

금속 보강재를 이용한 에폭시 수지형의 특성 향상 및 적용에 관한 연구

정성일*, 임용관*, 김경래*, 정해도#, 中川 威雄**

A Study on Characteristics Improvement of Epoxy Resin Mold Using Metal Fillers and Its Application

Sungil Chung*, Yonggwan Im*, Kyunglae Kim*, Haedo Jeong# and Nakagawa Takeo**

ABSTRACT

As the cycling time of new products have become more and more short in recent years, the demand for lowering the cost and reducing the production time becomes stronger. In order for the demand, the rapid prototyping and rapid tooling technology have been used. It has been widely known that RP technology has advantages with fabricating 3-D object having a complicated geometric shape. RP products, however, have a limitation with applying to the real die and mold because soft materials such as resin, paper and wax has been mostly used in RP technology. So in this paper, the RP products have been copied to semi-metallic soft tools using the mixture of metal fillers and epoxy resin. In order to evaluate the effect of the fillers on the characteristics of semi-metallic soft tools, three fillers are used including commercial aluminum powder, cast iron powder recycled by machining chips, and aluminum short fiber made by self-excited vibration technique. Besides, in the case of aluminum powder, the change of characteristics of semi-metallic soft tools is also tested according to the volume fraction of the powder.

Key Words : Rapid prototyping & tooling (쾌속 시제품 및 금형 제작), Semi-metallic soft tool (금속 보강재 함유 수지형), Metal fillers (금속 보강재)

1. 서론

3 차원 CAD 가 산업 현장에 널리 보급되면서, 쾌속 조형 기술을 이용하여 복잡한 형상을 갖는 시제품을 제작하는 공정이 널리 이용되고 있다. 그러나 현재 산업에 널리 쓰이고 있는 쾌속 시제품 제작 기술의 대부분은 광경화성 수지, 왁스 또는 종이와 같은 연질의 재료를 이용하기 때문에

실제 제품을 생산하기 위한 형으로 적용되기에는 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 이유에서 보급되어진 기술이 쾌속 금형제작(rapid tooling) 기술이다. 쾌속 금형제작 기술은 형을 제작하는데 쓰여진 소재에 따라 크게 소프트 툴링(soft tooling) 기술과 하드 툴링(hard tooling) 기술로 나뉘어진다^{1,2}. 현재까지 소프트 툴링 기술에서 가장 널리 사용되고 있는 소재로는 실리콘 고무와 금속 보강재

199 2002 년 7 월 29 일 접수
* 부산대학교 정밀기계공학과
교신저자, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소
hdjeong@pusan.ac.kr, Tel. (051) 510-2463
** Toyota Technological Institute

