

# 호이스트에 의한 비계 이송 시 적재하중에 의한 구조물 진동특성 연구

## A Study on Vibration Characteristics of Scaffolding Structures with a Hoist according to Payloads

류봉조† · 신광복\* · 이재열\*\* · 백수곤\*\*\* · 김후식\*\*\*  
B. J. Ryu, G. B. Shin, J. Y. Lee, S. G. Baek and H. S. Kim

Key Words : Vibration Characteristics(진동특성), Scaffolding Structure(비계 구조물), Modal Testing(모달시험), Hoist(호이스트)

### ABSTRACT

This paper presents the vibration characteristics of scaffolding structures with a hoist according to payloads. In order to analyze the vibrational and structural characteristics for 20-step scaffolding structure, structural and vibrational characteristics for 2-step scaffolding structure were compared with some experimental results. The numerical results for natural frequencies of scaffolding structures have a good agreement with experimental ones. Through the numerical analysis, firstly, it is shown that the maximum stress of scaffolding structures is lower than von-mises yield criteria when four persons with total weight of 280kgf are working at the top of the scaffolding structures. Secondly, vibration characteristics including natural frequencies and modes for scaffolding structures are shown in case of various kinds of moving masses.

### 1. 서론

비계(scaffolding)란 사다리 끝에 요철과 같은 연결부품을 두어 이 사다리를 길이방향으로 연결하면 긴 사다리가 되고, 넓히면 발판이 되며 서로 엮으면 사다리의 한 종류로서 삼차원 형태의 어떤 구조물로도 제작할 수 있도록 블록화 시킨 구조물이다. 비계의 응용부분을 살펴보면 주택건축용, 발전설비, 기기 제작공장, 테마파크(롯데월드나 우방타워 등)의 중요산업설비나 관객이 많아 안전과 미관이 중요한 건물, 신속한 시공이 필요한 파워플랜트 등을 들 수 있다.

이러한 비계의 경우 가장 짧은 시간에 저렴한 비용으로 안전하게 작업을 완료할 수 있는 제품을 개발하는 것은 대단히 중요한 사항이다. 일반적으로 비계는 비계 자체의 자중이나 수송물자 등 비계에 적재되는 정적 부하하중에 대한 정적 안전성 문제에 있어서는 제작 시 안전을 등을 고려하기 때문에 커다란 문제점은 없다.

그러나, 고소 작업을 하는 경우 부하하중의 이동 또는 비계에 부착된 호이스트의 이송 시 발생하는 진동의 문제는 그동안 꾸준히 문제점으로 지적되어 왔고, 대단히 중요한 문제임에도 불구하고, 이러한 진동특성의 명확한 규명이나 분석을 통한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구의 목적은 첫째, 정하중을 받는 비계 구조물의 구조해석을 통해 그 안전성을 검증하고, 둘째, 호이스트와 같은 이동 적재 하중이 부과되는 경우의 비계 진동특성을 고려한 비계 구조물을 제작함으로써, 고층까지 호이스트를 이용한 자재 이송이 가능해져 작업시간의 단축, 인건비의 절감, 작업자의 안전성 확보 등의 신뢰성 구축과 제품 매출 증가에 기여할 수 있게 하는데 있다.

### 2. 본론

#### 2.1 2단 비계구조의 진동해석

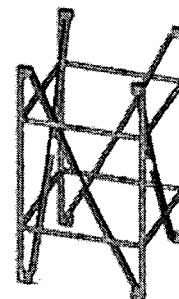


Fig. 1 FE model for 2-step scaffolding structure.

수직 비계구조물의 20단(20m)에 대한 구조해석 및 진동에 관한 시뮬레이션에 앞서서, 예비적으로 2단(2m) 비

† 한밭대학교 기계공학부

E-mail : bjryu701@hanbat.ac.kr

Tel : (042) 821-1159, Fax : (042) 821-1587

\* 한밭대학교 기계공학부

\*\* 한밭대학교 기계공학부 대학원

\*\*\* (주) 한밭

계구조에 대한 진동해석을 수행하였다. 2단 비계구조 모델은 수직 프레임만을 설치하였을 경우 구조상의 불안정성을 고려하여 보조사선보(assistant oblique beam)를 대각선 방향으로 설치한 모델을 사용하였다. 진동해석에 사용한 소프트웨어는 ANSYS 상요소소프트웨어를 사용하여 해석하였다.

