

# 에폭시-그라나이트 재료 기술의 활용기술과 전망



맹희영

서울산업대학교 기계설계 · 자동화공학부

## 1. 머리말

최근 반도체, 광학, 영상, 정보기기 및 항공우주 등 하이테크 산업의 급속한 발전과 더불어 고정밀도를 요구하는 부품의 비중이 높아가고 있다. 이에 따라 정밀부품의 가공에 필요한 공작기계도 점차 특수한 가공방식과 특수 구조물을 사용하는 강성 모델로 발전되어 가고 있다.

정밀공작기계의 가공정밀도가 유지되기 위해서는 기계 본체 구조물과 스피들 장치, 공구 및 홀더장치, 기어박스, 이송장치, 측정장치 등 각 장치별 정밀도와 조립되었을 때의 전체 정밀도가 유지되어야만 한다. 그리고 정밀도 유지 및 관리에 있어서 기초가 되는 공작기계 구조물은 형상 및 치수정밀도가 안정되어야 하고, 기계 작업 중 발생하는 내부 및 외부진동의 흡수성과 감쇠성이 뛰어나야 하며 정적 및 동적특성이 고려된 충분한 강성의 구조물로 설계/제작되어야만 그 기능을 발휘할 수 있게 된다.

전통적인 구조재료로 주로 사용되어 온 주물재료나 용접

구조물은 제작이 용이하고 강성과 내구성은 좋으나, 외부진동의 흡수성, 감쇠성, 치수안정성 등의 측면에서는 정밀공작기계의 구비조건으로 바람직하지 못한 기계적, 물리적 특성을 가지고 있다.

그 때문에 초정밀가공기의 구조재료로 이미 오래전부터 화강암제 베드가 사용되었는데, 화강암 구조물에 있어서도 감쇠 및 치수안정성은 매우 우수하나 가공비용이 많이 들고 습기 영향에 의해 변형을 일으키며 강철재료 된 다른 구성요소들과 열변형 문제를 일으키기 쉬운 단점이 있다.

이미 선진국에서는 80년대 초반부터 이들을 대체하기 위한 신소재로서 알루미늄 세라믹, Zerodur, Invar, Polymer Concrete 계통의 구조재료들을 응용하려는 시도가 있었다. 그 중 가장 성공적으로 널리 실용화되고 있는 것은 에폭시-그라나이트 재료이다. 대표적으로 영국의 CMS사, 미국의 Anocast사, Philadelphia Resins, 독일의 R. B. Gesellschaft사, 그리고 일본의 Tsugami사 등에 있어서는 여러 용도의 에폭시-그라나이트 복합재 구조

물을 제작하여 자사 또는 여러 공작기계 제조메이커들에 공급하고 있다. 국내에 있어서도 근래 외국산 공작기계들의 베드 또는 컬럼 구조물에서 이 복합재료를 발견할 수 있으며, 국내의 일부 정밀공작기계 제작사에 있어서는 이 복합재 구조물만을 수입하여 조립에 사용하고 있기도 하다.

에폭시-그라나이트 복합재의 응용범위에 있어서도 초기 단계에서는 초정밀가공기와 정밀선반, 연삭가공기 등의 적용에 국한하였으나, 그 효과가 좋아서 점차 밀링머신, 머시닝센터, 반도체 측정스테이지, 그리고 3차원측정기, 레이저가공기 구조물에 이르기까지 그 응용이 광범위하게 확산되고 있다.

따라서 이 글에서는 에폭시-그라나이트재 구조물이 정밀공작기계용으로 활용되는 데에 어떠한 장점이 있고, 세계적으로 개발된 동향과 발전추세, 그리고 관련된 설계기술과 제작방안들을 소개하고자 하였다.

## 2. 에폭시-그라나이트재의 장점과 개발 동향

### 2.1 에폭시-그라나이트재의 특성 및 장점

에폭시-그라나이트재 복합재료가 공작기계 구조물로서 각광을 받고 있는 것은 재료가 가지고 있는 우수한 감쇠성, 강도, 치수안정성, 내약품성 등의 고유 성질 이외에도 제작기간이 짧고 납기를 단축시킬 수 있으며, 열팽창계수가 강재와 거의 비슷하여 열변형문제가 적고, 공해가 심한 주물 산업에 비해서 공해원이 적은 제작방식이라는 점, 그리고 제작비가 저렴하고 가내공업형태나 현지제작도 가능한 점 등 구조성능, 제작성, 경제적 측면 모두를 함께 만족하고 있기 때문이다.

정밀공작기계 구조물의 구비조건 측면에서 에폭시-그라나이트재는 표 1에서 보는 바와 같이 주철재, 화강암재, 알루미늄세라믹재 등에 비해 많은 우수한 장점들이 많다. 주철재에 비해 감쇠성능이 10배나 되며 화강암에 비해서도 3배나 우수하며 높은 치수 안정성을 가지고 있다. 그러면서도 열팽창계수를 인위적으로 강철재 또는 주철재와 유사한

표 1. 정밀공작기계용 구조물 재료들의 기계적·물리적 특성 비교

재료명	주철재	화강암재	에폭시-그라나이트재	알루미늄세라믹재	Invar재
물성치					
Young율 E (GPa)	100	40	35	240	140
밀도 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	73	30	28	34	82
비강성 (E/ $\gamma$ ) ( $\times 10^6$ m)	1.4	1.5	1.4	7.0	1.7
대수감쇠율 $\delta$ ( $\times 10^3$ )	1~3	6	25	0.6	0.5~2
선팽창계수 $\alpha$ ( $\times 10^{-6}$ /K)	12	6~8	12~14	4~6	0.6
열전도율 $\lambda$ (W/m·K)	53.5	3.8	2~5	16	10
단위 강성 EI (N/mm <sup>2</sup> )	16,000	15,000	14,000	45,000	17,000

팽창계수로 조절할 수 있다. 한편 습도, 물, 절삭유, 윤활제 등에 전혀 영향을 받지 않는 내부식성을 가지고 있으면서도 가공비가 적게 들기 때문에 구조물의 제작 원가가 저렴하다. 또한 상온에서 성형하고 큐어링하기 때문에 구조물 내부에 전기배선용이나 냉각수, 윤활유 순환용 파이프 등을 튜브 삽입방식에 의해 설치할 수 있으며, 조립 또는 안내, 관련 부품 장착을 위한 인서트를 삽입하는 공법 등이 발전되어 있어 제작비용을 절감시켜 주기도 한다.

