

## 초고속 공작기계용 Hybrid Polymer Concrete bed 의 설계와 제작

서정도\*, 임태성\*, 이대길\*, 김태형\*\*, 박보선\*\*, 최원선\*\*

### Design and manufacture of hybrid polymerconcrete bed for high speed machine tool

J. D. Suh\*, T. S. Lim\*, 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. The polymer concrete has high potential for machine tool bed due to its good damping characteristics with moderate stiffness. This paper presents the use of polymer concrete and sandwich structures to overcome vibration problems. Also, co-cure bonding method for functional part mounting was exhibited experimentally, by which manufacturing time and cost for polymer concrete bed will be remarkably reduced.

**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

\* : 한국과학기술원

\*\* : 대우종합기계

안정 한계 (Stability Limit) 이상 인 때 체터링 (Chattering)이 발생한다. 공작기계 구조는 다수의 연속계로 구성되어 있으므로 구동 범위에서 여러 개의 고유진동수와 모드를 가지며 공진에서 응답 특성은 강성 보다는 진동 감쇠 특성 (Damping Characteristics)에 크게 영향을 받는다. 공작기계의 진동 감쇠 특성이 나쁘면 고속가공 중 체터 (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]. 그러나 부가장치의 실탕에 의해 고속 구동이 방해 받거나, 특정 진동 모드에만 효과적인 등의 문제점 때문에 다양한 고유진동수와 모드를 갖는 공작기계 구조를 적용에 제약이 따르는 경우가 많다. 그러므로 진동 감쇠가 큰 재료를 이용한 샌드위치 구조를 공작기계 구조물에 적용하면 다양한 구동 조건에서 효과적으로 진동을 감쇠 시킬 수 있다.

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

본 연구에서는 불포화 폴리에스터 수지를 결합제로 사용한 폴리머 콘크리트 코어 (Core)와 상철 민재 (Face)의 결합으로 샌드위치 구조의 폴리머 콘크리트 공작기계 베드를 제작하고 동특성 파악을 위한 모드시험 (Modal Test)을 수행하였다. 또한 폴리머 콘크리트 베드의 생산성 향상을 통한 제작 단가 절감을 위하여 리니어 가이드 (LM-Guide) 등의 기능부를 요구되는 위치에 고성능 폴리머 콘크리트를 타설하여 성형하는 동시경화공법을 제시하고 실험적으로 검증 하였다.

## 2. 폴리머 콘크리트

폴리머 콘크리트의 물성은 골재의 크기에 따른 혼합비, 폴리머 결합제 (Binder) 물성과 비율 등에 의해 결정된다. 일반적으로 다짐성 (Packing Rate)이 크고 공극 (Void)이 작을수록 기계적 물성이 우수므로 최적 혼합비를 구하기 위하여 식(1)의 리니어 팩킹 이론을 이용하여 초기 혼합비를 구하였다 [4, 5].

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

여기서  $V_i$ 는 i-Grade의 골재가 차지하는 부피 분율 (Volume Fraction),  $\alpha_i$ 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 최대로 하는 혼합비 이다. 본 연구에서 최적 혼합비는 위 식을 초기값으로하여 반복실험을 통해 Table 1과 같이 구하였고, 결합제는 경화 속도 조절의 용이성과 생산 단가 등을 고려하여 폴리에스터 PE-300 (에경화합)을 사용하였다.

폴리머 콘크리트의 강성 및 수파수에 따른 동특성 파악을 위하여 다양한 크기의 폴리에스터, 화강암, 폴리머 콘크리트 빔 시편의 충격응답시험 (Impulse Dynamic Test)를 수행하였고 결과는 Table 2, Fig. 1, 2와 같다. 여기서 Table 2 의 폴리머 콘크리트 물성 시험은 ASTM C215-91의 방법을 따랐다. 실험 결과로부터 폴리에스터와 화강암은 넓은 수파수 범위에서 각각 4%, 2% 정도의 Damping Factor  $\eta$  를 가지며 폴리머 콘크리트는 공작기계 스핀들 구동 수파수 범위에서 8% 이상의 매우 높은 진동 감쇠계수 (Damping Factor  $\eta$ )를 가짐을 알 수 있었다.

