

# 섬유강화 복합재료, 고분자 폼 및 레진 콘크리트로 구성된 샌드위치 구조 설계를 위한 파라메트릭 연구

김대일\*, 장승환<sup>+</sup>

Parametric study on design of sandwich structures composing of fibre reinforced composites polymer foam and resin concrete

D.I. Kim\*, S.H. Chang<sup>+</sup>

## Abstract

In this paper 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 for machine tool bed composites-skinned sandwich structure which has several ribs are proposed to enhance both directional bending stiffnesses at the same time. From the results optimal configuration and materials for high precesion machine tools are proposed.

**Key Words :** Parametric study, Sandwich construction, Resin concrete, PVC foam, Flexural rigidity, specific flexural ,Fiber reforcend composite material

## 1. 서론

기술이 발전함에 따라 제품의 크기는 줄어들고, 다양한 기능을 가지며, 각각의 기능은 향상되고 있다. 제품의 크기가 작아지면서 이를 구성하는 주요 부품들의 크기 역시

작아지고 이를 가공하는 공작기계도 부품 가공에 적합하게 소형화되어가고 있다. 그러나 부품의 소형화는 가공의 정밀도를 요구하며, 동시에 허용공차범위도 줄어드는 결과를 가져왔다. 최근에 이르러서는 수  $\mu\text{m}$ 단위의 정밀도를 요구하는 부품들이 다수 등장하면서 이에 발맞추어

\* 주저자, 중앙대학교 기계공학부 대학원  
+ 교신저자, 중앙대학교 기계공학부 (phigs4@cau.ac.kr)  
주소: 서울시 동작구 흑석동 221, (156-756)

공작기계도 미세가공에서의 정밀도가 중요해지고 있다. 공작기계와 가공대상이 직접 접촉하는 가공 방법은 가공시 하중과 진동이 추가로 발생하기 때문에 수 $\mu$ m단위의 가공에는 적합하지 않다. 따라서 가공대상과 직접 접촉하지 않으면서도 섬세한 가공이 가능한 ECM/EDM 가공 방식은 초정밀 공작기계에 적합하다. 그러나 기존의 전통적인 재료인 철과 알루미늄의 경우는 밀도가 높고, 비강성이 낮기 때문에 초정밀가공을 위한 공작기계에는 적합하지 못하다. 반면 섬유강화 복합재료의 경우 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 컬립과 헤드스톡을 설계하고 제작하였으며, 표면 감쇠처리 기술[3]을 적용하여 공작기계의 고감쇠구조를 구현하였다. 또한 Haranath[4]는 점탄성(Viscoelastic)층을 이용하여 밀링머신과 드릴링머신, 선반 등을 설계하여 구조의 감쇠특성을 향상시켰으며, Lee[5]는 기존의 텅스텐 보링바를 복합재료를 이용한 하이브리드 보링바로 대체하여 동강성(Dynamic stiffness)을 30% 향상시켰다. 그리고 Jeong[6]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 비강성을 얻을 수 있으며, 이는 진동에 의한 가공 오차를 줄일 수 있다. 그러나 샌드위치 구조는 단면의 형상에 따라서 기계적 특성이 변하기 때문에 주어진 조건에 대한 적합한 특성을 얻기 위해서는 여러 파라미터(Parameter)를 고려하여야 한다. 본 논문에서는 수 $\mu$ m수준의 정밀도를 가진 초소형화된 공작기계에 적합한 샌드위치 구조의 각종 파라미터를 얻기 위해 파라메트릭 연구(Parametric Study)를 수행하였다.

## 2. 공작기계의 구조

공작기계의 형상은 매우 다양하지만, 구성과 특징은 큰 차이를 보이지 않는다. Fig. 1은 공작기계의 일반적인 구조를 나타내며, 보(beam), 스테이지(stage), 베드(bed)로 구성되어 있다.

보는 주로 굽힘력을 받기 때문에 굽힘강성(EI)이 커야 하며, 공진주파수를 높이기 위하여 비굽힘강성(EI/ $\rho$ ) 역시 커

야 한다. 그리고 베드는 주로 수직압축력을 받기 때문에 압축강성을 고려해야 하며, 역시 진동을 감안하여 비강성도 높아야 한다.

