

하나로 침니내부지지대의 내진해석 및 진동시험

Seismic Analysis and Vibration Test of HANARO In-Chimney Bracket

류 정 수* 윤 두 병*
Ryu, Jeong-Soo Yoon, Doo-Byung

ABSTRACT

The HANARO in-chimney bracket was proposed as a structure which supports the guide tubes of irradiation facilities at the irradiation sites of CT, IR and OR4/5 in HANARO core for the reduction of flow-induced vibration and seismic response of the irradiation facilities. For the evaluation of the structural integrity of the in-chimney bracket, its finite element model is developed. The seismic response analysis was performed for the in-chimney bracket and related reactor structures, under the response spectrum of OBE and SSE. The analysis results show that stress values of the in-chimney bracket and reactor structures for the seismic loads are within the ASME code limits. It is also confirmed that its fatigue usage factor is much less than 1.0. For the verification of the implementation effects of the in-chimney bracket, the vibration level of the guide tube of the instrumented fuel assembly, which is subjected to fluid-induced vibration, was measured and analyzed. The vibration analysis results demonstrate that the vibration level of the instrumented fuel assembly has been remarkably reduced after installing the in-chimney bracket. Therefore, when the in-chimney bracket is installed at the reactor chimney, any damage on the structural integrity is not expected.

1. 서론

연구용 원자로인 하나로의 노심에는 다수의 조사공(CT, IR, OR)이 확보되어 있으며, 이들 조사시험공은 핵연료나 재료의 노내 조사시험과 방사선 동위원소 생산 등에 활용되고 있다. 하나로에서 수행되는 시험용 시료의 노내 조사시험은 크게 조사시험물에 계측장치가 부착되어 있지 않는 무계장 조사시험과 열전대(thermocouple), 중성자계측기 등의 각종 계측장치 및 연결선을 보호하기 위한 안내관(guide tube)이 조사시험물에 결합되어 있는 상태에서 수행되는 계장 조사시험으로 구분할 수 있다. 이러한 조사시험에 사용되는 조사시험물은 압력강하와 진동에 대한 하나로 핵연료 기준을 만족하도록 설계되어야 하며, 조사기간동안 조사시험물 및 원자로구조물의 구조적 건전성을 확보하는 것이 필수적이다.

하나로에는 조사시험용으로 제작된 계장캡슐이나 계장형 핵연료 시험다발 상부에 그림 1과 같이 세장비가 높고 연성(flexibility)을 갖는 안내관이 결합되어 있으며,

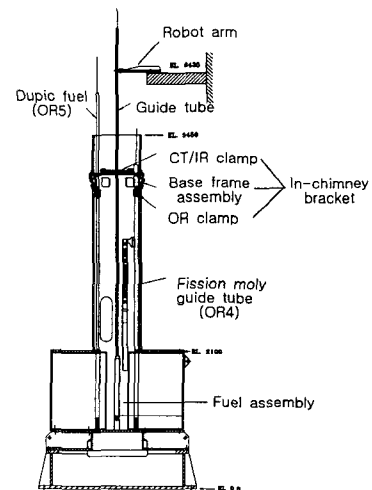


Fig. 1 Schematic diagram of the HANARO in-chimney bracket, instrumented fuel assembly, and reactor structures

* 한국원자력연구소 하나로이용연구단 하나로운영팀

이를 지지하기 위한 고정장치인 로봇팔(robot arm)이 원자로 수조벽에 설치되어 있다.^{(1),(2)} 그러나 로봇팔을 이용하여 안내관을 지지하는 상태에서도 조사중 냉각수의 유동으로 인한 유체유발진동(fluid-induced vibration)의 발생 가능성이 있으며, 실제로 계장캡슐과 계장형 핵연료 시험다발의 시운전시 안내관의 진동이 육안으로도 목격된 바 있다.⁽³⁾