### 2.2 에폭시-그라나이트재 구조물의 개발동향과 활용현황

정밀공작기계의 구조용 복합재료로서 에폭시-그라나이트 복합재를 응용하려는 연구는 1975년에 처음으로 스위스의 F. Studer사가 Synthetic Granite라 명명된 복합재 베드의 개발<sup>(6)</sup>한 데에서 비롯하였다.

초창기에는 영국, 독일, 스위스 등에서 연구가 진행되었는데, 영국에서는 MITRA 및 Crafield 공과대학<sup>(7)</sup>, 독일에서는 Aachen 공과대학 및 Darmstadt 공과대학<sup>(8)</sup> 등에서 산학 공동연구를 통해 점차 그 응용을 확대하여 나갔다. 미국의 경우에는 ANORAD사와 Dayton 대학과의 산학연구소로서 연구가 진행되었는데<sup>(9)</sup>, 미국에서는 정밀선반, 연삭기, 밀링머신, 머시닝센터 등의 응용보다는 반도체 정밀검사장비의 stage와 CMM 측정대의 구조물용에 치중하여 응용되고 있는 특징이 있다.

최근에는 에폭시-그라나이트계 복합재 품명도 여러 가지로 불리우고 있는데, Epoxy-Granite 명칭 이외에도 영

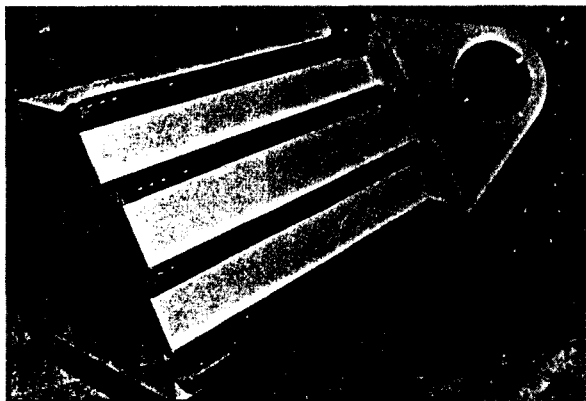
국의 CMS(Cranfield Moulded Structure)사에서는 GRANITAN<sup>TM</sup>, 미국의 ANOCAST사에서는 ANONITE<sup>SM</sup>, 그리고 일본의 Nippon정기에서는 산화철 분말을 넣어서 FESINITE<sup>SM</sup> 등의 제품들로서 상용화되어 시판되고 있다.

그리고 이 복합재의 제조기술은 Studer AG사가 Synthetic Granite라는 특허권을 가지고 있었으나 90년대에 들어서는 각 회사가 고유 제조공정법 또는 첨가재의 사용을 통해 Synthetic Granite재와의 차별성을 추구해나갔다.

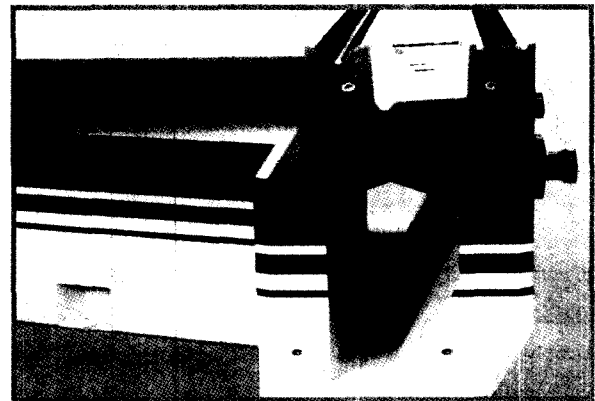
한편 국내에 있어서 필자 등<sup>(1-3)</sup>이 1987년 초정밀가공기 구조물 제조기술의 개발 일환으로서 에폭시-그래나이트

복합재료의 국산화 개발연구에 처음 착수하였고, 5년여에 걸쳐 filler 재료의 combination기술, 높은 점도 혼합재료의 강제성형 방법, 진공 탈포법, 진동충진법, 그리고 인서트 삽입기술 등을 축적하였다. 그 후 초정밀가공기 prototype 이외에 정밀측정대와 드릴링센터, 연삭기 등의 구조물에도 이 재료를 실용화하는 데에 성공하였으며, 재료 강도와 감쇠성 등 재료특성들과 재료조직의 치밀성 등에 있어서는 선진국의 수준을 능가하는 결과를 얻은 바고 있다.

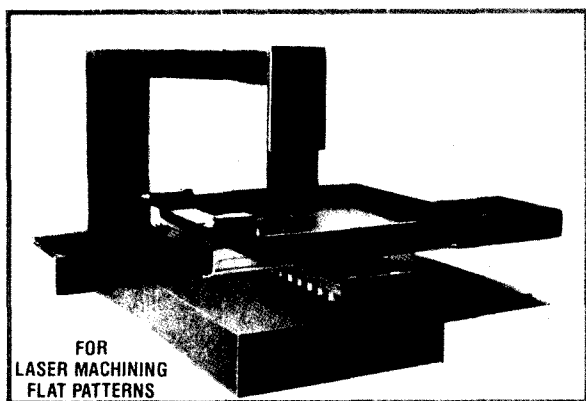
그림 1에는 각종 공작기계와 위치결정 장비들에 에폭시-그래나이트 구조물이 활용되고 있는 모습을 보여 주고 있다.