Fig. 1은 2단 비계구조의 구조해석 모델을 보여준다. Fig. 2에서 수직 프레임은 바닥과 고정단의 경계조건을 부여하였으며, 그림에서 보이는 바와 같이 x-y-z 3차원 모델을 사용하였다. ANSYS 상요소소프트웨어 사용 시, 모델에 대한 모델링은 2단 비계구조가 비교적 단순한 형상이기 때문에 형상들의 절점을 생성한 다음 절점들을 직접 선으로 연결하여 라인으로 생성시키고, 부재의 요소는 하단이 고정되어 있는 경계조건을 주었다. 해석에 사용된 요소들은 파이프(186번)와 보(16번)요소를 이용하였으며, 부재의 연결부위는 보요소를 사용하여 기하학적 모델을 완성하였다. 해석에 사용된 모델의 물성 값은 Table 1에 나타난 바와 같다.

Table 1 Specification of materials for scaffolding.

Materials		Steel
Young's modulus $E (GPa)$	Pipe	200
	Beam	205
Density $\rho (kg/m^3)$		7,860
Poisson's ratio $\nu$		0.29

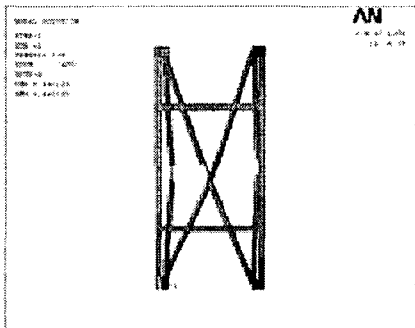


Fig. 2 1st bending mode for 20.938Hz

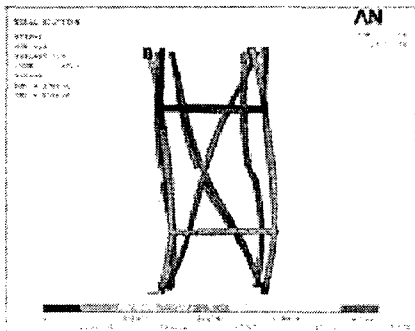


Fig. 3 2nd bending mode for 57.72Hz

Fig. 2와 Fig. 3은 2단 비계구조의 y-z 평면상에서의 1차와 2차 굽힘 진동모드를 나타낸다. 1차 굽힘과 2차 굽힘 모드들 사이에 국부적인 비틀림 모드와 회전 모드들이 나타나지만, 본 논문에서는 굽힘에 관계된 모드들만을 그림에서 나타내었고, 국부 모드들은 실험과의 비교 시에 나타낸다.

2.2 실험장치 및 실험

2단 비계구조의 진동해석 결과의 실험적 검증을 위해 Fig. 4와 같은 실험장치를 구성하였고, Photo. 1은 실험장치 및 실험전경을 나타내는 사진이다.

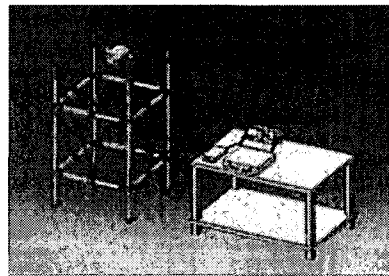


Fig. 4 Experimental setup for modal testing.

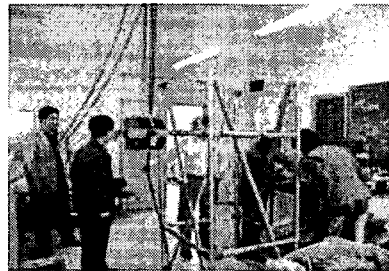


Photo. 1 Photograph of modal testing for 2-step scaffolding structure.

실험은 첫째, 2단 비계구조의 횡 방향으로 가진기에 의해 가진을 하게 되면 응답 가속도 신호를 가속도계로 측정한다.

둘째, 측정된 가속도 신호는 그 신호 자체가 미소하므로 증폭기(amplifier)를 통해 증폭되며, 이 증폭된 출력 신호는 디지털 메모리 오실로스코프 상에 모니터링 된다. 셋째, 모니터링된 신호는 컴퓨터와 연결하여 프린터를 통해 출력하여 진동분석을 행하였다.

