

마이크로팩토리 용 미세방전 공작기계의 고강성/고감쇠 설계

김주호⁺, 장승환^{*}

(논문접수일 2007. 6. 28, 심사완료일 2007. 8. 23)

Design of EDM Machine Tool Structures for Microfactory with High Stiffness and Damping Characteristics

Ju Ho Kim⁺, Seung Hwan Chang^{*}

Abstract

In this paper, foam-composite sandwich structures for EDM machine tool components such as column and column block designed by controlling stacking sequences and cross-sectional dimensions of the composite structures. The original column block is a box-shaped structure made of aluminum connecting a column and a Z-stage of the system. This research was focused on the design of efficient column block structure using a foam-composite sandwich structure which have good bending stiffness and damping characteristics to reduce the mass and increase damping ratio of the system. Vibration tests for getting damping ratio with respect to the stacking angle and thickness of the composites were carried out. Finite element analyses for static deflection and vibration behaviour were also carried out to find out the appropriate stacking conditions; that is, stacking sequence and rib configuration. From the test and analysis results it was found that composite-foam sandwich structures for the microfactory system can be successful alternatives for high precision machining.

Key Words : Microfactory(마이크로팩토리), Sandwich structure(샌드위치 구조), Fiber reinforced composite material(섬유강화복합재료), Damping ratio(감쇠비), Finite element analysis(유한요소해석)

1. 서론

산업과 생활에 사용되는 기계들이 소형화되고 경량화되

는 추세에 따라 구조의 경량화가 성능에 미치는 영향이 커지면서 다양한 산업용기계의 설계를 위한 복합재료의 연구가 더욱 활발해지고 있다. 또한 정밀기계 기술이 발전함에 따라

⁺ 중앙대학교 기계공학부
^{*} 교신저자, 중앙대학교 기계공학부 (phigs4@cau.ac.kr)
주소: 156-759 서울시 동작구 흑석동 221

다양한 공작기계 구조설계에 복합재료가 성공적으로 적용되고 있다. 복합재료는 기존의 금속재료보다 가볍고 더 높은 강성을 가지기 때문에 고속, 정밀거동을 필요로 하는 구조의 제품을 설계하고 제작하는데 중요한 역할을 담당하고 있다. 최근 마이크로(μm) 단위의 기계 부품 가공과 관련된 다양한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 미세 가공기술(micro-machining)과 초소형 마이크로팩토리(microfactory) 등의 분야가 주목을 받고 있다. 이들 소형·초정밀 공작기계들은 기전 시스템(MEMS)과 같이 미세 초정밀 부품을 가공하기 위한 시스템이며, 일반적으로 정밀한 가공을 위해 구동 시 마이크로 미만의 정밀도를 필요로 한다. 밀링머신과 같은 전통적인 공작기계들의 경우 직접 접촉 가공을 하기 때문에 가공 과정에서 접촉에 의한 열과 진동이 발생되어 공작물의 과도한 변형을 유발할 수 있으므로 고 정밀도를 요하는 가공에는 한계가 있다. 반면에 미세방전/전해가공(EDM/ECM: Electro-Discharging Machining /Electro-Chemical Machining)은 비 접촉식 가공 방식으로 마이크로 단위의 복잡하고 정밀한 가공에 있어 적합한 장치들이지만 대부분 강철, 알루미늄과 같이 높은 밀도와 낮은 비강성(specific stiffness) 재료를 사용한 구성 요소들로 이루어졌다.

섬유강화복합재료는 높은 비강성을 가지며, 우수한 감쇠 특성을 가지기 때문에 정밀 기계와 로봇 구조의 설계·제작에 성공적으로 적용되고 있다. 섬유강화복합재료를 공작기계에 적용한 연구들을 살펴보면, Chang 등⁽¹⁾과 Lee 등⁽²⁾은 복합재료와 강철을 이용한 샌드위치 구조로 고정밀 연삭기의 컬럼과 헤드스톡을 설계·제작하였고, Jung 등⁽³⁾은 복합재료와 알루미늄을 이용한 샌드위치 구조를 LCD 유리 판넬 이송장비 설계에 적용하였다. 또 Kim 등^(4,5)은 섬유강화복합재료를 이용한 샌드위치 구조를 공작기계의 컬럼과 스테이지 평판에 적용하기 위한 파라메트릭 연구를 수행하였다.

