論文 한국정밀공학회지 제11권 제1호 1994.2
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 11, No.1 Feb. 1994.

에폭시 그래나이트재를 이용한 공작기계 베드 모델의 구조 특성에 관한 실험적 연구

맹 희 영*, 박 영 일*, 원 시 태**, 김 종 호**, 이 후 상***, 박 종 권***

Experimental Study on Structural Characteristics of Machine Bed Model Using Epoxy-Granite Material

H. Y. Maeng*, Y. I. Park*, S. T. Won**, J. H. Kim**, H. S. Lee***, J. K. Park***

ABSTRACT

This study is to develop a new composite material, a mixture of epoxy resin and granite aggergates which is called Epoxy-Granite, to overcome the inherent disadvantages of conventional materials commonly used as a bed structure material of long-term dimensional/thermal stability. Under the various manufacturing conditions which could be formulated through experimental investigation, we have constructed 6 kinds of Epoxy-Granite structure models having one fifth the size of the ultra-precision machine tool bed structure. They are compared with cast iron and pure granite models through the dynamic test and the thermal deformation test. Both in the steel ball dropping test and in the forced vibration test, three types of epoxy-granite models made in this study have shown much better dynamic characteristics than the cast iron model and almost the same characteristics as compared with the pure granite model. In the thermal deformation test the above composite materials have also represented lower thermal displacements in the vertical direction of each model as compared with other specimens. It is therefore seen that the epoxy-granite composite material can be applied to the construction of high-precision machine tool bed, instead of cast iron or pure granite.

1. 序 論

精密 工作機械의 구조물은 일반 공작기계의 구조물보다 形狀 및 치수 정밀도가 安定되어야 하고 內部 및 外部 振動의 吸收性과 減衰性이 뛰어나야 하며 정적 및 동적특성을 고려한 高剛性의 구조물로 設計, 製作되어야 한다[1].

그렇지만 일반 공작기계의 베드 재료로 주로 사용되어 오고 있는 주물 재료나 용접 구조물은 이같은 정밀 공작기계용 구조물의 제반 구비조건을 만족시킬 수 없는 고유특성 때문에 이를 대체할 수 있는 재료가 요구되었다. 그 대체 재료로서 오래전부터 측정용 정반으로 사

* 서울산업대학교 기계설계학과
** 서울산업대학교 금형설계학과
*** 한국기계연구원 공작기계연구실

용되던 화강암이나 현무암 또는 대리석 등의 자연석이 정밀 공작기계의 좋은 기계적 특성들을 만족하고는 있지만 濕氣 또는 切削油 등의 영향을 받아 장기적으로 形態가 변형되고, 그 질적 차이가 많으며 공급 물량도 한정되어 있을뿐 아니라 기계 구조물로써 응용될 때 그 加工 費用이 많이 드는 단점을 가지고 있다[2].

따라서 최근에는 이들 단점의 해결을 위해 알루미나 세라믹, Zerodur, Invar, Resin Concrete 등의 新素材들을 구조재료로써 응용하는 시도들이 있었는데, 그 중 구조성능, 제작성, 경제성 측면에서 가장 널리 응용되고 있는 것은 Resin Concrete이다. 그리고 이 Resin Concrete의 응용은 1975년 스위스의 F. Studer 회사가 Synthetic Granite라 명명된 복합재 베드 개발을 성공한 이래 시작되었고[3], 현재에는 접착재 종류와 첨가재료 및 제조공정이 매우 다양하게 사용되어 여러 Polymer Concrete계 재료[4]나 Epoxy Concrete[5], Epoxy Granite[6], Granitan[7], Anonite[8], Ferrocement[9] 등으로 명명된 재료들로서 정밀 공작기계의 구조 재료에 응용되고 있다.

그러나 현재 개발되어 있는 이들 복합재료들에 있어서는 정적 및 동적 강성, 감쇠특성, 열팽창, 열전도성, 열적변형 그리고 경년변화 및 제조공정 등 제반 특성들이 超精密 加工機로서는 아직 만족스러운 결과를 나타내고 있지는 못한 실정이며, 그밖에도 제작비나 제작후의 가공성 그리고 부가적 기계요소의 案內面 설치방법 등에 관한 부수적인 문제들이 남아있다.

지난 연구[10, 11]에서는 초정밀 가공기계로서 이상적인 에폭시 그래나이트재를 개발하기 위해 에폭시 樹脂 種類, 添加材의 粒子크기 및 混合比, 製造方法 등을 변화시키면서 에폭시 그래나이트재 시험편을 제작하였고, 각각의 시험편에 대해 정적 및 동적강성과 감쇠특성 그리고 열적특성과 치수안정성 등에 관련된 비교 실험을 실시하여 재질선정 및 제조방안을 조사한 바 있다.

