# LNG Pilot 탱크의 동특성 실험
# Fundamental Experiment of Dynamic Response for LNG Pilot Tank

임윤묵* 김문겸** 조경환*** 박수용****
Lim, Yun Mook Kim, Moon Kyum Cho, Kyung Hwan Park, Soo Yong

**ABSTRACT**

Korea Gas Corporation has recently constructed a LNG pilot tank with 1,000m$^3$ capacity in Incheon, Korea. The main objective of this pilot tank construction is to accumulate field data under different operating conditions for the future use in design procedure, construction, and maintenance. As the part of the project, a field dynamic test, so-called modal test, is performed to obtain the dynamic characteristics of the pilot tank. This paper describes the instrumentation and measurement process used in the testing. From the measured Frequency Response Functions (FRFs), resonant frequencies and corresponding mode shapes of the tank are extracted and provided. Also, these results are compared to those calculated from a finite element model. The change of dynamic characteristics of the pilot tank due to the effect of internal fluid and the possible structural deterioration will be investigated in near future.

## 1. 서 론

LNG는 에너지 효율이 높고 공해물질이 거의 발생하지 않는 청정연료의 장점을 가지고 있어 새로운 차세대 에너지원으로 부상하고 있으며 우리나라에서도 1986년에 도입한 이후 사용량이 급증하고 있는 실정이다. 이에 따라 LNG의 안정적인 수급을 위하여 저장시설의 건설이 활발하게 이루어지고 있다. LNG 저장시설 중에서도 저장탱크는 내부에 저장된 -162°C 의 극저온 유체의 영향으로 인해 해석·설계·시공 전 분야에 걸쳐 고도의 기술이 필요하며 운용상의 실수나 지진과 같은 자연재해로 저장된 LNG가 외부로 유출될 경우, 2차적 손실이 대규모 인명피해나 경제적 손실이 될 수 있으므로 LNG 저장탱크의 평상시 및 재해시의 안전에 대한 신뢰도는 사회적으로

* 정회원·연세대학교 사회환경시스템공학부, 부교수
** 정회원·연세대학교 사회환경시스템공학부, 교수
*** 학생회원·연세대학교 사회환경시스템공학부, 박사과정
**** 정회원·영산대학교 건축학부, 조교수

중요한 의미를 가진다.[1] 이에 따라, 한국가스공사에서는 LNG 저장탱크의 안전성과 신뢰성을 높이고 외국기술의 국내시장 잠식을 막기 위해 해석·설계·시공 분야의 핵심기술을 국산화하려는 연구를 지속적으로 수행하고 있으며 이러한 연구의 일환으로 LNG Pilot 탱크를 건설하였다.

본 연구에서는 이러한 연구 프로젝트의 일환으로 건설된 LNG Pilot 탱크를 대상으로 현장실험(Field Test) 혹은 모드실험(Modal Test)을 수행하여 고유 진동수 및 모드형상 등의 동적특성을 추출하였다. 모드실험은 구조물에 동적 하중을 재하하여, 구조물의 동적 거동을 계측 및 분석하는 실험으로서 본 연구에서는 Impact Hammer 를 이용하여 LNG 탱크를 가진 하였으며 충격과 가속도 응답을 동시에 계측한 후 모드해석(Modal Analysis)을 통하여 Pilot 탱크의 고유진동수와 모드형상을 추출하였다. 전체실험은 다음과 같은 3 세트로 나누어 진행된다; (1) LNG Pilot 탱크의 건설 후 LNG를 채우기 전의 모드실험; (2) LNG를 채우고 난 후에 동일한 모드실험; (3) 일정기간 후 탱크에 손상 및 노후화가 진행된 상태에서의 모드실험. 각각의 실험에서 계측된 동적특성은 지진과 같은 동적하중에 대한 LNG 저장탱크의 거동특성을 규명하는 기본자료와 손상도 측정이나 system identification과 같이 구조물의 동적 특성 변화를 기초로 기존 구조물의 건전도를 평가하는 연구의 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. LNG 저장탱크의 동특성 실험

### 2.1 실험대상

실험대상인 LNG Pilot 탱크는 한국가스공사 인천인수기지 내에 위치하고 있으며 외부탱크는 P.S 콘크리트로, 내부탱크는 9% Ni 강으로 구성된 완전방호식 탱크이다. 지진하중을 경감하기 위해 면진장치가 설치되어 있으며 높이는 14.7m, 외부탱크의 내경은 14.16m 로 LNG 저장용량은 1,000$m^3$ 이다. 그림 1 은 탱크 전경을, 그림 2 는 탱크의 기하학적 형상 및 수치를 나타내고 있다.

