

Rigid Core 샌드위치 구조의 초고속 공작기계 베드 적용에 관한 연구

서정도*, 이대길*, 김태형**, 박보선**, 최원선**

Application of Sandwich Structure with Rigid Core for High Speed Machine Tool Bed

J. D. Suh*, D. G. Lee*, T. H. Kim**, B. S. Park**, and W. S. Choi**

ABSTRACT

To maximize the productivity in machining molds and dies, machine tools should operate at high speeds. During the high speed operation of moving frames or spindles, vibration problems are apt to occur if the machine tool structures are made of conventional steel materials with inferior damping characteristics. However, self-excited vibration or chatter is bound to occur during high speed machining when cutting speed exceeds the stability limit of machine tool. Chatter is undesirable because of its adverse effect on surface finish, machining accuracy, and tool life. Furthermore, chatter is a major cause of reducing production rate because, if no remedy can be found, metal removal rates have to be lowered until vibration-free performances is obtained. Also, the resonant vibration of machine tools frequently occurs when operating frequency approaches one of their natural frequencies because machine tools have several natural frequencies due to their many continuous structural elements. However, these vibration problems are closely related to damping characteristics of machine tool structures. This paper presents the use of polymer concrete and sandwich structures to overcome vibration problems. The polymer concrete has high potential for machine tool bed due to its good damping characteristics with moderate stiffness. In this study, a polymer concrete bed combined with welded steel structure i.e., a hybrid structure was designed and manufactured for a high-speed gantry-type milling. Also, its dynamic characteristics were measured by modal tests.

Key Words : Machine tool bed (공작기계 베드), Polymer concrete (폴리머 콘크리트), Sandwich structure (샌드위치 구조), Vibration damping (진동 감쇠)

1. 서론

정밀·고속가공은 최근 공작기계분야의 주요한 기능적 요구조건 (Functional Requirement)이며, 이는 반도체, 자동차, 금형 가공 등 다양한 산업 분야에 활용되는 정밀한 고부가가치 제품을 빠른 시간내에 생산하여 치열한 국제 경쟁 속에서 경쟁력을 확보하는데 필수적이다. 일반적으로 공작기계의 고속 구동은 구조물의 강성뿐만 아니라 진동 특성에도 밀접히 관련되어 있다. 공작기계는

다양한 주파수 범위 (Frequency Range)에서 구동되며, 구동 주파수가 공작기계 구조물의 고유 진동수 (Natural Frequency)와 근접하면 공진이 발생할 가능성이 크다. 또한 스피들의 구동 속도가 안정 한계 (Stability Limit) 이상 일 때 체터링 (Chattering)이 발생한다. 공작기계 구조는 다수의 연속체로 구성되어 있으므로 구동 범위에서 여러 개의 고유진동수와 모드를 가지며 공진에서 응답 특성은 강성 보다는 진동 감쇠 특성 (Damping Characteristics)에 크게 영향을 받는다. 공작기계의

* : 한국과학기술원
* : 대우종합기계

진동 감쇠 특성이 나쁘면 고속가공 중 chatter (Chatter)나 공진이 발생하기 쉬우며, 이를 회피하기 위하여 가공 속도를 낮추면 생산성이 떨어지는 결과를 낳는다 [1, 2]. 따라서 공작기계의 진동 감쇠 특성 향상을 위하여 Damped Dynamic Absorber, Tuned Damper, Coulomb Friction Damper 등 진동 감쇠 장치들에 관한 연구가 진행 되어왔다 [3-6]. 그러나 부가장치의 질량에 의해 고속 구동이 방해 받거나, 특정 진동 모드에만 효과적인 등의 문제점 때문에 다양한 고유진동수와 모드를 갖는 공작기계 구조물 적용에 제약이 따르는 경우가 많다. 그러므로 진동 감쇠가 큰 재료를 이용한 샌드위치 구조를 공작기계 구조물에 적용하면 다양한 구동 조건에서 효과적으로 진동을 감쇠시킬 수 있다.

폴리머 콘크리트는 자갈, 모래를 폴리에스터, 에폭시 등 결합재 (Binding Material)를 이용하여 결합시킨 일종의 복합재료로서 높은 진동 감쇠 특성을 가지면서 주철과 동등한 비강성을 가지므로 공작기계 구조물, 특히 베드 제작에 매우 적합한 재료이다.

본 연구에서는 불포화 폴리에스터 수지를 결합재로 사용한 폴리머 콘크리트 코어 (Core)와 강철 면재 (Face)의 결합으로 샌드위치 구조의 폴리머 콘크리트 공작기계 베드를 제작하고 동특성 파약을 위한 모드시험 (Modal Test)을 수행하였다.

