

본 연구는 ERC/NSDM(정밀정형 및 금형가공연구소)의 국제공동연구로 수행되었으며 이에 감사 드립니다

## 급속금형제작 (1); 분말주조에 의한 정형(正形)에의 도전

임용관\*, 김범수\*, 정해도\*\*, 배원병\*\*

### Rapid Tooling : Challenge to Net Shape by Powder Casting

Yong-Gwan Im\*, Beom-Su Kim\*, Hae-Do Jeong\*\*, Won-Byung Bae\*\*

#### ABSTRACT

The business of manufacturing is increasingly becoming time-compressing, precise and long-life oriented, owing to various needs from the consumers and harsh global competition. With the emergence of the layer laminate manufacturing method, it is possible to produce prototypes directly from 3D CAD and additive process, the production time and cost have shortened dramatically. However there are some problems like surface-step, dimensional deviation and warp. A newly developed powder casting is suitable for rapid-manufacturing metallic tools. Powder casting can serve as a promising rapid tooling method because of high density characteristics and low dimensional shrinkage below 0.1% during sintering and infiltration. By this process, we have realized significant time savings bypassing the wait for prototype tooling and cost savings eliminating the expense of conventional prototype tooling process.

**Key Words** : layer laminate manufacturing(적층조형), surface-step(표면단차), powder casting(분말주조), rapid tooling(급속금형제작), dimensional shrinkage(치수수축오차), sintering(소결), infiltration(용침), prototype tooling(시작금형제작)

#### 1. 서론

오늘날의 산업계는 소비자의 다양한 욕구에 따라 소량의 다양한 제품이 생산되며 그에 따라서 제품의 사이클은 점점 짧아지고 디자인 또한 빠르게 변화하고 있어서 제품 개발에서 가장 큰 비중을 차지하는 시작모형제작과 시작금형제작을 비롯하여 궁극의 양산금형 제작의 비용과 시

간을 가능한 한 단축하지 않으면 안되게 되었다. 이러한 이유로 최근 국내에 여러 가지의 RP(Rapid Prototyping)를 통한 시작모형제작공정과 RPM(Rapid Prototyping & Manufacturing)기술이 도입되어 활발히 연구가 이루어지고 있다. RP에는 SL(Stereo Lithography), LOM (Laminated Object Manufacturing), FDM(Fused Deposition Method) 등의 급속시작모형

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부

의 제작기술이 있으며, RPM기술로서는 궁극적인 금형으로서의 강도도 가질 수 있는 SLS(Selective Laser Sintering), LENS(Laser Engineered Net Shaping), 3-D Keltool, Rapid Tool 등의 공정이 있다. <sup>(1),(2)</sup>

그러나 양산금형제작 공정에서의 RPM기술은 미국과 유럽에서는 가전회사를 중심으로 활발히 시도되고 있으나 현재 국내에서는 일부 회사와 연구소에서 제한적으로 시도되고 있을 뿐이다. 실제 현장에서는 초단납기의 양산금형의 경우 최근 도입된 여러가지 Rapid Tooling기술보다 금형을 고속절삭하는 절삭형에 의존하고 있다. 이것은 SLS, 3-D Keltool, Rapid Tool 등의 공정이 직접 분말을 녹여 그 공극에 동용침(Cu Infiltration)을 행하거나 분말 또는 메탈-폴리머 분말의 공극을 동용침하는 소결공정에서 생기는 3 ~ 4%의 치수오차와 뒤틀림 등의 형상오차에 의한 근본적인 한계 때문이다. <sup>(2)</sup>

이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 RPM의 일환으로서, 마스터모형을 이용하여 실리코 고무형을 제작하고, 그 고무형에 분말을 넣고 바인더를 함침시켜 대기중에서 건조 후 소결과 용침공정을 적용하여 높은 형상정밀도와 밀도를 가진 급속금형 제작기술을 개발하였다. 기존의 공정들이 평균분말직경이 같은 한가지 종류의 분말을 사용하는데 반해, 직경이 다른 두가지 종류 이상의 분말을 사용하고, 분말충진시와 바인더 함침후에 진동을 도입하여 충전율을 높이는 등 새로운 분말주조(Powder Casting)공정에 의해 정형(正形 : Net Shape)을 실현할 수 있는 급속금형제작기술을 확립하였다.

