

'96춘계 학술발표회논문집  
한국원자력학회

常時微動을 이용한 터빈기초 구조물의 건전성 평가

서용표, 전규식, 이종립  
한국전력 전력연구원

요 약

모든 물체는 물체를 구성하는 재료의 성질과 구조의 형식에 따라 각각의 고유주기를 갖고 있으며, 구조물을 구성하는 재료는 시간의 경과와 더불어 경년열화 과정을 거치므로 구조물의 고유주기는 조금씩 길어지는 경향을 갖는다. 그러므로 구조물의 건설 당시에 동적특성을 파악해 놓았다면 구조물에 문제가 발생했을 시의 동적특성을 측정하여 구조물의 손상 여부를 판단하는 중요한 열쇠가 된다. 본 연구는 자연적으로 발생하는 진동 또는 인간이 사회생활을 영위하면서 항상 발생하고 있는 지반의 미소한 외력인 상시미동을 이용하여 구조물의 동적특성을 측정하고 구조해석을 통한 해석결과와 비교 분석하여 구조물의 진동특성을 파악하는 편리한 도구로써 상시미동이라는 진동측정방법의 실용성을 확인하였으며, 고유진동수의 변화추이는 구조물의 건전성을 평가하는 새로운 지표가 될 수 있음을 제안하였다.

1. 서 론

최근에 발생한 성수대교 및 삼풍백화점 붕괴사고와 같은 대형사고로 인하여 구조물의 안전에 대한 국민적인 관심이 고조되고 있으나, 현재 사용하고 있는 기존 구조물의 안전성을 평가하는 방법이란 외관상 나타난 콘크리트의 균열 또는 강도를 점검하고 철근의 배근상태 및 철골의 용접부위를 확인하는 방법이 가장 일반적이다. 그러나 대부분의 구조물은 이를 지탱하는 주부재가 마감재로 처리되어 있거나 통상적인 방법으로는 인간의 접근이 불가능한 장소가 대부분인 관계로 주부재의 균열을 외관상 확인하기가 어려운 경우가 많으므로, 외관상만의 안전 점검은 형식적으로 수행될 위험성이 있으며 기술적으로도 불가능한 경우가 많다. 그러므로 이러한 외관조사만의 미비점을 보완할 수 있는 새로운 방법의 시도가 구조물의 진동특성을 이용한 구조물의 건전성 평가방법이다. 우리들이 직감적으로 느낄 수 있는 구조물의 진동이란 바람이나 지진과 같은 자연적인 외력과 가력장치를 사용한 인위적인 외력에 의해 움직임을 생각하여, 구조물의 진동특성을 파악하기 위해서 지진감시설비를 구조물에 설치하고 지진을 기다리는 방법, 또는 가진기나 충격장치를 사용하여 구조물에 인위적인 외력을 가하면서 진동을 측정하는 방법을 일반적으로 사용한다. 그러나 지진감시설비를 갖추고 지진을 기다리는 방법은 지진의 발생빈도가 적은 우리나라의 실정으로는 적합하지 않으며, 대형구조물이나 剛性이 강한 구조물을 가력하기 위하여 거대한 가진기를 사용하는 방법은 사용빈도면에서 볼 때 경제적이기 못하다. 그러므로 본 연구는 자연적인 지반의 운동에 의해 미소하게 움직이고 있는 구조물의 진동을 고감도의 계측기를 사용하여 포착하고 이를 수천배 또는 수만배로 증폭하여 구조물의 진동특성을 도출하는 常時微動에 의한 진동측정방법을 사용하였다. 물론 精度면에서는 가진기를 사용한 가력방법이나 지진관측에 의한 방법보다 떨어지나, 지진관측과 같은 큰 진동의 측정시에는 일반적 잡음으로 처리되는 미미한 진동을 신호처리기술을 사용하여 만족할 만한 精度를 얻을 수 있으며, 측정장소 및 측정시간에 구애 받지 않는 실용성과 가력장치가 필요없다는 경제성이 주된 장점이다.

