

비계 구조물의 구조해석 및 진동 특성

Structural Analysis and Vibration Characteristics of Scaffolding Structures

류 봉 조† · 이 창 노* · 김 후 식**

B. J. Ryu, C. R. Lee and H. S. Kim

(2009년 3월 4일 접수 ; 2009년 4월 17일 심사완료)

Key Words : Vibration Characteristics(진동특성), Scaffolding Structure(비계 구조물), Modal Testing(모달시험), Structural Analysis(구조해석)

ABSTRACT

This paper deals with structural analysis and 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 280 kgf 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. 서 론

비계(scaffolding)란 사다리 끝에 요철과 같은 연결부품을 두어 이 사다리를 길이방향으로 연결하면 긴 사다리가 되고, 눕히면 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.

최근 원자력 및 중화학 설비의 사용 기간이 장기화됨에 따라 설비의 열화가 가속되어 부품 정비의

필요성이 날이 갈수록 증가되고 있으며 정비에 필수적인 비계를 설치하는 기간 또한 정비기간을 결정하는 중요 요소의 하나가 되고 있고 산업설비의 정비 및 건설에 소요되는 비계를 신속하고 안전하며 정확하게 설치/해체 할 수 있는 다기능 비계의 개발 및 안정성 확보는 현재 상황에서 필수적이다.

근래 비계의 몸체에 호이스트가 이동하는 롤러 가이드의 기능을 부여함으로써 많은 양의 비계를 적재하거나 고소작업일 경우 호이스트가 하중을 견디지 못하는 사례가 있어 왔고, 호이스트 이동 시, 비계 전체의 진동에 의하여 작업자가 불안정한 상황에 처할 수 있었으며, 호이스트가 설치되어 있음에도 불구하고, 고소작업의 경우 작업자가 직접 손으로 자재를 전달하여 작업시간 지연에 따른 인건비 상승의 문제점이 있어 왔다.

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

† 교신저자; 정회원, 한밭대학교 기계공학부

E-mail : bjryu701@hanbat.ac.kr

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

* 우석대학교 기계자동차공학과

** (주)한밭

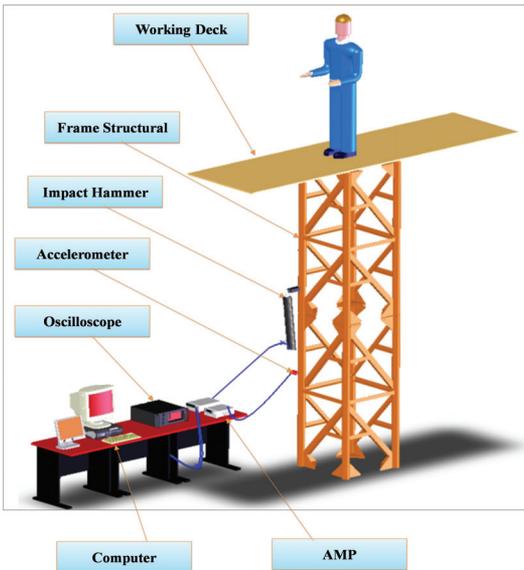


Fig. 1 Schematic diagram for scaffolding structure

적재되는 정적 부하하중에 대한 정적 안전성 문제에 있어서는 제작 시 안전을 등을 고려하기 때문에 커다란 문제점은 없다.

그러나, 발전설비 등⁽⁹⁾과 같이 고소작업을 하는 경우, 부하하중의 이동 또는 비계에 부착된 호이스트의 이동 시 발생하는 진동의 문제는 그동안 꾸준히 문제점으로 지적되어 왔고, 대단히 중요한 문제임에도 불구하고, 이러한 진동특성의 명확한 규명이나 분석을 통한 연구는 거의 없는 실정이다.