## 2. 분말주조의 공정

Fig. 1은 분말주조에서 사용된 마스터모델의 외관과 치수를 보여 주고 있으며 본 프로세스를 통해서 최종적으로는 골프공의 사출성형용 금형으로 사용하고자 하는 것이 목적이다. 본래의 마스터모델은 3-DCAD(Pro/Engineer)에서 3차원 형상을 모델링한 다음 STL파일로 변환

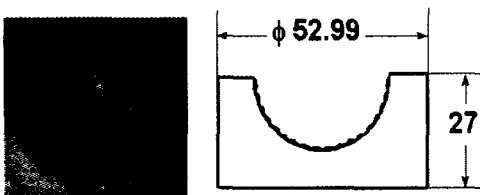


Fig. 1 금형의 외관과 치수

하여 골프공형의 마스터모델을 SL(Stereo Lithography)로 제작하였으나 그림에서 보는 것처럼 항력을 줄이기 위한 유체역학적인 이유로 dip의 깊이가 아래로 갈수록 작아지며, dip의 직경도 매우 작기 때문에 조형시 발생하는 계단모양(Step Mark)을 상사하기가 매우 어렵다. 따라서 본 실험의 마스터모델은 정확한 치수측정을 위하여 부득이 하게 절삭형을 이용하였다.

Fig. 2는 분말주조의 전체적인 프로세스를 개략적인 그림으로 나타내고 있다. 먼저 금형형태의 마스터모형을 이용해 실리코 고무를 진공상태에서 공기를 탈포시켜 실리코 고무형을 만든다. 급속분말을 실리코 고무형에 충전시키고, 구형의 분말을 실리코 고무형에 진동을 가하면서 충전한다. 이때의 급속분말은 입자크기가 서로 다른 스테인레스분말을 같이 혼합하여 밀도를 높이도록 하였다. 실리코 고무형에 충전된 분말과 결합제를 진공주형기 속에 넣은 뒤 진공상태로 두어 분말사이의 공기와 바인더에 용해되어 있는 공기를 탈포시킨다. 진공상태에서 바인더를 분

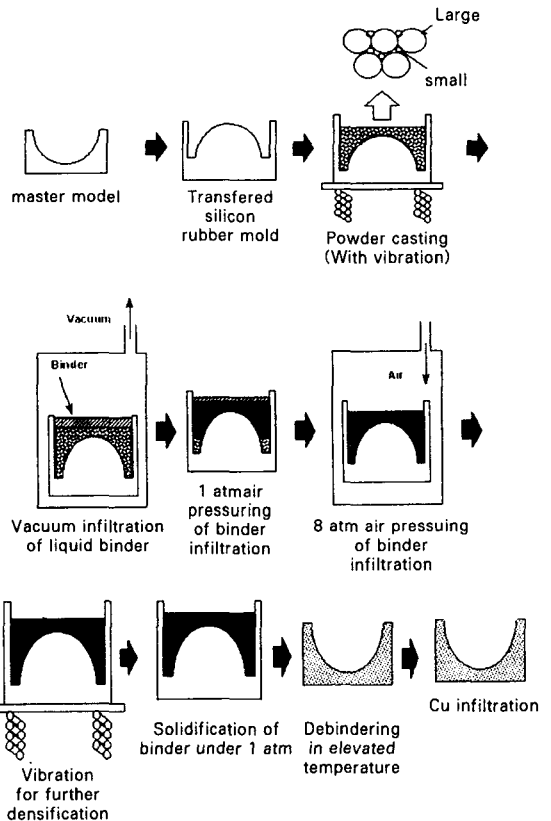


Fig. 2 분말주조의 전체 프로세스

말이 들어 있는 실리코고무형에 주입한 다음 대기중에서 바인더를 침투시키고, 다시 8기압 하에서 다시 한 번 더 침투시킨다. 가압한 다음 다시 진동을 주어 분말의 충전 밀도를 높일 수 있도록 하였다. 2회 째의 진동이 끝나면 대기압 하에서 약 15시간 정도 바인더가 굳을 수 있도록 건조시킨다. 건조 후 고온에서 바인더를 태우고, 분말에 함께 혼합되어 있던 구리분말을 액상소결한 다음, 구리용 침을 통하여 최종의 금형을 얻게 된다.

