



KR9800555

KAERI/RR-1810/97

하나로 핵연료집합체의  
고유진동수 측정

Measurements of the Natural Frequencies  
for  
the HANARO Fuel Assembly

한국원자력연구소

29-41

# 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 “하나로 핵연료집합체의 고유진동수 측정”과제의 연구  
보고서로 제출합니다.

1998 년 1 월

연구실명 : 미래원자력기술개발단

KALIMER 검증 시험 Lab.

과제책임자 : 박 진 호

연구 원 : 김 태 룡

류 정 수(하나로센터

연구로 계통관리실)

감수위원 : 유 봉

# 요 약 문

연구용 원자로인 하나로 노심에 장착되는 핵연료집합체를 실제 크기로 모사한 구조물에 대한 고유진동수 측정 시험을 수행하였다. 하나로 핵연료 집합체는 원형 18봉형과 육각형 36봉형으로 나누어지며 각각은 원형 및 육각형 shell 기둥 형태의 유동관 속에 장착된다. 시험은 공기중과 수중 상태에서 따로 수행되었으며 먼저 18봉형 핵연료집합체 및 원형 유동관의 시험을 수행하고 이어서 36봉형 핵연료집합체 및 육각형 유동관에 대하여 시험을 완료하였다.

18봉형 원형 유동관의 경우 공기중에서의 기본 고유진동수가 54 Hz로 나타났으며, 수중에서는 부가질량효과로 인하여 26 Hz로 낮게 나타났다. 36봉형 육각형 유동관의 경우에는 공기중에서 58.5 Hz, 수중에서 29 Hz로 18봉형의 경우보다 조금씩 높게 나타났다. 18봉형 핵연료집합체 구조물(핵연료집합체가 유동관속에 장착된 상태)의 경우에는 공기중에서 26 Hz, 수중에서 약 16 Hz로 평가되었다. 그리고 36봉형 핵연료집합체 구조물에서는 공기중에서 약 28 Hz, 수중에서는 11 Hz로 나타났다.

# Abstract

Measurements of the natural frequencies for the fuel assembly mock-up of HANARO reactor, which is a research reactor operating in KAERI, was implemented. There are two types of the fuel assembly model, one is 18-element fuel bundle assembly and the other is 36-element one. They were locked inside the shell type flow tubes, respectively. The flow tube(Round Flow Tube) corresponding to the 18-element fuel assembly mock-up has a form of cylindrical shell and the tube(Hexagonal Flow Tube) to the 36-element fuel assembly model does hexagonal shell.

The in-air fundamental natural frequency of the Round Flow Tube was turned out to be 54 Hz and the in-water one 26 Hz. The in-air fundamental natural frequency of the Hexagonal Flow Tube resulted as 58.5 Hz and the in-water one was reduced to 29 Hz due to the added mass effect. Also the in-air fundamental natural frequency of the 18-element fuel assembly structure(fuel assembly and round flow tube) was found to be 26 Hz and the in-water one 16 Hz. Finally the in-air frequency of the 36-element fuel assembly one(fuel assembly and hexagonal flow tube) was estimated as 28 Hz, and in-water one 11 Hz.

# 목 차

제출문-----	i
요약문-----	ii
Abstract-----	iii
목차-----	iv
제 1 장 서론 -----	1
제 2 장 Depleted Uranium 핵연료집합체 및 고유진동수 시험모델 제작-----	3
제 1 절 Depleted Uranium (DU) 핵연료집합체 제작-----	3
제 2 절 고유진동수 시험 모델 제작-----	4
제 3 장 핵연료집합체의 모우드 시험-----	15
제 1 절 모우드 시험 절차 -----	17
제 2 절 가진 방법-----	17
제 3 절 측정 장비-----	19
제 4 절 측정점의 위치-----	20
제 5 절 측정 및 분석 방법-----	22
제 6 절 결과 분석-----	22
제 4 장 결론 -----	75
참고문헌-----	76

## 제 1 장 서 론

하나로 핵연료집합체는 주 구성요소인 핵연료봉의 개수에 따라 18봉형과 36봉형의 두 가지가 있다. 18봉형의 경우는 단면의 형상이 원형이며 노심에 장착시에는 원형 튜브 형태의 유동관속에 장착된다. 그리고 36봉형의 경우는 단면의 형상이 육각형이며 육각형 튜브 형태의 유동관 속에 장착된다. 하나로의 출력운전 후 핵연료집합체에 대한 검사결과에 의하면 하단봉합판(bottom end plate) 부분과 간격체에서 마모현상이 발견되었다. 이는 운전중 1 차 계통의 냉각수 유동에서 유발된 유체진동 현상에 기인된 것으로 판단된다.

유체를 통하여 구조물에 전달되는 주요 진동원인으로서 1 차 냉각 계통의 펌프에 의한 pulsation, 유체유동에 의한 random 가진 및 유체와 구조물의 기하학적 상호작용에 의한 acoustic 공진 등이 있다. 특히 이러한 진동원인에 의하여 발생된 주 진동 주파수가 원자로 내부구조물의 기본 고유진동수와 일치하는 경우에는 공진 현상으로 인하여 구조물에 심각한 손상을 발생시킬 수 있다. 따라서 하나로 핵연료집합체의 마모현상에 대한 원인을 규명하기 위해서는 위에서 서술한 바와 같이 핵연료집합체의 고유진동수와 유체진동 사이의 공진 가능성이 우선적으로 평가되어야 한다.

본 연구에서는 정상운전시에 1 차 계통내에서 발생하는 주 진동 주파수와 핵연료집합체와의 공진 가능성을 평가하기 위한 기본자료를 생산하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 하나로 노심을 실제상태로

모사한 시험모델(mockup)을 제작하였다. 그리고 하나로 핵연료 집합체(36봉 및 18봉) 모델을 노심모델에 장착시켜, 공기중 및 수중에서의 고유진동수 시험을 수행하였다.

## 제 2 장 Depleted Uranium 핵연료집합체 및 고유진동수 시험모델 제작

### 제 1 절 Depleted Uranium (DU) 핵연료집합체 제작

하나로 핵연료집합체의 동적 특성 파악을 위한 고유진동수 시험을 위하여, 실제 핵연료봉과 질량분포가 동일한 육각형 36봉과 원형 18봉 depleted uranium (DU) 핵연료집합체 mock-up(이후로는 단순히 ‘핵연료 집합체’라 부르기로 함)을 제작하였다. 36봉과 18봉 DU 핵연료집합체의 조립과 제작은 연구로용 핵연료재료개발 과제팀에 의하여 기술시방서에 따라 이루어 졌다.<sup>1)</sup> 그림 2-1과 그림 2-2에서는 육각형 36봉과 원형 18봉 DU 핵연료집합체의 개략적인 형상을 보여주고 있다. 하나로 핵연료 집합체의 길이는 960 mm이며 핵연료봉, 봉단 접합판, 간격판, 등으로 구성되어 있는 것을 볼 수가 있다. 그리고 조립된 핵연료봉의 길이는 760 mm 이며 그림 2-3에서 그 형상을 보여주고 있다.

제작된 DU 핵연료집합체를 시험 모델의 유동관 내부에 장전하여 고유진동수 시험을 수행한다. 특히 핵연료집합체의 원주방향 진동을 측정할 수 있도록 DU 핵연료봉 대신에 알루미늄 봉 2 개를 제작하였으며, 하단에 가속도계 및 연결선을 고정할 수 있도록 구멍과 홈을 만들었다. 육각형 36봉 DU 핵연료집합체에 대한 시험이 끝나면 원형 18봉 핵연료집합체 시험을 위해 사용할 수 있도록 장착과 탈착이 용이하도록 설계하였다. 핵연료집합체는 수중에 잠기므로 수중용 가속도계를 사용해야 한다. 가속도계의 신호 연결선은 에폭시와 실리콘으로 알루미늄 봉 하단의 홈



속에 부착된다. 핵연료집합체내 수중용 가속도계의 위치는 36봉 핵연료 집합체의 경우에는 그림 2-4 에서 보여주는 바와 같이 1번과 10번 위치에, 그리고 18봉 핵연료집합체의 경우에는 그림 2-5 에서 보여주는 바와 같이 1번과 7번 위치에 장착된다. 알루미늄봉의 고정방법은 장착과 탈착이 용이하도록 하단에 나사산을 안쪽으로 내고 풀림방지를 위하여 접시형 와셔를 삽입한 후 나사로 고정하였다.

최종적으로 가속도계가 부착된 알루미늄 봉은 핵연료집합체 내에 조립되며, 나머지 가속계들은 주로 핵연료집합체 grapple head 위에 부착하였다. 각 모드 시험의 경우에 대한 가속도계의 상세한 설치위치는 제 3 장 제 4 절에 기술되어 있다.

## 제 2 절 고유진동수 시험 모델 제작

하나로 핵연료집합체에 대한 고유진동수 시험 모델은 그림 2-6 에서 보여주는 것과 같이 핵연료집합체를 포함한 유동관, receptacle이 있는 그리드판(grid plate) 및 외부 아크릴 원통으로 구성된다. 그리드판은 그림 2-7 에서와 같이 7 개의 receptacle를 고정할 수 있다. 가운데 receptacle은 시험에 따라 원형과 육각형 유동관과 핵연료집합체를 고정하며, 주위의 나머지 6 개의 receptacle은 원자로 조건과 같도록 육각형 유동관으로만 고정하였다. 수중시험의 경우는 외부 아크릴원통 내에 물로 채워서 모두 잠기게 하였다.

핵연료집합체를 고정하는 유동관은 하나로에 여유 분으로 보관되어

있는 육각형 유동관 7 개와 원형 유동관 1 개를 사용하였으며, 핵연료집합체는 고유진동수 시험을 위해 제작된 36봉과 18봉 DU 핵연료집합체를 사용하였다.

유동관이 고정되는 receptacle과 이와 고정되는 그리드판은 현재 하나로 원자로와 같은 실제 크기로 제작하였다. 7 개의 receptacle를 고정시킬 수 있는 그리드판의 배열은 그림 2-7에서 볼 수 있으며, 그림 2-8에서 receptacle에 대한 상세도를 보여주고 있다. 또한 그리드판이 고정되는 바닥 평판은 스텐레스강으로 제작된 시험용 상판 위에 볼트로 고정될 수 있도록 설계하였다. 그리드판(30mm)과 시험용 상판이 핵연료집합체 및 유동관에 비해 중량이 매우 크며(10 배 이상) 시험용 상판의 유효반경을 핵연료집합체와 유동관의 유효반경보다 훨씬 크게 하여 고정경계조건을 충분히 만족시킬 수 있도록 하였다.

특히 실제 수중에 있는 원자로 유동관의 조건을 모사하기 위하여 하나의 유동관 주위에 6개의 유동관을 고정시켜 실제 유동관 사이의 간격에 의한 효과를 고려할 수 있도록 하였다. 누수 방지를 위하여 아크릴통과 그리드판 사이에 테프론판으로 끼워 12 개의 볼트(M12)로 고정하였다.

외부의 아크릴통은 그림 2-9에서 보여주는 바와 같이 높이가 1200mm이며, 유동관 7개를 모두 포함할 수 있도록 내경을 270mm로, 두께를 15mm로 정하였다. 이 높이는 물속에 핵연료집합체를 장전할 수 있으며 고유진동수 시험을 위하여 필요한 공간을 확보하기에 충분하다.

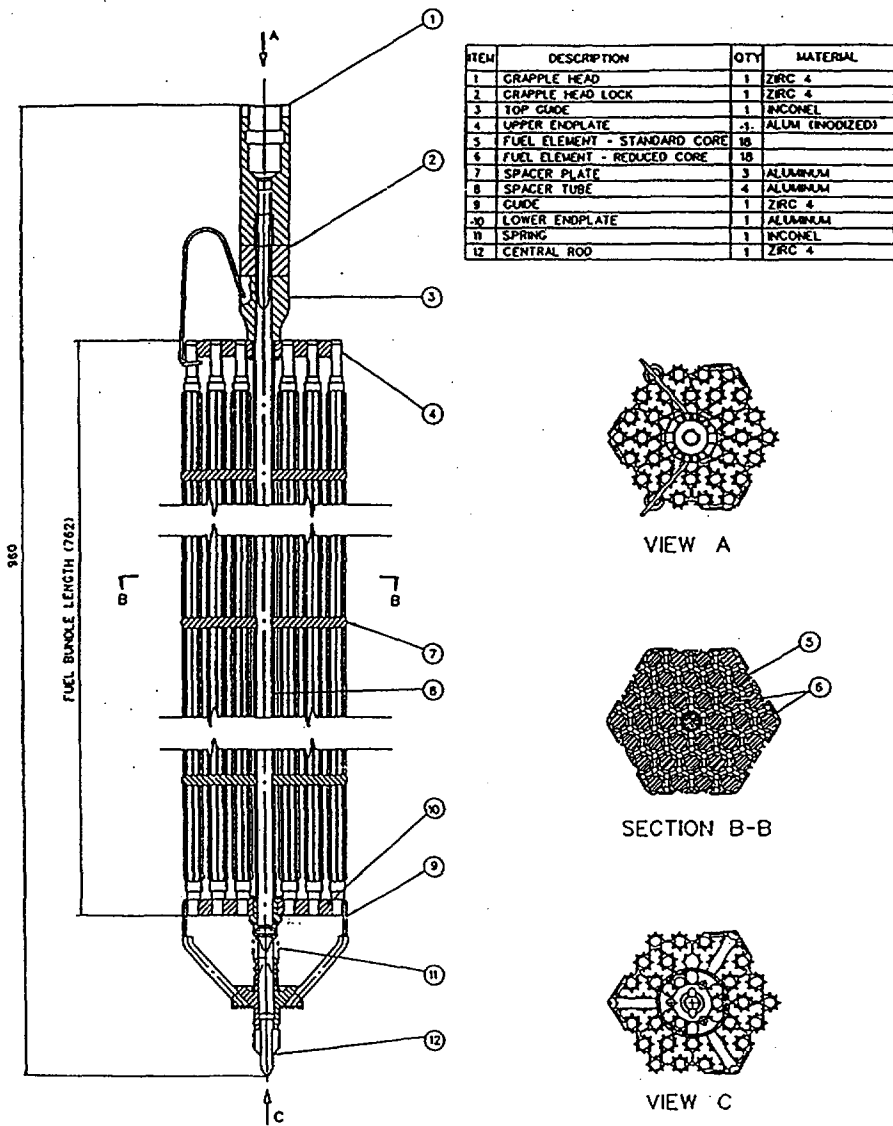
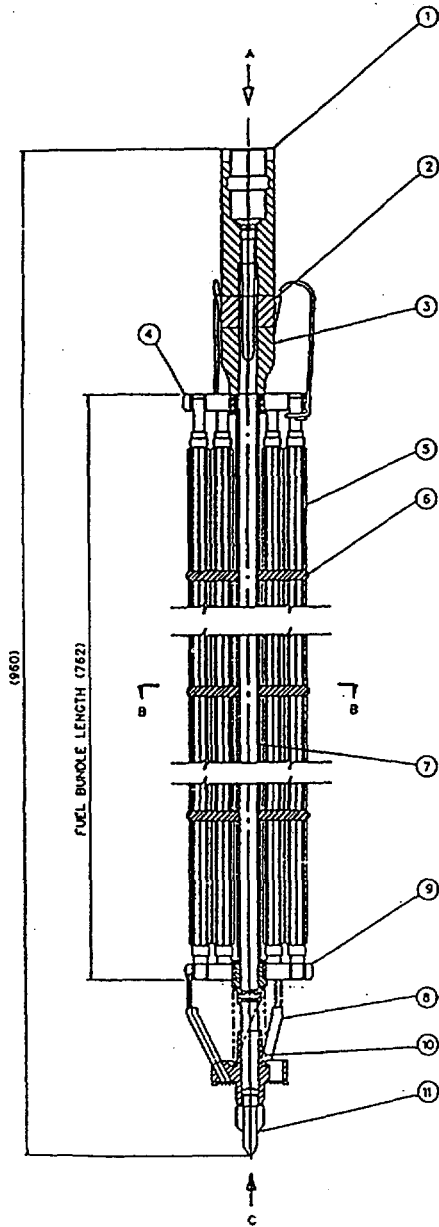


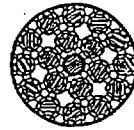
그림 2-1 육각형 36봉 DU 핵연료집합체의 형상



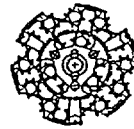
ITEM	DESCRIPTION	QTY	MATERIAL
1	GRAPPLE HEAD	1	ZIRC 4
2	GRAPPLE HEAD LOCK	1	ZIRC 4
3	TOP GUIDE	1	INCONEL
4	UPPER ENDOPLATE	1	ALUM (ANODIZED)
5	FUEL ELEMENT - STANDARD CORE	18	
6	SPACER PLATE	3	ALUMINUM
7	SPACER TUBE	4	ALUMINUM
8	GUIDE	1	ZIRC 4
9	LOWER ENDOPLATE	1	ALUMINUM
10	SPRING	1	INCONEL
11	CENTRAL ROD	1	ZIRC 4



VIEW A



SECTION B-B



VIEW C

그림 2-2 원형 18봉 DU 핵연료집합체의 형상

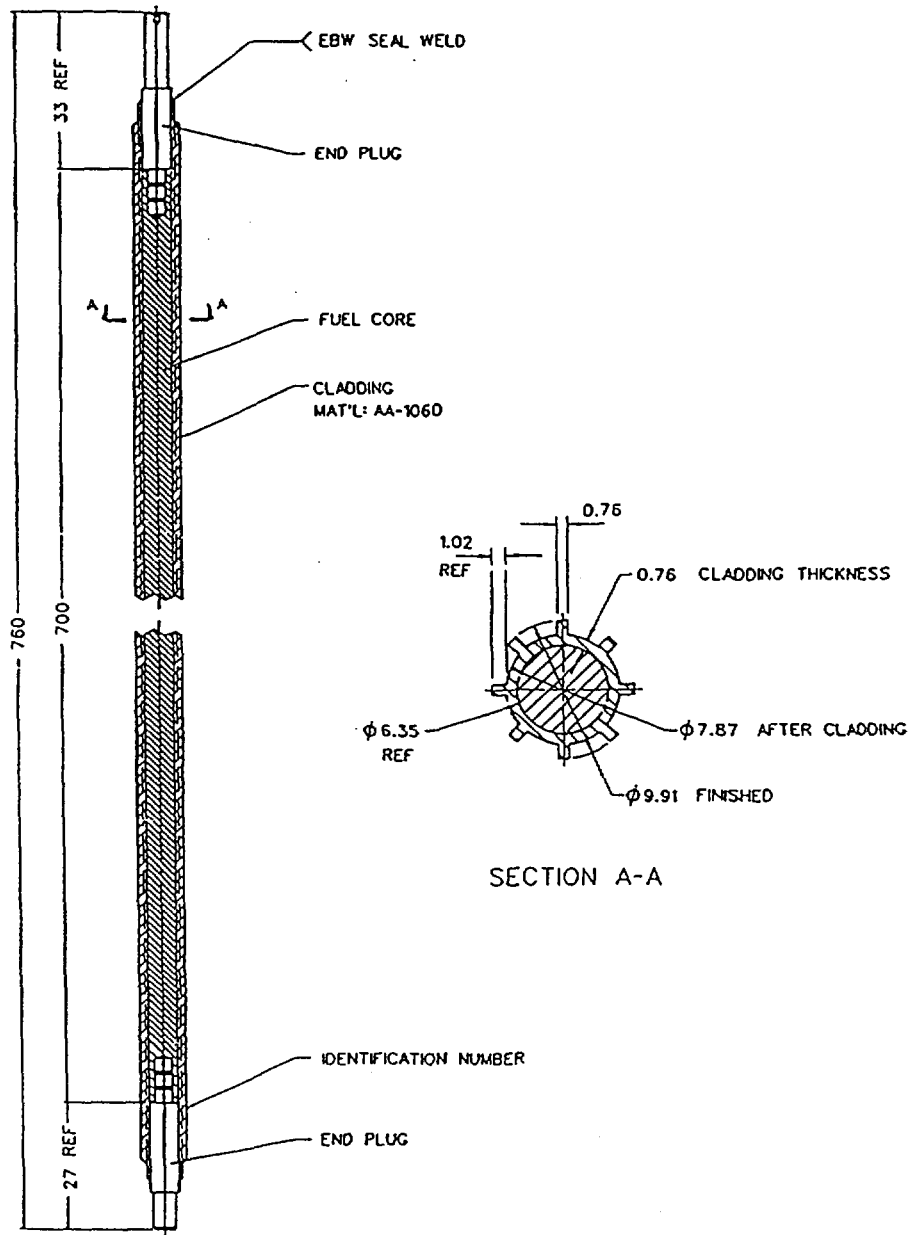
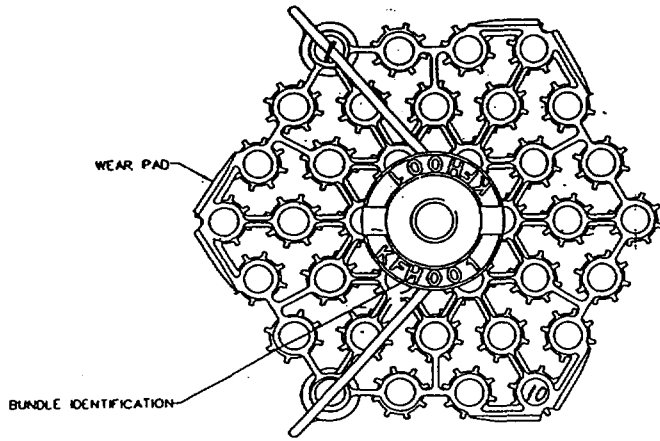
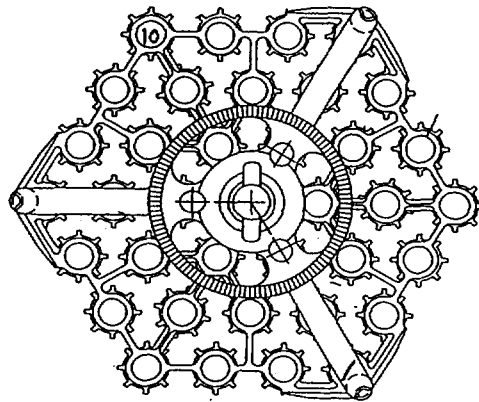


그림 2-3 핵연료봉 형상

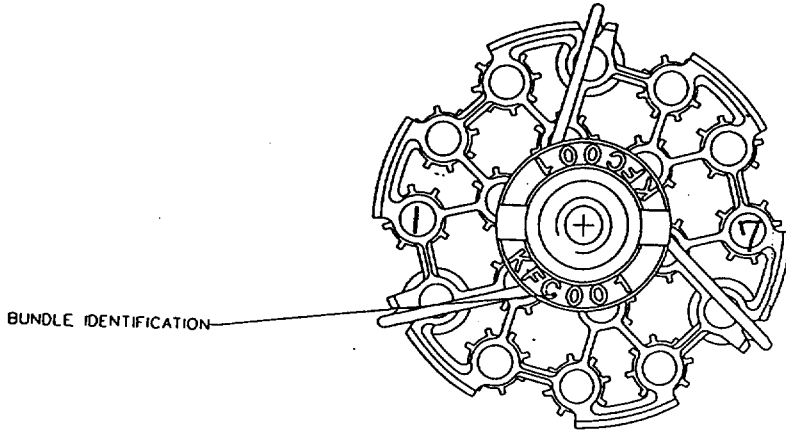


Top View

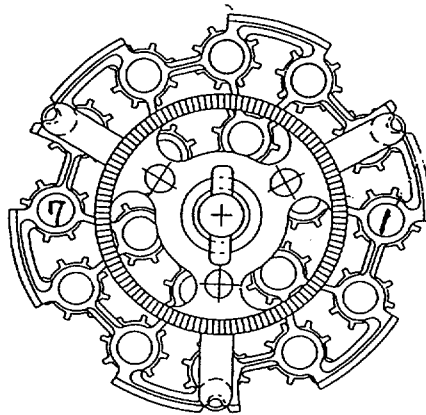


Bottom View

그림 2-4 육각형 36봉 핵연료집합체내 수중 가속도계  
설치위치



Top View



Bottom View

그림 2-5 원형 18봉 핵연료집합체내 수중 가속도계  
설치위치

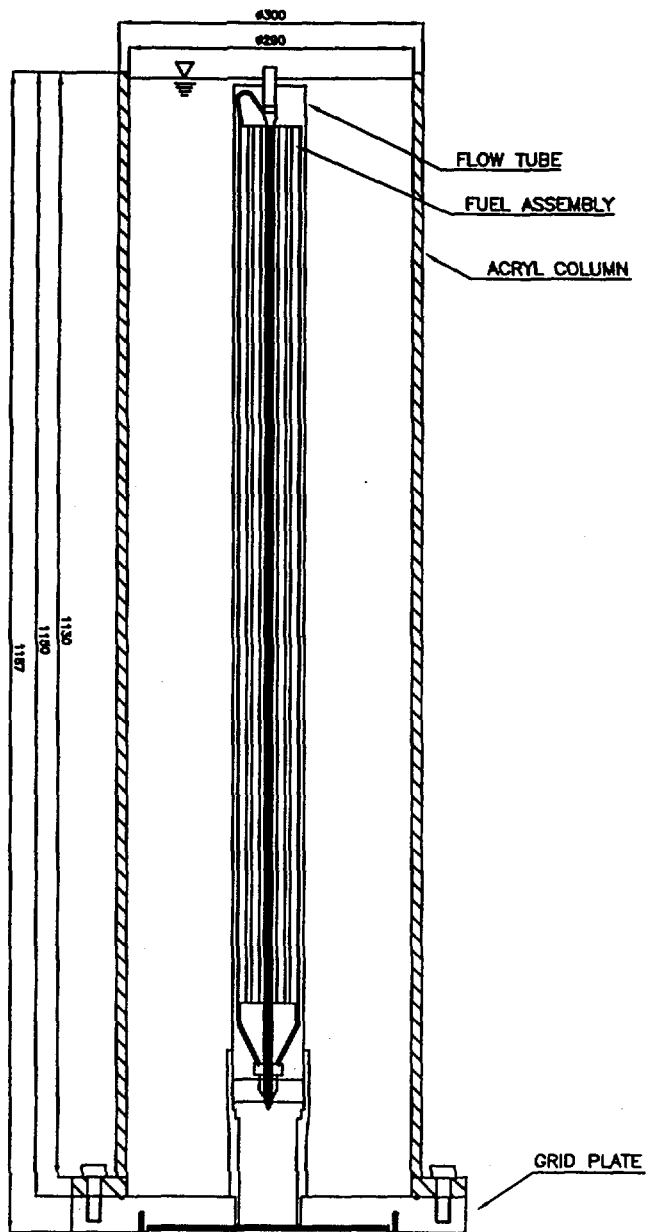
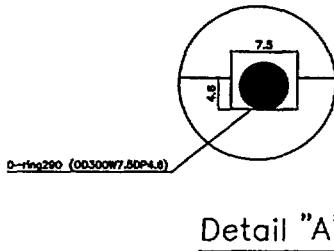
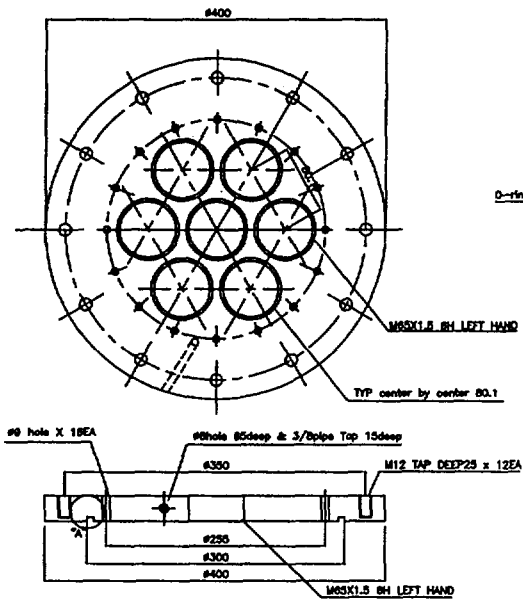


