

쾌속금형제작을 위한 진공주형과 동용침 분말주조기술에 관한 연구

임용관* · 정성일* · 정해도**
*부산대학교 대학원 정밀기계공학과
**부산대학교 기계공학부

Study on Vacuum Casting and Cu Infiltration Powder Casting for Rapid Tooling

Im Yong-Gwan*, Chung Sung-Il* and Jeong Hae-Do**

*Graduate School of Precision Mechanical Engineering, Pusan National University

**Department of Mechanical Engineering, Pusan National University

San 30 Changjeon-dong Kumjeong-gu Pusan, 609-735, Korea

(Received April 10, 2000)

Abstract With the emergence of the 3D CAD, it is possible to create a physical part directly from a digital model by accumulating layers of a given material. The technology is being widely used for checking designs, to create master models for rapid tooling, and for reverse engineering. However, in general, a model created by rapid prototyping technology is made of soft material that cannot be used as mass production hard tool. 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. Through this process, we have realized significant time and cost savings eliminating the expense of conventional prototype tooling process.

1. 서 론

1.1 쾌속조형(Rapid prototyping, RP)

기업에서 제품의 시장투입 과정에 있어서 시간적인 병목현상은 제품형상을 체크하기 위한 프로토타입 제작에 있었으나, 3차원 CAD(Computer Aided Design) 시스템이 보급되면서 설계에 소요되는 작업

들이 현저히 합리화된 지금, 쾌속조형기술을 이용하여 프로토타입(prototype)을 빠르게 제작함으로써 그 병목현상은 상당히 개선되었다. 그림 1에는 3차원 CAD로부터 쾌속조형기기가 인식할 수 있는 STL(Stereolithography)파일로 변환하여 각층을 적층하여 프로토타입을 제작하는 과정을 나타내었다. 이러한 3차원의 프로토타입 구조물을 제작하는 방법에는 사용

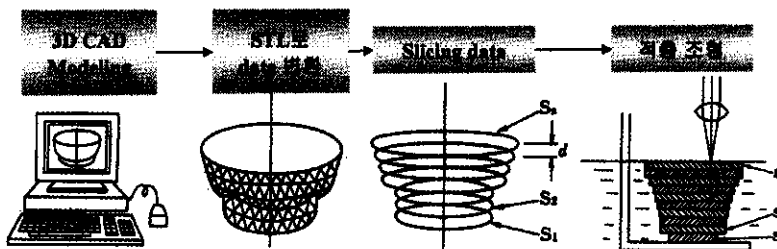


Fig. 1. Data process of rapid prototyping.

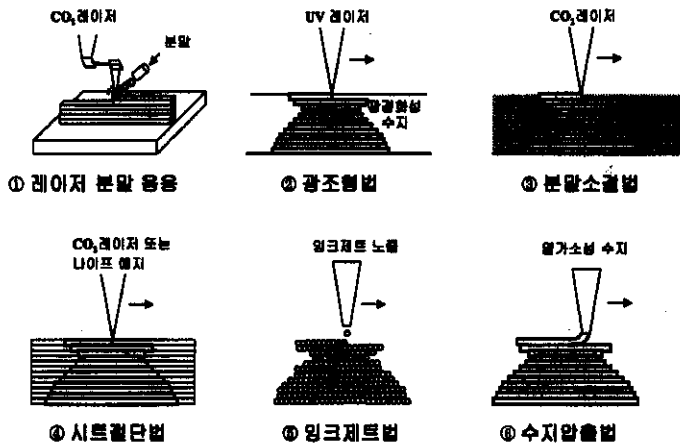


Fig. 2. Concept of various rapid prototyping method.

하는 재료와 에너지원에 따라 여러 가지가 있으나 대표적으로는 미국의 3D Systems사의 SLA장비에서 채택하고 있는 광조형(Laser lithography)법, Stratasys사의 FDM(Fused Deposition Method)장비에서 채택하고 있는 수지압출법, 분말을 고출력의 CO₂레이저로 소결하는 DTM사의 SLS(Selective Laser Sintering)법 등이 있으며 각각의 방법의 개념을 그림 2에 나타내었다. 이러한 쾌속조형으로 제작된 프로토타입은 기존의 가공방법으로는 어렵거나 불가능한 형상을 빠른시간에 제작할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있는 한편, 사용할 수 있는 소재가 제한되어 있어 강도나 치수정밀도, 가격, 제작수량 등의 한계를 지니고 있다.