섬유강화복합재료와 PVC 폼으로 구성된 샌드위치 구조를 공작기계의 구성 요소에 적용하면 기존의 금속 재료에 비해 비굽힘강성(specific bending stiffness)을 높이는 효과를 얻을 수 있으며, 동적강성을 향상시켜 공작기계의 정밀도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 수 마이크로 단위의 가공 정밀도를 가지는 미세 방전·전해가공 기계의 주요 구성 요소인 컬럼과 컬럼블록을 섬유강화복합재료-폼 샌드위치 구조로 설계하였으며, 미세 방전가공 기계의 알루미늄 재질 컬럼과 컬럼블록에 비해 복합재료 샌드위치 구조의 컬럼과 컬럼블록이 구조의 성능을 향상시키는 것을 유한요소해석을 통해 평가하였다.

2. 마이크로팩토리

2.1 마이크로팩토리의 구성

본 연구의 대상인 마이크로팩토리를 구성하는 주요 공작기계들은 미세 방전가공기계와 미세 전해가공기계이다. 각 공작기계는 가공기를 Z방향으로 이송(Z-스테이지 장착)하기 위한 컬럼과 공작물의 평면방향 이송과 가공위치 조정을 위한 X-Y 스테이지 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 이들 구조 중 컬럼과 컬럼블록의 경량 고강성, 고감쇠 설계를 위해 섬유강화복합재료와 폼을 이용하여 구조설계를 수행하였다. Fig. 1은 컬럼과 컬럼블록에 Z-스테이지와 가공기를 포함한 헤드스톡이 장착 되어있는 구조를 나타낸다.

2.2 재료와 물성

본 연구에서 사용한 구조재료는 면재로 두께가 0.125mm인 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그 (USN125, SK Chemical Korea)이며, 심재로는 밀도가 낮은 PVC 폼 (closed cell, divinycell)을 사용하여 전체적으로 경량 샌드위치 구조를 구현하였다. 본 연구에서 사용한 각종 재료의 기계적 물성을 다음 Table 1에 나타내었으며, 일방향 섬유강화복합재료의 적층각도에 따른 영계수의 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

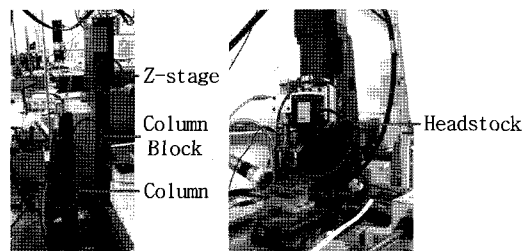


Fig. 1 The existing column-column block system with a Z-stage

Table 1 Material properties

Material	Young's modulus (GPa)	Density (kg/m^3)
USN125 (carbon/epoxy)	E_L 130 E_T 10	1550
PVC foam (HT110)	0.078	110
Aluminum	70	2800

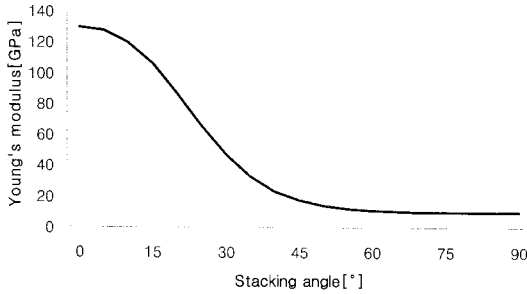


Fig. 2 Young's modulus of USN125 w.r.t. the stacking angle

2.3 감쇠특성 연구

본 연구에서 사용된 섬유강화복합재료의 적층각도에 따른 진동 특성을 확인하기 위해 보 형상의 복합재료 시편을 적층각도에 따라 준비하여 진동 실험을 수행한 결과 Fig. 3 과 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 1차 공진 주파수와 감쇠비가 적층각도에 크게 의존하는 것을 확인하였다. 또한 섬유강화복합재료 샌드위치 시편의 적층각도와 두께비에 따른 감쇠비를 측정하기 위해 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 보 형상의 시편을 준비하여 진동 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 장비는 B&K 사의 FFT analyzer(모델명:B&K3550)와 임팩트 해머(모델명:B&K8202) 그리고 가속도계(모델명:B&K4374)이며, 시편 한쪽 끝단을 실로 고정된 후 공중에 매달아 가진 하였다. 실험을 통해 얻은 주파수응답함수(FRF)를 이용하여 반파워밴드폭 (half-power band width)을 계산(식 (1) 참조)⁽⁶⁾하여 손실계수를 측정하였다.

