

고속 밀링 머신용 복합재료 이송부의 설계와 제작

서정도*, 김학성*, 김종민*, 최진경**, 이대길***

Design and Manufacture of Composite Machine Tool Structures for High Speed Milling Machines

Jung-do Suh*, Hak-Sung Kim*, Jong-Min Kim*, Jin-Kyung Choi**, Dai-Gil Lee***

Key Words : Machine Tool Structure, Composite, High Speed Machining, Sandwich Structure

ABSTRACT

To maximize the productivity in machining molds and dies, machine tools should operate at high speeds. However, the productivity of mold manufacturing has not increased significantly because CNC milling machines have massive slides, which do not allow rapid acceleration and deceleration during the frequent starts/stops encountered in machining molds and dies. This paper presents the use of composites for these slides to overcome this limitation. The vertical and horizontal slides of a large CNC machine were constructed by bonding high-modulus carbon-fiber epoxy composite sandwiches to welded steel structures using adhesives. These composite structures reduced the weight of the vertical and horizontal slides by 34% and 26%, respectively, and increased damping by 1.5 to 5.7 times without sacrificing the stiffness. Without much tuning, this machine had a positional accuracy of $\pm 5\mu\text{m}$ per 300 mm of the slide displacement.

1. 서론

최근 공작기계는 고정도의 제품을 단시간에 생산하기 위해 빠르고 진동이 작은 이송부가 필수적이며 20 m/s^2 정도의 가속도가 요구된다. 실제로 공작기계의 작동 중 빈번하고 빠른 이송부의 구동을 위해 큰 모터가 필요하고 진동과 관련된 문제점 발생이 빈번하다 [1-4]. 고속 고정밀 공작기계의 이송부는 경량, 고강성 및 고감쇠 특성이 요구되는데 기존의 금속재료는 비강성 (E/ρ)이 작고 진동 감쇠능이 작으므로 요구사항의 실현이 어렵다. 이러한 요구조건들은 고강성·고감쇠 특성의 섬유보강 복합재료 적용을 통해 만족시킬 수 있으며, 샌드위치 구조로 설계하면 복합재료의 장점을 극대화 할 수 있다.

본 연구에서는 고속 CNC 밀링머신의 고속 이

송부인 X-slide 와 Y-slide 에 섬유강화 복합재료와 하니콤폴을 이용한 샌드위치 구조를 적용하여 경량·고강성 구조로 제작하였으며 진동감쇠 특성을 실험을 통해 기존의 강철 구조물과 비교하였다.

2. 샌드위치 구조의 공작기계 적용

2.1 샌드위치 빔의 특성

샌드위치 빔의 굽힘강성 D 는 $E_f \square E_c$ 이고 $d \square t$ 일 때 다음과 같다 [6-8].

$$D = E_f \cdot \frac{bt^3}{6} + E_f \cdot \frac{btd^2}{2} + E_c \cdot \frac{bc^3}{12} \approx E_f \cdot \frac{btd^2}{2} \quad (1)$$

여기서 아래 E_f 와 E_c 는 각각 면재와 심재의 Young's moduli 를 의미한다.

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 고등기술연구원 선임 연구원

*** 한국과학기술원 기계공학과 교수

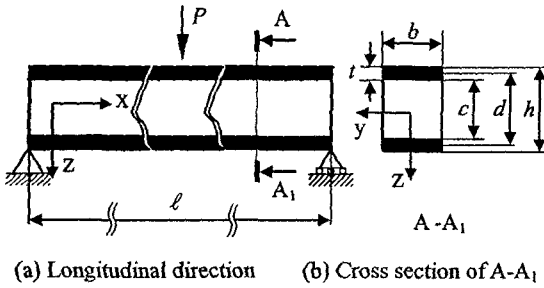


Fig. 1 Dimensions of a sandwich beam.

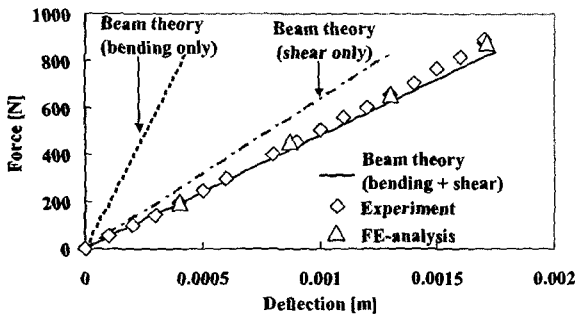


Fig. 2 Deflection of the sandwich beam obtained by the beam theory, experiment and FEM analysis.