## 2. 진동계측실험

상시미동을 이용한 토목/건축구조물의 진동측정에 사용되는 진동계측기는 구조물의 진동특성상 저주파수용 고감도 계측센서가 필요하다. 그러나 우리나라에는 아직까지 이러한 목적에 적합한 진동센서는 일반화 되어 있지 않아 전력연구원에서 보유하고 있는 고주파수진동에 적합한 B&K사의 압전형가속도계(Type 4370)을 사용하였으며, 계측결과를 분석하는 과정에서 고주파수성분을 소거하는 방법으로 센서의 문제점을 해결하였다. 그리고 압전형센서에서 계측된 미소한 전위신호를 전압으로 증폭시키는 Charge형 Amplifier를 사용하였으며, 증폭기를 통과한 아날로그 신호를 디지털 신호로 변화하는 기록장치는 横河社에서 제작한 다채널 FFT분석기인 AR1600을 사용하였다. 본 터빈발전기 기초구조물과 같이 형상이 복잡한 구조물의 경우에는 여러 위치를 동시에 계측하여 각 측정점을 서로 비교하여 진동모드에 의한 진동형상을 분석하는 것이 가장 좋은 방법이나 본 연구에서는 실험의 편의상 두 채널만을 사용하였다. 원자력발전소의 터빈구조물과 같은 장방향 구조물은 각 방향의 기본모드 이외에도 단방향(Transverse)으로의 회전모드가 低次진동모드로 발생하는 것이 일반적이므로 구조물의 길이방향으로 다수의 센서를 배치하는 것이 이상적이다. 그러나 본 실험에서는 준비한 두 개의 진동센서만으로 여러점을 동시에 측정할 수 없는 제약은 있었으나 단방향과 장방향의 기본진동수를 측정할 목적으로 그림-1과 같이 양단부에 장방향으로 센서를 배치한 실험-1과 회전모드를 조사할 목적으로 단방향으로 두 채널을 배치한 실험-2를 수행하였다.

## 3. 진동계측 결과 분석

### 3.1 장방향 진동특성

다음절에서 고찰할 단방향 진동성분과는 달리 장방향 진동성분은 기본모드만이 탁월할 것으로 판단하고 평면상 양단부의 중앙점에 두 개의 센서를 마주보게하고 실험-1의 계측을 실시하였다. 그림-2는 장방향으로 계측한 파형을 구조물의 기본진동수로 판단되는 진동수영역(2.0Hz ~ 6.0Hz)에 대하여 대역필터로 처리한 파형을, 그림-3은 처리된 파형의 푸리에 진폭스펙트럼을 나타낸다. 양단부의 위치에서 계측된 스펙트럼의 형상을 살펴보면, 부분적으로 상이한 면이 있으나 3.7Hz에서 현저히 큰 진폭을 갖고 있으므로 장방향 성분의 탁월주파수는 3.7Hz라고 판단된다. 또한 그림-2의 파형을 살펴보면 두 위치에서 계측 파형의 위상각이  $180^\circ$  상이하나, 이는 센서의 배치가 서로 마주봄으로서 일어나는 위상각의 변화이므로 실제 구조물의 움직임은 동일한 위상임을 알 수 있다.

### 3.2 단방향 진동특성

전절에서는 장방향 성분에 대한 계측 결과를 살펴보았으나 본 터빈구조물과 같이 한번의 길이가 다른 한번에 비해 상당히 긴 장방향 구조물에서는 어떤 시각에 있어서 양쪽면에서의 움직임이 동일한 방향으로 움직이는 병진모드와  $180^\circ$ 의 위상차를 갖는 회전모드가 있을 수 있다. 그러므로 그림-4와 같이 양단부의 스펙트럼에서 구조물의 고유진동수에 해당하는 10.0Hz미만의 저진동수 영역을 살펴보면, 기둥의 중간 위치에 슬래브가 존재하여 강성이 강한 해안측 단부에서의 스펙트럼(CH.02)은 5.9Hz 부근에서 탁월진동수를 나타내고 있는 반면에, 상대적으로 강성이 약한 내륙측 단부에서는 5.9Hz 이외에도 4.0Hz 부근에서 탁월진동수를 나타내고 있다. 즉, 낮은 탁월진동수(4.0Hz)는 강성이 강한 단부에서의 변위가 적은 병진모드에 해당하며, 높은 탁월진동수는 구조물의 상부에서 본 평면상의 회전모드에 해당하는 것으로 판단된다. 그러나 진폭의 절대값을 나타내는 진폭스펙트럼으로는 두 위치에서의 위상차에 대한 정보는 알 수 없