본 연구에서는 지난 연구 결과를 토대로 보충실험을 실시하여 적정작업조건을 조사하고[12], 이들 作業條件에 따라 초정밀 가공기 베드실물의 약 1/5되는 크기로 복합재 모델(6종류), 주철재 그리고 화강암재 모델들을 각각 제작한 후, 振動 特性과 熱的 安定性에 대한 모델실험을 실시하였다. 또한 이들 결과를 통해 정밀공작기계용 베드 구조물 재료로서 에폭시-그래나이트 복합재의 適用 可能性을 검토하였다.

2. 試驗片 準備 및 모델링 實驗

본 연구의 보충실험에서는 지난 연구에서 나타난 問題點을 토대로 에폭시 수지의 粘度, 첨가재(filler)의 종류와 입자 크기 등을 변화시키면서 실험하였으며, 그 결과 構造物 材料로 가장 적당하다고 판단된 작업조건이 表1에 정리되어 있다[12].

Table 1 Preparation of epoxy-granite material

Item	Size of filler (% in weight)
Selection of filler size (mm)	under 0.149 (20%) 0.149-1.68 (20%) 1.68-4.74 (20%) 4.79-10 (20%) over 10 (20%)
Mix ratio (weight) of filler to epoxy resin	13 : 1

3. 베드 構造物 모델의 形狀과 材質 및 實驗 方法

베드 구조물 형상은 초정밀 가공기의 실물 베드를 약 1/5 크기로 縮小한 정반 형상으로 하였고, 윗면에는 가공기 부품들을 模型化하여 ㄱ자 및 ㅁ자 철구조 마운트(mount) 모델과 加振 모터, 그리고 컵 형상의 入熱模型을 설치하였는데, 그림 1은 전체적인 이들 구조와 치수를 나타낸 그림이다.

모델 베드 구조물에 사용된 재질은 表2에서 처럼 첨가재로서는 그 특성이 오석과 화강암의 중간 성질을 갖

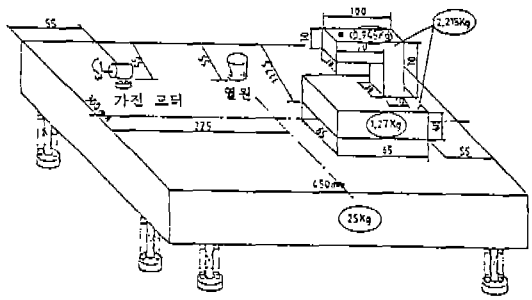


Fig. 1 Dimensional configuration for the bed structure model test

Table 2 Composition of specimen materials for bed structure model test

Model	Filler material		Epoxy resin used	Insertion of large block
	Coarse	Fine		
1	White granite	White granite	ED	-
2	Black granite	Blaxk granite	ED	-
3	〃	〃	EC	-
4	〃	Ferrite	ED	-
5	〃	Blaxk granite	ED	granite
6	〃	〃	ED	red block
7	Cast iron		-	-
8	Natural granite		-	-

는 백석영과 흑청석을 사용하였고, 모델 4에서는 #100 이상의 微粒添加材로서 페라이트(ferrite) 분말가루를 사용하였다. 여기서 첨가재 크기의 구성비는 表1에 주어진 混合比(mix ratio)를 사용하였다. 에폭시 수지는 2가지 종류(EC, ED)를 채택하였으며, 모델 5와 모델 6에서는 내부 코어재의 효과 파악을 위해 적벽돌과 화강암 介在物을 中央에 각각 삽입하여 ㅁ자 구조를 갖도록 하였다. 또한 제작조건은 구조물 크기가 크므로 眞空成形裝置를 사용하는 대신, 모울드(mould)내에 혼합된 복합재료를 장입한 후 振動 作業棒을 사용하여 컴팩션(compaction)하였다. 한편 모델 7의 鑄鐵材 베드 구조물은 동일한 가로 세로치수와 무게를 갖도록 높이를 27mm로 설계하였으며, 모델 8의 花崗岩材 베드 구조물은 그 중량이 복합재보다는 약간 무겁지만 (1.05배), 높이 치수는 복합재 베드 구조물과 동일하게 75mm로 하였다.