이 연구는 건설공사, 발전설비 구축 등 고소작업에 필요한 비계구조물의 이동 하중부하에 따른 구조해석과 진동특성을 살펴본 논문으로서, 연구의 목적은 첫째, 유한요소법을 이용한 ANSYS package를 사용하여 정하중을 받는 비계 구조물의 구조해석을 통해 그 안전성을 검증하고, 둘째, 호이스트와 같은 이동 적재 하중이 부과되는 경우의 비계 진동특성을 연구하는데 있다⁽¹⁻⁸⁾. 그러므로 비계 구조물에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있다고 판단된다.

Fig. 1은 고소작업에 이용되는 비계 구조물의 개략도를 나타낸다.

2. 2단 비계구조의 진동해석

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

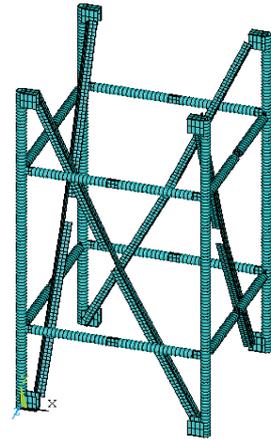


Fig. 2 FE model for 2-step scaffolding structure

Table 1 Specifications 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 ν		0.29

2단(2 m) 비계구조에 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. 2는 2단 비계구조의 구조해석 모델을 보여준다. Fig. 2에서 수직 프레임은 바닥과 고정단의 경계조건을 부여하였으며, 그림에서 보는 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.

Fig. 3과 Fig. 4는 2단 비계구조의 Y-Z 평면상에서의 1차와 2차 굽힘 진동모드를 나타낸다. 1차

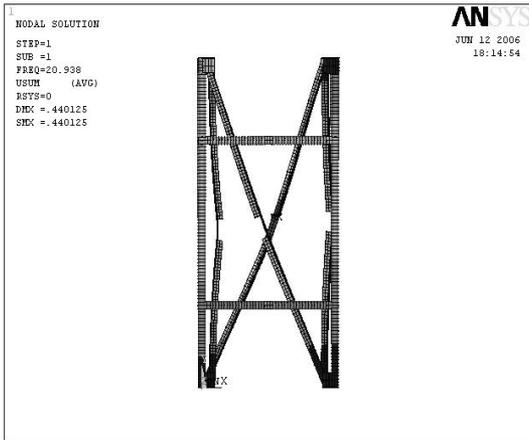


Fig. 3 1st bending mode for 20.938 Hz

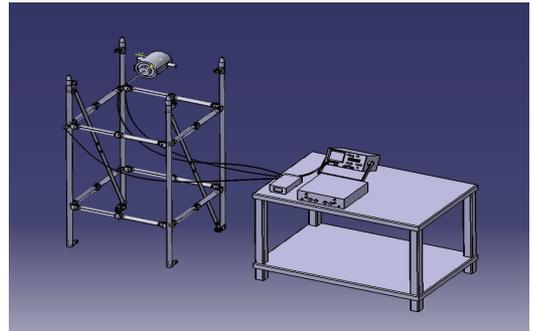


Fig. 5 Experimental setup for modal testing

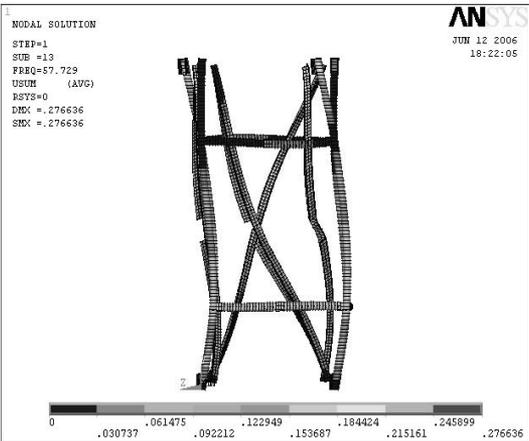


Fig. 4 2nd bending mode for 57.72 Hz



Fig. 6 Photograph of modal testing for 2-step scaffolding structure

굽힘과 2차 굽힘모드들 사이에 국부적인 비틀림 모드와 회전 모드들이 나타나지만, 이 논문에서는 굽힘에 관계된 모드들만을 그림에서 나타내었고, 국부 모드들은 실험과의 비교 시에 나타내었다.