Fig. 5는 실험으로부터 얻은 2단 비계구조의 고유진동수에 대한 그림을 보여준다. Fig. 5에서 가로축은 진동수 축, 세로축은 전달함수로서 입력에 대한 출력의 비를 나타내며, 단위는 (1/kg)이다.

Fig. 5의 실험결과에 나타난 진동수들을 살펴보면 1차 및 2차 굽힘진동 모드에 해당하는 진동수가 각각 20.79(Hz), 58.70(Hz)로 사료되며, 다른 진동수들은 국부적인 비틀림이나 회전 등에 관계된 모드들에 해당되는 것으로 판단된다. 또한, 실험 데이터에 있어 16.61(Hz)가 1차 굽힘모드에

해당할 것으로 판단할 수 있지만, ANSYS 상용 소프트웨어를 통한 해석 시, 2단 비계구조의 보조 사선보를 제거시킨 후의 모델에 대한 해석결과에 있어 이 실험 값(16.61(Hz))과 근접한 진동수를 얻게 됨으로 인하여, 이 실험 진동수는 주로 수직 프레임 자체의 영향에 기인된 것으로 판단하였다. 즉, 보조 사선보를 설치함으로 인하여, 다양한 모드들의 합성이 나타나기 때문일 것으로 사료된다.

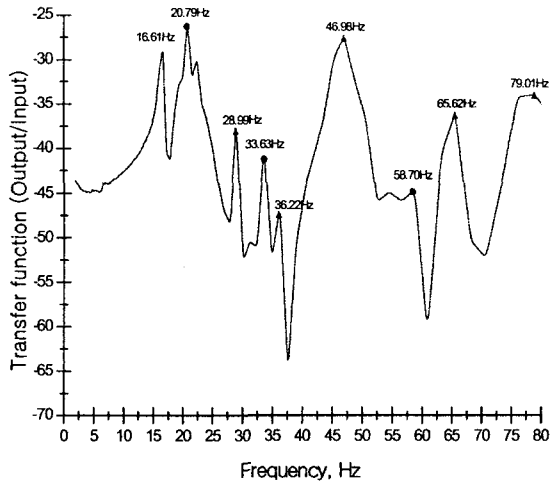


Fig. 5 Experimental natural frequencies of 2-step scaffolding structure.

Table 2 Comparison theoretical results with experimental ones for natural frequencies.

Modes	Theoretical frequency(Hz)	Experimental frequency(Hz)	Error (%)
1st (Bending)	20.938	20.79	-0.71
2nd (Local)	29.324	28.99	-1.15
3rd (Local)	32.568	33.63	3.16
4th (Local)	35.622	36.22	1.65
5th (Local)	44.897	46.98	3.80
6th (Bending)	57.729	58.70	1.65
7th (Local)	65.996	65.62	-0.57
8th (Local)	79.900	79.01	1.13

Table 2는 2단 비계구조에 대해 진동 시뮬레이션과 실험으로부터 얻은 고유진동수를 비교한 표이다. 시뮬레이션 모델과 같이 보조사선보 등을 설치한 모델은 다수의 진동모드들이 나타남을 알 수 있는데, 실험값과의 비교를 위해 굽힘진동수 1, 2차와 몇몇 국부 비틀림과 회전에 관계된 모드들에 관련된 진동수만을 비교한 것이다. 실험에 있어 특히, 2차 굽힘 모드에 대한 진동수 58.70(Hz)는 전달함수에 있어 미소한 크기를 보임을 알 수 있는데 이는 실험에 있어 가진을 주는 위치와 응답위치가 굽힘진동에 있어 구조물의 절점

(node point)부근에 근접함으로 인하여 미소한 크기를 보이고 있다고 사료된다.

Table 2의 결과비교를 통해 실험값과 시뮬레이션 결과값이 근사한 결과(4% 이내 오차)를 보임으로서 본 연구에서 설정한 2단 비계구조의 모델설정이 타당함을 검증하였다.