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 <sup>3</sup> )	E (GPa)	G (GPa)	v
2260	25.2	10.5	0.2

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

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

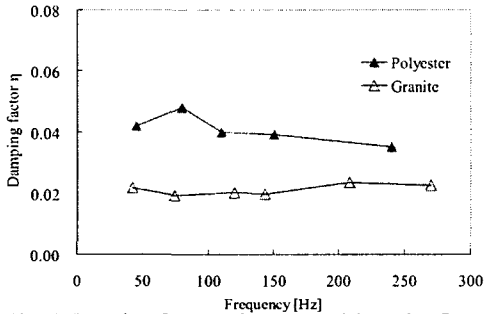


Fig. 1 Damping factors of raw materials under flexural vibration w.r.t. frequencies.

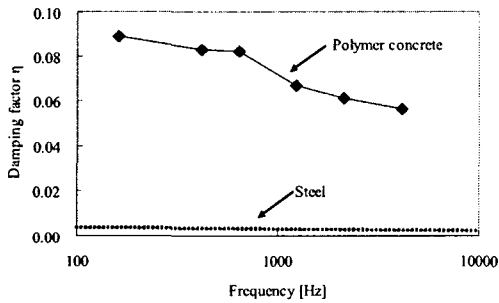


Fig.2 Damping factors of polymer concrete under flexural vibration w.r.t. frequencies.

### 3. 하이브리드 폴리머 콘크리트 베드

Fig. 3은 겐트리형 (Gantry Type) 고속 머시닝센터의 모습이고, 베드는 하단의 테이블부와 양 옆의 수직

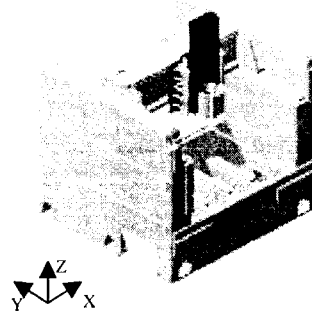


Fig.3 Machine tool structure (FV400, Daewoo).

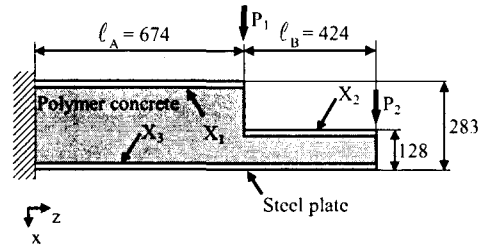


Fig. 4 Section view of the vertical column of the machine tool bed.

컬럼부 (Column)로 구성되어있다. 베드는 외부의강철 용접 구조물 내부를 폴리머 콘크리트로 채운 하이브리드 구조로 제작 하였다. 베드의 주요 진동 모드는 컬럼의 굽힘 (Bending)이므로 효과적인 진동 감쇠를 위하여 컬럼부는 Fig. 4의 단면을 갖는 샌드위치 구조로 설계하였다. 리니어 모터 장착시 강성과 고유진동수를 고려하여  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ 는 각각 20mm 설계 하여 Fig. 5과 같이 제작 하였다. 콘크리트 공작기계 베드 진동 특성은 모드 시험 (Modal Test)을 통해 Table 3, Fig. 6, 7과 같이 구하였다. 베드의 감쇠계수  $\eta$ 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 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> 모드는 각각 컬럼의 굽힘, 비틀림, 굽힘 모드로 나타났다.



Fig. 5 Photograph of the polymer concrete machine tool bed.

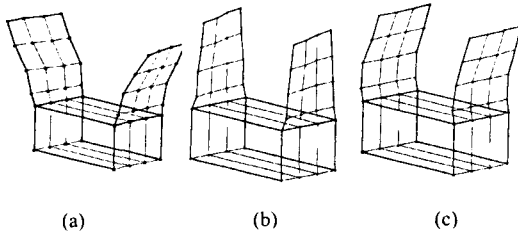


Fig. 6 Mode shapes of vibration of the machine tool bed: (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd.

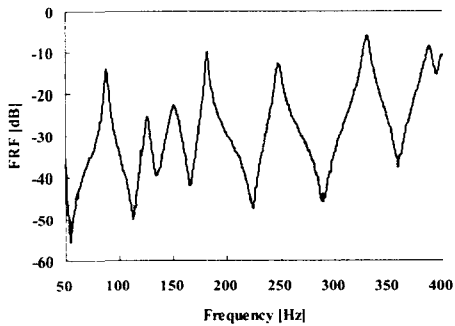


Fig. 7 FRF of the polymer concrete machine tool bed.

