

구조물의 소형화가 볼트 결합부의 동특성 파라미터에 미치는 영향 분석

김봉석*, 이성민*, 이수훈#, 송준엽**, 이창우**

Effect of Scale-down of Structure on Dynamic Characteristic Parameters in Bolted-Joint Beams

Bong-Suk Kim*, Seong-Min Lee*, Soo-Hun Lee#, Jun-Yeob Song** and Chang-Woo Lee**

ABSTRACT

To overcome many defects such as the high product cost, large energy consumption, and big space capacity in conventional mechanical machining, the miniaturization of machine tool and micro factory systems has been envisioned recently. The object of this paper is to research the effect of dynamic characteristic parameters in bolted-joint beams, which is widely applied to the joining of mechanical structures in order to identify structural system characteristics and to predict dynamic behavior according to scale-down from macro to micro system as the development of micro/meso-scale machine tool and micro factories. Modal parameters such as the natural frequency, damping ratio, and mode shape from modal testing and dynamic characteristics from finite element analysis are extracted with all 12 test beam models by materials, by size, and by joining condition, and then the results obtained by both methods are compared.

Key Words : Bolt joint (볼트 결합), Scale-down (소형화), Dynamic characteristic parameter (동특성 파라미터), Modal analysis (모달 분석), Finite element analysis (유한요소 해석)

1. 서론

지금까지 대부분의 대규모 플랜트와 매크로 기계 시스템에서는 비효율적인 에너지 소비와 유연하지 못한 대응성 등의 문제점들이 노출되었고 기계 장비와 과학 기술이 진보됨에 따라 각종 제품과 구성품들의 마이크로/메조(micro/meso) 크기로 소형화를 구현시키기 위해 새로운 제조 공정과 가공 기술이 계속 개발되어 진보되고 있다.^{1,2}

현재 마이크로 부품, 구성품, 시스템을 생산하기 위한 기술로 재료와 형상에 제한이 없는 마이크로/메조 레벨의 기계적인 가공은 다이아몬드 터닝, 마이크로 밀링, 마이크로 드릴링, 마이크로 그라인딩과 같은 초정밀 기계 가공과정에 의해서 이루어진다. 이 방법은 높은 정확도로 마이크로/메조 크기의 구성품과 형상을 생산할 수는 있지만 필수 정확도를 유지하기 위한 공간과 에너지가 커 생산비가 높아지는 경향이 있다. 이러한 초정밀 가공

접수일: 2006년 9월 20일; 게재승인일: 2006년 12월 26일

* 아주대학교 대학원 기계공학과

교신저자: 아주대학교 기계공학과

E-mail slee@ajou.ac.kr Tel. (031) 219-2954

** 한국기계연구원

공정들의 결점을 극복하고 고정밀 미세 부품과 마이크로 가공을 위하여 마이크로/메조 공작기계 및 마이크로 팩토리(micro factory) 개발이 활발히 진행되고 있다. 이는 신개념의 생산 시스템으로 소비자가 원하는 제품을 현장에서 신속히 제조할 수 있기 때문에 공간, 에너지, 노동력을 효과적으로 절감하고 효율적으로 시스템을 유지하도록 한다.³

마이크로/메조 공작기계 및 마이크로 시스템이 개발되면서 반드시 고려되어야 할 분야 중 하나가 구조물의 소형화에 따른 구조적 특성과 동적 거동에 대한 영향을 규명하는 것이다. 초기의 마이크로 공작기계는 기존 매크로 공작기에 마이크로/메조 크기의 공구를 부착한 시스템이 대부분이었지만 지금은 요소기술과 주변기술의 발달로 시스템이 소형화되어 제작되고 있다. 그러나 불행하게도 현재까지 구조 소형화에 따른 동적 해석에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 매크로 시스템에서 축적된 구조 특성과 마이크로 시스템의 동적 거동에 대한 상호 적용에 대한 검증이 시급하다. 따라서 앞으로 개발될 마이크로/메조 시스템에 대한 동적 성능을 예측하기 위한 동적 시험과 구조 해석은 설계와 개발을 위해서 반드시 필요한 과정이다.

본 연구에서는 매크로 시스템에서 마이크로 시스템으로 크기가 소형화될 때 볼트결합 구조물의 동특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 볼트 결합부는 기존 매크로 기계 구조물에서 대부분 결합방식에 사용될 뿐만 아니라 높은 정밀도를 요구하는 소형 머신 구조물의 부분간 결합에도 널리 적용되고 있다. 이러한 볼트 결합부는 소형 시스템의 구조 특성상 시스템에 많은 영향을 주게 되어 동적 특성 파악과 동적 거동 예측이 매우 중요하게 고려되고 있다. 볼트결합 구조물을 적용하기 위하여 매크로(macro), 중간(mid), 마이크로(micro)의 크기, SS41 과 Al6061-T651 의 재질, 단일 구조(monolithic)와 볼트결합구조(bolt-jointed)에 따른 모델의 시험 시편을 제작하였다. 시험 시편에 대한 모달시험(modal testing)을 통해 시스템의 고유진동수, 감쇠비, 모드형상의 특성 파라미터를 얻었고 또한 시험과 동일한 조건으로 유한요소 해석(finite element analysis)을 수행하여 시스템의 동특성을 파악하였다. 매크로 크기에서 마이크로 크기로 감소되면서 크기에 따른, 결합구조에 따른, 재질에 따른 동특성 파라미터의 영향을 비교분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 보의 진동

