

공작기계를 위한 보와 평판의 샌드위치 구조 설계에 관한 파라메트릭 연구

김대일*, 장승환⁺

(논문접수일 2005. 8. 10, 심사완료일 2005. 12. 19)

Parametric Study on the Design of Sandwich Beams and Plates for Machine Tool Structures

Dae Il Kim*, Seung Hwan Chang⁺

Abstract

In this paper, polymer composites based sandwich structures like beams and plates are optimised by using parametric study. The structures are composed of fibre reinforced composites for facial material and resin concrete and PVC foam for core materials. The stacking sequences and thickness of the composites are controlled as major parameters to find out the optimal condition for machine tool components. For the plate structure of machine tool bed composites-skinned sandwich structure which has several ribs are proposed to enhance bending stiffnesses in two major directions at the same time. Dynamic robustness of a machine tool structure is investigated using modal analysis. From the results optimal configuration and materials for high precession machine tools are proposed. And the plate was made of fiber reforced composite material and PVC foam.

Key Words : PVC foam(고분자 폼), Flexural rigidity(굽힘강성), Resin concrete(레진 콘크리트), Specific flexural rigidity(비굽힘강성), Sandwich structure(샌드위치 구조), Fiber reforced composite material(섬유강화 복합재료), Parametric study(파라메트릭 연구)

1. 서론

기술이 발전함에 따라 제품의 크기는 줄어들고, 다양한 기능을 가지며, 각각의 성능은 향상되고 있다. 제품의 크기가

작아지면서 이를 구성하는 주요 부품들의 크기 역시 작아지고 이를 가공하는 공작기계도 부품 가공에 적합하게 소형화 되어가고 있다. 그런데 부품의 소형화는 가공의 정밀도를 요구하며, 동시에 허용공차범위도 줄어드는 결과를 가져왔다.

* 중앙대학교 기계공학부 대학원 (caukdi@wm.cau.ac.kr)
주소: 156-756, 서울시 동작구 흑석동 221

+ 교신저자, 중앙대 기계공학부(phigs4@cau.ac.kr)

최근에 이르러서는 수 μm 단위의 정밀도를 요구하는 부품들이 다수 등장하면서 이에 발맞추어 공작기계도 미세가공에서의 정밀도가 중요해지고 있다. 공작기계와 가공대상이 직접 접촉하는 가공 방법은 가공시 가진과 마찰열로 인한 가공대상의 변형을 유발하기 때문에 초정밀 가공에는 적합하지 않다. 이에 비해서 ECD/EDM 가공은 비접촉 방식이기 때문에 μm 단위의 복잡하고 정밀한 가공에 적합하다. 그러나 기존의 공작기계 재료로 사용되는 강철과 알루미늄은 높은 밀도와 낮은 비강성(Specific stiffness) 때문에 초정밀가공을 위한 공작기계에는 적합하지 않다. 반면 섬유강화 복합재료는 높은 강도와 강성, 그리고 우수한 감쇠 특성에 기인하여 로봇 구조나 초정밀 연삭기와 같은 정밀 기계의 설계 및 제작에 성공적으로 적용되고 있다. 섬유강화 복합재료를 이용한 공작기계에 관한 연구를 살펴보면, Chang⁽¹⁾과 Lee⁽²⁾는 복합재료와 강철을 이용한 고정밀 연삭기의 컬럼과 헤드스톡을 설계하고 제작하였으며, Lee⁽³⁾는 기존의 텅스텐 보링바를 복합재료를 이용한 하이브리드 보링바로 대체하여 동강성(Dynamic stiffness)을 30% 향상시켰다. 그리고 Jeong⁽⁴⁾은 얇은 빔을 이용하여 적층각도에 따른 복합재료의 동특성을 해석하였다.

섬유강화 복합재료와 PVC 폼(Foam), 레진 콘크리트(Resin concrete)로 구성된 샌드위치 구조를 공작기계의 재료로 사용하면 기존의 금속재료에 비해 높은 비굽힘강성(Specific flexural rigidity)을 얻을 수 있다⁽⁵⁾. 그리고 공작기계의 정밀도에 영향을 미치는 주요 요소 중 하나인 동적강성⁽⁶⁾을 향상시킬 수 있다. 그러나 샌드위치 구조는 재료의 구성과 단면의 형상에 따라서 기계적 특성이 변하기 때문에 주어진 조건에 대한 적합한 특성을 얻기 위해서는 여러 파라미터(Parameter)를 고려하여 설계해야 한다⁽⁷⁾. 본 논문에서는 수 μm 수준의 정밀도를 가진 초소형 공작기계에 적합한 샌드위치 구조의 각종 파라미터를 결정하기 위해 파라메트릭 연구(Parametric study)를 수행하였으며, 각 요소간의 조립 방법과 조립된 구조의 동적 강성을 예측하고 최적의 조건을 제안하였다. 그리고 기존의 연구와는 달리 복합재료를 금속 재료의 취약한 비강성을 보완하는 보조재료가 아닌, 공작기계의 핵심재료로 사용하여 설계하였다.

2. 공작기계의 구조

공작기계의 형상은 매우 다양하지만, 주요 구성은 보(Beam), 스테이지(Stage), 베드(Bed), 컬럼(Column) 등으

로 이루어져 있다.

일반적으로 보는 높은 굽힘강성(EI)이, 베드는 높은 압축강성이 요구되며, 두 요소 모두 공진주파수를 높이기 위하여 높은 비굽힘강성(EI/p)이 요구된다. 본 연구에 사용된 보와 베드의 개형으로 Fig. 1~2과 같은 샌드위치 구조를 제안하였으며, 면재의 두께변화와 복합재료의 적층각도에 따른 기계적 특성을 검토하였다. Fig. 1~2에 제시된 모든 치수는 mm 단위이다.