복잡한 자유곡면의 형상이나, 일반적인 절삭이나 연삭의 방법으로는 가공하기 어려운 형상을 가진 금형의 경우, RP를 이용한 쾌속금형제작은 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 쾌속금형제작(3-D Keltool Process)을 시도하거나, 직접식 쾌속금형제작(SLS, Rapid Tool)에 의한 쾌속금형제작(Rapid Tooling)은 금형으로서의 강도나 치수정도에 있어서 수축이나 변형 등으로 인하여 절삭, 연삭 등에 의한 제거가공에 비하여 치수정밀도가 뒤떨어지는 것은 사실이다. 따라서 본 논문에서는 분말주조(Powder casting)공정을 이용하여 금형을 제작하여 제작시간을 단축하고, 기존의 쾌속금형 제작공정보다 향상된 치수정밀도를 달성할 수 있는

쾌속금형제작공정을 제시하였다.

1.2 쾌속금형제작(Rapid tooling) 공정

앞에서 지적한 바와 같이 쾌속조형공정에 의하여 제작된 파트는 제품개발단계에서 의사결정을 빠르게 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 프로토타입을 빠르게 제작할 수 있다는 장점에만 그치고 금형제작 공정은 기존의 금형제작 공정을 그대로 수행한다면, 디자인결정에서 양산에 이르는 전체 제품개발기간이나 비용이 크게 줄어들지는 않는다. 따라서 쾌속조형의 이점을 극대화 할 수 있는 쾌속금형제작공정을 개발하는 것이 중요하다.

그림 3에서 보는 바와 같이 현재 개발되고 있는 프로토타입을 빠르게 제작하는 쾌속조형(Rapid Prototyping)공정과 제품생산을 위한 금형을 빠르게 제작하는 쾌속금형제작(Rapid Tooling)공정으로 크게 분류할 수 있으며, 쾌속금형제작공정에는 진공주형

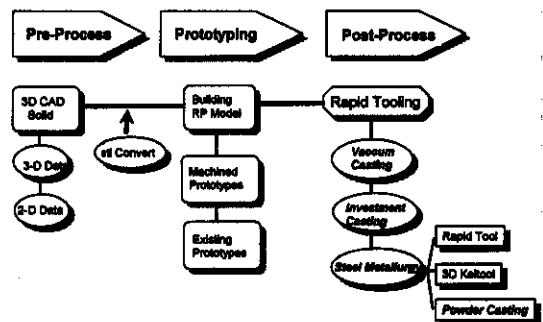


Fig. 3. Flow of rapid prototyping and rapid tooling.

(Vacuum Casting)과 정밀주조(Investment Casting)공정, 3D Systems사의 3D Keltool공정, DTM사의 Rapid-Tool 공정이 있다. 이러한 캐속금형제작공정은 기존의 절삭에 의한 금형제작공정에 비하여 제작시간이 50%~70%정도 단축되나, 금형으로서의 또 하나의 중요한 요소인 치수정밀도 측면에서는 만족스럽지 못한 결과를 보여, 실제 현장에서는 제한적으로 이용되어 왔다.^{1,2)}

본 연구에서는 캐속조형을 이용하여 금형을 제작하는데 있어서 진공주형과 용침공정을 이용하였다. Rapid-Tool이나 3D Keltool공정은 기존의 상용화된 캐속조형을 개발한 회사의 캐속금형제작 공정으로 금형의 인서트제작시 치수오차가 4.5%에 이르러 실제로 제작 후, 후처리에 많은 시간과 비용이 드는 어려움이 있다. 본 논문의 분말주조공정에서는 사출금형의 인서트를 제작함에 있어 앞에서 언급한 두가지 공정에서 지적인 치수오차를 최대한으로 줄이면서 형으로서 또 하나의 중요한 요소인 표면거칠기, 경도를 측정하였다.

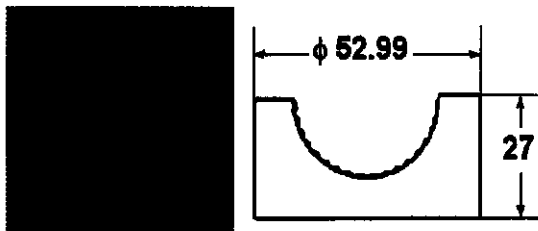


Fig. 4. Appearance and dimension of master model.