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \quad (1)$$

η : loss factor

f_1 : the left side frequency of the half power point

f_2 : the right side frequency of the half power point

f_r : the resonant frequency

Fig. 6은 섬유강화복합재료-폼 샌드위치구조의 적층각도와 두께비에 따른 1차 공진주파수를 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 섬유강화복합재료만의 실험결과 (Fig. 3)와 유사한 경향을 가짐을 알 수 있으며, 이는 샌드위치구조의 강성이 면재인 섬유강화복합재료에 크게 의존함을 의미한다. Fig. 7은 샌드위치구조의 진동실험을 통해 얻은 감쇠비를 면재인 섬유강화복합재료의 적층각도와 두께비에

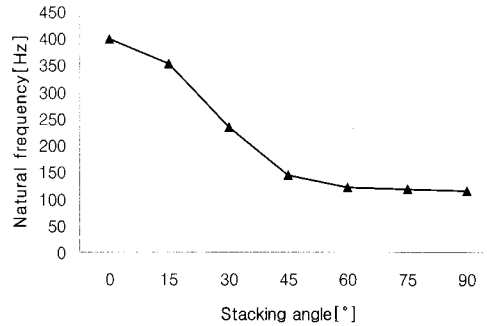


Fig. 3 Natural frequencies of composite beams

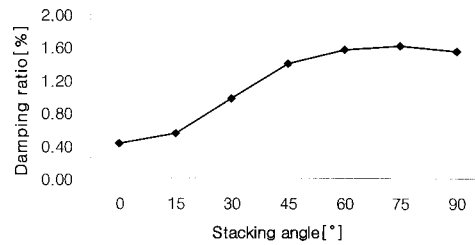


Fig. 4 Damping ratios of composite beams

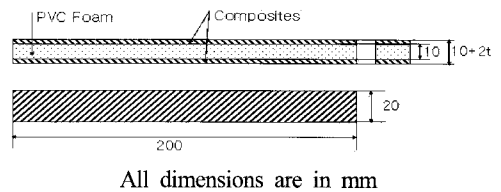


Fig. 5 The shape and dimensions of a foam-composite sandwich beam

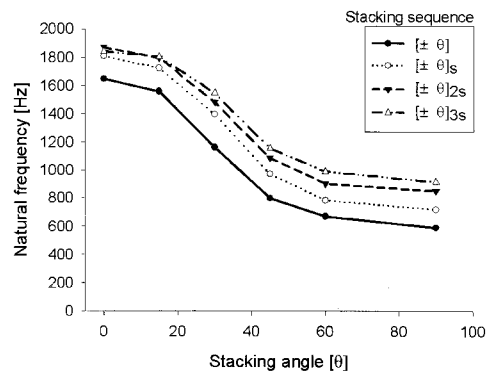


Fig. 6 Natural frequencies of composite-foam sandwich beams

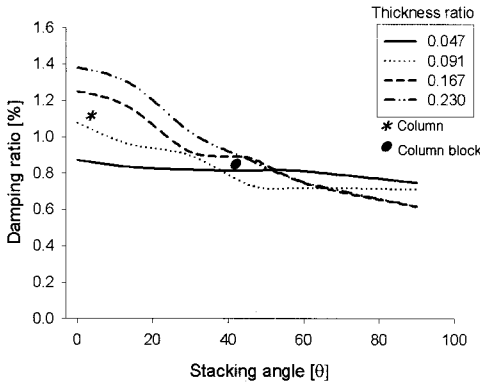


Fig. 7 Damping ratios of composite-foam sandwich beams

따라 나타난 결과이다. 실험결과 섬유강화복합재료만의 실험결과(Fig. 4)와 달리 샌드위치구조의 두께비가 작은 경우 적층각도에 따른 감쇠비의 변화가 적었으며, 두께비가 증가할수록 감쇠비의 변화가 적층각도에 크게 의존하는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 섬유강화복합재료-포움 샌드위치구조를 0°에 가깝게 적층하여 제작할 경우 높은 강성과 감쇠비를 동시에 얻을 수 있음을 알 수 있다.