3. 재료

Fig. 1과 2에서 제안한 형상에 Table 1에 제시한 재료들을 사용하여 여러 가지 기계적 특성을 예측하였다. Table 1에서 제시된 레진 콘크리트는 골재와 수지의 무게비율이 92.5:7.5인 경우이며, 소형화된 공작기계의 특성을 고려하여 자갈의 무게비율을 10%미만으로 계산하였다.

본 연구에서 사용된 샌드위치 구조의 면재(Facial material)로는 강성이 높은 일방향 탄소섬유/에폭시 섬유강화 복

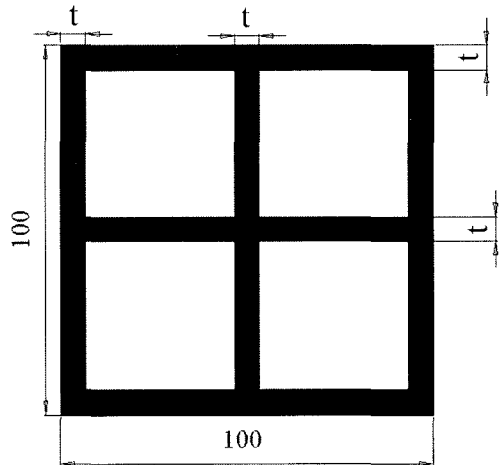


Fig. 1 Proposed sandwich beam structure

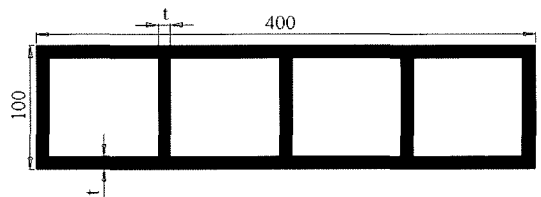


Fig. 2 Proposed sandwich plate

Table 1 Material properties

| Material | Density (kg/m ³) | Young's modulus(GPa) |
|---|------------------------------|----------------------|
| USN125(Fiber reinforced composite material) | 1550 | EL 130 ET 10 |
| Resin concrete | 2207 | 15 |
| PVC foam HT110 | 115 | 0.078 |
| Cast Iron | 7480 | 138 |
| Aluminium | 2800 | 70 |

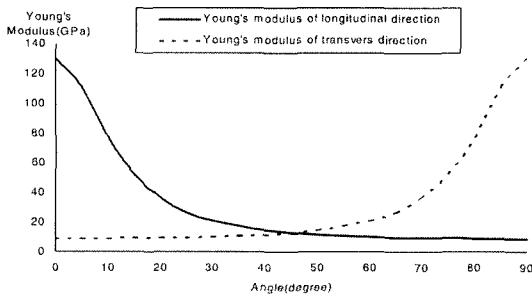


Fig. 3 Young's modulus of USN125 with respect to the stacking angle

합재료를 사용하였으며, 심재(Core material)로는 밀도가 낮은 고분자 폼과 레진 콘크리트를 사용하였다. Table 1에 여러 가지 재료의 주요 물성을 비교하였다. 특히, 일방향 섬유 강화 복합재료는 섬유의 적층각도에 따라 영계수의 변화가 Fig. 3에서 보는 바와 같이 매우 큼을 알 수 있다.

4. 십자형 리브를 가진 보에 대한 파라메트릭 연구

Fig. 1에서 제안한 샌드위치 보의 면재는 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료(USN125)이며, 비굽힘강성을 증가시키기 위해 심재는 폼, 레진 콘크리트 두 가지를 고려하여 각 심재에 따른 굽힘강성과 비굽힘강성의 변화를 계산하였으며, 심재를 사용하지 않은 구조(Hollow structure)와 그 결과를 비교하였다. 또한 면재의 경우도 다양한 적층각도를 사용하여, 여러 가지 영계수에 대한 계산을 수행하였다. 일방향 복합재료에 적용한 적층각도는 [±5]_{nT}, [±5/0]_{nS}, [±30]_{nT}, [±30/0]_{nS}, [±45]_{nT}이다. Fig. 1에서 보인 단면에 대한 굽힘강성(EI)과 비굽힘강성(EI/ρ)을 복합재료의 두께(t)에 대한 함수로 나타

내면 다음 식 (1)~(7)과 같다.

$$EI(t) = E_s I_s(t) + E_c I_c(t) \quad (1)$$

$$E_s I_s(t) = \frac{E_s}{12} [(b)^4 - (b-2t)^4 + (b-2t)(t)^3 + (t)(b-2t)^3 - (t)^4] \quad (2)$$

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

$$\frac{EI(t)}{\rho(t)} \quad (4)$$

$$\rho = \frac{m_s + m_c}{V_{str}} \quad (5)$$

$$m_s = [(b)^2 - (b-2t)^2 + (2t)(b-2t) - (t)^2] \times 400 \times 10^{-3} \times \rho_s \quad (6)$$

$$m_c = [(b-2t)^2 - (b-2t)(2t) + (t)^2] \times 400 \times 10^{-3} \times \rho_c \quad (7)$$