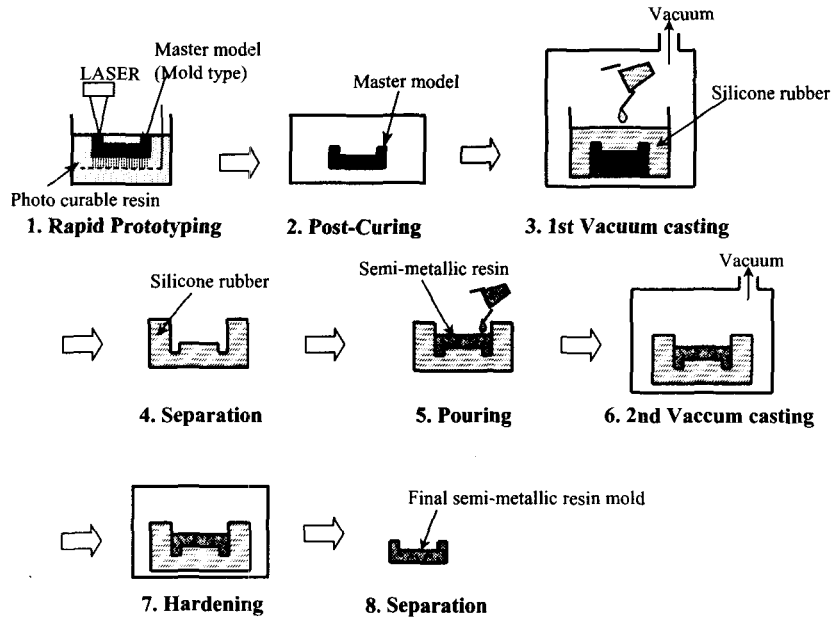


Fig. 1 Manufacturing process of semi-metallic soft tools

가 함유된 에폭시 수지이며, 하드 툴링 기술의 경우에는 알루미늄 같은 금속 소재가 주로 사용되고 있다. 본 논문에서는 금속 보강재 함유 수지형 (semi-metallic soft tool)의 특성을 평가하기 위해서 일반적으로 널리 이용되는 알루미늄 분말과 절삭 칩을 이용한 재생 주철 분말, 그리고, 자려진동 (Self-excited vibration)에 의해서 제작된 알루미늄 단섬유가 함유된 에폭시 수지형을 제작하였다. 또한 알루미늄 분말의 경우에는 에폭시 수지와 분말의 혼합비에 따른 특성을 함께 평가하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 산업에 적용 가능한 금속 보강재 함유 수지형을 제작하였다.

2. 전사공정

쾌속 금형제작 기술에서 금속 보강재 함유 수지형을 제작하기 위해서는 만들고자 하는 제품의 형상을 갖는 마스터 모델이 필요한데, 주로 광조형과 같은 쾌속조형 기술을 이용해 제작되어진다. 이러한 마스터 모델을 이용하여 금속 보강재 함유 수지형을 제작하는 공정을 Fig. 1에 나타내었다. 먼저, 광경화성 수지와 광조형(stereolithography) 장비를 이용하여 마스터 모델을 제작한다. 다음으

로, 광경화성 수지로 만들어진 마스터 모델을 이용하여 실리콘 고무형을 제작하게 되는데, 실리콘 고무형은 금속 보강재 함유 수지형을 만들기 위한 간이형으로 사용되어진다. 실리콘 고무형을 제작하는 순서로는, 우선 액상의 실리콘 고무를 경화제와 함께 잘 섞은 후, 마스터 모델 위에 붓고 진공 분위기에서 탈포시킨다. 충분한 탈포 후에 일정한 온도를 유지할 수 있는 건조로에서 경화과정을 거치게 되면 실리콘 고무형이 완성된다. 이렇게 해서 완성된 실리콘 고무형에 금속 보강재가 함유된 액상의 에폭시 수지를 경화제와 함께 잘 섞어 주입한 후, 일정 온도에서 일정 시간동안 경화시키면 최종적으로 금속 보강재 함유 수지형이 완성된다. 그런데 금속 보강재 함유 수지형을 제작하기 위한 전사공정은 3 단계와 4 단계의 두 가지 방법이 있다. 각 공정의 대략적인 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 먼저, 3 단계 공정은 마스터 모델이 금속 수지형 함유 수지형과 동일한 형태로 제작된 경우에 사용되어질 수 있고, 4 단계 공정의 경우에는 제품의 형상으로 제작되어진 마스터 모델을 이용하여 금속 보강재 함유 수지형을 제작하고자 할 때 사용된다. 4 단계 공정의 경우에는 실리콘 고무형을 이용하여 반대 형상을 갖는 실리콘

