

# 고감쇠 레진 콘크리트 공작기계 베드 제작에 관한 연구

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

## Study on the Manufacture of Resin Concrete Machine Tool Bed with High Damping Capacity

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

### ABSTRACT

High-speed and high-precision are trendy at present in the development of machine tools which are required for various fields of industry such as semiconductor, automobile, mold fabrication and so on. High damping capacity of the structure is an important factor to obtain precise products without vibration during manufacturing caused by rapid transportation and rotation of spindle unit. Resin concrete have high potential for machine tool bed due to its good damping characteristics. In this study, the static and dynamic characteristics of the machine tool bed were analysed. Also, the hybrid machine tool bed, made of steel base and polyester resin concrete material, was manufactured and its good dynamic characteristics were proved experimentally.

**Key Words** : Machine tool(공작기계), Resin concrete(레진콘크리트), Packing(다짐성)

### 1. 서론

초정밀 가공용 공작기계는 정적 강성이 높고 감쇠 효과가 뛰어나며 열적으로 안정화된 구조를 가져야 한다. 공작기계의 정적 강성은 높은 강성을 갖는 재료를 사용함으로써 구현 가능하지만, 정적 강성이 높은 재료는 일반적으로 낮은 감쇠 성능을 갖기 때문에 진동에 취약하다. 따라서, 초정밀 공작기계 구조를 설계하기 위해서는 진동을 억제할 수 있도록 감쇠 성능이 우수한 재료를 사용하는 것이 유리하다. 공작기계의 강성을 유지하면서 감쇠 성능을 향상시키기 위한 방법으로는 높은 강성을 갖는 재료와 높은 감쇠를 갖는 재료가 적절한 비율로 혼합된 복합재료를 사용하는 것이다. 이러한 특성을 갖는 재료에는 고분자 수지를 기지로 하는 콘크리트가 있다 [1-3].

고분자 수지를 기지로 하는 콘크리트는 일반 콘크리트에 단량체 (Monomer)를 함침시켜 만드는 고분자 함침 콘크리트 (Polymer Impregnate Concrete; PIC), 골재와 레진을 섞고 경화시켜 만드는 레진 콘크리트 (Resin Concrete or Polymer

Concrete; PC). 보통의 콘크리트의 제조 중에 고분자 재료를 섞어 경화시켜 만드는 고분자 시멘트 콘크리트 (Polymer Cement Concrete; PCC) 등으로 구분된다. 이 중에서 레진 콘크리트를 많이 사용하고 있으며, 레진 콘크리트 재료로는 불포화 폴리에스터, 에폭시, 아크릴 등 수지와 자갈과 모래 등 골재를 사용한다 [4-5].

레진 콘크리트를 공작 기계의 구조에 사용할 경우, 우수한 진동 감쇠 성능에 의한 공구 수명의 향상, 양호한 기하학적 형상정밀도 등을 얻을 수 있다. 또한 제조 온도가 낮기 때문에 주철과 같이 제조 과정에서의 치수변화 및 잔류응력이 거의 없으며, 열팽창계수가 작고 비열이 크기 때문에 열안정도가 높으며, 절삭유, 윤활제, 냉각제, 세정제 등에 대한 내화학성을 갖는다. 또한, 나사, 튜브, 슬라이드 가이드, 기준면 등을 매립 부품으로 하기 때문에 베드의 기계 가공량이 감소하며, 레진에 적당한 안료를 혼합하면 착색도 가능하다. 성형을 위한 주형은 반복하여 사용할 수 있으며 소량에 대해서는 목형도 가능하다.

\* : KAIST

\*\* : 대우종합기계

본 연구에서는 레진 콘크리트를 사용하여 초정밀 공작기계 베드를 제조하기 위하여 구조물의 정적 동적 해석을 수행하였다. 또한 최적의 조성비 선정을 위한 실험을 통해 레진 콘크리트 베드를 제작하고 동특성을 실험적으로 규명하였다.

## 2. 공작기계 베드의 사양

고속 가공을 통한 생산 시간 단축과 고정밀 제품의 가공을 위하여 공작기계는 경량·저관성과 진동의 고감쇠 특성이 요구된다. 본 연구에서 개발된 초고속 공작기계는 금형 가공용으로서 고속 이송에 따른 진동 감소를 통한 제품의 정밀도 향상과 생산성 향상을 목적으로 베드부에 레진 콘크리트를 적용하였다. 공작기계의 모습과 사양은 Fig.1과 Table 1에 보이고 있다.