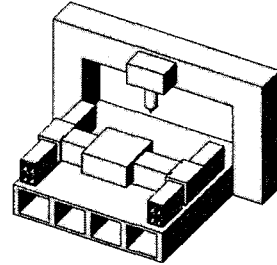


Fig. 1 공작기계의 구조

보와 베드에 각각 Fig. 2~3과 같은 샌드위치 구조의 단면을 제안하였으며, 면재의 두께변화와 복합재료의 적층각도에 따른 기계적 특성을 연구하였다. Fig.2~3에 제시된 모든 치수는 mm단위이다.

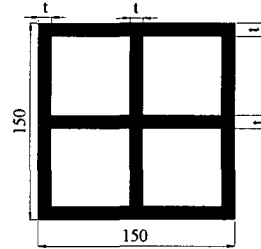


Fig. 2 제안된 샌드위치 보 단면

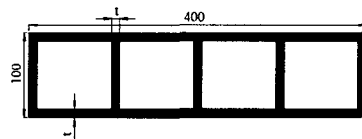


Fig. 3 제안된 샌드위치 평판 단면

## 3. 재료

Fig. 2와 3에서 제안한 형상에 Table 1의 재료들을 사용하여 기계적 특성을 예측하였다. 레진 콘크리트의 경우는 모래와 자갈, 수지의 혼합 비율에 따라서 영계수(Young's modulus)가 변한다. 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 섬유강화 복합재료를 사용하였으며, 심재(Core material)로는 밀도가 낮은 고분자 폼과 레진 콘크리트를 사용하였다. 샌드위치 구조에서 심재에 필요한 기계적 특성은 밀도가 낮고, 전단력에 강해야 하며, 열팽창이 적은 재료여야 한다. 레진 콘크리트는 밀도가 크지만 전단력에 강하고 열팽창이 적은 재료이며, 폼은 밀도가 작고, 열팽창이 적은 재료이다. Table. 1에 여러 가지 재료의 주요 물성을 나열하여 비교하였다. 일방향 섬유강화 복합재료는 적층 각도에 따른 영계수 변화가 매우 크다. Fig. 4는 섬유강화 복합재료의 적층 각도에 따른 영계수변화를 나타낸 것이다.

Table 1 Properties of materials

재 료	밀 도 (kg/m <sup>3</sup> )	영계수 (GPa)
USN125 (섬유강화 복합재료)	1550	E <sub>L</sub> 130 E <sub>T</sub> 10
Resin concrete	2207	15
PVC foam HT110	115	0.078
Cast Iron	7480	138
Aluminium	2800	70

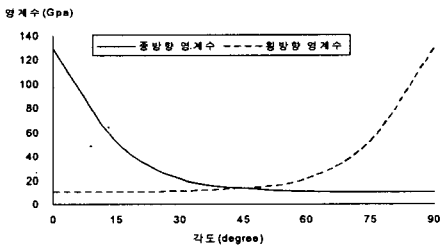


Fig. 4 적층각도에 따른 USN125의 영계수 변화

#### 4. 보에 대한 파라메트릭 연구

Fig. 2에서 제안한 샌드위치 구조의 보에서 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  $[\pm 5]_{nt}$ ,  $[\pm 5/0]_{ns}$ ,  $[\pm 30]_{nt}$ ,  $[\pm 30/0]_{ns}$ ,  $[\pm 45]_{nt}$ 이다. Fig. 2에서 보인 단면에 대한 굽힘강성(EI)과 비굽힘강성(EI/ρ)을 복합재료의 두께(t)에 대한 함수로 나타내면 다음식 (1)~(7)과 같다.

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

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

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

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

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

$$m_s = [(b)^2 - (b-2t)^2 + (2t)(b-2t) - (t)^2] \times 300 \times 10^{-3} \times \rho_s \quad (6)$$

$$m_c = [(b-2t)^2 - (b-2t)(2t) + (t)^2] \times 300 \times 10^{-3} \times \rho_c \quad (7)$$