2. 실험방법

2.1 마스터모델

그림 4는 분말주조에서 사용된 마스터 모델의 외관과 치수를 보여 주고 있으며 본 프로세스를 통해서 최종적으로는 골프공의 사출성형용 금형으로 사용하고자 하는 것이 목적이다. 본래의 마스터모델은 3-D CAD(Pro/Engineer)에서 3차원 형상을 모델링한 다음, 현재 캐속조형의 표준인 STL파일로 변환하여 골프공 형의 마스터모델을 광조형법(Laser stereo lithography)로 제작하였으나 양력을 높이기 위한 유체역학적인 이유로 dimple의 깊이가 아래로 갈수록 작아지며, dimple의 직경도 매우 작기 때문에 조형시 발생하는 0.1 mm정도 크기의 계단모양(Step Mark)을 상상하기가 매우 어렵다. 따라서 본 실험의 마스터모델은 진공주형과 용침공정에서의 정확한 치수측정을 위하여 부득이 하게 절삭형을 마스터모델로 이용하였다.

2.2 진공주형에 의한 고무형 제작

분말주조공정에 들어가기 전에 분말과 바인더를 형의 형태로 성형하기 위해서는 마스터모델의 형상을 담은 실리콘고무형(silicon rubber mold)를 제작하여야 한다. 그림 5에는 진공주형(vacuum casting)공정을 이용하여 고무형을 제작하는 공정을 나타내었다. 제작된 마스터모델에 게이트를 조립하여 형틀을 제작한 뒤, 준비된 실리콘고무를 경화제와 섞어서 진공중에서 실리콘고무에 들어있는 공기를 탈포(de-gassing)하였다. 적당한 온도에서 실리콘고무를 경화시

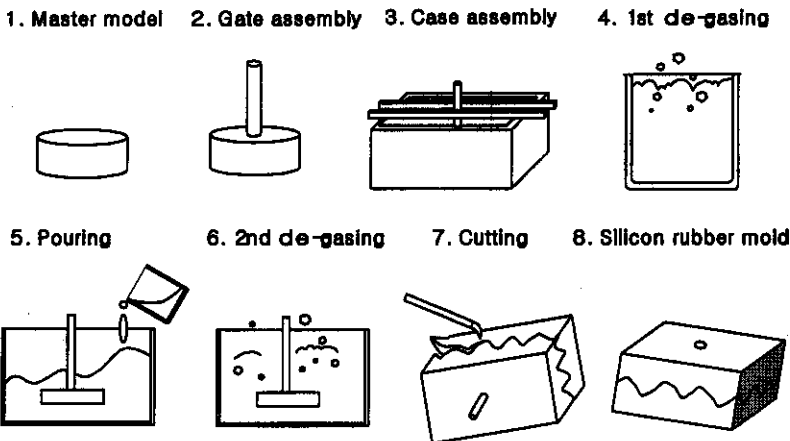


Fig. 5. Silicon rubber fabrication process by vacuum casting.

킨 다음 마스터모형을 분리하여 실리콘고무형을 제작하였다.

이 진공주형공정에서 주의하여야 할 것은 실리콘의 종류와 경화온도에 따른 형의 수축과 팽창인데, 본 실험에서는 Dowcoming사에서 제작된 실리콘인 SILASTIC을 사용하였으며, 분말과 바인더가 섞여 있는 생형(green part)의 수축을 최소화하기 38°C에서 경화하였다.

2.3 분말주조 공정

그림 6는 분말주조의 전체적인 프로세스를 개략적인 그림으로 나타내었다. 앞에서 진공주형을 이용하여 마스터 모델을 전사한 실리콘고무형을 만든 후 구형의 스테인레스(SUS316)분말을 실리콘고무형에 진동을 가하면서 충전시켰다. 이때의 스테인레스분말은 입자크기가 서로 다른 스테인레스분말을 같이 혼합하여 충전밀도를 높이도록 하였다. 실리콘고무형에 분말을 충전한 후 진공상태에서 분말사이의 공기를 탈포시킨 후 완전히 공기가 배제된 분말사이에 결합제가 침투할 수 있도록 하였다. 진공상태에서 결합제를 분말이 들어 있는 실리콘고무형에 주입한 다음, 충전된 분말의 높이가 높을 경우, 결합제가 바닥까지 미치지 못할 수 있으므로 8기압 하에서 다시 한 번 더 침투시켰다. 기압한 다음 다시 진동을 주어 분말의

충진밀도를 높일 수 있도록 하였다. 2회 재의 진동이 끝나면 대기압 하에서 약 15시간 정도 바인더가 굳을 수 있도록 건조시켰다. 건조 후 고온에서 바인더를 태우고, 분말에 함께 혼합되어 있던 구리분말을 액상소결한 다음, 구리용침을 통하여 최종의 금형을 얻었다.