Fig. 1에서 보(beam)의 진동은 보의 길이방향에 대해 수직방향의 운동으로 이러한 진동을 굽힘진동(bending vibration)이라 한다. 보 요소에서 $M(x,t)$ 는 굽힘모멘트, $V(x,t)$ 는 전단력, $f(x,t)$ 는 보의 단위 길이당 외력, ρ 는 밀도, $A(x)$ 는 보의 단면적, $w(x,t)$ 는 z 방향으로의 변위이다. 수직방향으로의 힘 운동방정식과 모멘트 운동방정식을 간단히 정리하면 식 (1)과 같다.^{4,5}

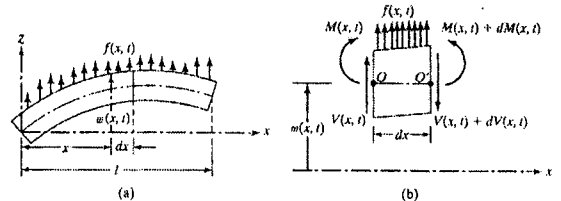


Fig. 1 Bending vibration

$$-\frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2} + f(x,t) = \rho A(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

계에 작용하는 외력이 없는 균일(uniform)한 보라 가정하고 보의 굽힘 모멘트와 변위 사이의 관계식을 식 (1)에 대입하면 자유진동 하는 보의 방정식이 된다.⁴ 여기서, E 는 보의 탄성계수이고 I 는 보 단면의 y 축에 관한 관성모멘트이다.

$$c^2 \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2)$$

식 (2)를 만족하는 보 모델을 Euler-Bernoulli 보 이론 또는 얇은 보(thin beam) 이론이라 한다. 식 (2)의 해는 변수분리법(separation of variables)을 통해 구할 수 있다.

$$\frac{c^2}{W(x)} \frac{d^4 W(x)}{dx^4} = -\frac{1}{T(t)} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} = a = \omega^2 \quad (3)$$

여기서 변수분리 상수 $a = \omega^2$ 은 양의 상수로 시스템의 고유진동수와 관계가 있다. 식 (3)에서 공간 방정식은 다음의 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{d^4 W(x)}{dx^4} - \beta^4 W(x) = 0, \quad \beta^4 = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (4)$$

식 (4)를 풀기 위해서는 해를 가정하여야 하며 계의 경계조건이 요구된다. 양끝이 자유단인 굽힘 진동하는 보의 고유진동수 식은 다음과 같다.

$$\omega_n = \frac{(\beta_n l)^2}{2\pi^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (5)$$

Fig. 2 는 단위길이당 외부 토크 $f(x,t)$ 를 받는 불균일한 축을 나타내고 있다. 여기서, $\theta(x,t)$ 가 단면의 비틀림각, G 는 전단계수, $GJ(x)$ 는 비틀림 강성, $J(x)$ 는 원형 단면의 극관성 모멘트를 나타낸다. 단위 길이당 외부 토크 $f(x,t)$ 가 축에 작용할 때 운동방정식은 식 (6)과 같다.^{4,5}

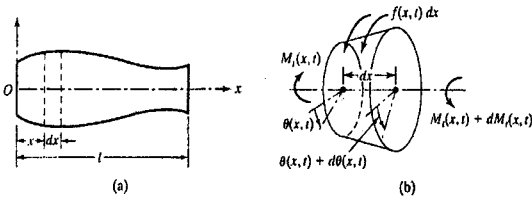


Fig. 2 Torsional vibration

$$(M_i - dM_o) + f dx - M_o = I_0 dx \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (6)$$

여기서 I_0 는 축의 단위길이당 질량 극관성 모멘트이다. 일정한 단면의 자유진동하는 균질조건에서 비틀림 변형과 비틀림 모멘트 사이의 관계식을 식 (6)과 함께 정리하면 비틀림 진동방정식을 얻을 수 있다. 축의 단면적이 원이 아닐 경우 비틀림 상수 γ 를 J 대신 사용하여 동일한 형태의 운동방정식을 근사적으로 사용할 수 있다.⁵ 양 끝이 자유단인 경우에는 고유진동수 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$c'^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}, \quad c' = \sqrt{\frac{G\gamma}{\rho J}} \quad (7)$$

$$\omega_n = \frac{(\beta_n l)}{2\pi} \sqrt{\frac{G\gamma}{\rho J}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

2.2 모달 해석

가진과 응답 신호 사이의 상호관계에 의한 주파수 응답함수로부터 진동에 관계되는 고유진동수, 모달 감쇠비, 모드형상과 같은 파라미터 값을 추출하는 과정을 실험적 모드해석이라 한다. 시험 구조물의 자유도 수를 결정하기 위하여 많은 경우 공진점의 개수를 자유도(DOF: Degree Of Freedom) 수로 하기도 하는데 이 방법은 고유진동수가 아주 근접해 있거나 중복 고유진동수를 가질 경우에는 적합하지 않게 된다. 파라미터 추출에 용이한 방법으로 커브 피팅(curve fitting)법이 있는데 고려하는 모드 수에 따라 1 자유도법과 다자유도계법이 있다. 1 자유도 커브 피팅법은 우선 주파수 응답함수(FRF: Frequency Response Function)를 각각의 피크치를 포함하는 구간으로 구분하고 공진점 근처에서는 주파수응답이 해당모드가 현저히 우세하다는 가정하에서 1 자유도 시스템으로 해석한다.