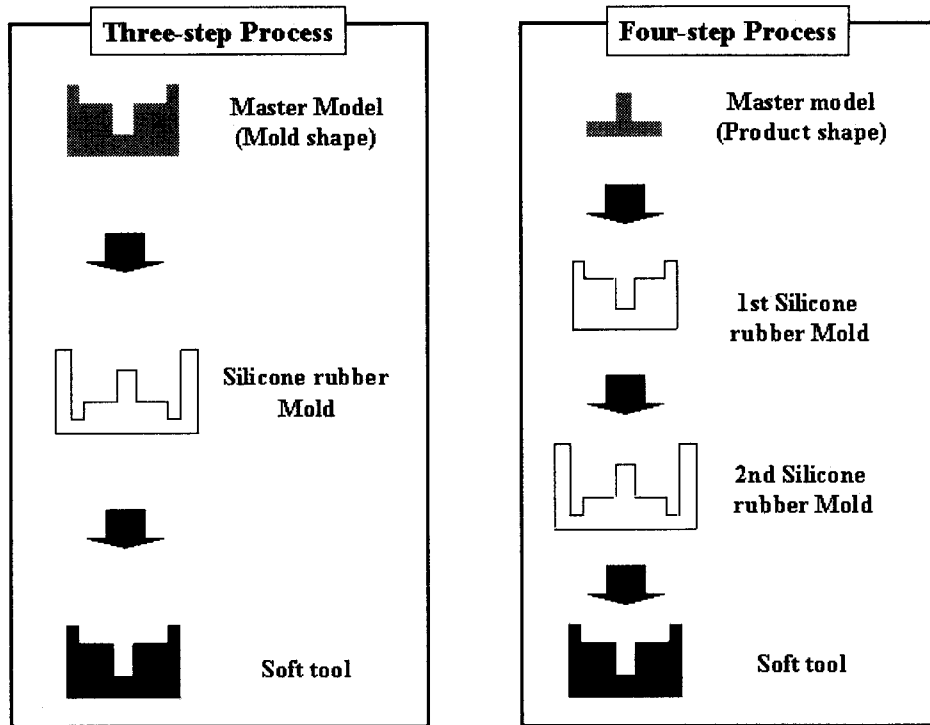


Fig. 2 Two types of transfer processes

고무형을 복제해내는 단계가 추가로 포함되는데, 이 때에 동일 재료인 실리콘 고무 상호간의 이형이 문제가 된다. 본 연구에서는 왁스 계열의 이형제를 이용하여 이러한 문제점을 해결하였다.

3. 금속 보강재의 제조

본 연구에서 사용한 보강재는 알루미늄 분말, 주철 분말, 알루미늄 단섬유의 세 가지 종류이다. 먼저 알루미늄 분말은 (주)창성에서 제조되어진 상용 분말이며, 평균입자의 크기는 $45\mu\text{m}$ 이고, 불규칙한 형상을 갖고 있다. 주철 분말은 (주)유진소재 산업에서 절삭칩을 분쇄하여 제조되어졌으며, 알루미늄 단섬유는 자려진동에 의해서 제작되어졌다.

3.1 재생 주철 분말의 제조

Fig. 3 은 재생 주철 분말의 제조 과정을 나타낸다. 재생 주철 분말에 사용되어지는 주원료는 각 공장에서 수거된 폐절삭칩이다. 폐절삭칩은 가

공중에 사용되어진 절삭유와 함께 여러 가지 불순물에 의해 오염이 된 상태이기 때문에, $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 열처리를 함으로써 그러한 오염물을 제거시켜야만 한다. 다음 공정은 분쇄공정으로서, 재생 주철 분말의 제조에 있어서 가장 중요한 공정이다. 그 이유는 동일한 폐절삭칩을 원료로 사용하더라도 분쇄 방법에 따라 전혀 다른 성질의 주철 분말이 얻어지기 때문이다.