3. 실험장치 및 실험

2단 비계구조의 진동해석 결과의 실험적 검증을 위해 Fig. 5와 같은 실험장치를 구성하였고, Fig. 6은 실험장치 및 실험전경을 나타내는 사진이다.

실험은 첫째, 2단 비계구조의 횡 방향으로 가진기에 의해 가진을 하게 되면 응답 가속도 신호를 가속도계로 측정한다. 둘째, 측정한 가속도 신호는 그 신호 자체가 미소하므로 증폭기(amplifier)를 통

해 증폭되며, 이 증폭된 출력 신호는 디지털 메모리 오실로스코프 상에 모니터링 된다. 셋째, 모니터링된 신호를 컴퓨터와 연결하여 프린터를 통해 출력하여 진동분석을 행하였다.

Fig. 7은 실험으로부터 얻은 2단 비계구조의 고유진동수에 대한 그림을 보여준다. Fig. 5에서 가로축은 진동수 축, 세로축은 전달함수로서 입력에 대한 출력의 비를 나타내며, 단위는 1/kg이다.

Fig. 7의 실험결과에 나타난 진동수들을 살펴보면 1차 및 2차 굽힘진동 모드에 해당하는 진동수가 각각 20.79 Hz, 58.70 Hz로 사료되며, 다른 진동수들은 국부적인 비틀림이나 회전 등에 관계된 모드들에 해당되는 것으로 판단된다. 또한, 실험 데이터에 있어 16.61 Hz가 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 판단되었다. 즉, 보조 사선보를 설치 함으로 인하여, 다양한 모드들의 합성이 나타나기 때문일 것으로 사료된다.

Table 2는 2단 비계구조에 대해 진동 시뮬레이션 과 실험으로부터 얻은 고유진동수를 비교한 표이다. 시뮬레이션 모델과 같이 보조사선보 등을 설치한 모델은 다수의 진동모드들이 나타남을 알 수 있는 데, 실험값과의 비교를 위해 굵힘진동수 1, 2차와 몇몇 국부 비틀림과 회전에 관계된 모드들에 관련 된 진동수만을 비교한 것이다. 실험에 있어 특히, 2 차 굵힘 모드에 대한 진동수 58.70 Hz는 전달함수 에 있어 미소한 크기를 보임을 알 수 있는데 이는 실험에 있어 가진을 주는 위치와 응답위치가 굵힘 진동에 있어 구조물의 절점(node point)부근에 근접 함으로 인하여 미소한 크기를 보이고 있다고 사료 된다.

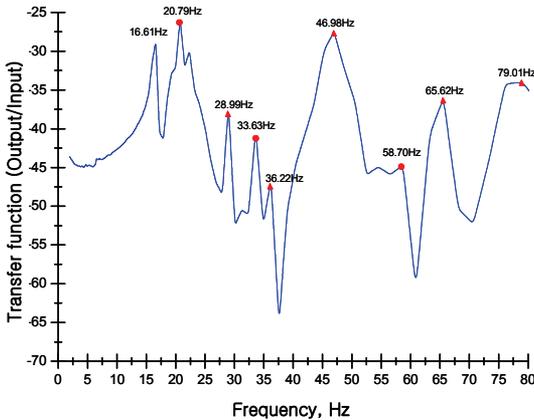


Fig. 7 Experimental natural frequencies of 2-step scaffolding structure

Table 2 Comparison theoretical results with experi- mental 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 2의 결과비교를 통해 실험값과 시뮬레이션 결과 값이 최대 4 % 이내 오차를 보이지만, 2단 구조물의 국부모드들의 영향과 실험 시 경계조건이 수치시뮬레이션의 경계조건과 완전히 일치하지 않는 등의 상황을 고려할 때, 이 연구에서 설정한 2 단 비계구조의 모델설정은 비교적 타당함을 보여주었다고 판단된다.