그림 2-6 하나로 핵연료집합체에 대한 고유진동수 시험모델





material : SUS304

\* Teflon spacer 1EA  
(00-400,05-300,PCD350  
M12 bolt hole 12EA)

그림 2-7 그리드판 제작 도면

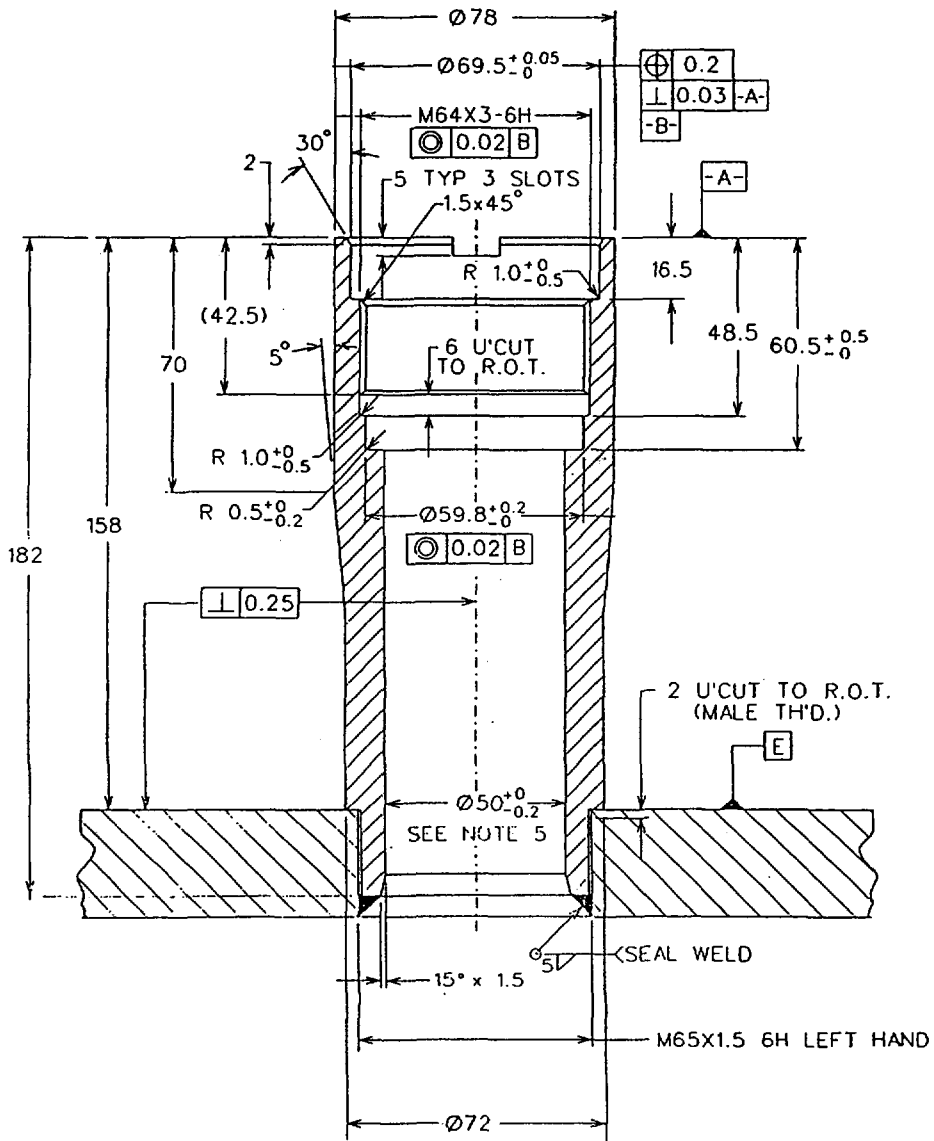


그림 2-8 Receptacle 제작도면

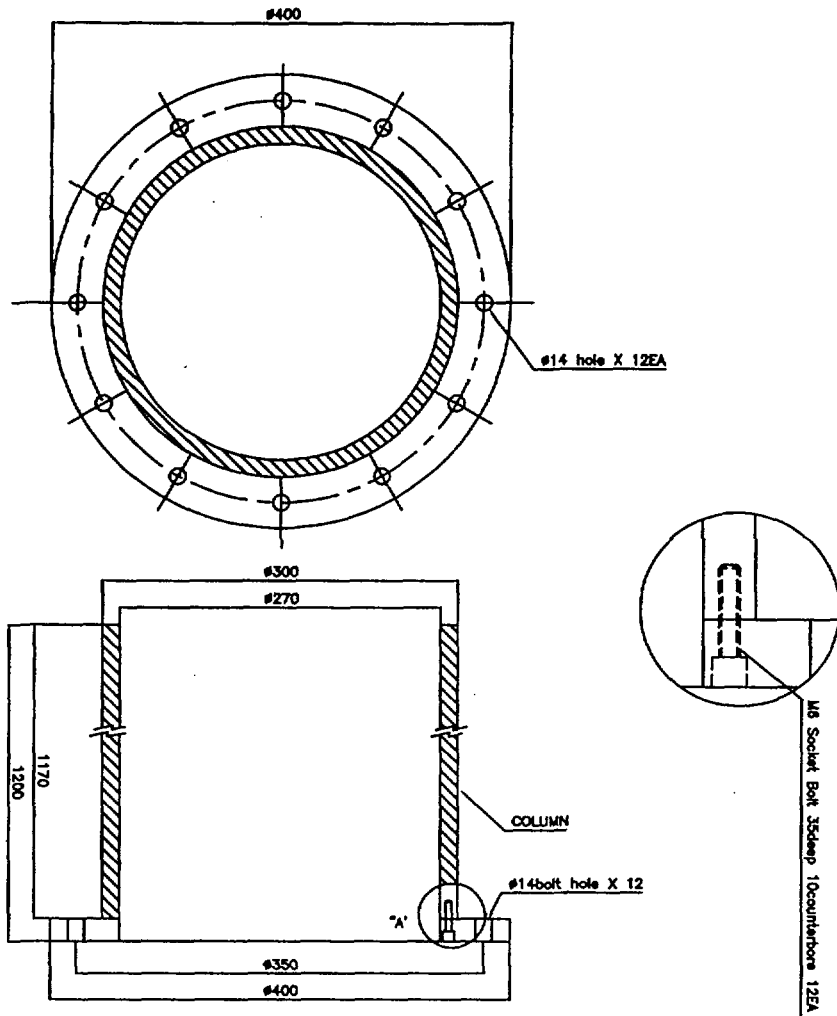


그림 2-9 외부 아크릴 원통

### 제 3 장 핵연료집합체의 모우드 시험

하나로의 정상운전시에 핵연료집합체는 내부의 유체유동에 의하여 유체유발진동 현상을 겪는다. 원자로 내부의 유체에 의한 주요 진동 가진원인으로서 원자로 계통의 펌프에 의한 harmonic 성분, 유체 및 1 차 계통 구조물의 상호작용에 의한 acoustic 공진 성분, 그리고 난류 유동장에 기인한 broad band random 가진 성분 등으로 나누어 볼 수가 있다.

이러한 가진 주파수 성분들은 정상상태 운전 시에 진동측정 및 주파수 분석을 통하여 어느 정도 알아낼 수가 있다. 그러나 정상상태 운전시에는 유체의 난류유동에 의한 broad band 랜덤 가진으로 인하여, 구조물 자체의 고유진동 주파수 성분도 아울러 나타나게 된다. 따라서 정상상태시의 진동 주파수 분석만으로는 가진 주파수와 구조물의 고유진동 주파수 성분을 정확하게 분리해 낼 수가 없다. 특히 내부 유체에 의한 특정 가진 주파수 성분이 구조물의 기본 고유진동 주파수와 일치하게 되는 경우에는 공진 현상에 의하여 구조물의 심각한 손상을 초래하게 된다.

일반적으로 구조물에 대한 고유진동 주파수를 알아내기 위해서는 해석적인 방법과 실험적인 방법을 이용한다. 전자를 모우드 해석이라 하며, 후자를 모우드 시험이라 부른다. 모우드 해석은 주로 유한요소해석 기법을 이용하며, 구조물의 형상 및 경계조건이 복잡한 경우에는 실험등을 이용한 결과의 검증이 필요하다.

모우드 시험은 실험적으로 구조물의 동특성매개변수(고유 진동수, 감쇠율 및 진동모우드 형상)를 추출하여 해석적으로 구한 구조물의 동적해석모델을 검증하거나 또는 경계조건이 매우 복잡하여 해석적으로 구조물의 동적해석모델을 구해내기 힘든 경우에 substructure의 동특성 파라미터를 실험적으로 추출하여 전체구조물의 동특성 및 동적 응답해석에 활용하기 위하여 수행한다. 본 시험에서는 하나로 핵연료집합체를 실제 원자로 설치 시와 동일한 경계조건을 구현하여, 공기중 및 수중에서의 고유진동수를 구하고자 한다.

전체 시험의 종류별 test ID가 표 3-1에 나와 있다.

표 3-1 하나로 핵연료집합체의 고유진동수 test ID

Test ID	핵연료봉 수	측정 구조물	공기중/수중 구분
A18TU	18	유동관	공기중
W18TU	18	유동관	수중
A36TU	36	유동관	공기중
W36TU	36	유동관	수중
A18FA	18	핵연료집합체	공기중
W18FA	18	핵연료집합체	수중
A36FA	36	핵연료집합체	공기중
W36FA	36	핵연료집합체	수중

## 제 1 절 모우드 시험 절차

모우드 시험의 일반적인 절차는 아래와 같다:

- 대상 구조물을 적절한 주파수 범위의 힘으로 가진(excitation) 시킨다.
- 가진과 동시에 구조물의 응답신호를 추출하여 입력과 출력 신호간의 주파수응답함수(frequency response function)를 구한다.
- 전체의 주파수응답함수로부터 curve-fitting 알고리즘을 이용하여 모우드 매개변수(고유진동수, 댐핑, 고유진동모우드 형상)를 추출하고 수학적인 모델을 구한다.

모우드 매개변수 평가를 통한 수학적인 모델의 분석을 위해서는 모우드매개변수 전체를 구하기 위하여, 구하고자 하는 모우드 수 보다 훨씬 많은 수의 측정점 및 방대한 양의 데이터 분석이 필요하다. 본 시험에서는 상기 절차 중 수학적인 모델의 분석은 생략하고 핵연료집합체의 가진, 가진 및 응답신호의 측정과 데이터의 수집, 그리고 고유진동수의 추출에 대하여 기술하기로 한다.

## 제 2 절 가진 방법

일반적인 구조물의 가진 신호로는 아래의 3가지가 있다:

- i) impact 가진

ii) deterministic 가진

iii) random 가진

Impact 가진은 일정한 크기의 질량을 구조물에 직접 충격시켜서 그 충격량을 이용하여 구조물에 가진신호를 전달하는 방법이다. 또한 복잡하고 비싼 가진장비가 필요없이 구조물을 가진할 수 있는 간단한 가진수단으로서, 관심주파수 영역에서 거의 일정한 힘을 구조물에 가하며 가진펄스의 시간축의 폭은 가진주파수 대역과 직접 관련된다. 그러나 crest factor (peak/r.m.s)의 값이 좋지 않고 신호의 조정시 과부하 문제가 발생하며 비 선형계의 경우 정확한 선형화에 문제가 발생하는 단점이 있다.

Deterministic 가진은 신호의 수학적 표현이 명확하며 평균화 (averaging)를 통하여 variance error를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 적절한 신호와 window의 선택으로 leakage error를 조절할 수 있다. 그러나 실험에 소요되는 시간이 길며 측정계의 비선형성을 제거할 수 없다.

Random 가진은 주기성이 전혀 없고 auto spectrum이 평평한 모양을 하는 신호를 발생시킬 수 있다. 그리고 비선형계 응답의 선형화가 가능하며 신호대 잡음비(signal to noise)가 좋다. 그러나 leakage가 큰 문제가 될 수 있고 averaging에 시간이 소요되며 spectrum의 형태를 제어하기 위하여 equalizer와 같은 부가적 기능이 필요한 단점이 있다.

본 과제의 경우에는 핵연료집합체의 배치 상황 등을 살펴 볼 때 가진점이 많지 않고 시험모델 전체를 통한 충격 에너지의 전달이 용이하였기 때문에 impact 가진 방법을 선택하였다. Impact 가진기로는 힘변환기(force transducer)가 부착되어 있는 impact hammer(B&K사의 model 8202)를 사용하였다.

### 제 3 절 측정 장비

각 측정점의 응답가속도 측정을 위하여 B&K 사의 소형의 전하식 가속도계, 전하식 3 축 가속도계 및 PCB사의 ICP형 소형 가속도계를 함께 사용하였으며, sensitivity 범위는  $0.1 \sim 0.2 \text{ pc/ms}^{-2}$ (B&K 4374),  $1.0 \text{ pc/ms}^{-2}$ (B&K 4321),  $10.07 \sim 10.58 \text{ mV/g}$ (PCB W353B15)등이다. 가속도계의 부착은 공기중 상황에서는 가속도계 부착용 왁스를 이용하여 측정점에 직접 부착하였으며, 수중의 경우에는 수중용인 PCB사의 W353B15 가속도계를 에폭시로 측정 위치에 고정하였다.

가진력을 측정하기 위한 힘변환기는 본 실험에서 사용한 B&K 8202 impact hammer에 부착되어 있는 힘변환기를 사용하였다. 이때 이 힘변환기의 sensitivity는  $0.98 \text{ pC/N}$  이며 사용 최대 주파수 범위는  $7 \text{ kHz}$ 이다. 압전형 가속도계의 출력신호는 전치증폭기를 통하여 매우 낮은 임피던스로 변환시켜 비교적 외부 잡음을 차단시키며 진동신호를 측정 및 분석장치에 적합하게 만든다. ICP 회로가 내장되어 있는 W353B15 가속도계의 전원공급용으로는 PCB power unit model 480B를 사용하였으며, B&K 가속도계의 경우에는 charge



mode type 전치증폭기(B&K 2635)를 사용하였다. B&K 2635 전치증폭기는 감도의 미세한 조정이 가능하고, 0.2~100 kHz 까지의 넓은 주파수 대역을 가지며 입력신호에 대한 선택적인 low 또는 high pass filtering이 가능하며 적분기 회로가 내장되어 있다. 본 실험의 경우에는 aliasing 효과를 고려하여 입력 가속도 신호를 0.2~3 kHz 범위로 band pass filtering 하였다.

측정 데이터의 감시 및 분석을 위한 장비로는 12 채널 HP3565S front end 모델을 사용하여 시간영역 가속도 신호를 실시간으로 수집 및 FFT 변환하였다.

#### 제 4 절 측정점의 위치

시험모델의 가진 및 응답 측정점의 위치는 시험의 종류에 따라 조금씩 다르게 설정되었다. 각각의 시험 종류에 대한 가진 및 응답신호의 측정위치가 그림 3-1~그림3-4에 나와 있다.

전체 모델을 통하여 충분한 크기의 가속도 응답을 구하기 위해서는 가진점의 선정이 매우 중요하다. 시험모델의 구조적인 경계조건이 길이방향으로 단순지지화 되어 있으므로 여기서는 공기중 및 수중 모두의 경우에 대하여 시험모델의 상단부에 가진점을 선정하였다. 그리고 측정점의 선정은, 공기중의 경우 선택이 비교적 자유로우므로 예상되는 시험모델의 고유진동 모드 형상 및 가진력의 전달효율을 고려하여 선정하였다. 즉 유동관의 경우에는

길이방향 등간격으로 3 곳을 측정점으로 결정하여 beam 진동모우드 형상을 관찰할 수 있도록 하였으며, 핵연료집합체의 경우에는 중심축의 전체 길이방향으로의 센서의 부착이 불가능하여 중심축의 상단부에 2 개의 응답 측정점을 설정하였다.

그림 3-1은 공기중에서의 원형(18봉용) 및 육각형(36봉용) 유동관의 가진 및 응답 가속도 측정점의 위치를 보여준다. 축방향 진동모우드 형상을 알 수 있도록 하기 위하여 축방향으로 등간격으로 3 곳을 측정점으로 하였다. 수중의 경우에는 공기중의 모델과 동일하며 단지 응답가속도의 측정점을 각각 맨 윗쪽 부분 한군데로만 결정하였다.

그림 3-2는 18봉 핵연료집합체의 공기중에서의 측정점 위치를 상세히 나타내고 있다. 핵연료집합체 하단부에 존재할 것으로 판단되는, Z축 중심의 회전모우드 성분의 존재 유무를 간접적으로나마 확인해 보기 위하여 핵연료집합체 하단부에 원주방향으로 한 쌍의 가속도계(④,⑤번)를 설치하였다. 수중의 경우에는 공기중의 경우와는 달리(그림 3-3) 에서 제 ③,④번 가속도계만 원래 위치(하단부)에 설치하고, 수면위의 평면상에서 반경방향으로 핵연료집합체의 상부 중심축 부분과 원형 유동관의 외부에 각각 한 개씩의 가속도계를 설치하였다. 36봉 핵연료집합체의 경우에는 그림 3-4에서 보는 바와 같이 공기중과 수중의 경우 대부분 동일한 위치에 가진점 및 응답가속도 측정점을 선정하였다.

## 제 5 절 측정 및 분석방법

측정에 앞서 모든 측정센서-저잡음 케이블(low noise cable), 전치증폭기(또는 power unit) 시스템은 주파수가 79.6 Hz 이고 zero-to-peak 값이  $9.8 \text{ m/sec}^{-2}$  인 정현파 신호를 사용하여 system calibration을 수행하였다. 아울러 가진점과 응답 측정점에 대한 시간영역에서의 신호의 크기를 평가하여 데이터 입력 범위를 조정함으로써 잡음의 영향을 최소화 하였다.

그림 3-5는 모우드 시험에 대한 데이터 분석 개략도를 보여주고 있다. 충격 가진 및 가속도의 시간영역 응답신호를 실시간으로 FFT(Fast Fourier Transform) 처리하여 평균화된 Auto Power Spectral Density, Coherence 함수 및 주파수응답함수(frequency response function)를 구하였으며, 이들을 이용하여 고유진동수 분석을 수행하였다. 이때 FFT 분석을 위한 시간간격(주기)은 2 초로 하였으며 샘플링 주파수는 4096 Hz, 최대 주파수 범위는 400 Hz로 하였다(이때 주파수의 resolution은 0.25 Hz임). 그리고 잡음효과 및 신호의 leakage error를 줄이기 위하여 가진 신호에 대해서는 rectangular window, 가속도 응답신호에 대해서는 exponential window를 적용하였다.<sup>2),3)</sup>

## 제 6 절 결과 분석

### 1) 원형 유동관(Round Flow Tube)

18봉형 핵연료집합체용 원형 유동관의 공기중에서의 가진점 및 각 측정점(그림 3-1 참조)에 대한 auto PSD(Power Spectral Density) 및 coherence 함수가 각각 그림 3-6 및 그림 3-7에 나와 있다. 약 54 Hz 및 305 Hz에서 서로 상관관계가 높으면서 고유진동수로 보이는 peak가 존재함을 볼 수가 있다. 이 사실은 그림 3-8의 주파수 응답함수에서 확인할 수가 있다. 즉 54 Hz 및 305 Hz에서 주파수응답함수가 peak를 보이면서 phase가 약 180도로 변화하는 것을 볼 수 있다. 아울러 3 개의 주파수응답함수에서 54 Hz 성분은 전체 신호의 phase 변화가 없는 반면 305 Hz 성분은 1,2 번에서 phase가 180도 차이가 남을 볼 수 있다. 따라서 54 Hz 성분은 제 1 차(기본) beam 모드, 305 Hz 성분은 제 2 차 beam 모드 형상을 갖는 성분임을 쉽게 확인할 수가 있다.

수중의 경우에는 수면을 원형 유동관의 상부끝단에서 약 3cm 아래까지만 물을 채운 후에 상부의 1번 측정점에 가속도계를 반경방향으로 부착시키고 그 반대편의 대칭점을 가속도계와 동일한 방향으로 가진시켜 그림 3-9에서 그림 3-11과 같이 auto PSD, coherence 함수 및 주파수응답함수를 구하였다. 그 결과 유체의 부가질량효과로 인하여 제 1 차(기본) beam 모드 성분이 공기중의 경우에 비하여 훨씬 줄어든 약 26 Hz로 나타났으며, 제 2 차 beam 모드 성분 역시 약 146 Hz로 반 이상 줄어드는 것으로 나타났다.

## 2) 육각형 유동관

36봉형 핵연료집합체용 육각형 유동관의 공기중에서의 가진점 및 응답측정점(그림 3-1 참조)에서의 auto PSD, coherence 함수 및

주파수응답함수 결과가 그림 3-12에서 그림 3-15 사이에 나타나 있다. 18봉형의 경우와 동일한 방법으로 분석한 결과 원형 유동관의 경우와 경향이 유사하나 고유진동수의 수치는 원형 유동관에 비하여 다소 높은 것으로 나타났다. 즉 제 1 차(기본) beam 모우드 성분은 약 58.5 Hz, 제 2 차 beam 모우드 성분은 약 328 Hz이다. 이로부터 육각형 유동관이 원형에 비하여 상대적으로 강성이 더 큼을 확인할 수가 있다.

그림 3-16~그림 3-18은 수중의 경우에 대한 상부 가진점에서의 주파수 분석결과를 보여준다. 마찬가지로 공기중의 경우에 비하여 고유진동수가 현저히 감소함을 볼 수 있으며, 관심주파수 영역(400 Hz)내에서 원형 유동관에 비하여 peak의 개수가 더 많이 나타남을 볼 수가 있다. 이로부터 제 1 차 beam 모우드 성분은 약 29 Hz, 제 2 차 beam 모우드 성분은 약 159 Hz인 것으로 판단된다. 아울러 고차 beam 모우드 성분이 268 Hz에서 348 Hz 사이에 존재함을 확인할 수가 있다. 아울러 여기에서는 원형 유동관의 경우와는 다르게, 가진점 및 응답가속도 측정점을 육각 모서리 부분에 설치한 경우에 대하여 부가적으로 동일한 실험을 수행하였다. 그 결과 그림 3-19에서 보는 바와같이 주파수응답함수가 그림 3-18과 동일함을 알 수가 있다. 따라서 유동관의 경계조건이 동일한 경우에는 육각형 유동관 자체의 고유진동수 변화가 가진방향과는 무관함을 알 수 있다.