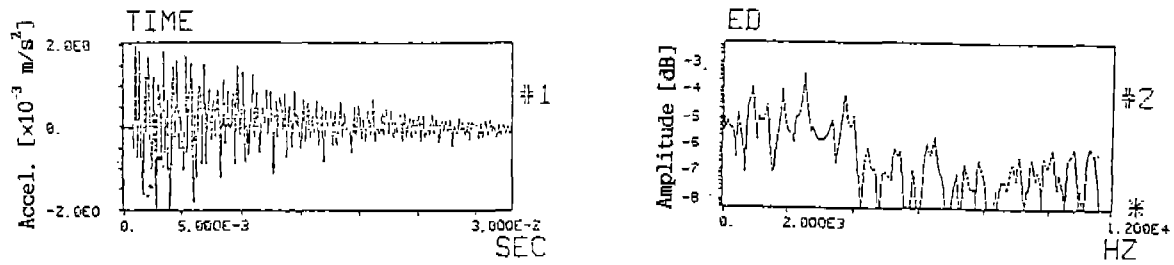
동적 특성 조사를 위한 鋼球 落下實驗은 고무 패드 위에 모델 구조물을 올려 놓고, 구조물 중앙에 3.5g의 강구(steel ball)를 300mm 높이에서 낙하시켜 1.03Ncm의 에너지를 구조물에 일정하게 작용하였다. 出力은 ㄱ자 구조물 위에 부착된 가속도계로부터 신호를 증폭(Charge Amplifier)하고, ZONIC F.F.T Analyzer에 의해 구조물의 시간응답과 파워 스펙트럼 해석을 수행하였다. 한편 模型 加振에 의한 振動 應答實驗은 모델 구조물에 불균형력을 주어 加振을 하고 이에 대한 응답을 같은 절차로 실시하였다. 이때 가진 모형은 0.1kW의 5볼트 入刀 DC 모타에서 모타축에 偏心量 me가 0.068kgmm인 偏心 質量을 사용하고 모타의 주축 회전속도는 2500rpm이 되도록 일정하게 유지하였다.

한편 熱變形 실험에 있어서 熱源 模型은 그림 1과 같이 컵 속에 약 80℃의 온수를 채운 다음, 컵의 아래 면을 통해 入熱되는 구조로 하였다. 그리고 열변형량은 ㄱ자 마운트의 上面과 後面의 2곳에 전기마이크로메타 플런저(plunger)의 레버를 접촉시켜 그 곳의 변위를 30초 週期마다 측정하였고, 또 구조물 전체의 변형에 대한 角度 變位로서는 열원의 반대측 평면 양끝에 오토콜리메타(auto-collimator) 본체와 反射鏡을 설치하여 주기적으로 각도 변위를 측정하였다. 이때 측정기의 정밀도는 전기 마이크로메타의 경우 0.1㎛ 단위로 하였고, 오토콜리메타의 경우는 1㎛/200mm, 즉 1초 단위로 하였다.