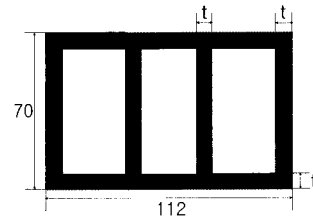
3. 구조 설계

3.1 컬럼

본 연구에서는 Kim 등⁽⁷⁾이 설계한 샌드위치 컬럼 구조의 십자 리브 모양을 가지는 컬럼을 활용하였다. 섬유강화복합재료 면재의 최종사양은 적층각도와 적층두께에 따른 컬럼의 비굽힘강성을 계산하여 $[\pm 5]_{22T}$ 로 결정하였으며, 이 경우 샌드위치 컬럼의 질량은 알루미늄 컬럼과 근사하나 1차 고유진동수가 2배이다⁽⁷⁾.

3.2 컬럼블록

컬럼블록의 형상은 340mm X 70mm X 112mm의 치수를 가지는 육면체의 형상을 가진다. 컬럼블록에는 Z-스테이지와 헤드스톡이 차례로 체결되며, 체결 시 Z-스테이지가 컬럼블록에 굽힘 모멘트를 가하여 컬럼블록의 상부에 인장력, 하부에는 압축력을 부가한다. 이러한 하중을 지지하기 위한 방안으로 컬럼과 Z-스테이지가 체결되는 방향에 면재와 같은 두께의 수직 리브를 삽입한 모델을 제안하였으며 (Fig. 8참조), 외부치수(높이, 폭)는 기존의 알루미늄 시스템과 동일하



All dimensions are in mm

Fig. 8 The proposed cross-section of composite sandwich column block for the micro-EDM machine

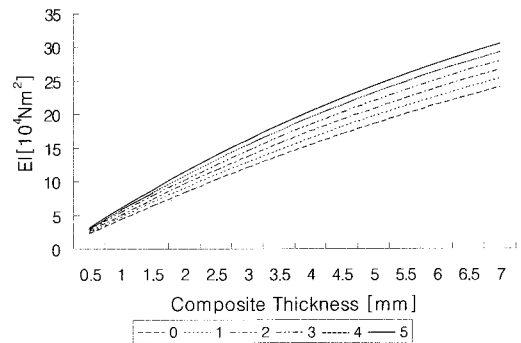


Fig. 9 Bending stiffness of column-block w.r.t. the composite thickness and number of ribs

다. 컬럼블록의 비굽힘강성을 증가시키기 위해 면재의 두께와 샌드위치 구조 내부의 리브 수에 따른 굽힘강성과 비굽힘강성의 변화를 계산하여 비교하였다. 또한 면재의 두께와 리브의 개수를 변화시킨 모델에서 적층각도를 15°씩 바꾸어 여러 가지 영계수에 대한 계산을 수행하였다. 일방향 복합재료에 적용한 적층각도는 $[0]_{2nT}$, $[\pm 15]_{nT}$, $[\pm 30]_{nT}$, $[\pm 45]_{nT}$, $[\pm 60]_{nT}$, $[\pm 75]_{nT}$, $[90]_{2nT}$ 이다. Fig. 8에서 보인 단면에 대한 굽힘강성(EI)과 비굽힘강성(EI/ρ)을 복합재료의 두께(t)와 적층각도 및 리브의 수(n) 등을 이용하여 다음 식 (2)~(8)과 같이 유도하였다.

계산결과 컬럼블록의 면재와 리브수가 증가함에 따라 굽힘강성이 단순 증가하며 (Fig. 9참조), 일정두께 이상의 복합재료가 사용될 경우($t \approx 1.25\text{mm}$) 리브의 수가 증가할수록 비굽힘강성이 감소하였으며, 전반적으로 비굽힘강성은 복합재료 두께가 증가함에 따라 일정 값으로 포화되는 경향을 나타내었다(Fig.10 참조). 비굽힘강성의 결과에 의해 복합재료의 두께를 1.5mm로 결정하였다.