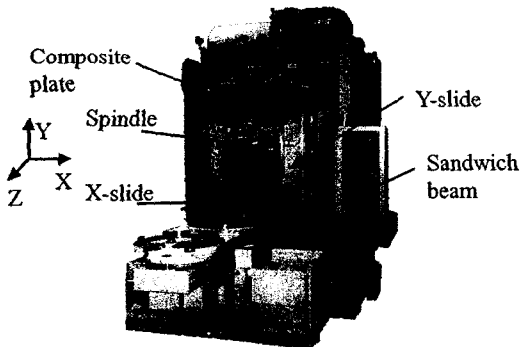


Fig. 3 High speed milling machine tool structure.

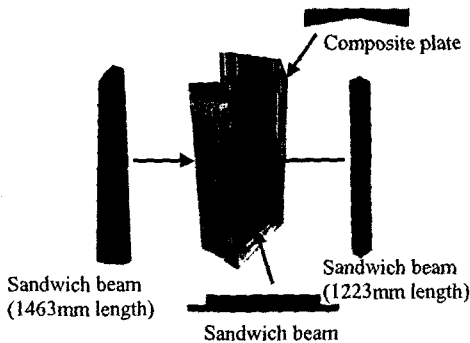


Fig. 4 Hybrid X-slide and composite reinforcements.

Table 1 Dimensions [mm] of the sandwich specimens.

b	c	d	h	ℓ
55	18	23	28	600

Fig. 1과 같은 단순지지조건 및 중앙부 집중하중에서 총처짐 Δ 는 굽힘에 의한 처짐 Δ_1 과 전단변형에 의한 처짐 Δ_2 의 합과 같다 [6, 9].

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{Pl^3}{48D} + \frac{Pl}{4AG_c} \quad (2)$$

여기서 G_c 는 심재의 전단강성이다. 일반적으로 샌드위치 구조에 사용되는 심재는 낮은 전단강성을 가지므로 설계시 전단에 의한 변형을 고려해야 한다. 본 연구에서는 샌드위치 빔의 굽힘 특성에 대하여 식 (2)의 빔 이론을 FEM 해석 및 실험과 비교 하였다. 샌드위치 빔은 탄소섬유강화 복합재료 USN150과 유리섬유강화 복합재료 GEP215를 사용한 면재, 아라미드 섬유 하니콤 HRH-10-1/8-4.0심재로 제작하였으며, 면재 제작시 적층 방식은 $[0^2_2G/0^2_{10}C/0^2_{10}G/0^2_{10}C]_s$ 로 하였다. 여기서 아래첨자 c와 g는 각각 탄소섬유, 유리섬유 복합재료를 의미하고 자세한 빔의 사양은 Table 1과 같다. Fig. 2는 식 (2)의 빔 이론, FEM 해석, 실험 결과의 비교이고 약 8% 오차 범위 이내로 잘 일치 하였다. 이 경우, 전단에 의한 처짐은 굽힘에 의한 처짐의 약 3배에 해당하는 값을 가지므로 실제 공작기계 적용시 구조물의 변형을 최소화하기 위하여 옆면이 강철로 둘러 싸인 Box Type 빔을 적용하였다. 이때 Box Type 빔 측면 강철 면재의 전단응력 $\tau_{xz,s}$ 와 하니콤의 전단응력 $\tau_{xz,h}$ 의 관계는 아래와 같다.

$$\tau_{xz,s} = G_{xz,s} \gamma_{xz} = \frac{G_{xz,s}}{G_{xz,h}} \tau_{xz,h} = R \tau_{xz,h} \quad (3)$$

여기서 R은 전단강성의 비이다. 식 (3)에 의해 Box Type 빔의 처짐은 굽힘에 의한 처짐 Δ_1 과 전단변형에 의한 처짐 Δ_2 의 합과 같으므로 아래 식이 성립한다.

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{Pl^3}{48D} + \frac{Pl \int_{A_c} E z dA}{4D(Rb_s + b_h)G_{xz,h}} \quad (4)$$

Δ_2 에 대한 Δ_1 의 비를 RBT (Ratio of Bending to Shear Deflection)라고 하면 아래 조건일 때 전단에 의한 처짐을 무시할 수 있다.

$$RBT = \frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{\ell^2 (Rb_s + b_h) G_{xz,h}}{12 \int_{A_c} E z dA} \gg 1 \quad (5)$$

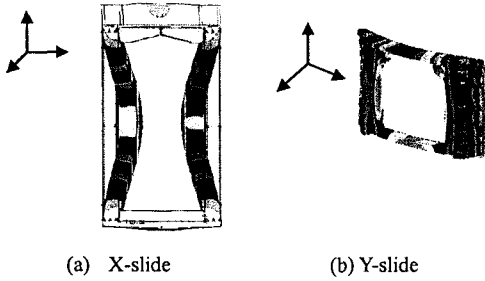


Fig. 5 Deformation of the steel machine tool structures.