4. 정하중 부과에 따른 구조해석 (20단-비계)

2단 비계구조의 진동해석결과와 실험결과를 토대 로 이 연구에서 설정한 2단 비계구조 모델 설정에



Fig. 8 Finite element model for 20-step scaffolding structure

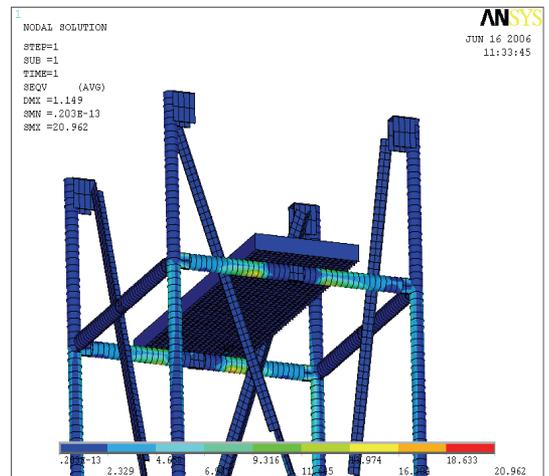


Fig. 9 Stress distribution of 20-step scaffolding structure under static load

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. 8은 20단 비계구조의 해석 모델을 보여주고 있으며, Fig. 9는 20단-비계 구조물의 자중과 맨 상단의 받침대 위에 75 kg의 4인 정하중이 부과될 때에 대한 응력분포를 나타낸 그림으로 해석결과 최대 응력은 20.962 Mpa로 steel의 항복응력 기준 내의 값으로 정하중에 대해 안전한 것으로 판단되었다. 최대응력은 상단부의 작업자가 딛고 있는 발판 바로 밑의 비계구조물의 가로요소에서 발생하는 것으로 나타났다.

5. 이동하중 부과에 따른 진동해석 (20단-비계)

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

이 경우 이동하중의 크기는 각각 50 kg과 100 kg의 경우로 나누었으며, 이동하중이 없는 경우에 대해서도 동특성을 파악하였다. 또한 이동하중의 위치 변화는 50 kg의 이동하중의 경우에 대해서만 20단 비계구조의 하단부터 0.5 m 높이부터 맨 상단까지 0.5 m 간격의 수직위치에서 진동특성을 파악하였다.

5.1 이동하중이 없는 경우

이동하중이 없는 20단 비계구조의 진동해석에 있어서의 시뮬레이션 결과들은 Fig. 10부터 Fig. 15에 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, 3차)일 경우에 그런 현상이 두드러진다. 그러나 모드가 4차 이상으로 진행되면 보조사선보의 여러 가지 혼합 모드들이 나타날 것으로 판단된다.

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

림 모드, Fig. 14와 Fig. 15는 각각 3차 굽힘과 비틀림 모드형상을 보여주고 있다.

따라서, 고단 비계구조물을 이용하여 고소작업을 하는 경우, 이러한 비계구조의 저차 고유진동수들과 외력의 진동수들이 근접함으로 발생하는 공진현상을 피하기 위해서는 이 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 판단되었다.

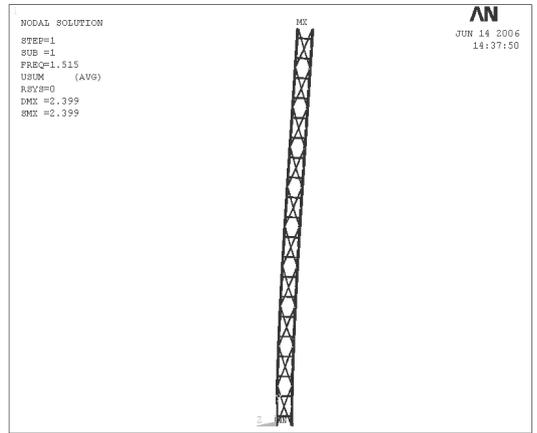


Fig. 10 1st bending mode(1.515 Hz)