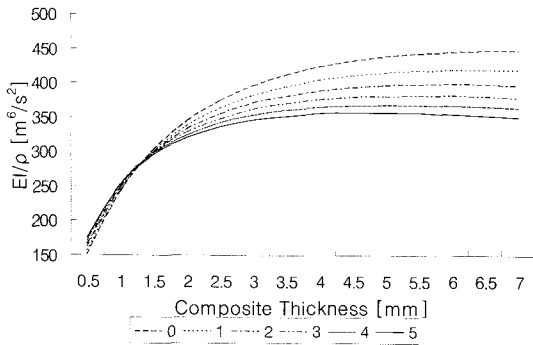


Fig. 10 Specific bending stiffness of column-block w.r.t. the composite thickness and number of ribs

$$EI(t) = E_s I_s(t) + E_c I_c(t) \quad (2)$$

$$E_s I_s(t) = \frac{E_s}{12} [bh^3 - (b-2t)(h-2t)^3 + nt(h-2t)^3] \quad (3)$$

$$E_c I_c(t) = \frac{E_c}{12} [(b-2t)(h-2t)^3 - nt(h-2t)^3] \quad (4)$$

$$\frac{EI(t)}{\rho(t)} \quad (5)$$

$$\rho(t) = \frac{m_s + m_c}{V_{str}} \quad (6)$$

$$m_s(t) = [bh - (b-2t)(h-2t) + nt(h-2t)] \times l \times \rho_s \quad (7)$$

$$m_c(t) = [(b-2t)(h-2t) - nt(h-2t)] \times l \times \rho_c \quad (8)$$

여기서, 아래 첨자 s와 c는 각각 면재와 심재를 의미하며, 식 (2)~(10)의 변수들이 의미하는 바는 아래와 같다

$EI(t)$	equivalent bending stiffness
$\rho(t)$	equivalent mass density (kg/m^3)
V_{str}	total volume (m^3)
m	mass (kg)
t	composite thickness (mm)
b	column-block width (mm)
h	column-block thickness (mm)
l	column-block length (mm)
n	number of ribs

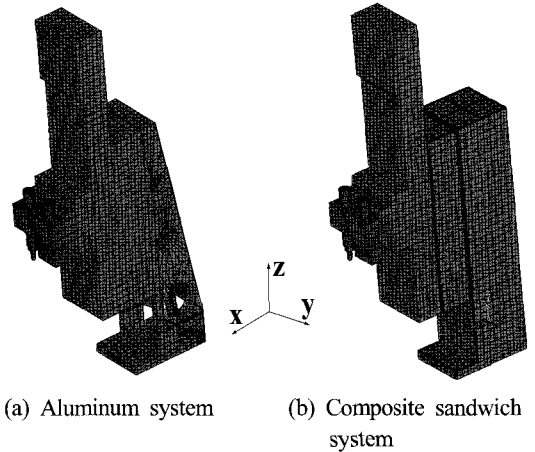


Fig. 11 Finite element models of microfactory machine structures

4. 유한요소해석

본 연구에서 사용한 유한요소 패키지는 ANSYS9.0이며, 사용된 요소는 Shell 99와 Solid 46이다. 결정된 단품의 규격을 적용하여 전체 시스템의 정적·동적 성능평가를 위해 유한요소해석을 통해서 기존 시스템과 성능을 비교하였으며, 각 구조의 모델링 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 알루미늄 컬럼과 알루미늄 컬럼블록에 헤드스톡이 체결되었을 때 자중에 의한 가공기 끝단에서의 정적 처짐이 6.98 μm 인 반면 복합재료 시스템인 경우 처짐량이 기존의 시스템에 비해 35% 정도의 수준을 가짐을 확인하였다. 면재와 리브의 두께 및 리브의 개수에 따른 자중 해석결과는 Fig. 12에 나타내었으며, 처짐량의 단위는 μm 이다. 리브 개수와 적층 수를 바꾸어 해석한 결과 적층각도가 45°일때 처짐량이 가장 적음을 알 수 있었다. 이는 컬럼블록의 상부와 하부 각각 인장력과 압축력이 가해지기 때문에 블록의 적층각도에 따라 블록의 강성이 바뀌어 처짐량과 거동이 바뀌며, 인장과 압축응력을 비교적 상하로 균일하게 유지할 수 있는 강성을 가지기 때문으로 판단된다. 알루미늄 시스템의 1차 고유진동수는 91Hz이며, 복합재료 시스템의 경우 알루미늄 시스템에 비해 고유진동수가 1.5배 이상 높은 것을 확인하였다(Fig. 13참조). 복합재료 시스템의 진동 모드는 컬럼블록의 y방향 굽힘 모드였다(Fig. 11 참조). 이상의 결과를 바탕으로 컬럼블록의 적층 순서를 $[\pm 45]_6 T$ 로 결정하였다.