조사시험시 냉각수유동이나 지진발생에 의해 안내관이 과도한 변위진폭으로 진동하게 되면 계장캡슐이나 계장형 핵연료 시험다발의 변위진폭도 커지게 되어 캡슐이나 핵연료가 들어있는 유동관의 진동이 유발될 수 있다. 이때 유동관이 과도하게 진동하게 되면 이웃한 유동관과 부딪쳐서 마찰에 의한 마모가 일어날 수 있으며, 또한 충격력에 의해 손상을 입을 가능성이 있다. 따라서 안내관의 과도한 진동억제와 유동관의 상호 충격 가능성을 원천적으로 줄이기 위하여, 발생가능한 지진이나 냉각수 유동에 의해 유발되는 진동을 감소시키기 위한 방안을 찾고자 하였다.^{(3),(4)} 그 결과로 CT/IR 조사공에 장전되는 시험다발 안내관의 중간부분을 추가로 지지하고, OR4/5 조사공에 장전되는 조사시험물 안내관 상부를 고정할 수 있는 지지대를 제공하는 방안을 제안하였다.^{(4),(5)} 이를 위해 침니내부지지대(in-chimney bracket)를 고안하여 설계/제작한 후, 원자로 침니 상단 아래 70 cm 지점에 설치하였다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 새로 마련된 침니내부지지대의 구조건전성을 평가하기 위해 침니내부지지대 및 관련구조물에 대한 내진해석 및 피로평가를 수행하여, 침니내부지지대 및 관련구조물에 발생하는 최대응력들과 침니내부지지대의 피로사용계수를 구하고 ASME 코드의 허용기준과 비교하였다. 또한 계장형 핵연료 시험다발을 조사공에 장전한 상태에서 침니내부지지대 및 시험다발 안내관에 대한 진동시험을 수행하여 실제 조사시험시 침니내부지지대의 설치효과를 검증하였다.

2. 침니내부지지대의 내진해석

침니내부지지대는 조사시험을 위한 시험다발 안내관의 지지구조물로서 원자로 냉각계통이나 원자로 정지에 주는 영향이 전혀 없으므로 설계등급상 안전등급은 NNS이며, 안전관련 구조물에 인접하므로 내진범주 II급 및 품질등급 T급으로 분류한다. 침니내부지지대에 대하여 ASME Sec. III, NF⁽⁶⁾의 규정을 적용하였다. 침니내부지지대를 포함한 원자로구조물에 대한 보수적인 평가를 수행하기 위해서 SSE와 OBE 지진하중에 대하여 내진해석 및 피로평가를 수행하였다.

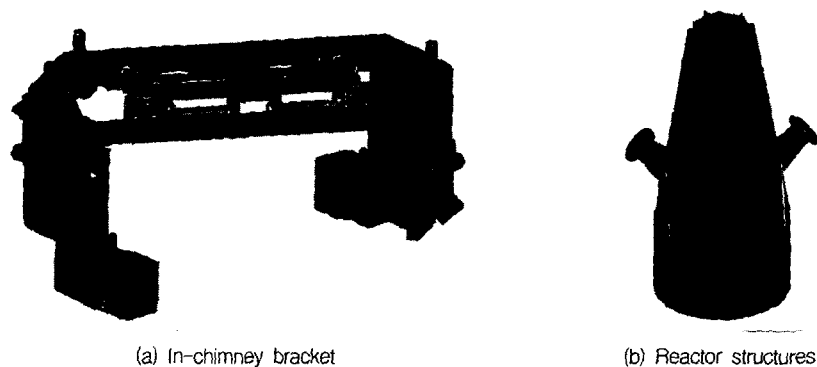


Fig. 2 3-D model of the HANARO in-chimney bracket and reactor structures

2.1. 내진해석

침니내부지지대는 CT/IT 고정장치, OR 고정장치 및 base frame의 3 구조물로 구성되어 있다. 내진해석에 필요한 침니내부지지대 및 관련구조물의 모델을 만들기 위하여 본 연구에서는 IDEAS의 고체모델링 프로그램⁽⁷⁾

을 이용하였으며, 그림 2와 같은 침니내부지지대 및 관련구조물에 대한 3차원 모델을 작성하였다. 내진해석은 ANSYS 프로그램⁽⁸⁾을 이용하여 수행하였으며, 그림 3은 해석에 사용된 3차원 유한요소모델을 나타내고 있다. 지진입력하중은 SSE의 경우 그림 4와 같은 하나로 원자로구조물과 수조벽의 층응답스펙트럼(floor response spectrum)을 포괄하는 값을 사용하였다.^{(9),(10),(11)}