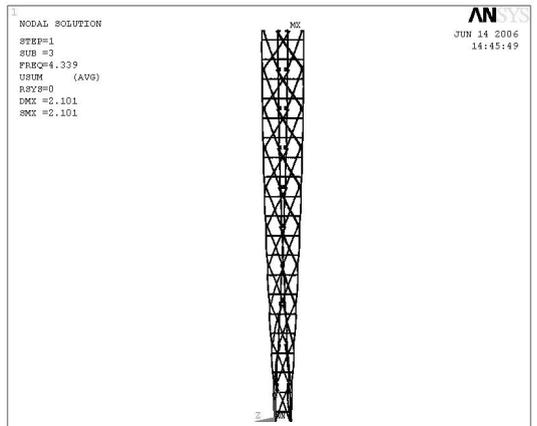


Fig. 11 1st twisting mode(4.339 Hz)

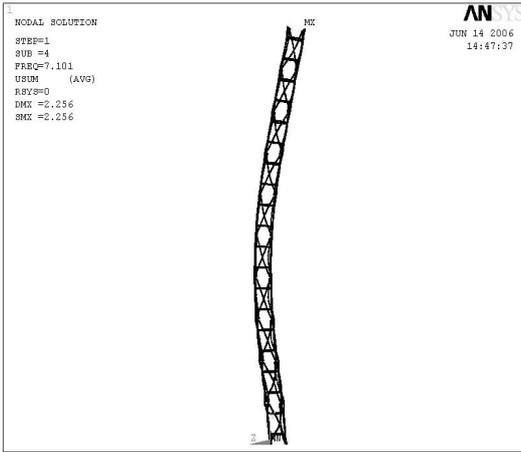


Fig. 12 2nd bending mode(7.101 Hz)

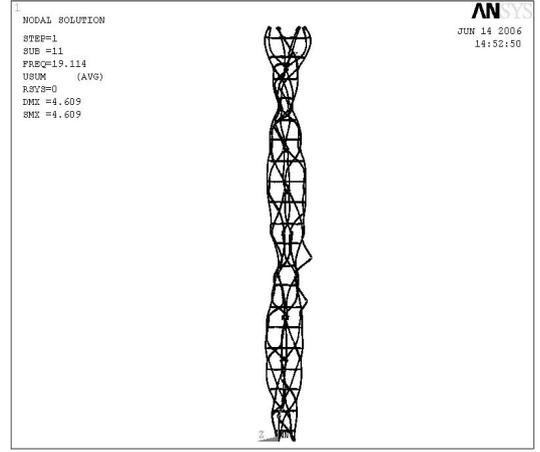


Fig. 14 3rd twisting mode(19.114 Hz)

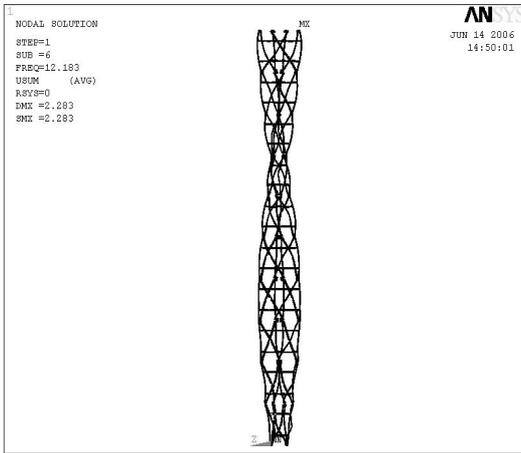


Fig. 13 2nd twisting mode(12.183 Hz)

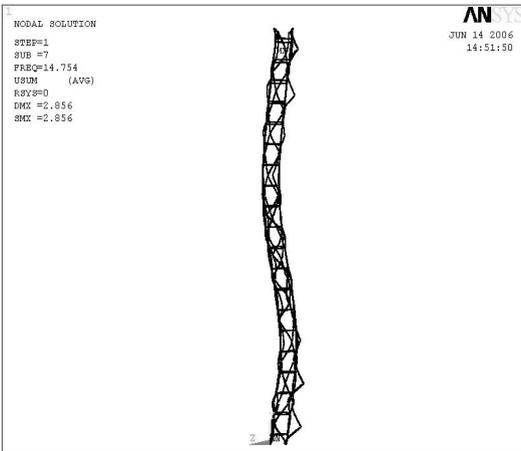


Fig. 14 3rd bending mode(14.754 Hz)

5.2 이동하중이 있는 경우

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

(1) 이동하중이 0.52 m에 위치한 경우

20단 비계 구조의 하단으로부터 0.52 m부분에 이동하중이 있을 때의 고유진동수의 변화를 Table 3에서 보여주고 있다.