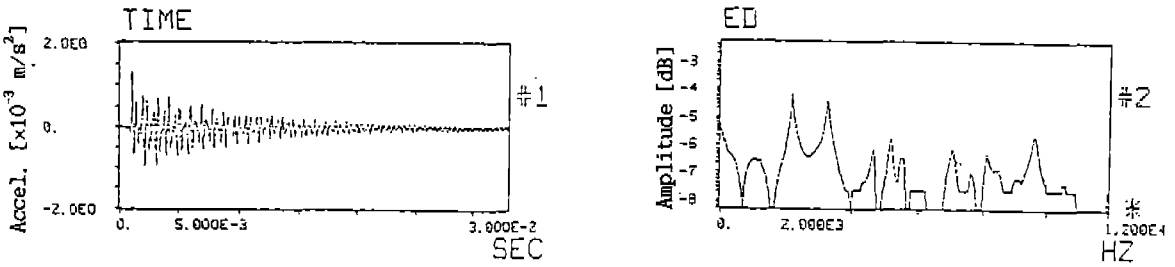
4. 實驗 結果 및 考察

4.1 鋼球 落下 實驗과 模型 加振 實驗

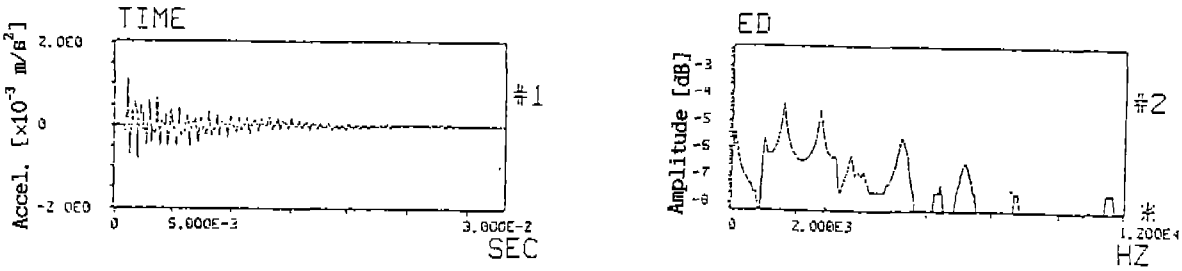
그림 2(a), (b), (c)는 각각 주철재, 화강암재 및 모델 2에 대한 강구 낙하 실험의 진동 응답결과를 보여주고 있다. 좌측 그림은 시간축에서의 가속도 신호이고 우측 그림은 오토 스펙트럼을 나타내고 있다. 오토 스펙트럼을 살펴보면, 주철재는 측정진동수 전범위에 걸쳐서 가진이 되어 많은 공진진동수가 발생되고 있으며 화강암과 복합재는 주철재에 비하여 공진 진동수가 적으며 그 크기 또한 주철재에 비하여 작게 나타나고 있다. 이와같은 결과는 다른 모델의 복합재도 모델 2 실험결과와 거의 비슷한 결과를 나타내고 있다. 화강암도 비교적 작은 크기의 응답을 보이고 있으나 높은 진동수 범위에서는 복합재의 경우가 감쇠가 크기 때문에 더 작은 크기의 응답 결과를 나타내고 있다. 즉 주철재는 거의 모든 진동수 영역에서 비교적 큰 크기의 응답이 발생될 수 있는 반면 복합재의 경우에는 특정한 진동수 범위를 피하면 외부 가진에 대해 베드 구조물이 작은 진폭의 안정된 응답을 얻을 수 있으리라 생각된다. 시간축에서의 결과를 살펴보면 오토 스펙토럼과 비슷한 결과를 나타내며, 주철재 모델의 경우에는 뚜렷하게 出力 振幅이 크게 나타나서 다른 재료의 최대 진폭의 거의 2倍를 보이고 있다. 다른 복합재의 경우에도 화강암재와 거의 같거나 약간 작은 크기를 나타내고 있다. 진폭의 크기는 재료의 강도 및 구조물의 형상과 함께 재료의 감쇠 영향도 받게 되는데 복합재의 경우에는 우



(a) cast iron,



(b) granite,



(c) model-2 epoxy granite

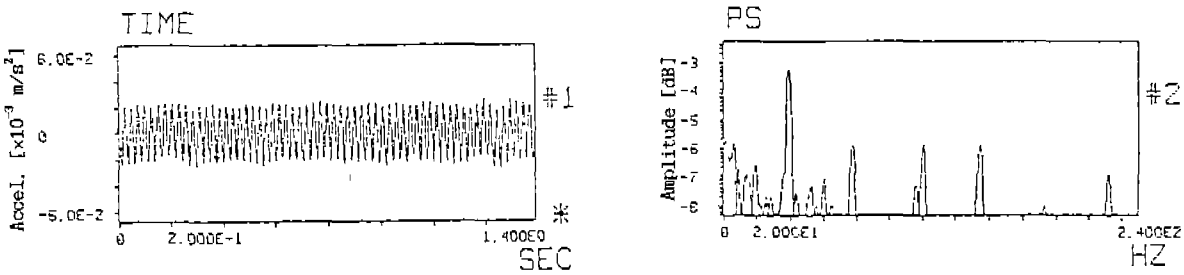
Fig. 2 Vibration results of bed structure models in steel ball dropping test

수한 吸振性을 보여 주어 발생된 진동도 빠른 시간에 감소시키는 특성을 가지고 있다. 이러한 현상은 원치않는 加振에 의한 베드 구조물 응답이 自體材料의 진동 흡수에 의해 작게 나타나는 것으로서 이와같은 현상은 공작기계 베드에의 적용에 매우 유리하게 작용하고 있다.

