

공작기계 강철-복합재료 하이브리드 헤드스톡의 설계 및 제작

최진경* · 장승환** · 김포진** · 이대길** · 김태형***

Design and Manufacture of the Steel-Composite Hybrid Headstock for Machine Tools

Jin Kyung Choi, Seung Hwan Chang, Po Jin Kim, Dai Gil Lee and Tae Hyong Kim

Key Words : Surface damping treatment, Damping capacity, Glass fabric epoxy composite, Bending mode, Loss factor, R.K.U. equation

Abstract

During machining, since more than 50% compliance of the cutting point in machine tool structures comes from headstocks, with the remainder coming from beds, slides and structural joints, the structural analysis of the headstock is very important to improve the static and dynamic performances. Especially, in case of machining hard and brittle materials such as glasses and ceramics with the grinding machine, the reinforced headstock with the high damping material is demanded. Since the fiber reinforced composite materials have excellent properties for structures, owing to its high specific modulus, high damping and low thermal expansion, it is expected that the dynamic and thermal characteristics of the headstock will be improved if they are employed as the materials for headstock. In this paper, the design and the manufacturing methods as well as the static and dynamic characteristics of a steel-composite hybrid headstock were investigated analytically and experimentally to improve the performance of the grinding machine system.

기호설명

- f : First natural frequency [Hz]
- L : Length of the beam [m]
- E : Longitudinal Young's modulus [Pa]
- I : 2nd area moment of inertia [m⁴]
- ρ : Density [kg/m³]
- S : Cross sectional area [m²]
- η : Loss factor

1. 서론

최근 산업분야에서는 다품종 소량생산을 통한

고부가가치 고정밀 제품의 수요가 증가하고 있으며, 관련된 생산기술의 개발과 그에 따른 공작기계의 정밀화 및 신속한 가공속도가 지속적으로 요구되고 있다 [1-2]. 생산성 향상을 위한 고속 정밀가공은 공작기계 구조의 공진과 구동부의 과도한 열발생 등으로 인해 최고 가공속도와 제품의 정밀도가 제한 받게 된다. 따라서 정밀가공을 위한 공작기계의 내진설계가 가공물의 정밀도에 매우 중요한 요소로 인식되고 있다. 구조물의 진동과 소음을 효과적으로 감쇠 시키기 위한 표면감쇠처리(Surface damping treatment)는 구조에 적용이 쉽고 넓은 주파수 범위에서 우수한 감쇠성능을 얻을 수 있기 때문에 많은 분야에 성공적으로 적용이 되어 왔다. 고무와 같은 고분자 재료는 감쇠특성은 우수하지만 재료의 강성이 감쇠 시키고자 하는 고강성 금속 구조물에 비해 매우 작으므로 이러한

* 고등기술연구원

** 한국과학기술원 기계공학과

*** 대우중공업 공기사업본부

재료를 이용한 표면감쇠처리는 효과적인 감쇠성능 (Damping capacity)을 얻기 힘들다. 반면에 고분자 기지 섬유강화 복합재료 (Fiber reinforced composite material)는 우수한 감쇠특성과 고강성 특성을 동시에 가지므로 공작기계 구조와 같은 고강성 구조물의 표면감쇠처리에 매우 적합하다. Lee [3] 등은 수직형 연삭기의 주철 킬럼에 섬유강화 복합재료를 보강하여 감쇠특성을 향상키는 연구를 수행하였으며, Haranath [4] 등은 밀링머신, 선반 등의 구조에 점탄성 층을 적용하는 감쇠처리방법에 관한 연구를 수행하였다. Salje [5] 등은 래진 콘크리트의 동적 및 열적 거동에 관한 연구를 수행하였으며, 고분자 수지를 기지로 하는 래진 콘크리트의 기계적 특성을 주철 구조물의 기계적 특성과 비교하였다. 본 연구에서는 경취성 재료의 정밀 가공을 위한 공작기계의 강철 헤드스톡을 섬유강화 복합재료로 보강하여 감쇠특성을 향상시키는 방법을 제안하였으며, 최적의 감쇠특성 조건을 찾기 위해 섬유강화 복합재료의 적층 방향에 따른 강성과 손실계수 (Loss factor)를 측정하였다. 강철 헤드스톡의 표면을 섬유강화 복합재료로 보강할 경우 적층 각도에 따른 진동특성 및 감쇠특성을 R.K.U. 방정식을 통해 예측하였으며, 진동모드, 감쇠특성, 재료비, 제작의 용이성 등을 고려하여 최적의 재료와 적층 각도를 결정하였다.