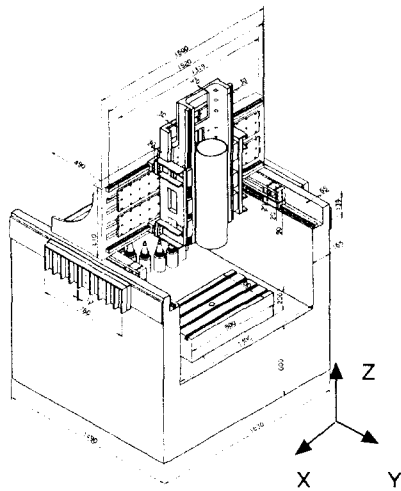


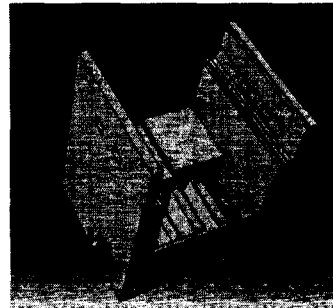
Fig. 1 Machine tool structure

Table 1 Specifications of the machine tool

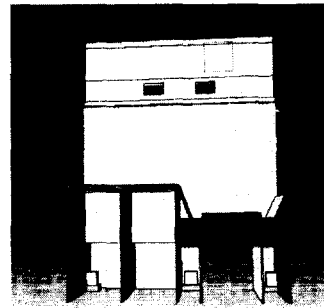
크기	1830 × 1600 × 1850 mm
모터 간극	0.9 ± 0.3 mm
베어링 설치면 정밀도	10 - 30 μm
모터의 반력	20 kN
이송 거리(X, Y, Z)	600, 400, 400 mm
이송가속도 (X, Y, Z)	1.4g, 1.4g, 2g
무게 (X, Y, Z-Slide)	550, 1100, 290 kg
주축회전수	30000rpm

## 3. 레진 콘크리트 베드

베드의 컬럼부는 리니어 레일 등 작동부가 부착되므로 치수 정밀도가 크게 요구된다. 따라서 레진 콘크리트 베드는 Fig. 2 와 같이 두께 20t 의 강철 용접 구조물 안쪽의 빈 공간에 레진 콘크리트를 채우는 형태의 하이브리드 구조 개념으로 제작하였다. 베드 제작을 위한 강철 용접 구조물은 약 3000kg의 자중을 가지며 내부에 레진 콘크리트가 채워질 공간은 약 2.2m<sup>3</sup> 이고, 이의 상당 부분이 Fig. 2 (b) 좌측 하단의 공간에 집중된다. 따라서 전체적인 무게의 균형과 두꺼운 부분 제작 중 레진 콘크리트의 발열 등을 고려하여 빈 공간 중 0.2m<sup>3</sup>에 MDF 나무 판재를 적용하여 전체적인 자중의 균형과 제작상의 문제점을 해결함과 동시에 나무의 높은 진동감쇠 효과를 얻을 수 있도록 하였다. Fig. 2 (b) 우측 하단의 가로 빔은 작업 테이블 받침으로 사다리꼴 단면 구조를 가지며 바깥쪽에 두께 2mm 강철 판재를 용접하여 틀을 만들고 안쪽에 레진 콘크리트를 채워 제작하였다. 베드 받침 아래쪽의 빈 공간은 자동 칩 제거장치의 이송을 위한 공간이고, 제작 중 몰드 릴리즈 처리된 나무 판재를 임시 금형으로 이용하여 제작하였다.



(a)



(b)

Fig. 2 Welded steel base for resin concrete bed; (a) Top view and (b) Side view

### 3. 베드의 정적 및 동적 특성 해석

공작기계의 베드는 Table 2와 같은 하중들이 복합적으로 작용하여 변형이 유발된다. 정밀 가공용 공작기계 구조물은 변형 방지를 위하여 큰 강성이 요구된다. 여러 하중이 작용할 때 변형량을 예측하기 위하여 Ansys 5.5를 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 해석에는 Solid 45 요소를 사용하였으며 하단의 6개 받침점에 고정단 경계조건을 적용하였다. 변형 해석 결과 Case10과 같이 모든 정적 및 동적 하중이 고려되었을 때의 평균 변형량이 Linear motor부에  $49.1\mu\text{m}$ , Linear guide부에  $6.3 - 6.5\mu\text{m}$ , Work table에  $4.9\mu\text{m}$ 로 충분한 강성을 가지는 것으로 사료된다.

