

## 하나로 침니내부지지대와 계장형 핵연료 시험다발의 진동시험 Vibration Test for HANARO In-Chimney Bracket and Instrumented Fuel Assembly

류정수, 윤두병, 조영갑, 박진호, 이재한, 우종섭

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

하나로 정상운전 유동상태에서 원자로구조물 침니에 새로 설치된 침니내부지지대 및 계장형 핵연료 시험다발의 진동시험 및 분석을 수행한 후, 구조건전성을 평가하였다. 이를 위하여 유체유발진동을 받고 있는 계장형 핵연료 시험다발 안내관 및 침니내부지지대의 최대진동이 예상되는 4 지점의 가속도 신호를 취득하였으며, 이에 대한 시간영역 및 주파수영역 분석을 통하여 가속도 및 변위의 최대진폭과 RMS 값을 구하고, 주파수성분에 대한 상세 분석을 수행하였다. 진동신호 분석결과, 정상운전시 측정된 진동수준은 허용치 이하이며, 계장형 핵연료 시험다발 안내관의 진동은 주로 10 Hz 부근의 저주파 대역 신호로 구성되어 있음을 확인하였다. 또한 침니내부지지대를 포함한 관련구조물의 구조건전성을 평가하기 위해, 진동분석을 통해 얻은 최대변위를 하중으로 입력하여 ANSYS 유한요소모델에 대한 정적해석을 수행하였으며, 구조해석결과로부터 최대응력들이 ASME 코드의 허용응력 이내에 있고, 유동관 상부의 변위도 제한치 이내임을 확인하였다. 따라서 하나로 원자로에 새로 설치된 침니내부지지대를 사용하여 조사시험을 수행할 때 조사시험물의 구조건전성에 영향을 미치는 어떠한 손상도 발생하지 않을 것으로 판단된다.

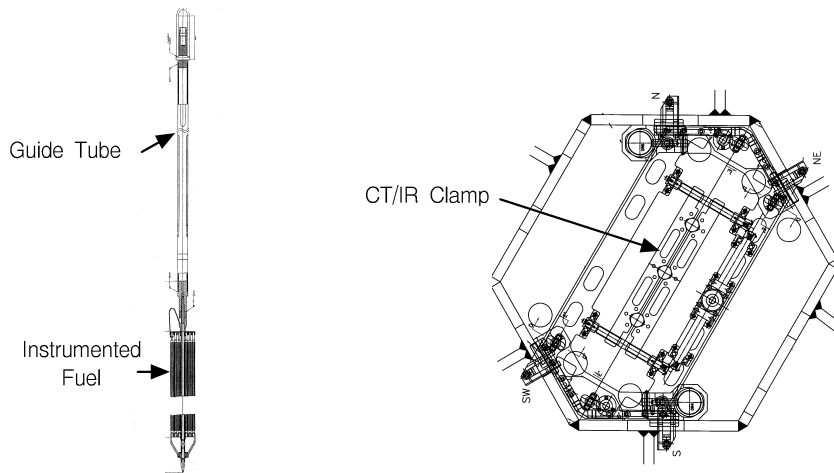
### Abstract

The vibration characteristics and structural integrity of the instrumented fuel assembly and in-chimney bracket structures, which is recently installed in HANARO reactor chimney, are investigated. For this purpose, four acceleration data on the guide tube of the instrumented fuel assembly and in-chimney bracket structures subjected to fluid induced vibration are measured and analyzed. In time domain analysis, maximum amplitudes and RMS values of accelerations and displacements are obtained from the measured vibration signal. The frequency components of the vibration data are analyzed by using the frequency domain analysis. These analysis results show that the levels of the measured vibrations are within the allowable limit, and the low frequency component near 10 Hz is dominant in the vibration signal. For the evaluation of the structural integrity on the in-chimney bracket and related structures, the static analysis for ANSYS finite element model is carried out. The maximum displacements of the measured vibration signals are used as the load inputs. These analysis results show that the maximum stresses are within the allowable stresses of the ASME code, and the maximum displacement at the top of the flow tube is within the displacement limit. Therefore any damage on the structural integrity is not expected when the irradiation test is performed using the in-chimney bracket.

# 1. 서론

하나로는 현재(2000년 9월말) 24 MW로 운전 중에 있으며, 노심에는 재료조사 및 핵연료 시험용으로 다수의 조사공이 확보되어 있다. 이들 조사시험공은 핵연료나 재료의 노내 조사 시험과 방사선 동위원소 생산에 활용되고 있으며, 하나로에서 계획중인 조사시험에는 계장 캡슐을 이용한 재료조사시험, 높은 선출력에서의 계장형 핵연료 시험다발, 핵연료에 대한 조사시험 등이 있다. 시험용 시료의 노내 조사시험은 계측기가 부착되어 있지 않는 무계장 조사시험과 중성자계측기, 열전대(thermocouple) 등의 각종 계측기 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 전체 조사시험물의 구조적 건전성을 확보하는 것이 필수적이다.

하나로에는 조사시험용으로 제작된 계장캡슐이나 계장형 핵연료 시험다발(Type-B bundle) 상부에 그림 1 (a)와 같이 세장비가 높고 연성(flexibility)을 갖는 안내관이 결합되어 있으며, 계장 조사시험시 안내관의 영향으로 전체 조사시험물의 진동특성이 크게 변화할 가능성이 있으므로, 이를 보호하고 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].