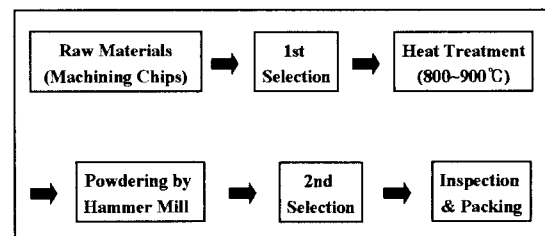


Fig. 3 Manufacturing process of recycled cast iron powder

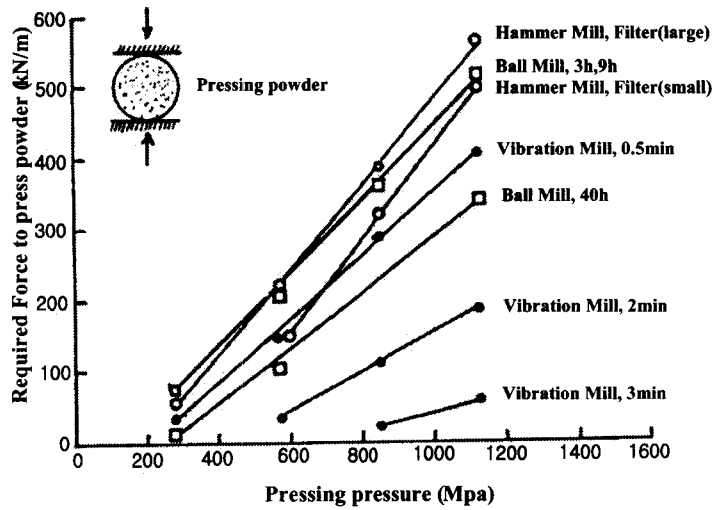


Fig. 4 Strength of pressed powder according to powdering method

Fig. 4 는 분쇄 방법에 따른 압분체 강도를 나타내는 그림이다³. 이 실험에서 진동밀(vibration mill), 볼밀(ball mill), 해머밀(hammer mill)의 세 가지 종류의 분쇄 방법이 사용되었다. 진동밀의 경우에는 분쇄시간에 관계없이 성형성이 좋지 못한 분말을 얻었다. 그러나 볼밀과 해머밀의 경우에는 성형성이 우수한 재생 주철 분말을 얻을 수가 있었다. 그러나 볼밀의 경우에는 분쇄 시간이 너무 길 경우, 성형성이 나쁜 분말을 얻게 될 수도 있기 때문에 해머밀에 의한 분쇄 방법이 가장 우수한 것을 알 수 있다. Fig. 5 는 본 논문에서 사용된 재생 주철 분말의 SEM 사진을 나타낸다.

3.2 알루미늄 단섬유의 제조

알루미늄 단섬유는 선반에서 Al 7075 봉재를 이용하여 제조되었다. 공구는 Fig. 6(a)에서 나타난 강성이 낮은 탄성 공구를 이용하였다. 이 탄성공구를 선반에 장착한 후 회전시키면 일정한 조건에서 자려진동이 발생하는데, 이러한 절삭조건에서 단섬유가 제조되어진다. 제조되어진 단섬유의 직경은 아래의 식을 따른다.

$$d = 1000 \frac{\sqrt{4Vs}}{\pi f}$$

이 식에서 d 는 제조된 단섬유의 직경(μm)을, V 는 절삭속도(m/s)를, s 는 절입량($\mu\text{m}/\text{rev.}$)을, f 는 공구의 주파수(Hz)를 각각 나타낸다. 이 값들 중에서 공구의 주파수는 공구의 제작 단계에서 결정되어지는 값이기 때문에 단섬유의 직경은 절삭속도와 절입량에 의해 결정되어진다. Fig. 6(b)는 절삭가공 동안에 칩과 단섬유의 생성영역을 나타낸다. 선반의 스피들의 속도와 알루미늄 봉재의 직경은 각각 1150rpm 과 130mm 이며, 절삭깊이는 4mm 로 하여 실험을 수행하였다. Fig. 6(c)는 단섬유가 생성되고 난 후에 알루미늄 봉재에 남은 진동흔적을 나타내는 사진이며, Fig. 6(d)는 제조된 알루미늄 단섬유의 사진을 나타낸다.

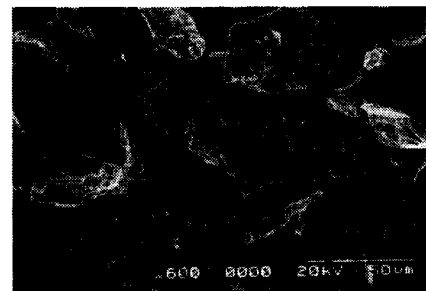
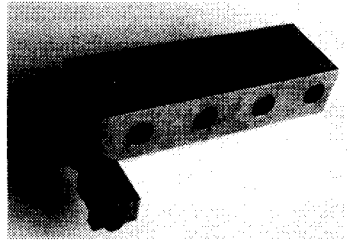
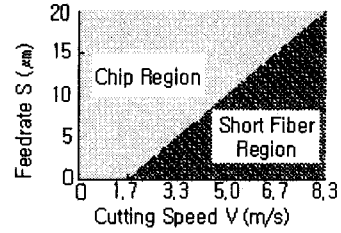