2.4 실험에 사용된 분말과 바인더의 종류

본 실험에서는 파우더의 충전밀도를 높이기 위해서 표 1과 같이 Gas atomized process로 만들어진 일반 스테인레스 분말과 스테인레스 미분말 두 가지 입도의 구형분말을 사용하였다

바인더는 높은 밀도의 분말에 효과적으로 침투할 수 있도록 될 수 있으면 낮은 점도의 바인더를 쓰는 것이 바람직하며, 또한 탈지(debinding)시 금형의 형상변화를 일으키지 않아야 한다. 표 2에 나타난 점도 100 CPS/25°C의 수용성 페놀 바인더를 사용하였으며, 바인더 그대로 분말에 혼합하여 사용할 수도 있으나

Table 1. Average diameter and tap density of used powder

	Avg. diameter(μm)	Tap density (vol%)
A: Large size (Stainless steel)	66	61
B: Small size (Stainless steel)	5	39
A(82.5%)+B(17.5%)	-	67

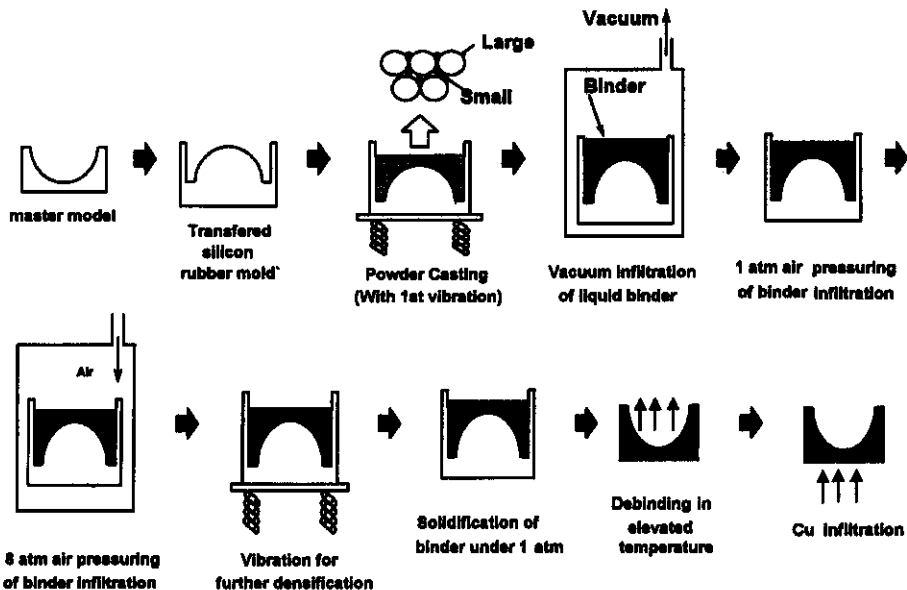


Fig. 6. Process of powder casting.

Table 2. Specification and its mixing ratio of binder

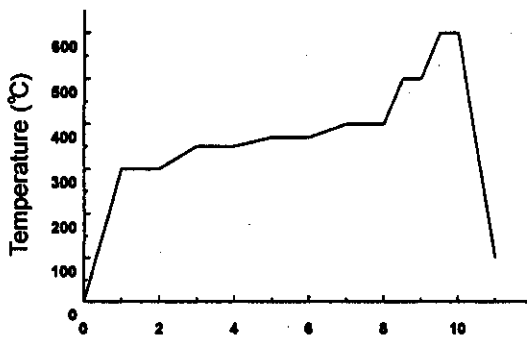
Binder	Type(Company)	Mixing ration (vol%)
Water soluble phenol	Chem Rez 630 HSL (Ashland Chemical Company, USA)	45
Hardener	Chem Rez 6016 (Ashland Chemical Company, USA)	10
Water		45

본 실험에서는 물에 1:1의 비율로 희석하여 사용하였다. 물의 희석비율은 바인더의 점도를 변화시키며 점도는 바인더의 분말에의 침투성에 큰 영향을 미친다.³⁾

2.5 탈지(debinding) 및 용침(infiltration)

그림 7에는 탈지(debinding)과 용침(infiltration)공정에서의 온도조절을 나타내었다. 탈지공정에서는 생형(green part)의 분말사이 공극에 게재하고 있는 바인더(수용성 페놀 + 물)를 제거하기 위하여 먼저 진공건조기에서 2시간 건조시켜 수분을 어느 정도 제거하고 난 다음, 질소분위기에서 온도를 300, 350, 370, 400, 500, 600°C로 각각 그래프에서와 같이 선형적으로 승온시키고, 30분 썩 유지하여 결합제를 태워 제거하였다.