(a) 계장형 핵연료 시험다발

(b) 침니내부지지대의 평면도

그림 1 하나로 계장형 핵연료 시험다발 및 침니내부지지대

조사시험시 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 과

또한 진동억제와 유동관의 상호 충격 가능성을 원천적으로 줄이기 위하여, 냉각수에 의해 유발되는 진동을 감소시키기 위한 방안을 찾고자 하였다[3]. 그 결과로 안내관을 중간에 추가로 지지를 하는 방안이 제안되었으며, 그림 1 (b)와 같은 침니내부지지대(in-chimney bracket)를 설계한 후, 제작 및 설치하였다[4,5,6].

본 연구에서는 실제 조사시험시 새로 마련된 침니내부지지대의 설치효과를 검증하기 위하여 계장형 핵연료 시험다발을 조사공에 장전한 상태에서 침니내부지지대 및 계장형 핵연료 시험다발 안내관에 대한 진동시험[7]을 수행하였다. 또한 예측된 진동신호에 대한 분석을 수행하여 침니내부지지대 및 안내관의 최대 변위진폭을 구하고, 이 값들을 사용하여 원자로 유동관 상부의 최대 변위진폭과 침니내부지지대를 포함한 관련구조물에 발생하는 최대응력을 구조해석으로부터 산정하여, 전체 조사시험물의 구조건전성을 평가하고자 한다.

## 2. 진동계측

### 2.1. 진동계측 지점의 선정

그림 2는 침니내부지지대 및 계장형 핵연료 시험다발 안내관의 가속도계 부착위치를 나타내고 있다[7]. 진동시험에 사용된 계장형 핵연료 시험다발은 다수의 연료봉이 지지격자 사이에 배열된 6각형 집합체로 이루어져 있으며, 집합체 중앙봉 상부에 계장선의 보호를 위해 속이 빈 외경 34 mm, 내경 27 mm, 길이 5 m의 안내관이 연결되었다. 그림 2(a)에서 관찰할 수 있듯이 시험다발 안내관은 세장비가 매우 크므로 축방향의 종진동(longitudinal vibration) 보다는 횡방향의 굽힘진동(bending vibration)이 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 대략 중간지점이라고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 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 2 (a)와 같이 설치하였다[7].

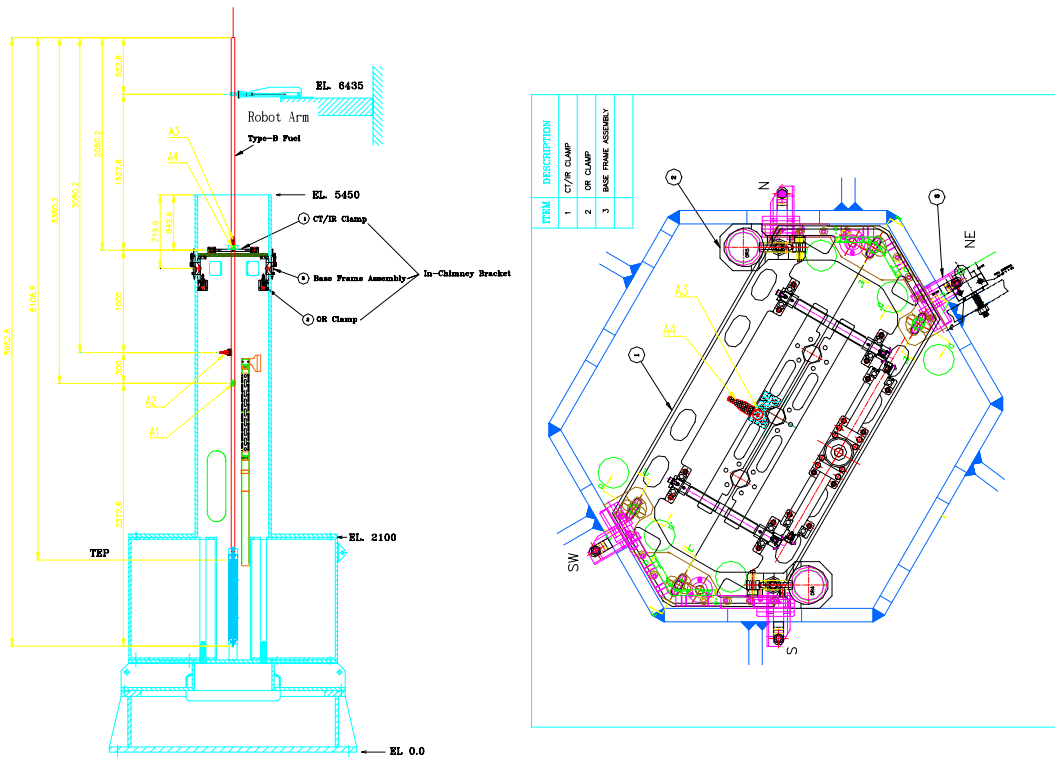
침니내부지지대의 외곽은 견고하게 제작되었으므로, 구조적으로 진동이 가장 크게 발생할 수 있는 부분은 침니내부지지대의 CT/IR clamp부분이다. 또한 침니내부지지대의 CT/IR clamp부분도 핵연료 계장다발 안내관의 경우와 마찬가지로 부재의 종진동보다는 굽힘진동이 발생할 가능성이 크며, 이 경우 CT/IR clamp부 중심에서의 진동수준이 가장 클 것으로 판단되어 가속도계를 그림 2 (b)에서 보는 바와 같이 수직방향과 수평방향으로 설치하였다.