### 3) 18봉 핵연료집합체 구조물(18봉 핵연료집합체 및 원형 유동관)

그림 3-20~그림 3-25는 공기중에서의 18봉 핵연료집합체 구조물(측정점은 그림 3-2 참조)의 모우드 시험 결과를 보여준다. Auto PSD,

coherence 함수 및 주파수응답함수를 동시에 살펴보면 고유진동수와 관련되는 주요 peak 주파수는 26 Hz, 58 Hz, 72 Hz, 84 Hz임을 알 수가 있다. 여기서 26 Hz 성분은 전체 측정점에서 고루 나타나며, 58 Hz 성분은 바깥 원형 유동관에서 상대적으로 선명하게 나타나고 있다. 이것은 원형유동관 자체의 제 1 차(기본) 모우드 성분(54 Hz)과 매우 가까이 있다. 따라서 이 성분은 원형 유동관의 기본 진동 모우드 주파수가 핵연료집합체와 함께 지지스프링으로 접촉함으로 인하여 강성이 약간 증가된 때문이라 판단된다. 72 Hz 성분은 핵연료 하단부를 제외하고는 핵연료집합체 축 및 외부 유동관 전체에 나타나고 있음을 볼 때 전체 집합체의 제 2 차 모우드 성분일 것으로 추측된다. 그러나 전체 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 기본 모우드 성분(26 Hz)이 다른 peak 성분에 비하여 지배적인 성분임을 확인할 수 있다. 이로부터 기본 모우드 고유진동수인 26 Hz 성분이 공기중 18봉 핵연료집합체 구조물의 주 진동 주파수가 될 것으로 예상된다. 그리고 상기의 공기중의 결과를 토대로 생각해 볼 때, 핵연료집합체 및 외부유동관 모두의 경우에 대하여 가진 방향과 동일한 방향의 응답 신호가 고유진동 주파수 성분을 결정하는 주요인자가 됨을 알 수 있다.

수중의 경우에는 그림 3-3과 같이 반경방향으로 핵연료 상단부에서 두 개(핵연료집합체 축 및 유동관 부분)의 가속도계를 설치한 후 가진점을 핵연료집합체 축 및 유동관 두 지점으로 하여 각각 반경방향으로 번갈아 가며 응답가속도 신호를 측정하였다. 그림 3-26과 그림 3-27은 핵연료집합체 축을 impact 가진 한 경우에 대한 응답가속도 신호의 auto PSD를 보여주며, 그림 3-28은 외부 유동관을 반경방향으로 impact 가진 한 경우의 auto PSD이다(여기서는 impact

가진의 스펙트럼 형상이 관심 주파수 영역에서 평평한 분포를 나타내므로 응답 신호들의 auto PSD 만으로 고유진동수를 추정할 수가 있다.). 두 경우 모두에 대하여 핵연료집합체 축 부분에서 약 16 Hz 및 26.5 Hz 성분이 주요 peak 주파수로 나타났으며, 하단부의 응답신호에서는 두 경우 모두에서 특별한 peak 성분을 발견할 수 없었다. 따라서 공기중의 고유진동 주파수 성분을 근거로 하여, 제 1 차(기본) 진동 모드 성분은 약 16 Hz, 제 2 차 진동 모드 성분은 약 26.5 Hz인 것으로 판단된다. 따라서 18봉 핵연료집합체 구조물의 수중에서의 기본 고유진동수(26 Hz)가 공기중의 경우(16 Hz)에 비하여 약 10 Hz 정도 감소하였다. 한편 핵연료집합체 하단부의 end plate에 설치된 한 짝의 가속도계 응답 신호들로부터는 회전 모드와 관련된 주파수 성분을 발견할 수 없었으며, 고유진동 주파수 성분들도 분명하게 나타나지 않음을 볼 수가 있다. 이것은 핵연료집합체의 상단부에서의 충격가진 에너지가 집합체의 하단부까지 충분히 전달되지 못하여 end plate의 가진이 적절히 이루어지지 않기 때문이라 생각된다. 따라서 end plate에서의 회전 모드 성분을 확인해 보기 위해서는 핵연료집합체 하단부의 경계조건을 유지하면서 end plate의 원활한 가진을 통한 부가적인 시험이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

#### 4) 36봉 핵연료집합체 구조물(36봉 핵연료집합체 및 육각형 유동관)

공기중 36봉 핵연료집합체 구조물에 대한 가진점 및 응답 측정점(그림 3-4 참조)의 신호들에 대한 주파수 분석 결과가 그림 3-29에서 그림 3-36에 걸쳐 나와 있다. Auto PSD, coherence 및 주파수응답함수로부터 고유진동수로 판단되는 주요 peak 성분이 28 Hz, 31 Hz, 36 Hz, 64 Hz

이다. 여기서 28 Hz 성분은 감쇠율이 클 뿐만 아니라 31 Hz peak와 서로 밀접해 있는 관계로 인하여 상대적으로 뚜렷하게 나타나지는 않고 있다. 그리고 28 Hz 및 31 Hz 성분은 가진방향을 포함하여 전체 방향에서 고루 나타나며 36 Hz 및 64 Hz 성분은 가진 방향에서 peak가 뚜렷하게 보인다. 36봉은 18봉에 비하여 질량이 크므로 이 효과를 고려한다면 36봉 핵연료집합체 구조물의 제 1 차(기본) 고유진동수가 26 Hz 이하가 될 것으로 기대되었으나, 실제로는 그 보다 약간 큰 28 Hz로 나타났다. 이것은 36봉 핵연료집합체가 육각형 유동관과 조립되면서 강성의 효과가 더 커진 것으로 사료된다. 18봉의 경우와는 달리 전체적으로 기본 진동 모드 성분(28 Hz) 보다는 제 2 차 고유진동수(31 Hz)가 다른 peak 성분에 비하여 더 지배적으로 나타남을 볼 수가 있다. 그러나 이 신호가 가속도 신호임을 감안하면, 변위 성분에서는 28 Hz peak 및 31 Hz 성분 모두가 공기중 36봉 핵연료집합체 구조물의 주요 진동 주파수가 될 것으로 예상된다.

수중의 경우에는 그림 3-37에서 그림 3-42에서 보는 바와 같이 28 Hz peak 성분이 전체 방향에서 고루 나타난다. 11 Hz 성분도 미약하게 볼 수 있으며 특히 유동관의 가진방향에서 뚜렷이 나타나고 있다. 그런데 앞의 결과로부터, 36봉형 유동관의 수중에서의 기본 고유진동수가 29 Hz이므로 28 Hz 성분은 유동관 자체의 기본 고유진동수에 의한 성분으로 여겨진다. 따라서 역시 이 신호가 가속도 신호임을 감안하면 11 Hz 성분이 기본 고유진동수가 될 가능성이 높다. 이를 확인하기 위하여 가진점을 X 방향으로 바꾸어서(그림 3-4 참조) 시험을 재 수행하였다. 그 결과 그림 3-43부터 그림 3-45까지에서 보는 바와 같이 11 Hz 및 28 Hz



peak 성분이 동일하게 나타나며, 아울러 16.5 Hz가 주요 peak 성분으로 나타났다. 이로부터 36봉형 육각형 핵연료집합체 구조물에서는 가진점의 방향에 따라 주요 peak 주파수가 다르게 발생하는 것으로 관찰되었다. 그리고 46 Hz와 54 Hz는 주로 핵연료 축상의 가진방향으로 가진신호와 높은 상관관계를 가지면서 뚜렷한 peak를 보이므로 핵연료집합체의 축과 관련된 고차의 고유진동수로 여겨진다. 따라서 36봉 핵연료집합체 구조물의 경우 공기중에서의 기본 고유진동수는 28 Hz 수중에서의 기본 고유진동수는 11 Hz로서, 그 차이(공기중 및 수중)가 18봉 핵연료집합체 구조물의 경우에 비하여 좀 더 크게 나타난다. 또한 18봉의 경우와 마찬가지로 핵연료집합체 하단봉입판에 설치된 한 쌍의 가속도계 응답 신호들로부터는 회전 모드와 관련된 주파수 성분이 발견되지 않았다.

하나로 핵연료집합체 구조물의 공기중 및 수중에서의 고유진동수 시험결과를 각 test ID 별로 요약하면 표 3-2와 같다.

표 3-2 하나로 핵연료집합체의 고유진동수 시험 결과

Test ID	핵연료봉 수	측정 구조물	공기중/수중 구분	고유진동수 (Hz)
A18TU	18	유동관	공기중	54, 305
W18TU	18	유동관	수중	26, 146
A36TU	36	유동관	공기중	58.5, 328
W36TU	36	유동관	수중	29, 159
A18FA	18	핵연료집합체	공기중	26, 58, 72, 84
W18FA	18	핵연료집합체	수중	16, 26.5
A36FA	36	핵연료집합체	공기중	28, 31, 36, 64
W36FA	36	핵연료집합체	수중	11, 16.5, 28, 46, 54

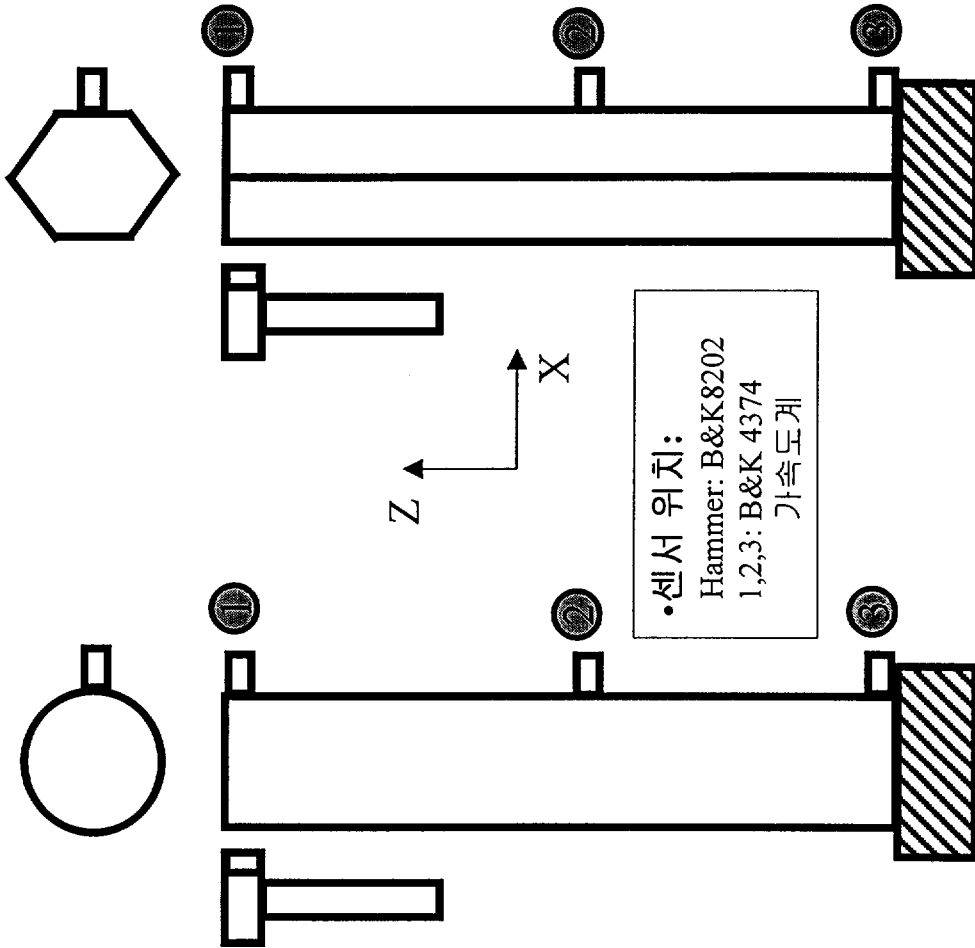


그림 3-1 원형 및 육각형 유동관의 공기중 센서 위치

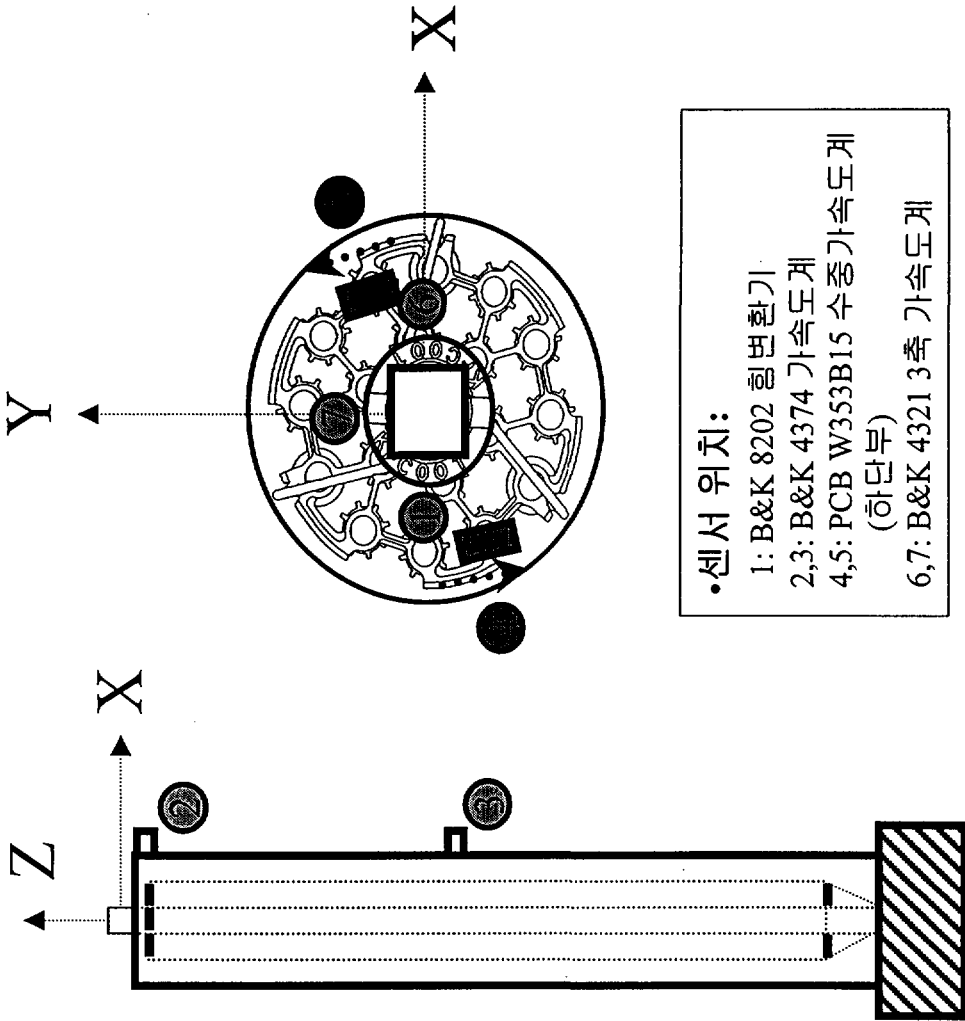
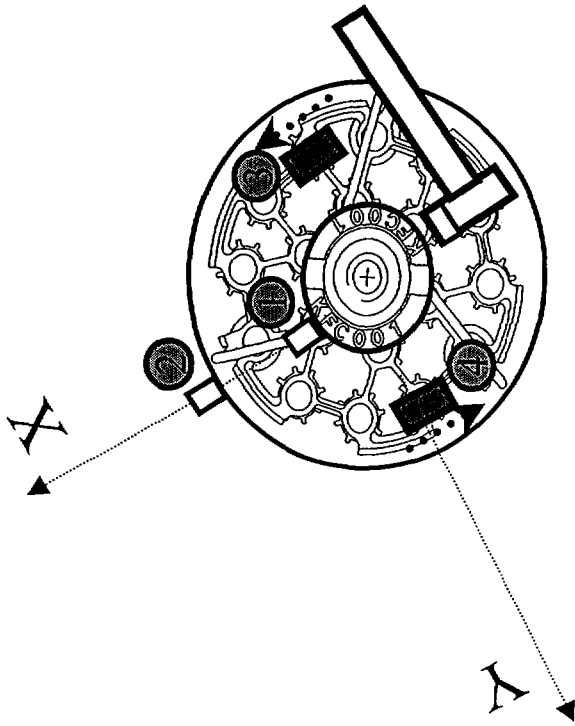


그림 3-2 공기중 18봉 핵연료집합체 구조물의 측정점 위치



•센서 위치:

1,2 : B&K 4374 가속도계

3,4 : PCB W353B15 수중가속도계  
(하단부)

그림 3-3 수중 18분 핵연료집합체 구조물의 측정점 위치

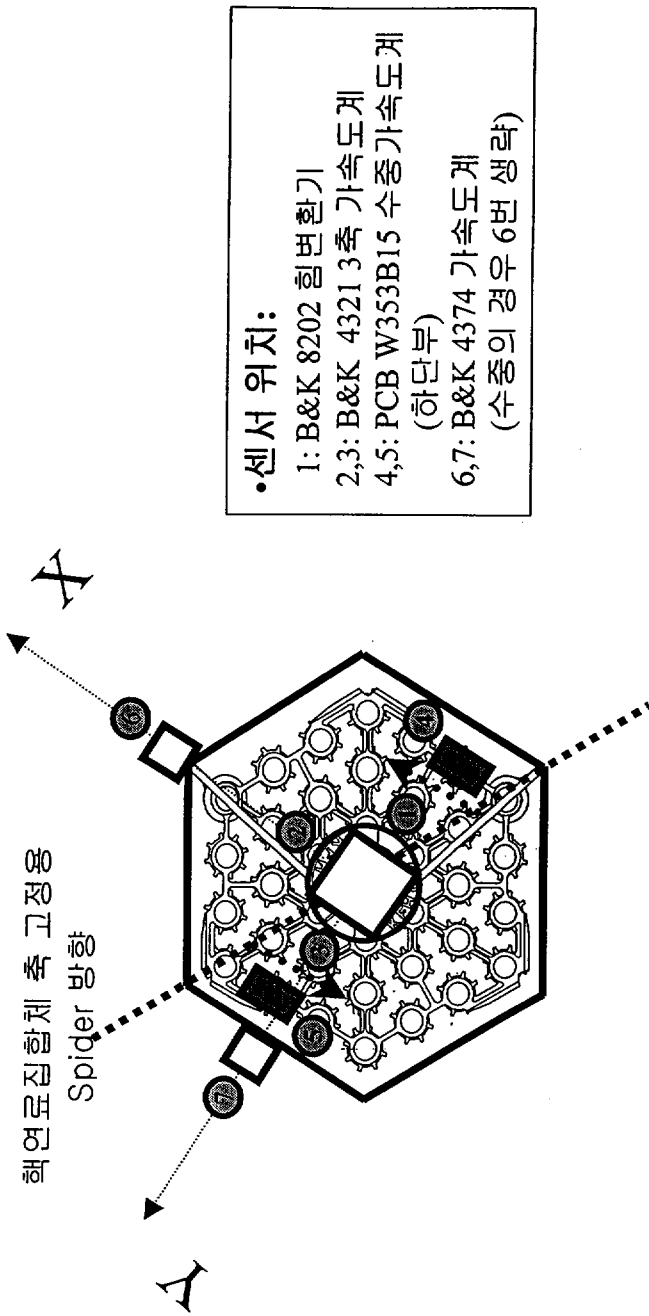


그림 3-4 공기중 및 수중에서의 36봉 해연로집합체 구조물  
의 측정점 위치

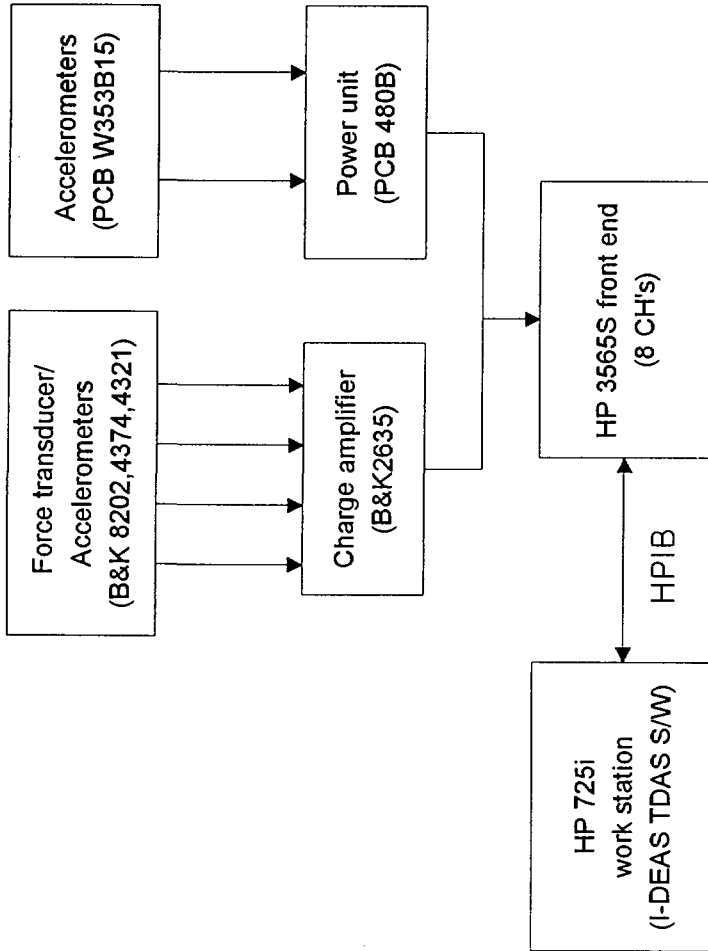


그림 3-5 측정장비 개략도

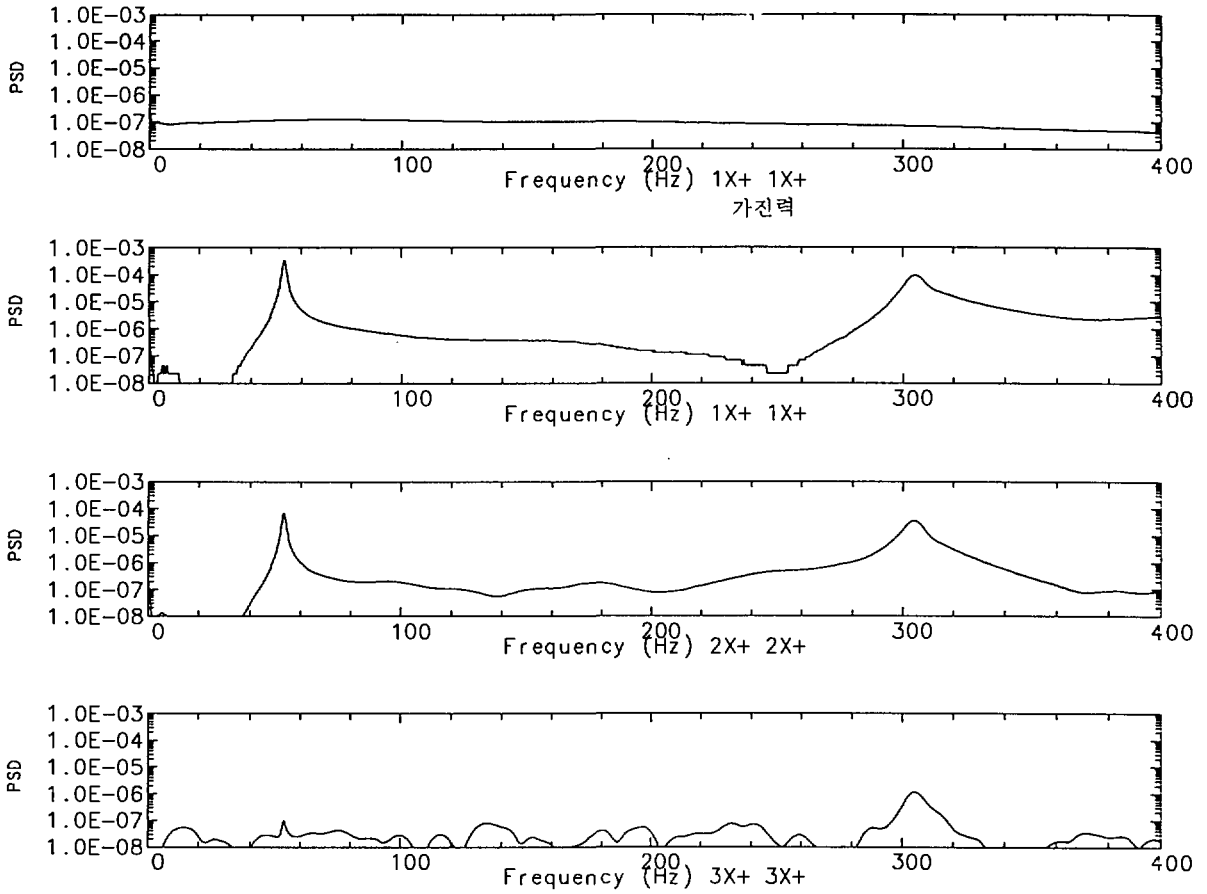


그림 3-6 공기중 원형 유동관의 Auto PSD



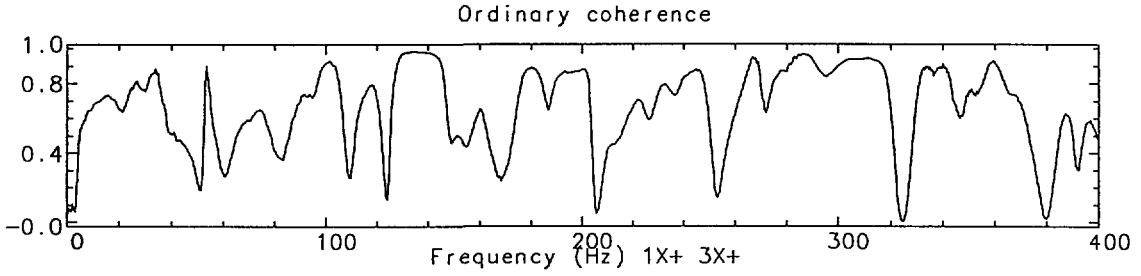
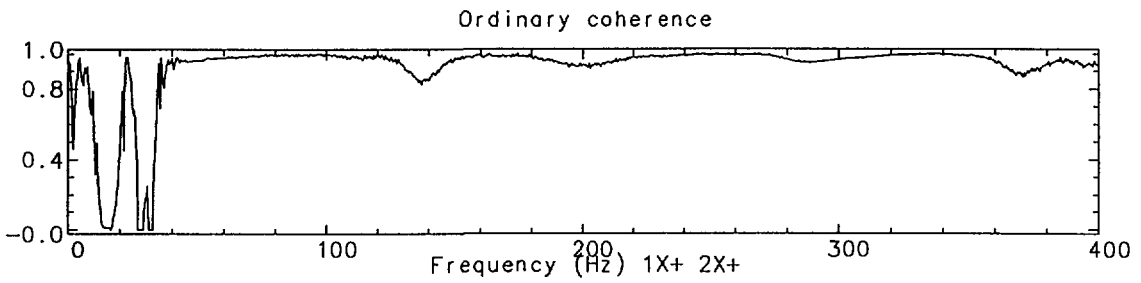
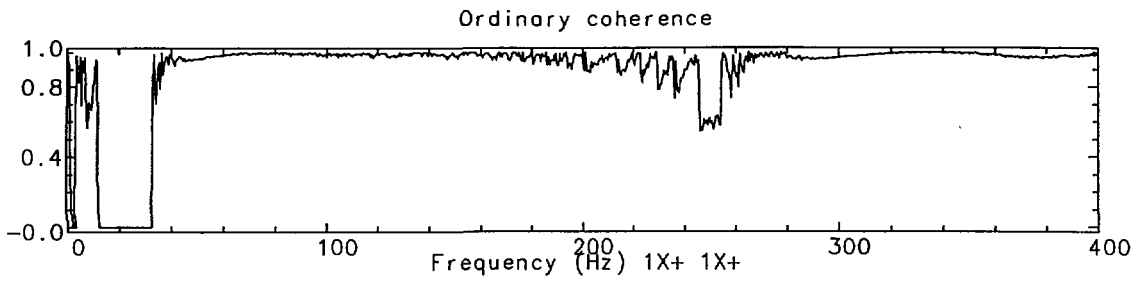