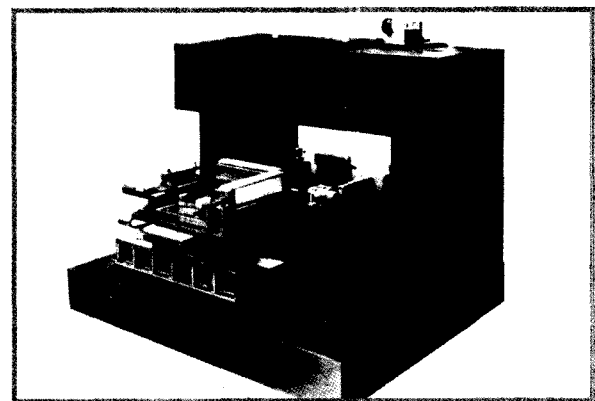
(a) 정밀선반용 베드(Studer AG)



(b) 성형연삭기용 베드(CMS)



(c) 레이저가공기용 구조물(Anorad사)



(d) 반도체 검사장비용 구조물(Anorad사)

그림 1. 각종 정밀공작기계와 위치결정장비에의 에폭시-그래나이트 구조물의 실용에

### 3. 에폭시-그라나이트재 구조물의 특성 비교

#### 3.1 정적 및 동적 특성

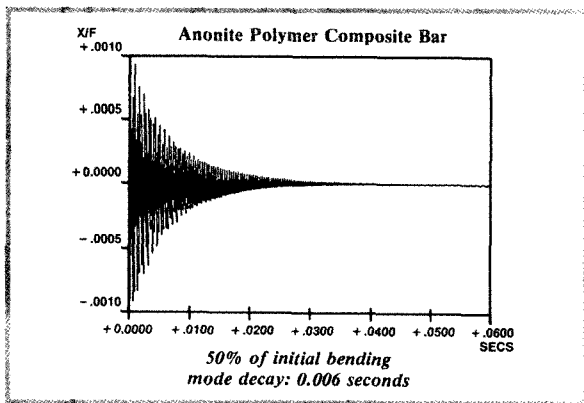
에폭시-그라나이트재는 인장 또는 압축강도가 주철재의 1/3 정도밖에 되지 않으나, 보통 주철재 구조물이 가지고 있는 내부 空洞이 에폭시-그라나이트재에서는 채워져서 설계되기 때문에 비강성 및 단위강성은 거의 비슷한 값에 도달하게 된다.

실제로 상용화되고 있는 구조물의 예를 보면, 그림 2와

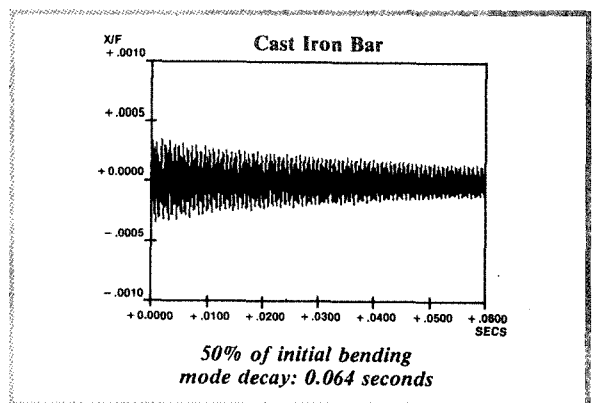
같이 에폭시-그라나이트재는 주철재보다 10배 감쇠가 크고 진동소멸시간도 매우 짧게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

실제 에폭시-그라나이트재가 연삭기 구조물로 형성되었을 때의 동특성에 대하여 살펴보면, 그림 3과 같이 주철재에 비하여 저주파 영역에서의 공진현상이 없어지고 고주파 영역에서의 진폭도 감소되고 있는 현상을 볼 수 있다.

한편 그림 4는 정밀선반에 있어서의 스피들의 진동에 의한 회전오차를 에폭시-그라나이트재 베드로 이루어진 정밀선반의 경우와, 보통의 주철재 베드 정밀선반과의 경우와를 비교한 것으로 에폭시-그라나이트재 구조물의 경우가 월등히 작은 반경오차값을 보이고 있음을 볼 수 있다.



(a) 주철재



(b) 에폭시-그라나이트재(ANOCAST 사)

그림 2. 주철재와 에폭시-그라나이트재 봉의 진동특성 비교

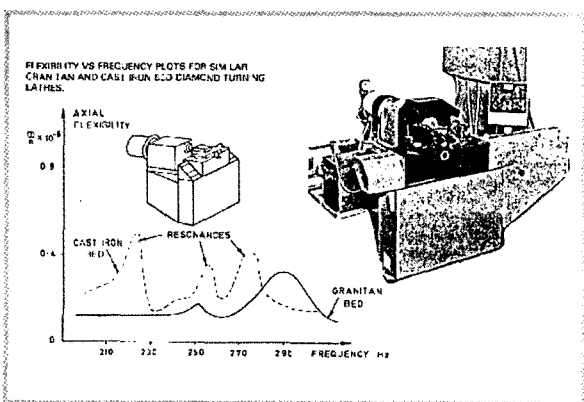


그림 3. 연삭기에 응용된 에폭시-그라나이트재 베드의 진동특성 비교 (영국 CMS사의 GRANITAN 제품)

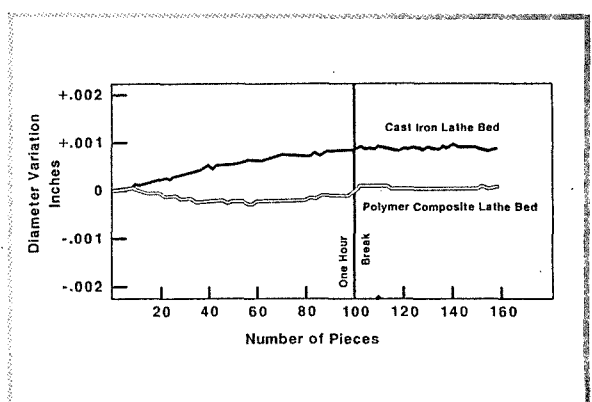


그림 4. 에폭시-그라나이트재 정밀선반과 주철재 정밀선반의 회전가공오차 비교 (미국 ANORAD사의 Anonite재 정밀선반)

### 3.2 열변형 특성

외부열원에 대한 에폭시-그래나이트재의 열변형은 그 반응속도가 늦어서 외관상의 열변형량도 작게 된다. 그러나 고분자 에폭시 접착제가 사용된 복합재의 경우에는 재료가 어느 일정온도에서 유리전이변태를 겪기 때문에 유리변태온도 이상의 고온 환경이나 내부 열원에 의해 집중열이 발생하는 경우에는 설계상 또는 취급상 다소 주의를 요한다. 그리고 유리변태온도는 사용 에폭시의 성질과 복합재의 경화온도와 밀접한 관계가 있기 때문에 이를 기술적으로 조절하여 대처하기도 한다.