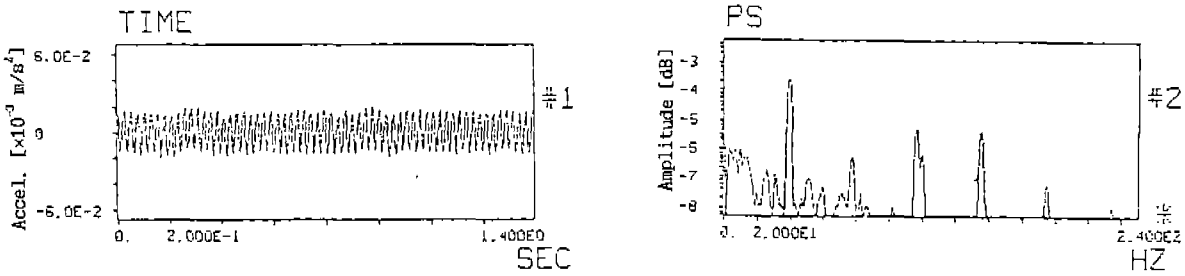
表3은 각 모델 구조물에 대한 강구 낙하 실험에서 발생되는 最大 振幅과 振動이 감소하는 시간을 나타내고 있다. 이것은 재료의 감쇠를 간접적으로 확인할 수 있는 방법으로서 일정한 크기의 대수감쇠율이 되도록 진동 소멸 시간이 진동의 진폭이 최대 진폭 크기의 1/4이 될때까지의 소요시간을 측정하였고, 복합재와 화강암

Table 3 Experimental results of the steel ball dropping test

Type of structure model	1	2	3	4	5	6	7	8
Maximum amplitude after drop (0.1V)	2.4	2.2	2.7	2.2	2.5	2.7	4.0	2.6
Vibration disappearing time (ms)	15	8	11	19	10	10	18	14



(a) cast iron,

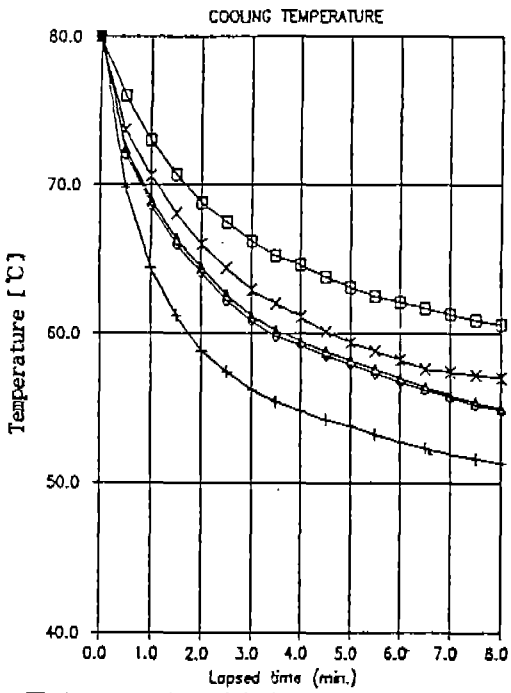


(b) model-2 epoxy granite

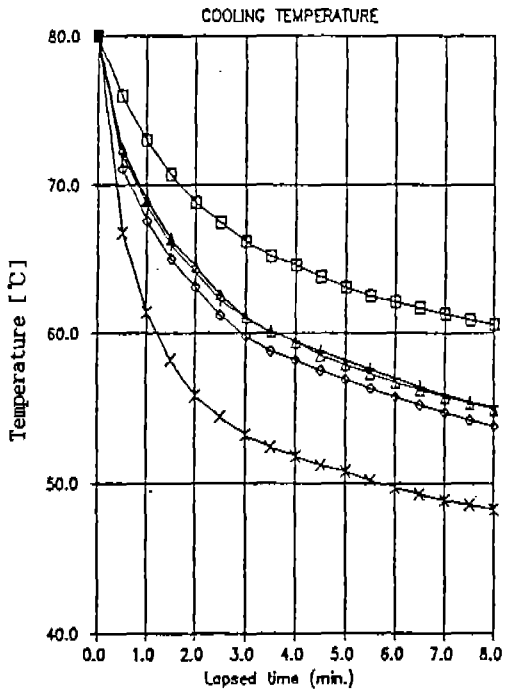
Fig. 3 Vibration results of bed structure models forced by rotation of eccentric mass in the isolation spring support

은 주철재에 비해 짧은 시간내에 진동의 진폭이 사라짐을 알 수 있다. 그리고 복합재의 경우에는 재료 자체의 감쇠가 큰 편이지만 여러 모델의 진동의 진폭이 감소하는 시간에 차이가 나는 것은 구조물 구조가 복합재의 구성 방식에 따른 원인으로 생각된다. 모델 4의 경우에는 첨가재 성질이 鑄鐵과 비슷하여 진동의 진폭은 작게 발생되더라도 진동의 진폭 감소가 매우 작게 나타나고 있으며, 모델2는 진동의 振幅이 가장 작고 진동의 감소 현상이 빠르게 나타나서 공작기계용 베드재료 구비조건으로서 가장 적합할 것으로 생각된다. 한편 모델5, 모델6과 같이 복합재 내에 적벽돌과 화강암 블록을 삽입하는 경우에는 이것들과 복합재 사이에 境界層이 발생하여 외부 가진에 의한 진동의 진폭은 다소 크게 나타나지만, 진동의 감소는 커지므로 진동의 진폭이 빠르게 감소하고 있다.