### 2.2. 진동계측시 운전조건 및 장비구성

일반적으로 가속도계가 방사선에 장기간 노출되면 가속도를 측정하는 본래의 기능을 잃게 되므로, 본 연구에서는 원자로 출력이 구조물 진동에 미치는 영향은 무시할 수 있다는 가정하에 영출력(zero power) 정상운전시의 유동조건으로 진동시험을 실시하였다. 즉 진동계측 시험은 두 개의 1차 냉각펌프를 정상적으로 기동하는 상태에서 진행되었으며, 이때 유량조건은 노심유량 711.2 kg/sec 및 우회유량 62.7 kg/sec를 유지하도록 함으로써 정상상태(steady state)의 진동신호를 예측할 수 있도록 하였다.

본 실험에서 계장형 핵연료 시험다발 및 침니내부지지대의 진동 계측을 위해 사용된 시험

장비의 구성도는 그림 3과 같다. 진동계측을 위해 사용한 수중용 가속도계(underwater accelerometer)는 B&K 8319로 수중에서 사용가능하며 가속도계 위치의 가속도를 전류신호로 바꾸어 주는 역할(sensitivity:  $1 \mu A / ms^{-2}$ )을 한다. Line drive amplifier(B&K 2816)는 가속도계를 통해 얻어진 전류신호를 전압신호로 바꾸어주는 역할(sensitivity:  $1 mV / \mu A$ )을 하며, 가속도계와 line drive amplifier를 거쳐 전압신호로 변환된 가속도신호는 신호계측후 상세 분석이 가능하도록 DAT recorder(TEAC RD-200T)를 이용하여 DAT에 저장하였다. 이때 portable analyzer(DI-2200)를 DAT recorder의 출력단자에 연결하여 계측되는 신호의 상태를 관찰할 수 있도록 하였으며, 진동계측을 통해 4개 측정지점에서 30분간의 가속도 신호를 취득하였다.



(a) 4개 가속도계(A1~A4)의 위치 (b)침니내부지지대의 가속도계(A3과 A4) 설치방향

그림 2 침니내부지지대 및 계장형 핵연료 시험다발 안내관의 가속도계 부착위치

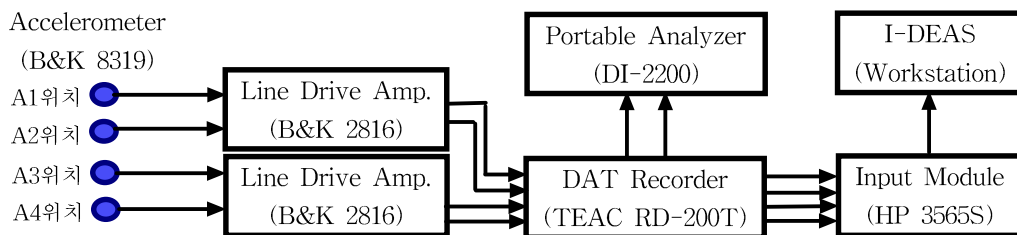


그림 3 진동계측장비의 구성도

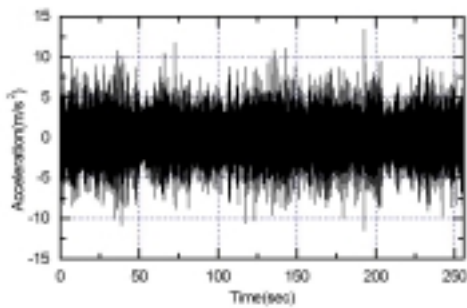
### 3. 진동신호 분석

본 연구에서는 계측된 진동신호의 크기 및 주파수 특성을 파악하기 위하여 시간영역 및 주파수영역 분석을 수행하였다. 시간영역 분석에서는 계측된 진동의 수준(크기)을 대표하는 최대진폭, RMS 값, 진동의 시간영역 특성을 대표하는 자기상관함수, 확률밀도함수를 이용하여 진동신호를 분석하였다. 또한 주파수영역 분석에서는 진동신호를 구성하는 주파수성분들에 대한 상세 분석을 수행하였다.

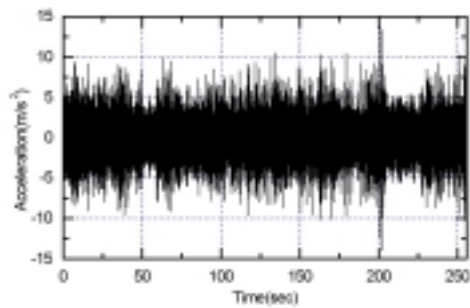
#### 3.1. 시간영역 분석

##### 3.1.1. 가속도신호 분석

그림 4와 그림 5는 각각 계장형 핵연료 시험다발 안내관 및 침니내부지지대에 설치된 가속도계로부터 계측된 가속도신호를 나타내고 있다. 그림 4의 (a)와 (b)는 각각 계장형 핵연료 시험다발 안내관의 A1과 A2 위치에서 계측된 신호를 나타내며, 그림 5 (a)와 (b)는 침니내부지지대의 A3과 A4 위치에서 계측된 가속도신호를 나타내고 있다(그림 2 참조).