Studer사 GRANITAN 제품의 경우, 외부 가열에 따른 재료의 온도 변화특성은 GRANITAN 제품의 경우가 주철재의 경우보다 열사이클 진폭도 작고 안정하게 나타남을 보고하고 있다. 또한 밀폐 구조형의 에폭시-콘크리트 구조물에 대한 열 변형량에 있어서도 내부 코어를 갖는 보통형 주철재 구조물보다 전반적으로 변형량이 적고 그 구조적 구배도 완만하게 생기고 있음을 보고하고 있다.

### 3.3 치수안정성과 수축률의 비교

에폭시-그래나이트 복합재가 장기간 경과에 따라 시효 변형이 일어날 수 있는지의 여부는 많은 연구에서 검토되었다. 그리고 구조물의 치수안정성은 주로 사용된 접착제의 성질에 의존하는 것으로 알려져 있는데, 크리이프 시험(상온, 항복강도의 10% 하중조건)된 결과들을 통해 그 특성을 살펴 보면, 에폭시 수지를 사용하였을 때가 불포화폴리에스테르 수지나 폴리메타크릴릭 수지의 경우보다 매우 작아서 UP : PMMA : PA = 8 : 4 : 1의 비율로 나타나고, 에폭시 수지 고형체의 경우는 약 1000시간이 경과한 후에도 1.5  $\mu\text{m}$  정도의 변형량밖에 생기지 않고 있음을 보고하고 있다.

그리고 필자 등<sup>(2)</sup>이 시험한 결과에 의하면 장시간 하중의 작용에 의한 잔류변형의 측정을 통해 평가한 결과에 의하면, 에폭시-그래나이트재의 경우가 주철재나 화강암재에 비하여 다소 치수 안정성이 저하되고 있는 것을 볼 수 있으나, 주철재에 비해 인장/압축강도가 약한 점을 고려한다면 강성 값이 비슷하게 설계된 실제의 구조물의 경우에

대해서는 에폭시-그래나이트의 경우가 오히려 치수안정성이 더 좋게 나올 수 있는 가능성을 볼 수 있으며, 또한 Studer사의 보고에 의하면 GRANITAN S100 제품의 경우, 보통 크기의 공작기계에서 6년간 1 $\mu\text{m}$  이내의 치수안정성이 보장되는 것으로 보고 되고 있다.<sup>(7)</sup>

### 3.4 제작비용 및 경제성의 비교

에폭시-그래나이트재로 공작기계 구조물을 제작할 때 드는 비용은 주철재를 사용하는 경우보다 가격이 오히려 저렴하게 되는 것이 보통이다. 영국 CMS사의 경제성 비교 자료에 의하면, 에폭시-그래나이트 구조물을 정밀선반에 적용한 경우, 에폭시 수지가 비싸기 때문에 순수한 소재 비용은 주철재보다 GRANITAN 재료가 약간 비싸지만 모울딩 비용과 추가 가공비용 등이 GRANITAN의 경우가 적게 들기 때문에 총제작비용을 종합해 보면 오히려 GRANITAN의 경우가 29%나 적게 들고 있음을 보여 주고 있다.

한편 연삭기의 경우에 대한 동등한 평가 자료에 있어서도 마찬가지로 회주철 재료를 사용한 경우보다 GRANITAN재를 사용한 구조물의 경우가 총제작비용이 27% 정도 절감되고 있음을 보여 주고 있기도 하다.

## 4. 에폭시-그래나이트재 구조물의 설계 및 제작 기술

공작기계의 구조재료가 대체되게 되면 이에 수반하여 구조물의 설계 변경도 뒤따라야 하며, 주위 기계요소와 결합 부품과의 결합성, 균형과 조화, 그리고 안내면의 진직도, 내마모성, 가공성 등에 관련된 기술도 축적되어야 한다. 따라서 본 장에서는 에폭시-그래나이트재를 공작기계의 구조물에 적용할 때 어떠한 설계 및 제작기술이 적용되는가를 살펴보기로 한다.

### 4.1 재료 대체에 따른 구조 설계

구조재료의 기계적, 물리적 성질 등이 변경되게 되면 공

작기계의 기능상 여러 구속조건들을 만족시키면서 설계치수의 국부적 또는 전면적인 변경을 추구하여야 본래의 성능을 유지할 수 있게 된다. 이때 구조물의 정적, 동적 특성과 열변형 특성을 해석하는 절차는 주철재를 사용하는 경우와 대동소이하다. 그리고 근래에는 유한요소법을 이용한 CAE 기술의 발달로 구조해석용 Workstation을 이용하는 경우가 많다.

## 4.2 구조물의 모울딩 절차 및 성형 기술

에폭시-그래나이트재 구조물을 모울딩하는 기술은 각 개발사마다 약간의 차이가 있으나 보통은 다음과 같은 공정절차를 거친다.