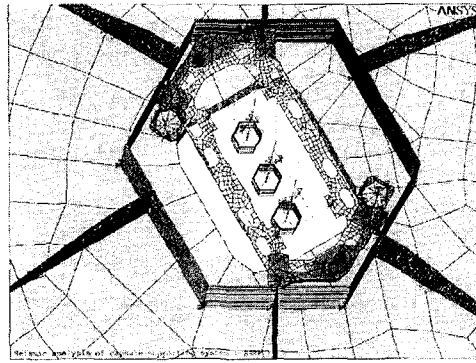
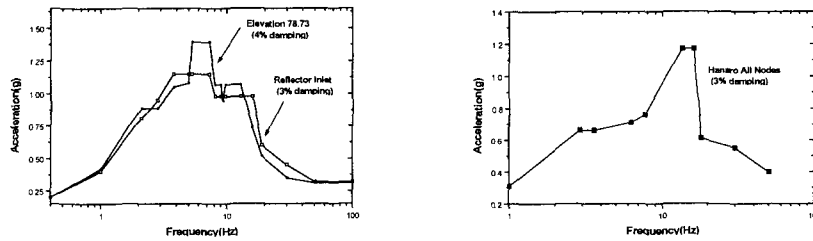


Fig. 3 ANSYS finite element model of the in-chimney bracket and related reactor structures



(a) Horizontal response spectrum(SSE, 0.2g)

(b) Vertical response spectrum(SSE, 0.13g)

Fig. 4 Floor response spectrum for SSE

본 연구에서는 표 1에서와 같이 OR4/5 안내관 및 시험관의 두께(t), 외경(D_o) 및 중량에 따라 2가지 경우로 나누어 내진해석을 수행하였다. 표 2와 표 3은 내진해석을 통해 구한 침니내부지지대 및 관련구조물의 shell 요소에 대한 최대응력을 나타내고 있다. 표 4는 보요소들에 대한 조합응력과 허용응력의 비인 조합응력비를 나타내고 있다. 표 2와 표 3을 관찰해보면 지진하중에 의해 발생하는 침니내부지지대 및 관련구조물의 최대응력들이 모두 ASME code^{(6),(12)}의 허용응력 이하임을 알 수 있다. 또한 표 4의 조합응력비도 모두 1 보다 작으므로, 침니내부지지대와 관련구조물은 지진하중에 대하여 구조적으로 건전함을 확인할 수 있다.

Table 1 Dimension and weight of the guide tube and test tube used in the seismic analysis

Case	OR 4					OR5				
	Guide tube		Test tube		Weight	Guide tube		Test tube		Weight
	D _o (mm)	t(mm)	D _o (mm)	t(mm)		D _o (mm)	t(mm)	D _o (mm)	t(mm)	
Case I	40	5	58	5	15kg	34	1.65	58	2	20kg
Case II	60	5	58	5	15kg	60.5	1.65	58	2	20kg

Table 2 Maximum stresses of the in-chimney bracket for load combinations

Case	Component	Maximum stress intensity, P_m+P_b (MPa)		
		Service level A	Service level B	Service level D
Case I	In-chimney bracket	8.83	51.93	66.73
	OR4 G.T holder	1.61	20.91	31.21
	OR5 G.T holder	0.70	26.90	41.10
Case II	In-chimney bracket	8.83	48.53	60.73
	OR4 G.T holder	1.61	18.41	27.31
	OR5 G.T holder	0.70	24.70	37.80
Allowable stress intensity(MPa)		179.	237.	428.

* Service level A: Dead weight, Service level B: Dead weight+OBE, Service level D: Dead weight+SSE

Table 3 Maximum stresses of the reactor structures for load combinations

Case	Component	Maximum stress intensity, P_m+P_b (MPa)			Allowable stress intensity (MPa)
		Service level A	Service level B	Service level C	
Case I	Chimney	1.07	3.99	5.61	61.9
	Reflector vessel	2.68	20.98	31.38	162.7
Case II	Chimney	1.07	3.91	5.47	61.9
	Reflector vessel	2.68	22.18	33.28	162.7

* Service level A: Dead weight, Service level B: Dead weight+OBE, Service level C: Dead weight+SSE

Table 4 Maximum combined stress ratios of beam structure for case II

Component	Maximum combined stress ratio		
	Service level A	Service level B	Service level D
CT/IR G.T holder	0.027	0.245	0.173
OR4 guide tube	0.004	0.625	0.589
OR5 guide tube	0.001	0.809	0.687