### 2.2. 실험방법

구조물을 진동시키기 위한 동적 하중은 크게 인가되는 하중의 크기 및 성분을 알 수 있는 경우와 그렇지 못한 경우로 나눌 수 있으며 전자의 경우가 일반적으로 좀 더 정확한 결과를 나타낸다.[4] 전자의 경우에 해당하는 재하 방법으로는 Impact Hammer, 가진기에 의한 재하 방법 등이 있으며, 풍하중, 교통하중과 같은 상시 진동(Ambient Vibration)에 의한 측정 등은 후자에 해당한다. 본 실험에서는 Impact Hammer 를 이용하여 LNG 탱크를 가진 하였으며 충격과 가속도 응답을 동시에 계측한 후 모드해석을 통하여 Pilot 탱크의 고유진동수와 모드형상을 추출하였다.

가속도 계측지점과 하중 재하점 및 고유진동수의 대역등을 조사하기 위해 실험에 선행하여 유한요소해석을 실시하였으며 그 결과를 바탕으로 가속도 계측은 원주방향으로 8개 높이 방향으로 5개 씩 총 40개 지점을 선정하였으며 하중 재하점은 가능한 모든 원주방향과 높이방향 모드성분을 효율적으로 가진할 수 있으며 안정적으로 가진이 가능한 위치를 선택하였다.

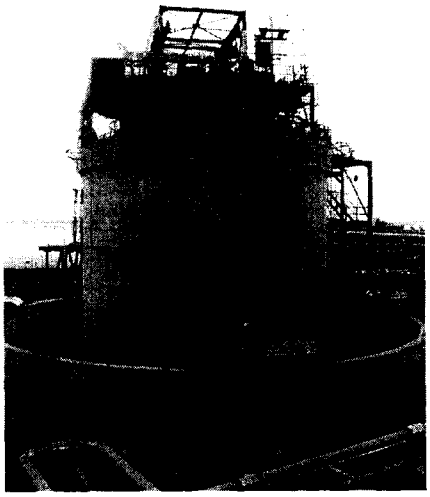

그림 1 pilot 탱크 전경

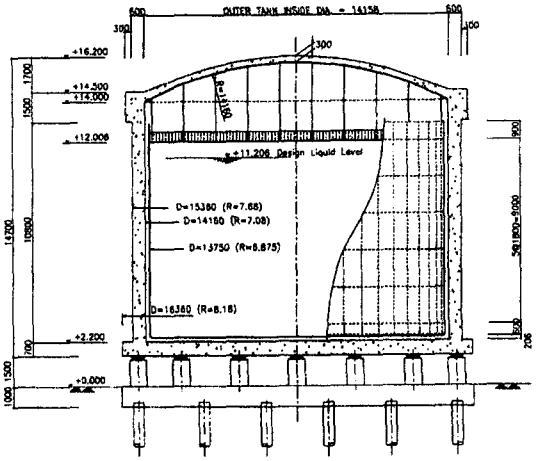

그림 2 pilot 탱크의 기하형상

구조물에 가해지는 외력과 이에 대한 동적 응답을 파악하기 위해서는 그 전달함수를 측정하면 된다. 디지털 기술을 이용한 모드 해석에 대해서 실제로 구조물에 적용하는 순서는 다음과 같다.

먼저 그림 3 과 같이 구조물에 인위적인 가진력을 이것의 응답과 동시에 측정한다. 다음에 이들의 신호를 A/D변환기에 의해 샘플링 하여 컴퓨터에 입력한다. 이들의 디지털 데이터는 고속 프리에 변환(Fast Fourier Transform; FFT) 되어, 가진점과 응답점간의 전달함수가 계산된다. 다음에 진동모드를 구하기 위해서는 구조물의 여러 가지 점에 대해서 이 전달함수 계측을 반복한다. 이 전달함수는 FFT의 원리로부터, 통상 똑같은 주파수 간격에 있어서 이산형태의 데이터이기 때문에 고유진동수, 감쇠비, 진동모드 등의 모드 파라미터를 높은 정확도로 구할 수 있는 수치해법이 필요하게 된다. 이것을 커브 핏팅이라고 부른다. 최근의 모드해석 장치에는 컴퓨터 단말기기로써 그래픽장치를 가지는 것이 있으며, 얻어진 모드 파라미터로부터 그래픽 상에 진동모드가 움직이고 있는 것과 같이 표현하는 에니메이션 기능도 갖추고 있다.