### (1) 제품성형을 위한 모울드 준비

구조물 제품의 설계가 완성되면 설계치수와 내/외부 공차, 수축률, 가공여유 등을 고려하여 모울드를 설계한다. 모울드의 설계요령은 일반 재료의 경우와 대동소이하나 에폭시-그래나이트재의 경우에는 고점도의 혼합재를 성형하여야 하기 때문에 이형시의 편리성을 고려하여 대부분 조립형 모울드를 사용한다. 이때 성형시의 하중, 압력, 인서트부착, 치수정밀도의 유지 등을 주의 깊게 고려하여 설계한다. 그리고 필요에 따라서는 모울드를 지지하고 성형될 구조물의 위치 및 치수정밀도를 유지하기 위해 지그나 고정구, 보조기구를 사용하고 있으며 완성된 모울드 벽에는 적절한 유지 강도와 위치를 확보할 수 있도록 인서트와 안

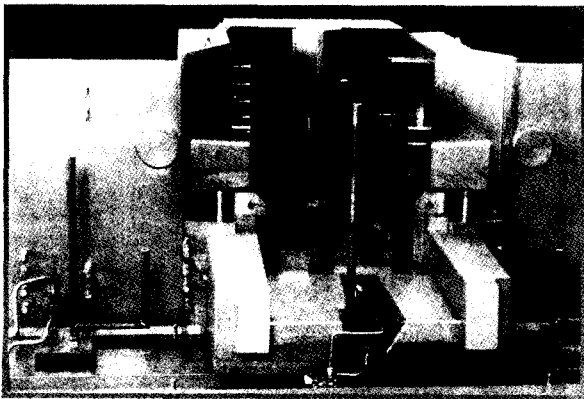


그림 5. 에폭시-그래나이트재 제품의 성형을 위해 준비된 모울드

내 스톱, 코어 등을 부착하는 특징이 있다.

그림 5는 이와 같은 방법으로 준비된 모울드의 예를 보여 주고 있다.

### (2) 모울드 표면의 이형제 도포

성형 작업후 제품의 이형을 용이하도록 하기 위해, 모울드의 표면에는 이형제를 도포한다. 이형제의 도포한 후에는 건조시키는 과정을 수차례 반복하여 충분한 이형이 이루어 질 수 있도록 하는 기술이 필요하다. 보통은 스프레이식으로 이형제를 많이 사용하나 경제성을 위하여 붓으로 바르는 이형제 도포 과정을 사용하기도 한다.

### (3) 에폭시 수지와 필러재의 준비

에폭시-그래나이트재에는 각각 고유의 에폭시 수지와 경화제, 그리고 Coupling agent가 있으므로 이를 준비하여 적당한 혼합비로 적당 시간동안 희석하고 탈포처리를 하여 수지 혼합액을 만든다. 에폭시는 용도 및 사용목적에 따라 매우 다양한 성질이 발휘되는데, 여기서 중요시 되는 것은 점도, 당량, 접착력, 분자량, 그리고 가사시간, 큐어링 시간 등이다.

또한 필러재로는 화강암 자연석을 분쇄기로 분쇄한 후, 사용 성분계의 입도 크기별로 분류하고, 이를 충분히 세척 및 건조시켜서 성분계 구성비로 중량을 달아 준비한다. 그리고 필러재의 입도 성분계는 일반 콘크리트와는 달리 충전도를 높이기 위해서 5~8 성분계가 사용되는 것이 보통이다.

### (4) 수지와 필러재의 혼합

복합재의 사용 목적에 맞추어서 고유한 수지 : 필러재의 중량비로 수지와 필러재를 혼합한다. 보통 에폭시-그래나이트재의 중량비는 1 : 10에서 1 : 15의 범위 값이 사용되기 때문에 혼합재료의 점도는 매우 높다. 따라서 믹서기는 특수 임펠러가 장착된 기계가 사용되는 것이 보통이다. 그리고 이때 믹서기의 속도와 작업시간은 접착력 및 재료 결합과 관계가 깊으므로 주의를 요하며, 작업시에는 경우에 따라 발열반응을 일으키기도 하는데, 가능한한 상온으로 유지하도록 하는 것이 중요하다.

### (5) 혼합재의 주입 및 콤팩션(compaction) 작업

혼합재의 준비가 완료되면, 미리 준비된 모울드에 주입하면서 성형 작업을 실시한다. 성형 작업시에는 재료의 점



그림 6. 콤팩션 장치 내부에 설치된 모듈드 전경

도가 매우 높으므로 보통 진동작업봉, 성형가압기, 진공챔버, 모듈드 바이브레이터 등이 사용되며, 혼합재료는 또한 고유의 可事時間이 약정되어 있고 가사시간에 가까울수록 점도가 더욱 올라가기 때문에 가사시간을 고려하여 규정시간 내에 작업을 끝내지 못하면 재료가 굳어버려 작업이 곤란해지므로 주의를 요하기도 한다.

그림 6은 이와 같은 혼합재의 주입 및 콤팩션 작업을 위한 공정실 내부를 보여주는 예로서 여러 추가적인 장치로 형성된 작업대 위에 모듈드가 설치된 모습을 보여주고 있다.

#### (6) 큐어링(curing) 작업

콤팩션 작업이 끝난 후에는 약 24~30 시간이면 제품이 충분히 경화되는데, 이와 같이 경화되는 동안 제품이 적당한 하중상태에서 치수정밀도가 잘 유지되도록 보관하는 작업을 큐어링 작업이라 한다. 큐어링 작업중에는 혼합재료가 경화되면서 수축을 발생하므로 수축변형이 생기더라도 치수 오차가 최대한 적게 되도록 유지·관리하는 기술을 요한다.

#### (7) 제품의 이형 및 후처리

큐어링이 끝나면 모듈드나 코어 지지대 등을 해체하여 제품을 이형한다. 그리고 필요시에는 이형된 제품의 표면에 겔코팅(gel-coating)을 한다면지, 정밀도를 요하는 인서트 부분을 연삭 또는 폴리싱하는 등의 후처리 가공을 실시함으로써 제품을 완성한다.