으므로 위상각의 차이를 표현하기 위하여 회전모드로 판단된 진동수영역에 대하여 대역필터로 처리한 파형을 그림-5에 나타내었다. 그림-5에서 알 수 있는 것처럼 두파형의 위상이 완전히 반전되어 있지는 않으나, 한쪽 파형의 진폭이 +의 위치에 있을 때 다른 쪽의 파형은 -의 위치에 있다. 진폭의 방향이 +또는 -라는 의미는 절대좌표를 기준으로 말하는 것이 아니라, 어떤 기준점을 중심으로 운동의 방향이 서로 반대가 되는 것을 의미한다. 그러므로 구조물의 양단에서 운동의 방향이 서로 반대가 된다는 것은 회전모드를 나타내나, 두 위상각의 차이가 완전한  $180^\circ$ 가 아닌 것은 본 구조물이 평면적으로 완전한 대칭이 아니기 때문에 발생하는 현상이며, 수치해석에서도 동일한 결과를 보여준다.

#### 4. 수치해석

모든 물체는 물체가 갖고 있는 질량과 강성에 따라 고유한 진동수 및 진동형상을 갖고 있으며, 동일한 질량이라도 강성이 강한 물체가 빠르게 흔들리는 사실은 자연계에 살고 있는 우리의 직감으로 알 수 있는 현상이다. 그러나 물체의 형상이 복잡하면 할수록 우리의 직감으로 파악하기는 어려움으로, 물체의 질량행열과 강성행열에 의해 결정되는 고유진동수 및 진동형상을 수학적으로 계산하는 과정이 고유치 해석이다. 본 터빈구조물의 수치해석을 위하여 전력연구원에서 보유하고 있는 3차원 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 해석에 적용된 콘크리트의 물성치는 표-1과 같다. 그리고 계산된 고유 진동수를 표-2에 나타내며, 각 고유진동수에 해당하는 고유모드의 4차성분까지를 그림-6에 나타내었다. 그림-6.(a)는 기본진동모드인 장방향 병진모드를 나타내고 있으며 그림-6.(b)는 두 번째 진동모드인 단방향 병진모드를 나타낸다. 구조물의 형상에서 판단할 때, 여섯 개의 기둥이 강성으로 작용하는 장방향의 강성에 비해, 두 개의 기둥이 강성으로 작용하는 단방향의 전체강성이 강한 것처럼 느껴지기 쉬우나 실제의 계산에서는 장방향의 병진모드의 고유진동수가 먼저 발생하고 있으며, 이는 기둥의 단면 이차모멘트가 단방향으로 강하게 작용하는 형상을 갖고 있기 때문이다. 또한 그림-6.(b)의 단방향의 병진모드는 장방향 병진모드와는 달리 변위의 크기가 평면적으로 서로 다른 병진모드를 나타낸다. 이는 구조물의 형상에서 알 수 있는 것처럼 해안측에 위치한 단부기둥의 단면이 내륙측에 위치한 단부기둥의 단면보다 큰 형상을 하고 있으며, 또한 해안측 단부기둥의 중간지점에는 네 개의 기둥을 서로 연결하는 슬래브로 연결되어 있으므로 내륙측보다 큰 강성을 갖고 있기 때문이다. 이와 같이 평면적으로 강성의 배분이 상이한 구조물은 강성이 강한 지점을 중심으로 회전하는 형상을 갖는 것으로 유추할 수 있다. 그리고 그림-6.(c)와 같이 직사각형 양단부에서의 위상이 서로 다른 회전모드인 평면 2차모드가 다음 모드로 발생하고 있으며, 이러한 결과로 부터 본 수치해석에 사용된 콘크리트 강성의 배분이나 모델링은 적합한 것으로 판단된다. 특히 평면적으로 강성의 배분이 대칭이 아닌 구조물은 병진모드보다 회전모드에 의해 구조물의 지진피해를 초래하는 경우가 많다.