2.2. 피로평가

지진하중에 의한 침니내부지지대의 피로파괴 가능성을 검증하기 위하여, 피로평가를 수행하였다. 먼저 피로 파괴의 가능성이 가장 높은 침니내부지지대의 최대응력 발생지점을 응력해석을 수행하여 선정하였다. 피로파괴에 대한 보수적인 평가를 수행하기 위하여 응력집중계수를 4로 가정하고, SSE 최대응력과 응력집중계수의 곱으로 피크응력강도를 산정하였다. 구해진 피크응력강도(267MPa, 30ksi)와 침니내부지지대의 재질(S.S.304)에 대한 설계피로곡선(ASME, Sec III, Appendix Fig. I-9.2.1)으로부터 침니내부지지대의 허용반복횟수가 100,000회로 예측되었다. 또한 하나의 설계수명동안 5회의 OBE와 1회의 SSE에 의해 발생하는 최대응력 발생횟수는 2,800회로 예측된다.

따라서 피로파괴 가능성을 나타내는 지표인 피로사용계수(fatigue usage factor)는 운전반복횟수(2,800)와 허용반복횟수(100,000)의 비로 구할 수 있다. 피로사용계수는 표 5에서 볼 수 있듯이 0.028로 예측되었으며, 이는

허용치인 1보다 매우 작은 값이므로 하나의 설계수명동안 지진하중에 대한 침니내부지지대의 피로파괴 가능성은 희박한 것으로 판단할 수 있다.

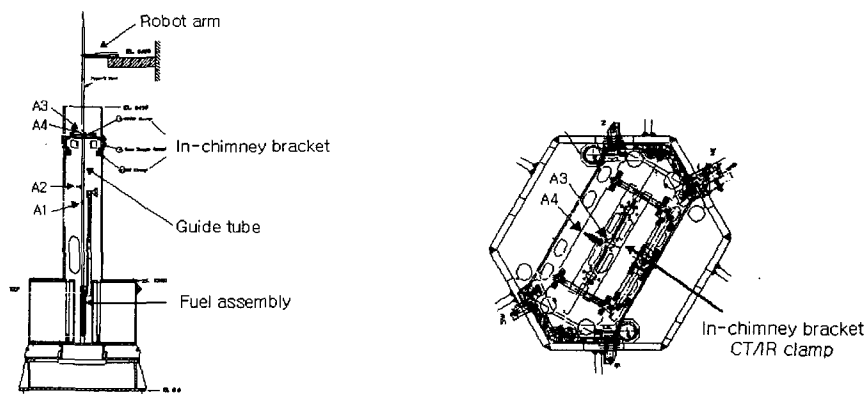
Table 5 Fatigue usage factor of the in-chimney bracket

Maximum stress intensity (S_{max})	Stress concentration factor	Peak stress intensity (S_p)	Operating cycle (n)	Allowable operating cycle (N)	Fatigue usage factor (n/N)
66.73MPa	4	267MPa	2800	100,000	0.028

3. 침니내부지지대의 진동시험

침니내부지지대의 설치효과를 검증하기 위하여 계장형 핵연료 시험다발을 원자로 노심에 장전하여 1차 냉각 펌프의 정상운전중 시험다발 안내관 및 침니내부지지대에 발생하는 진동 수준을 계측하였다.

진동시험에 사용된 계장형 핵연료 시험다발은 다수의 연료봉이 지지격자 사이에 배열된 6각형 집합체로 이루어져 있으며, 집합체 중앙봉 상부에 계장선의 보호를 위해 속이 빈 외경 34mm, 내경 27mm, 길이 5m의 안내관이 연결되어 있다. 그림 5는 침니내부지지대 및 계장형 핵연료 시험다발 안내관의 가속도계 부착위치를 나타내고 있다. 그림 5(a)에서 관찰할 수 있듯이 안내관은 세장비가 매우 크므로 횡방향의 굽힘진동이 발생할 가능성이 높다. 또한 핵연료 장착시 시험다발 안내관의 상부는 로봇팔에 의해 지지되며 하단부는 횡방향으로 고정된 것으로 고려할 수 있으므로 횡방향 진동이 가장 크게 발생할 수 있는 지점은 안내관의 길이방향 중 중간지점이라고 볼 수 있다. 따라서 안내관의 형상 및 장전조건을 고려하여 최대굽힘진동이 발생할 것으로 예상되는 안내관 중간지점을 진동 측정점으로 선정하였으며, 안내관 중간지점의 횡방향 진동을 측정할 수 있도록 2개의 수중용 가속도계를 그림 5(a)와 같이 설치하였다. 침니내부지지대에서 구조적으로 진동이 가장 크게 발생할 수 있는 부분은 침니내부지지대의 CT/IR 고정장치이다. 또한 침니내부지지대의 CT/IR 고정장치도 핵연료 시험다발 안내관의 경우와 마찬가지로 부재의 굽힘진동이 발생할 가능성이 크며, 이 경우 CT/IR 고정장치 중심에서의 진동수준이 가장 클 것으로 판단되어 가속도계를 그림 5 (b)에서 보는 바와 같이 수직방향과 수평방향으로 설치하였다.