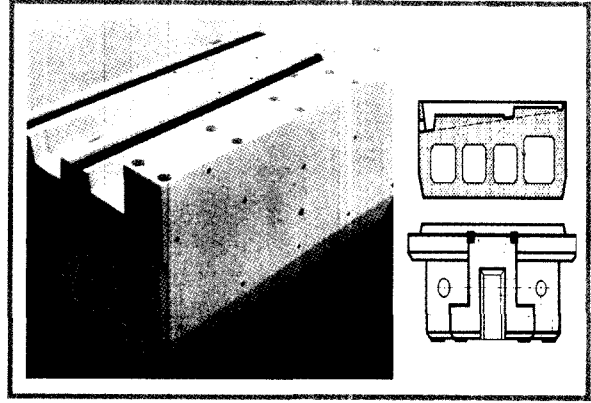


그림 7. 제품의 이형이 완료된 구조를 모습(오른쪽 그림은 단면도)

### 4.3 제품 및 모듈드 설계시의 주요 고려사항

일반적으로 에폭시-그라나이트재 구조제품과 모듈드를 설계하는 데에 고려되는 사항들 중에서 특별히 중요시 되는 점들만을 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 치수부여: datum plane이나 모듈드 (강제)벽의 주조 표면을 기준으로 하여 치수를 정한다.
- (2) 수축 여유(Linear Shrinkage): 약 0.02%를 기준으로 고려한다.
- (3) 모듈드 재료의 강성/변형에 따른 여유공차 (Tolerances):
  - Hard Wood Construction: +/- (0.635~1.27) mm
  - Metal Lined Wood Construction: +/- (0.508~0.889) mm
  - Metal Mold Construction: +/- (0.127~0.381) mm
- (4) 테이퍼 구매(솔리드형 모듈드나 코어의 경우):
  - Wooden Mold: 최소한 5° draft 구매
  - Metal Mold: 최소한 (1 - 2)° draft 구매
- (5) 최소 벽두께(고립된 돌출부의 단면 치수) 설정조건:
  - 최소벽두께(min. wall thickness) > 2.5 × (max. size aggregate)
  - 최소벽두께 > (35 mm) [구조물의 국부적 강도 고려]
- (6) 단면(Section) 설계:
  - Uniform한 형상이거나 progressive한 형상이 되도록 설계
  - Symmetric하도록 설계

- 응력집중이 피해지도록 rounding, chamfer를 사용
- (7) Rounding 및 chamfer 설정조건:
  - Radius >  $2.0 \times (\text{max. size aggregate})$
  - Radius > (15 mm) [구조물의 국부적 강도 고려]
  - Chamfer > 10 mm
- (8) 리브(Rib)의 설치: 앞의 설계원칙 입장에서 Wall이나 Section의 두께를 증가시키므로 가능한 한 사용을 억제한다. 부득이한 사용시에는 위의 설계원칙을 적용하며, 대칭성을 유지할 수 있도록 배치하는 데에 주의하여야 하고, 또 이종재 간의 불균형이 초래하지 않도록 주의하여야 한다.
- (9) 포켓(Pockets) 설치: 조립목적, roller pack pocket, lift slot, 중량 감소, 주조시의 대칭성, 배선, 배관을 위한 공급구 등을 목적으로 설치하며 항상 2° 정도의 경사를 둔다.
- (10) Lips: 미적인 목적이나 철판의 부착을 위해 적당 깊이를 준다. 이 부분은 약하기 쉬우므로 파손 가능성에 주의하여야 한다.
- (11) 구멍: Cast-in 구멍과 관통구멍이 상용되는데, 연마된 표면을 주로 사용하고 길이와 뽑아냄을 고려하여 정한다.
- (12) 전기배선: 가요성 도관, PVC 관, 견고한 파이프 등을 구형 내에 삽입하여 주조한다. 이때 주형작업의 방해나 지지강도가 약해질 가능성을 충분히 고려한다.
- (13) 배관(냉각수, 공유압, 윤활유 등의 배관): 이는 주형 내에 삽입하여 주조하는 방법이 보통 사용되는데, 설치시에는 주조과정에서 진동에 견딜수 있도록 지지해야 되고, 벽이나 각종 삽입물 등 내부 구조물 사이에는 30mm 이상의 간격을 유지하여야 하며, 반드시 누출여부를 확인한 후 조립한다.
- (14) 코어: 사용되는 코어형은 Pull-out형과 Cast-in형이 있는데, Pull-out형의 경우에는 뽑아내는 길이, 방법을 고려 2~5° 경사를 주고, 무게 감소/증가, 대칭성, 벽과의 거리 등에 특히 주의하여야 한다.
- (15) 들어올림블록(Lifting): 강도, 무게중심, 간섭 등을 충분히 고려한다.
- (16) 지지대(Support): 무게 중심, 수평유지방법, 정/동

적 하중의 분포, 진동원, Creep 등을 검토한 후에 주의 깊게 설치한다.

#### 4.4 인서트(Insert) 및 표면 다듬질

에폭시-그레나이트재 구조물을 제작하는 데에 사용되는 인서트의 종류는 크게 Cast-in 인서트와 Grouted 인서트로 나뉘며, 표준형 인서트를 상용할 때에는 하중조건, 안전계수를 고려하여 설계한 후 표준규격을 선택하여 사용한다. 그러나 후가공을 필요로 하는 부위에서는 비표준형 인서트가 사용되기도 하는데, 이때에는 구조물체의 부하분포, 열적특성, 가공력에 의한 충격, 이종재료 간의 조화, 정밀도 유지강도 등에 주의하여 설계하여야 한다.

인서트의 설계 및 삽입시의 일반적 고려사항을 열거하면 다음과 같다.