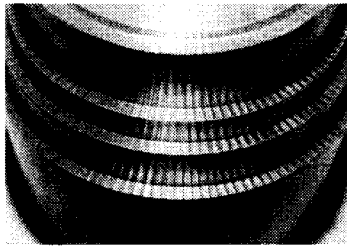
Fig. 5 Recycled cast iron powder



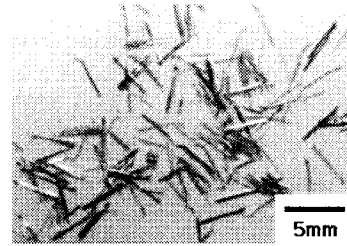
(a) Tool



(b) Short fiber formation region



(c) Chatter mark after getting the short fiber



(d) Aluminum short Fiber

Fig. 6 Production of Aluminum short fiber

4. 함유된 금속 보강재에 따른 수지형의 특성 평가

금속 보강재가 수지형에 미치는 영향을 평가하기 위해서 각각의 금속 보강재를 에폭시 수지에 함유시켜 금속 보강재 함유 수지 시편을 제작하였다. 본 실험에서 사용된 에폭시 수지는 열경화성으로서, 400cps의 점도값을 갖는다. 또한 알루미늄 분말을 이용한 실험의 경우에는 분말의 함유비에 따른 수지형의 특성을 평가하기 위해 20, 30, 40vol%의 알루미늄 분말을 에폭시 수지와 혼합하였다. 이렇게 제조되어진 슬러리를 AFR-20, AFR-30, AFR-40으로 명명하였다. 그런데, 40vol%이상의 알루미늄 분말을 함유시킨 슬러리의 경우, 점도가 매우 높기 때문에 슬러리의 제조뿐만 아니라 진공 주형시에도 많은 어려움을 야기시키다. 따라서 본 연구에서는 보강재의 함유량을 40vol%로 고정시켜 시편을 제작하였는데, 40vol%의 재생 주철 분말이 함유된 슬러리를 CIFR-40으로, 38vol%의 알루미늄 분말과 2vol%의 알루미늄 단섬유가 함께 함유된 슬러리를 AFR-fiber이라고 명명하였다.

4.1 치수 정밀도 (Dimension accuracy)

치수 정밀도의 평가는 90mm의 직경을 갖는

디스크 형태의 마스터 모델 직경과 그 마스터모델로부터 제작된 금속 보강재 함유 수지 시편의 직경을 디지털 캘리퍼스를 이용하여 각각 5회씩 측정 후 비교하였으며 다음의 식을 이용하였다.

$$\text{Shrinkage rate}(\%) = \frac{D_0 - D_1}{D_0} \times 100$$

D_0 : the diameter of master model

D_1 : the diameter of semi-metallic specimen

Fig. 7은 치수 정밀도의 결과를 나타낸다. 순수한 에폭시 수지를 이용해 제작된 시편의 경우, 가장 높은 수축률 값을 나타내며, 금속 보강재의 함유량이 높을수록 치수 정밀도의 값은 향상됨을 확인할 수 있다. 특히, 알루미늄 단섬유가 함유된 시편의 경우 가장 양호한 치수 정밀도를 나타냄을 확인할 수 있는데, 이는 단섬유가 분말보다 수지의 경화과정에서 발생하는 수축에 대한 저항이 높기 때문이다.

4.2 인장 강도 (Tensile strength)

인장강도는 MTS Sintech 20/G 장비를 이용하여 측정하였다. 측정속도는 2×10^{-5} m/s이며, 인장시편

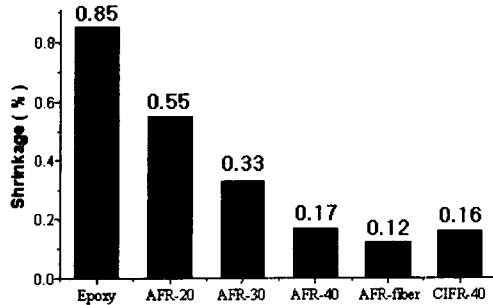


Fig. 7 Shrinkage according to the metal fillers

의 표점부에서의 직경과 길이는 각각 6mm 와 28mm 이다. 인장강도의 측정 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. Semi-metallic specimen 의 인장강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 에폭시 수지와 금속 보강재의 혼합과정에서 발생되어 경화 후에도 시편 내부에 잔존하는 기포이다. 결과에서도 알 수 있듯이 알루미늄 분말의 함유량에 따라서는 큰 변화가 없으며, 오히려 AFR-20 의 경우에는 순수한 에폭시로 제작된 시편보다도 더 낮은 인장강도 값을 갖는다. 그리고, 알루미늄 단섬유가 혼합된 시편의 경우, 섬유와 섬유사이의 공간에 기포가 함유된 채로 경화될 확률이 높기 때문에 인장강도가 가장 낮게 측정되었다. 반면에 재생 주철 분말의 경우, 알루미늄 분말보다 밀도가 높기 때문에 수지 내부에 존재하는 기포들이 용이하게 외부로 배출되어 가장 높은 인장강도 값을 가지게 된다.