EI(t): 등가 굽힘강성

m: 질량

ρ(t): 등가밀도

V<sub>str</sub>: 구조물의 전체부피

t: 복합재료의 두께

b:  $150 \times 10^{-3}$ (m), 정사각형 단면의 한 변 길이

여기서 첨자 s, c는 각각 면재와 심재를 나타낸다. Fig. 5~6은 심재로 아무 것도 사용되지 않은 중공상태의 보일 때 면재의 두께와 적층각도 변화에 따른 굽힘강성(EI)과 비굽힘강성(EI/ρ)의 변화를 복합재료의 적층순서에 따라 나타낸 것이다. Fig. 5는 면재인 복합재료의 두께(t)가 증가할수록 굽힘강성이 증가함을 나타낸다. 반면 Fig. 6은 면재가 두꺼워질수록 비굽힘강성이 감소함을 보여준다. 이는 면재의 두께가 증가하여 구조의 밀도가 커지면서 중공구조의 장점이 상쇄됨을 나타낸다. Fig. 5~6에서 보이는 바와 같이  $[\pm 5]_{nt}$ ,  $[\pm 5/0]_{ns}$ 는 거의 동일한 굽힘강성과 비굽힘강성을 가진다. 제작과정은  $[\pm 5]_{nt}$ 가  $[\pm 5/0]_{ns}$ 에 비해 용이하기 때문에  $[\pm 5]_{nt}$ 를 면재로 선택하는 것이 더 적합하다고 할 수 있다.

Fig. 7~8은  $[\pm 5]_{nt}$ 로 적층된 복합재료를 면재로 하고, 레진 콘크리트와 PVC 폼을 심재로 한 샌드위치 구조 및 중공구조와 주철, 알루미늄의 굽힘강성과 비굽힘강성을 비교한 것이다. 굽힘강성(EI)에서는 주철이 다소 우수하지만, 비굽힘강성에서는  $[\pm 5]_{nt}$ 로 적층한 일방향 복합재료가 4~5

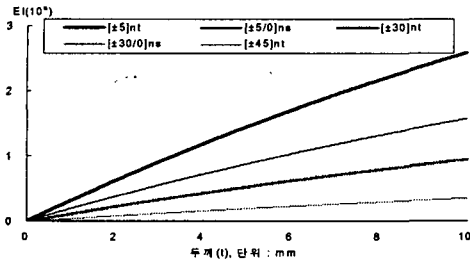


Fig. 5 중공구보 보의 적층순서에 따른 굽힘강성 비교

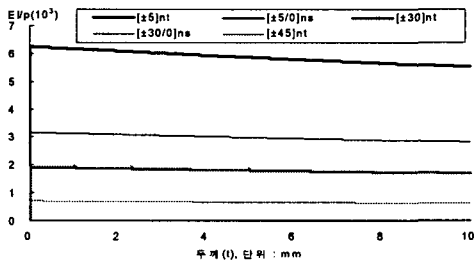


Fig. 6 중공구보 보의 적층순서에 따른 비굽힘강성 비교

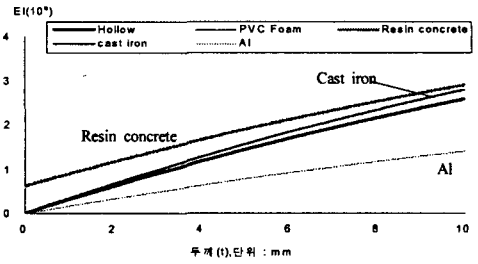


Fig. 7 여러 가지 심재 및 다른 재료와의 굽힘강성 비교

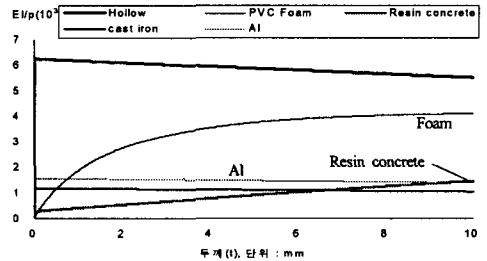


Fig. 8 여러 가지 심재 및 다른 재료와의 비굽힘강성 비교

배 이상 우수함을 알 수 있다. Fig. 7에서 각각의 샌드위치 구조에 대한 비교를 보면 굽힘강성은 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 이는 심재인 PVC 폼과 레진 콘크리트의 강성이 면재에 비해 매우 작고, 기하학적으로 중립축에 근접해 있기 때문이다. 그러나 비굽힘강성은 강성이 작은 폼을 심재로 한 샌드위치 보가 더 큼을 알 수 있다(Fig. 8). 복합재료의 두께가 증가함에 따라 레진 콘크리트를 심재로 한 샌드위치 보의 비굽힘강성도 크게 증가하지만, 이는 레진 콘크리트의 효과가 아니라 비강성( $E/p$ )이 큰 섬유강화 복합재료에 의한 결과이다. 따라서 진동에 의한 문제가 더 심각한 경우라면 심재로 PVC 폼을 사용하는 것이 레진 콘크리트를 사용하는 것보다 더 적합하다는 것을 알 수 있으며, 이 경우 섬유 강화 복합재료의 최적의 적층각도와 두께를 계산해 낼 수 있다(Fig. 7, 8 참조).