그림 3은 주철재와 에폭시 그래나이트 모델재(모델2)에 대한 模型 加振 實驗結果를 보여 주고 있는 것이다. 강구 낙하 실험 결과에서의 2500rpm 근처 스펙트럼 크기와 같이 일정한 크기의 가진에 의한 베드 구조물의 응답이 복합재의 경우가 주철재에 비하여 작게 나타난 것으로 베드 구조물의 강성 및 형상 그리고 재질



(a) model 1-4,



(b) model 5-8

Fig. 4 Cooling temperature curve of each model material due to heat transfer

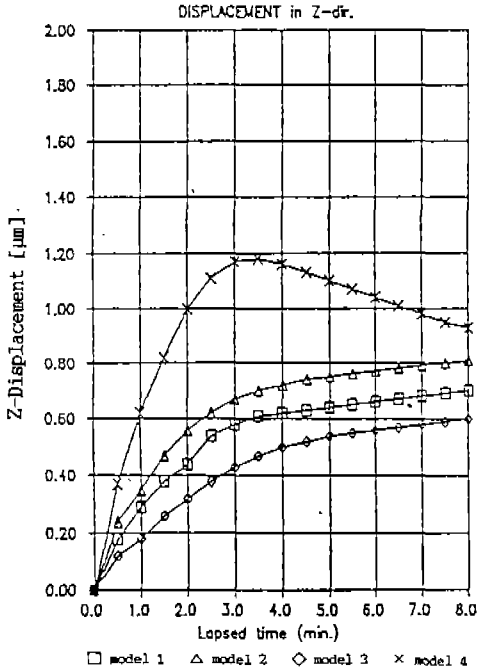
의 특성에 의해 발생되는 진동응답 현상을 직접확인할 수 있는 결과이다.

4.2 熱傳導 特性과 熱變形 特性

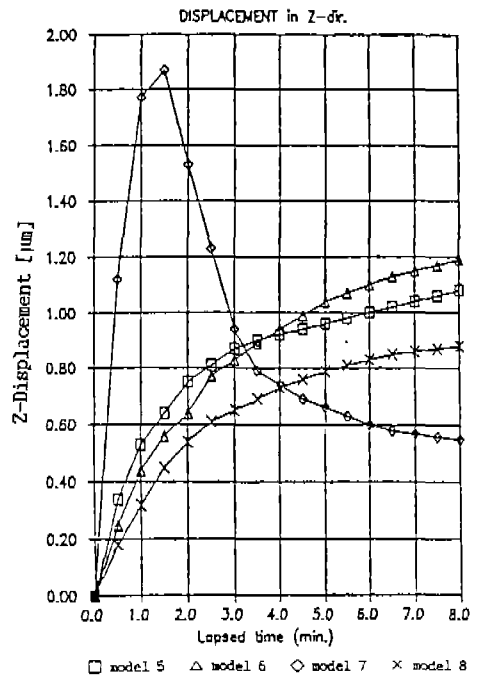
본 연구에서는 熱源模型에서의 入熱條件을 용기속에 들어있는 초기 80℃의 물로 부터 바닥을 통해 熱이 베드 구조물에 전달되고, 이에 따라 전달된 열만큼 용기속의 물의 溫度는 감소하게 된다. 그림 4(a), (b)는 각각의 모델별로 물의 온도가 減少하는 모양을 나타낸 것으로, 여기서 NO-Conduction의 조건은 열전도면을 斷熱시켰을 때 對流熱損失에 의한 온도강하 곡선인데, 이 곡선과 각 모델별 降下曲線과를 비교해보면 그 특성이 間接的으로 파악될 수 있다. 먼저 모델 1-4를 비교해보면 모델3의 경우가 열전도가 가장 적게 되고 있음을 볼수 있으며, 페라이크분말이 함유된 모델4의 경우는 열전도량이 다른 유형보다 크게 나타나고 있고 열전도 反應速度도 빠르게 일어나고 있는 것을 알수 있다. 또한 모델 5-8의 경우를 비교하여 보면 화강암재인 모델8은 본 연구의 複合材料보다 약간 열전도량이 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 주철재인 모델7의 경우는 열전도량이 월등히 크고 그 반응 속도도 매우 급하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 그리고 內部에 화강암과 적벽돌이 內在되어 있는 모델5와 6의 경우는 內在되어 있지 않은 경우와 비교하여 볼때 그다지 큰 差異를 보이지 않는데, 이는 初期의 熱傳導量이 주로 구조물의 表層部에만 전달되고 있기 때문이다.