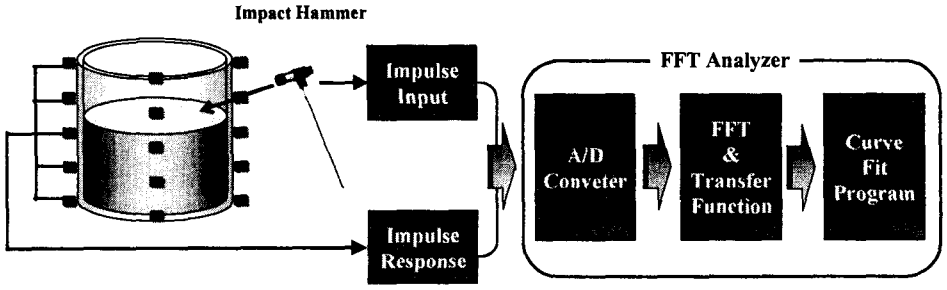


그림 3 실험의 개요도

## 2.3 실험에 사용된 기자재

본 실험에서는 LNG Pilot 탱크를 가진하기 위하여 그림 4 와 같이 PCB사의 Model 086D50 Sledge Impulse Hammer 를 사용하였으며 햄머의 주요제원과 공급사에서 제공된 4가지 종류의 Tip에 따른 가진 주파수의 범위를 표 1에 나타내었다. 햄머에 장착된 로드셀의 허용 가능 최대 충격은 5000lb(2.3ton)이고 감도는 lbf당 약 1mV이다.

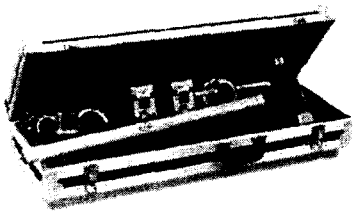

그림 4 PCB Impulse Hammer

표 1 PCB Implulse Hammer의 주요 제원

| | |
|---|---|
| Sensitivity | 0.94mV / lbf |
| Force Range | 0 - 5000 lbf |
| Head Mass | 12.1 lbf (5.5kg) |
| Freq. Range | Hard Tip - 750 Hz<br>Medium Tip - 650 Hz<br>Soft Tip - 350 Hz<br>Super Soft Tip - 250 Hz |

충격 하중에 의한 LNG Tank의 거동 계측을 위해 본 연구에서는 총 15개의 가속도계가 사용되었다. 사용된 가속도계는 그림 5와 같은 PCB사의 Model 393A03 Seismic Accelerometer로 ±5g의 범위에 g당 약 1000mV의 감도를 가지고 있고 주파수 응답범위는 0.5Hz에서 2000Hz (±5 %)이다.

가속도계로부터 입력되는 아날로그 신호들은 FFT Analyzer를 이용하여 실시간으로 FFT 연산처리 및 저장하였다. 본 실험에 사용된 FFT Analyzer장비는 미국 ZONIC사의 Medallion으로 최대 16개의 입력 채널을 갖고 있으며, 입력 주파수 범위는 최고10KHz 까지 이다. Medallion FFT Analyzer의 외형 및 주요 제원은 그림 6, 표 2 와 같다.

그림 5 가속도 센서그림

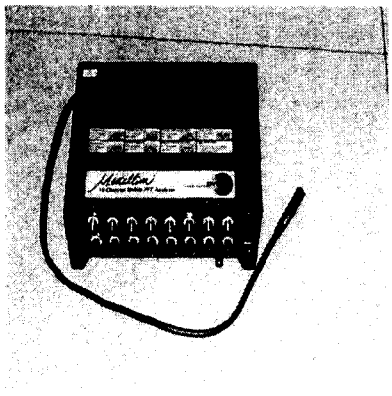

그림 6 Medallion FFT Analyzer

표 2 Medallion FFT Analyzer의 주요 제원

| | |
|---|---|
| Number of Input Channel | 16 Channels |
| Max. Analysis Freq. | 10 kHz per Channel |
| Max. Sampling Rate | 25.6 k samples/sec |
| Dynamic Range | >90 dB |
| Input Coupling | AC,DC,ICP at 4 mA |
| DSP Size | Type III PCMCIA DSP Card |
| On-board RAM | 4MB RAM |