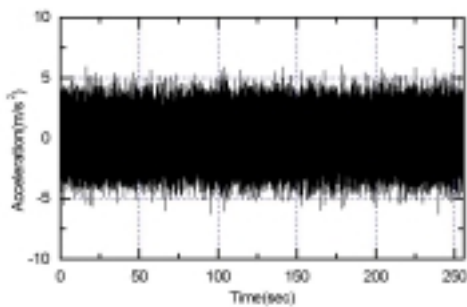


(a) A1 위치의 가속도신호

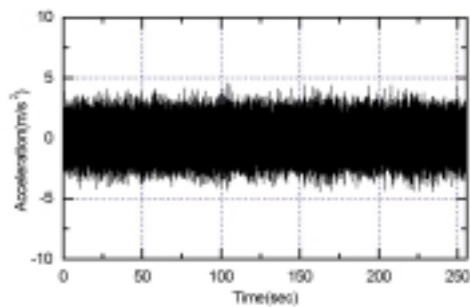


(b) A2 위치의 가속도신호

그림 4 계장형 핵연료 시험다발 안내관 A1과 A2 위치에서 계측된 가속도신호



(a) A3 위치의 가속도신호

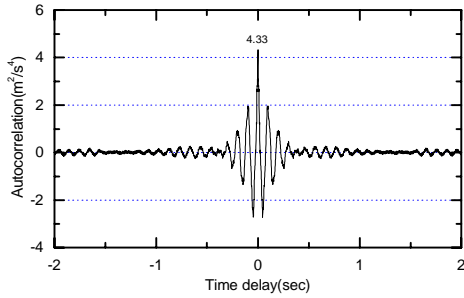


(b) A4 위치의 가속도신호

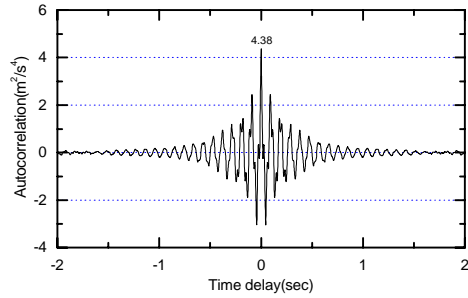
그림 5 침니내부지지대 A3과 A4 위치에서 계측된 가속도신호

계측된 가속도신호가 확률분포(RMS, 최대진폭 등)로서만 표현할 수 있는 랜덤신호(random signal)인지의 여부를 판단하기 위하여 각 신호의 자기상관함수(autocorrelation

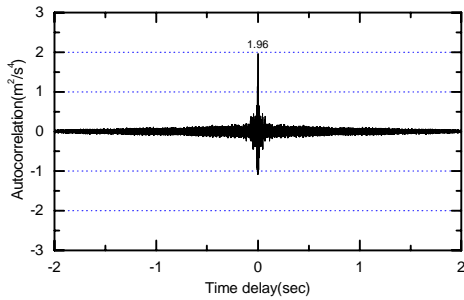
function)를 구해보았다. 그림 6은 4개 측정지점에서 계측된 가속도신호의 자기상관함수를 나타내고 있으며, 자기상관함수들이  $\tau=0$  에서 최대값을 갖고,  $\tau$ (time delay)의 크기가 커질수록 상관성이 급격하게 떨어지는 형태를 나타내고 있으며, 이를 근거로 계측된 신호들이 랜덤신호에 가까움을 판단할 수 있다[8].



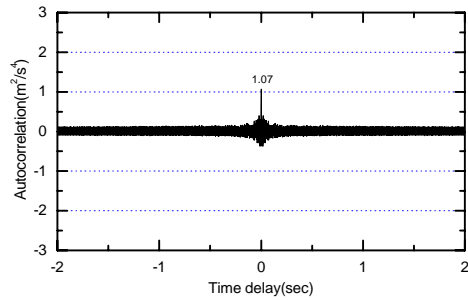
(a) A1 위치 가속도신호의 자기상관함수



(b) A2 위치 가속도신호의 자기상관함수



(c) A3 위치 가속도신호의 자기상관함수



(d) A4 위치 가속도신호의 자기상관함수

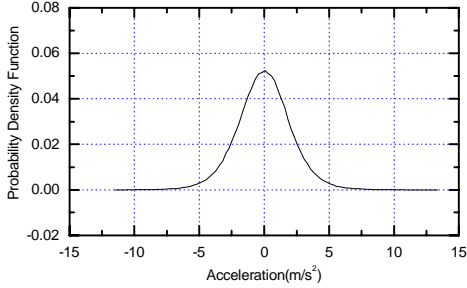
그림 6 계측된 가속도신호의 자기상관함수

그림 7은 계측된 가속도 신호의 확률밀도함수(probability density function)를 나타내고 있다. 그림 7을 보면 계측된 신호들이 평균값 부근에서의 밀도가 높고, 평균값에서 멀어질수록 밀도가 낮아지는 형태를 취하고 있음을 관찰할 수 있으며, 이는 Gaussian 분포에 해당하는 것으로 판단할 수 있다[8]. 따라서 위의 자기상관함수와 확률밀도함수에 대한 관찰을 통해 계측된 진동 신호는 Gaussian 분포를 갖는 랜덤신호라고 판단할 수 있으며, 통계적인 지표(RMS, 최대진폭 값 등)로 신호의 특성을 표현할 수 있음을 알 수 있다.