Fig. 3은 Case 10의 응력분포 결과이다.

Table 2 Static load applied to bed

- Case1 : 베드 자중 (7.8 ton)
- Case2 : 테이블의 정적하중 (1.3 ton)
- Case3 : x,y,z 슬라이드에 의한 정적하중
- Case4 : linear motor의 전자기력 (2.1 kN)
- Case5 : x 슬라이드에 의한 동적하중
- Case6 : y 슬라이드에 의한 동적하중
- Case7 : z 슬라이드에 의한 동적하중
- Case8 : linear motor의 전자기력  
+ 슬라이드의 정적하중  
+ 테이블 정적하중
- Case9 : x,y,z 슬라이드의 동적하중
- Case10 : 모든 정적 및 동적하중

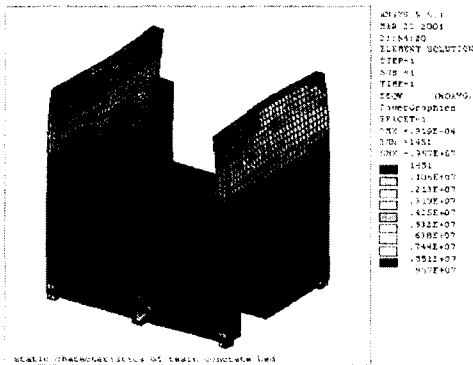
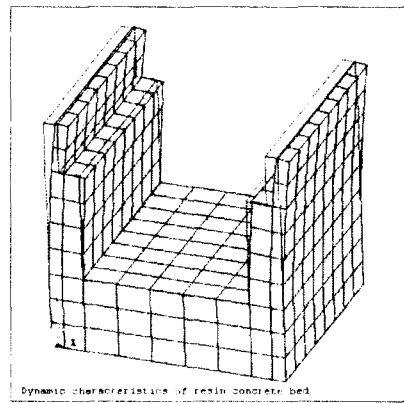
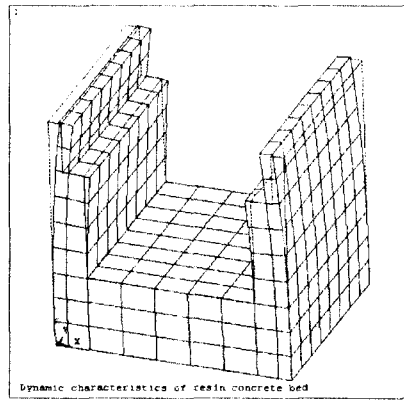


Fig. 3 Von-mises stress distribution in Case 10

주된 변형은 양쪽의 세로 컬럼이 리니어 모터의 흡인력에 의해 안쪽으로 휘는 것이고 이 부분에서 최대 응력이 발생한다. 리니어 모터의 흡인력, 이송체의 관성 등 모든 하중 작용시 베드 내에 최대로 걸리는 하중은 Fig. 3과 같이 9.6 MPa로 레진 콘크리트와 강철의 물성을 고려하면 구조는 매우 안정적인 것을 확인할 수 있다. 정적 해석과 마찬가지로 Ansys 5.5를 이용하여 진동해석을 수행하였으며 결과는 Fig.4와 같다. 주요 진동 모드는 세로 컬럼 부의 굽힘과 비틀림 모드이며 레진 콘크리트가 많이 적용된 베드의 하단부는 진동에 의한 변형이 거의 없는 것으로 보인다. 고유진동수는 스피ndl의 작동 영역내에 존재하므로 이를 회피한 운전이 요구되나 레진 콘크리트의 우수한 진동 감쇠 특성으로 인해 공진과 관련한 문제는 크게 발생하지 않을 것으로 사료된다.