Fig. 3 의 주파수 응답함수로부터 모달 감쇠비를 구하기 위해서는 공진상태에서 $|H(\omega)|$ 의 피크치가 날카롭게 뻗어 올라가는 경감쇠시스템의 경우에 모달 감쇠비 ζ 는 다음 조건을 만족하는 두 점에서 주파수와와의 관계로부터 구할 수 있다.⁴

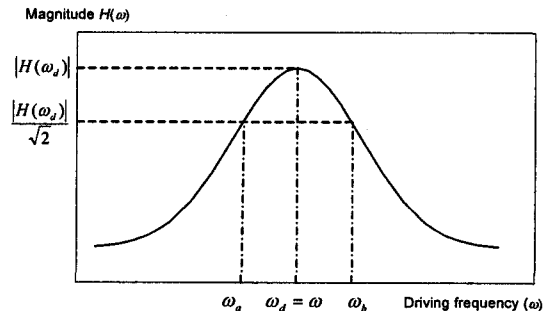


Fig. 3 FRF of 1 DOF

$$|H(\omega_a)| = |H(\omega_b)| = \frac{|H(\omega_d)|}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

$\omega_b - \omega_a = 2\zeta\omega_d$ 의 관계에 의해 모달 감쇠비 ζ 를 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\zeta = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_d} \quad (10)$$

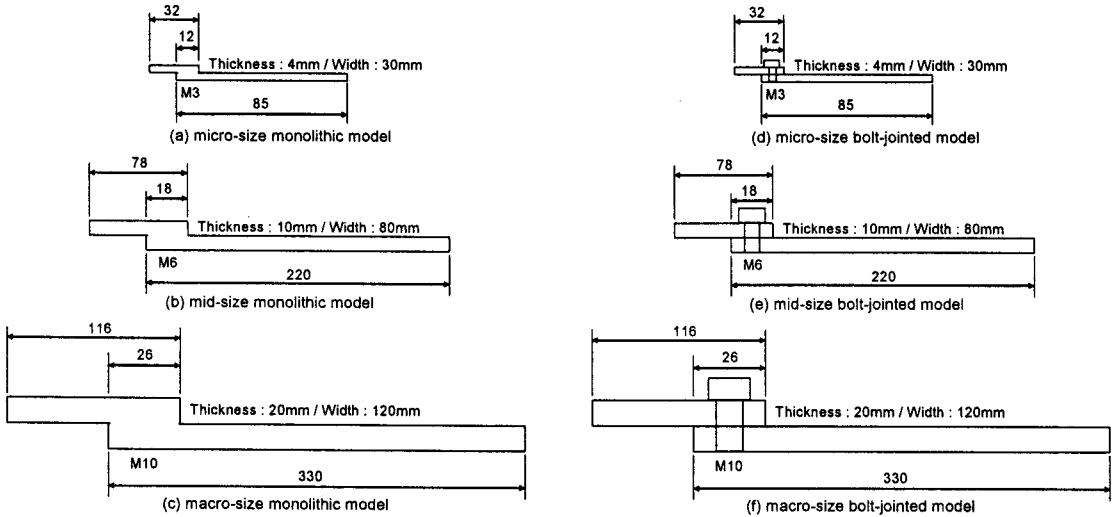


Fig. 4 Schematic diagram of test model

여기서 ω_d 는 감쇠 고유진동수(natural frequency of damped vibration)이며 ω_a 와 ω_b 는 식 (9)를 만족시키는 주파수이다. 대수 스케일에서 $H(\omega_d)/\sqrt{2}$ 는 $H(\omega_d)$ 아래로 3dB 점에 해당되기 때문에 식 (9)를 만족시키는 점을 반동력점(half power point) 또는 3dB 아랫점(3-dB down point)이라고 한다.

3. 실험적 모드 해석

3.1 시험 장치

본 연구에서는 매크로 크기의 볼트결합 구조물이 마이크로 크기로 축소되면서 발생하는 동특성 파라미터의 변화를 규명하기 위하여 매크로, 중간, 마이크로의 세 가지 크기, 단일구조와 볼트결합구조의 결합구조, AL6061-T651 과 SS41 재질의 모두 12 개의 시험 시편 모델을 제작하였다. Fig. 4 는 모달시험과 유한요소 해석에 사용된 시편 모델의 개략도를 보여준다.

모달시험에서 매크로 크기와 중간 크기의 시편 시험에는 임팩트 해머(PCB 086C03)와 가속도계(PCB ICP type 353B15)가 사용되었고 마이크로 크기에는 소형 임팩트 해머(PCB 086D80)와 미니 가속도계(PCB 352C22)를 이용하여 측정하였다. 임팩트 시험법은 한번의 가진으로 고차모드까지 모든 공진점을 찾아낼 수 있고 측정시간이 짧으며 간편한 하드웨어를 이용하는 장점으로 널리 사용된다.^{6,7}

모든 시험 시편은 21 개 지점에서 임팩트 해머로 가진되었고 가속계는 좌표기준점으로부터 가장 먼 지점에 위치하여 응답을 측정하였고 각 지점에서의 가진은 5 번씩 하여 시험의 오차를 줄이도록 하였다. 측정된 시험 데이터는 상용 구조시험 및 분석 소프트웨어 LMS Test.Lab 을 통해 분석되어 각 시험 시편에 대한 고유진동수, 모달 감쇠비, 모드형상의 모달 파라미터를 추출하였다.⁸ 모달시험을 위해 구축된 시험장치는 Fig. 5 와 같다.