(a) Acceleration measurement positions(A1~A4)

(b) Accelerometer position of the in-chimney bracket

Fig. 5 Measurement positions of the in-chimney bracket and the guide tube

본 시험에서 진동 계측을 위해 사용된 시험장비의 구성도는 그림 6과 같다. 진동계측을 위해 사용한 수중용 가속도계는 B&K 8319로 수중에서 사용가능하며 가속도를 전류신호로 바꾸어 주는 역할을 한다. Line drive amplifier는 가속도계를 통해 얻어진 전류신호를 전압신호로 바꾸어주는 역할을 하며, 전압신호로 변환된 가속도신호는 신호계측후 상세 분석이 가능하도록 DAT recorder를 이용하여 저장하였다. 이때 portable analyzer를 DAT recorder의 출력단자에 연결하여 계측되는 신호의 상태를 관찰할 수 있도록 하였으며, 1차 냉각펌프의 정상운전 중 4개 측정지점에서 30분간의 가속도 신호를 취득하였다.

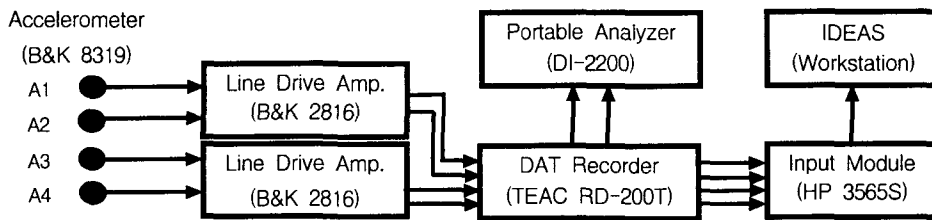


Fig. 6 Schematic diagram of the measurement setup

계측된 진동신호의 크기 특성을 파악하기 위하여 계측된 진동의 수준(크기)을 대표하는 최대진폭, RMS 값을 분석하였다. 그림 7과 그림 8은 각각 계장형 핵연료 시험다발 안내관 및 침니내부지지대에 설치된 가속도계로부터 계측된 가속도신호를 나타내고 있다. 그림 9와 그림 10은 가속도신호를 시간에 대한 2회 적분을 수행하여 얻은 변위신호를 나타내고 있으며, 표 6은 4개 측정지점 가속도와 변위의 RMS값과 최대진폭값을 정리하여 나타낸 것이다.

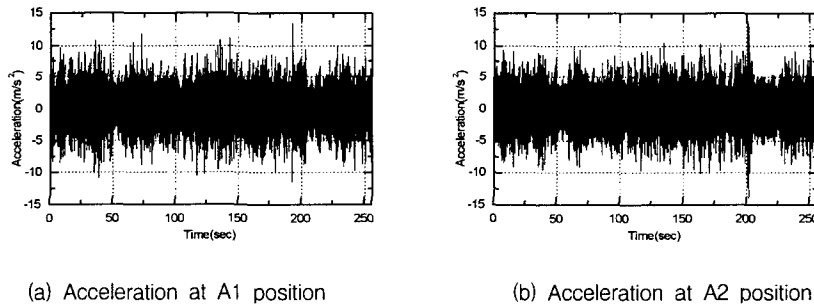


Fig. 7 Acceleration signals at the guide tube of the instrumented fuel assembly (A1 and A2)