EI(t): 등가 굽힘강성

m: 질량

ρ(t): 등가밀도

V_{str}: 구조물의 전체부피

t: 복합재료의 두께

b: 100 × 10⁻³(m), 정사각형 단면의 한 변 길이

여기서 첨자 s, c는 각각 면재와 심재를 나타낸다. Fig. 4-5는 중공상태의 보일 때 면재의 두께와 적층각도 변화에 따른 굽힘강성(EI)과 비굽힘강성(EI/ρ)의 변화를 복합재료의 적층각도에 따라 나타낸 것이다. 면재인 복합재료의 두께(t)가 증가할수록 굽힘강성은 증가하지만 비굽힘강성이 감소함을 알 수 있다. 이는 보의 외부 치수는 유지된 채 면재의 두께가 증가하여 구조의 밀도가 커지면서 중공구조의 장점이 상쇄됨을 나타낸다. Fig. 4-5에서 보이는 바와 같이 [±5]_{nT}, [±5/0]_{nS}는 거의 동일한 굽힘강성과 비굽힘강성을 가진다. 제작과정은 [±5]_{nT}가 [±5/0]_{nS}에 비해 용이하기 때문에 [±5]_{nT}를 면재로 선택하는 것이 더 적합하다고 할 수 있다. Fig. 6-7은 [±5]_{nT}로 적층된 복합재료를 면재로 하고, 레진 콘크리트와 PVC 폼을 각각 심재로 사용한 샌드위치 구조 및 중공구조와 주철, 알루미늄의 굽힘강성과 비굽힘강성을 비교한 것이다. 굽힘강성(EI)은 주철이 다소 우수하지만, 비굽힘강성은 [±5]_{nT}로 적층된 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료가 4~5배 이상 우수함을 알 수 있다. Fig. 6에서 각각의 샌드위치 구조에

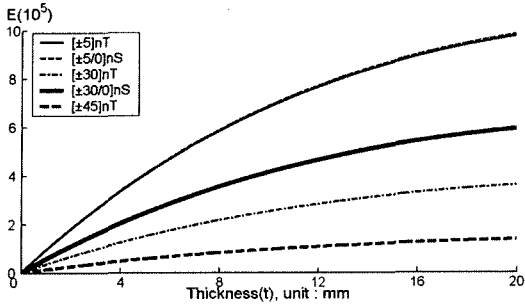


Fig. 4 Bending stiffness of hollow beam according to the stacking sequences

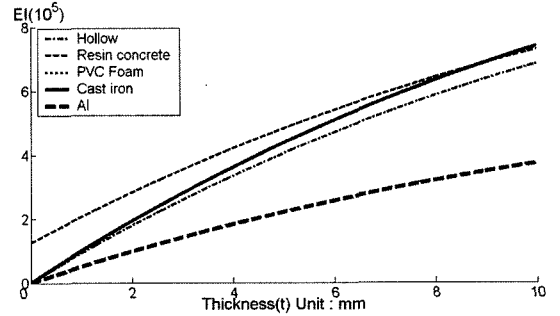


Fig. 6 Bending stiffness of beams with various core materials

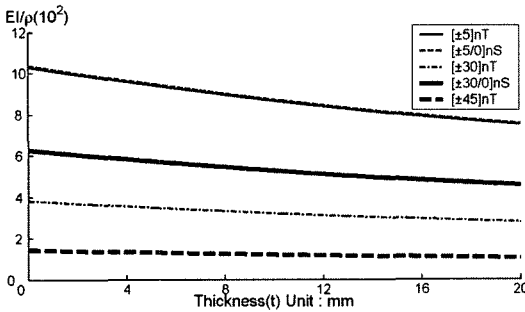


Fig. 5 Specific bending stiffness of hollow beam according to the stacking sequences

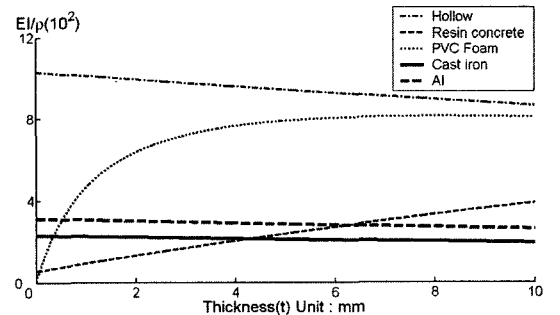


Fig. 7 Specific bending stiffness of beams with various core materials

대한 비교를 보면 굽힘강성은 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 그러나 비굽힘강성은 밀도가 작은 폼을 심재로 한 샌드위치 보가 더 큼을 알 수 있다(Fig. 7). 따라서 진동에 의한 문제를 고려할 경우 심재로 PVC 폼을 사용하는 것이 레진 콘크리트를 사용하는 것보다 더 적합하다는 것을 알 수 있으며, 이 경우 섬유강화 복합재료의 최적의 적층각도와 두께를 제안할 수 있다(Fig. 6, 7 참조).

유강화 복합재료를 이용한 샌드위치 구조를 사용하여 비굽힘 강성을 최적화시키는 파라메트릭 연구를 수행하였다.

Fig. 8의 구조는 이방성 재료인 일방향 복합재료와 폼 등의 심재를 이용한 샌드위치 베드 구조이다. 수직압축력을 지지하기 위해서는 $[0/90]_nT$ 의 적층순서가 효과적이나, 이

5. 베드에 대한 파라메트릭 연구

베드의 형상은 $400\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 의 치수를 가지는 두꺼운 평판형태(Fig. 2 참조)로 가정하여 해석을 수행하였다. 베드에 작용하는 주요하중은 수직압축력이기 때문에 하중을 지지하는 부분에는 압축강성이 높을수록 유리하다. 그러나 가공 대상물의 이동과 공구의 작동에 의한 가진 환경을 고려하여, 높은 굽힘비강성을 갖도록 설계해야 한다. 앞서 보에서 주철은 구조의 강성 향상에는 유리하지만, 비굽힘강성이 취약함을 알았다. 따라서 이를 해결하기 위하여 섬