(a)



(b)

Fig. 4 Mode shape of; (a) 1st and (b) 2nd mode

### 3. 레진 콘크리트

레진 콘크리트는 폴리에스터, 에폭시 등의 다양한 수지에 모래, 자갈 등 골재가 혼합된 복합재료이다. 본 연구에서 수지는 경제성을 고려하여 가격이 저렴한 YJ-100K 폴리에스터 수지 (애경화학)를 사용하였으며 골재는 건설용으로 사용되는 40mm, 25mm의 큰 자갈과 4-8mm, 2-4mm 작은 자갈, 미장용 모래를 사용하였다. 공작기계 구조물은 큰 강성을 요구하므로 레진 콘크리트에서 우수한 강성을 얻기 위하여 상대적으로 강성과 강도가 큰 굵은 골재를 많이 사용하고 모래와 수지를 적게 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 모래와 수지를 너무 적게 사용하면 콘크리트 중의 기공이 크게 형성되어 다짐성이 나빠진다. 따라서 다짐성과 물성을 고려한 최적의 혼합비를 갖도록 하는 것이 중요하다. 사용한 골재와 다짐성과 관련한 물성을 실험적으로 구하였고 최적 혼합비는 Table 3과 같다.

Table 3 Mixing ratio of resin concrete (wt %)

40mm	25mm	4-8mm	2-4mm	Sand	Resin
30.3	15.4	7.1	7.1	30.0	10.0

### 4. 레진 콘크리트 베드의 제작

레진 콘크리트 베드의 제작 공정은 다음과 같다.

#### a. 강철베이스 제작

Fig. 5과 같이 20mm 두께의 강철 판재를 용접하여 베이스 구조물을 제작한다. 이 구조물은 레진 콘크리트의 음형 역할을 할과 동시에 제작 완료 후에도 접합된 상태로 베드를 구성하여 강성을 향상시킴과 동시에 리니어 레일 등의 접합에 이용된다. 레진 콘크리트와의 접합성을 향상시키기 위하여 베이스의 내부는 샌드블라스터 처리를 통하여 거친 표면을 만든 후 유기 용제 (탈지 신나)로 세척하고 폴리에스터 수지를 도포 하였다.

#### b. 골재 세척

골재에 함유된 염분은 레진 콘크리트의 내구성에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 따라서 강에서 채취된 골재를 우선적으로 사용하고 이를 수돗물로

세척한 후 건조하여 준비 하였다.

#### c. 폴리에스터 혼합

폴리에스터는 경화제와 촉진제를 적정 비율로 첨가하여 작업 속도에 맞춰 혼합한다. 혼합된 폴리에스터는 20분 정도의 Gel Time을 갖도록 경화제와 촉진제의 비율을 조절하였다.

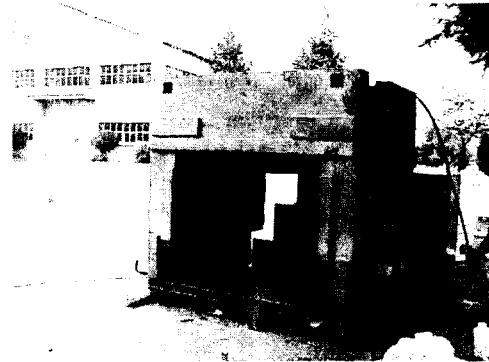


Fig. 5 Steel base of resin concrete bed

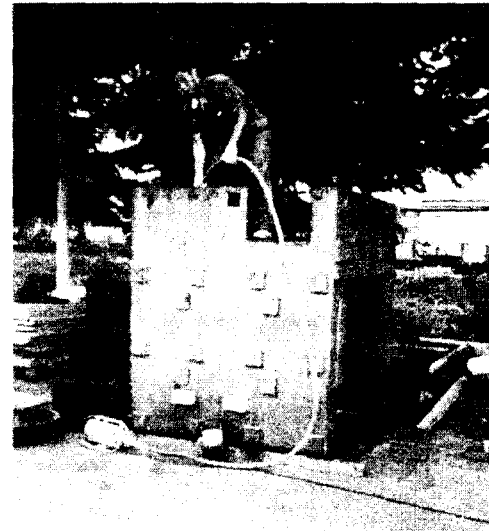


Fig. 6 Packing of resin concrete using vibrator

#### d. 골재와 폴리에스터 혼합

최적 골재 혼합비와 수지 함량을 고려하여 계량된 골재와 폴리에스터를 혼합한다. 본 연구에서는 제작 과정 중 손비빔을 사용하였다.

e. 부어 넣기와 다지기

다짐 과정은 레진 콘크리트 물성에 직접적인 영향을 미치는 매우 중요한 공정으로 Fig.6과 같이 혼합된 레진 콘크리트를 강철 베이스 안에 부어 넣고 진동 다짐기를 이용하여 다짐을 좋게 한다. 진동 다짐기는 콘크리트 혼합물에 운동 에너지를 주어 입자간 미세한 운동을 유발하고 중력에 의해 다져지면서 큰 입자간의 직접 접촉을 유도하여 레진 콘크리트의 물성을 향상시킨다.