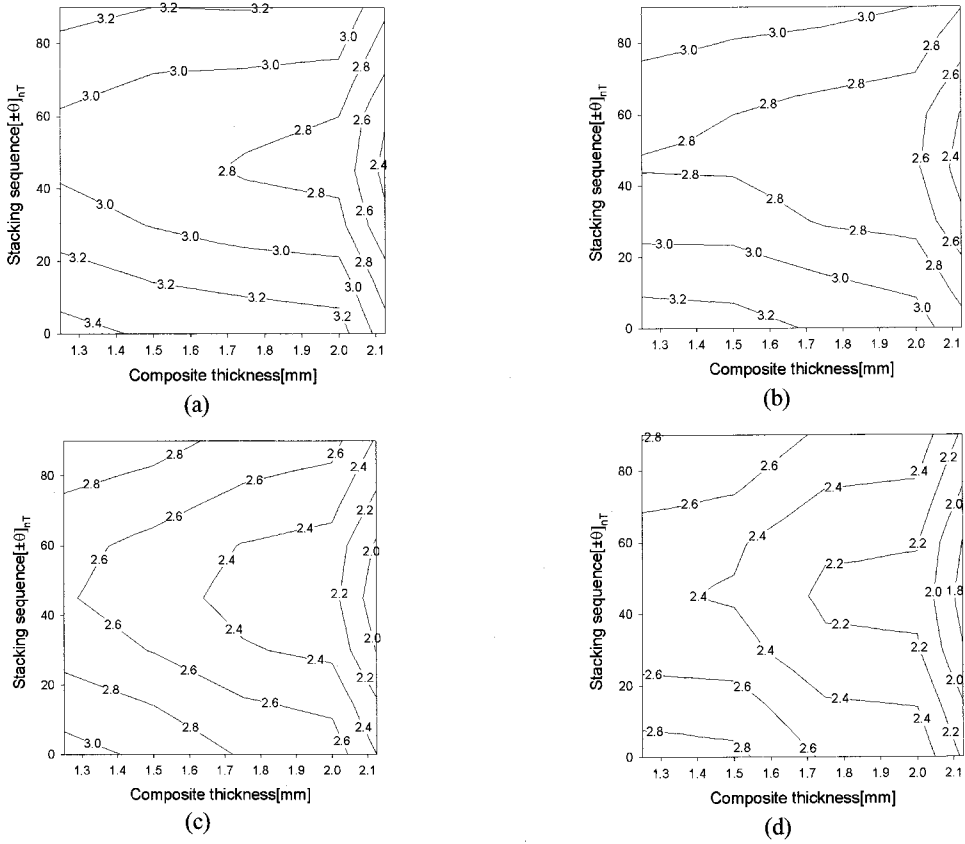


Fig. 12 Max. deflection due to dead weight of microfactory machine structures; (a) 1rib, (b) 2ribs, (c) 3ribs, (d) 4ribs