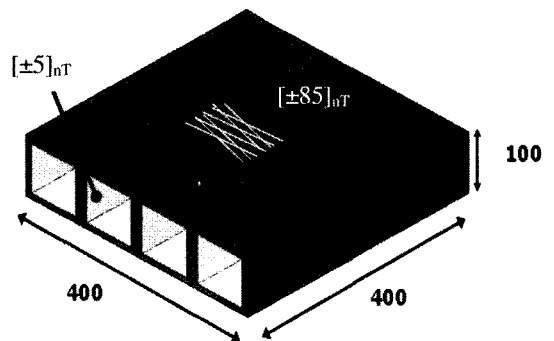


Fig. 8 Sandwich plate with rib structures

경우 평면방향 강성의 손실을 감수해야 한다. 따라서 섬유강화 복합재료의 효과적인 이용을 위해서 샌드위치 구조 내부의 리브는 종방향의 굽힘 모멘트를 지지하고, 면재는 횡방향의 굽힘모멘트를 지지하도록 설계하였다. 따라서 Fig. 8과 같이 리브구조는 $[\pm 5]_{nr}$ 의 적층순서를 가지는 일방향 탄소 섬유/에폭시 복합재료를 사용하였고, 면재에는 리브와 동일한 재료를 $[\pm 85]_{nr}$ 로 적층하여 평면의 두 주요 방향에 대한 굽힘강성을 향상시킬 수 있도록 설계하였다.

Fig. 9은 베드가 증공 상태일 때, 리브의 수와 두께에 따른 굽힘강성을 계산한 결과이며, Fig. 10은 비굽힘강성을 계산한 결과이다. 리브의 수 및 두께가 증가함에 따라서 굽힘강성과 비굽힘강성이 증가함을 알 수 있다. 굽힘강성은 리브의 수와 두께에 비례해서 증가하기 때문에 적절한 리브의 수와

두께를 결정하기 위한 변수로 사용하기에는 부적당하다. 반면 비굽힘강성은 리브의 수 혹은 리브의 두께가 증가함에 따라 그 값이 포화되는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 베드의 경우 보와는 달리 압축하중도 지지해야 하므로 내부에 심재로서 고분자 폼과 레진 콘크리트를 사용하여 압축강성을 높이는 방법을 고려하였다. Fig. 11와 12은 심재로 고분자 폼을 사용하였을 때의 굽힘강성과 비굽힘강성을 리브의 수와 두께에 따라 나타낸 것이며, Fig. 13와 14는 심재로 레진 콘크리트를 사용하였을 경우의 굽힘강성과 비굽힘강성을 나타낸 것이다.

Fig. 11와 13에서 보는 것처럼, 굽힘강성은 리브의 수와 두께에 비례하여 단순 증가하고 있고 Fig. 12과 14에서 보이는 비굽힘강성은 고려된 리브의 형상 범위 내에서 고분자 폼과 레진 콘크리트가 서로 다른 경향을 보이고 있다. 고

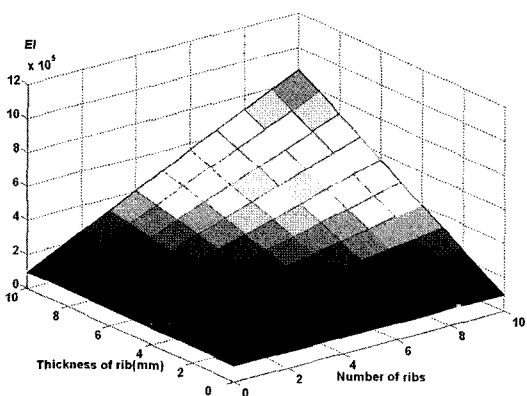


Fig. 9 Bending Stiffness of hollow plate with respect to the number of ribs and rib thickness

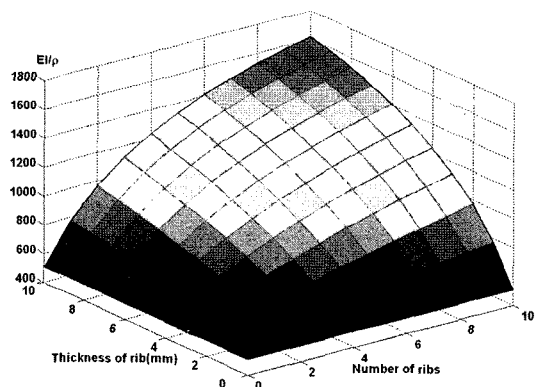


Fig. 10 Specific bending stiffness of hollow plate with respect to the number of ribs and rib thickness