#### 5. 관측치과 계산치의 비교

표-2에서 알 수 있는 것처럼 관측치와 계산치의 전반적인 경향은 기본모드인 장방향 병진모드와 단방향 병진모드에서 관측치가 계산치보다 조금 적은 진동수를 나타내고 있으며, 회전모드를 나타내는 슬래브 2차모드에서는 관측치가 계산치보다 조금 큰 진동수를 나타낸다. 이러한 사실을 몇가지 관점에서 양자를 비교하면 다음과 같다. 먼저 입력데이터를 작성하는 과정에서 콘크리트의 강도 등과 같은 재료의 물성치는 설계값으로 입력하게 되나, 실제 콘크리트의 물성치가 배합비 또는 양생의 정도에 따라 발생하는 차이를 정확하게 반영할 수는 없다. 또한 모래와 자갈과 같이 천연적인 재료를 사용하는 콘크리트는 응력과 변형율의 관계에 있어서 비선형

거동을 하나, 재료의 비선형성을 해석절차에 반영하기는 어려운 점이 많으므로 일반적인 해석에서는 그림-7과 같이 재료의 평균적인 강성의 의미를 갖는 割線彈性係數를 사용한다. 그러나 외력의 크기가 극히 적은 상시미동에 의한 진동측정은 재료의 初期彈性係數에 의해 유발되는 진동을 측정하고 있다. 즉 구조해석에서는 할선탄성계수를 사용하고 있으며 상시미동은 강성의 크기가 큰 초기탄성계수를 사용하고 있으므로, 상시미동에 의한 고유진동수가 구조해석에 의한 고유진동수 보다 높게 측정되는 것이 논리적이다. 이러한 관점에서 표-2를 살펴보면, 기본 고유진동수인 장방향 병진모드와 단방향 병진모드에서 관측치의 고유진동수가 계산치의 고유진동수보다 낮게 나타나고 있으므로 비논리적이라고 판단할 가능성이 있다. 그러나 실제의 자연 현상에는 우리가 진동실험에서 간과하기 쉬운 지반과 구조물의 상호작용이라는 현상이 있다. 즉 모든 구조물은 지반위에 설치되어 있으므로 구조물의 진동은 지반과 일체가 되어 움직이며, 지반이 연약하면 연약 할수록 구조물의 상대변위에 지반의 변위가 합산되어 구조물의 절대변위가 증가하고 고유진동수는 낮아지는 경향을 갖는다. 그러므로 지반을 고정으로 가정한 상태에서 구조물만의 고유진동수와 지반의 영향이 고려된 고유진동수와의 차이가 지반과 구조물의 상호작용에 의한 영향으로 평가될 수 있다. 본 실험에서 계측된 실측치는 지반의 영향이 반영된 고유진동수를 구한 것이 되나, 구조해석에 구한 해석치는 지반의 영향을 무시하였으므로 지반과 구조물의 상호작용에 의한 영향만큼 실측치에 의한 고유진동수가 줄어들게 된다. 결과적으로 割線彈性係數와 初期彈性係數와의 차이에 의해 실측의 고유진동수가 증가하는 부분과 지반의 영향으로 인해 실측의 고유진동수가 감소하는 부분을 정량적으로 평가할 수 있는 방법은 없으나, 관측치와 계산치에 대한 고찰에서 양자의 영향을 배제하고는 정확한 설명을 할 수 없다. 그러므로 진동측정으로 구조물의 건전성을 평가하는 방법에 있어서 구조물 건설 당시의 진동특성을 조사해 두어야 하는 사실은 상당히 중요한 의미를 갖는다.

## 6. 결 론

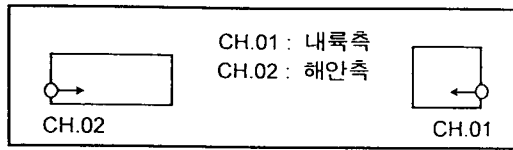
구조물은 강성과 질량에 따라 고유한 고유진동수를 갖고 있으며, 재료의 경년열화나 구조적인 결함이 발생하면 질량은 변함이 없는 반면에 강성이 급격히 떨어지게 되어 구조물의 고유진동수에 변화가 발생한다. 그러므로 건설당시에 구조물의 고유진동수를 측정해 놓았다면 고유진동수의 변화를 주시함으로써 구조물의 건전성을 확인할 수 있는 중요한 방법임을 제안하였다. 그리고 지반의 상시미동을 이용하여 구조물의 고유진동수를 측정하는 방법은 인위적인 외력을 사용하지 않으므로 실험에 경제성과 편의성이 있으며, 해석결과와 비교하여도 정확성이 있음을 증명함으로써 상시미동에 의한 진동측정의 유용성을 확인하였다.