2. 폴리머 콘크리트

폴리머 콘크리트의 물성은 골재의 크기에 따른 혼합비, 폴리머 결합재 (Binder) 물성과 비율 등에 의해 결정된다. 일반적으로 다짐성 (Packing Rate)이 크고 공극 (Void)이 작을수록 기계적 물성이 우수하므로 최적 혼합비를 구하기 위하여 식(1)의 리니어 팩킹 이론을 이용하여 초기 혼합비를 구하였다 [7, 8].

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \alpha_1 \\
 V_2 &= \alpha_2(1 - V_1) \\
 &\vdots \\
 V_5 &= \alpha_5(1 - V_1 - V_2 - V_3 - V_4)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 V_i 는 i-Grade의 골재가 차지하는 부피 분율 (Volume Fraction), α_i 는 i-Grade골재의 최대 다짐계수 (Packing Rate)로서 실험에 의해 골재 크기에 관계없이 0.56의 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다. 최적 혼합비는 골재의 총 부피분율 $\sum V_i$ 을 최대화 하는 혼합비 이다. 이와 같이 정해진 초기값을 기준으로 반복실험에 의해 비선형적 특성을 고려한 최적 혼합비를 Table 1과

같이 구하였고 결합재는 경화 속도 조절의 용이성과 생산 단가 등을 고려하여 폴리에스터 PE-300 (애경화학)을 사용하였다.

폴리머 콘크리트의 강성 및 주파수에 따른 동특성 파약을 위하여 다양한 크기의 폴리에스터, 화강암, 폴리머 콘크리트 빔 시편의 충격응답시험 (Impulse Dynamic Test)를 수행하였고 결과는 Table 2, Fig. 1, 2와 같다. 여기서 Table 2의 폴리머 콘크리트 물성 시험은 ASTM C215-91의 방법을 따랐다.

Table 1 Mixing ratio of polymer concrete

Mesh #	1.0~1.5	1.5~3.2	3.2~6.4	6.4~12.0	Sand	Polyester
Wt. %	30.3	15.4	7.1	7.1	30.0	10.0
Vol. %	26.7	13.6	6.3	6.3	26.4	21.8

Table 2 Properties of polymer concrete

Density (kg/m ³)	E (GPa)	G (GPa)	ν
2260	25.2	10.5	0.2

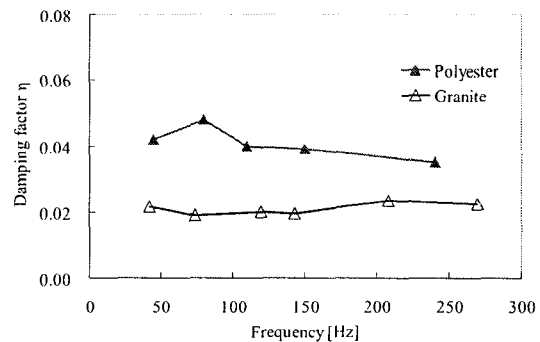


Fig. 1 Damping factors of raw materials under flexural vibration w.r.t. frequencies

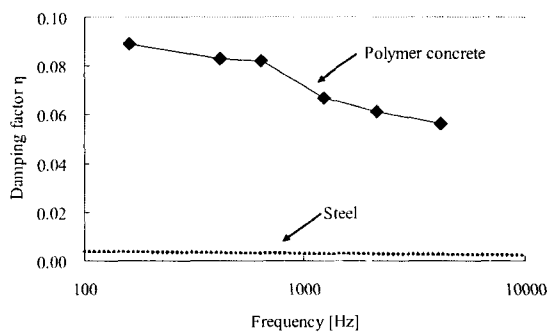


Fig.2 Damping factors of polymer concrete under flexural vibration w.r.t. frequencies

실험 결과로부터 폴리에스터와 화강암은 넓은 주파수 범위에서 4%, 2% 정도의 Damping Factor η 를 가지며 폴리머 콘크리트는 공작기계 스피들 구동 주파수 범위에서 8% 이상의 매우 높은 진동 감쇠계수 (Damping Factor η)를 가짐을 알 수 있었다.