### 3. 두가지 종류의 혼합분말의 실험

#### 3.1 분말주조(Powder Casting)에 사용된 분말과 바인더

본 실험에서는 파우더의 밀도를 높이기 위해서 Table 1과 같이 Atomized process로 만들어진 일반 스테인레스 분말과 스테인레스 미분말 두 가지 입도의 구형분말을 사용하였다

바인더는 높은 밀도의 분말에 효과적으로 침투할 수 있도록 되도록이면 낮은 점도의 바인더를 쓰는 것이 바람직하며, 또한 디바인딩(debinding)시 금형의 형상변화를 일으키지 않아야 한다. Table 2에 나타낸 점도 100 CPS/25℃의 수용성 페놀 바인더를 사용하였으며, 바인

Table 1 분말의 종류와 평균 입자직경

	평균입자직경 ( $\mu\text{m}$ )	충진율 (vol%)
A: Large size (Stainless steel)	66	61
B: Small size (Stainless steel)	5	39
A(82.5%) + B(17.5%)	-	67

Table 2 실험에 사용된 바인더의 사양과 혼합비

바인더	Type (제조회사)	혼합비율 (vol%)
수용성 페놀	Chem Rez 630 HSL (Ashland Chemical Company, USA)	45
경화제	Chem Rez 6016 (Ashland Chemical Company, USA)	10
물		45

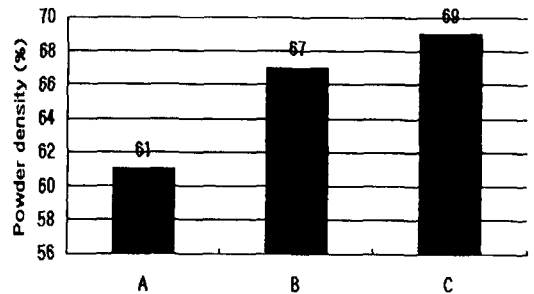
더 그대로 분말에 혼합하여 사용할 수도 있으나 본 실험에서는 물에 1:1의 비율로 희석하여 사용하였다. 물의 희석비율은 바인더의 점도를 변화시키며 점도는 바인더의 분말에의 침투성에 큰 영향<sup>(3)</sup>을 미친다.

#### 3.2 테이블 진동에 의한 밀도의 증가

##### 3.2.1 바인더 침투후의 진동

금속분말을 이용한 금속금형제작에 있어서, 금형의 밀도와 치수정밀도와 관계가 깊은 것은 제작과정에서의 분말의 밀도 때문이다. 분말입자간의 접촉이 긴밀하여야만 높은 분말의 밀도를 얻을 수 있고, 후공정에서의 치수제어가 가능하기 때문에 본 실험에서는 바인더를 혼합함에 있어서 기존의 습식 슬러리카스팅(Wet-type slurry casting)형태가 아닌 건식(Dry-type)을 채택함으로써 높은 충전밀도를 얻을 수 있었다.

충진밀도의 향상과 고른 충진을 위해서 첫번째 진동은 파우더를 채운 실리코고무형에 주었으며, 두번째 진동은 액상의 바인더를 혼합분말에 침투시킨후 가한다. Fig.3에서와 같이 분말의 밀도가 변화하는 것을 알 수 있다. 그림에서 보면 바인더함침 후 두번째 진동에 의하여 분말의 충전밀도가 2% 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 분말사이에 침투한 바인더의 Thixotropic Behavior(유체에 일정한 전단응력을 가할 때 점성계수가 시간에 따라 감소하는 현상)에 의해 바인더의 점성이 떨어지면서 분말사이의 마찰력 감소로 인하여 분말의 접촉각을 줄임으로서 Fig.4에서 보는 것과 같이 결과적으로 충전밀도가 향상되는 것으로<sup>(4)</sup> 사료된다.