2. 섬유강화 복합재료 적층판의 설계

복합재료의 적층 각도에 따른 손실계수 (Loss factor)를 측정하기 위해 여러 가지 적층 각도를 가진 보 형태 (Beam type) 시편을 제작하였다. Table 1에 실험에 사용된 직물유리섬유 복합재료 (Glass fabric epoxy composite) GEP 215 (SK Chemical, KOREA) 프리프레그의 물성을 나타내었으며, 적층 각도에 따른 길이방향 탄성계수 (Longitudinal Young's modulus)는 고전 적층판 이론 (Classical laminate plate theory)을 사용하여 계산하여 Fig. 1에 나타내었다.

계산 결과 Fig. 1에서 보인 바와 같이 길이방향 탄성계수는 적층 각도가 55도일 때까지 감소하였으며, 그 이상의 적층 각도에서는 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 손실계수 측정에 사용된 시편의 폭 (w)과 두께 (t)는 각각 10 mm와 3 mm이며, 시편의 길이 (L)는 식 (1)로 표현되는 1차 공진주파수를 동일하게 맞추기 위해서 적층 각도에 따라 각각 적합한 길이를 계산 하여 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Properties of composite material.

Tensile modulus E_1 (GPa)	36.0
Tensile modulus E_2 (GPa)	17.2
Shear modulus G_{12} (GPa)	4.9
Poisson's ratio	0.12
Ply thickness (mm)	0.15
Fiber volume fraction	0.46
Density (kg/m^3)	1980

$$f_1 = \frac{22.37}{2\pi \times L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \quad (1)$$

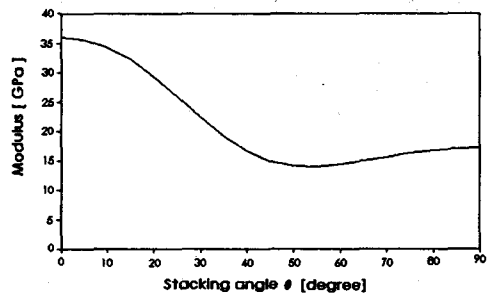


Fig. 1 Longitudinal Young's modulus of the glass fabric epoxy composite specimen with respect to stacking sequence type of $[\pm\theta]_{ns}$.

Table 2. Length of specimens with respect to fiber orientation.

Stacking sequence	Length (mm)
$[0]_{20T}$	234
$[\pm 10]_{10s}$	231
$[\pm 20]_{10s}$	222
$[\pm 30]_{10s}$	208
$[\pm 45]_{10s}$	188
$[\pm 70]_{10s}$	190
$[90]_{20T}$	195

주파수 응답법 (Frequency response method)을 이용하여 보 형태의 시편을 실로 매단 후 충격 (Impulse)을 가하여 재료의 적층 각도에 따른 손실계수 (Loss factor)와 1차 공진주파수 (1st resonant frequency)를 측정하였다. 측정된 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 10번의 측정값의 누적 평균값을 사용하였으며, 신뢰도 (Coherence)가 0.95 이상인

데이터만을 사용하였다. 신뢰도 (Coherence)는 입력신호에 대한 출력신호의 선형성을 정량화 한 값으로서 그 값이 1일 때 가장 신뢰할 만한 값을 의미한다. 공진주파수에서의 손실계수는 다음과 같이 반파워 밴드폭 (Half power band width)을 이용하여 계산하였다 [6].

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \quad (2)$$

여기서 f_1 , f_2 그리고 f_r 은 각각 왼쪽 반파워 주파수 (Left half power frequency), 오른쪽 반파워 주파수 (Right half power frequency) 그리고 공진주파수 (Resonant frequency)를 나타낸다. Fig. 2는 여러 가지 적층 각도에 대해 측정된 복합재료 시편의 손실계수이다.