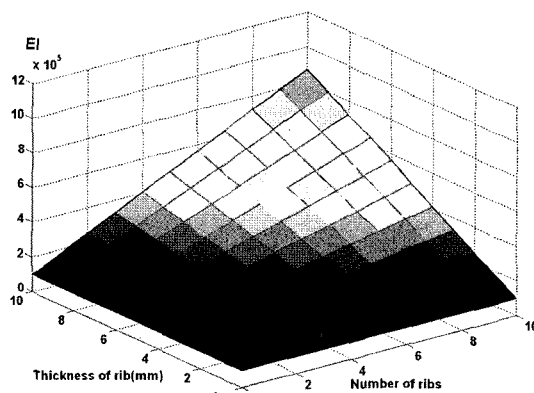


Fig. 11 Bending stiffness of plate with foam core

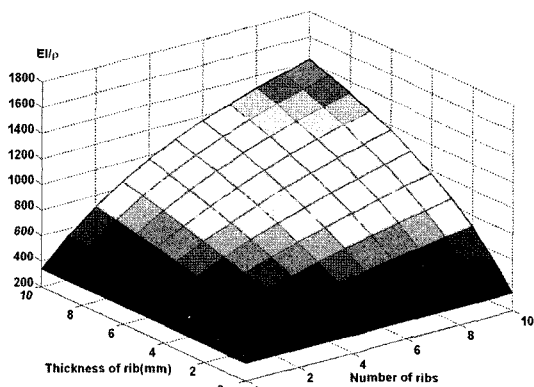


Fig. 12 Specific bending stiffness of plate with foam core

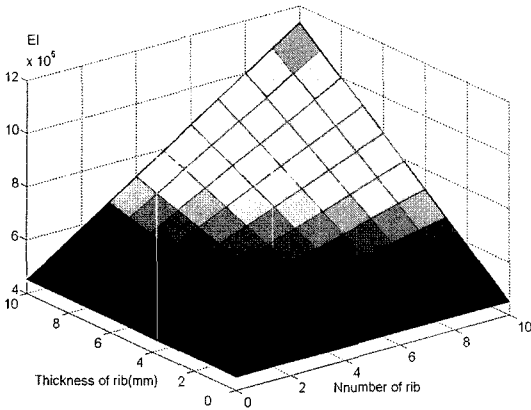


Fig. 13 Bending stiffness of plate with resin concrete core

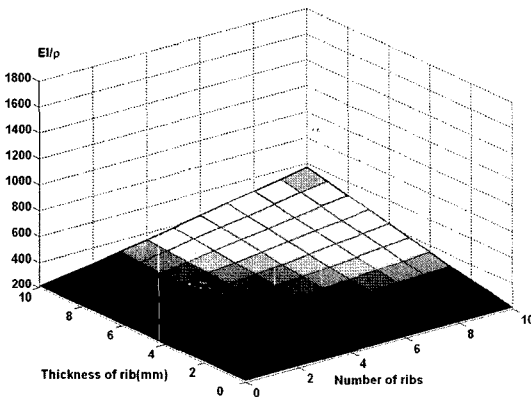


Fig. 14 Specific bending stiffness of plate with resin concrete Core

분자 포움이 심재인 경우는 리브의 조건 범위 내에서 포화되는 경향을 가지는 반면, 레진 콘크리트의 경우는 굽힘강성의 경우와 마찬가지로 단순 증가하며, 이는 레진 콘크리트의 강성이 포움에 비해서 높은 것에 기인한다(Table 1 참조).

리브의 수와 두께를 결정하기 위한 부가적 파라미터로 압축에 의한 변형량과 베드의 질량을 제안하였다. 압축 변형을 계산하기 위해 유한요소해석을 수행하였으며, 사용한 프로그램은 ANSYS8.0이다. Table 2에 해석에 사용한 조건을 정리하였다. Fig. 15~16은 베드의 최대 변형량을 그래프로 나타낸 것이다. 레진 콘크리트의 강성이 15GPa이기 때문에 포움을 이용한 베드에 비해 압축 변형량을 지지하는 리브의 효과가 나타나지 않고 있다. 공진과 관련된 비굽힘강성은 높은 비중에 기인하여 고분자 포움에 비해서 낮은 값을 가진

Table 2 Conditions for FEA

| | |
|--------------------|--|
| Element type | Solid45 |
| Boundary condition | Fixed bottom surface |
| Load condition | 100N/m ² (Distribution load in gravity direction) |
| Number of nodes | Maximum 28,044 |
| Number of elements | Maximum 24,640 |

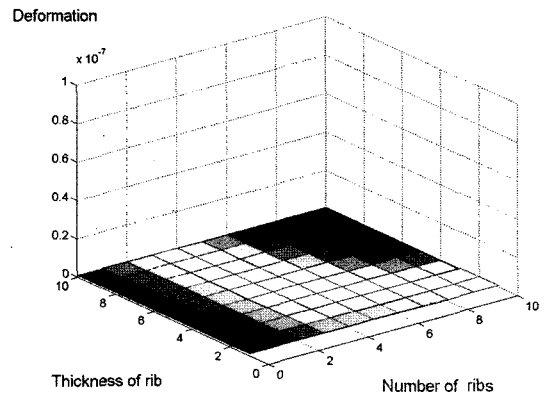


Fig. 15 Compressive deformation for sandwich plate with resin concrete core

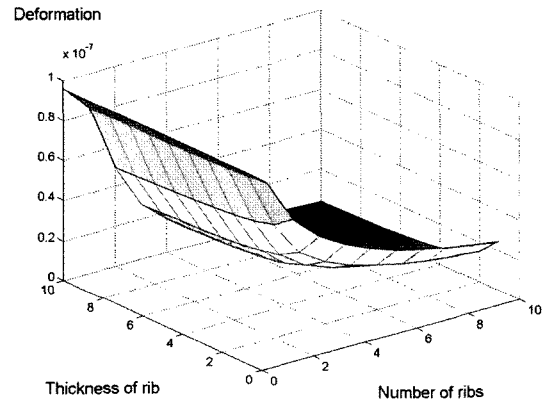


Fig. 16 Compressive deformation for sandwich plate with foam core

다. 또한 레진 콘크리트를 심재로 사용한 경우는 리브의 수와 두께를 결정할 수 있는 요인들이 모두 단순 증가하기 때문에 리브의 수와 두께를 결정하는 것이 어렵다. 반면 고분

자 포움을 심재로 사용한 경우는 리브의 치수 및 개수의 변화에 따른 굽힘강성, 압축강성, 비굽힘강성의 변화가 두드러짐을 알 수 있다(Fig. 11, 12, 16 참고). 리브의 두께와 개수를 결정하기 위해서 리브의 수와 두께에 따른 변형감소율, 질량감소율, 굽힘강성 증가율을 식 (8)~(10)을 제안하여 비교하였다.

$$\Delta d = \frac{(D-d)}{D} \times 100 \quad (8)$$

$$\Delta m = \frac{(M-m)}{M} \times 100 \quad (9)$$

$$\Delta s = \frac{(s-S)}{S} \times 100 \quad (10)$$

- Δd : 변형감소율
- Δm : 질량변화율
- Δs : 굽힘강성변화율
- D : 1mm 두께 리브 1개 일 때의 베드의 변형량(기준)
- d : 리브의 수와 두께가 임의인 경우의 베드 변형량
- M : 1mm 두께 리브 1개 일 때 베드의 질량
- m : 리브의 수와 두께가 임의인 경우의 베드 질량
- S : 1mm 두께 리브 1개 일 때의 베드의 굽힘강성
- s : 리브의 수와 두께가 임의인 경우의 베드의 굽힘강성