그림 3-7 공기중 원형 유동관의 Coherence 함수

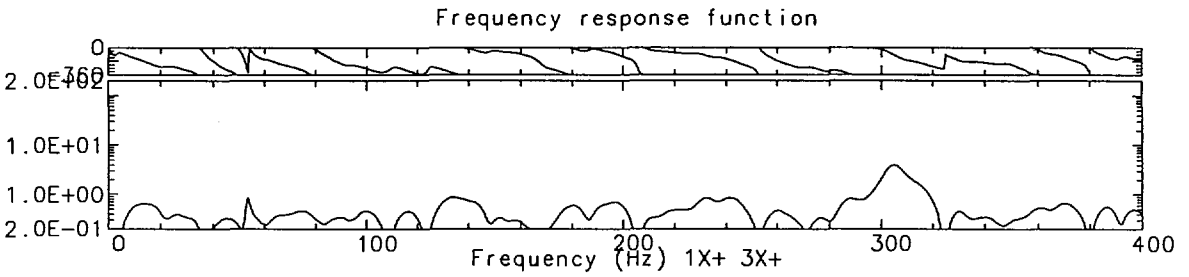
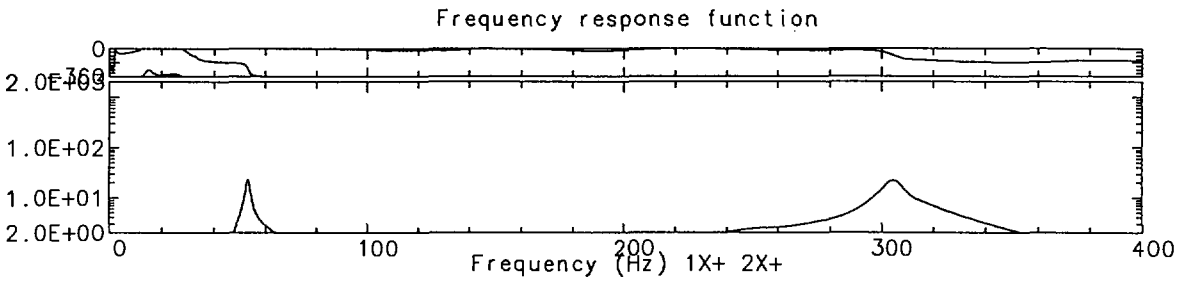
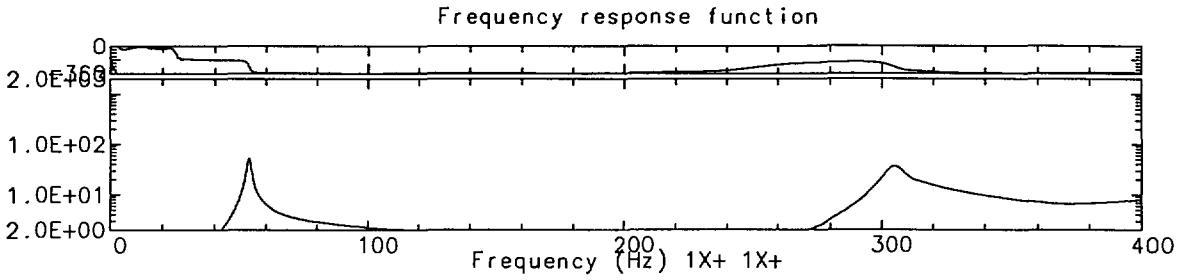


그림 3-8 공기중 원형 유동관의 주파수 응답함수

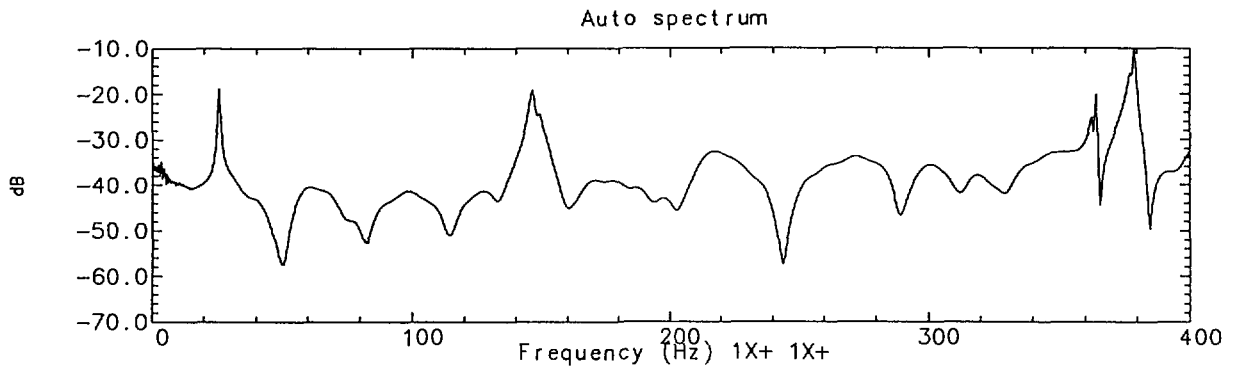
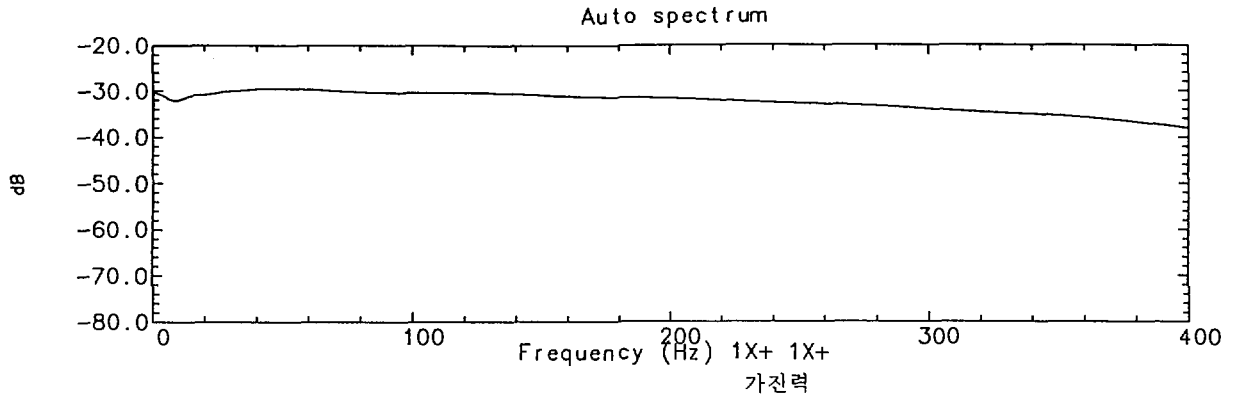


그림 3-9 수중 원형 유동관의 Auto PSD

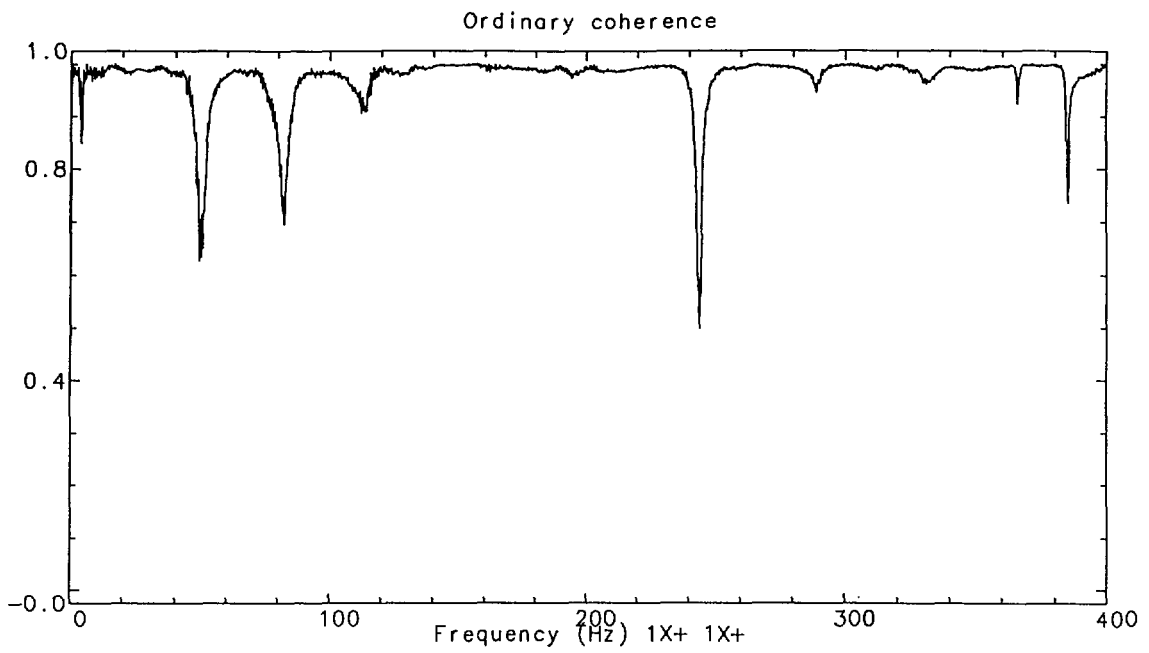


그림 3-10 수중 원형 유동관의 Coherence 함수

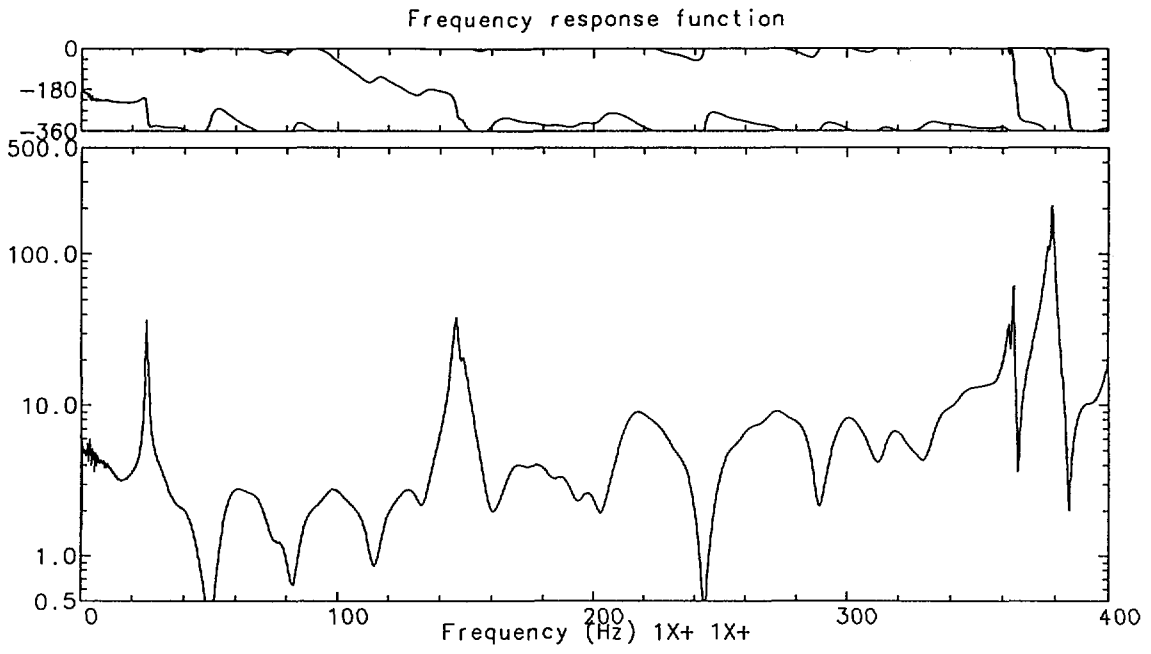


그림 3-11 수중 원형 유동관의 주파수 응답함수

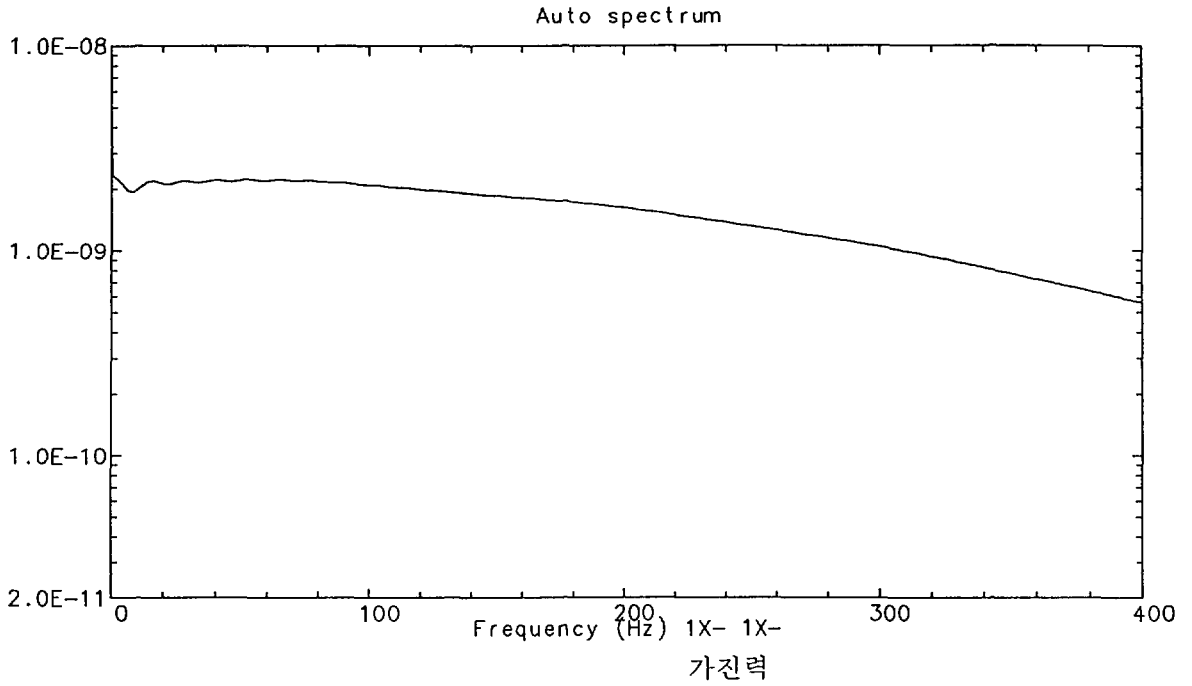


그림 3-12 공기중 육각형 유동관의 가진력 Auto PSD

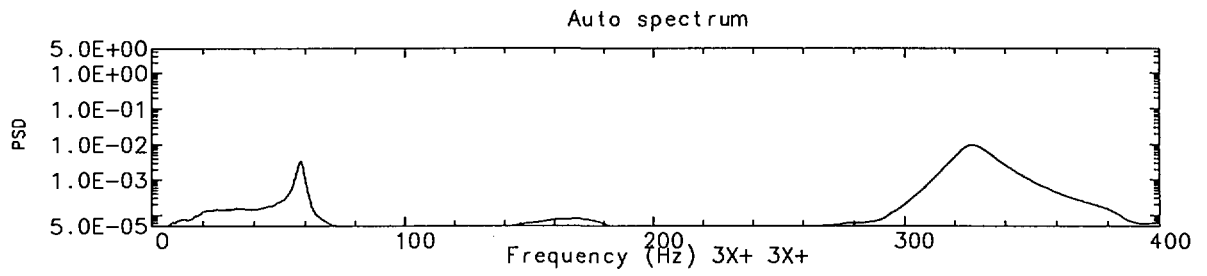
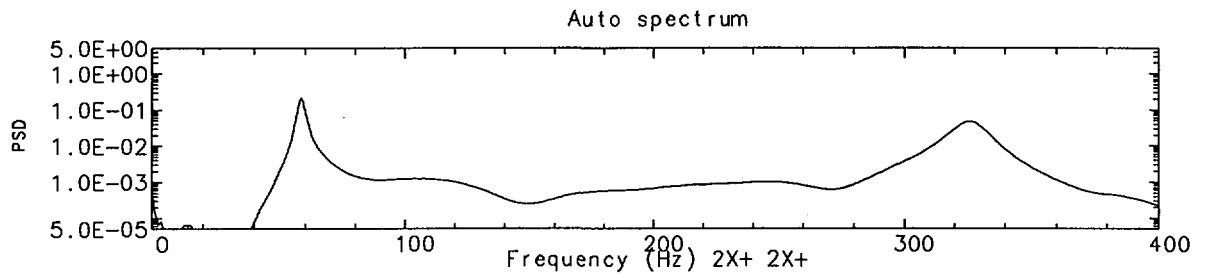
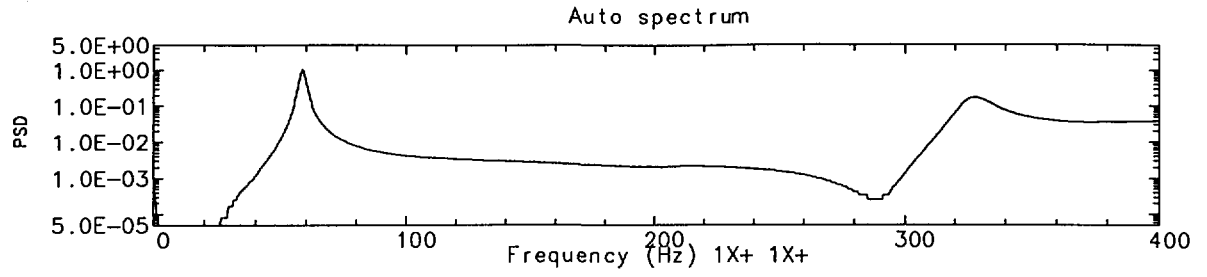


그림 3-13 공기중 육각형 유동관의 응답가속도 Auto PSD

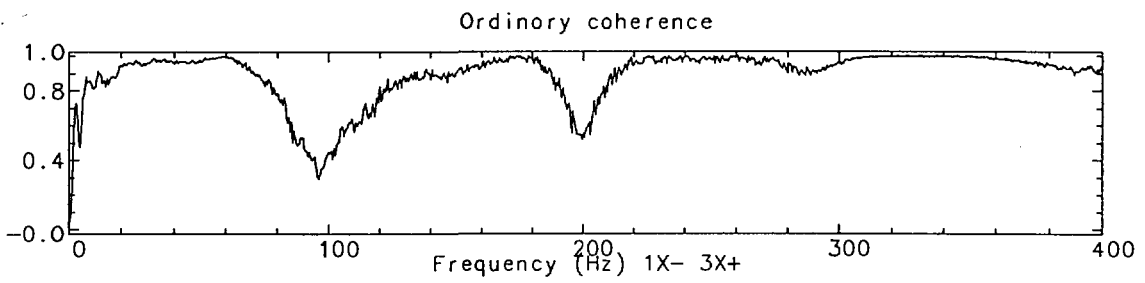
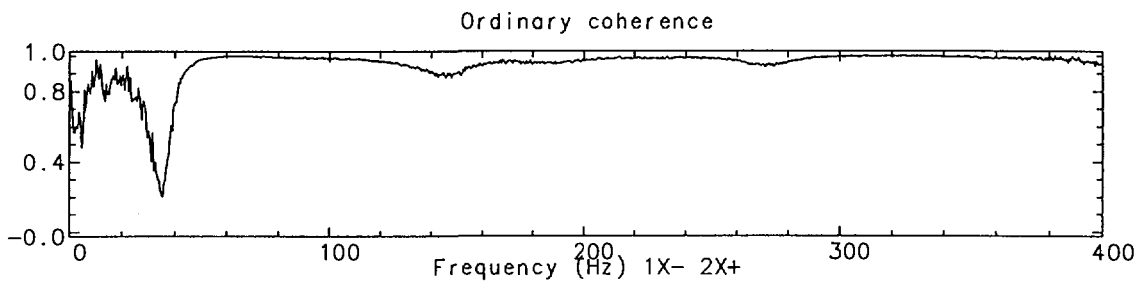
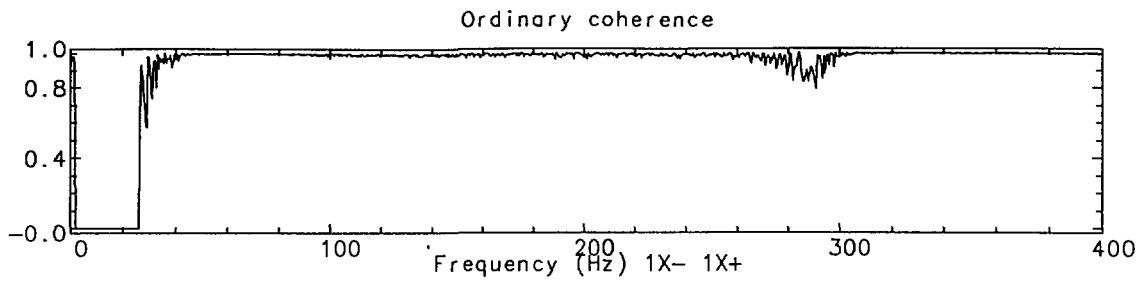


그림 3-14 공기중 육각형 유동관의 Coherence 함수



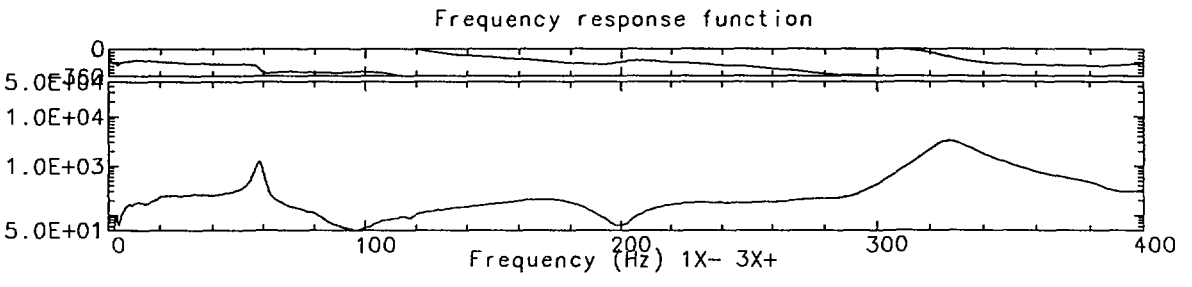
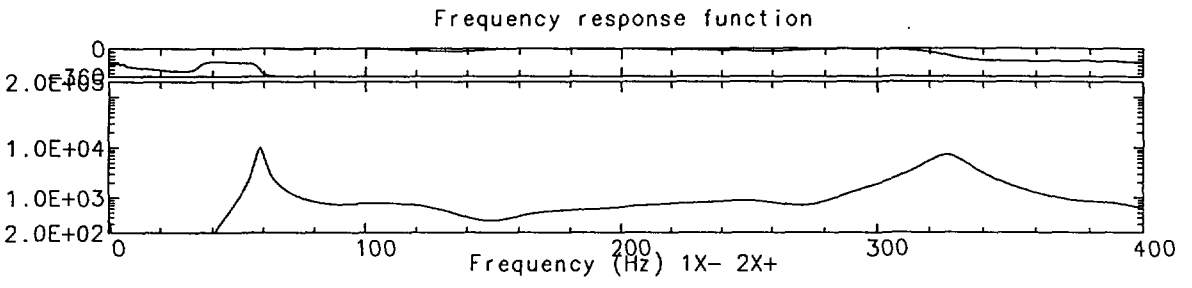
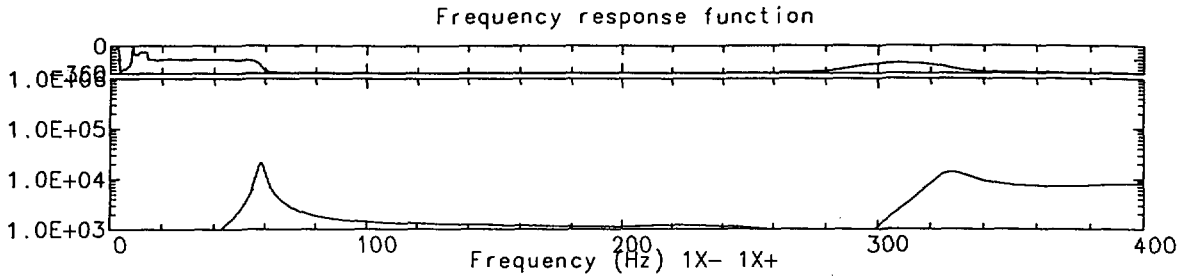