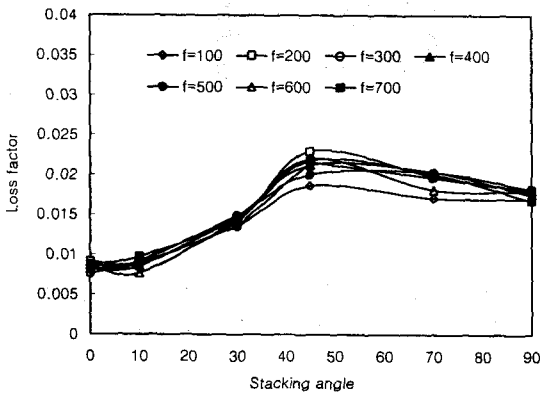


Fig. 2 Loss factors of the glass fabric epoxy composite specimens at various frequencies with respect to stacking sequence type of $[\pm\theta]_{ns}$.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 복합재료 시편의 손실계수는 적층 각도가 약 45도일 때 최대값을 가지며, 그 이상의 적층 각도에 대해서는 거의 포화되는 경향을 나타내었다. Fig.1 과 Fig.2와 같은 진동특성을 가지는 재료가 금속 구조물에 접합되었을 경우 보강되는 재료의 물성 및 기하학적 형태에 따른 굽힘방향 1차 공진주파수는 다음 식 (3)과 같이 정리할 수 있으며, 손실계수는 고차식을 무시한 R.K.U. 방정식을 이용하여 식 (4)와 같이 정리할 수 있다 [7].

$$f_1 = \frac{22.37}{2\pi \times L^2} \sqrt{\frac{E_c I_c + E_s I_s}{\rho_c S_c + \rho_s S_s}} \quad (3)$$

$$\eta = X\eta_s + Y\eta_c$$

$$X = \frac{E_s I_s}{E_s I_s + E_c I_c} \quad (4)$$

$$Y = \frac{E_c I_c}{E_s I_s + E_c I_c}$$

여기서 아래 첨자 C 와 S 는 각각 복합재료와 금속구조물을 의미하며, 매개변수 X 와 Y 는 하이브리드 구조물의 손실계수의 가중치 (Weighting fraction)이다. 식 (4)에서 보는 바와 같이 금속 구조물에 감쇠재를 보강할 경우 하이브리드 구조물의 감쇠특성 (η)은 금속 구조물과 보강재의 굽힘강성 비와 보강재의 감쇠특성 (η_c)에 직접적으로 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

강철-복합재료 하이브리드 헤드스톡을 제작하는데 소요되는 재료비와 보강되는 복합재료의 재료 (USN 150, GEP 215)와 적층 각도에 따른 공진주파수 비 그리고 하이브리드 헤드스톡의 감쇠특성에 직접적으로 영향을 미치는 가중치 Y 의 재료와 적층 각도에 따른 변화를 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타내었다.

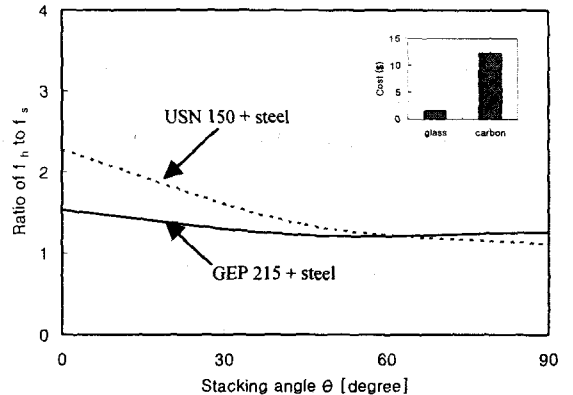


Fig. 3 Material costs per area ($\$/m^2$) and ratio of the resonant frequency (f_h) of the hybrid steel-composite plates to the natural frequency (f_s) of the steel plate w. r. t. the stacking sequence $[\pm\theta]_{ns}$.

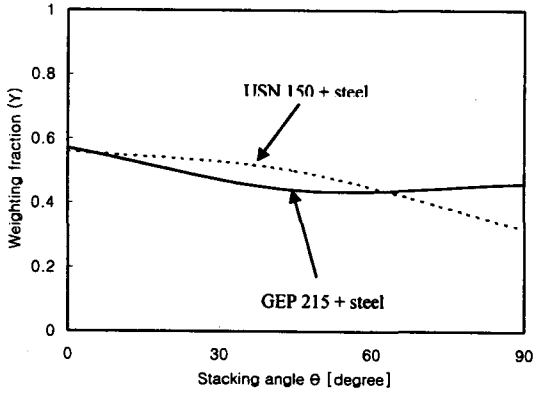


Fig. 4 Weighting fraction Y of the composite loss factor η_c w. r. t. the stacking sequence type of $[\pm\theta]_{ns}$.