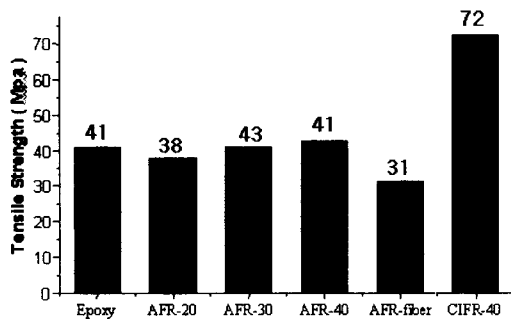


Fig. 8 Tensile strength according to the metal fillers

4.3 내마모성 (Wear resistance)

내마모성은 금속 보강재 함유 수지형의 수명을 결정짓는 매우 중요한 요소이다. Fig. 9 는 내마

모성 측정을 위한 핀과 디스크를 나타낸다. 핀은 각종 보강재가 함유된 에폭시 수지를 이용해 제작되었으며, 디스크는 스틸(S45C)로 제작되었다. 내마모성 평가는 영국의 Plint & Partner 사의 rotary tribometer 를 사용하였으며, 60rpm 으로 회전하는 스틸 디스크 위에 15 분 동안 200N 의 하중으로 핀을 문지름으로써 발생하는 마모의 양을 측정하는 방법을 이용하였고, 마모의 양은 다음의 식을 이용하여 얻었다.

$$\text{Amount of wear (cm}^3\text{)} = (M_1 - M_2) \rho$$

M1 : the mass of pin before test

M2 : the mass of pin after test

ρ : the density of semi-metallic resin

인장강도 평가의 결과와 마찬가지로 보강재의 함유량이 높을수록 내마모성이 향상됨을 알 수 있다. 특히 재생 주철 분말이 함유된 시편의 경우 다른 시편에 비해 확연히 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 내마모성 평가의 결과를 Fig. 10 에 나타내었다.

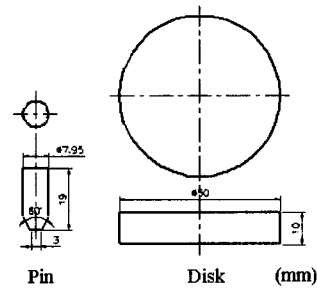


Fig. 9 Pin and disk for wear-resistance test

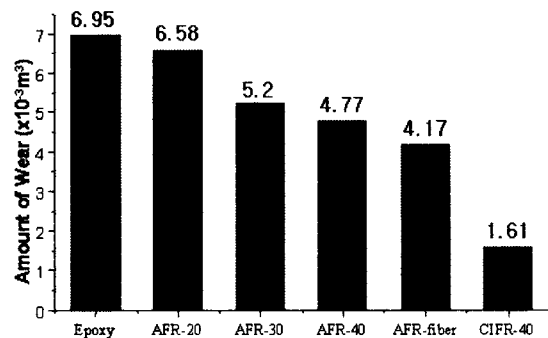


Fig. 10 Wear-resistance according to the metal fillers

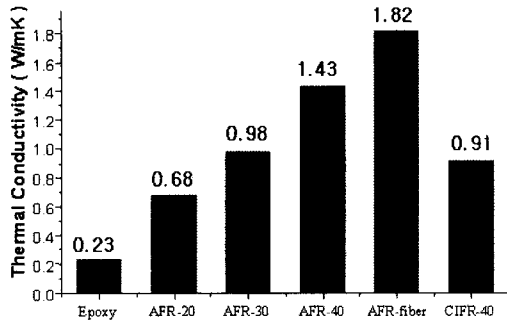


Fig. 11 Thermal conductivity according to fillers

4.4 열전도도 (Thermal conductivity)

열전도도는 몰딩(molding) 작업의 효율에 중요한 영향을 미친다. 왜냐하면, 높은 열전도도를 갖는 재료를 이용하여 제작되어진 형의 경우, 예열 및 냉각이 용이하여 작업 능률을 높일 수 있기 때문이다. 본 연구에서 열전도도는 비정상면 열원법(transient plane source)을 이용한 열원반(hot disk)법을 이용하였으며, 시편은 직경이 90mm 이고, 높이가 20mm 인 디스크 형상을 이용하였다⁵. 에폭시 수지는 열전도도가 매우 낮은 물질이지만, 수지에 보강재를 첨가함으로써 열전도도를 개선시킬 수 있었다. 특히, 알루미늄 단섬유는 시편 내부에서 서로 연결되는 양이 많기 때문에 열전도도 측면에서 탁월한 개선 효과를 얻을 수가 있었다. 그 결과를 Fig. 11 에 나타내었다.