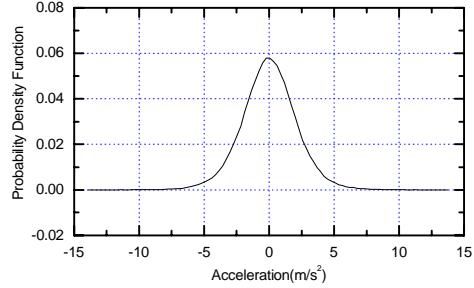
표 1은 4개 위치에서 계측된 가속도의 RMS 및 최대진폭 값을 정리하여 나타낸 것이다. 표 1을 보면 A1과 A2 위치의 가속도 수준이 유사하고, A3과 A4 위치의 가속도 수준이 유사함을 관찰할 수 있으며, A1과 A2 위치의 가속도 수준이 A3과 A4 위치의 가속도 수준보다 높게 나타나고 있음을 관찰할 수 있다.

표 1에서 가속도의 최대진폭을 살펴보면 4개 측정위치 중 가속도의 최대진폭은  $13.90 \text{ m/s}^2$ 로 원자로구조물의 가속도 허용기준[9]으로 설정된  $18.99 \text{ m/s}^2$ 이하임을 확인할 수 있다. 또한 가속도의 최대진폭과 RMS값의 관계를 살펴보면 최대진폭이 RMS값의 5~6배에 해당함을 관찰할 수 있다. 이는 신호들이 평균값 부근에서의 밀도가 높고, 평균값에서 멀어

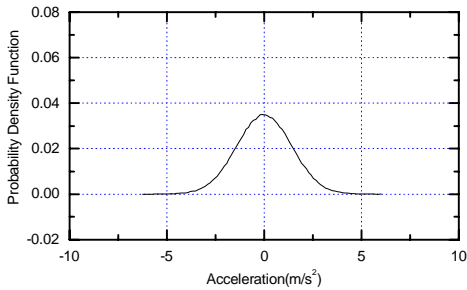
질수록 밀도가 낮아지는 가우시안 분포형태를 가지기 때문이며 그림 7에서 이를 확인할 수 있다.



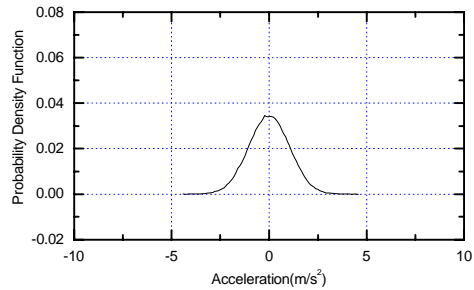
(c) A1 위치 가속도신호의 확률밀도함수



(d) A2 위치 가속도신호의 확률밀도함수



(c) A3 위치 가속도신호의 확률밀도함수



(d) A4 위치 가속도신호의 확률밀도함수

그림 7 계측된 가속도 신호의 확률밀도함수

표 1 계측된 가속도신호 및 변위의 최대진폭과 RMS값

가속도계 위치 및 방향		가속도(m/s <sup>2</sup> )		변위(mm)	
설치위치	설치방향	최대진폭	RMS	최대진폭	RMS
A1 (시험다발 안내관)	수평방향	13.36	2.08	2.6	0.49
A2 (시험다발 안내관)	수평방향(A1과 90도 차이)	13.90	2.09	2.4	0.39
A3 (침니내부지지대)	수직방향(vertical)	6.25	1.40	0.055	0.0097
A4 (침니내부지지대)	수평방향	4.57	1.04	0.036	0.0065

### 3.1.2. 변위신호 분석

그림 8과 그림 9는 가속도신호(그림 4와 그림 5)를 시간에 대한 2회 적분을 수행하여 얻은 변위신호를 나타내고 있으며, 표 1에는 4개 지점 변위의 RMS값과 최대진폭값이 정리되어 있다.

표 1에서 시험다발 안내관 변위의 최대진폭을 살펴보면, 측정위치중 변위의 최대진폭은

2.6 mm이며, 침니내부지지대의 최대변위진폭은 0.055 mm로 나타났다. 또한 표 1에서 가속도의 경우와 마찬가지로 A1과 A2 위치의 변위 수준이 A3과 A4 위치의 변위 수준보다 높게 나타나고 있음을 관찰할 수 있다.

안내관을 갖는 시험 핵연료의 운전중 진동시험[3]에서는 침니내부지지대가 설치되지 않은 경우 측정위치 중 최대변위가 124 mm임을 확인한 바 있으며, 본 실험에서 침니내부지지대가 설치된 상태에서 계측된 최대변위진폭(2.6 mm)은 이보다 훨씬 작은 값이므로 침니내부지지대를 설치함으로써 설치전에 비해 안내관의 진동특성이 크게 개선된 것으로 판단된다.