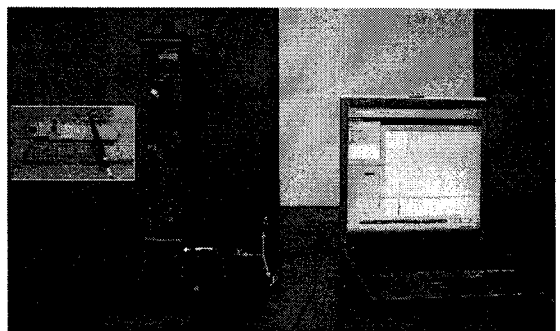


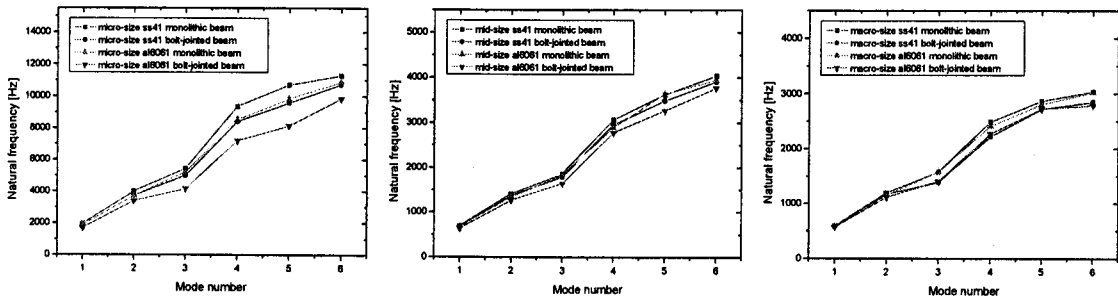
Fig. 5 Test setup

3.2 모달 파라미터의 특성 변화

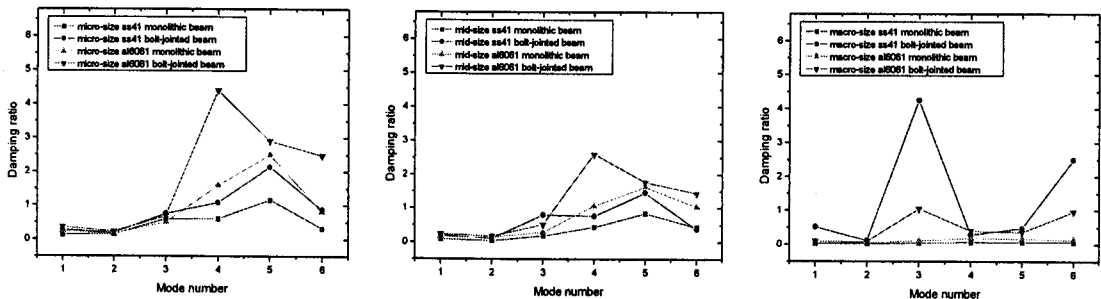
임팩트 시험에 의해 21 개의 가진점으로부터 각각 수집된 주파수 응답함수로부터 추출된 모달 파라미터인 고유진동수와 감쇠비는 6 차 모드까지이며 그 결과를 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Modal parameters of each test model in modal testing

| Micro-size beam | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------------|---------------|------------------------|---------------|------------------------|---------------|--------------------------|---------------|---------------|
| order | ss41 monolithic beam | | ss41 bolt-jointed beam | | a16061 monolithic beam | | a16061 bolt-jointed beam | | damping ratio |
| | Natural frequency | damping ratio | Natural frequency | damping ratio | Natural frequency | damping ratio | Natural frequency | damping ratio | |
| 1 | 1954.57 | 0.14 | 1843.60 | 0.27 | 1862.75 | 0.23 | 1672.85 | 0.36 | |
| 2 | 3992.11 | 0.15 | 3708.95 | 0.20 | 3711.23 | 0.17 | 3379.66 | 0.23 | |
| 3 | 5429.63 | 0.59 | 4989.01 | 0.75 | 5229.72 | 0.50 | 4160.06 | 0.68 | |
| 4 | 9355.89 | 0.60 | 8395.00 | 1.06 | 8518.17 | 1.59 | 7200.73 | 4.40 | |
| 5 | 10722.27 | 1.16 | 9594.45 | 2.14 | 9841.37 | 2.50 | 8141.11 | 2.91 | |
| 6 | 11273.72 | 0.32 | 10709.68 | 0.87 | 10886.10 | 0.82 | 9848.93 | 2.48 | |
| mid-size beam | | | | | | | | | |
| order | ss41 monolithic beam | | ss41 bolt-jointed beam | | a16061 monolithic beam | | a16061 bolt-jointed beam | | damping ratio |
| | Natural frequency | damping ratio | Natural frequency | damping ratio | Natural frequency | damping ratio | Natural frequency | damping ratio | |
| 1 | 688.02 | 0.09 | 670.86 | 0.20 | 678.27 | 0.14 | 637.41 | 0.24 | |
| 2 | 1410.75 | 0.05 | 1368.41 | 0.11 | 1338.64 | 0.14 | 1262.38 | 0.18 | |
| 3 | 1860.94 | 0.19 | 1790.35 | 0.60 | 1829.64 | 0.30 | 1644.29 | 0.52 | |
| 4 | 3069.70 | 0.44 | 2959.76 | 0.76 | 2894.81 | 1.06 | 2780.51 | 2.60 | |
| 5 | 3620.44 | 0.84 | 3487.81 | 1.46 | 3640.16 | 1.63 | 3270.39 | 1.78 | |
| 6 | 4041.52 | 0.44 | 3905.96 | 0.38 | 3946.60 | 1.04 | 3770.73 | 1.44 | |
| macro-size beam | | | | | | | | | |
| order | ss41 monolithic beam | | ss41 bolt-jointed beam | | a16061 monolithic beam | | a16061 bolt-jointed beam | | damping ratio |
| | Natural frequency | damping ratio | Natural frequency | damping ratio | Natural frequency | damping ratio | Natural frequency | damping ratio | |
| 1 | 589.97 | 0.03 | 571.07 | 0.52 | 588.96 | 0.08 | 567.73 | 0.10 | |
| 2 | 1191.54 | 0.03 | 1166.93 | 0.12 | 1149.01 | 0.06 | 1110.38 | 0.09 | |
| 3 | 1577.88 | 0.05 | 1388.17 | 4.25 | 1575.96 | 0.12 | 1403.02 | 1.05 | |
| 4 | 2487.06 | 0.07 | 2221.57 | 0.29 | 2410.16 | 0.19 | 2271.05 | 0.41 | |
| 5 | 2865.84 | 0.07 | 2720.73 | 0.48 | 2805.48 | 0.16 | 2722.30 | 0.36 | |
| 6 | 3033.76 | 0.08 | 2847.14 | 2.50 | 3024.61 | 0.14 | 2784.37 | 0.96 | |