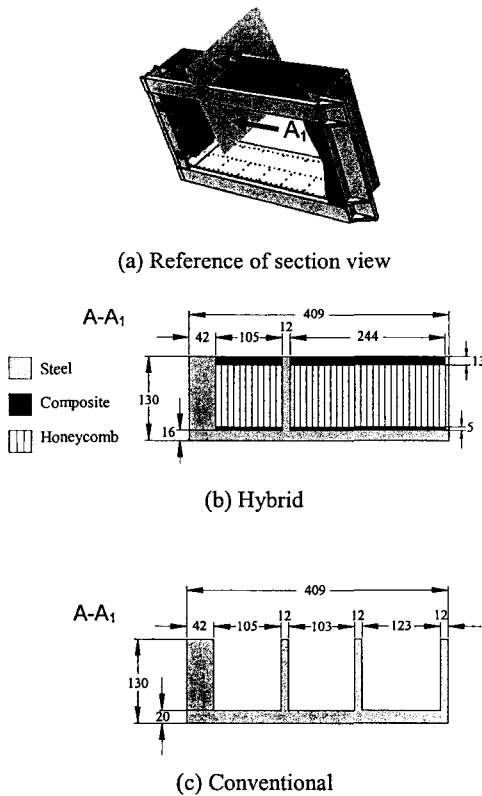


Fig. 6 Section views of vertical columns of the X-slide.

Table 2 Dynamic characteristics of the hybrid X-slide under free-free boundary condition.

Mode	Conventional X-slide			Hybrid X-slide		
	Natural frequency	Mode shape	Damping factor (%)	Natural frequency	Mode shape	Damping factor (%)
1	64Hz	Torsion	0.90	92Hz	Torsion	2.20
2	126Hz	Bending	0.50	131Hz	Tilting	0.80
3	211Hz	Bending	0.30	281Hz	Bending	1.20
4	261Hz	Bending + Twisting	0.20	304Hz	Bending + Twisting	0.80
5	308Hz	Bending + Twisting	0.14	357Hz	Bending + Twisting	0.80

2.2 경량 복합재료 고속 이송부의 설계와 제작

Fig. 3은 하이브리드 이송부 (Machine Tool Frame)가 장착된 고속 밀링 머신이다. 고속 이송부는 강철 용접 구조물인 기본 골격에 복합재료 보강재를 접합한 하이브리드 구조로 제작하였다. 즉, 수직 이송부인 Y-slide와 수평이송부인 X-slide의 수직 컬럼 (Vertical Column)은 복합재료 샌드위치 빔으로, 수평 컬럼 (Horizontal Column)은 복합재료 판재로 보강하였다. 공작기계에는 35,000rpm의 주축부를 장착하였고 Y-slide와 X-slide는 2.0 m/s의 최고 속도와 14.0 m/s²의 최고 가속도로 구동된다. Fig. 4는 강철 용접 구조물에 복합재료 판재와 샌드위치 구조로 보강된 X-slide의 모습이다. 이송부의 설계를 위해 작동 중 변형을 FEM 해석을 통해 확인하였는데 X-slide의 경우 세로 컬럼이 안쪽에 장착된 리니어 모터의 흡인력 20kN에 의해 안쪽으로 휘어지는 변형을 하며, Y-slide의 경우 스펀들 부의 자중 4000N에 의해 가로 컬럼이 변형함을 확인하였다. 따라서 X-slide의 세로 컬럼과 Y-slide의 가로 컬럼이 복합재료를 적용하여 보강 할 주요부로 결정하였다. 하이브리드 이송부는 Fig. 6과 같이 경량화를 위해 기존의 강철 이송부에 비해 얇은 강철 베이스에 복합재료 보강재를 접합하여 제작하였다. 단순한 샌드위치 구조는 전단 변형에 의한 영향이 크므로 Fig. 6(b)과 같이 Box-Type 설계를 채택하였으며 식(5)의 *RBT* 값이 10.4 이상이므로 전단 변형의 영향을 거의 무시할 수 있다. 따라서 설계 초기 과정에서 하이브리드 구조물이 기존 구조물 이상의 굽힘강성 *D*를 갖도록 복합재료 보강재의 위치와 두께를 결정하였다. 그 후 FEM 해석을 통해 샌드위치 빔의 내·외측 면재 두께를 각각 5, 13mm로 결정하였다. 사용된 복합재료는 탄소 및 유리 섬유 에폭시 복합재료 USN150과 GEP215(SK Chemicals, Korea)를 사용하였고 샌드위치 빔 심재는 노멕스 하니콤 HRH-10-1/8-4.0을 사용하였다. 복합재료 보강재의 접합에는 에폭시 접착제 (2216B/A, 3M, USA)와 볼트를 모두 사용하였다.