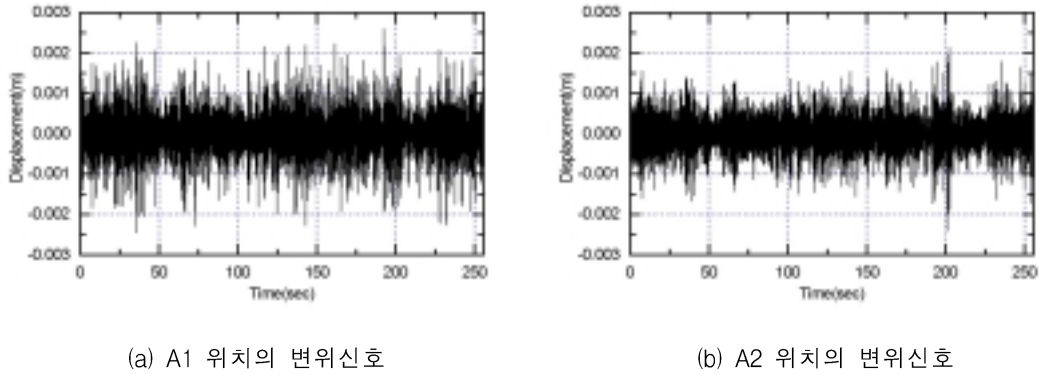


그림 8 계장형 핵연료 시험다발 안내관 A1과 A2 위치의 변위신호

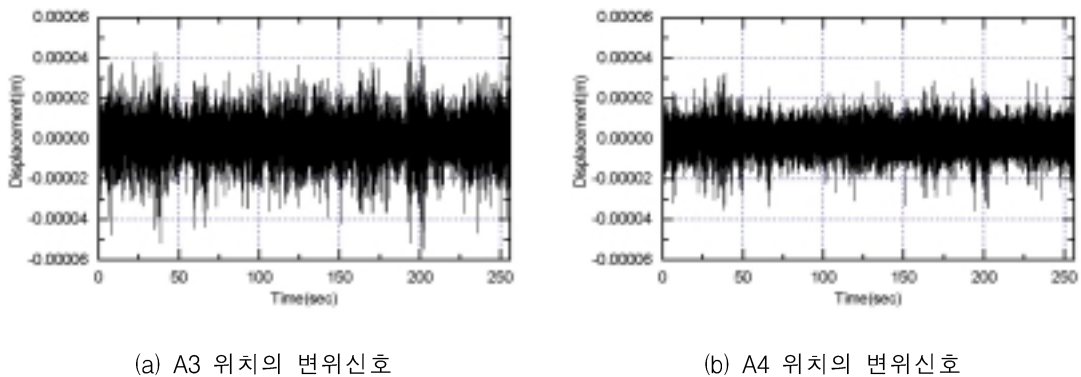


그림 9 침니내부지지대 A3과 A4 위치의 변위신호

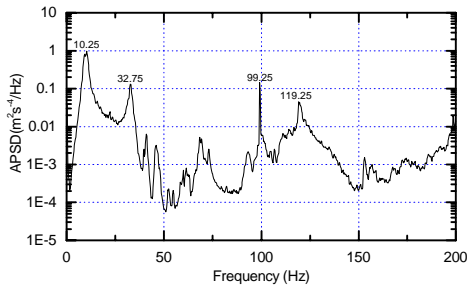
### 3.2. 주파수영역 분석

가속도 및 변위 신호의 주파수특성에 대한 정보를 얻기 위하여 4개 측정점에서 계측한 신호에 대한 주파수분석을 수행하였으며, 그림 10은 계장형 핵연료 시험다발에 설치된 2개의 가속도계로부터 구한 가속도신호의 자기스펙트럼밀도함수(auto-spectral density function)을 나타내고 있다. 그림 10을 관찰해보면 A1 위치에서 계측된 신호의 경우 10.25 Hz 및 32.75 Hz에서 기여도가 큰 피크가 존재하는 것을 관찰할 수 있으며, A2 위치에서 계측된 신호에서는 10.5 Hz 및 34.25 Hz에서 피크가 존재함을 관찰할 수 있다.

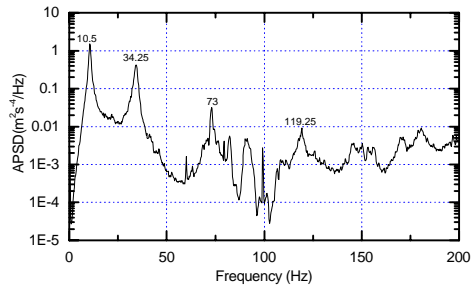
그림 11은 침니내부지지대에 설치된 가속도계로부터 얻은 가속도신호의 자기스펙트럼밀도



함수를 나타내고 있다. 그림 11의 저주파영역을 관찰하면 A3 위치에서 계측된 신호는 10.5 Hz와 34.25 Hz의 피크를 가지고 있으며, A4 위치에서 계측된 신호는 10.5 Hz와 39.25 Hz의 피크를 가지고 있는 것을 관찰할 수 있으나 그 크기가 A1과 A2 위치에서 계측된 신호에 비해 상당히 작음을 관찰할 수 있으며, 저주파영역보다 고주파영역의 성분이 큼을 관찰할 수 있다. 또한 그림 10과 11에서 99.25 Hz의 피크가 존재하는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 펌프의 회전주파수와 날개수의 곱인 BPF(blade passing frequency)에 해당하는 것으로 판단되며, 펌프의 회전에 의한 가진력(압력변동)이 계측위치까지 전달된 것으로 판단된다.