본 연구에 사용된 가속도계와 Hammer의 로드셀은 모두 Voltage Type (또는 ICP Type)으로 실험 시 별도의 Signal conditioner 또는 Amplifier를 사용하지 않고 데이터 수집장치인 Medallion FFT Analyzer를 ICP Mode로 설정하여 각 센서에서의 신호를 직접 수집 처리하였다. 실험 시 입력 신호의 A/D 변환과정에서 Fs/2 이상의 주파수 성분을 갖는 아날로그 신호가 낮은 주파수 성분의 신호로 잘못 받아들여지는 현상인 Aliasing 현상을 고려하여 각 채널의 입력 최대 주파수 범위는 200Hz, Frame Period는 8초 (Frame sample Size는 4096개, Freq. Increment 0.125 Hz)로 설정하였다. 또한, 신호의 FFT 연산 시 유한시간으로 취득한 자료 양단의 불연속으로 인한 오차 (Leakage Error)를 줄이기 위해 입력하중과 가속도응답을 Window Function으로 처리하였는데, 입력하중신호에는 Rectangular Force Window를 가속도 응답신호에는 Exponential window를 사용하였다. 가속도계 응답신호의 경우 Exponential Window 기능을 사용하여 부가 고유진동수를 변화시키지 않으면서 주파수 영역 전체에 동일한 감쇠를 갖도록 하여 SN (signal to noise ratio) 비가 좋아지는 효과를 볼 수 있었다.

### 3. 실험결과 분석

그림 7 은 가진 지점에서 Impact Hammer로 LNG Pilot 탱크의 벽면을 중심을 향하여 친 충격 파형의 시간이력이고, 그림 8 은 이를 주파수 영역에서 표현한 스펙트럼이다. 그림에서 볼 수 있듯이 대략 100Hz까지의 주파수 대역에서 거의 일직선을 나타내고 있으며 이는 100Hz 이내의 모드는 실험시의 입력하중으로 충분히 가진할 수 있음을 의미한다.

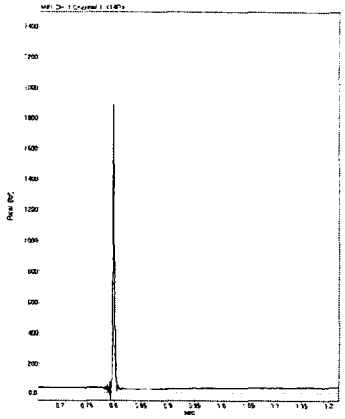

그림 7 충격시 임펄스햄머의 파형

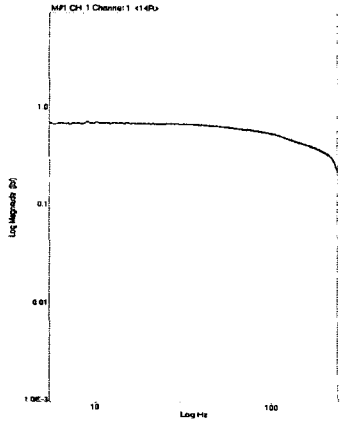

그림 8 충격파형의 스펙트럼

상용 모드해석 프로그램인 ME'ScopeVES[5]를 사용하여 전체 3세트로 이루어진 실험 중 1세트에 해당하는 LNG가 채워지지 않은 Pilot 탱크에 대한 실험의 임펄스 응답으로부터 고유진동수와 모드형상을 구하였다. 그림 9 - 그림 11 은 각각 고유진동수 31.5Hz ,38.25Hz ,69.5Hz 때의 모드형상으로 평면도와 입체도로 구성되어 있어서 복잡한 모드형상을 알아보기 쉽게 시각화하였다. 가속도 계측시 탱크의 roof 에 설치된 기계장치들로 인해 roof 에는 가속도계를 설치하지 못한 관계로 모드형상에서 탱크의 roof 형태는 나타나 있지 않다.