### 2.3 정하중 부과에 따른 구조해석(20단-비계)

2단 비계구조의 진동해석결과와 실험결과를 토대로 본 연구에서 설정한 2단 비계구조 모델 설정에 대한 타당성이 검증되었으므로, 이제 20단 비계구조에 대한 구조해석을 먼저 수행하였다. 구조해석은 70(kg) 사람 4인이 수직 비계구조의 상단에서 작업한다고 가정할 때, 구조물의 응력 및 변형을 해석한 것이다. Fig. 6은 20단 비계구조의 해석 모델을 보여주고 있으며, Fig. 7은 20단-비계 구조물의 자중과 맨상단의 받침대 위에 75(kg) 4인의 정하중이 부과될 때에 대한 응력분포를 나타낸 그림으로 해석결과 최대 응력은 20.962(Mpa)로 steel의 항복응력 기준 내의 값으로 정하중에 대해 안전한 것으로 판단된다. 최대응력은 상단부의 작업자가 딛고 있는 발판 바로 밑의 비계구조물의 가로요소에서 발생되는 것으로 나타났다.



Fig. 6 Finite element model for 20-step scaffolding structure.

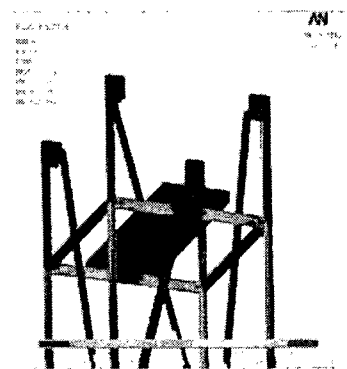


Fig. 7 Stress distribution of 20-step scaffolding structure under static load.

2.4 이동하중 부과에 따른 진동해석(20단-비계)

이동 하중의 부과에 따른 20단 비계구조의 진동해석에 있어서는 비계 자체만의 진동특성을 명확히 알아보기 위하여, 작업자의 수와 하중은 고려하지 않고, 비계의 자중을 포함한 이동하중 크기와 위치변화에 따른 진동 특성을 파악하였다.

이 경우, 이동하중의 크기는 각각 50(kg)과 100(kg)의 경우로 나누었으며, 이동하중이 없는 경우에 대해서도 동특성을 파악하였다. 또한 이동하중의 위치변화는 50(kg)의 이동하중의 경우에 대해서만 20단 비계구조의 하단부터 0.5(m)높이부터 맨 상단까지 0.5(m) 간격의 수직위치에서 진동특성을 파악하였다.

(1) 이동하중이 없는 경우

이동하중이 없는 20단 비계구조의 진동해석에 있어서는 시뮬레이션 결과들은 Fig. 8부터 Fig. 13에 나타나 있다. 비계구조가 길어짐에 따라 보조사선보에 의한 영향은 적게 나타나고, 주로 비계 수직구조의 굽힘과 비틀림에 의한 모드 영향이 나타남을 알 수 있는데 이는 주로 저차 모드(1, 2, 3 차)일 경우에 그런 현상이 두드러진다. 그러나 모드가 4차 이상으로 진행되면 보조사선보의 여러 가지 혼합 모드들이 나타날 것으로 판단된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 한단이 고정된 외팔 구조물의 1차 굽힘 및 비틀림 모드 형상을 보여주고 있으며, Fig. 10과 Fig. 11은 각각 2차 굽힘과 비틀림 모드, Fig. 12와 Fig. 13은 각각 3차 굽힘과 비틀림 모드 형상을 보여주고 있다.

따라서, 고단 비계 구조물을 이용하여 고소작업을 하는 경우, 이러한 비계구조의 저차 고유진동수들과 외력의 진동수들이 근접함으로 발생하는 공진현상을 피하기 위해서는 본 연구와 같이 비계구조의 고유한 동특성인 고유진동수 및 고유모드들에 대한 정보를 토대로 외부의 외력에 의한 진동수가 이와 근접되지 않도록 하는 대책이 필요할 것으로 사료된다.

이를 피하기 위한 대책으로는 비계 하부 쪽에 강성이나 질량의 변화를 주는 방안, 진동을 흡수하는 방진재를 하부에 설치하는 방안 등 다양하게 검토될 수 있다고 판단된다.