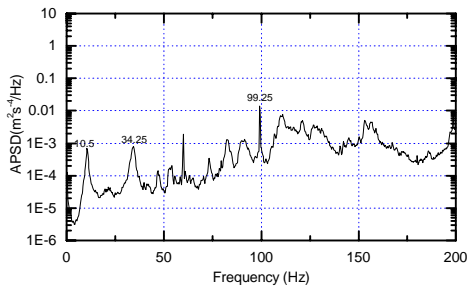


(a) A1 위치 가속도의 자기스펙트럼밀도함수

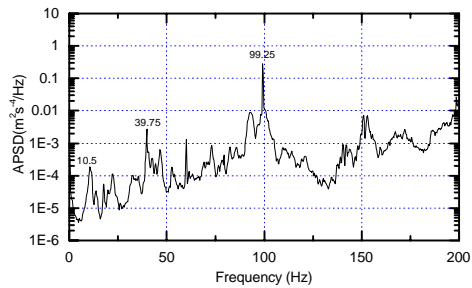


(b) A2 위치 가속도의 자기스펙트럼밀도함수

그림 10 계장형 핵연료 시험다발 안내관 가속도신호의 자기스펙트럼밀도함수



(a) A3 위치 가속도의 자기스펙트럼밀도함수

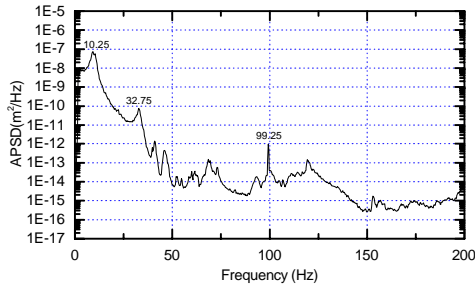


(b) A4 위치 가속도의 자기스펙트럼밀도함수

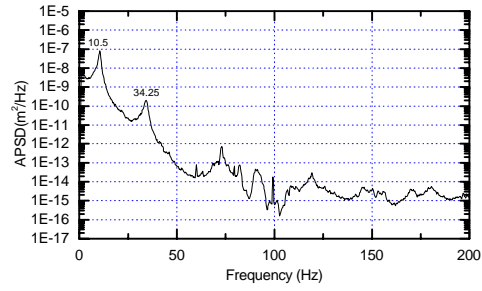
그림 11 침니내부지지대 가속도신호의 자기스펙트럼밀도함수

그림 12는 변위신호에 대한 자기스펙트럼밀도함수를 나타내고 있다. 그림 12를 그림 10, 그림 11과 비교해보면 동일한 주파수에서 피크가 존재함을 확인할 수 있다. 또한 가속도가 변위로 변환됨에 따라 주파수가 증가할수록 스펙트럼밀도함수의 크기가 작아짐을 관찰할 수 있으며, 가속도신호를 변위신호로 변환하면 저주파성분이 강조되어 나타남을 관찰할 수 있다. 이는 시간에 대한 2번 적분은 주파수영역에서 가속도신호 자기스펙트럼밀도함수 값에  $1/(2\pi f)^4$ 를 곱하는 것에 해당하기 때문이다.

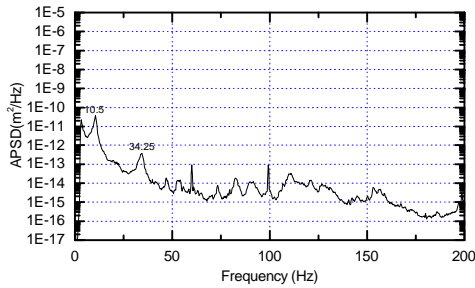
따라서 그림 12에서 관찰할 수 있듯이 계측된 변위신호는 주로 10 Hz 부근의 낮은 주파수를 갖는 진동성분의 기여도가 가장 큼을 알 수 있으며 상대적으로 이보다 높은 주파수 성분들(34 Hz, 99 Hz 부근)이 시험다발 안내관 및 침니내부지지대의 진동변위에 미치는 영향은 크지 않음을 관찰할 수 있다.



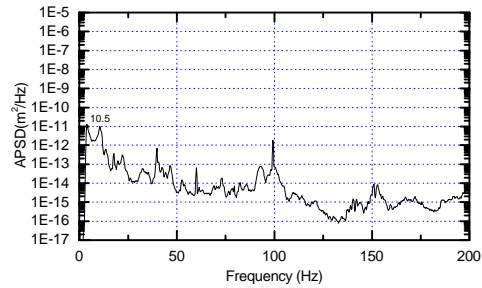
(a) A1 위치 변위의 자기스펙트럼밀도함수



(b) A2 위치 변위의 자기스펙트럼밀도함수



(c) A3 위치 변위의 자기스펙트럼밀도함수



(d) A4 위치 변위의 자기스펙트럼밀도함수

그림 12 변위신호의 자기스펙트럼밀도함수

#### 4. 구조건전성 평가

계장시험시 침니내부지지대를 포함한 관련구조물의 구조건전성을 평가하기 위하여 구조해석을 수행하였으며, 구조해석 수행시 ANSYS 프로그램[10]으로 작성된 침니내부지지대, 안내관 및 관련구조물의 해석 모델[4]을 사용하였다. 가진입력 하중은 표 1의 최대변위진폭을 동시에 사용하였으며, 이를 계장형 핵연료 시험다발의 가속도계 설치위치에  $\pm$ 변위하중으로 작용시켜 구조해석을 수행하였다. 구조해석 결과, 유동관 상부에서의 최대 변위는  $0.139\text{ mm}$ 로 예측되었으며, 이 값은 유동관과의 간섭이 일어나지 않는 무시할만한 변위수준으로 판단된다. 또한 최대 변위하중이 가해지는 상태의 침니내부지지대 및 관련 구조물의 응력해석 결과를 표 2와 같은 최대응력강도(maximum stress intensity) 값으로 구할 수 있었다.