그림 5(a), (b)는 마운트 모델의 ㄱ자 구조물 선단 상면에서의 垂直方向變化에 대한 時間應答特性이다. 모델 1, 2, 3은 熱源으로부터의 入熱이 계속되는 동안 指數的으로 변형량이 증가되고 있음을 알 수 있다. 이들 3가지 유형의 熱變形은 거의 비슷한 특성을 나타내고 있으며 그 크기는 모델2가 가장 크고, 그 다음이 모델 1의 순서이며 모델 3이 가장 작다. 이같은 원인은 구조 특성보다는 사용 복합재의 熱膨脹 계수가 지배적인 영향을 미치는 것으로 고찰될 수 있는데, 백석영재료 보다는 흑청석 재료가, 그리고 EC 수지 보다는 ED 수지가 열팽창 계수가 크다는 사실을 반영하고 있다. 한편 모델 4에서는 初期의 熱膨脹이 급격하게 일어나다가 一定時間이 경과한 이후에는 점차 변형량이 감소하고 있는 특징을 보이고 있는데, 이는 모델4 재질(페라이트)의 熱傳導 係數와 熱膨脹 係數가 크기 때문이며 집중된 入熱量이 전체 구조물로 확산되면서 변형이 회복되고, 측정 부위의 局部 變形量은 상대적으로 감소된다고 생각된다. 그리고 모델8의 화강암재에서는 앞의 모델 1, 2, 3의 구조물과 그 변화 특성은 거의 비슷하나 수직 변형량은 이들 3개 보다 더 큰 수치를 나타내고 있다. 이에 대한 원인으로는 화강암재의 열팽창 계수가 본 연구의 複合材보다 작기는 하지만, 열전도 계수가 크기 때문에 入熱量이 많고 구조물 특성 등도 부가적으로 작용된 것으로 생각된다. 그러나 적벽돌과 화강암 판재가 內在된 모델5와 6은 挿入 블록과의 구조적 효과로 모델 1, 2, 3과 화강암재 보다 열변형량이 크게 나타나고 있다.

주철재인 모델7은 앞의 모델 4와 비슷한 양상으로 아주 큰 변형량을 보이고 있는데, 이는 주철재의 열전도 계수가 매우 커서 입열량이 클 뿐 아니라 熱의 擴散이 빠르기 때문이라 생각된다. 그리고 이 과정에서는 그 熱的 反應이 빠르기 때문에 열변형이 복원된 후의 변화과정도 간접적으로 확인되고 있다.

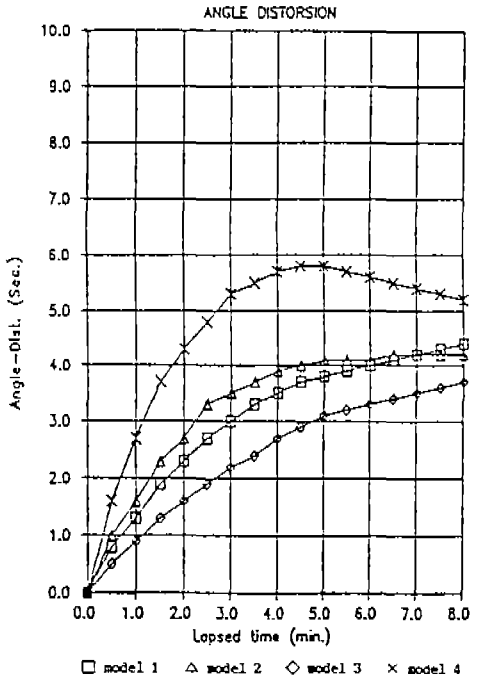


(a) model 1-4,

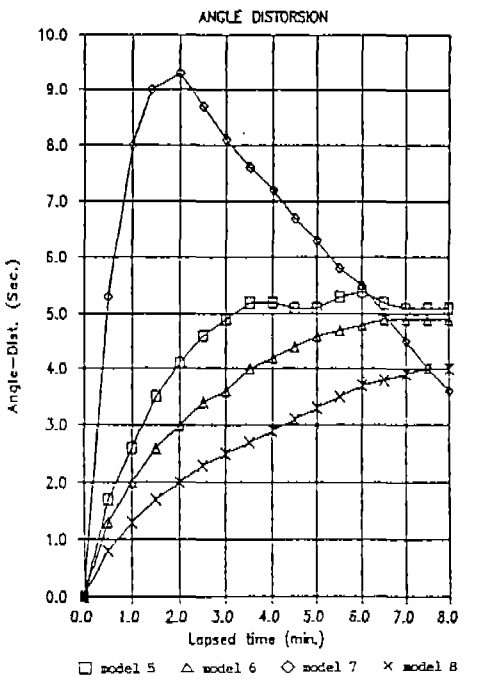


(b) model 5-8

Fig. 5 Thermal deformation in the verical direction of each model due to heat transfer