3 진동 감쇠를 고려한 설계

Fig. 3은 겐트리형 (Gantry Type) 고속 머시닝센터의 모습이고, 베드는 하단의 테이블부와 양 옆의 수직 컬럼부 (Column)로 구성되어 있다. 베드는 외부의 강철 용접 구조물 내부를 폴리머 콘크리트로 채운 하이브리드 구조로 제작 하였다. 베드의 주요 진동 모드는 컬럼의 굽힘 (Bending)이므로 효과적인 진동 감쇠를 위하여 컬럼부를 Fig. 4의 단면을 갖는 샌드위치 구조로 설계하였다. Fig. 5는 FEM 해석을 통해 얻은 컬럼 진동시 1st 모드 모양과 Fig. 4의 컬럼에 정하중 P_1 , P_2 를 가했을 때 정적 처짐을 비교한 것이다. 수직 컬럼의 1st 진동 모드가 정적 변형과 유사한 변형 형상을 갖는다면 변형에너지는 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 U &= U_s + U_c \\
 &= \int_{R_s} \int_0^l \left(\frac{(\sigma_{z,s})^2}{2E_s} + \frac{(\sigma_{zx,s})^2}{2G_s} \right) dz dx \\
 &\quad + \int_{R_c} \int_0^l \left(\frac{(\sigma_{z,c})^2}{2E_c} + \frac{(\sigma_{zx,c})^2}{2G_c} \right) dz dx
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 첨자 s 와 c 는 각각 강철과 폴리머 콘크리트를 의미한다. 진동 중 최대 변형 상태에서의 변형 에너지는 구조물의 각 부분의 진동 감쇠 특성에 의해 일정 비율이 소산된다. 강철과 폴리머 콘크리트로 이루어진 샌드위치 빔에서 감쇠 계수 η 는 다음 관계식을 가진다 [6, 8].

$$\eta = \frac{W_D}{2\pi U} = \frac{W_{D,s} + W_{D,c}}{2\pi(U_s + U_c)} = \frac{(\eta_s \cdot U_s + \eta_c \cdot U_c)}{(U_s + U_c)} \quad (3)$$

여기서 W_D 는 1 Cycle 동안 소산되는 에너지를 의미한다. 따라서 컬럼의 감쇠계수 η 는 강철의 감쇠계수 η_s 와 Fig. 2의 폴리머 콘크리트의 감쇠계수로부터 계산할 수 있으며, 리니어 모터 장착을 고려하여 X_2 를 20mm로 고정하고 X_1 과 X_3 를 20, 15, 10mm로 하였을 때 각각 3.3, 3.4, 3.7%로 모든 경우에서 매우 큰 값으로 계산되었다. 따라서 정적 강성을 고려하여 X_1 과 X_3 는 20mm로 설계 하여 Fig. 6과 같이 제작 하였다. 콘크리트 공작기계 베드 진동 특성은 모드 시험 (Modal

Test)을 통해 Table 3, Fig. 7, 8과 같이 구하였다. 베드의 감쇠계수 η 는 넓은 주파수 범위에서 1.60-5.14% 정도의 높은 값을 보였으며 이는 일반적인 용접구조물의 감쇠계수 0.2~0.3%와 비교하였을 때 매우 우수함을 알 수 있다. 진동 모드는 주로 컬럼에서 나타났으며 1st, 2nd, 3rd 모드는 각각 컬럼의 굽힘, 비틀림, 굽힘 모드로 나타났다. Fig. 8의 FRF 에서 스피들의 구동 범위 내에 다수의 고유진동수가 존재하나, 베드의 진동 감쇠 계수가 매우 크므로 주기적 가진에 대한 응답이 매우 작아 정밀가공에 유리할 것으로 사료된다.

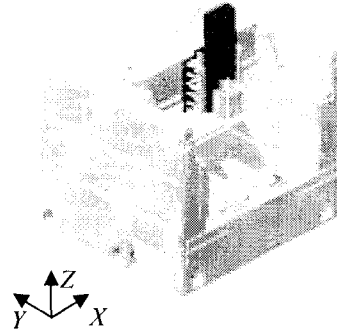


Fig.3 Machine tool structure (FV400, Daewoo)