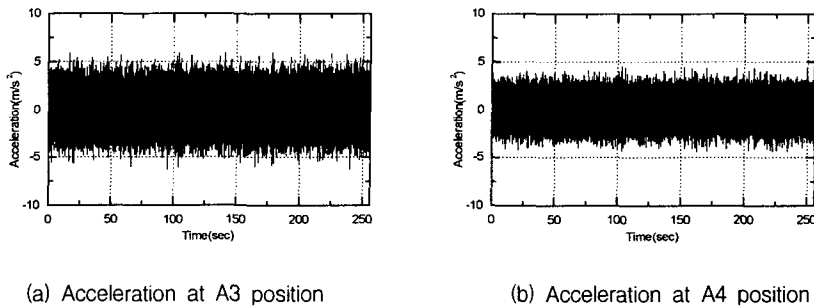
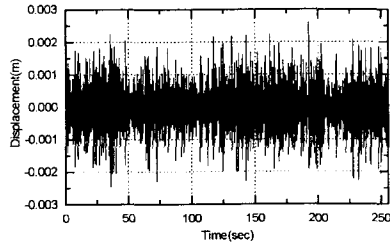
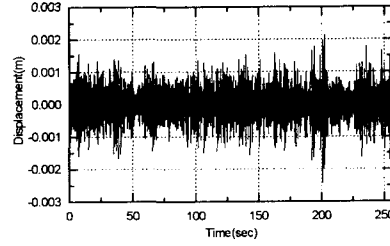


Fig. 8 Acceleration signals at the in-chimney bracket (A3 and A4)

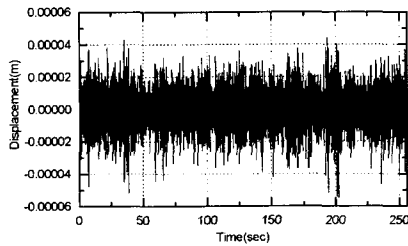


(a) Displacement signal at A1

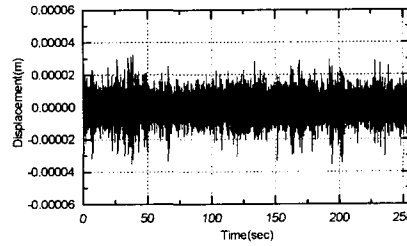


(b) Displacement signal at A2

Fig. 9 Displacement signals at the guide tube of the instrumented fuel assembly (A1 and A2)



(a) Displacement signal at A3



(b) Displacement signal at A4

Fig. 10 Displacement signals at the in-chimney bracket (A3 and A4)

Table 6 Maximum amplitude and RMS values of the acceleration and displacement signals

Position and Direction of the Accelerometer		Acceleration(m/s ²)		Displacement(mm)	
Position	Direction	Max. Amp.	RMS	Max. Amp.	RMS
A1 (Guide tube)	Horizontal	13.36	2.08	2.6	0.49
A2 (Guide tube)	Horizontal(A2 ⊥ A1)	13.90	2.09	2.4	0.39
A3 (In-chimney bracket)	Vertical	6.25	1.40	0.055	0.0097
A4 (In-chimney bracket)	Horizontal	4.57	1.04	0.036	0.0065

표 6에서 가속도의 최대진폭을 살펴보면 4개 측정위치 중 가속도의 최대진폭은 13.90m/s²로 원자로구조물의 가속도 허용기준⁽¹³⁾으로 설정된 18.99m/s²이하임을 확인할 수 있다. 또한 시험다발 안내관 변위의 최대진폭을 살펴보면, 측정위치중 변위의 최대진폭은 2.6mm이며, 침니내부지지대의 최대변위진폭은 0.055mm임을 관찰할 수 있다. 또한 A1과 A2 위치의 가속도 및 변위 수준이 A3과 A4 위치의 가속도 및 변위 수준보다 높게 나타나고 있음을 관찰할 수 있다. 안내관을 갖는 시험 핵연료의 운전중 진동시험⁽³⁾에서는 침니내부지지대가 설치되지 않은 경우 측정위치중 최대변위가 124mm임을 확인한 바 있으며, 본 실험에서 침니내부지지대가 설치된 상태에서 계측된 최대변위진폭(2.6mm)은 이보다 훨씬 작은 값이므로 침니내부지지대를 설치함으로써 설치전에 비해 안내관의 진동특성이 크게 개선된 것으로 판단할 수 있다.