(a) model 1-4,



(b) model 5-8

Fig. 6 Angular distortion of top surface of each model due to heat transfer

熱變形에 의한 수직 변형량 이외에 베드면에서의 傾斜角 변화를 오토콜리메타에 의해 相對的으로 조사한 결과가 그림 6에 나타나 있다. 이들 특성은 전반적으로 수직방향으로의 열변형량 변화 특성과 비슷한 傾向을 보여주고 있으며, 이중에서 화강암재 모델8과 에폭시 그래나이트 모델3은 거의 같은 熱變形 特性을 갖고 있음을 알 수 있다.

5. 結 論

에폭시 그래나이트재의 最適成形 條件을 찾기 위해 에폭시 수지, 첨가재 크기, 배합비 등을 변화시키면서 보충실험을 실시하고, 이들 實驗結果를 토대로 정밀 공작기계용 베드 구조물 모델 제작조건을 設定하였다. 이 제작조건에 따라 6종류의 복합재 구조물 모델을 성형하였고, 기존 베드 재료와 비교 실험을 위해 鑄鐵材와 花岡岩材도 함께 준비하였다. 준비된 8종류의 베드 구조물 모델들에 대해 動的實驗을 한 결과, 內部 또는 外部振動에 의한 구조물의 減衰特性 및 除振特性은 주철재나 화강암재보다 에폭시 그래나이트재가 더 우수함을 확인하였다. 그리고 구조물의 熱的 安定性 實驗에 있어서도 본 開發材料가 精密加工機械에 많이 사용되는 화강암재에 필적될 수 있는 정도의 특성치를 나타내고 있었다.

따라서 본 硏究에서 개발한 에폭시 그래나이트재는 기계의 진동, 강도, 열변형 등이 문제가 될 수 있는 정밀 가공기용 베드 구조물 재료로 향후 응용될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. G. H. Morgan, P. A. Mckeown, and H. J. Renker, "Materials for Machine Tool Structures", Proc. 20th, MTDR, pp. 429~434, 1980.
2. S. Z. Dbdin, R. K. Shenoy, and M. E. Visveswaran, "Investigation on Granite as a Material for Metrology Aids". Annals of the CIRP, Vol. 27, pp. 371~381, 1987.
3. R. A. Bares, "Furane Resin Concrete and its applications to large diamater sewer pipes", ACI Publication SP. 58, pp. 41~74, 1978.
4. C. Vipulanandan, N. Dharmarajan and E. Ching, "Mexhanical Behavior of Polymer Concrete System", Cranfield Research & Development LTD, 1979.
5. CMS, "Epoxy Conerte-A New Improved Structural Material for Production Machinery", Cranfield Research & Development LTD, 1979.
6. P. A. Mckeoun, and G. H. Morgan, "Epoxy Granite : a Structural Material for Precision Machines", Pecision Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 37~39, 1979.
7. Fritz Studer AG technical papers, "GRANITAN", pp. 1~69, 1986.
8. J. F. Kane, "ANONITE™ Design Manual", GANDALF Inc., pp. 1~35, 1990.
9. M. Tsutsumi, K. Unno and Yoshino, "New Material Application to Ultraprecision Lathe", Precision Machinery, Vol. 13, No. 1. pp. 171~186, 1985.
10. 김종호, 맹희영, 박영일, 원시태, "초정밀 가공기계 구조물용 에폭시-그래나이트재의 특성에 관한 연구", 제7권, 제2호, 74~84, 1990.
11. 김종호, 맹희명, 박영일, 원시태, "초정밀 가공기계 개발을 위한 기계구조물 설계 연구", 특성과제 연구보고서, 과학기술처, pp. 1~142, 1989.
12. 박종권, 이득우, 박천홍, 신영재, 정재호, 김종호, 맹희명, 박영일, 원시태, "초정밀 가공기 구조물의 설계 기술 연구(I)", 특정과제 연구보고서, 과학기술처, pp. 57~154, 1991.