(2) 이동하중이 10.02 m에 위치한 경우

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 kg에서 150 kg으로 증가됨에 따라 감소됨을 알 수 있다. 그러나, 이 경우도 이동하중이 없는 경우에 비해서는 이동하중이 있는 경우의 고유진동수들이 큰 값을 보이고 있는데, 이는 이동하중을 비계의 하부로

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

	No load(Hz)	50 kg load(Hz)	100 kg load(Hz)	150 kg 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

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

	No load(Hz)	50 kg load(Hz)	100 kg load(Hz)	150 kg 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

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

	No load(Hz)	50 kg load(Hz)	100 kg load(Hz)	150 kg 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

부터 상부로 올리는 경우 이동하중을 잡고 있는 부분의 강성의 영향이 100 kg 이동하중의 크기 영향보다 고유진동수 변화에 크게 미치는 것으로 사료된다.

(3) 이동하중이 19.52 m에 위치한 경우
20단 비계 구조의 하단으로부터 19.52 m부분에 이동하중이 있을 때의 고유진동수의 변화를 Table

5에서 보여주고 있다.

Table 5에서도 Table 3 및 Table 4에서와 마찬가지로 이동하중이 존재할 때, 1차부터 3차까지의 고유진동수들이 이동하중의 크기가 50 kg에서 150 kg으로 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.

6. 결 론

비계구조물의 구조해석과 진동특성에 대한 실험 및 계산결과 얻은 결론은 다음과 같다.

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

둘째, 20단-비계구조의 정하중에 의한 구조해석을 통해 비계 자중과 비계 상단 발판 쪽에 280 kg의 정하중 작용 시, 최대응력은 항복응력내의 값으로 나타남으로 정하중에 의한 구조안전성은 타당하다고 판단되었다.

셋째, 20단-비계구조의 진동해석은 이동하중을 적재한 경우와 적재하지 않은 경우로 나누어 해석하였으며, 이동하중이 있는 경우는 이동하중의 크기가 각각 50, 100, 150 kg에 대하여, 이동하중의 위치는 비계 하단으로부터 0.52, 10.02, 19.52 m일 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

이 논문은 2005년도 산학연 공동기술개발 지역권 소기업사업 수행결과이며, 지원을 아끼지 않으신 관계기관에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Seglind, L., 1984, Applied Finite Element Analysis, 2nd edition, New York, John Wiley & Sons.
- (2) Zienkiwicz, O. C. and Taylor, R. C., 1989, "The Finite Element Method," 4th edition, McGraw-Hill Company.
- (3) Genta, G., 1993, "Vibration of Structures and Machines," Springer-Verlag.
- (4) Meirovitch, L. M., 1997, "Principles and Techniques of Vibrations," Prentice-Hall.
- (5) Woods, R. L. and Lawrence, K. L., 1997, "Modeling and Simulation of Dynamic Systems," Prentice-Hall International, Inc.
- (6) Noaveni, S. 1999, "Finite Element Analysis," Prentice-Hall Company.
- (7) Ewins, D. J., 2000, "Modal Testing : Theory, Practice and Application(2nd edition)," Research Studies Press Ltd.
- (8) Hong, S. J., Yoo, J. H., Kim, Y. Y., Lee, D. J. and Lee, S. W., 2004, "The Dynamic Characteristics of Bolt Jointed Plates Using the Finite Element Method," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 990~998.
- (9) KEPCO, 2005, "Development of Module-type Footboard for Power Transmission Construction," Final Report of Joint Research Development Project, KEPCO-04-C28.