EDM/ECM 공작기계는 절삭 메카니즘의 특성상 전기절연 혹은 화학적 부식에 강한 재료의 사용이 요구된다. 따라서 탄소섬유강화 복합재료는 이러한 환경에 취약할 수 있으므로 내식성과 전기절연성을 가진 레진 콘크리트를 면재로 하고 복합재료 샌드위치 구조를 내부에 보강한 구조에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 9는 레진 콘크리트를 면재로 하고, 섬유강화 복합재료, 폼, 레진 콘크리트를 이용한 보를 내부에 강화구조로 삽입한 단면을 나타낸 것이다. Fig. 10은 섬유강화 복합재료를 면재로 사용한 Fig. 2와 비교할 수 있

는 단면 구조이다. 레진 콘크리트는 골재와 수지가 혼합된 재료이기 때문에 기계적 특성상 섬유강화 복합재료처럼 매우 얇은 형태를 유지하기가 어려우며, 얇은 형태로 제작하더라도 쉽게 파괴되거나, 부분적인 결함이 다수 발생하여 사용이 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 외부 치수의 20%에 해당하는 두께를 레진 콘크리트가 기계적 특성을 발휘하기 위한 최소 필요 두께로 가정하였고, 150mm×150mm의 단면 구조에서는 이 가정에 따라 30mm를 레진 콘크리트의 두께로 하여 파라메트릭 연구를 수행하였다.

이 경우에는 레진 콘크리트의 두께는 변하지 않고 내부에 심재의 역할을 하는 섬유강화 복합재료의 두께가 변하는 것으로 가정하였다. 그리고 섬유강화 복합재료내에 폼을 심재로 하는 경우를 계산하여 Fig. 2와 비교한 결과를 Fig. 10~11에 나타내었다. 폼을 심재로 사용한 경우를 비교한 이유는 Fig. 2에서 레진 콘크리트가 심재로 사용된 경우와 비교해도 굽힘강성에 큰 차이가 없으면서 중공구조 보의 비굽힘강성에 근접하기 때문이다. Fig. 9에서 샌드위치 보의 굽힘강성을 복합재료의 두께의 함수로 나타낸 다음과 같다.

$$EI = E_S I_S + E_C I_C + E_{C2} I_{C2} \quad (8)$$

$$E_S I_S = 5.80 \times 10^5 \quad (9)$$

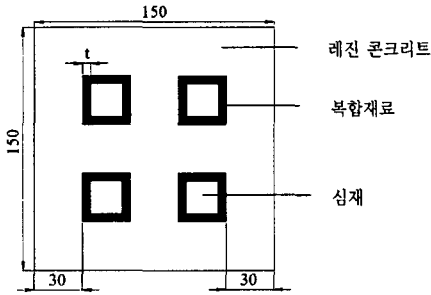


Fig. 9 레진 콘크리트가 면재인 샌드위치 구조

$$\begin{aligned}
 E_{c1}I_{c1} &= E_{c1} \left[ \frac{1}{12} (30 \times 10^{-3})^4 \right. \\
 &\quad - \frac{1}{12} (30 \times 10^{-3} - 2t)^4 \\
 &\quad + \left. \left\{ (30 \times 10^{-3})^2 - (30 \times 10^{-3} - 2t)^2 \right\} \right. \\
 &\quad \left. \times (30 \times 10^{-3})^2 \right] \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{c2}I_{c2} &= E_{c2} \left[ \frac{1}{12} (30 \times 10^{-3} - 2t)^4 \right. \\
 &\quad + (30 \times 10^{-3} - 2t)^2 \\
 &\quad \left. \times (30 \times 10^{-3})^2 \right] \quad (11)
 \end{aligned}$$

여기서 아래 첨자 c1과 c2는 각각 복합재료와 심재를 나타낸다. Fig. 10~11의 결과에서 보이는 바와 같이 레진 콘크리트를 면재로 사용했을 경우 굽힘강성이 크게 저하됨을 알 수 있다. 레진 콘크리트는 탄소섬유 복합재료에 비해 전기절연성이 우수하지만, 면재를 탄소섬유로 사용한 경우라도 유리 섬유를 사용한 복합재료로 얇게 표면 처리를 할 경우 거의 동일한 효과를 얻을 수 있기 때문에 레진 콘크리트를 면재로 사용하는 것은 부적합함을 알 수 있다.