5. 금속 보강재 함유 수지형의 적용

현재 현장에서는 알루미늄 분말이 함유된 수지형이 쾌속 금형제작 기술에 널리 이용되고 있는데, 치수 정밀도, 인장강도, 내마모성, 열전도도등에서 개선할 여지가 많이 남아있다. 그래서 본 연구에서는 재생 주철 분말, 알루미늄 단섬유 등 다양한 재료를 이용하여 보강재를 제조하여 금속 보강재 함유 수지형의 특성을 개선하였다. 특히 주철 분말이 함유된 에폭시 형의 경우, 인장강도와 내마모성에 탁월한 성능을 나타내었고, 알루미늄 단섬유와 알루미늄 분말이 함께 함유된 수지형의 경우, 치수 정밀도와 열전도도에서 효과를 발휘하였다.

5.1 주철분말 함유 수지형의 적용

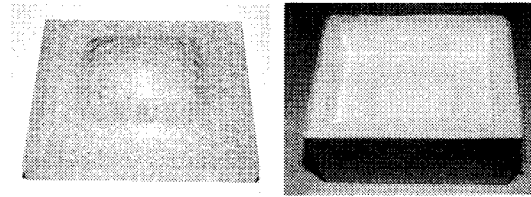


Fig. 12 Master model and silicone rubber



Fig. 13 Semi-metallic soft mold and results of CRT forging test

CRT(Cathode-Ray Tube)는 반응용 상태의 유리를 이용한 성형(forging) 공정을 통해서 제작된다. 그러나 제품의 개발 공정 중, 성형 공정의 시뮬레이션 단계에서 스틸 재질의 실제 금형을 제작할 필요는 없다. 따라서 그런 경우에 금속 보강재 함유 수지형이 유용하게 사용되어질 수 있다⁶. 특히 이러한 성형성 평가를 위한 시뮬레이션에서는 강도나 내마모성과 같은 기계적 특성이 매우 중요하기 때문에 주철 분말이 함유된 에폭시 수지형이 유용하게 사용되어질 수 있다. Fig. 12 는 CRT 성형성 평가를 위한 수지형의 제작을 위해서 사용된 마스터 모델과 실리콘 고무형을 나타내고 있으며, Fig. 13 은 플라스틱인(plasticine)을 이용한 CRT 다이의 성형성 평가를 위해 제작된 수지형 및 그 성형성 평가 결과를 나타낸다.

5.2 알루미늄 분말 및 단섬유 함유 수지형의 적용

정밀주조(investment casting) 공정은 금속 제품의 양산 및 시제품 제작에 적합한 공정이다. 그러나 왁스 패턴의 양산 금형은 정밀주조 공정을 쾌속 시제품제작 기술에 적용하는데 있어서 중요한 장애물이 되어왔다. 그래서 본 연구에서는 금속 보강재 함유 수지형을 이용하여 왁스를 제작할 수 있는 형을 제작해 보았다. 특히 왁스 패턴의 제작에 있어서는, 열전도도가 작업 능률에 막대한 영향을 끼치게 되므로 알루미늄 분말과 단섬유가 함

유된 에폭시 수지를 이용하여 왁스 패턴 제작에 필요한 형을 제작하였다. Fig. 14 는 광조형기술을 이용해 제작된 권총 부품의 마스터 모델과 실리콘 고무형을 나타내고 있으며, Fig. 15 는 그 마스터 모델을 이용해 제작된 알루미늄 분말 및 단섬유 함유 수지형과 그 형을 이용해 제작된 왁스 패턴을 함께 나타낸다.