고유진동수 31.5Hz의 경우, 가장 기본적인 모드로 pilot 탱크를 위에서 볼 때 타원형태로서 2차 모드를 나타내며, 타원의 장주 부분은 측면에서 볼 때 볼록해지며, 단주 부분은 오목해지는 형태로 보의 1차모드 형상을 보인다. 두 번째 모드형상은 고유진동수 38.25Hz일 때의 경우로 위에서 볼 때 원주방향으로 4차모드의 형태를 가지며 각각의 볼록해진 부분은 측면에서 볼 때 1차 모드로 볼록해지는 형상을 나타낸다. 세 번째 경우로 고유진동수가 69.5Hz일 때는 원주방향의 모드가 38.25Hz 일때와 동일하며 높이방향으로는 2차 모드로 움직이는 것을 알 수 있다. 이는 탱크가 위, 아래로 볼록해짐과 오목해짐을 반복한다는 것을 나타낸다.

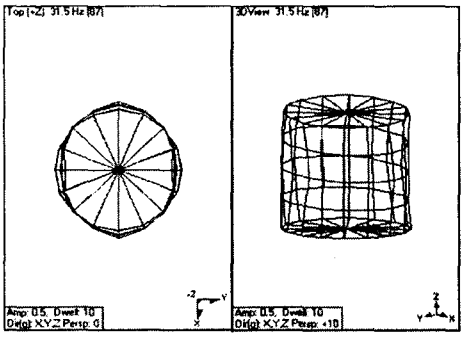

그림 9 고유진동수 35Hz에서의 모드형상

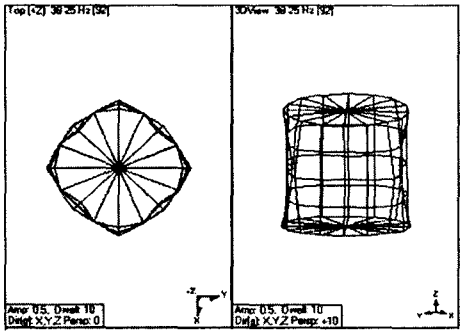

그림 10 고유진동수 38.25Hz에서의 모드형상

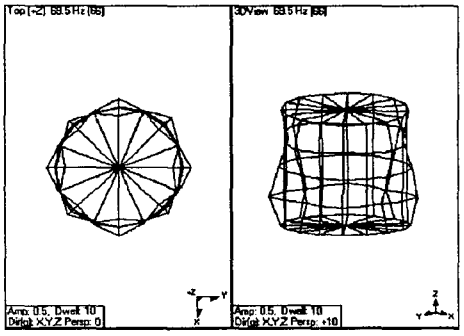

그림 11 고유진동수 69.5Hz에서의 모드형상

## 4. 해석결과와의 비교

실험결과의 타당성을 판단하기 위하여 상용 구조해석프로그램[6]을 사용하여 모드해석을 수행하였다. 실험 시 Impulse Hammer의 가진력이 면진장치에 영향을 줄만큼 크지 못할 것이라는 가정

하에 수치해석모델에서는 탱크의 구속조건으로 바닥 고정으로 하였다. 그림 12 는 고유진동수 33.89일 때의 모드형상을 타나낸 것으로 실험 첫 번째 모드형상인 고유진동수 31.5Hz의 경우와 일치한다. 그림 13 은 고유진동수 37.03Hz일 때의 모드형상으로 실험 두 번째 모드형상인 고유진동수 38.25Hz일 때의 형상을 반영하였다. 그림 14 는 고유진동수 65.79Hz일 때의 모드형상으로 실험 네 번째 경우인 고유진동수 69.5Hz의 모드형상을 나타낸다. 실험에서 얻어진 고유진동수와 모드형상을 수치해석모형과 비교하면 다음 표 3 과 같다.