## 5. 베드에 대한 파라메트릭 연구

베드의 형상은 400mm×100mm×400mm의 치수를 가지는 두꺼운 평판형태(Fig. 3 참조)를 가정하여 해석을 수행하였다. 베드에 작용하는 하중은 수직압축력이 대부분이기 때문에 하중을 지지하는 부분에 있어서는 강성이 높을수록 유리하다. 그러나 가공 대상물의 이동과 공구의 작동에 의한 가진이 있기 때문에, 진동을 고려하여야 한다. 앞서 보에서 주철의 경우 구조의 강성 향상에는 유리하지만, 진동에서 주요한 인자인 비굽힘강성이 취약함을 알았다. 따라서 이를 해결하기 위하여 섬유강화 복합재료를 이용한 샌드위치 구조를 사용하여 비굽힘강성을 최적화시키는 파라

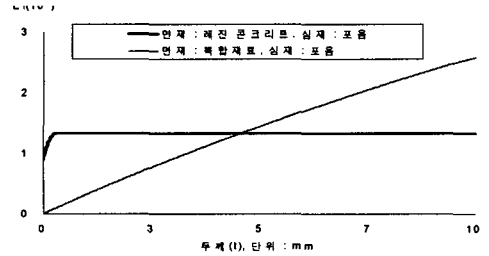


Fig. 10 면재의 재료에 따른 굽힘강성의 비교

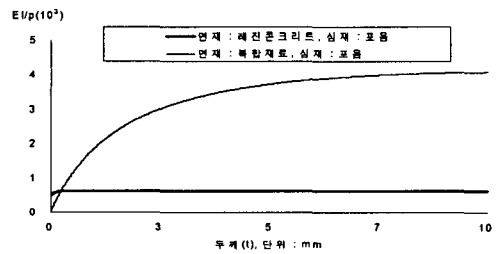


Fig. 11 면재의 재료에 따른 비굽힘강성의 비교

메트릭 연구를 수행하였다.

Fig. 3의 구조는 이방성 재료인 일방향 복합재료와 폼 등의 심재를 이용한 샌드위치 베드 구조이다. 수직압축력을 지지하기 위해서는  $[0/90]_n$ 의 적층순서가 효과적이거나, 이 경우 강성의 손실을 감수해야 한다. 따라서 섬유강화 복합재료의 효과적인 이용을 위해서 샌드위치 구조 내부의 리브는 종방향의 하중 및 굽힘 모멘트를 지지하고, 면재는 횡방향의 굽힘모멘트를 지지하는 역할을 담당한다. 따라서 Fig. 3과 같이 리브구조는  $[\pm 5]_n$ 의 적층순서를 가지는 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료를 사용하였고, 면재에는 리브와 동일한 재료를  $[\pm 85]_n$ 로 적층하였다.

리브의 두께를 5mm로 가정하고 리브의 수를 증가시킬 때, 비굽힘강성의 변화를 그래프로 나타낸 것이 Fig. 13와 14이다. 리브의 수가 늘어나면 굽힘강성은 증가하지만, 중공 효과가 줄어들면서 비굽힘강성은 감소하고 있다. 또한 리브의 수가 늘어날 경우 심재의 보강이 어려워지게 되는 단점이 있다. 따라서 굽힘강성과 비굽힘강성 뿐만 아니라 심재가 기계적 특성을 발휘하는 최소의 크기 및 가공 조건을 고려하여 리브의 수를 결정해야 한다. Fig. 15는 리브의 개수를 3개로 고정하고 리브 두께를 증가시킨 경우의 비굽힘강성이다. 두께증가에 따른 비굽힘강성이 다소 감소하지만, 수직압축력에 대한 지지 능력 향상을 고려한다면 리브를 가진 샌드위치 구조는 일방향 복합재료를 이용한 평판제작에 매우 효과적인

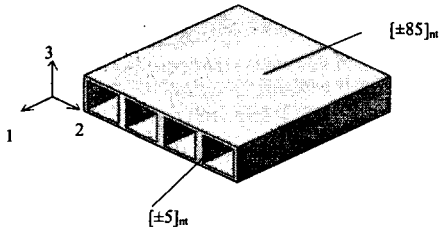


Fig. 12 리브구조를 내부에 가진 샌드위치 평판

과적인 설계임을 알 수 있다.