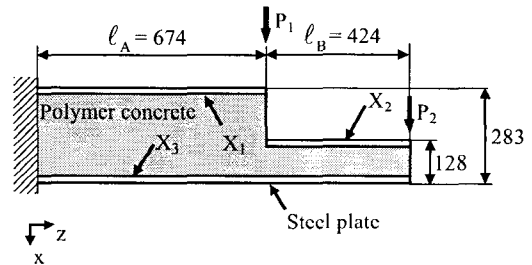


Fig. 4 Section view of the vertical column of the machine tool bed

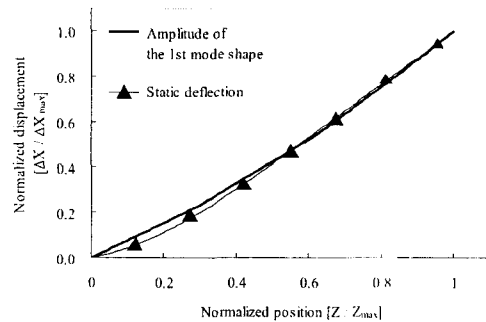


Fig. 5 Comparison between the 1st mode amplitude and static deflection of the vertical column

Table 3 Dynamic characteristics of the machine tool bed obtained by impulse dynamic test

Mode	Natural frequency (Hz)	Damping factor η (%)
1	88	3.20
2	126	3.31
3	151	5.14
4	182	1.60

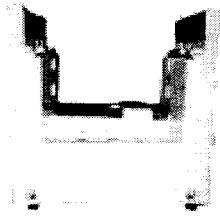


Fig. 6 Photograph of the polymer concrete machine tool bed

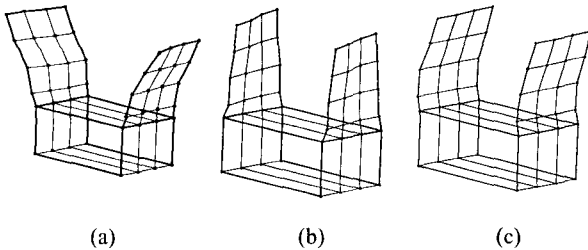


Fig. 7 Mode shapes of vibration of the machine tool bed : (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd

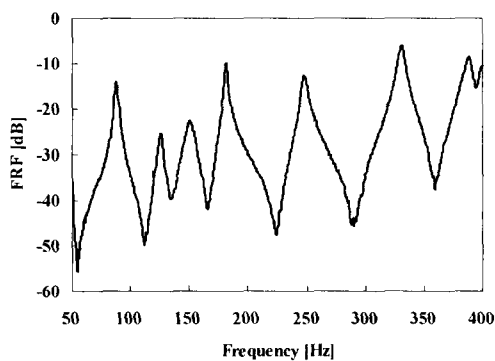


Fig. 8 FRF of the polymer concrete machine tool bed

4. 결론

본 연구에서는 불포화 폴리에스터 수지를 결합재 (Binding Material)로 사용한 폴리머 콘크리트와 강철

용접 구조물의 결합으로 샌드위치 구조의 하이브리드 폴리머 콘크리트 공작기계 베드를 설계, 제작하고 동특성을 실험에 의해 구하였다. 제작된 하이브리드 공작기계베드의 감쇠계수 η 는 넓은 주파수 범위에서 1.60~5.14% 정도의 높은 값을 보였으며 이는 일반적인 용접구조물의 감쇠계수 0.2~0.3%와 비교하였을 때 매우 우수하다.

후 기

본 연구는 산업기반기술과제, NRL, BK21 과제의 지원으로 수행되었으며, 대우종합기계(주)의 협조에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1 S. A. Tobias, Machine Tool Vibration, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 143-146, 1965.
- 2 A. Gogoussis, M. Donath, "Determining the Effects of Coulomb Friction on the Dynamics of Bearings and Transmissions in Robot Mechanisms," Journal of Mechanical Design, Vol. 115, No. 2, pp. 231-240, 1993.
- 3 S. D. Xue, J. M. Ko, Y. L. Xu, "Optimum Parameters of Tuned Liquid Column Damper for Suppressing Pitching Vibration of an Undamped Structure," Journal of Sound and Vibration, Vol. 235, No. 4, pp. 639-654, 2000.
- 4 E. Riven and H. Kang, "Improvement of Machining Conditions for Slender Parts by Tuned Dynamic Stiffness of Tool," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 29, No. 3, pp. 361-376, 1989.
- 5 J. Peters, "Damping in Machine Tool Construction," Proceedings of the 6th International M.T.D.R. Conference, pp. 191-210, 1965.
- 6 S. Ema, E. Marui, "Damping Characteristics of an Impact Damper and its Application," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, pp. 293-306, 1996.
- 7 T. Stovall, F. D. Larrard, M. Buil, "Linear Packing Density Model of Grain Mixtures," Powder Technology, Vol. 48, pp. 1-12, 1986.
- 8 P. Stroeven, M. Stroeven, "Assessment of Packing Characteristics by Computer Simulation," Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1201-1206, 1999.