(a) Natural frequency



(b) Damping ratio

Fig. 6 Comparison of modal parameter in each test model

각 시험 시편의 크기, 결합구조, 재질 조건에 따라 모달시험으로부터 추출된 고유진동수와 감쇠비를 비교분석하였다. 동일한 크기의 시편에서는 AL6061-T651 볼트결합구조 모델의 고유진동수가 가장 낮고 SS41 단일구조 모델의 고유진동수가 가장 높으며 동일한 결합구조와 재질의 경우에는 저차 모드에서 고차모드로 갈수록 각 시편들 사이의 차가 더욱 커짐을 알 수 있다. 마이크로 시편의 경우 SS41 단일구조 모델의 고유진동수를 기준으로 AL6061-T651 볼트결합구조 모델의 고유진동수는 약 20%의 평균 오차율로 상당히 큼을 알 수 있다. 감쇠비의 특성을 살펴보면 매크로 크기의 단일구조 시편은 비교적 낮고 일정한 감쇠비를 가지는 반면 시편의 크기가 작아지고 볼트 결합구조에서는 전체적으로 감쇠비가 커지고 단일구조 모델에서 보다 복잡하며 특정 모드에서는 감쇠비가 급격히 커지는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 6 은 동일한 재질과 결합조건에서 각각의 크기에 따른 고유진동수와 감쇠비의 특성 변화를 보여주고 있다. 시험에 의한 주파수 응답함수와 추출된 모달 파라미터를 통해 모드 합성된 주파수 응답함수는 90% 이상의 정확도를 보여준다.

4. 유한요소 해석

4.1 모델링

기계 시스템의 정확한 동특성을 얻기 위해서는 시험적 방법이 가장 정확한 것이 사실이지만 대상 시스템이 실존해야만 가능한 방법이다. 그러나 유한요소법에 의한 해석적 방법은 대상물이 존재하지 않는 초기 설계시나 시작품을 제작하기 전에 다양한 모델에 대해 구조적 문제점을 검토할 수 있고 동적 거동을 예측할 수 있다는 커다란 장점 때문에 널리 이용되고 있다.

12 개의 시편 모델에 대하여 수행된 유한요소 해석 결과와 모달시험을 통해 추출된 고유진동수와 모드형상을 비교하였다. 유한요소 해석시 단일구조 모델의 경우는 SOLID 모델의 CHEXA 요소를 통한 해석과 PSHELL 모델을 바탕으로 상판과 하판이 겹쳐지는 부분을 강체보요소(rigid bar element) RBE2 로 취급한 해석의 두 가지 방법으로 수행하였다. 볼트결합구조 모델에 대한 해석에서는 PSHELL 모델을 바탕으로 볼트결합부에 강체보요소인 RBE2 요소를 적용한 방법과 CBEAM 요소를

적용한 방법 두 가지로 하였다.

본 연구에서는 볼트 결합부의 복잡한 구조와 기하학적 형상에 대하여 엄밀하게 모델링하기 보다는 실용적인 단순화 모델을 통해 크기, 결합구조, 재질 각각에 대하여 볼트결합 구조물에서의 동특성을 알아 보았다. Fig. 7 은 유한요소 해석을 위한 네 가지의 유한요소 모델링을 보여주고 있다.

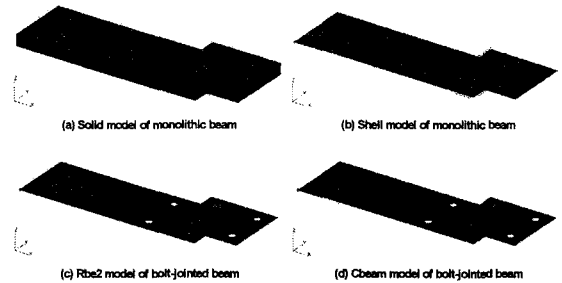


Fig. 7 Modeling of monolithic and bolt-jointed model

4.2 유한요소 해석 결과

유한요소 해석은 상용 구조해석 프로그램 NASTRAN 을 이용하였고 경계조건은 시험과 동일하게 자유조건으로 하였으며 해석에 적용된 SS41 과 AL6061-T651 의 물성치를 Table 2 에 나타내었다.⁹ 모달시험에서처럼 시스템의 특성 파라미터인 고유진동수와 모드형상은 6 차 모드까지 추출하였고 Table 3 에 정리하였다.