표 2 변위하중에 의한 침니내부지지대 및 관련구조물에 발생하는 최대응력강도(단위: MPa)

원자로구조물 요소	응력강도	허용응력
1. In-Chimney Bracket	12.0	178.5
2. Robot Arm	8.97	178.5
3. Flow Tube	2.42	131.8
4. Chimney	1.09	61.9
5. Reflector vessel	2.66	162.7

표 2의 응력해석 결과를 관찰해 보면 최대응력강도가 모두 ASME 코드[11,12]의 허용응력[4] 이하임을 확인할 수 있으며, 유동관 상부의 변위가 허용값보다 훨씬 작으므로 전체 조사시험물은 구조적으로 건전함을 확인할 수 있다.

따라서 침니내부지지대를 사용하여 CT/IR 조사관을 이용하는 시험다발의 안내관을 고정하면 유체유발진동을 더욱 더 억제할 수 있는 것을 알 수 있으며, 조사시험 기간동안 유체유발진동으로 인한 유동관들의 구조적 손상은 없을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 원자로 정상운전 유동상태에서 원자로침니에 새로 설치된 침니내부지지대 및 계장형 핵연료 시험다발 안내관에 대한 진동시험 및 진동분석을 수행한 후, 구조건전성 평가를 수행하였으며 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 시간영역 분석을 통하여 계장형 핵연료 시험다발 안내관과 침니내부지지대 CT/IR clamp에서 계측된 진동신호는 통계적인 지표로 신호의 특성을 표현할 수 있는 Gaussian 랜덤 신호임을 확인하였다.
- 2) 침니내부지지대 및 계장형 핵연료 시험다발 안내관에서 계측된 진동신호 분석을 수행하였으며, 안내관의 가속도 최대진폭은  $13.90 \text{ m/s}^2$ , 변위 최대진폭은  $2.6 \text{ mm}$ , 침니내부지지대의 가속도 최대진폭은  $6.25 \text{ m/s}^2$ , 변위 최대진폭은  $0.055 \text{ mm}$ 로 나타났다. 계측된 가속도 및 변위의 최대진폭은 모두 원자로구조물의 진동 허용치보다 작음을 보여주었다.
- 3) 주파수분석을 통하여 시험다발 안내관의 제 1차 및 2차 진동수는  $10.25 \text{ Hz}$ 와  $32.75 \text{ Hz}$ 로 나타났으며, 침니내부지지대의 자기스펙트럼밀도함수에서 이들 피크가 나타나 안내관의 진동이 전달되고 있음을 알 수 있었다. 또한 1차 냉각펌프의 blade passing 주파수인  $99.25 \text{ Hz}$ 가 설치된 가속도계에서 모두 나타나 펌프회전에 의한 압력변동이 계측위치까지 전달된 것으로 판단된다.
- 4) 진동분석결과를 사용하여 침니내부지지대 및 관련 구조물에 대한 구조해석을 수행하였으며, 각 구조물에서 발생하는 최대응력강도들이 모두 허용응력 이내이고, 유동관 상부의 최대 변위진폭이  $0.139 \text{ mm}$ 로 허용변위 이내로 산정되었다.
- 5) 따라서 새로 설치된 침니내부지지대를 이용하여 조사시험을 수행할 경우, 침니내부지지대를 비롯한 전체 조사시험물은 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 운전 중 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] 조영갑, 류정수, 이중희, 이용섭, 이번헌, “하나로 침니내부지지대 설치를 위한 침니 치수측정 및 특수공구 개발,” 기술보고서 KAERI/TR-1582/2000, 한국원자력연구소, 2000.
- [7] 류정수, 조영갑, “침니내부지지대 및 계장형 핵연료 시험다발에 대한 진동시험 절차서,” HAN-RS-OT-IT-00-002, Rev. 0, 2000. 7. 10, 하나로이용연구단, 한국원자력연구소, 2000.
- [8] J. S. Bendat and A. G. Piersol, Random Data(2nd Edition), New York : Wiley, 1986.
- [9] 정승호, 김태룡, 박진호, 박진석, 류정수, “KMRR 원자로구조물 및 일차냉각계통 배관의 진동시험,” KAERI/RR-1417/94, 1994
- [10] ANSYS 5.6, User’s Manual, 2000, ANSYS Inc.
- [11] ASME Code Section III, Division 1, Subsection NF, Component Supports, 1989.
- [12] ASME Code Section III, Div. 1, Appendix F, Rules for Evaluation of Service Loadings with Level D Service Limits, 1989.