그림 3-15 공기중 육각형 유동관의 주파수응답함수

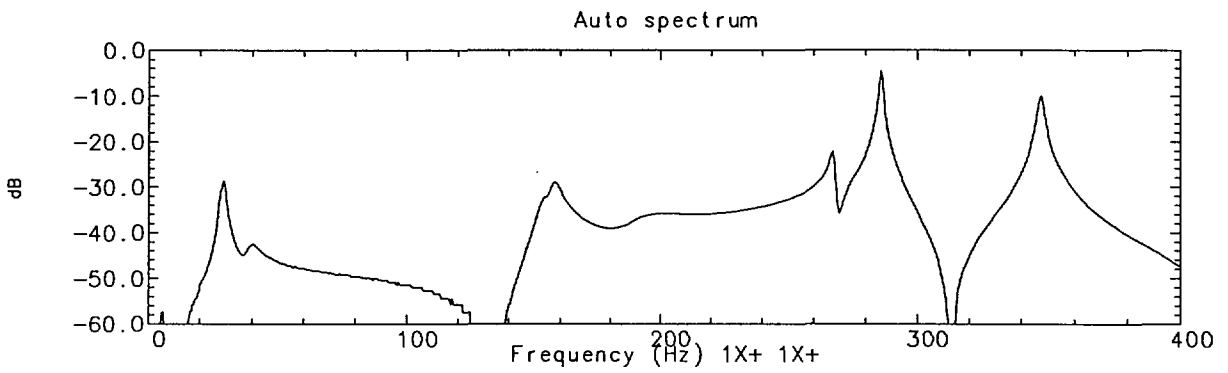
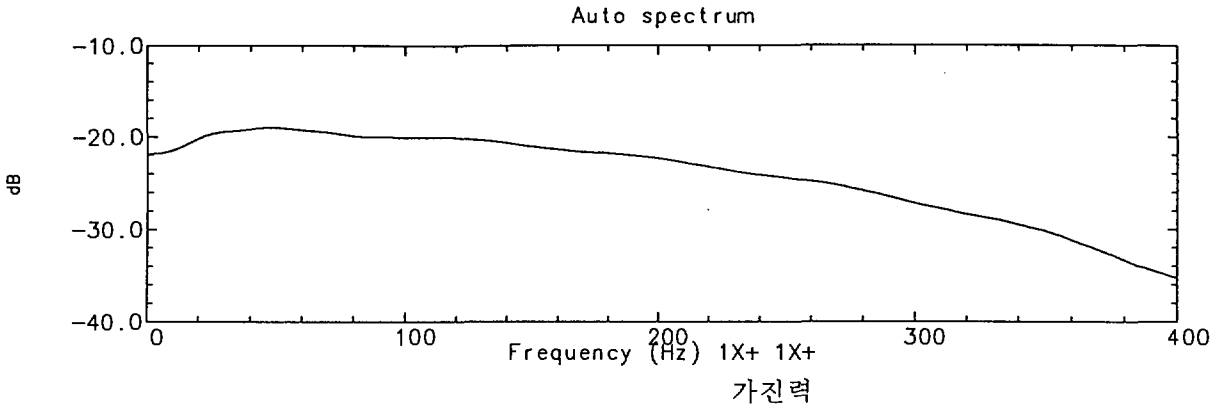


그림 3-16 수중 육각형 유동관의 Auto PSD

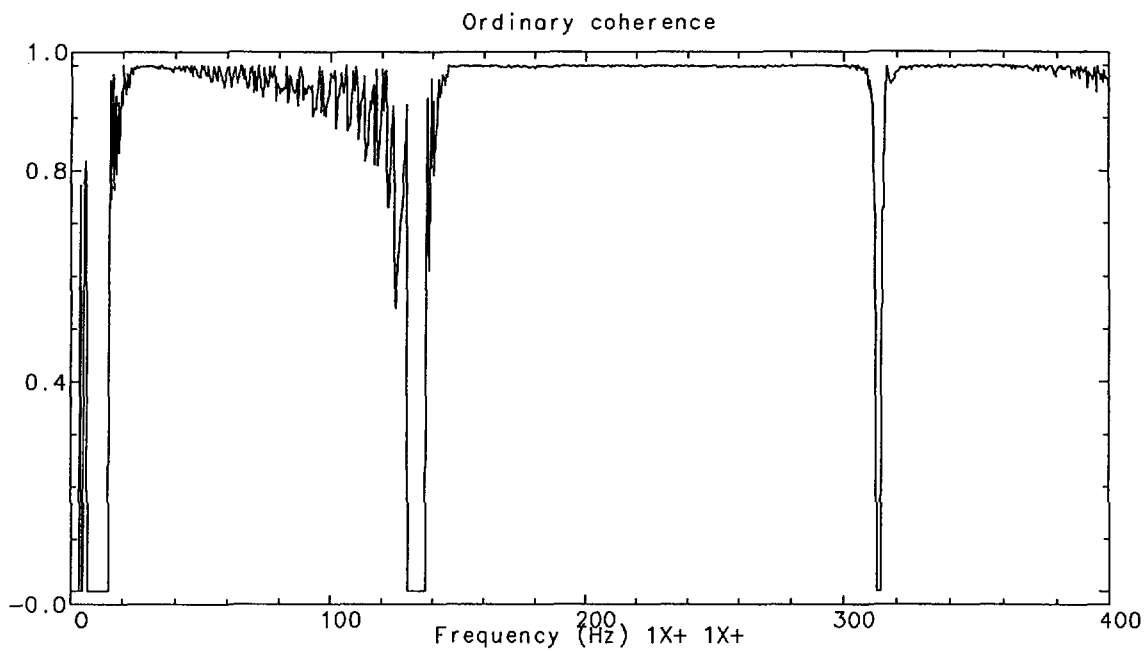


그림 3-17 수중 육각형 유동관의 Coherence 함수

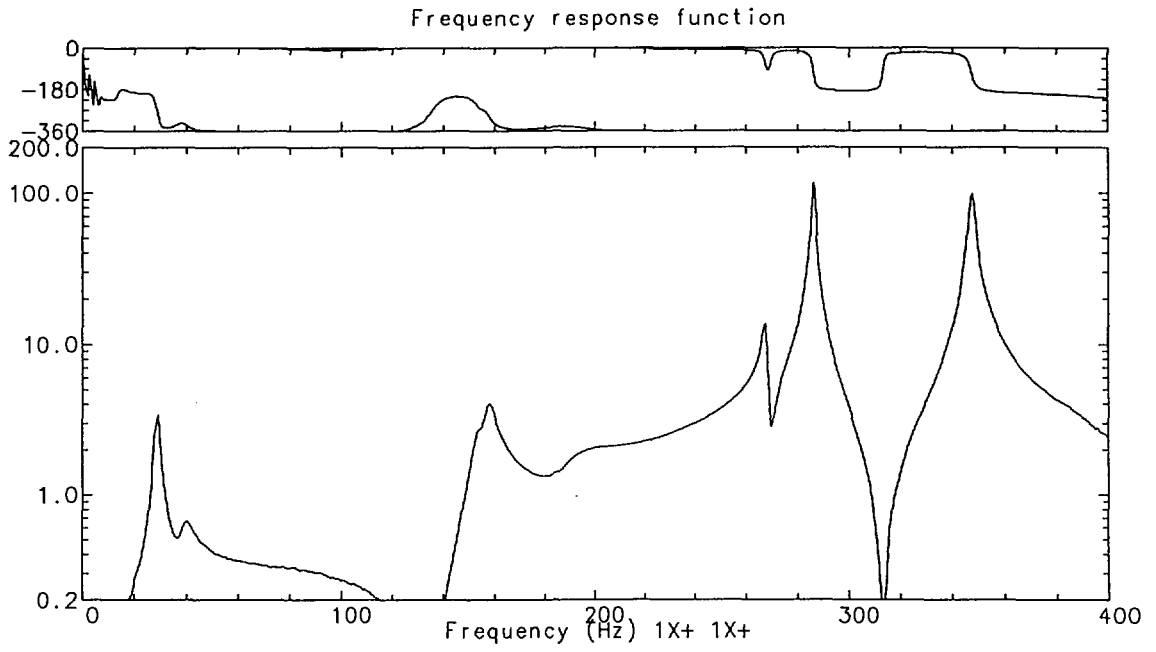


그림 3-18 수중 육각형 유동관의 주파수응답함수

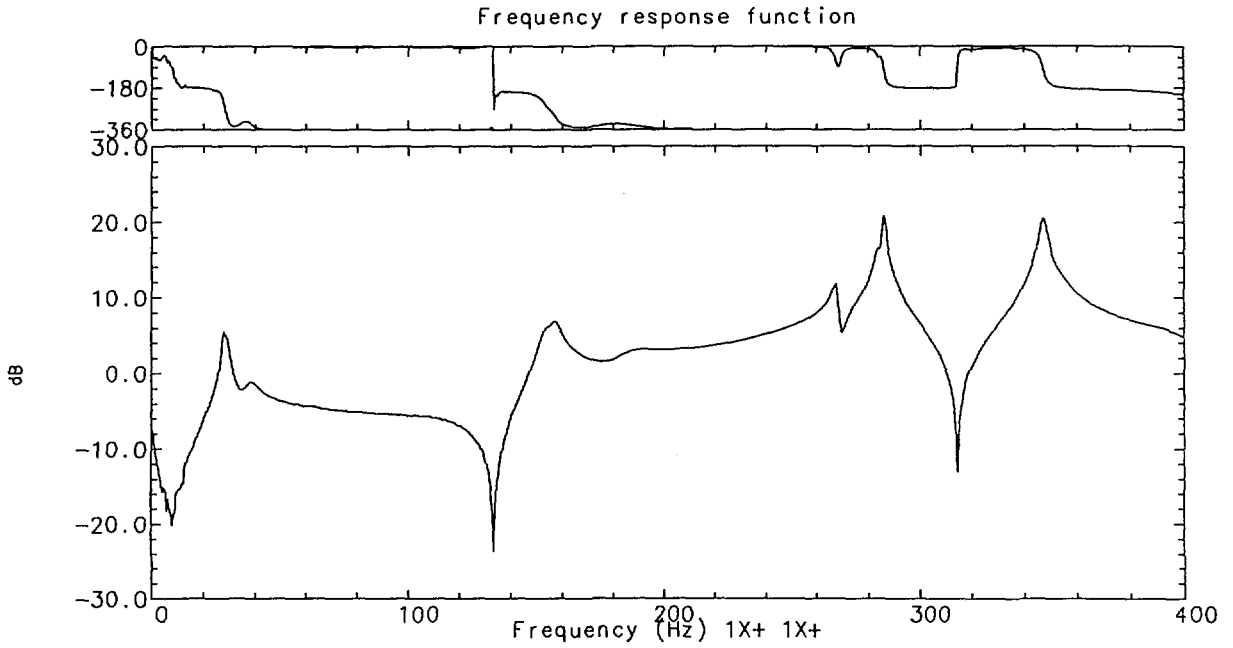


그림 3-19 수중 육각형 유동관의 주파수응답함수  
(모서리 부분을 가진 한 경우)

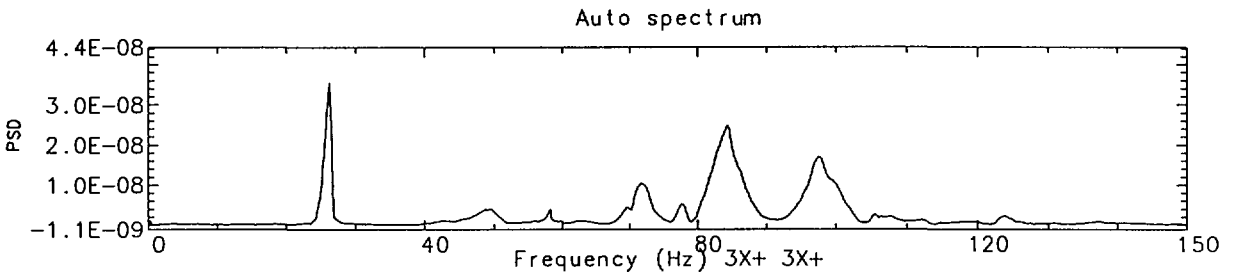
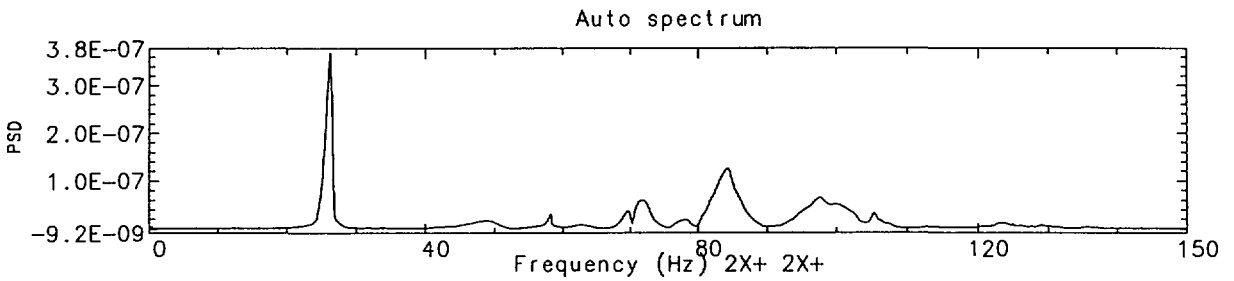
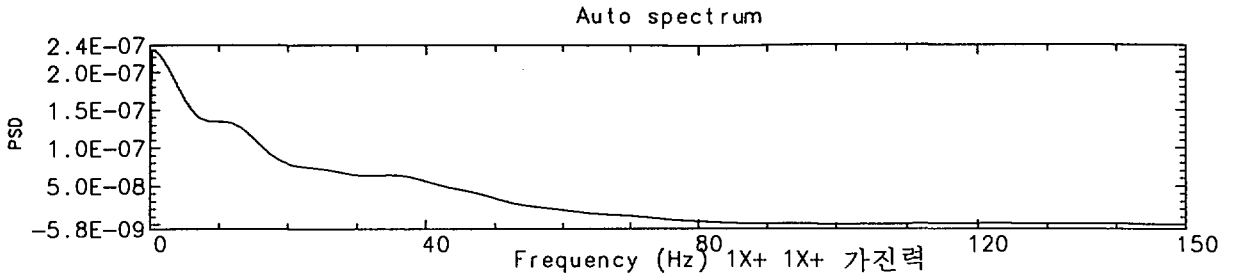


그림 3-20 공기중 18봉 핵연료집합체 구조물의 Auto PSD

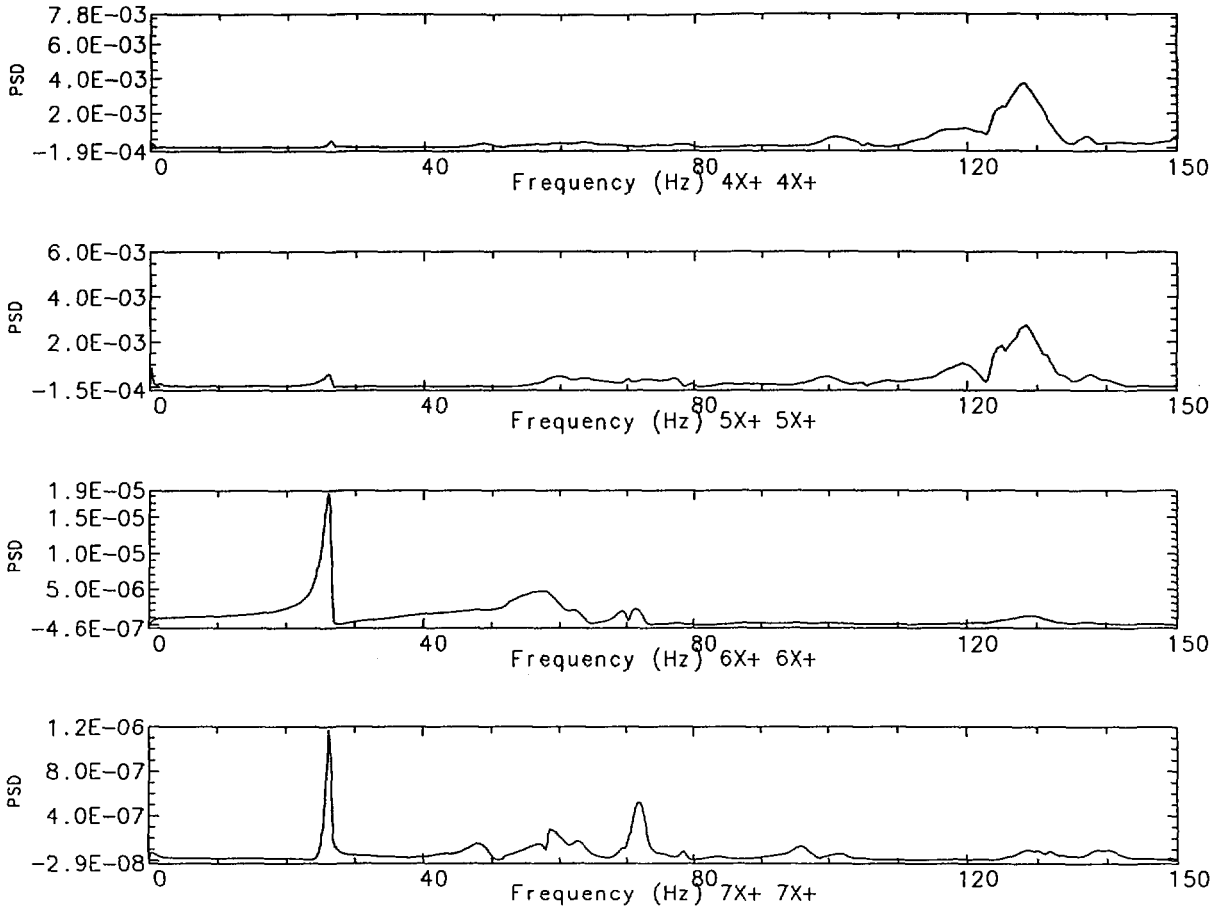


그림 3-21 공기중 18봉 핵연료집합체 구조물의 Auto PSD

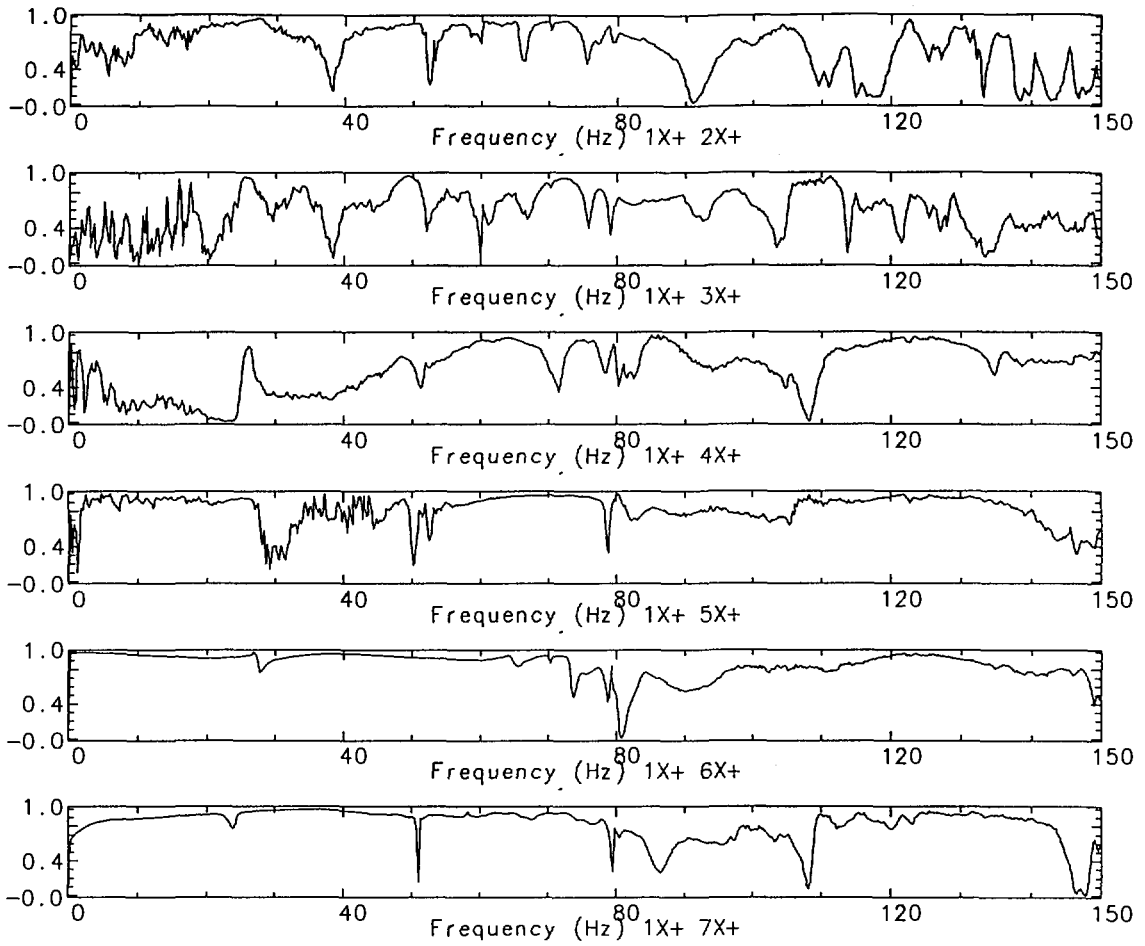


그림 3-22 공기중 18봉 핵연료집합체 구조물의 Coherence 함수



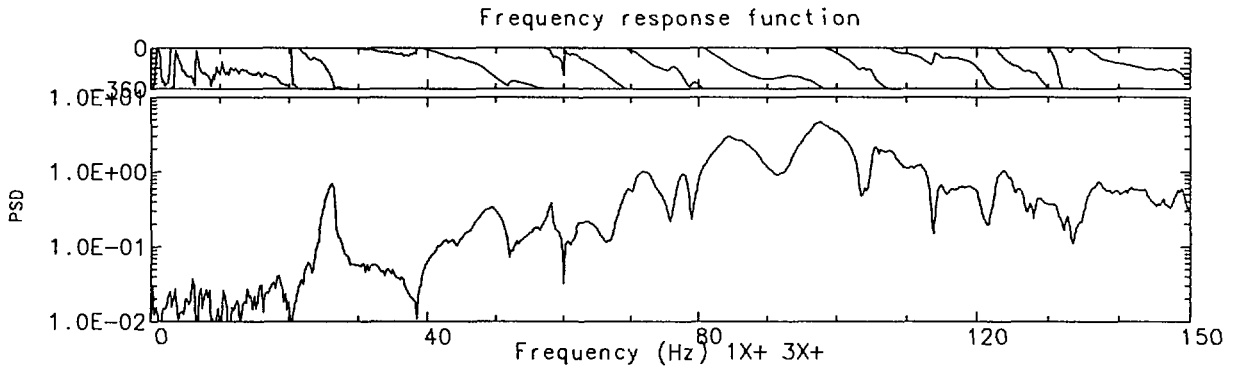
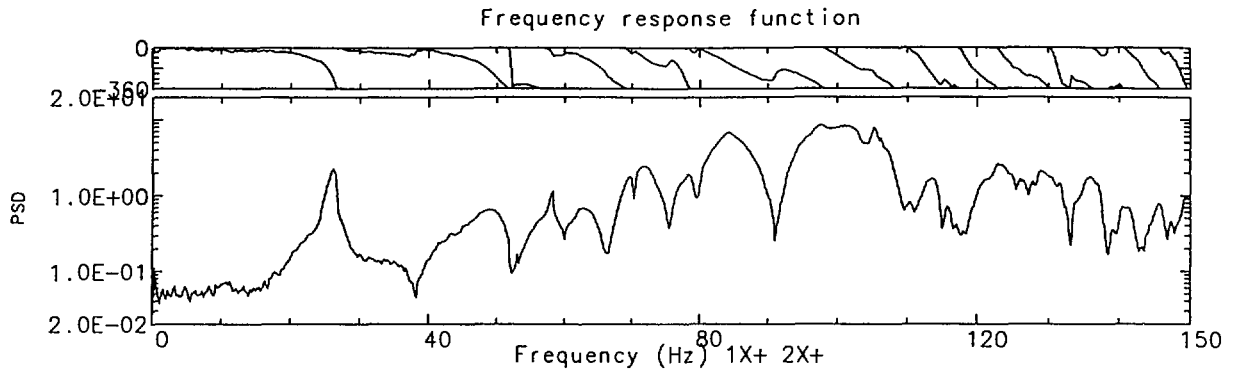