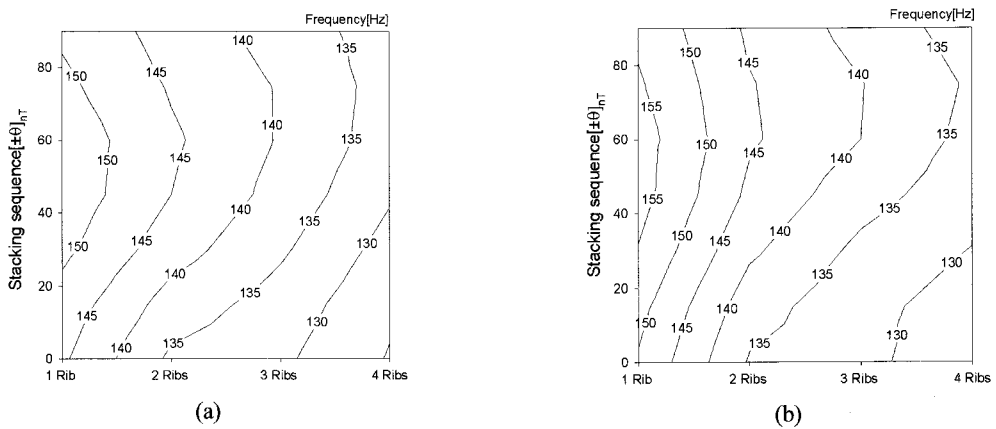


Fig. 13 Natural frequencies of microfactory machine made of foam-composite sandwich structures; (a) composite thickness 1.25mm, (b) composite thickness 1.5mm

5. 결론

본 논문에서는 마이크로(μm) 단위의 정밀도를 요하는 공작기계를 높은 비굽힘강성을 가지는 복합재료-포움 샌드위치 구조를 이용하여 설계하였다. 유한요소해석을 통하여 섬유강화복합재료-포움 샌드위치 구조가 마이크로팩토리의 성능을 향상시키는 것을 확인하였다. 복합재료 시스템은 기존의 알루미늄 시스템보다 1차 고유진동수가 1.5배 이상 높은 것으로 확인하였고 복합재료 샌드위치 빔의 실험결과에 근거하여 우수한 감쇠능력을 가짐을 간접적으로 확인하였다. 복합재료-포움 샌드위치 구조를 적용한 결과 컬럼블록의 무게가 2.6kg에서 1kg으로 60% 감소하였다. 또한 복합재료 시스템의 자중에 의한 처짐량은 블록의 경량화로 기존의 시스템의 35% 정도임을 확인하였으며, 고유진동수는 1.5배 증가하는 것으로 확인하였다. 이상의 결과를 바탕으로 기존의 알루미늄 시스템을 섬유강화복합재료-포움 샌드위치 구조로 대체하는 것이 전체 시스템의 강성 및 감쇠특성 향상에 효과적이라는 결론을 얻었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산업기술개발사업인 “마이크로 전기 화학 복합형상 제거 시스템 개발” 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- (1) Chang, S. H., Kim, P. J., Lee, D. G. and Choi, J. K., 2001, “Steel-composite hybrid headstock for high-precision grinding machines,” *Composite Structures*, Vol. 53, No. 1, pp. 1~8.
- (2) Lee, D. G., Chang, S. H. and Kim, H. S., 1998, “Damping improvement of machine tool columns with polymer matrix fiber composite material,” *Composite Structures*, Vol. 43, No. 2, pp. 155~163.
- (3) Jung, S. C., Lee, J. E. and Chang, S. H., 2004, “Design of inspecting machine for next generation LCD glass panel with high modulus carbon/epoxy composites,” *Composite Structures*, Vol. 66, No. 1-4, pp. 439~447.
- (4) Kim, D. I., Jung, S. C., Lee, J. E. and Chang, S. H., 2006, “Parametric study on design of composite-foam-resin concrete sandwich structures for precision machine tool structures,” *Composite Structures*, Vol. 75, No. 1-4, pp. 408~414.
- (5) Kim, D. I. and Chang, S. H., 2006, “Parametric Study on Design of Sandwich Beams and Plates for Machine Tool Structures,” *Transaction of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 1, pp. 39~48.
- (6) Nashif, A. D., Jones, D. I. G. and Henderson, J. P., 1985, *Vibration damping*, Wiley-Interscience, New York, pp. 258~362.
- (7) Kim, D. I. and Chang, S. H., 2006, “Design of Micro-EDM machine tool components with advanced composite material,” *Proceeding 2nd international workshop on next-generation microfactory system*, pp. 141~146.