Table 2 Material Properties

| Properties | SS41 | AL6061-T651 |
|------------------------------|------|-------------|
| Density (g/cm ³) | 7.85 | 2.7 |
| Modulus of Elasticity (GPa) | 200 | 68.9 |
| Poisson's ratio | 0.26 | 0.33 |

모달시험에서 얻어진 단일구조 모델의 고유진동수를 기준으로 유한요소 해석 결과를 비교해보면 매크로 크기에서는 두 재질 모두 CHEXA 요소를 이용한 해석이 PSHELL 을 바탕으로 RBE2 요소 결합을 이용한 해석보다 정확하기는 하지만 두 방법 모두 평균 오차율 3.5% 이하로 정확한 결과를 보여준다고 할 수 있다.

Table 3 Natural frequencies of each test model in finite element analysis

| Micro-size beam | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------|---------|------------------------|---------|-------------------------|---------|--------------------------|---------|
| order | Monolithic chexa(solid) model | | Monolithic shell model | | Bolt-jointed rbe2 model | | Bolt-jointed cbeam model | |
| | ss41 | al 6061 | ss41 | al 6061 | ss41 | al 6061 | ss41 | al 6061 |
| 1 | 1909.4 | 1917.6 | 1936.5 | 1944.6 | 1843.2 | 1848.9 | 1371.1 | 1659.2 |
| 2 | 3932.4 | 3839.8 | 3996.9 | 3903.3 | 3780.5 | 3691.5 | 3087.5 | 3630.2 |
| 3 | 5323.0 | 5361.9 | 5543.5 | 5580.6 | 4783.6 | 4808.8 | 3716.3 | 3645.4 |
| 4 | 9156.5 | 8966.9 | 9366.0 | 9173.3 | 8326.0 | 8157.3 | 6190.4 | 7497.7 |
| 5 | 10349.0 | 10428.0 | 10911.0 | 10983.0 | 9246.5 | 9296.3 | 7650.8 | 8040.5 |
| 6 | 11055.0 | 10999.0 | 11148.0 | 11099.0 | 10054.0 | 9974.0 | 8517.0 | 8808.9 |
| Mid-size beam | | | | | | | | |
| order | Monolithic chexa(solid) model | | Monolithic shell model | | Bolt-jointed rbe2 model | | Bolt-jointed cbeam model | |
| | ss41 | al 6061 | ss41 | al 6061 | ss41 | al 6061 | ss41 | al 6061 |
| 1 | 663.5 | 666.2 | 672.1 | 674.6 | 642.4 | 643.7 | 374.6 | 509.2 |
| 2 | 1377.8 | 1344.6 | 1399.3 | 1385.7 | 1355.8 | 1322.8 | 1042.7 | 1170.9 |
| 3 | 1811.6 | 1824.8 | 1880.2 | 1892.8 | 1650.3 | 1654.4 | 1336.6 | 1303.1 |
| 4 | 3045.6 | 2980.0 | 3120.6 | 3053.5 | 2892.1 | 2831.4 | 2237.2 | 2677.3 |
| 5 | 3503.9 | 3531.1 | 3662.5 | 3688.5 | 3230.6 | 3244.5 | 2715.2 | 2833.1 |
| 6 | 3968.1 | 3936.0 | 4030.9 | 4001.5 | 3719.0 | 3687.1 | 2987.1 | 3171.2 |
| Macro-size beam | | | | | | | | |
| order | Monolithic chexa(solid) model | | Monolithic shell model | | Bolt-jointed rbe2 model | | Bolt-jointed cbeam model | |
| | ss41 | al 6061 | ss41 | al 6061 | ss41 | al 6061 | ss41 | al 6061 |
| 1 | 580.5 | 582.7 | 592.5 | 594.5 | 570.6 | 571.7 | 246.6 | 370.7 |
| 2 | 1181.4 | 1152.7 | 1211.2 | 1181.8 | 1162.7 | 1134.3 | 869.6 | 931.5 |
| 3 | 1559.2 | 1589.9 | 1650.0 | 1659.8 | 1467.6 | 1470.1 | 1135.1 | 1110.7 |
| 4 | 2461.8 | 2419.7 | 2552.4 | 2512.2 | 2351.2 | 2318.9 | 1234.4 | 1729.3 |
| 5 | 2817.1 | 2790.4 | 2873.2 | 2842.8 | 2776.3 | 2740.4 | 1655.2 | 2294.1 |
| 6 | 2990.3 | 3011.0 | 3199.3 | 3218.0 | 2804.0 | 2811.0 | 2425.9 | 2548.4 |

시편의 크기가 작은 마이크로 모델에서는 SS41 재질의 경우 PSHELL 을 바탕으로 한 모델이 정확하였고 AL6061-T651 재질의 경우 CHEXA 요소를 이용한 모델이 보다 정확하였다. 그러나 전체적으로 단일구조 모델의 유한요소 해석 결과에 대한 오차는 허용 범위 이내로 만족할 만한 결과로 판단된다. 반면에 볼트결합구조 모델에 대한 유한요소 해석결과를 모달시험 결과와 비교해 보면 매크로 크기에서는 두 재질 모두 RBE2 요소를 이용한 방법이 정확하였고 CBEAM 요소를 이용한 방법은 SS41 과 AL6061-T651 재질에서 각각 33%와 20%의 평균 오차율을 보여주고 있다. 중간 크기의 유한요소 해석 결과에서 두 재질 모두 CBEAM 요소를 이용한 방법의 평균 오차율은 매크로 크기에 대한 결과보다 다소 감소됨을 알 수 있다. 마이크로 크기에서는 SS41 재질의 경우 CBEAM 요소의 경우 22%의 평균 오차율이지만 RBE2 요소를 적용한 방법은 3%의 평균 오차율을 보여주고 있다. 그런데 마이크로 AL6061-T651 재질의 경우는 이전 모델과 다른 특성이 발생되는데 RBE2 요소를 이용한 방

법에서는 10%의 평균 오차율을 보이지만 CBEAM 요소에서는 5%의 평균 오차율로 오히려 CBEAM 요소가 더 정확한 것으로 나타났다.