표-1 해석에 사용된 콘크리트의 물성치

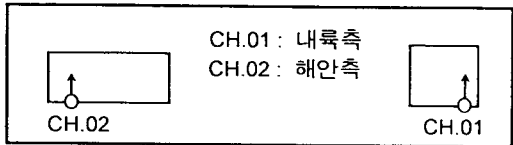
종 류	콘크리트의 물성치
콘크리트의 실험강도	$f_c = 5,710 \text{ psi}$ (설계강도 $4000 \text{ psi}$ )
콘크리트의 탄성계수	$E_c = 33 \cdot \omega_c^{1.5} \sqrt{f_c}$ ( $\text{psi}$ ) $= 617,840,208 \text{ lb/ft}^2$
콘크리트의 단위중량	$\omega_c = 2,300 \text{ kg/m}^3 = 143.589 \text{ lbs/ft}^3$
중력가속도	$g = 9.8 \text{ m/sec}^2 = 32.15282 \text{ ft/sec}^2$
밀도	$\rho = 143.589 / 32.15282 = 4.4658$

표-2 관측치와 계산치의 고유진동수 비교

Mode No	고유진동모드	고유진동수 (Hz)	
		관측치	계산치
1	장방향 병진모드	3.60	3.74
2	단방향 병진모드	4.00	4.75
3	슬래브 2차모드	5.90	5.48
4	슬래브 3차모드	-	8.38



(a) 실험-1 : 장방향 진동 측정



(b) 실험-2 : 단방향 진동 측정

그림-1 센서의 배치도

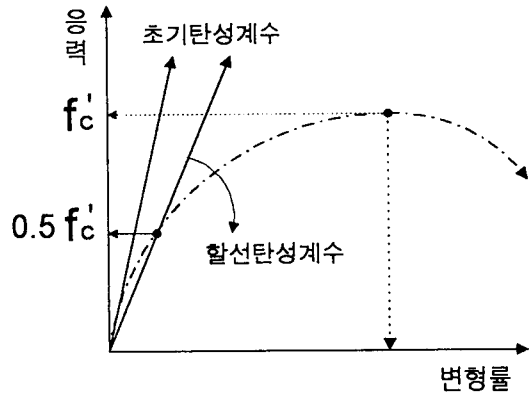
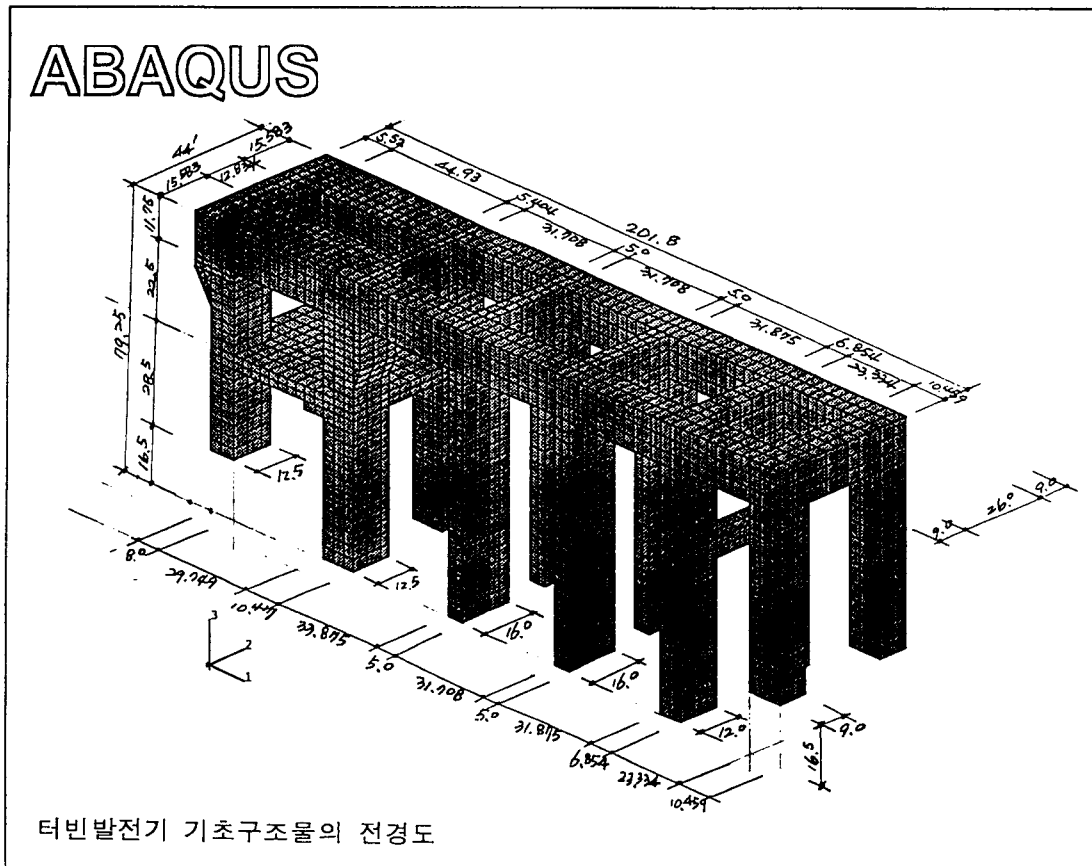