또한 유동관들의 간섭현상 발생 여부를 판단하기 위하여 표 6의 침니내부지지대 및 안내관의 최대 변위진폭인 0.055mm와 2.6mm 변위를 하중으로 구조해석을 수행하였으며 유동관 상부의 변위를 그할 수 있었다. 구조해석결과, 유동관 상부에서의 최대 변위는 0.139mm로 예측되었으며, 이 값은 유동관 상부변위의 허용값인 0.5mm보다 작으므로 유동관간의 충돌이 발생하지 않는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 침니내부지지대를 사용하여 시험다발의 안내관을 고정하면 유체유발진동을 더욱 억제할 수 있는 것을 알 수 있으며, 조사시험 기간동안 유체유발진동으로 인한 유동관들의 구조적 손상은 없을 것으로 판단된다.

4. 결론

하나로 원자로 침니에 새로 설치된 침니내부지지대의 구조건전성을 평가하고, 이의 설치효과를 검증하였다. 침니내부지지대의 구조건전성 평가를 위하여 침니내부지지대 및 관련구조물에 대한 유한요소모델을 작성하고 지진하중에 대한 내진해석 및 피로평가를 수행하였다. 내진해석 결과, 침니내부지지대 및 관련구조물에 발생하는 최대응력은 모두 ASME 코드의 허용응력 이하임을 확인하였으며, 피로평가를 통하여 하나로의 설계수명동안 지진하중에 의한 피로파괴 가능성은 무시할만한 수준임을 확인하였다.

또한 침니내부지지대의 설치효과를 검증하기 위하여 1차 냉각펌프의 정상운전중 계장형 핵연료 시험다발을 장전하여 안내관 및 침니내부지지대에 발생하는 진동신호를 계속하였다. 계속된 신호를 분석한 결과, 침니내부지지대를 설치함으로써 설치전에 비해 계장형 핵연료 시험다발 안내관의 진동수준이 현저하게 감소하였음을 알 수 있었다. 침니내부지지대에서의 진동 수준도 매우 작아 침니내부지지대가 원자로 침니에 잘 설치되었음을 확인할 수 있었다.

따라서 새로 설치된 침니내부지지대를 이용하여 조사시험을 수행할 경우, 침니내부지지대를 비롯한 전체 조사시험물들은 지진하중과 유체유발진동에 대하여 구조적으로 건전한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부의 출연금에 의한 한국원자력연구소의 기관고유사업으로 수행되었다.

참고 문헌

1. 강영환 외, "하나로에 설치될 계장캡슐 및 고정장치의 구조건전성 평가보고서," 기술보고서, KAERI/TR-601/96, 한국원자력연구소, 1996.
2. 강영환 외, "재료조사시험용 캡슐 및 관련 설비의 안전성 분석보고서," 기술보고서, KAERI/TR-985/98, 한국원자력연구소, 1998.
3. 임정식, 손동성, 임인철, 류정수, 박진호, "안내관을 갖는 시험 핵연료(Type-B)의 운전중 진동개선," 기술보고서 KAERI/TR-1304/99, 한국원자력연구소, 1999.
4. 류정수, 이재한, 조영갑, 이중희, 박진호, "하나로 침니내부지지대에 대한 구조건전성 평가," 기술보고서 KAERI/TR-1398/99, 한국원자력연구소, 1999.
5. 류정수, 조영갑, 황승렬, 우종섭, 전병진, "하나로 침니내부지지대의 설계 지침서," 기술보고서 KAERI/TR-1577/2000, 한국원자력연구소, 2000.
6. ASME Code Section III, Division 1, Subsection NF, Component Supports, 1989.
7. IDEAS 5.0 Solid Modeler Computer Program.
8. ANSYS 5.5 Computer Program.
9. Banwatt, A.S., "Stress Analysis for the KMRR Reactor Assembly," SR-37-31200-001, Rev.2, AECL, 1992.
10. KOPEC, "Structural Dynamics and Static Analysis for KMRR Reactor Building," KM-210-DC-P001 to P006, 1988.
11. Biswas, J.K., Banwatt, A.S., and Usmanl, S.A., "Stress Analysis Interface Data for KMRR," SR-37-31000-200-900, Rev.1, AECL, 1993.
12. ASME Code Section III, Division 1, Appendix F, Rules for Evaluation of Service Loadings with Level D Service Limits, 1989.
13. 정승호, 김태룡, 박진호, 박진석, 류정수, "KMRR 원자로구조물 및 일차냉각계통 배관의 진동시험," KAERI/RR-1417/94, 1994.