Fig. 3 과 Fig. 4 에서 보인 바와 같이 적층 각도가 증가함에 따라 두 가지 재료를 각각 보강한 하이브리드 헤드스톡의 공진주파수 차이가 점진적으로 감소하였으며, 특히 적층 각도가 50 도 이상일 때 그 차이가 급격히 작아짐을 알 수 있었다. 또한 적층 각도가 60 도 이상이 되면 직물유리섬유 복합재료 (GEP215)가 일방향 탄소섬유 복합재료 (USN150)보다 오히려 감쇠특성이 우수한 것을 알 수 있었다. 따라서 이와 같은 결과를 고려하여 하이브리드 헤드스톡의 감쇠특성과 재료비 그리고 제작의 효율성을 고려하여 강철 헤드스톡에 보강할 복합재료의 재료를 직물 유리섬유 복합재료 (GEP215)로 결정하였으며, 적층 각도는 90 도로 설계하였다.

3. 강철-복합재료 헤드스톡의 정적 및 동적 특성

강철-복합재료 헤드스톡의 정적 강성 (Static stiffness)과 굽힘방향 진동 모드 (Bending mode)를 계산하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 상용 유한요소 코드인 ANSYS5.3 을 사용하였으며, 사용된 요소는 8 절점 3 자유도를 가지는 SOLID45 이다. 보강되는 복합재료 적층판의 적층 각도에 대한 헤드스톡의 강성을 계산하기 위해 헤드스톡에 장착되는 주축부의 자중을 고려하여 모델링 하였으며, 헤드스톡이 컬럼과 조립되는 연결부위는 고정단 조건을 부가하였다. Fig. 5 는 헤드스톡이 주축의 자중에 의해 처진 형상이며, Fig. 6 은 복합재료 적층판의 보강 두

께가 10 mm 일 때 적층 각도에 따른 헤드스톡의 처짐량을 계산한 결과이다. 계산 결과 복합재료 적층판의 적층 각도가 증가함에 따라 헤드스톡의 처짐량이 다소 증가하는 경향을 나타내었으나, 최대 처짐량이 1 μ m 정도에 그치는 것을 확인하였으며, 이러한 결과로부터 대부분의 하중은 강철 구조에서 지지한다는 것을 알 수 있었다.

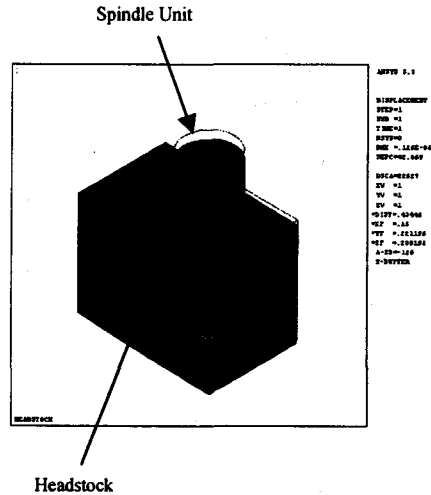


Fig. 5 Deformed shape caused by the dead weight of the steel-composite hybrid headstock using the finite element method.

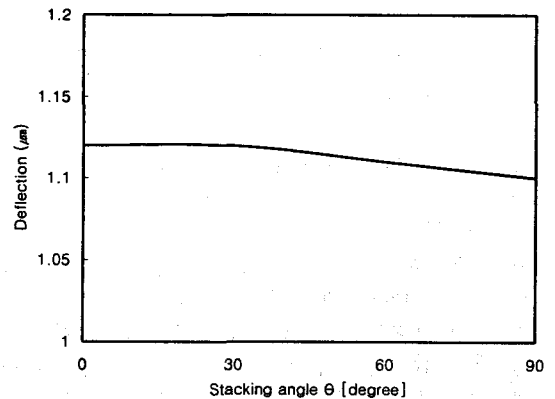


Fig. 6 Deflections of the headstock w. r. t. the stacking angle of $[\pm\theta]_{ns}$ of the composite plates of 10 mm thickness.

박스 형태 (Box type)의 강철 헤드스톡은 자중과 강성을 고려하여 주축부의 하중을 가장 많이 지지

하는 위판의 두께를 15 mm로 설계하고 나머지 면을 구성하는 평판의 두께는 10 mm로 설계하여 자중대비 강성을 향상시켰다.