A : 일반분말(65 $\mu\text{m}$ ) + 진동  
 B : 일반분말(65 $\mu\text{m}$ ) + 미분말(5 $\mu\text{m}$ ) + 1st 진동  
 C : 일반분말(65 $\mu\text{m}$ ) + 미분말(5 $\mu\text{m}$ ) + 1st 진동  
 ⇨ 바인더 함침 + 2nd진동

Fig. 3 진동에 의한 분말밀도의 변화

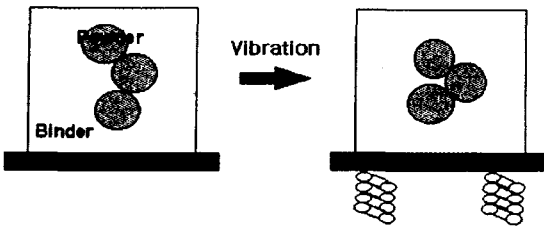


Fig. 4 바인더의 Thixotropic Behavior

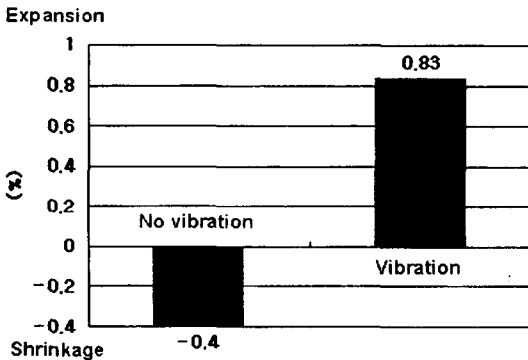


Fig. 5 진동에 의한 형상치수의 변화(동용침 후)

### 3.2.2 진동에 의한 형상치수의 변화

Fig.5에서 바인더 침투 후 진동을 가하지 않은 형은 동용침 후 치수변화가 0.4% 수축하는데 반해 진동을 가한 형은 0.83% 팽창하는 것을 알 수 있다. 진동을 가하지 않은 것은 분말밀도가 높지 않아 건조, 디바인딩시 크게 수축하여 동용침시 구리의 침투로 인하여 팽창함에도 불구하고 결과적인 최종치수가 수축으로 나타났다. 진동을 가한 것은 분말의 충전밀도가 높기 때문에 건조, 디바인딩시 크게 수축하지 않았기 때문에 동용침시 구리의 침투로 최종치수가 팽창하는 것으로 나타났다.

### 3.3 두 종류의 분말에 의한 실험결과

Fig.6에서는 두가지 종류의 평균입자지름을 갖는 혼합 분말을 사용하는 경우의 프로세스 단계별 형상치수의 변화를 측정하여 나타내었는데, 대기중 건조와 디바인딩의 공정에서는 형상치수변화가 그다지 크지 않지만 마지막 단계인 동용침 시 상당한 정도의 형상치수변화가 일어남을 알 수 있다. 이것은 분말 충전시에 스테인레스 분말입자 사이의 간격이 테이블진동에 의하여 상당히 조밀하였다가, 동용침시 모세관현상에 의하여 액상의 동이 스테인

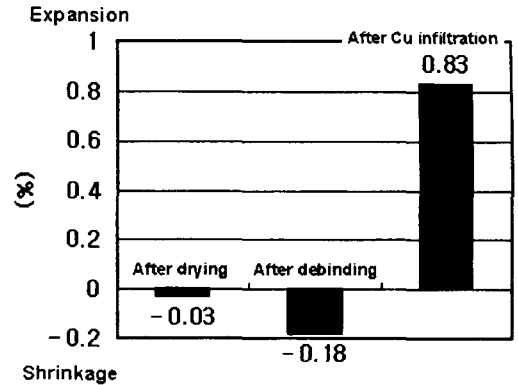


Fig. 6 각 공정단계별 치수변화

레스분말의 입자 사이에 침투하면서 분말입자사이의 간격을 넓히기 때문이라고 생각된다.