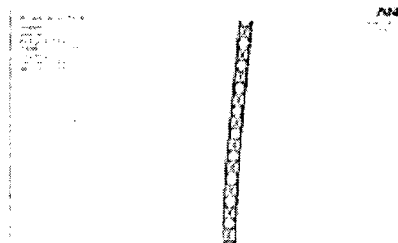


Fig. 8 1st bending mode(1.515Hz)

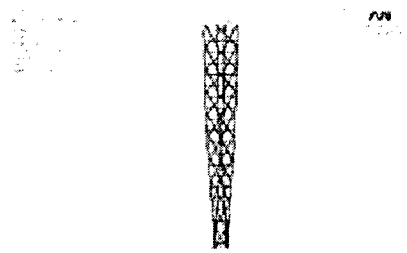


Fig. 9 1st twisting mode(4.339Hz)

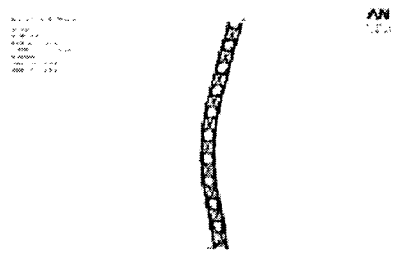


Fig. 10 2nd bending mode(7.101Hz)

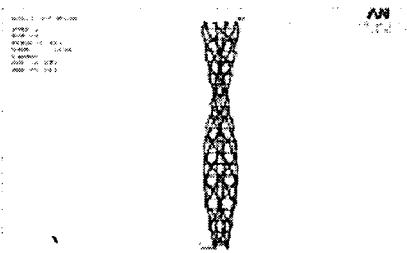


Fig. 11 2nd twisting mode(12.183Hz)

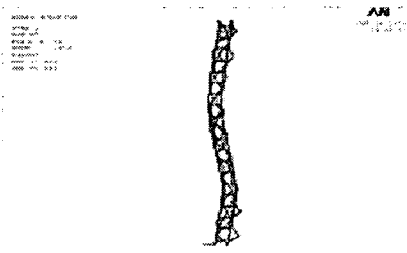


Fig. 12 3rd bending mode(14.754Hz)

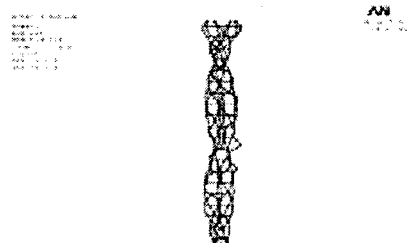


Fig. 13 3rd twisting mode(19.114Hz)

(2) 이동하중이 있는 경우

이동하중이 있는 경우, 이동하중이 없는 경우와 비교할 때 고유진동수의 변화가 있는 것은 당연하다. 본 연구에서는 이동하중의 크기가 각각 50(kg), 100(kg), 150(kg)일 때에 1차부터 3차까지의 굽힘 및 비틀림 모드들에 관계된 고유진동수를 이동하중이 없는 경우와 비교하여 Table 3에 나타내었다. Table 3~Table 5에 나타난 고유진동수 값들은 이동하중이 비계의 맨 하단바닥에서 0.52(m)위치부터 시작해서 19.52(m)되는 부분까지 이동하는 경우에 대한 고유진동수들 중, 3부분 위치(0.52, 10.02, 19.52(m))에 대한 고유진동수들을 보여준다.

(가) 이동하중이 0.52(m)에 위치한 경우

20단 비계 구조의 하단으로부터 0.52(m)부분에 이동하중이 있을 때의 고유진동수의 변화를 Table 3에서 보여주고 있다.

Table 3 Comparison natural frequencies of no moving load with ones of moving load at position 0.52(m).

	No load(Hz)	50kg load(Hz)	100kg load(Hz)	150kg load(Hz)
1st bending	1.515	1.577	1.577	1.577
1st twisting	4.339	5.2598	5.2591	5.2584
2nd bending	7.101	7.5808	7.5799	7.5788
2nd twisting	12.183	14.821	14.769	14.235
3rd bending	14.753	15.789	15.631	15.038
3rd twisting	19.114	22.082	21.148	21.114

(나) 이동하중이 10.02(m)에 위치한 경우

Table 4 Comparison natural frequencies of no moving load with ones of moving load at position 10.02(m).