- (1) 연결부위들의 강도, 강성
- (2) 정적인 응용인가, 동적인 응용인가에 따른 지지특성
- (3) 열부하, 피로반복하중(fatigue loading)
- (4) 충돌 가능성 또는 충격부하
- (5) 기능성, 용통성(변경가능성)
- (6) Cast-in인가 Grouted인가에 따른 정밀도 유지, 내구성, 지지강도
- (7) 후가공을 하는 경우에 가공에 따른 변형이나 이상현상
- (8) 기타 투울링 및 모듈드에의 유지성

한편 에폭시-그레나이트재 구조물의 제품표면은 모듈드면의 표면거칠기만 좋으면 이형된 표면만으로도 매우 매끈한 면이 얻어지고 재료가 내약품성이 보장되기 때문에 대부분 이형된 면 그대로를 사용할 수가 있는데, 이를 "As-Cast Surface" 라 부른다.

그러나 경우에 따라서는 더욱 광택이 나는 미려한 표면으로 만들기도 하는데, 이때에는 표면에 젤코팅 처리를 하여 "Gel Coat surface"를 만들기도 하고, 내마모성을 증진시키기 위해서 표층부분을 Sand Blasting 하거나 연마가공을 실시하기도 한다.

그림 8은 에폭시-그레나이트 구조물의 내부에 설치된 여러 유형의 인서트들에 대한 모양을 보여준 것이다.



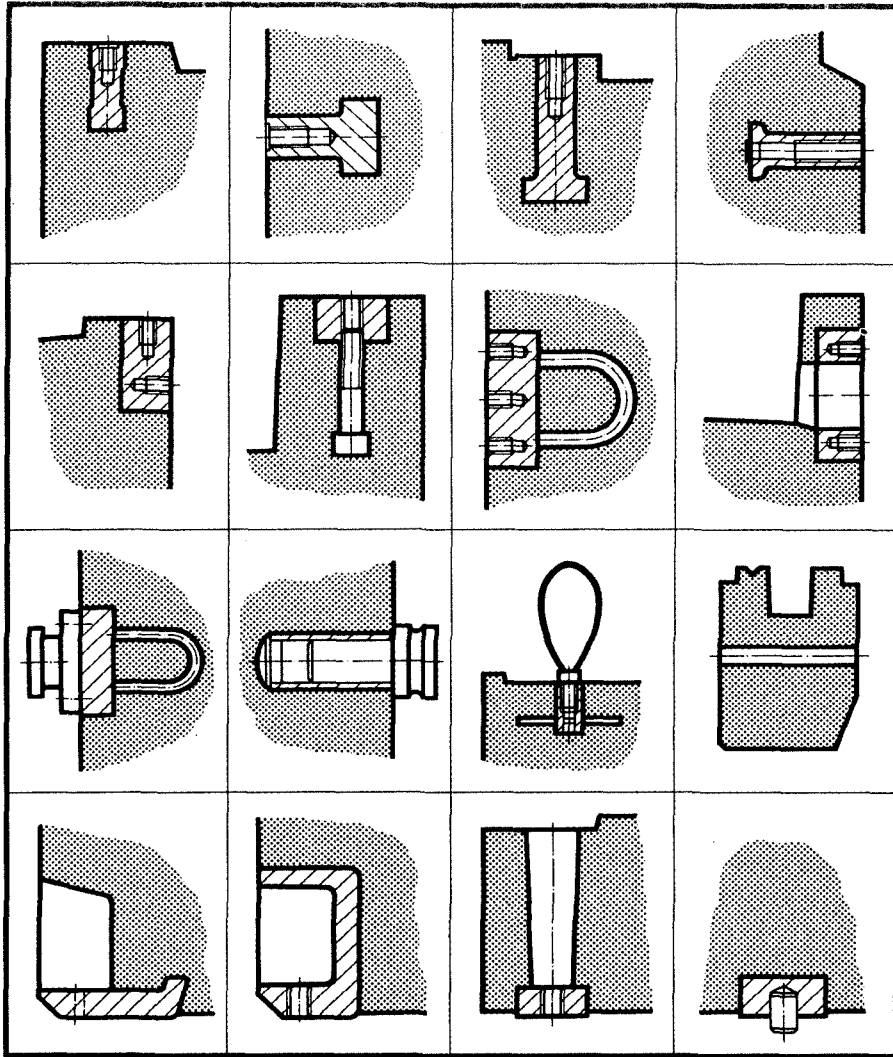


그림 8. 구조물 내부에 설치된 여러 유형의 인서트 설치 예

#### 4.5 안내면(guide way)의 제작기술

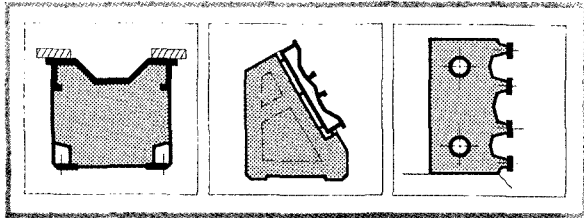
정밀공작기계의 운동정밀도에 매우 중요한 인자인 안내면을 가공하기 위해서는 대형성형 연삭기가 필요하게 되어 가공비가 많이 든다. 에폭시-그래나이트재 공작기계 구조물에서는 안내면을 제작하는 방법으로 크게 3가지가 사용된다.