그림 3-23 공기중 18봉 핵연료집합체 구조물의 주파수 응답함수

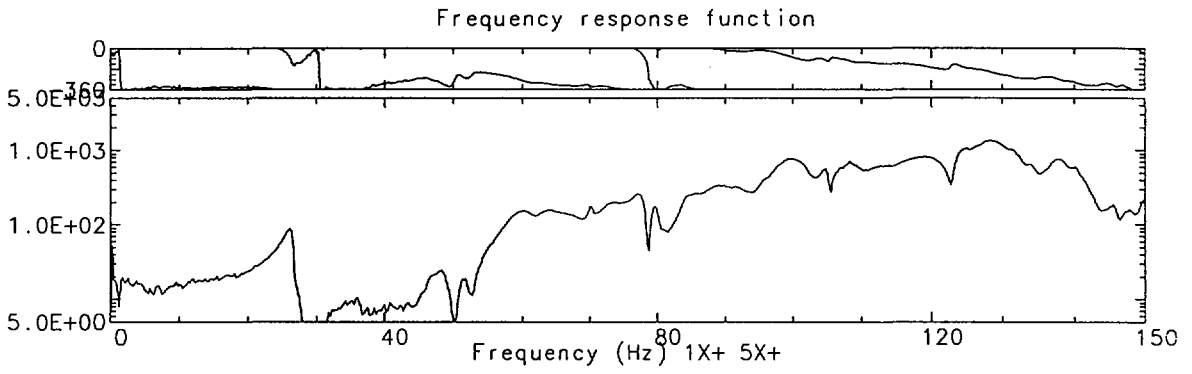
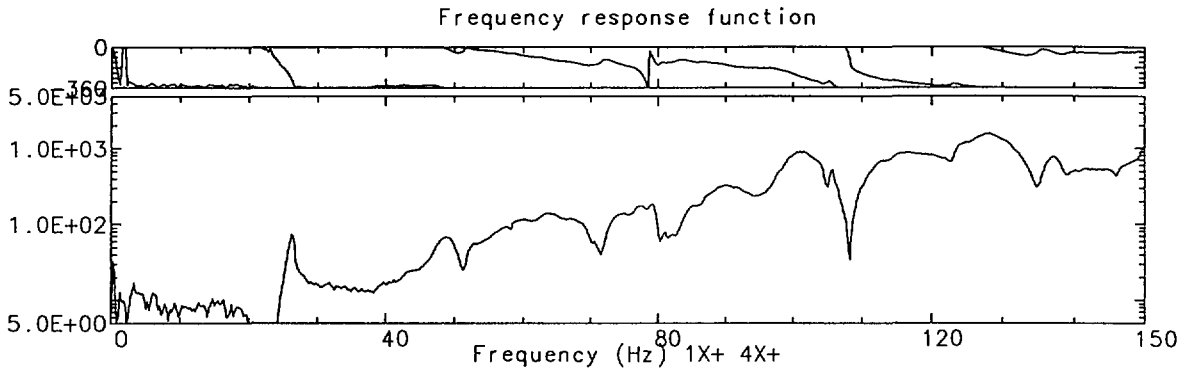


그림 3-24 공기중 18봉 핵연료집합체 구조물의 주파수 응답함수

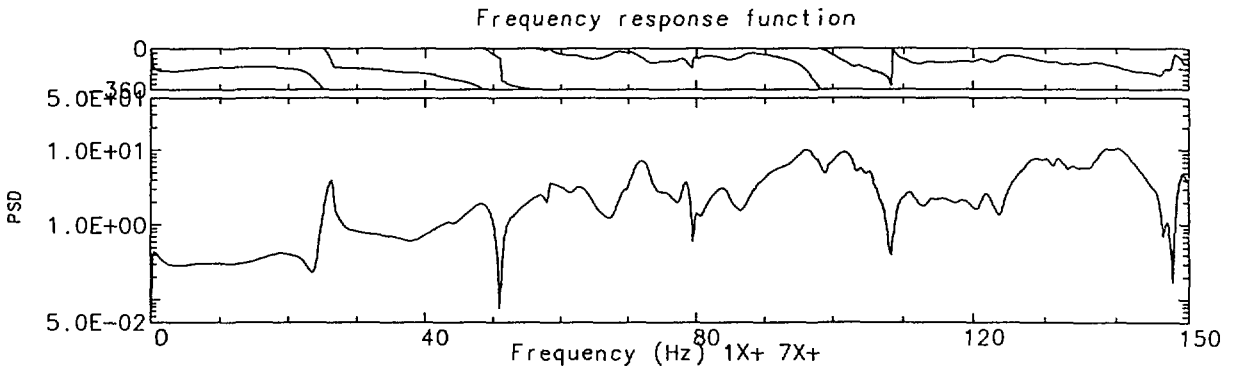
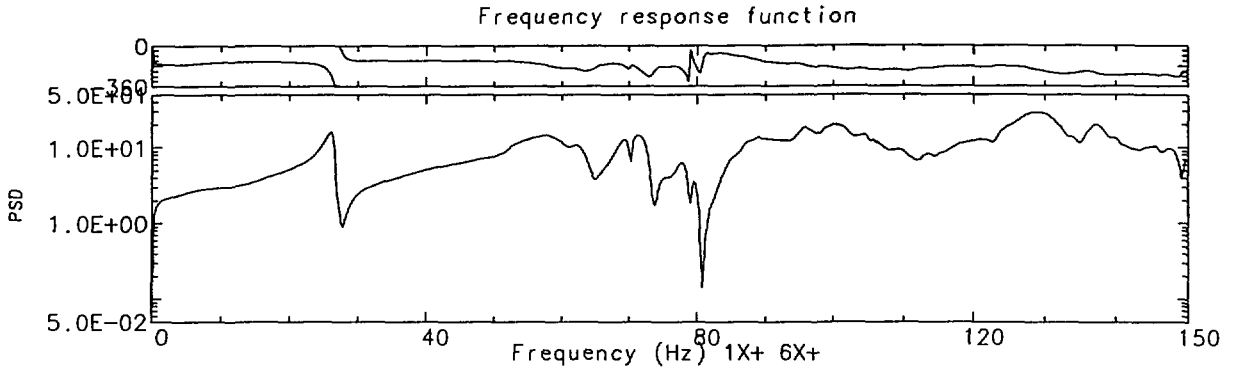


그림 3-25 공기중 18봉 핵연료집합체 구조물의 주파수  
응답함수

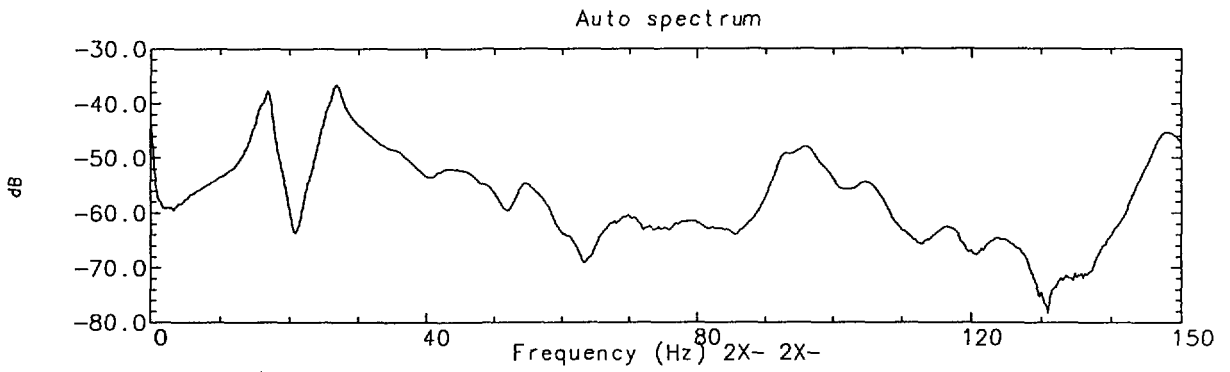
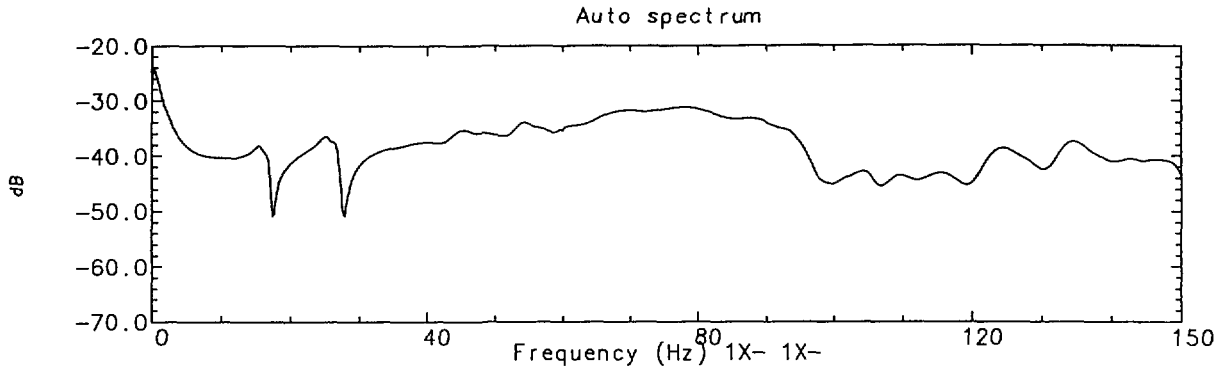


그림 3-26 수중 18봉 핵연료집합체 구조물의 Auto PSD  
(집합체 축가진)

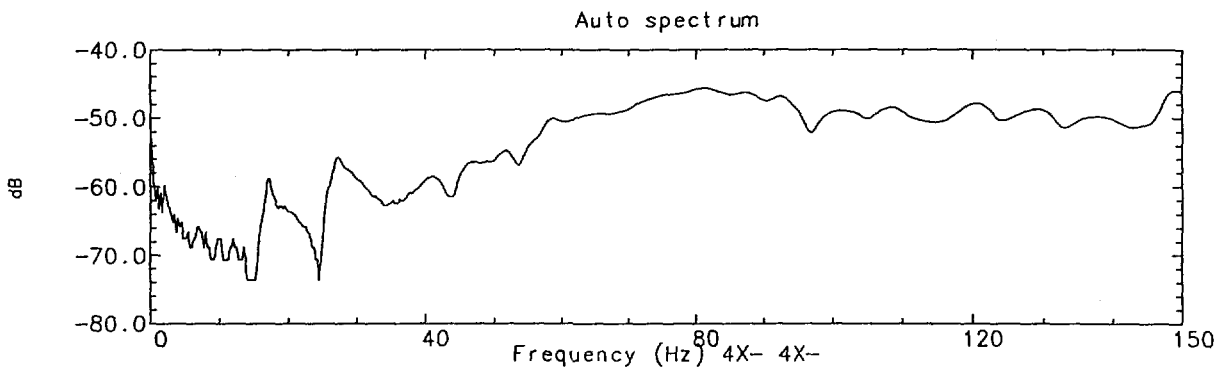
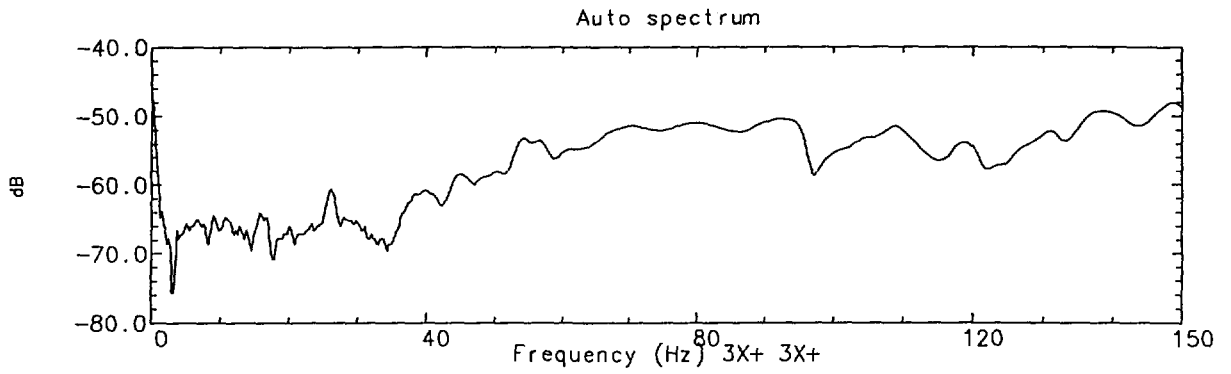


그림 3-27 수중 · 18봉 핵연료집합체 구조물의 Auto PSD  
(집합체 축가진)

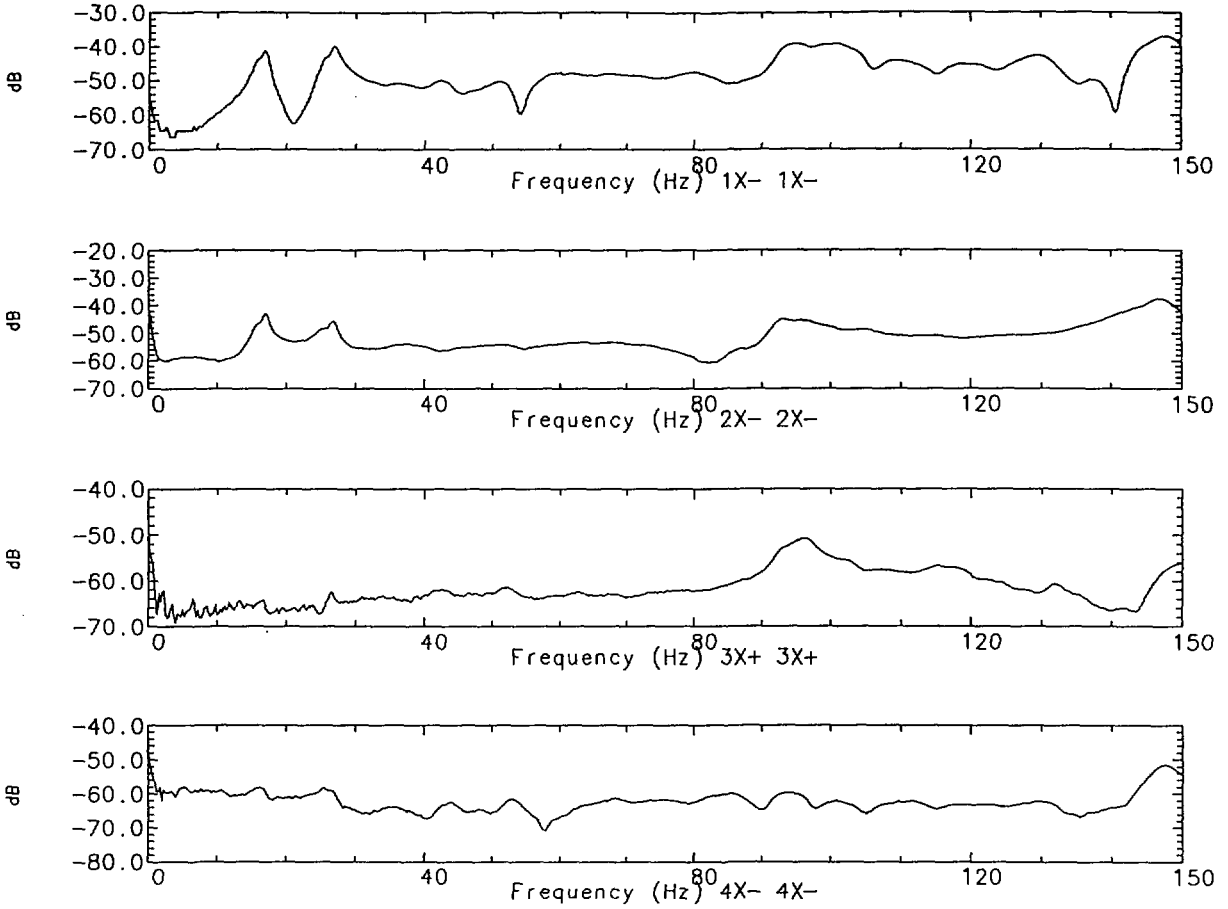


그림 3-28 수중 18봉 핵연료집합체 구조물의 Auto PSD  
(외부유동관 가진)

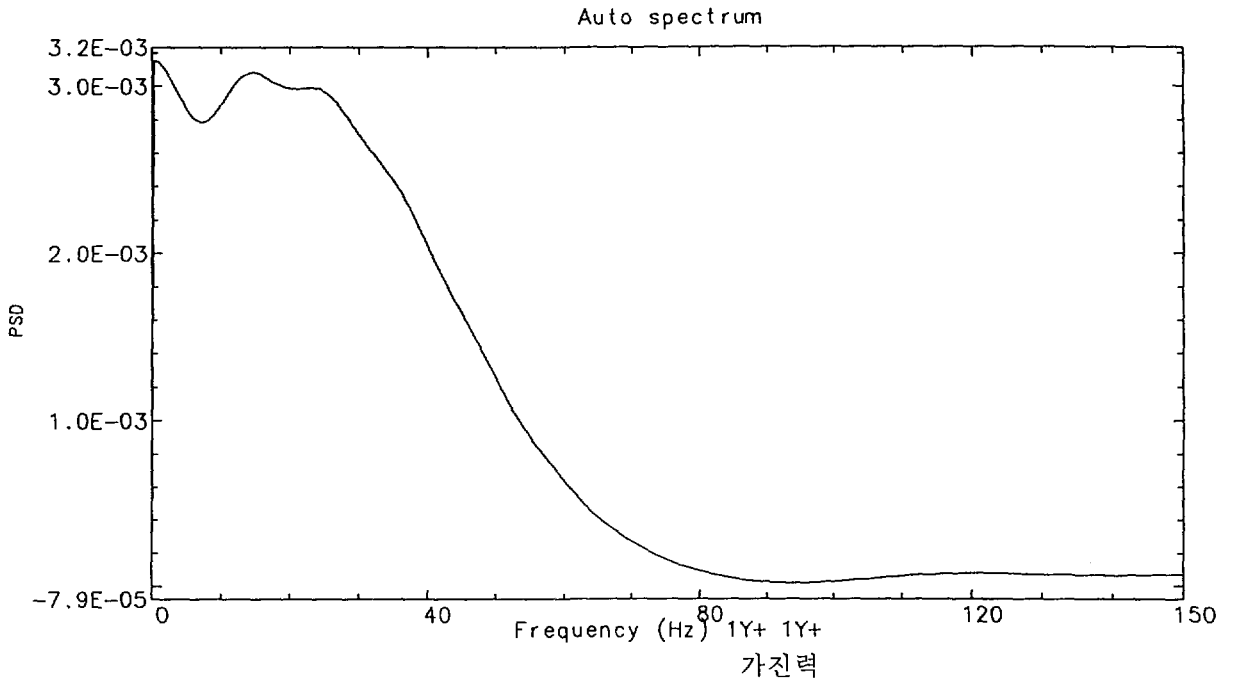


그림 3-29 공기중 36봉 핵연료집합체 구조물의 가진력  
Auto PSD

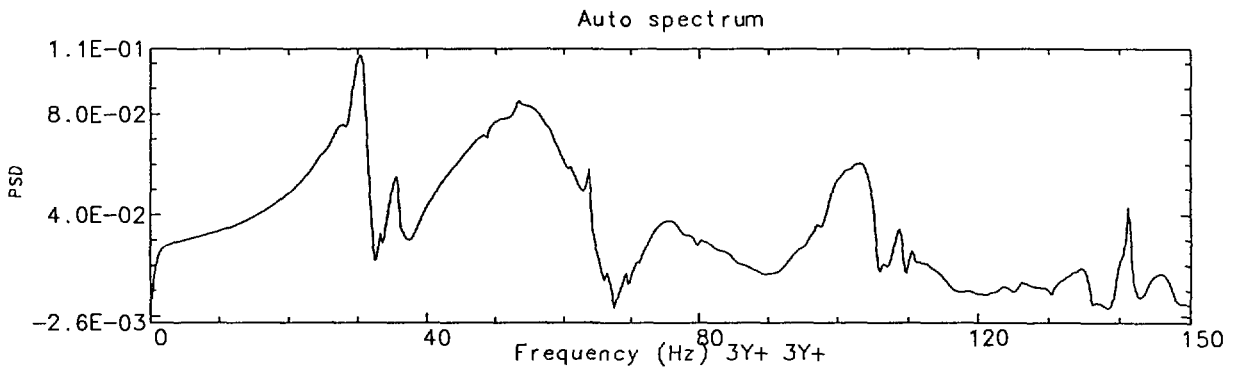
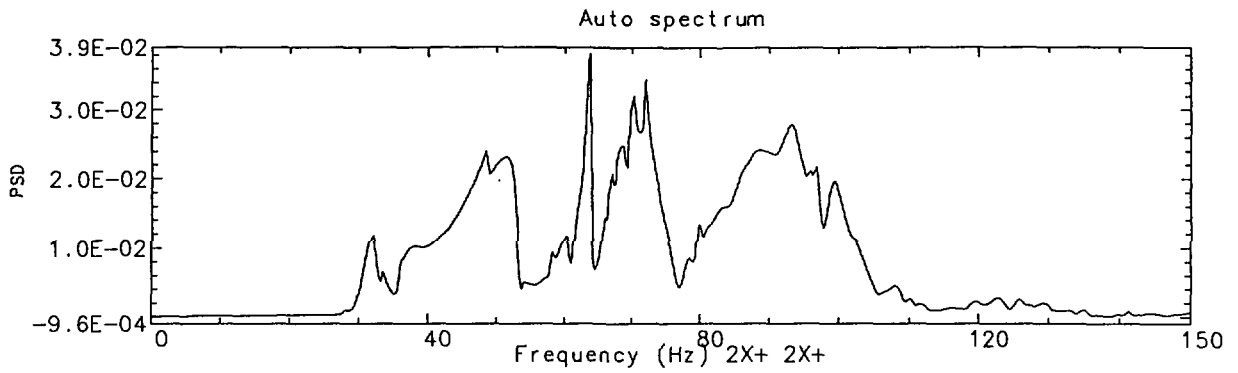


그림 3-30 공기중 36분 핵연료집합체 구조물의 Auto PSD



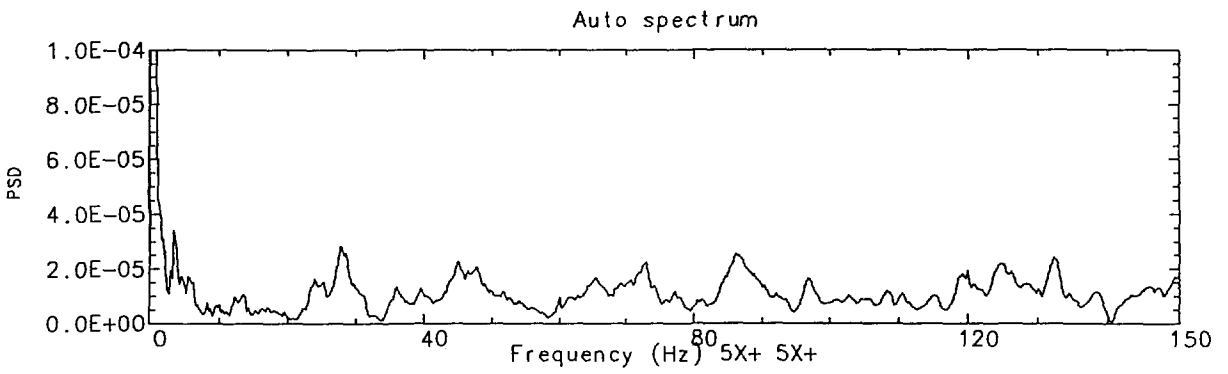
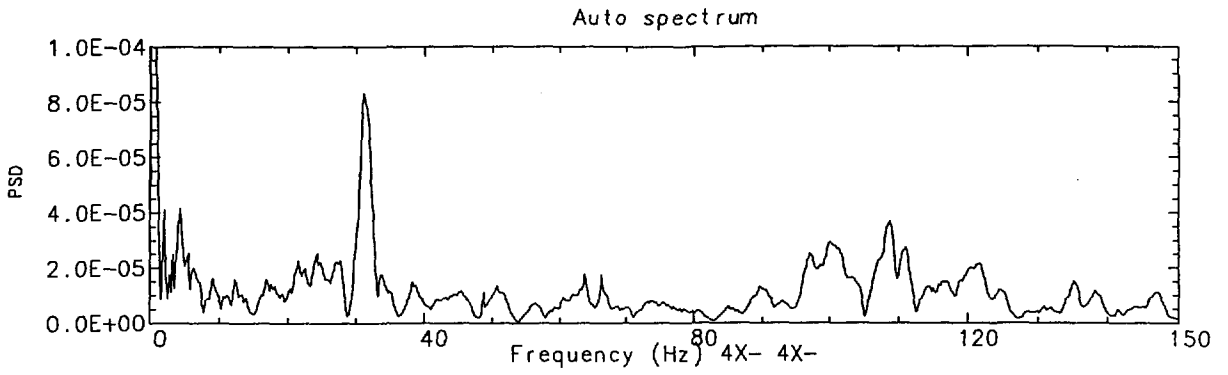