그림-7 콘크리트의 응력에 따른 탄성계수의 변화



【참고문헌】

1. 울진원자력 터빈-발전기 구조건전성 분석보고서, 한국전력 전력연구원, 1995.12
2. 最新建築學 시리즈9, 最新 耐震構造解析, 柴田明德著, 森北出版株式會社
3. 有限要素法の基礎, 李丙海 編著, 韓國工學社

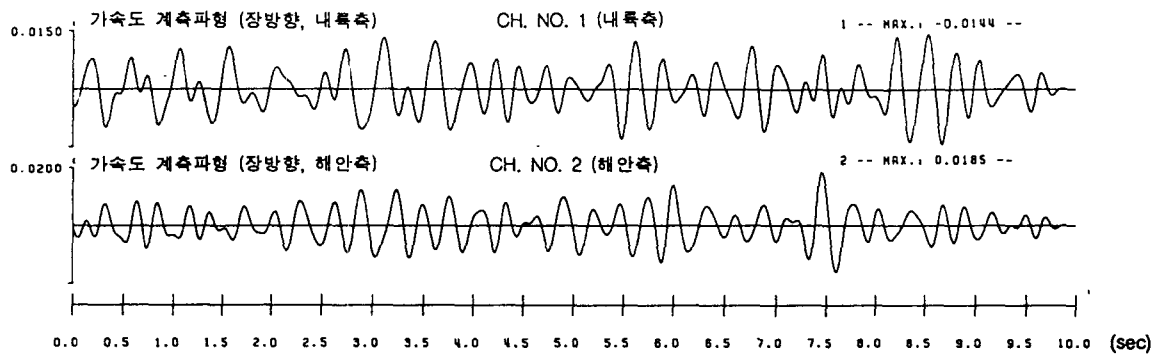


그림-2 장방향 계측파형 (Band Path Filter, 2.0Hz~6.0Hz, SH=7.0Hz)