Table 3~5는 레진 콘크리트가 심재인 경우에 대하여 식 (8)~(10)의 결과 중 일부분을 나타낸 것이다. 질량감소율과 굽힘강성 증가율은 리브의 수와 두께에 대하여 단순 증가

Table 3 Deformation reduction in the case of sandwich plate with resin concrete core

| Thickness of rib \ Number of ribs | 4 | 5 | 6 |
|-----------------------------------|------|------|------|
| 4mm | 3.8% | 4.5% | 5.2% |
| 5mm | 4.4% | 5.1% | 5.8% |
| 6mm | 4.9% | 5.7% | 6.5% |
| 7mm | 5.6% | 6.4% | 7.2% |

Table 4 Weight reduction in the case of sandwich plate with resin concrete core

| Thickness of rib \ Number of ribs | 4 | 5 | 6 |
|-----------------------------------|------|------|------|
| 4mm | 1.0% | 1.3% | 1.6% |
| 5mm | 1.3% | 1.7% | 2.0% |
| 6mm | 1.6% | 2.0% | 2.4% |
| 7mm | 1.9% | 2.4% | 2.9% |

고 변형감소율은 단순 감소하기 때문에 특별하게 리브의 수와 두께를 결정하기가 어렵다.

반면 고분자 포움을 심재로 사용한 경우(Table 6~8) 리브의 수 및 두께에 따른 각 파라미터의 변화가 포화형태를 가지므로 상대적으로 쉽게 리브의 수를 결정할 수 있다. 그러나 밀도가 다른 재료에 비해 가장 낮은 고분자 포움이 심재로 사용되면 리브의 수가 증가할수록 질량도 증가하기 때문에 식(9)는 물리적으로 질량증가율을 나타내게 된다.

Table 6에서 보는 바와 같이 변형감소율은 리브의 수와 두께가 증가함에 따라 증가하지만 감소비율은 점차 낮아짐을 보여준다. 질량 증가율(Table 7)은 리브의 수 및 두께가 증가함에 따라서 단순 증가한다. 리브의 수가 4~6개인 경우에 리브의 두께 증가에 따른 질량 증가율의 변화폭이 변형감소율의 변화폭을 넘어서게 된다. 리브의 수가 5개인 경우를 보면 두께가 5mm에서 6mm로 증가하면 변형감소율은 2.9% 변화한 것에 비해 질량증가율의 변화폭은 5.4%이다. 리브의

Table 5 Bending stiffness increment in the case of sandwich plate with resin concrete core

| Thickness of rib \ Number of ribs | 4 | 5 | 6 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| 4mm | 23.7% | 30.2% | 36.6% |
| 5mm | 30.2% | 38.2% | 46.4% |
| 6mm | 36.6% | 46.4% | 56.2% |
| 7mm | 43.1% | 54.5% | 66.1% |

Table 6 Deformation reduction in the case of sandwich plate with foam core

| Thickness of rib \ Number of ribs | 4 | 5 | 6 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| 4mm | 75.1% | 80.3% | 83.5% |
| 5mm | 77.3% | 83.1% | 86.0% |
| 6mm | 78.4% | 84.9% | 87.9% |
| 7mm | 79.3% | 85.7% | 89.2% |

Table 7 Weight increment in the case of sandwich plate with foam core

| Thickness of rib \ Number of ribs | 4 | 5 | 6 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| 4mm | 16.5% | 20.9% | 25.3% |
| 5mm | 20.9% | 26.4% | 31.8% |
| 6mm | 25.3% | 31.8% | 38.4% |
| 7mm | 29.7% | 37.3% | 45.0% |

Table 8 Bending stiffness increment in the case of sandwich plate with foam core

| Number of ribs Thickness of rib | 4 | 5 | 6 |
|------------------------------------|--------|--------|--------|
| 4mm | 61.2% | 75.6% | 89.3% |
| 5mm | 80.5% | 98.0% | 114.0% |
| 6mm | 98.0% | 118.4% | 137.1% |
| 7mm | 114.4% | 137.1% | 157.5% |

추가로 인해서 질량 증가율의 상승폭이 변형감소율의 하락 폭을 뛰어넘는 경우라면, 리브 삽입의 목적에 배치되는 것이다. 특히 변형감소율은 사실상 변화가 없으면서 질량은 증가하는 경우라면 더 이상의 리브를 추가하는 것은 무의미하다. 이에 근거하여 베드에 삽입될 적절한 리브의 수는 5개, 두께는 6mm로 결정하였다. 굽힘강성증가율을 고려하면 더 두꺼운 리브 4개 혹은, 약간 더 얇은 6개의 리브와도 별 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

6. 조립

구조의 강성은 각 요소의 강성뿐만 아니라 요소간의 체결부 강성이 전체구조의 강성을 결정한다. 본 연구에서는 복합재료로 설계된 동작기계의 강성을 향상시키기 위해 삽입형 조인트를 설계하여 접착제를 이용한 접착법으로 베드와 체결하는 방법을 제안하였다. 각 구성 요소에서의 섬유강화 복합재료의 적층 각도는 Fig. 17~19에 표시하였다. 베드의 경

우는 Fig. 8에서 언급한 것과 동일하다.