그림 3-31 공기중 36봉 핵연료집합체 구조물의 Auto PSD

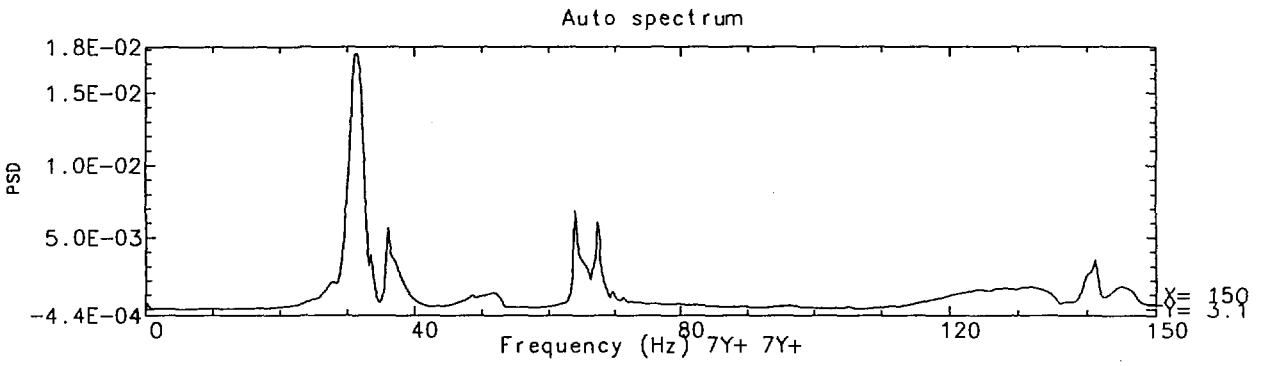
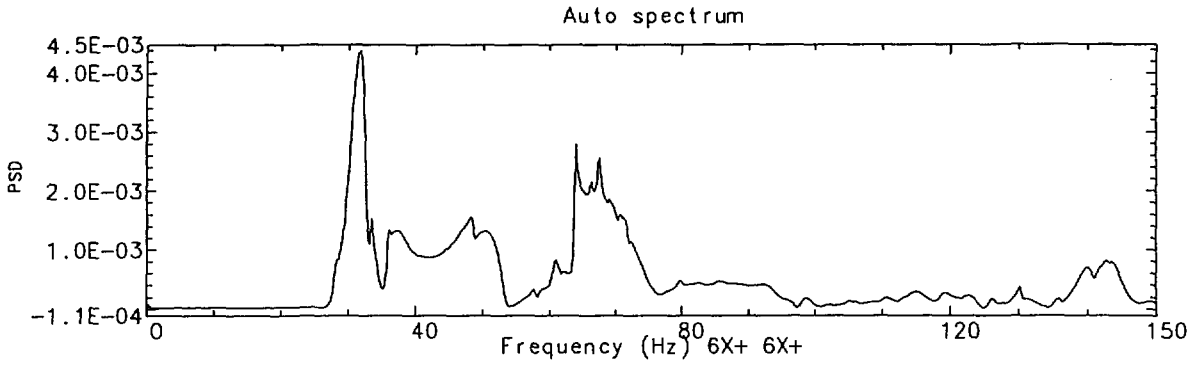


그림 3-32 공기중 36봉 핵연료집합체 구조물의 Auto PSD

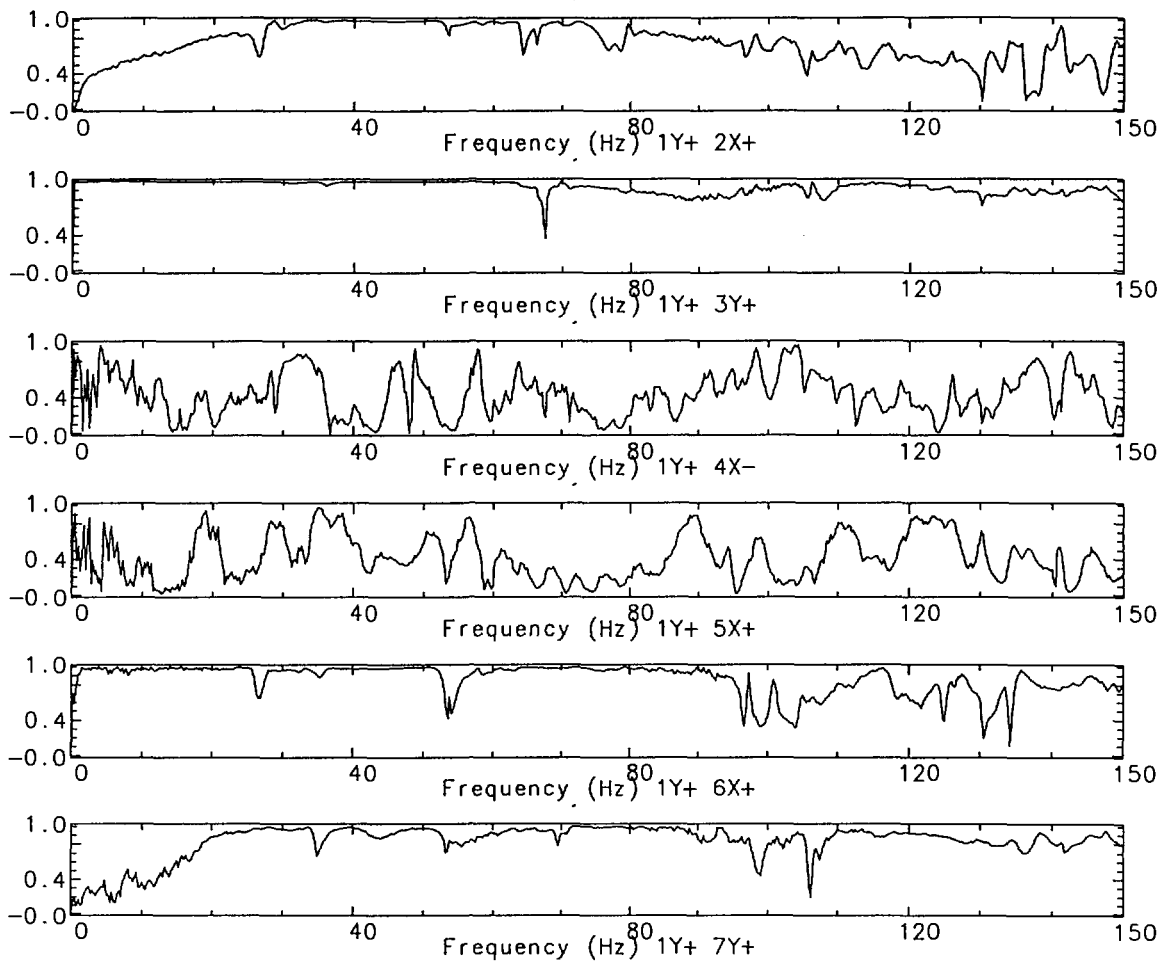


그림 3-33 공기중 36봉 핵연료집합체 구조물의 Coherence 함수

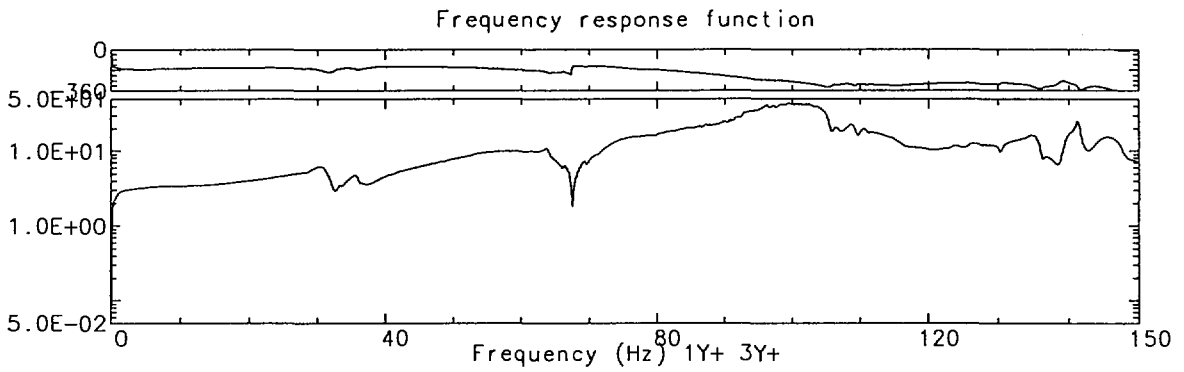
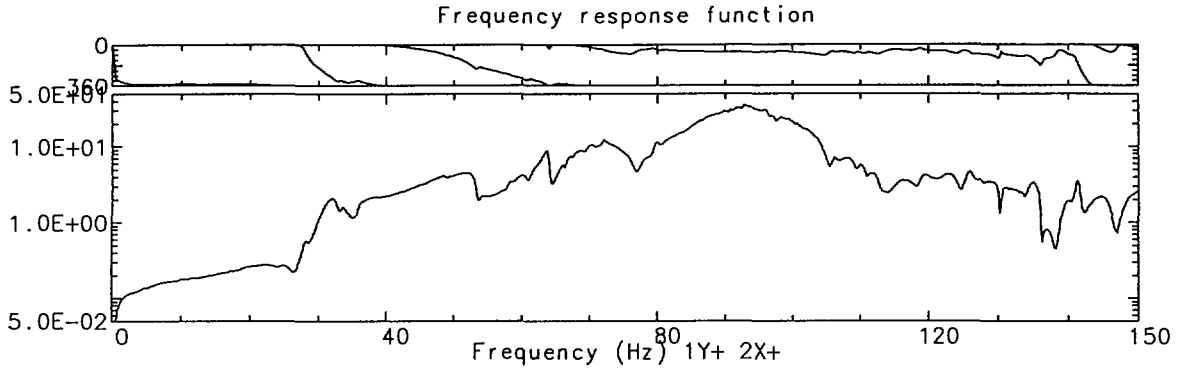


그림 3-34 공기중 36봉 핵연료집합체 구조물의 주파수 응답함수

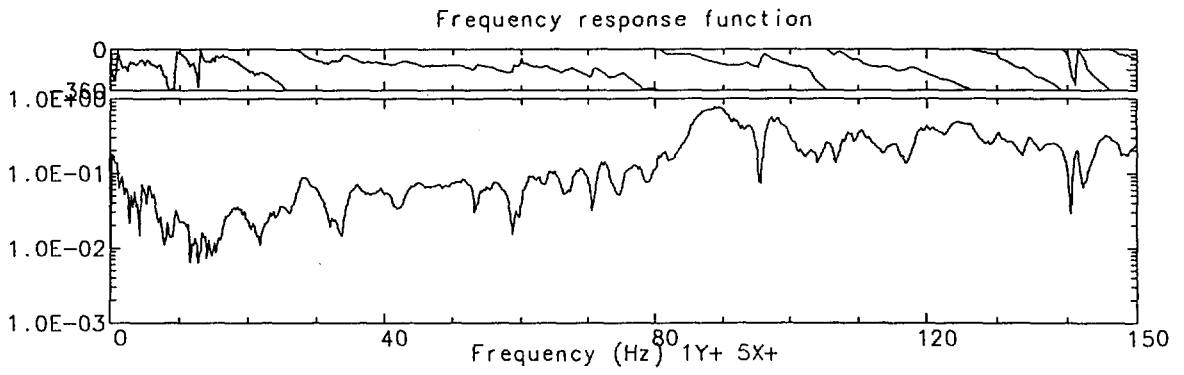
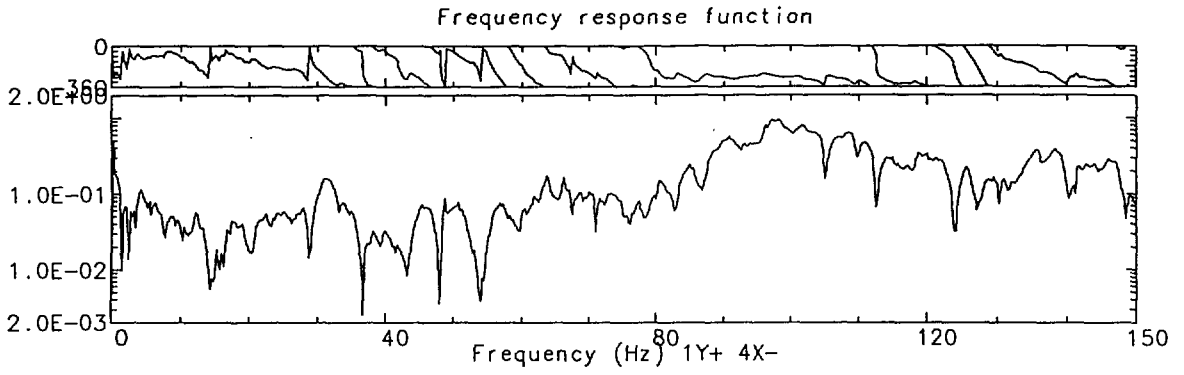


그림 3-35 공기중 36봉 핵연료집합체 구조물의 주파수  
응답함수

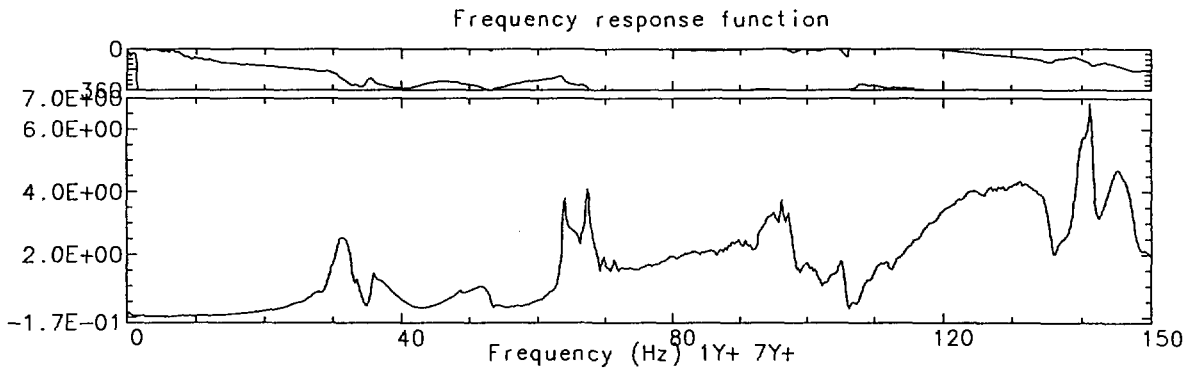
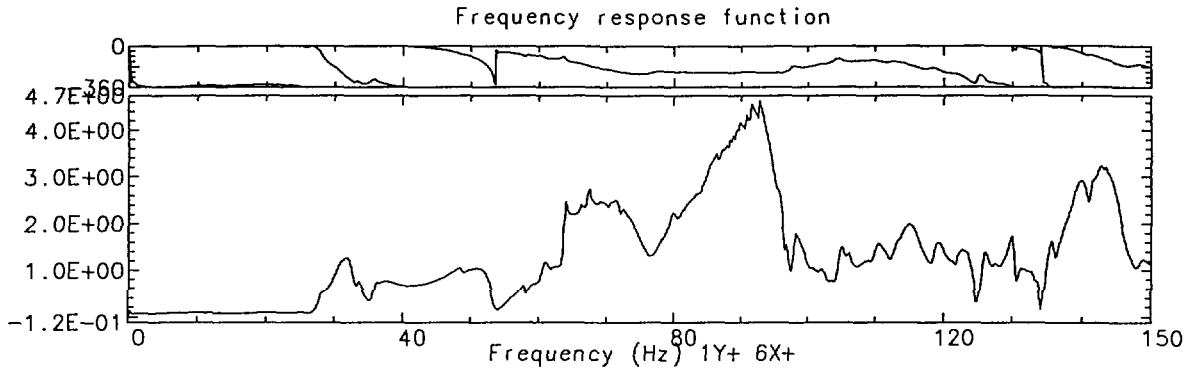


그림 3-36 공기중 36봉 핵연료집합체 구조물의 주파수 응답함수

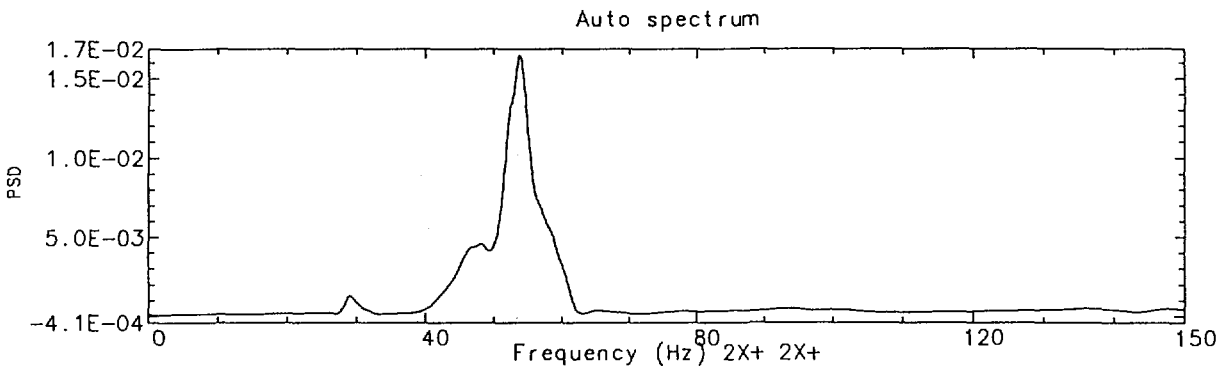
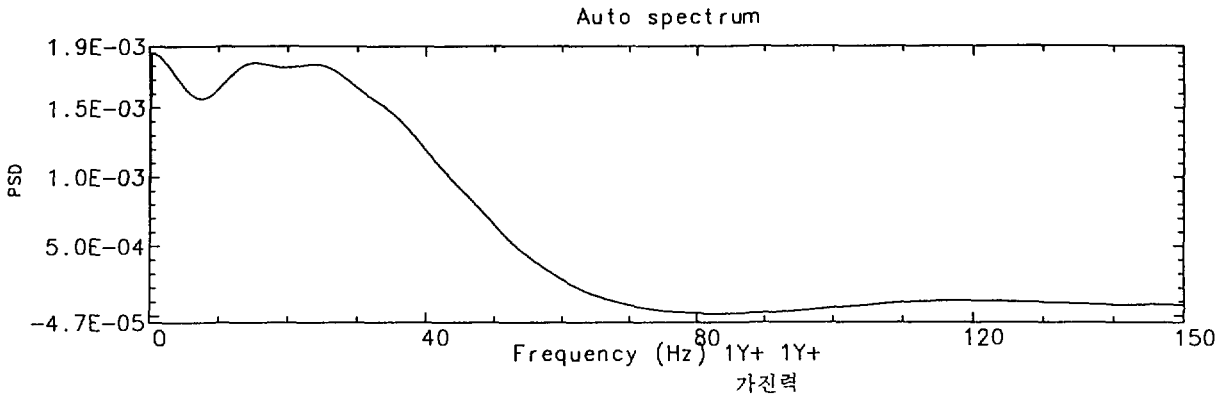


그림 3-37 수중 36봉 핵연료집합체 구조물의 Auto PSD

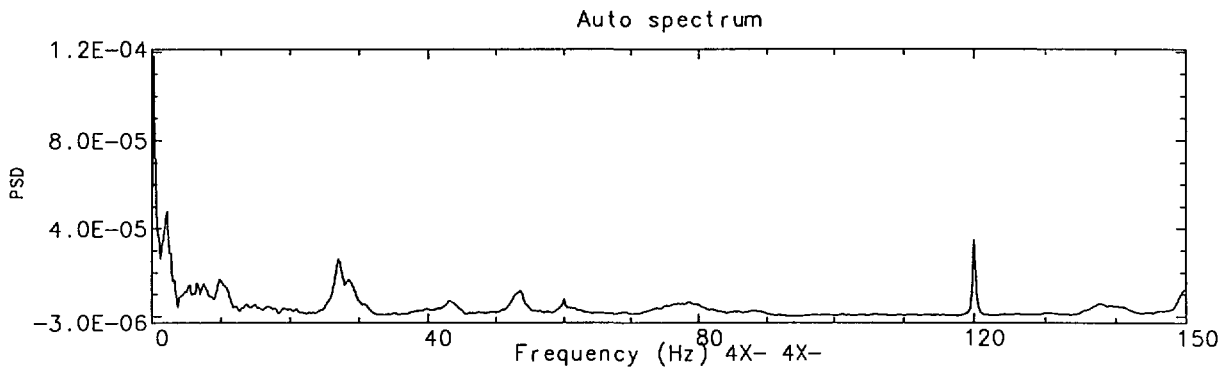
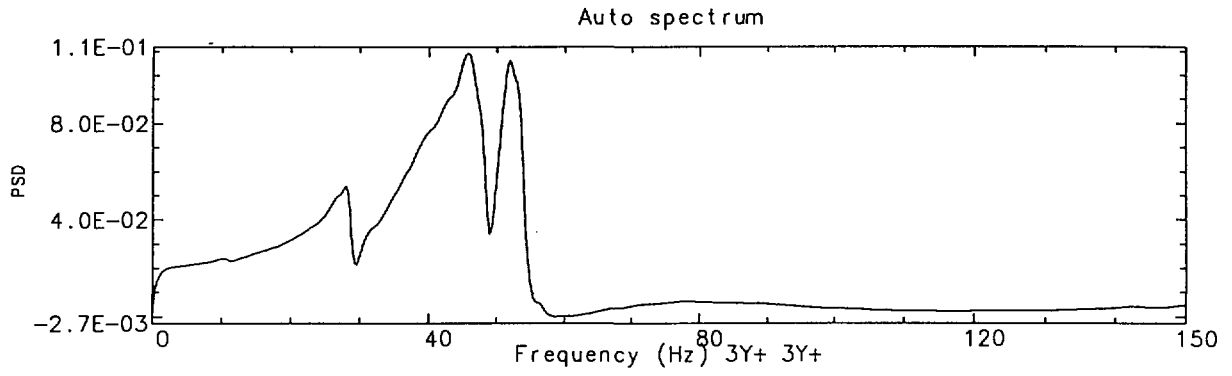


그림 3-38 수중 36봉 핵연료집합체 구조물의 Auto PSD



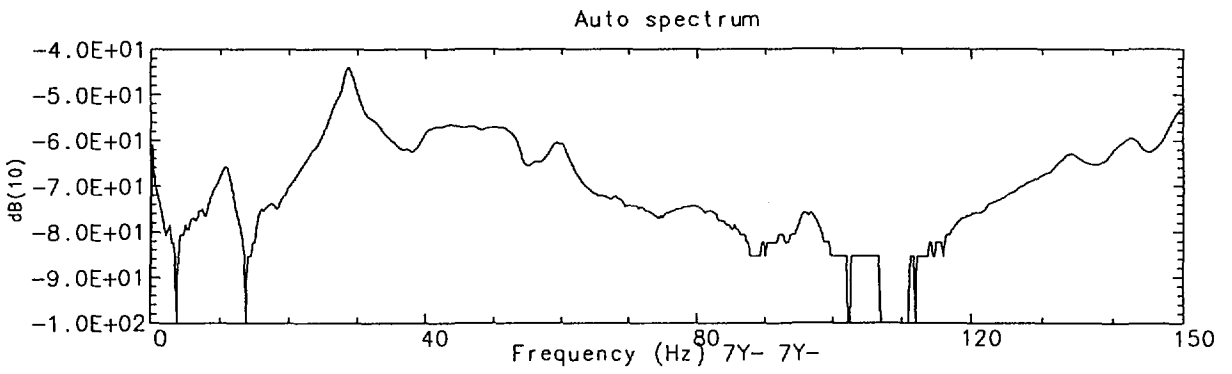
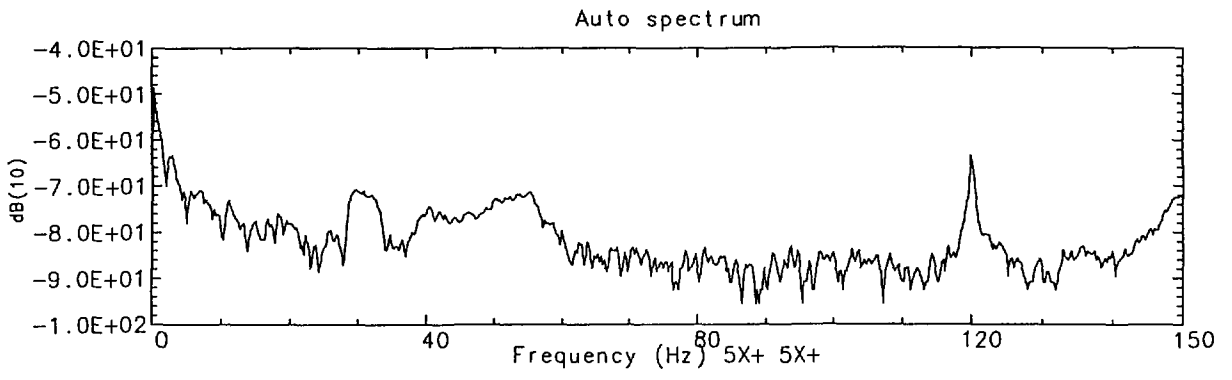