강철 헤드스톡의 보강부위를 결정하기 위해서 헤드스톡의 1차 공진 모드를 계산을 위한 모드 해석 (Modal analysis)을 수행하였다. 계산 결과 Fig. 7에서 보인 바와 같이 강철 헤드스톡은 중력 방향으로의 굽힘 진동모드를 가지는 것을 확인하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 위판과 아랫판을 섬유강화 복합재료 적층판으로 보강하여 중력 방향의 굽힘 공진주파수 및 그 모드에서의 손실계수를 향상시킬 수 있도록 설계하였다.

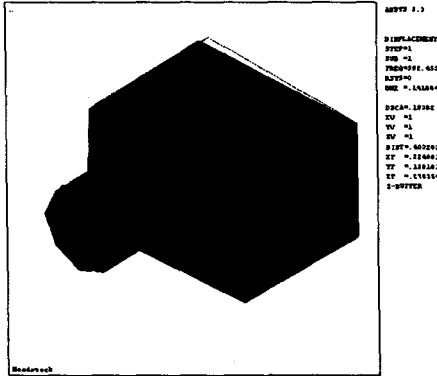


Fig. 7 Mode shape of the whole headstock

4. 섬유강화 복합재료 적층판의 제작 및 접착

강철 헤드스톡을 보강하기 위한 복합재료 적층판을 제작하기 위해서 진공백 성형법 (Vacuum bag molding)을 이용하였다. 10 mm 두께의 두꺼운 복합재료 적층판을 한번에 경화 시킬 경우 내부에서 온도 과승이 발생하여 적층판의 물성을 악화시킬 수 있으므로, 적층판 한 개당 28장의 프리프레그를 적층하여 4.25 mm 적층판 두 개를 제작한 후 두개의 완성된 적층판 사이에 10장의 프리프레그를 적층하여 10 mm 두께의 적층판을 완성하였다. 제작된 적층판에 Fig. 8과 같이 주축부 체결을 위한 구멍 가공을 한 후 강철 헤드스톡과 복합재료 적층판의 접착면을 사포를 이용하여 표면처리를 하고, 아세톤으로 세척한 후 에폭시 접착제 (IPCO 9923 National Starch USA)를 이용하여 상온조건에서 강철 헤드스톡의 위판과 아랫판에 각각 접착하였다.

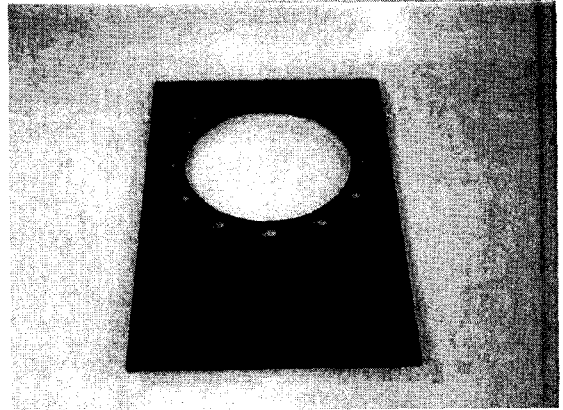


Fig. 8 Photograph of the damping reinforcement after boring for the spindle assembly.

접착에 사용한 에폭시 접착제의 물성을 Table 3에 나타내었다. Fig. 9는 섬유강화 복합재료 적층판으로 보강된 강철-복합재료 헤드스톡의 사진이다.

Table 3. Properties of the epoxy adhesive (IPCO 9923).

Tensile modulus (GPa)	1.3
Poisson ratio	0.41
Shear modulus (GPa)	0.46
Density (kg/m ³)	1200

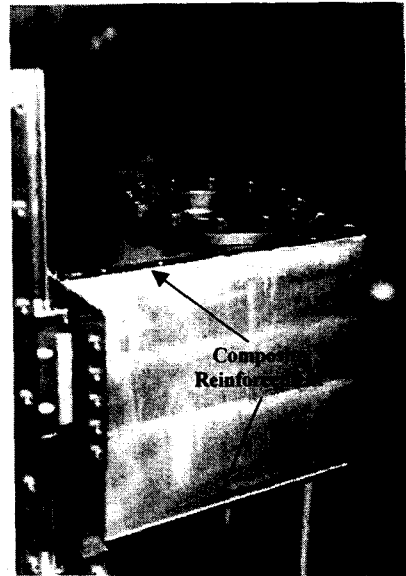


Fig. 9 Photograph of the headstock with the adhesively bonded composite for damping improvement.