섬유강화 복합재료의 경우는 표면에 흠이나 구멍가공을 할 경우 섬유 조직이 손상되어 강성이 저하될 수 있다. 따라서 각 요소간의 결합은 요소의 형상을 조절하여 섬유강화 복합재료의 손상을 막는 것이 바람직하다. Fig. 17와 18은 면접촉 부분을 가지도록 설계된 컬럼과 헤드스톡을 나타낸다. Fig. 19은 베드와 보 사이의 결합부를 보강하기 위해 설계된 L자형 탭(Tab)이다. 모든 체결부는 접착제를 이용한 접착법으로 체결하여 구조의 강성을 증가시키고 감쇠특성도 향상시킬 수 있도록 설계하였다. 설계된 구조의 동적 강성을

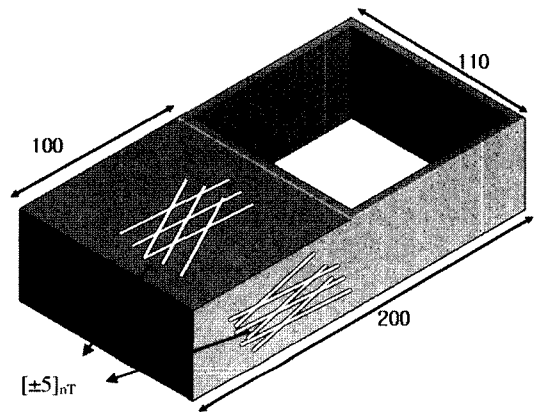


Fig. 18 Headstock with surface contact joint

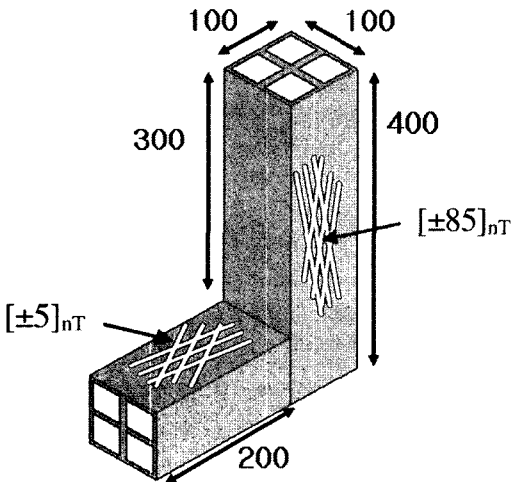


Fig. 17 L-Shaped beam joint

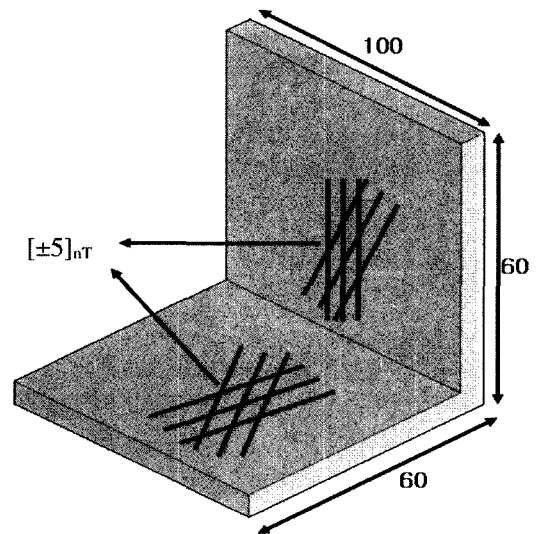


Fig. 19 Tab for joining bed with beam

예측하기 위해 Fig. 20의 형상에 대하여 유한요소해석을 통하여 구조의 공진주파수를 계산하였다. Fig. 20에 대한 구체적인 치수는 Table 9에 정리하였다. 유한요소해석에 사용한 프로그램은 ANSYS9.0이며 경계조건 등의 정보는 Table 10에 정리하였다.

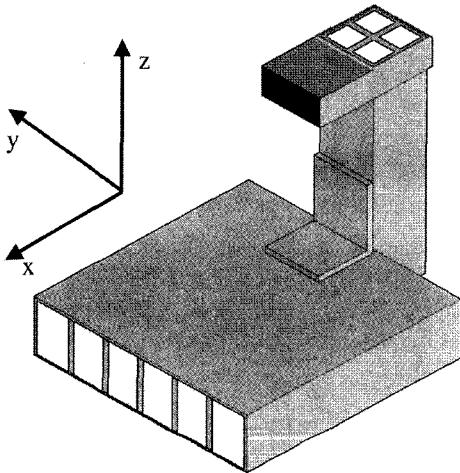


Fig. 20 Assembled machine tool structure

Table 9 Dimensions of the machine components

| | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Number of ribs | 5 |
| Thickness of rib | 6mm |
| Thickness of surface material | 5mm |
| Length of tab | L_t |
| Thickness of tab | t_t |
| Core material in bed | Polymer foam Resin concrete |
| Core material in beam | Polymer foam |

Table 10 Conditions for FEA

| | |
|---------------------------|---|
| Element type | Solid 45 |
| Boundary condition | Assumption to attach air bearing to angular points of bottom surface in bed |
| Number of nodes | About 9900 |
| Number of elements | About 8000 |
| Vibration analysis method | subspace |

6mm 두께의 리브 5개를 베드 내에 삽입한 근거는 앞서 제시하였으며, 보의 섬유강화복합재료의 두께를 5mm로 정한 것은 Fig. 8에서 Foam을 심재로 사용한 경우는 5mm를 전후하여 비굽힘강성이 포화되기 때문이다. 이 유한요소해석은 탭(Tab)의 적절한 길이와 두께를 결정하는 것이 목적이다. Fig. 21~22는 탭의 두께(t_t)를 5mm로 고정시킨 후 길