공작기계와 같은 기계 구조물의 유한요소 해석시 볼트결합구조는 종종 제거되어 하나의 강체 모델(rigid model)로 간주되어 해석이 수행되거나 볼트결합과 같은 결합구조를 구현하기 위하여 높은 강성을 나타내는 강체보요소를 이용하여 해석하는 것이 현재 일반적으로 적용되는 방법이다. 비록 강체로 모델링된 결합 요소를 적용한 유한요소 해석 결과가 시험에서 얻어진 결과보다 다소 커지지만 허용될 수 있는 범위 내에 충분히 존재하기 때문에 널리 이용되고 있는 실정이다.¹⁰

본 연구의 결과를 바탕으로 살펴보면 기존 매크로 크기의 결합 구조물에 적용 가능했던 이러한 RBE2 요소들이 결합 구조물 크기가 소형화됨에 따라 부정확한 결과를 도출해 낼 수 있었다. 또한 매크로 시스템에서는 강성이 낮아 특수한 조건에서 적용할 수 있었던 CBEAM 요소가 소형화된 볼트결합 구조물에 더 적합함을 알 수 있었다.

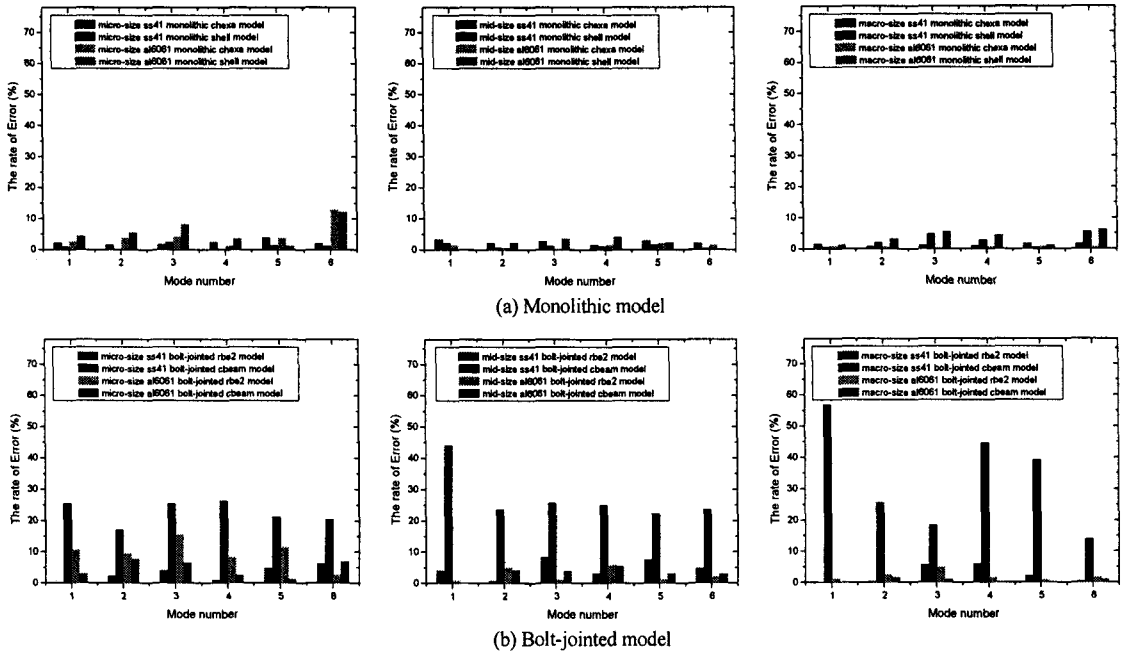


Fig. 8 The rate of error of natural frequency between modal testing and finite element analysis

Fig. 8 은 모달시험으로부터 추출된 고유진동수를 기준으로 각 시편 모델의 유한요소 해석 결과와 비교하여 나타난 오차율을 나타낸 것이다.

마이크로 크기 AL6061-T651 볼트결합구조 모델에서 미니 가속도계의 질량에 대한 영향을 유한요소 해석을 통해 알아보았다. CHEXA 요소와 RBE2 요소를 이용하여 가속도계를 고려한 모델과 고려하지 않은 모델에서의 고유진동수의 평균 변화율은 1.2%로 시험결과에 의한 20% 평균 오차율에 대한 영향에 대해서는 미비한 것으로 판단된다.

상용 스틸 계열 재료의 매크로 시스템이 알루미늄 계열의 마이크로 시스템으로 소형화와 경량화됨에 따라 볼트 결합부에서의 결합강성과 감쇠 특성에 영향을 미치기 때문에 이에 대한 요소 모델을 고려한 유한요소 해석 방법이 요구된다.