	No load(Hz)	50kg load(Hz)	100kg load(Hz)	150kg load(Hz)
1st bending	1.515	1.5457	1.5156	1.4867
1st twisting	4.339	5.1698	5.0721	4.9681
2nd bending	7.101	7.1118	6.7318	6.4212
2nd twisting	12.183	14.341	13.964	13.689
3rd bending	14.753	15.734	15.657	15.587
3rd twisting	19.114	21.555	21.297	21.178

20단 비계 구조의 하단으로부터 10.02(m)부분에 이동하중이 있을 때의 고유진동수의 변화를 Table 4에서 보여주고 있다. Table 4에서도 Table 3에서와 마찬가지로 이동하중이 존재할 때, 1차부터 3차까지의 고유진동수들이 이동하중의 크기가 50(kg)에서 150(kg)으로 증가됨에 따라 감소됨을 알 수 있다. 그러나, 이 경우도 이동하중이 없는 경우

에 비해서는 이동하중이 있는 경우의 고유진동수들이 큰 값을 보이고 있는데, 이는 이동하중을 비계의 하부로부터 상부로 올리는 경우 이동하중을 잡고 있는 부분의 강성의 영향이 100(kg) 이동하중의 크기 영향보다 고유진동수 변화에 크게 미치는 것으로 사료된다.

(다) 이동하중이 19.52(m)에 위치한 경우

20단 비계 구조의 하단으로부터 19.52(m)부분에 이동하중이 있을 때의 고유진동수의 변화를 Table 5에서 보여주고 있다.

Table 5 Comparison natural frequencies of no moving load with ones of moving load at position 19.52(m).

	No load(Hz)	50kg load(Hz)	100kg load(Hz)	150kg load(Hz)
1st bending	1.515	1.3965	1.2645	1.1633
1st twisting	4.339	4.9261	4.7197	4.5851
2nd bending	7.101	6.9939	6.6586	6.4461
2nd twisting	12.183	13.480	12.838	12.503
3rd bending	14.753	14.740	14.232	13.949
3rd twisting	19.114	21.352	21.214	21.164

Table 5에서도 Table 3 및 Table 4에서와 마찬가지로 이동하중이 존재할 때, 1차부터 3차까지의 고유진동수들이 이동하중의 크기가 50(kg)에서 150(kg)으로 증가됨에 따라 감소됨을 알 수 있다. 1차부터 3차까지의 굽힘모드에 있어서는 이동하중이 없는 경우에 비해 고유진동수들이 작은 값을 보이고 있다. 이는 이동하중을 비계의 하부에서 상부로 이동하는 경우 이동하중을 잡고 있는 부분의 강성의 영향보다 150(kg) 이동하중의 크기 영향이 고유진동수 변화에 크게 미치는 것으로 사료된다.

3. 결론

호이스트에 의한 비계 이송 시 적재 하중에 의한 구조물 진동특성 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 접이식 2단-비계구조에 대한 진동해석 시뮬레이션과 실험을 통하여, 본 연구의 시뮬레이션 모델 설정의 타당성을 검증하였으며, 그 결과 본 연구의 해석 모델을 이용하여 고층 다단비계 구조물의 해석 시뮬레이션 모델 설정이 가능함을 확인하였다.

둘째, 20단-비계구조의 정하중에 의한 구조해석을 통해 비계 자중과 비계 상단 발판 쪽에 280(kg)의 정하중 작용시, 최대응력은 항복응력내의 값으로 나타났다.

셋째, 20단-비계구조의 진동해석은 이동하중을 적재한 경우와 적재하지 않은 경우로 나누어 해석하였으며, 이동하중이 있는 경우는 이동하중의 크기가 각각 50, 100, 150(kg)

에 대하여, 이동하중의 위치는 비계 하단으로부터 0.52, 10.02, 19.52(m)일 때의 고유진동수와 진동모드를 산출하였다. 결과를 통해 고단-비계구조물은 저단 비계구조물에 비해 주로 굽힘(bending)과 비틀림(twisting)에 의한 모드가 주를 이룸을 알 수 있었다.

## 후 기

본 논문은 2005년도 산학연 공동기술개발 지역컨소시엄 사업 수행결과의 일부이며, 지원을 아끼지 않으신 관계기관에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Genta, G., 1993, Vibration of Structures and Machines, Springer-Verlag.
- (2) Meirovitch, L. M., 1997, Principles and Techniques of Vibrations, Prentice-Hall.
- (3) Ewins, D. J., 2000, Modal Testing : Theory, Practice and Application(2nd edition), Research Studies Press Ltd.
- (4) 한국전력공사, 2005. 12, “송전공사용 모듈형 발발침 개발” 협력연구개발과제 최종보고서(KEPCO-04-C28).