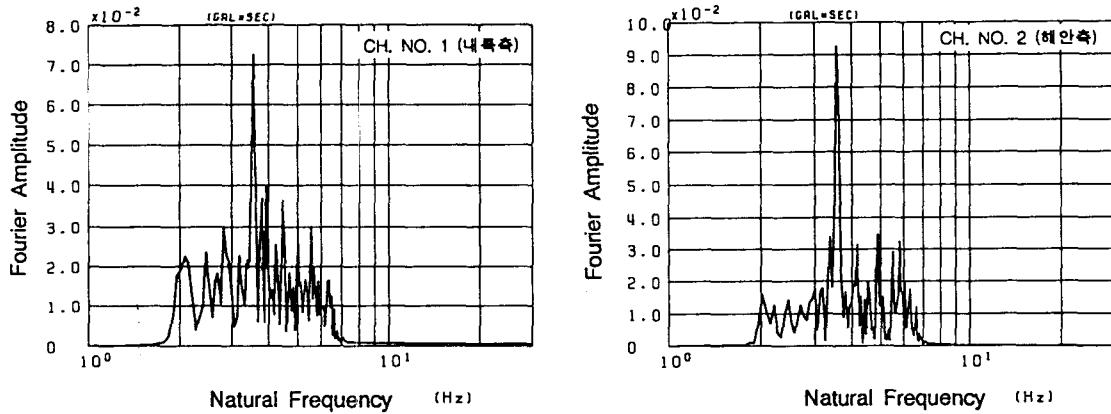


그림-3 장방향 계측파형의 푸리에 스펙트럼

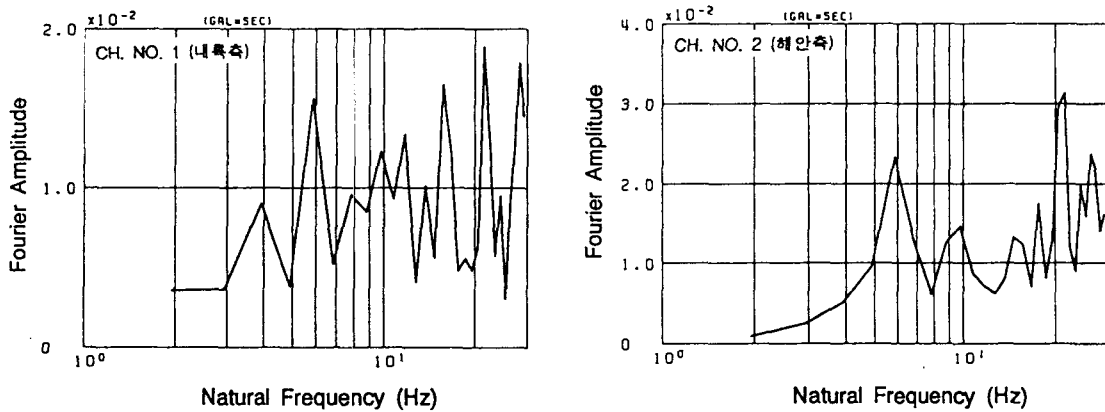


그림-4 단방향 계측파형의 푸리에 스펙트럼

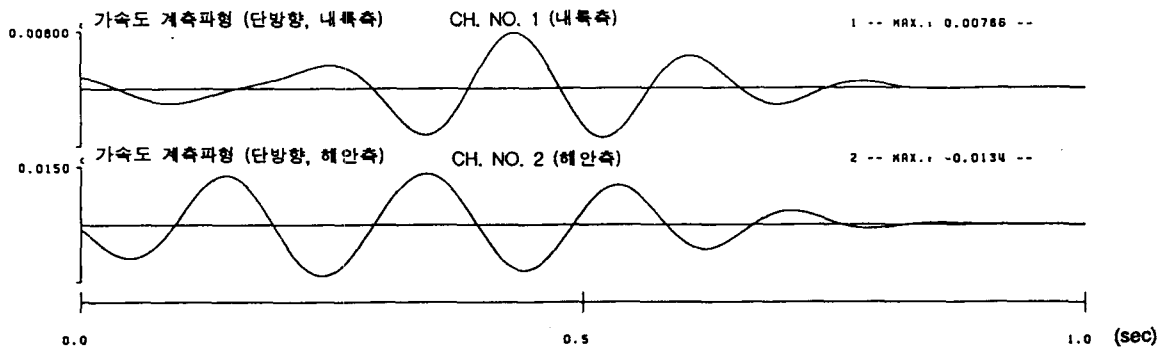
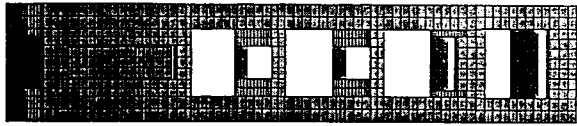
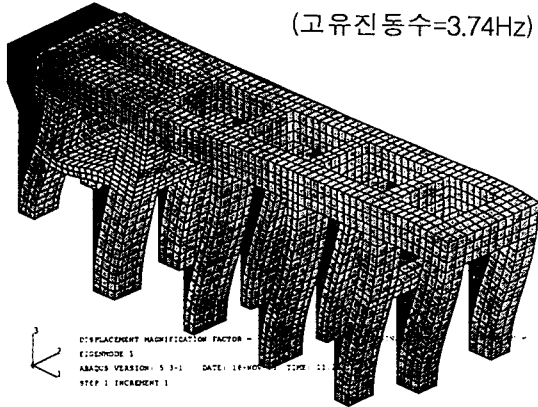