## 6. 결론

수 μm 단위의 정밀도를 요구되는 공작기계에서는 하중에 의한 처짐을 방지하기 위한 굽힘강성이 중요하며, 이에 못지 않게 가진에 의한 진동을 방지하기 위한 비굽힘강성도 중요하다. 금속 재료로서 다양한 형상을 제작할 수 있고, 강성이 뛰어난 주철의 경우 높은 밀도에 기인한 낮은 비굽힘강성 때문에 정밀한 공작기계 제작에 부적합하며, 이를 해결하기 위해서는 비강성이 높은 재료가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 면재와 심재의 각종 인자 변화에 따른 굽힘강성과 비굽힘강성의 변화 경향을 계산하였다. 또한 베드와 같이 평판 형태의 수직 압축력을 받는 경우는 리브를 통한 구조적인 보강을 통하여 효과적으로 하중을 지지할 수 있다. 리브를 통하여 구조적인 보강을 하는 경우는 면재와리브의 적층각도를 각각 다르게 하면 큰 효과를 거둘 수 있음을 알게 되었다. 본 연구를 통해서 강성과 비강성이 모두높으면서, 비굽힘강성도 만족시키기 위해서는 섬유강화 복합재료를 이용한 샌드위치 구조가 유리함을 확인하였다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

[1] Chang SH, Kim PJ, Lee DG, Choi JK. Steel-composite hybrid headstock for high-precision grinding machine. *Compo Struct* 2001; 53: 1-8.

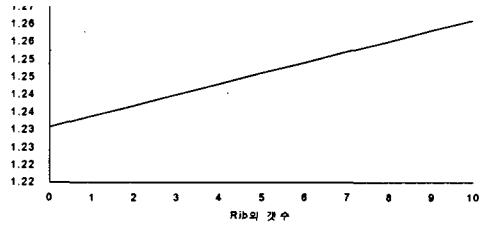


Fig. 13 리브의 수에 따른 굽힘강성

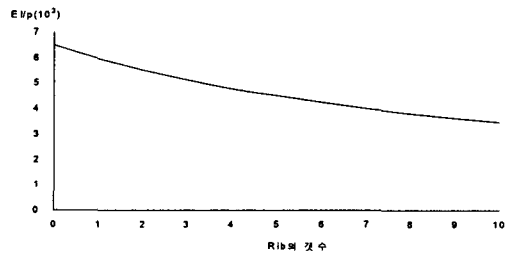


Fig. 14 리브의 수에 따른 비굽힘강성

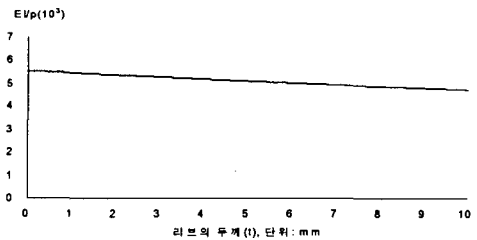


Fig. 15 리브의 두께에 따른 비굽힘강성 변화(리브 3개)

[2] Lee DG, Chang SH, Kim HS. Damping improvement of machine tool columns with polymer matrix fiber composite material. *Compo Struct* 1998; 43: 155-163.

[3] Nashif AD, Jones DIG, Henderson JP. Vibration damping. John wiley & sons; 1985 [Chapter 6].

[4] Haranath S, Ganesan N, Rao BVA. Dynamic analysis of machine tool structures with applied damping treatment. *Int J Mach Tools Manufact* 1987; 27: 43-55.

[5] Lee DG, Hwang HY, Kim JK. Design and manufacture of a carbon fiber epoxy rotating boring bar. *Compo Struct* 2003; 60: 115-124.

[6] Jeong KS, Lee DG, Kwak YK. Experimental investigation of the dynamic characteristics of carbon fiber epoxy composite thin beams. *Comp Struct* 1995; 33: 77-86.