#### 4. Polymer concrete - Steel 동시경화 공법

폴리머 콘크리트 베드에는 리니어 가이드 (LM-Guide), 리니어 모터 (Linear Motor) 등의 기능부가 장착되며, 이송부가 요구되는 위치결정 정밀도를 가지고 원활히 구동되게 하기 위하여 기능부의 장착부위들은 정확한 상대적 위치를 가져야 한다. 따라서 기존에는 폴리머 콘크리트 베드 외면의 강철 부를 마더머신을 이용한 후가공을 통하여 요구되는 상대 위치 정도를 갖도록 하였다. 그러나

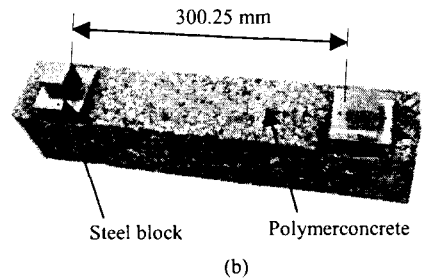
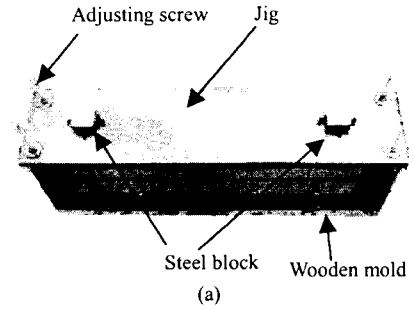


Fig. 8 Polymer concrete shrinkage measurement: (a) Before curing (with mounting jig), (b) After curing (without mounting jig).

콘크리트의 타설/경화 공정을 고려하여 타설 전에 고정지그를 이용하여 미리 원하는 위치에 고정된 후 타설/경화 공정을 수행하면 후가공 공정을 생략하거나 줄일 수 있으므로 생산성 측면에서 매우 바람직하다.

#### 4.1 Polymer concrete 의 경화 및 수축특성

Fig. 8(a)는 폴리머 콘크리트의 경화 중 수축 측정을 위하여 제작된 정밀 지그의 모습이다. 본 연구에서는 2 개의 정밀 가공된 스틸 블록(Steel Block)을 정밀 가공된 지그에 볼트를 이용하여 조립하고 나무 거푸집 (Mold)에 폴리머 콘크리트를 적당량 타설 한 후 스틸 블록이 묻히도록 한 후 경화시켰다. 경화가 완료 된 후 Fig. 8 (b)과 같이 지그를 제거하고 두개의 스틸 블록 사이의 거리를 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정 하였다. 경화 전의 스틸 블록 사이의 거리는 300.25mm 였고 경화 후에도 거리에 변화가 없어 지그를

분리하는데 문제가 발생하지 않았다. 일반적으로 폴리에스터 등의 폴리머재료는 경화시 수축이 발생하나, 본 연구에서 사용된 혼합비의 폴리머 콘크리트는 골재들이 직접 접촉을 하고 있으므로 폴리머 재료가 수축을 하여도 전체적인 치수의 변화는 거의 무시할 만한 것으로 나타났다. 따라서 리니어 가이드 (LM-Guide), 리니어 모터 등의 기능부는 정밀한 지그를 사용하여 폴리머 콘크리트 경화 전에 조립 후 경화시키면 후가공 없이 정밀한 위치에 장착할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4.2 Polymer concrete- Steel 의 접합 강도

Fig. 9의 시편을 이용하여 스틸과 폴리머 콘크리트가 동시경화 접합 되었을 때 접합 강도를 측정하였다. Table 4의 치수의 스틸봉을 폴리머 콘크리트와 동시 경화시킨 후 인스트론에서 0.2mm/min의 속도로 하중을 가하여 스틸 봉이 밀려나가는 시점에서 계면에 걸리는 응력을 접합면의 전단 강도로 정의 하였으며 다양한 스틸 봉의 표면 거칠기에 따른 실험 결과는 Fig. 10과 같다. 실험 결과로부터 스틸의 표면이 거칠수록 전단 강도가 높게 나타났으며, 실제 공작기계에서 기능부에 걸리는 응력 수준을 고려할 때 실험에 사용된 표면 거칠기의 전 범위에서 접합강도는 만족할 만한 수준임을 알 수 있었다.

#### 4.3 정밀 지그를 이용한 위치 결정 공법

공작기계의 기능부는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 높은 수준의 기하학적 상대 위치의 정밀도를 요한다. 따라서 동시경화 공법의 가용여부는 모형 제작을 통하여 검증하였다. 모형은 Fig 12와 같은 스틸 거푸집에 폴리머 콘크리트를 채우고 상부에 LM-Guide 장착부를 동시경화 시켰고, 위치 결정용 정밀 지그를 경화 중에 볼트를 이용하여 체결하여 두었다가 경화가 완료된 후 해체하고 LM-Block 과 Dummy Slide 를 장착하고 주형 정밀도를 측정하였다. 일반적인 LM-Guide 의 경우 평행정밀도

(Parallelism) 25-30 $\mu$ m, 레벨오차 (Level) 70-125 $\mu$ m 이내 가 요구되는데 실험결과는 이를 모두 만족하였으며 더미 슬라이드가 장착된 상태에서 피칭은 10 $\mu$ m 이내로 측정 되었다.