5. 진동 특성

진동 특성의 파악을 위하여 B&K 사의 FFT analyzer (B&K 2032), Charge Amplifier (B&K 2626), Impulse Hammer (B&K 8202), Accelerometer (B&K 4374) 와 Force Transducer (B&K 8200)를 이용하여 충격 응답시험 (Impact response test)를 수행하였고 결과는 Fig. 7과 Table 4에 나타내었다. 실험 과정 중 가진과 신호 측정은 베드의 주 진동 모드인 세로 컬럼부의 굽힘과 비틀림 진동을 측정할 수 있도록 하였고 바닥의 6점에 고정단 조건을 적용하여 실제 작동시 진동 모드를 구현 할 수 있도록 하였다. Table 4에서 보는 바와 같이 진동 모드에 따라 공작기계 스피들의 작동 영역 내에 여러 고유 진동수가 존재하지만 아래식의 Half Power Bandwidth를 이용한 감쇠비  $\eta$ 는 0.04-0.07의 매우 큰 값을 가지며 이는 공작기계 구조물의 진동 감쇠 특성이 매우 우수한 것을 의미한다 [6,7].

$$\eta = \frac{f_r - f_1}{f_{resonant}} \quad (1)$$

여기서  $f_{resonant}$ 는 고유진동수이고  $f_r$ 와  $f_1$ 는 각각 우측과 좌측에서 FRF가 3dB 아래의 파워를 갖는 진동수이다.

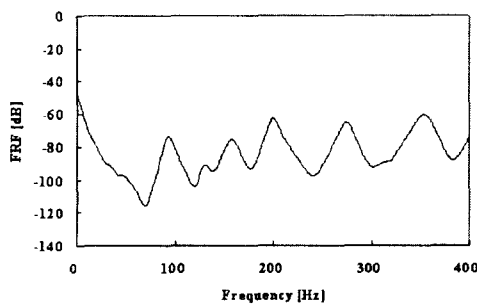


Fig. 7 FRF of resin concrete bed

Table 4 Natural frequencies and loss factors of resin concrete bed

Mode	Natural frequency (Hz)	Loss factor $\eta$
1	93	0.07
2	131	0.07
3	158	0.06
4	200	0.04

6. 결론

본 연구를 통하여 강철 베이스와 폴리에스터 레진 콘크리트의 하이브리드 구조로 공작기계 베드를 제작 하였다. 레진 콘크리트 베드의 진동 모드는 주로 세로 컬럼의 굽힘과 비틀림 거동과 관련 되며 감쇠비 (Loss factor)는 0.04-0.07 정도로 매우 큰 값을 갖는다.

참고문헌

1. M. Rahman, M. A. Mansur and K. H. Chua, "Evaluation of Advanced Cementitious Composite for Machine Tool Structures," *Annals of the CIRP*, Vol. 137, pp373-376, 1988.
2. H. Schultz and R. G. Nicklau, "Designing Machine Tool Structures in Polymer Concrete," *Industrial and Production Engineering*, pp74-77, 1982.
3. S. Z. Abdin, R. K. Shenoy and M. E. Visveswaran, "Investigation on Granite as a Material for Metrology Aids," *Annals of the CIRP*, Vol.27, pp371-381, 1978.
4. P. A. Mckeown and G. H. Morgan, "Epoxy Granite: a Structural Material for Precision Machines," *Precision Engineering*, pp227-229, 1979.
5. T. W. Brockenbrough and D. N. Pattreson, "Fiber Reinforced Methacrylate Polymer Concrete," *ACI Journal*, pp322-325, 1982.
6. C.T. Sun and Y.P. Lu, *Vibration Damping of Structural Element*, Prentice-Hall. Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
7. A.D. Nashif, D.I.G. Johns and J. P. Henderson, *Vibration damping*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1985.