결과적으로 0.83%의 비교적 높은 치수오차를 달성하였으나, 치수오차를 좀더 개선하기 위하여 두가지 혼합분말에 동미분을 다시 혼합하여 세가지 혼합분말을 사용하는 실험을 계속하였다.

### 4. 세 종류의 혼합분말(동분말의 첨가)에 의한 실험

앞에서 언급했듯이 동용침시 형상의 치수가 증가한다는 사실로부터, 사용되는 재료나 공정을 적절히 조절함으로써 최종적인 형의 치수제어가 가능하게 됨을 알 수 있다. 분말의 밀도를 조절함으로써 동용침후 치수오차를 줄이기 위해서 예를 들면 디바인딩의 과정에서 사라지는 분말을 혼합한다든지 하는 등의 여러가지의 방법적인 시도가 이루어졌다. 본 실험에서는 혼합 스테인레스분말 중에서 18 wt%의 스테인레스 미분말 대신에 평균입자직경 10 $\mu$ m의 순수 동분말과 스테인레스 미분을 5 : 5의 비율로 혼합하여 사용하였으며 그 조성은 Table 3에 나타내었다.

이러한 순수 동분말을 혼합하여 형을 제작하고 각 단계 마다의 치수변화를 편의상 수축은 (-), 팽창은 (+)로 하

Table 3 동미분 첨가시의 혼합분말의 조성

재료명	중량비율(wt%)	체적비율(vol%)	중량(g)
SUS(65 $\mu$ m)	82	83.2	492
SUS(5 $\mu$ m)	9	9.1	54
Cu(10 $\mu$ m)	9		7.66

Table 4 직경치수의 변화

직경방향 4곳 번호	1	2	3	4	평균
건조 수축률 (%)	-0.17	-0.23	-0.23	-0.25	-0.22
Debinding 수축률 (%)	-0.53	-0.54	+0.53	-0.52	-0.53
내부용침 팽창률 (%)	+0.42	+0.43	+0.48	+0.37	+0.42
용침 팽창률 (%)	+0.2	+0.3	+0.24	+0.27	+0.26
전체수축률 (%)	-0.02	-0.04	-0.04	-0.13	-0.07

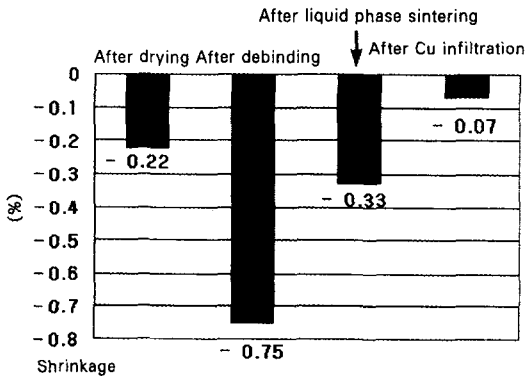


Fig. 7 동분말 혼합에 의한 형상치수의 제어

Table 5 분말의 종류에 따른 형의 표면 거칠기

A	일반 SUS분말(65 $\mu$ m) + SUS 미분말(5 $\mu$ m)	Rmax	13( $\mu$ m)
		Rz	9
		Ra	2.2
B	일반 SUS분말(65 $\mu$ m) + SUS 미분말(5 $\mu$ m) + 순수동분말(10 $\mu$ m)	Rmax	6.5( $\mu$ m)
		Rz	4
		Ra	0.9

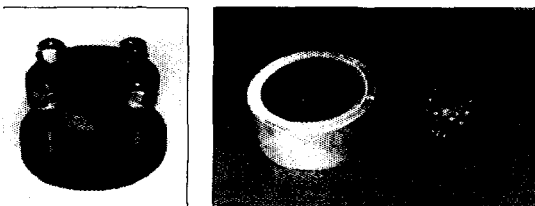


Fig. 8 분말주조로 제작된 사출금형과 사출제품

여 Table 4에 나타내었다. 건조와 디바인딩 공정에서는 각각 0.22%와 0.53%의 수축이 일어남을 알 수 있고, 분말중에 포함된 순수 동분말을 액상소결(liquid phase sintering)하는 과정에서 0.42%의 팽창이 일어났으며, 마지막 동용침공정에서는 0.26%의 팽창이 일어남으로서 결과적으로 골프공 형의 치수변화를 0.07%의 수축으로 제어 할 수 있었다.