Table 4 Specifications of the specimens to measure shear strength between steel and polymer concrete

Outer dimension (mm)			Steel rod (mm)		Mix ratio (Vol. %)		
W	L	H	D	H	Sand	Polyester	Void
100	200	30	20	50	56	34	10

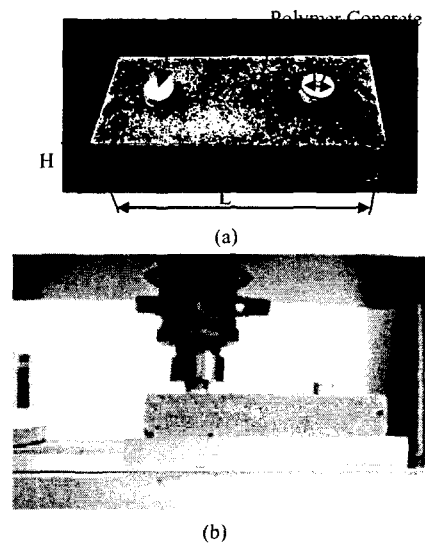


Fig. 9 Photograph of measurements for shear strength between polymer concrete and steel: (a) Specimen, (b) Testing.

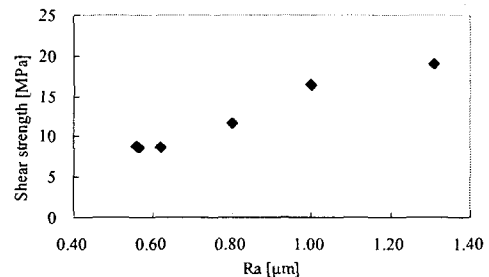


Fig. 10 Shear strength between steel and polymer concrete w.r.t. surface roughness of steel.

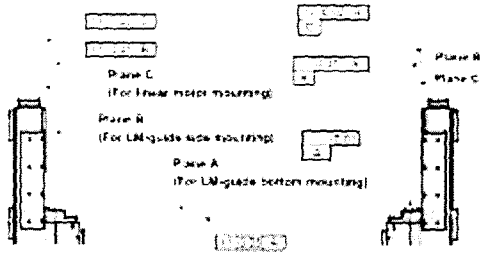
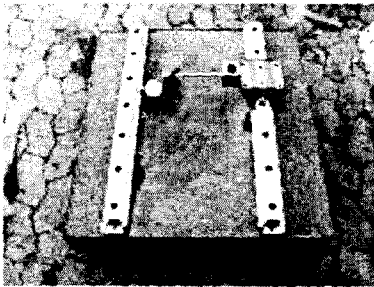
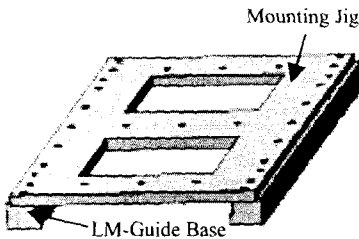


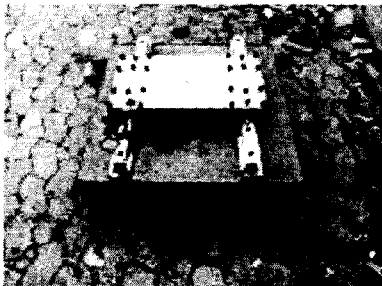
Fig. 11 Required accuracies for machine tool bed column.



(a)



(b)



(c)

Fig. 12 Photograph of reduced model with LM-Guide system mounted by co-curing method: (a) Measurement of Parallelism, (b) Mounting jig and LM-Guide Base, Measurement of pitching.

#### 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  $\eta$ 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. 리니어 가이드 등의 기능부를 정밀한 상대 위치에 고정 및 제작하는 방법으로 동시경화 방법을 제시하였고 실험을 통한 검증결과 가용한 것으로 사료된다.

#### 후기

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 T. Stovall, F. D. Larrard, M. Buil, "Linear Packing Density Model of Grain Mixtures," Powder Technology, Vol. 48, pp. 1-12, 1986.
- 5 P. Stroeven, M. Stroeven, "Assessment of Packing Characteristics by Computer Simulation," Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1201-1206, 1999.