.90	32.87	32.77
8	35.88	35.87	35.81	35.60	34.91

**Table 3** The change rate of CSB fundamental beam and shell mode natural frequencies

Defecting rate (%)	Mode	Frequency (Hz)	Change rate of frequency (%)
5	1	8.30	1.0
	2	8.38	0.1
	3	17.90	0.1
	4	18.61	0.3
10	1	8.00	4.5
	2	8.37	0.2
	3	17.80	1.1
	4	18.53	0.7
15	1	7.47	10.9
	2	8.35	0.5
	3	17.38	3.4
	4	18.51	0.9
20	1	6.84	18.4
	2	8.29	1.2
	3	17.04	5.3
	4	18.34	1.7

$$\text{Change rate} = \frac{\text{Freq. in normal state} - \text{Freq. in abnormal state}}{\text{Freq. in normal state}} \times 100$$

## 6. 결 론

울진원전 1호기의 원자로 내부구조물을 유한요소 해석하고 원자로 압력용기와 CSB와의 결합부품인 hold-down 스프링의 결합을 모사함으로써 결합에 따른 진동특성 변화를 파악하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 무결합상태에서의 유한요소해석 결과 CSB beam 모드 고유진동수는 8.4 Hz, CSB shell 모드 고유진동수는 18.7 Hz로 울진원전 1호기의 노외 중성자신호를 측정, 분석한 결과인 8.2 Hz, 20.5 Hz와 비교적 잘 일치한다.

(2) CSB와 원자로 압력용기와 CSB의 결합부품인 hold-down 스프링의 결합시 CSB 1차 beam 모우드의 고유진동수는 10% 결합의 경우에 4.5%, 20% 결합의 경우에 18.4% 정도 감소되며, CSB shell 모드 고유진동수의 감소율은 5.3% 이내로 CSB 1차 beam 모드 고유진동수에 비해 변화율이 작다.

(3) CSB의 beam 모드의 변화는 hold-down 스프링의 결합 진단에 활용될 수 있으며, 더 나아가 1차 beam 모드 고유진동수의 변화율로부터 손상의 정도를 대략적으로 예측할 수 있다.

## 참고문헌

(1) Kryter, R. C. et al., 1978, "US Experience with In-Service Monitoring of Core Barrel Motion in PWRs using Ex-Core Neutron Detectors," *Proc. Int. Conf. Vibration in Nuclear Plants*, BNES,

London.  
 (2) Wach, D. and Sunder, R., 1977, "Improved PWR Neutron Noise Interpretation based on Detailed Vibration Analysis," *Prog. Nucl. Energy*, Vol. 1, pp. 309~322.  
 (3) Bernald, P. et al., 1977, "Neutron Noise Measurements on Pressurized Water Reactors," *Prog. Nucl. Energy*, Vol. 1, pp. 333~351.  
 (4) Scharf, L. L., 1990, *Statistical Signal Processing: Detection, Estimation, and Time Series Analysis*, Addison Wesley Inc.  
 (5) Lubin, B. T. et al., 1988, "Analysis of Internals Vibration Monitoring and Loose Part Monitoring Systems Data Related to the St. Lucie 1 Thermal Shield Failure," *SMORN V, Progress in Nuclear Energy*, Vol. 21, pp. 117~1126.  
 (6) *ANSYS User's Manual for Revision 5.0*, 1992, Swanson Analysis System, Inc.  
 (7) Trenty, A. et al., 1991, "SINBAD, A Data Base for PWR Internals Vibratory Monitoring," *SMORN VI.*, Gatlinburg, Tennessee, USA., pp. 21.01~21.12.  
 (8) 김태룡, 정승호, 박진호, 박진석, 1995, "중성자신호를 이용한 울진 1호기 내부구조물 진동감시," 한국원자력학회 추계학술대회논문집, pp. 306~311.  
 (9) Kim, T. R., Jung, S. H., Joo, Y. S. and Sim, C. M., 1995, "Korean Experience in Neutron Noise Monitoring of Nuclear Power Plant," *SMORN VII, Avignon, France*, Vol. 1, pp. 32~39.