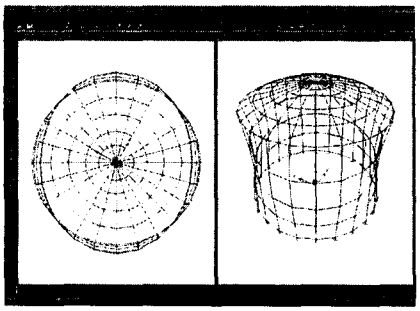

그림 12 33.89Hz에서의 모드형상

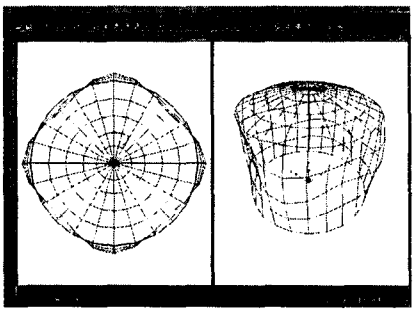

그림 13 37.03Hz에서의 모드형상

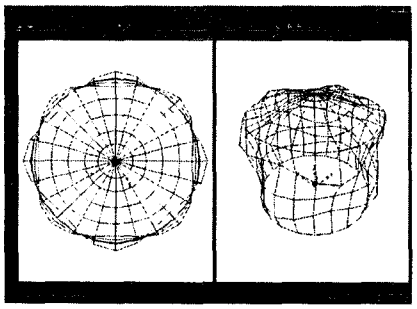

그림 14 65.79Hz에서의 모드형상

표 3 실험과 수치해석에 의한 모드형상 비교

| Case | 실험(Hz) | 수치해석(Hz) | 오차(%) |
|---|---|---|---|
| 1. | 31.5 | 33.89 | 7.0 |
| 2 | 38.25 | 37.03 | 3.3 |
| 3 | 69.5 | 65.79 | 5.6 |

실험과 해석결과의 오차범위가 7.0% 이내로 나타나, 실험에서 구한 모드형상이 대체적으로 타당하다는 것을 말해주고 있으며 결과에서 나타난 오차의 원인은 실제 탱크에 부착된 악세사리들을 수치해석모델에서 적절하게 반영하지 못한 데에 따른 것으로 추정된다.

## 5. 결 론

LNG 탱크의 벽면을 따라서 등 간격으로 8개 지점씩 총 40개(원주방향 8개소 × 수직방향 5개소 = 40) 지점에 대하여 가속도를 계측하여 모드해석을 한 결과 탱크의 고차모드까지 반영함으로써 계측점의 개수가 경제적으로 선정되었으며, 모드형상을 반영하기에 충분하였음을 알 수 있었다. 가진 지점에서 Impulse Hammer로 LNG Pliot 탱크의 벽면을 중심을 향하여 친 충격파형의 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 대략 100Hz까지의 주파수 대역에서 거의 일직선을 나타내고 있으며, 이로 부터 탱크의 고유모드 중 100Hz 이내의 모드는 Hammer의 충격으로 충분히 가진할 수 있음을 알 수 있었다. 실험에 의한 가속도 계측 결과의 FFT 변환과 커브핏팅을 통해 주파수 응답함수(Frequency Response Function)와 고유진동수를 산정하고, 이와 연관된 모드형상을 구하였다. 이를 상용 유한요소해석 프로그램과 비교한 결과 고유진동수가 오차범위 7.0%이내에서 일치하는 결과를 얻을 수 있었으며 모드형상 또한 잘 일치함을 알 수 있었다.

본 결과는 총 3세트로 구성된 실험 중 첫 번째 세트인 LNG가 채워지지 않은 Pilot 탱크에 대한 실험결과로서 현재 두 번째 세트인 LNG를 채운 후의 Pilot 탱크에 대한 실험을 진행한 상태이며 이에 대한 실험결과를 처리하고 있는 중이다. 두 번째 실험의 결과는 Pilot 탱크 내부에 저장된 LNG가 구조물의 동특성에 미치는 영향을 파악하는 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 사료되며 추후 세 번째 실험까지 수행하면 시간에 따른 구조물의 손상에 의한 건전도 평가의 기초자료를 구축할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2001년도 건설기술연구개발사업으로부터 연구비 지원을 받아 이루어졌으며 이를 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Tung, A. T. Y. and Kiremidjian, A. S., "Application of system reliability theory in the seismic analysis of structures," Earthquake Spectra, Vol. 8, No. 3, 1992, pp. 471-494.
2. Mazurek, D. F. and De Wolf, J. T., "Experimental study of bridge monitoring technique," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 9, 1990, pp. 2532-2549.
3. Narkis, Y., "Identification of crack location in vibrating simply supported beams," Journal of Sound and Vibration, Vol. 172, No. 4, 1994, pp. 549-558.
4. Ewins, D. J., "Modal Testing : Theory and Practice," Research Studies Press LTD., 1986, pp.269.
5. Vibrant Technology, Inc., "1997 ME'scopeTM version 4.0 Operating Manual," Jamestown, California, 1997.
6. Computers & Structures, Inc., "SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design Structures," 1998.