4.3 모드형상의 비교

중간 크기의 AL6061-T651 볼트결합구조 모델에 대한 모달시험과 RBE2 요소를 적용한 유한요소 해석을 통해 얻어진 1 차에서 6 차 모드까지의 모드형상을 비교하여 Fig. 9 에 나타내었다. 또한 매크로 크기 시편의 모드형상은 굽힘, 비틀림, 굽힘, 비틀림, 비틀림, 굽힘 모드의 패턴이지만 마이크로와

중간 크기 시편의 모드형상은 굽힘, 비틀림, 굽힘, 비틀림, 굽힘, 비틀림 모드의 패턴을 가진다.

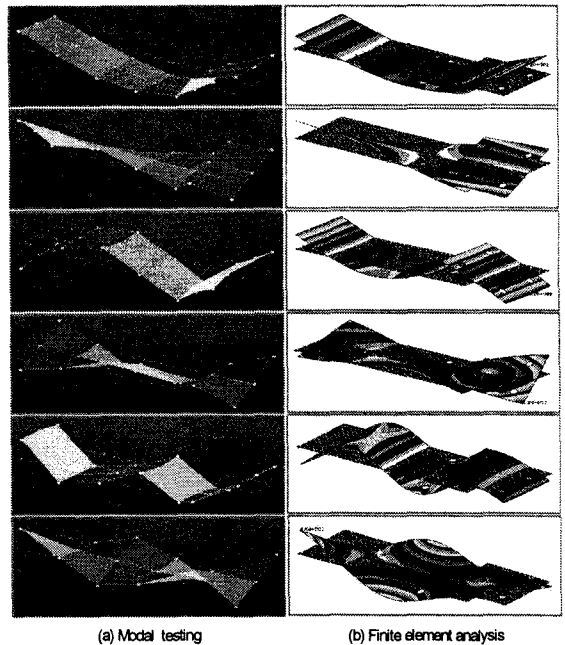


Fig. 9 Comparison of mode shape

마이크로 크기의 AL6061-T651 볼트결합구조 모델의 경우 5 차 모드에서 굽힘과 비틀림이 혼합된 복잡한 모드형상을 보여주기도 하지만 두 결과는 비교적 잘 일치 한다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 마이크로/메조 레벨의 공작기계 및 마이크로 팩토리 개발시 구조물의 소형화에 따른 구조적 특성 변화와 거동 예측을 위하여 볼트결합 구조물에서의 크기에 따른 동특성 파라미터에 대한 영향을 알아보았다.

볼트결합 시험 시편의 특성을 규명하기 위하여 매크로, 중간, 마이크로의 크기에 따른, 단일구조와 볼트결합의 결합구조에 따른, SS41 과 AL6061-T651 의 재질에 따른 모델을 제작하여 모달시험과 유한요소 해석을 수행하여 고유진동수, 감쇠비, 모드형상을 추출하여 특성을 비교하였다.

모달시험 결과로부터 시험 시편이 소형화됨에 따라 볼트로 결합된 구조에 따른 고유진동수의 오차가 커지고 감쇠비는 복잡하게 증가한다. 특히 마이크로 크기의 AL6061 볼트결합구조 모델인 경우 SS41 모델과 비교하여 낮은 결합강성으로 인해 고유진동수가 저하되고 감쇠비가 특정모드에서 급격히 증가된다. 또한 유한요소 해석 결과를 모달시험 결과와 비교해 보면 크기가 작아지면서 두 결과의 오차는 작아지며 마이크로 크기의 AL6061 볼트결합구조 모델에서는 기존 매크로 시스템에서 유용하게 적용되었던 강체보요소 방법을 그대로 적용할 수가 없음을 알 수 있었다. 이는 시스템이 소형화됨에 따라 결합강성이 낮아지고 감쇠비가 증가되면서 발생하는 특성으로 판단되며 이러한 마이크로 기계 시스템의 구조 특성을 고려한 유한요소 해석이 수행되어야 할 것이다.

향후 공작기계와 같은 기계류의 소형화를 완성하기 위해서 설계 단계에서부터 시스템의 동역학적 특성이나 동적 거동을 고려하여 설계하여야 하며 이를 위하여 유한요소 해석의 기준이나 방법론에 대한 체계적인 연구가 시급할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 차세대신기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Park, J. K., "Technical Trends of Micro Factory," Journal of the Korea Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 10, pp.7-14, 2002.
2. Kang, J. H., "Development of Microfactory System for Future Industry," Journal of the Korea Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 10, pp.15-22, 2002.
3. Lee, S. W., "Development and Characterization of Meso-scale Machine Tool Systems," Ph.D. Dissertation, University of Michigan, 2004.
4. Rao, S. S., "Mechanical Vibrations," Prentice Hall Seoul, pp.613-666, 2003.
5. Inman, D. J., "Engineering Vibrations," Prentice Hall Seoul, pp.463-565, 2000.
6. Ewins, E. J., "Modal Testing: Theory, Practice and Application," Research Studies Press Ltd., pp.87-152, 2000.
7. Kobayashi, A. S., "Handbook on Experimental Mechanics," VCH Publisher Inc. New York, pp.635-745, 1993.
8. LMS International, "LMS Test.Lab Theory," Leuven, Belgium.
9. MSC Korea, "MSC/PATRAN Exercise Workshop," Seoul, Korea
10. Hong, S. J., Yoo, J. H. and Lee, D. J., "Prediction of the Dynamic Characteristics of a Bolt-Joint Plates According to Bolting Conditions," Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineers A, Vol. 29, No. 9, pp.1175-1182, 2005.
11. Blevins, R. D., "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape," Van Nostrand Reinhold Company New York, pp.101-200, 2000.