5. 진동실험

헤드스톡을 공작기계 컬럼 (Column)의 직선운동기구 (LM guide)에 조립하여 장착한 후 복합재료 적층판의 보강 전후의 진동특성을 비교하기 위해 Fig. 10 에서 보이는 바와 같이 진동실험을 수행하였다.

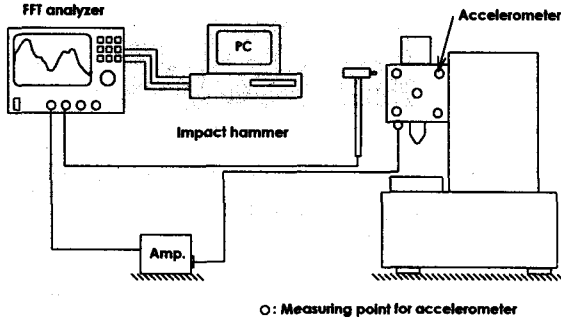


Fig. 10 Measuring apparatus for the vibration characteristics of the machine tool headstock.

Fig. 11 은 강철 헤드스톡에 복합재료 적층판을 보강하기 전후의 주파수 응답 함수 (FRF)이다. 복합재료 적층판으로 보강하기 전의 공진주파수와 손실계수는 각각 444 Hz, 0.032 였으며, 이 경우 손실계수는 조립부위의 마찰과 강철재질의 감쇠특성에 기인된 것으로 판단된다.

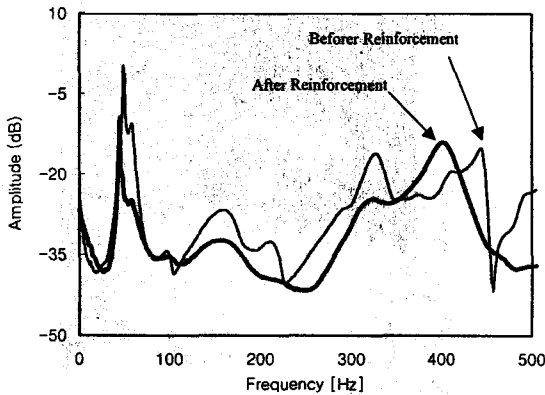


Fig. 14 Experimental results using the FFT signal analyzer.

반면에 복합재료 적층판으로 보강한 경우의 공진주파수와 손실계수는 각각 404 Hz와 0.066 의 값을 가지는 것을 확인하였으며, 공진주파수의 감소는 보강을 위해 적층한 복합재료 적층판에 의한

질량증가 및 강철보다 낮은 강성을 가지는 복합재료를 보강함에 따른 등가강성 (Equivalent stiffness)의 감소에 기인한 것으로 판단된다. 실험결과 등가강성의 감소로 인한 약간의 공진주파수의 감소 현상이 발생하였으나, 손실계수가 2.1 배 증가하는 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 강철 헤드스톡의 감쇠특성 향상을 위하여 섬유강화 복합재료를 보강한 강철-복합재료 하이브리드 헤드스톡을 설계 및 제작하였다. 보강효과를 최적화하기 위하여 재료비, 구조해석, 모드해석 및 R.K.U. 방정식의 결과 등을 고려하여 직물유리섬유 복합재료를 적층 각도 $[90]_{int}$, 두께 10 mm 로 제작한 후 강철 헤드스톡의 위판과 아랫판을 보강하였다. 또한 실제 공작기계 구조에 복합재료 적층판을 보강하여 진동실험을 수행한 결과 손실계수가 200 % 이상 향상됨을 확인하였다.

참고문헌

- (1) J. K. Choi and D. G. Lee, 1997, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 37, pp. 171-81.
- (2) K. J. H. Al-Shareef and J. A. Brandon, 1990, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 30, pp. 431-45.
- (3) D. G. Lee, S. H. Chang and H. S. Kim, 1998, *Composite Structures*, Vol. 43, pp. 155-63.
- (4) S. Haranath, N. Ganesan and B. V. A. Rao, 1987, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 27, pp. 43-55.
- (5) E. Salje, H. Gerloff and J. Meyer, 1988, *Ann. CIRP* Vol. 37, pp. 381-84.
- (6) A. D. Nashif, D. I. G. Jones and J. P. Henderson, 1985, *Vibration Damping*, John Wiley & Sons, New York, pp. 131-134.
- (7) D. G. Lee and J. S. Kim, 1994, *J. Materials Processing & Manufact. Science* Vol. 2, pp. 357-372.