Table 3 Dynamic characteristics of the hybrid Y-slide under free-free boundary condition.

Mode	Conventional Y-slide			Hybrid Y-slide		
	Natural frequency	Mode shape	Damping factor (%)	Natural Frequency	Mode shape	Damping factor (%)
1	135Hz	Torsion	0.48	115Hz	Torsion	0.90
2	345Hz	Bending	0.22	341Hz	Bending	0.35
3	365Hz	Complex mode	0.19	589Hz	Bending	0.30
4	572Hz	Bending	0.22	598Hz	Bending	0.32
5	690Hz	Bending	0.12	620Hz	Bending	0.28

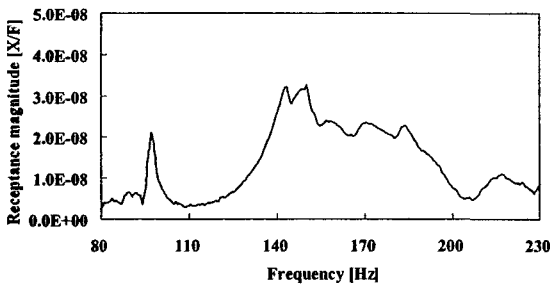


Fig. 7 Dynamic characteristics of the hybrid X-slide assembled with frame and spindle unit.

Table 4 Comparison between masses of the X-slide and the Y-slide of the conventional and the hybrid machine tools.

	Conventional	Hybrid	
X-slide	671 kg	497 kg	
		465 kg (steel base)	32 kg (composite)
Y-slide	140 kg	92 kg	
		84 kg (steel base)	8 kg (composite)

3. 진동특성 향상 및 경량화 특성

기존의 강철 이송부와 복합재료를 적용한 하이브리드 이송부 구조물에 대해 충격 응답 시험을 통해 동특성을 비교하였다. Table 2 와 3 에서 보인 바와 같이 X-slide 의 경우 고유진동수가 약 30% 정도 증가하였으며 진동 감쇠는 1.6~5.7 배 증가하였고 Y-slide 의 경우 1.5~2.5 배 진동 감쇠 증가가 있었다. Fig. 7 은 하이브리드 X-slide 가 장착된 공작기계 전체 구조물의 FRF 이며 저차 진동 모드의 진동수와 진동감쇠계수는 각각 97, 143, 150Hz 와 2.65, 1.84, 3.27 % 이다. Table 4 는 하이브리드 이송부와 기존 강철 이송부의 자중을 비교 한 것이며 각각 X, Y-slide 에 대해 각각 26, 34 %의 경량화를 실현하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 고속 CNC 밀링머신의 수평 및

수직 이송부 X-slide 와 Y-slide 에 복합재료 샌드위치 보강재를 적용한 하이브리드 형태 구조물을 설계 및 제작하였다. 하이브리드 구조물은 강성을 유지하면서 기존의 강철 구조물에 비해 X, Y-slide 의 경우 각각 26%와 34%의 경량화를 실현하였다. 또한 진동 감쇠계수(Damping Factor)는 약 1.5~5.7 배 증가하였고 넓은 주파수 범위에서 큰 진동 감쇠 특성을 가졌다.

후 기

본 연구는 대한민국 정부의 NRL 과제와 고등기술연구원 및 대우 종합기계(주)의 지원으로 수행되었으며 연구 결과는 2001 대한민국 10대 신기술로 선정되었다.

참고문헌

- (1) Schmitz, T. L. and Donalson, R. R., 2000, Predicting High-Speed Machining Dynamics by Substructure Analysis, *Annals of CIRP*, 49/1:303-308.
- (2) Ema, S. and Marui, E., 1996, Damping characteristics of an impact damper and its application, *Int. J. Mach. Manufact.*, Vol. 36:293-306.
- (3) Rivin, E. I. and Kang, H., 1989, Improvement of machining conditions for slender parts by tuned dynamic stiffness of tool, *Int. J. Mach. Manufact.*, Vol. 29:361-376.
- (4) Tobias, S. A., 1965, *Machine Tool Vibration*, John Wiley & Sons, Inc., New York:143-146.
- (5) Lee, D. G., Sin, H. Y. and Suh, N. P., 1985, Manufacturing of a graphite epoxy composite spindle for a machine tool, *Annals of the CIRP*, Vol. 34:365-369.
- (6) Allen, H. G., 1969, *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*, Pergamon Press, New York:8-47.
- (7) Vinson, J. R., 1999, *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*, Technomic Publishing, Inc., Lancaster, Pennsylvania: 81-104.
- (8) Zenkert, D., 1997, *The Handbook of Sandwich Construction*, EMAS Publishing:51-77.
- (9) Gere, J. M., 1997, *Mechanics of Materials* 5th ed., Books/Cole:271-378.