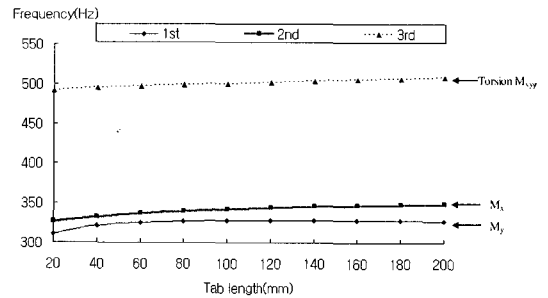


Fig. 21 Variation of natural frequency with respect to the tab length(resin concrete)

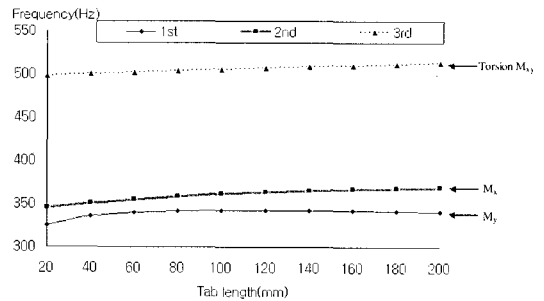


Fig. 22 Variation of natural frequency with respect to the tab length(polymer foam)

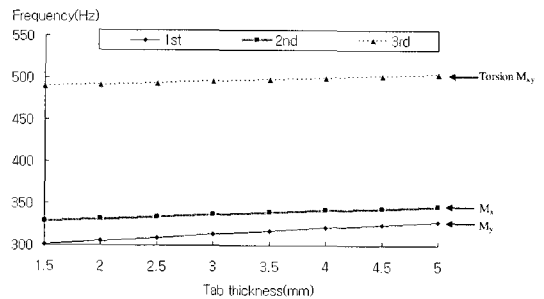


Fig. 23 Variation of natural frequency with respect to the tab thickness(resin concrete)

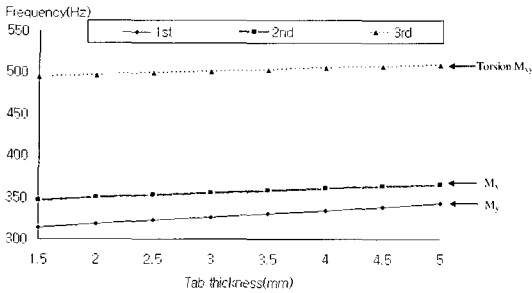


Fig. 24 Variation of natural frequency with respect to the tab thickness (polymer foam)

이를 변화시켰을 때, 1, 2, 3차 공진주파수 계산한 결과이다.

탭의 길이 변화에 따른 공진 주파수는 길이가 60mm 이상인 경우에는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 따라서 공진주파수를 고려한 탭의 길이는 60mm로 결정하였다. Fig. 23~24는 탭의 길이를 60mm로 고정시킨 후 두께를 변화시킨 결과이다. 탭의 두께를 변화시킨 경우에는 선택한 범위 내에서는 특정 값에 포화되지 않고 단순 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 탭의 두께를 결정하기 위해서는 다른 요인들을 고려하여야 할 것이다.

7. 결론

수 μm 단위의 정밀도가 요구되는 공작기계에서는 하중에 의한 처짐을 방지하기 위해 구조의 높은 굽힘강성이 요구되며, 이에 못지않게 가진에 의한 공진을 방지하기 위한 비굽힘강성도 중요하다. 주철, 알루미늄 등의 금속재료는 다양한 형상으로 제작될 수 있고 강성도 뛰어나지만, 높은 밀도에 기인한 낮은 비굽힘강성 때문에 정밀한 공작기계 제작에 부적합하며, 이를 해결하기 위해서는 비강성이 높은 재료가 필요하다. 기존의 복합재료를 사용한 공작기계들은 낮은 비굽힘강성을 보완하기 위하여 복합재료를 보조적으로 사용한 것에 비해, 본 논문에서는 섬유강화 복합재료를 핵심 재료로 사용하여 면재와 심재의 각종 파라미터 변화에 따른 구조성을 계산하였다.

또한 베드와 같이 평판 형태의 수직 압축력을 받는 부재의 경우에는 리브를 통한 구조적인 보강을 통하여 효과적으로 하중을 지지할 수 있음을 확인하였다. 리브를 통하여 구조적인 보강을 하는 경우 면재와 리브의 적층각도를 조절하여 유용한 효과를 거둘 수 있음을 확인하였다. 또한 유한요소해

석 및 파라메트릭 연구를 통하여 베드 내의 리브의 수를 결정하였으며, 각 요소들의 형상과 조립 방법 및 구조의 동적 강성을 예측하였다. 그리고 기존의 연구와는 달리 복합재료의 손상을 최소화하는 조립 방법을 제안하여 결합강성의 향상을 도모하였다.

후기

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

참고 문헌

- (1) Chang, S. H., Kim, P. J., Lee, D. G. and Choi, J. K., 2001, “Steel-composite hybrid headstock for high-precision grinding machine,” *Composite Structures*, Vol. 53, 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, pp. 155~163.
- (3) Lee, D. G., Hwang, H. Y. and Kim, J. K., 2003, “Design and manufacture of a carbon fiber epoxy rotating boring bar,” *Composite Structures*, Vol. 60, pp. 115~124.
- (4) Jeong, K. S., Lee, D. G. and Kwak, Y. K., 1995, “Experimental investigation of the dynamic characteristics of carbon fiber epoxy composite thin beams,” *Composite Structures*, Vol. 33 pp. 77~86.
- (5) Zenkert, 1995, *An introduction to Sandwich Construction*, Engineering Materials Advisory Services, pp. 1~48.
- (6) Kahng, C. H., 1995, “Machine Tool Technology ; The Present And The Future(5),” *Journal of the KSPE*, Vol. 12, No. 8, pp. 5~18.
- (7) Jack, R. V., 1999, *The Behavior of Sandwich Structure of Isotropic and Composite Materials*, Technomic, pp. 1~16.