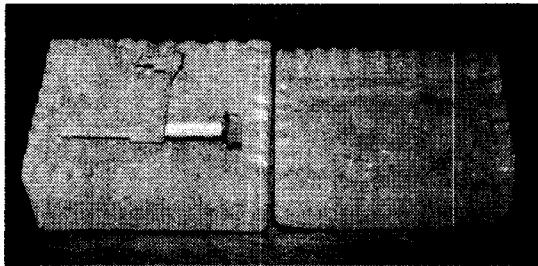


Fig. 14 Master model and silicone rubber mold

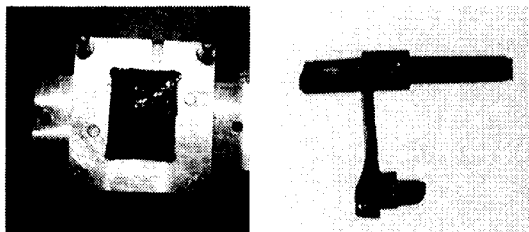


Fig. 15 Semi-metallic soft mold and wax pattern of pistol part for investment casting

6. 결론

본 연구에서는 금속 보강재 함유 수지형의 특성에 있어서 금속 보강재가 미치는 영향에 대한 평가를 수행하였다. 결과를 정리해 보면 다음과 같다.

- 알루미늄 분말의 양이 많을수록 금속 보강재 함유 수지형의 치수 정밀도, 내마모성 및 열전도도 값은 향상됨을 알 수 있었다. 30Vol%의 함유량과 40Vol%의 함유량을 비교해 볼 때, 40Vol%를 함유시킨 시편이 치수 정밀도에 있어서는 0.16% 향상되었고, 마모량에 있어서는 $0.6 \times 10^{-3} \text{m}^3$ 감소되었으며, 열전도도에 있어서는 0.45W/mK 향상됨을 알 수 있었다. 그러나 보강재의 함유량을 40Vol% 이상으로 높일 경우, 슬러리의 점도가 높아져서 에폭

시와 알루미늄 분말의 원활한 혼합이 불가능하였고, 또한 슬러리의 높은 점도는 실리콘 고무형으로의 주입 과정에 있어서도 많은 문제점을 야기시킨다. 특히 인장시편과 같은 비교적 얇은 부분을 갖는 시편의 경우에는 40Vol% 이상의 함유량을 가진 슬러리를 이용해서는 성형이 불가능함을 확인하였다.

- 재생 주철 분말 및 알루미늄 단섬유를 혼합하여 금속 보강재 함유 수지형을 제작함으로써 알루미늄 분말 혼합 수지형의 문제점을 해결하고자 하였다. 주철 분말이 혼합된 수지형의 경우, 인장강도와 내마모성과 같은 기계적 특성에 탁월한 효과를 보였으며, 알루미늄 단섬유와 알루미늄 분말을 함께 혼합하여 제작한 수지형의 경우에는 치수 정밀도와 열전도도의 측면에서 만족할 만한 효과를 나타냄을 알 수 있었다.

- 주철 분말을 혼합하여 만든 에폭시 수지형은 CRT 다이의 개발단계에서, 성형 공정의 시뮬레이션에 적용되었고, 알루미늄 분말과 단섬유를 혼합하여 만든 에폭시 수지형은 권총 부품의 정밀주조 공정에 있어서 왁스 패턴의 제작을 위한 형에 적용되었다.

이러한 향상된 특성을 갖는 금속 보강재 함유 수지형의 경우 패속 금형제작 기술의 적용 범위를 넓히는데 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구에 사용된 주철 분말의 제조에 힘써 주신 (주)유진소재산업 관계자 여러분과 에폭시 수지와 관련하여 많은 도움을 주신 (주)일범상사 관계자 여러분들께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. Peter, D. H., Paul, F. J. "Rapid Tooling - Technologies and Industrial Application," Marcel Dekker, INC., 2000.
2. Nakagawa, T., "Rapid Prototyping in Japan," Proceedings of the Eighth International Conference on Rapid Prototyping, pp. 1-16, 2000.

3. Hanawa, K., Nakagawa, T., " Powder metallurgy of cast iron", Manufacturing Research, Vol. 36, No. 3, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, p. 79, 1984.
4. Tlustý, J., Smith, S. and Zamudra, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517-521, 1990.
5. Richards, J. D., "Transient method for measuring thermal conductivity," IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 4, No. 1, p. 23, 1988.
6. Cha, D. J., Cho, J. R., Bae, W. B., Hwang, N. C., "A study on the development of cathod-ray tube die using hot forging," Trans. Mater. Process, Vol. 9, No. 1, p. 23, 2000.