Fig.7에서는 이 치수오차 데이터를 각 공정 단계마다 누적하여 나타내었다. Table 5에서 보는 바와 같이 두가지 분말을 사용하여 제작한 금형의 표면의 거칠기가 Rmax 13 $\mu$ m였으며, 순수동분말을 혼합하여 제작한 형의 표면거칠기가 Rmax 6.6 $\mu$ m로 나타나, 동분말을 첨가함으로써 표면거칠기도 상당히 개선됨을 알 수 있다.

### 5. 결 론

복잡한 자유곡면의 형상이나, 일반적인 절삭이나 연삭의 방법으로는 가공하기 어려운 형상을 가진 금형의 경우, RP를 이용한 급속금형제작은 본래 취지인 시간적인 그리고 비용적인 측면의 장점뿐만이 아니라 제거가공이 아닌 부가가공이라는 제작상의 장점 또한 가지게 된다. 그러나 현재까지 RP(Laser lithography, LOM, FDM 등)에 의해 제작된 모델을 전사시켜 급속금형제작(3-D Keltool Process)을 시도하거나, 직접식 급속금형제작(SLS, Rapid Tool)에 의한 급속금형제작(Rapid Tooling)은 금형으로서의 강도나 치수정도에 있어서 수축이나 변형 등으로 인하여 절삭, 연삭 등에 의한 제거가공에 비하여 치수정밀도가 뒤떨어지는 것은 사실이다.

본 연구에서 개발한 분말주조법에 의한 통해서 RP를 이용한 급속금형제작을 시도함에 있어서 급속금형제작은 기존 방법의 시간적, 비용적인 장점을 유지하면서, 기존의 한가지 입도의 분말을 쓰는 대신에 두가지 입도의 스테인레스 분말을 사용하거나 다시 그 혼합분말에 순수 동분말을 첨가하여, 최종 금형의 표면조도의 향상과 함께 치수변형을 0.1% 이하로 제어함으로써 앞에서 지적한 치수정밀도의 문제를 상당히 개선할 수 있었다. 또한 기존 Rapid Tool이나 3-D Keltool의 프로세스가 바인더와 분말을 혼합하여 충전하는 습식의 슬러리 타입을 채택하고 있는데 반해 본 연구의 분말주조(Powder Casting)에서는 분말을 충전하고 바인더를 함침시키는 건식을 채택하여 작업성을 향상시켰고, 분말 충전시와 바인더 침투 후 진동을 가함으로써 분말의 충전밀도를 높여 금형

의 강도와 치수정밀도를 향상시킬 수 있었다. Fig.8은 본 논문의 분말구조를 통해서 제작한 사출금형과 사출제품을 나타낸다.

본고 이후의 향후 연구에서는 금형표면의 코팅과 다양한 분말재료의 시도를 통한 금형의 금속조직의 개선을 통한 금형강도의 개선과 현재 주로 사포나 블라스터로 이루어지고 있는 금형 표면처리공정의 개선을 통하여 절삭금형에 비하여 떨어지는 양산금형으로서의 강도와 정밀도의 향상에 대하여 연구를 계속할 계획이다.

### 참 고 문 헌

1. 中川成雄, 丸谷洋二, "積層造型 システム," 工業調

査會, 1997.

2. 이관행, "제 2회 쾌속조형 및 금형기술혁신 심포지움," 한국과학기술원 금형기술혁신연구센터, pp 38 ~ 48, 1997.
3. Takeo Nakagawa, Hirouki Noguchi, "Rapid Prototyping of Fine Ceramics - Slurry Casting Using Silicon Rubber Mold," Research on Slip Castings Using Rubber Molds, Proceedings of 10th Rapid Prototyping Symposium, pp. 17 -18, 1997.
4. Frank M White, "Fluid Mechanics," Mcgraw-Hill Kogakusha, 1989.