그림 3-39 수중 36봉 핵연료집합체 구조물의 Auto PSD

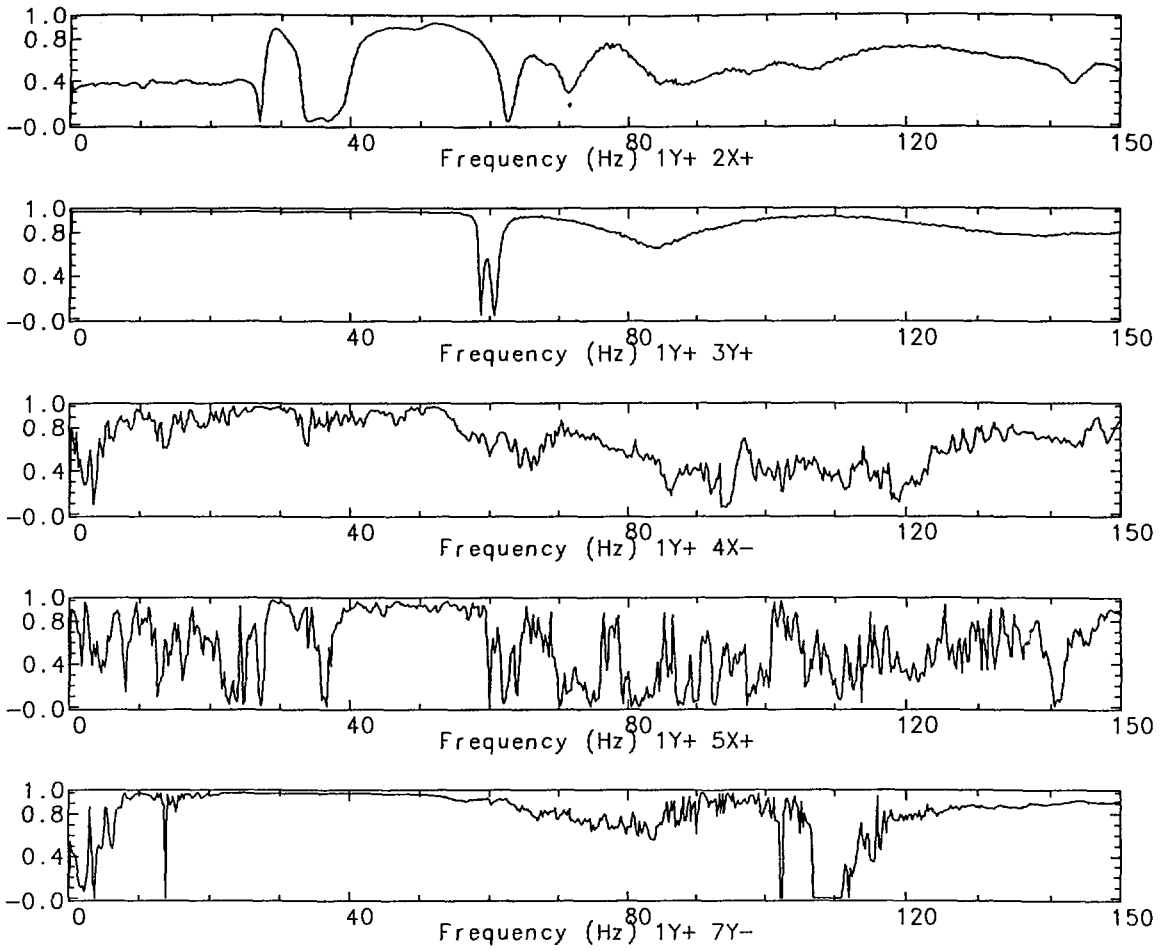


그림 3-40 수중 36봉 핵연료집합체 구조물의 Coherence 함수

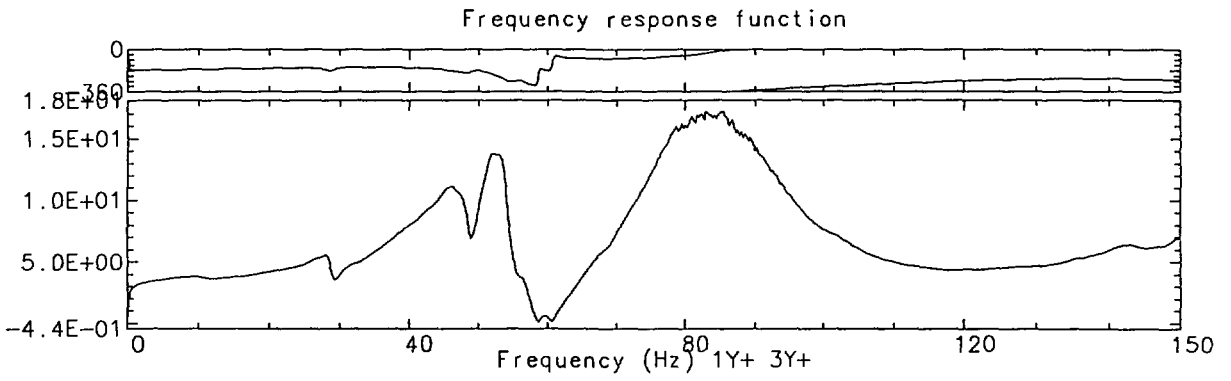
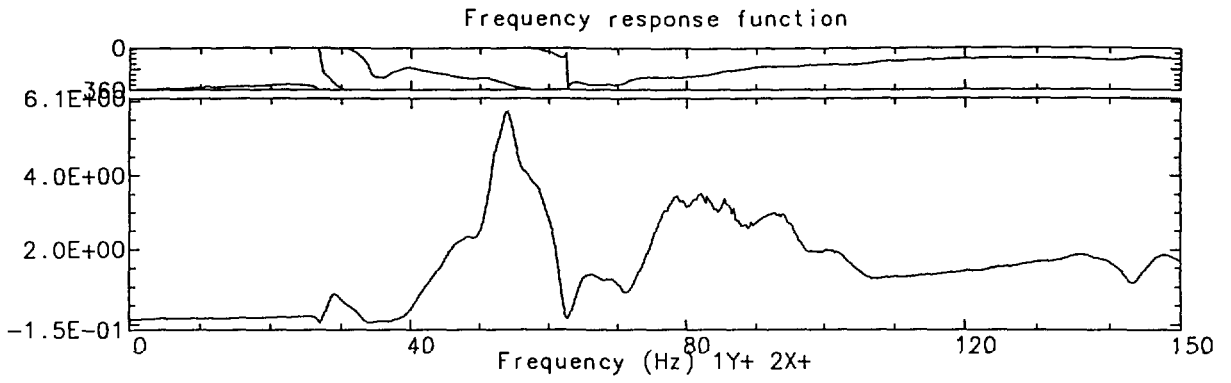


그림 3-41 수중 36봉 핵연료집합체 구조물의 주파수  
응답함수

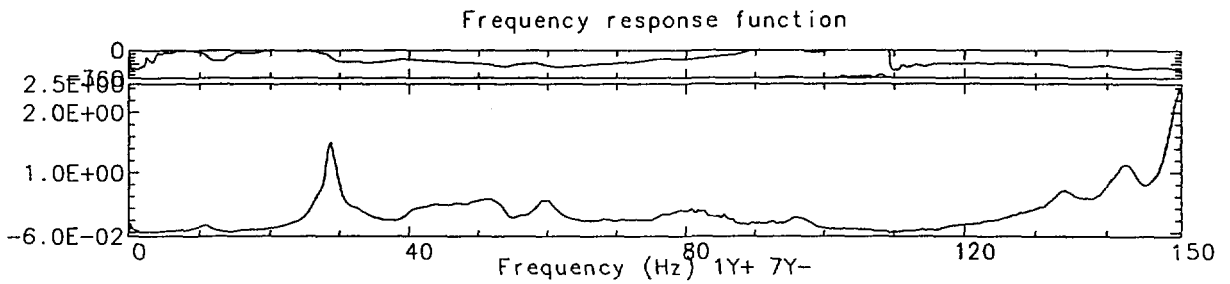
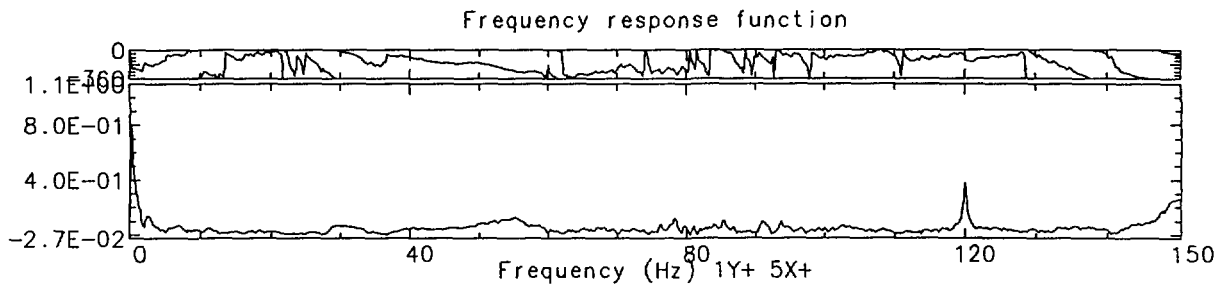
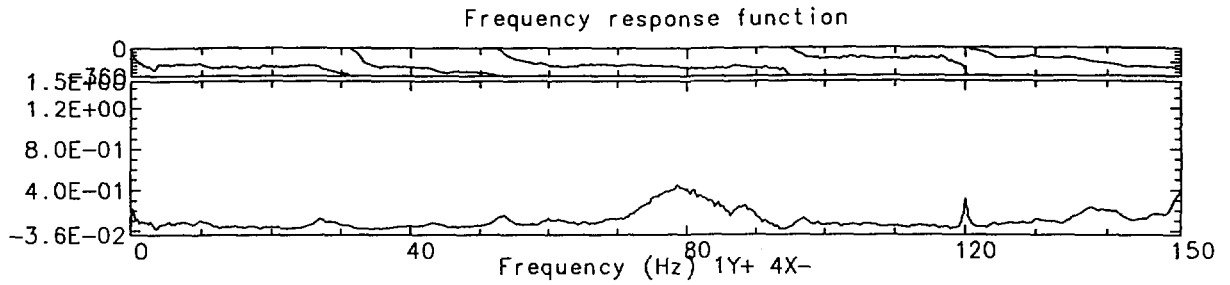


그림 3-42 수중 36봉 핵연료집합체 구조물의 주파수 응답함수

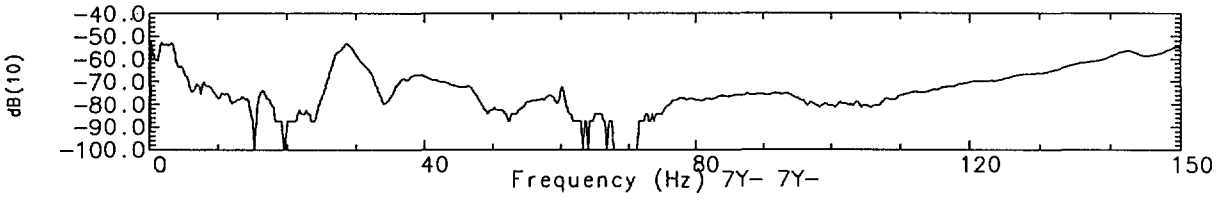
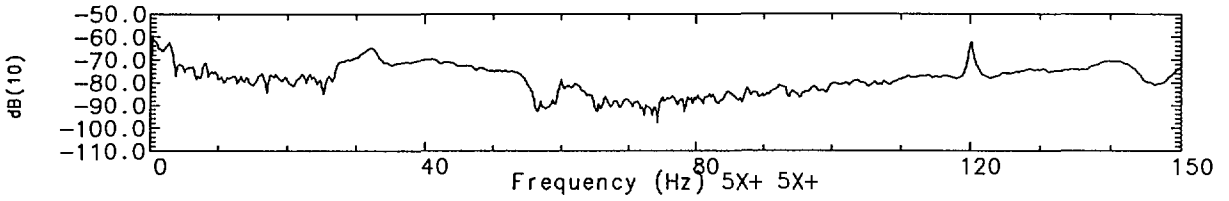
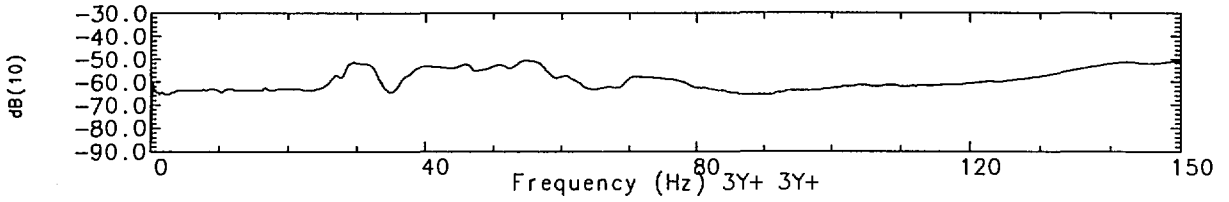
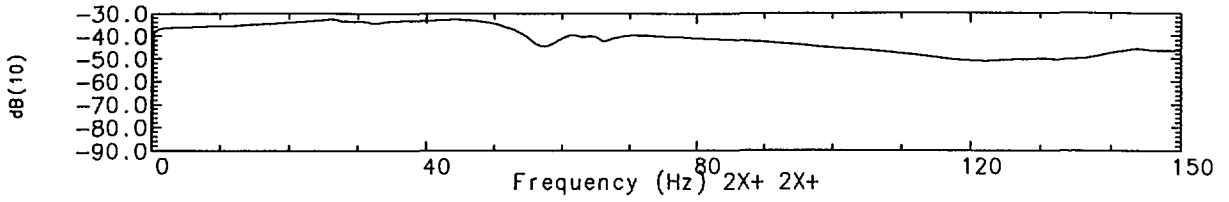


그림 3-43 수중 36봉 핵연료집합체 구조물의 Auto PSD  
(X 방향 가진시)

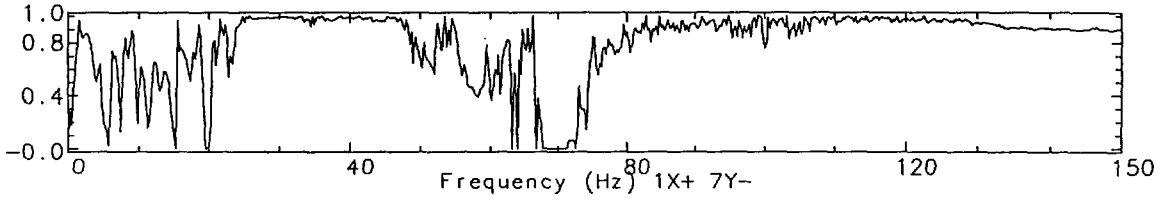
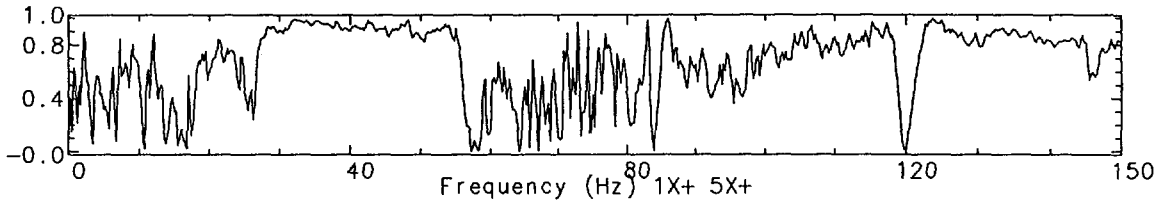
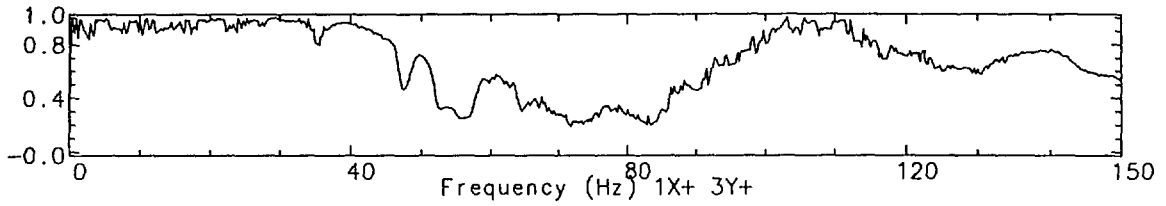
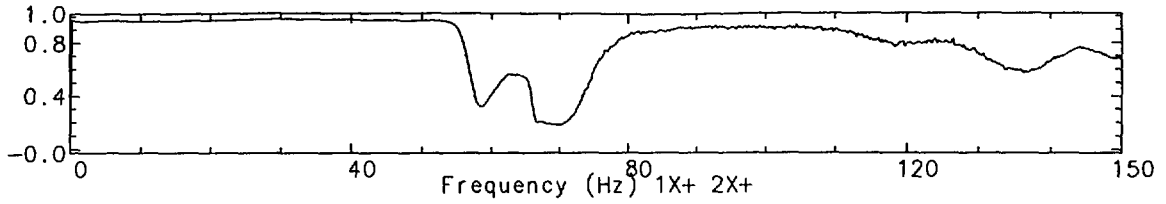


그림 3-44 수중 36봉 핵연료집합체 구조물의 Coherence 함수  
(X 방향 가진시)

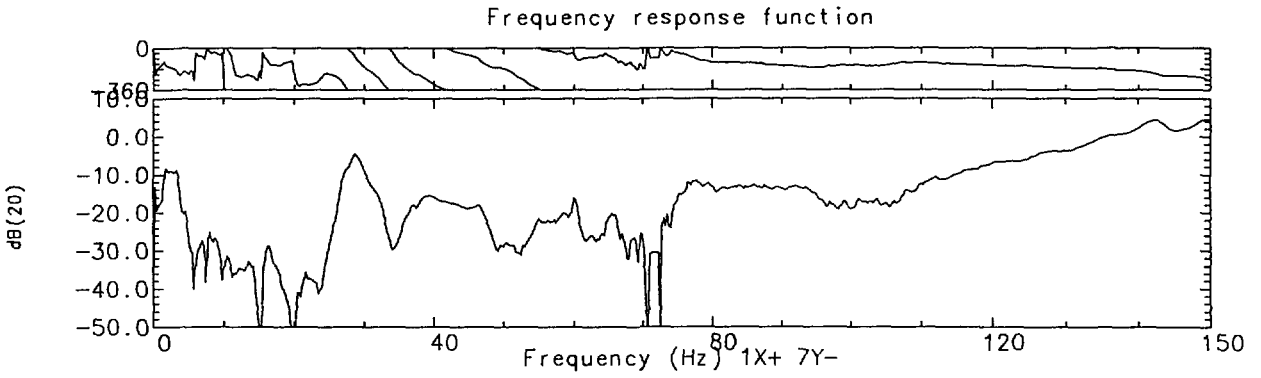
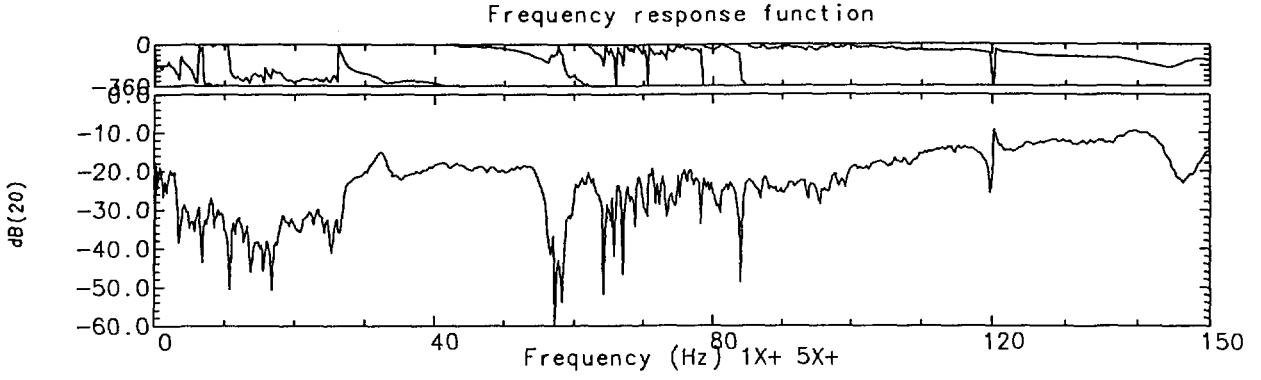


그림 3-45 수중 36봉 핵연료집합체 구조물의 주파수응답함수  
(X 방향 가진시)

## 제 4 장 결 론

연구용 원자로인 하나로 노심에 장착되는 핵연료집합체 구조물의 mock-up 모델(DU 핵연료집합체 및 유동관)을 제작하여 고유진동수 측정 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 18봉형 원형 유동관의 공기중 및 수중에서의 기본 고유진동수는 각각 54 Hz 및 26 Hz이다.

2) 36봉형 육각형 유동관의 공기중 및 수중에서의 기본 고유진동수는 각각 58.5 Hz 및 29 Hz이다.

3) 18봉형 핵연료집합체 구조물(핵연료집합체가 유동관속에 장착된 상태)의 경우 공기중 기본 고유진동수는 26 Hz, 수중 기본 고유진동수는 16 Hz이다.

4) 36봉형 핵연료집합체 구조물의 경우에는 공기중 기본 고유진동수는 28 Hz, 수중 기본 고유진동수는 11 Hz이다.



## 참고문헌

- 1] 류정수, DU Dummy Bundle for Natural Frequency Measurement, Technical Specification, HAN-RS-DD-SP-97-002(0), 하나로센터, 한국원자력연구소, 1997. 8.21.
- 2] 김태룡외 4인, "원자로 내부구조물 동특성 변화에 관한 연구," KAERI/RR-1267/93, 1993.
- 3] D. J. Ewins, Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd., 1984

## 서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/RR-1810197			
제목 / 부제	하나로 핵연료집합체의 고유진동수 측정		
연구책임자 및 부서명	박진호(미래원자력기술개발단 KALIMER 검증시험 Lab.)		
연구자 및 부서명	김태룡( ) 류정수(하나로센터 연구로계통관리실)		
출판지	발행기관	한국원자력연구소	발행년 1997
페이지 76 p.	도표	있음( O ), 없음( )	크기 26 Cm
참고사항			
비밀여부	공개( O ), 대외비( ), — 급비밀	보고서종류	연구보고서
연구위탁기관		계약 번호	522250-01
초록 (15-20줄내외)	<p>연구용 원자로인 하나로 노심에 장착되는 핵연료집합체를 실제 크기로 모사한 구조물에 대한 고유진동수 측정 시험을 수행하였다. 하나로 핵연료 집합체는 원형 18봉형과 육각형 36봉형으로 나누어지며 각각은 원형 및 육각형 shell 기둥 형태의 유동관 속에 장착된다. 시험은 공기중과 수중 상태에서 따로 수행되었으며 먼저 18봉형 핵연료집합체 및 원형 유동관의 시험을 수행하고 이어서 36봉형 핵연료집합체 및 육각형 유동관에 대하여 시험을 완료하였다.</p> <p>18봉형 원형 유동관의 경우 공기중에서의 기본 고유진동수가 54 Hz로 나타났으며, 수중에서는 부가질량효과로 인하여 26 Hz로 낮게 나타났다. 36봉형 육각형 유동관의 경우에는 공기중에서 58.5 Hz, 수중에서 29 Hz로 18봉형의 경우보다 조금씩 높게 나타났다. 18봉형 핵연료집합체 구조물(핵연료집합체가 유동관속에 장착된 상태)의 경우에는 공기중에서 26 Hz, 수중에서 약 16 Hz로 평가되었다. 그리고 36봉형 핵연료집합체 구조물에서는 공기중에서 약 28 Hz, 수중에서는 11 Hz로 나타났다.</p>		
주제명키워드 (10단어내외)	하나로, 유동관, 핵연료집합체, 진동 모드, 공기중 고유진동수, 수중 고유진동수		

## BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-1810/97			
Title / Subtitle	Measurements of the Natural Frequencies for the HANARO Fuel Assembly		
Project Manager and Department	Jinho Park(KALIMER Lab., Advanced Nuclear Technology Development)		
Researcher and Department	Tae-Ryong Kim( " ) Jeong-Soo Ryu(Research Reactor System Management, HANARO Center)		
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI
Page	76 p.	Ill. & Tab.	Yes( O ), No ( )
Publication Date			1997
Size			26 Cm
Note			
Classified	Open( O ), Restricted( ), ___ Class Document	Report Type	Research Report
Sponsoring Org.		Contract No.	522250-01
Abstract (15-20 Lines)	<p>Measurements of the natural frequencies for the fuel assembly mock-up of HANARO reactor, which is a research reactor operating in KAERI, was implemented. There are two types of the fuel assembly model, one is 18-element fuel bundle assembly and the other is 36-element one. They were locked inside the shell type flow tubes, respectively. The flow tube(Round Flow Tube) corresponding to the 18-element fuel assembly mock-up has a form of cylindrical shell and the tube(Hexagonal Flow Tube) to the 36-element fuel assembly model does hexagonal shell.</p> <p>The in-air fundamental natural frequency of the Round Flow Tube was turned out to be 54 Hz and the in-water one 26 Hz. The in-air fundamental natural frequency of the Hexagonal Flow Tube resulted as 58.5 Hz and the in-water one was reduced to 29 Hz due to the added mass effect. Also the in-air fundamental natural frequency of the 18-element fuel assembly structure(fuel assembly and round flow tube) was found to be 26 Hz and the in-water one 16 Hz. Finally the in-air frequency of the 36-element fuel assembly one(fuel assembly and hexagonal flow tube) was estimated as 28 Hz, and in-water one 11 Hz.</p>		
Subject Keywords (About 10 words)	HANARO, Fuel Assembly, Flow Tube, Vibration Mode, In-air Natural Frequencies, In-water Natural Frequencies		