(1) 조립형 안내면(그림 9(a)): 따로 가공된 안내면 부품을

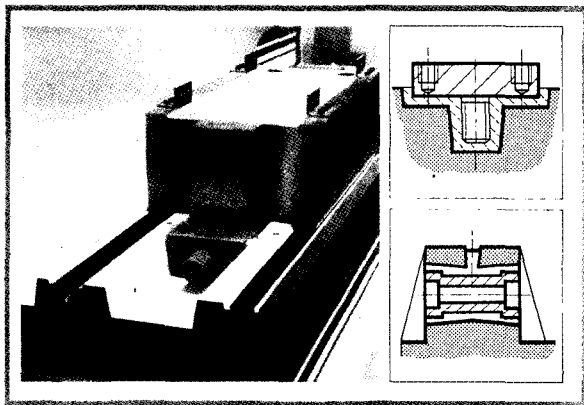
인서트와 조립한 후 정밀도를 맞추는 방법

(2) 인서트 가공형 안내면(그림 9(b)): 안내면 제작용 인서트를 심어서 성형한 후에 안내면을 기계가공을 통해 제작하는 방법

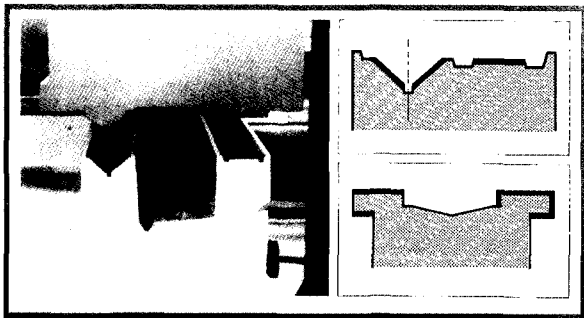
(3) 내마모제 도포형 안내면(그림 9(c)): 제품을 성형하기 전에 모울드의 역안내면 표층부위에 내마모제를 일정 두께만큼 발라놓고 이를 이형한 후에 후가공을 통해 정밀도를 맞추는 방법



(a) 조립형 안내면



(b) 인서트 가공형 안내면



(c) 내마모제 도포형 안내면

그림 9. 에폭시-그라나이트재 구조물상의 안내면 설치 유형

등이 사용되고 있다. 각각의 이들 방법에는 상당한 기술적 수준을 필요로 하는 단점은 있으나, 경우에 따라서는 안내면의 교체가 가능하고 안내면의 가공비용이 절감되며 내마모성이 매우 뛰어난 재료를 사용할 수 있는 장점이 있어서, 이 부분에 있어서도 많은 관심의 대상이 되고 있는 사항이다.

## 5. 맺음말

정밀공작기계의 구조용 복합재료로서 에폭시-콘크리트재를 응용하려는 연구는 Studer AG사가 Synthetic Granite 복합재 베드의 개발을 성공한 이래 실용화되기 시작하였고 이에 관한 많은 연구가 축적되어 현재에는 본격적인 실용기를 맞이하고 있다. 시작단계에서는 초정밀가공기, 정밀선반, 연삭기 등에 응용되었으나 현재에는 밀링머신, 머시닝센터, 그리고 정밀공작기계 이외의 반도체 검사스테이지와 CMM 구조물용에 이르기까지 그 실용화가 확대되어 있다.

이와 같이 정밀공작기계의 구조물용으로 에폭시-그라나이트재 구조물이 각광받고 있는 것은 재료가 가지고 있는 우수한 고유성질들 이외에도 제작기간이 짧고 납기를 단축시킬 수 있으며, 공해가 심한 주물산업에 비해 공해원이 없는 제작방식이라는 점, 그리고 제작비가 저렴하고 가내공업 형태나 현지제작도 가능한 점 등, 구조성능, 제작성, 경제적 측면에서 모두를 함께 만족하고 있기 때문으로 사료된다.

국내에 있어서도 공작기계 구조물 시장은 약 2조원 규모이며 수출시장까지 개척할 수 있는 내재적 가치와 기존의 주물산업에서 가지고 있는 공해문제, 열악한 작업환경의 개선문제, 인력수급의 문제 등을 생각한다면 에폭시-그라나이트재의 다양한 응용은 전망있는 고부가가치형 기술집약 산업이라 할 수 있을 것이다.

따라서 우리나라가 국제 경쟁력있는 정밀공작기계의 양산체제를 구축하기 위해서는 에폭시-그라나이트재의 제조방법 및 응용에 많은 관심과 연구가 이루어져야 할 것이고, 축적된 연구결과들이 조속히 실용화 기술로 활용하여야 한다고 본다.

## 참고 문헌

- (1) Weck, M. and Hartel, R., "Design, Manufacture and Testing of Precision Machines with Essential Polymer Concrete Components", Precision Engineering, vol. 7, no. 3, pp. 165-170.

- (2) Morgan, G.H., Mckeown, P.A. and Renker, H. J., "Materials for Machine Tool Structure", Proc. 20th MTDR, pp. 429-434.
- (3) Mckeoun, P.A. and Morgan, G.H., "Epoxy Granite: A Structural Material for Precision Machines", Precision Engineering, Vol. 17, No.1, pp.37-39.
- (4) CMS mfg. co., "Epoxy Concrete - A New Improved Structural Materials for Production Machinery", Cranfield Research & Development LTD., 1996.
- (5) Vipulanandan, C., Dharmarajan,N. and Ching,E., "Mechanical Behavior of Polymer Concrete System", Materials and Structures, Vol.21, No.2, pp.268-277.
- (6) Bares,R.A., 1988, "Resin Concrete and its Applications to Large Diameter Sewer Pipes", ACI Publication SP.58, pp.41-74
- (7) Fritz Studer AG technical papers, 1986, "GRANITAN", pp.1-69.
- (8) Kane,J.F., 1999, "ANONITETM Design Manual", GANDALF Inc., pp.1-35.
- (9) Tsutsumi,M., Unno,K. and Yoshino,M., 1995, "New Material Applicaion to Ultra-Precion Lathe", Precision Machinery, Vol.13, No.1, pp.171-186.
- (10) 박종권, 김종호, 맹희영, 원시태, 박영일, 1991, "조정밀 가공기용 구조재의 개발연구", 90 '특정연구개발사업의 세부과제, UCN 365-1514C, 과학기술처, pp.1-167.
- (11) 김종호, 원시태, 맹희영, 박영일, 1990, "조정밀 가공기계 구조물용 에폭시-그라나이트재의 특성에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제7권, 제2호, pp.74-84.
- (12) 맹희영, 김종호, 박영일, 원시태, 1998, "Epoxy-Granite 복합재 연삭기 베드 구조물의 개발", 서울산업대학교-(주)진영정기, 공업기반기술과제보고서, 통상산업부
- (13) 이상곤, 박영일, 맹희영, 정성균, "에폭시-그라나이트재를 이용한 연삭기 베드의 설계 및 동특성 해석", 한국공작기계학회지, 제8권 제2호, 1999. 4, pp. 62~72.