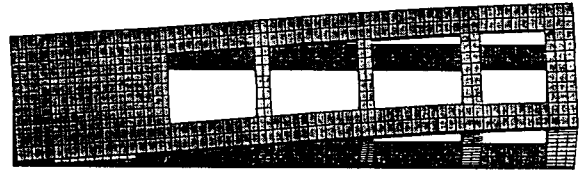
그림-5 단방향 계측파형 (Band Path Filter, 3.0Hz~4.8Hz, SH=5.0Hz)



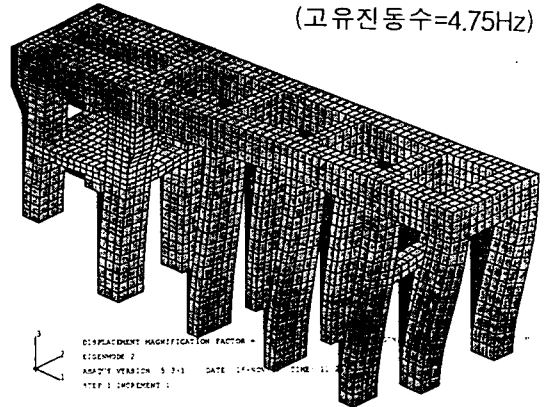
(고유진동수=3.74Hz)



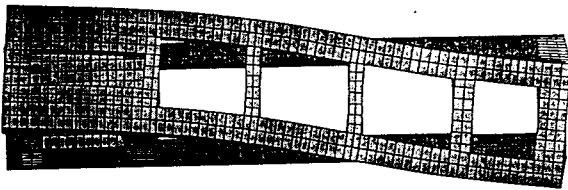
(a) 장방향 병진모드



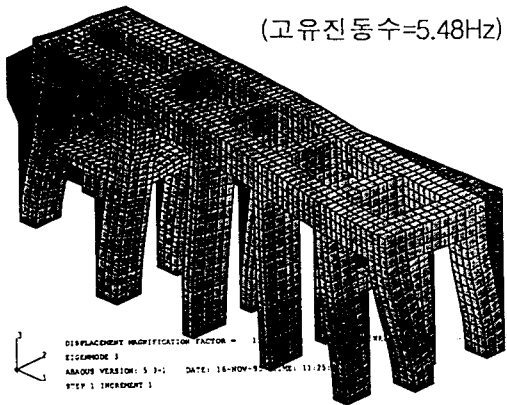
(고유진동수=4.75Hz)



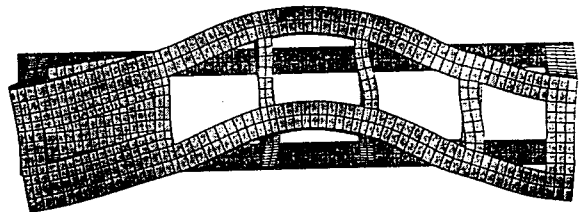
(b) 단방향 병진모드



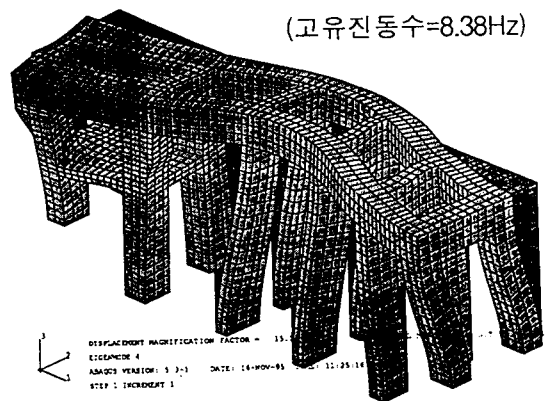
(고유진동수=5.48Hz)



(c) 평면2차 회전모드



(고유진동수=8.38Hz)



(d) 평면3차 회전모드

그림-6 수치해석에 의한 진동모드의 형상