용침공정에서는 용침용 구리분말을 소형프레스를 이용하여 블록형상으로 간이성형하여 바인더가 제거된 생형 밑에 둔 다음 수소 환원분위기에서 온도를 1140°C까지 올려 구리가 완전히 녹아 생형의 공극사이를 모세관현상을 이용하여 침투하도록 하여 100% 조밀한 금형 인서트를 제작하였다.



(a) Debinding process

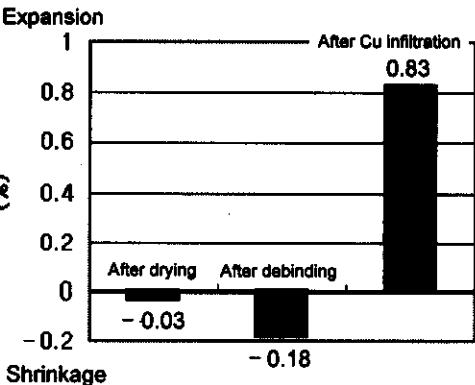
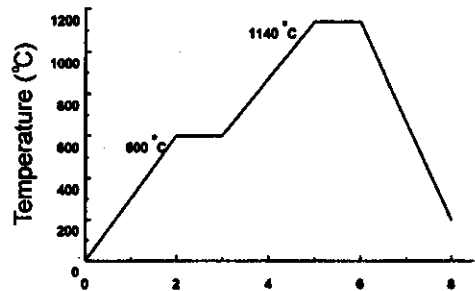


Fig. 8. Dimensional change in 2 kinds of powder experiment.



(b) Infiltration

Fig. 7. Temperature control in debinding and infiltration process.

3. 결 과

3.1 두 종류의 분말에 의한 형상오차 실험

평균입도 5 μm의 스테인레스 분말의 충전밀도는 39%이고 입자크기가 큰 평균입도 66 μm의 스테인레스 분말은 61%였다. 본 연구에서 충전밀도를 높이기 위하여 상기 분말을 표 1과 같이 82.5:17.5의 비율로 혼합한 결과 충전밀도가 67%로 증가하였다. 따라서 혼합분말을 사용하였으며, 그림 8에서는 평균 입자크기가 다른 두가지 종류의 스테인레스강 분말을 혼합하여 사용하는 경우의 프로세스 단계별 형상치수의 변화를 측정하여 나타내었는데, 대기중 건조와 디바인딩의 공정에서는 형상치수변화가 그다지 크지 않지만 마지막 단계인 용침 시 상당한 정도의 형상치수변화가 일어남을 알 수 있다. 이것은 분말 충전시에 스테인레스 분말입자 사이의 간격이 테이블

진동에 의하여 상당히 감소하였다가, 동용침시 모세관현상에 의하여 액상의 동이 스테인레스분말의 입자 사이에 침투하면서 분말입자사이의 간격을 넓히기 때문이라고 생각된다. 결과적으로 0.83%의 비교적 높은 치수오차를 달성하였으나, 상기의 혼합된 스테인레스분말에 동미분을 다시 혼합하여 치수오차를 개선하기 위한 실험을 하였다.

3.2 세 종류의 혼합분말(동분말의 첨가)에 의한 형상오차 실험

앞에서 언급했듯이 동용침시 형상의 치수가 증가한다는 사실로부터, 사용되는 재료나 공정을 적절히 조절함으로써 최종적인 형의 치수제어가 가능하게 됨을 알 수 있다. 본 실험에서는 혼합 스테인스분말 중에서 18 wt%의 스테인레스 미분말 대신에 평균입자 직경 10 μm의 순수 동분말과 스테인레스 미분을 5:5의 비율로 표 3과 같이 배합하여 사용하고 이후의 실험조건은 두가지 분말실험과 같이 진행하였다.

그럼 9에서는 세 종류의 분말을 이용한 실험에서 각 공정단계별 수축오차를 보여주고 있다. 건조와 디바인딩 공정에서는 각각 0.22%와 0.53%의 수축이 일어남을 알 수 있고, 분말중에 포함된 순수 동분말

Table 3. Specification of mixed powder

Powder	Weight Percent (wt%)	Volume Percent(vol%)	Weight(g)
SUS(65 μm)	82	83.2	492
SUS(5 μm)	9	18	54
Cu(10 μm)	9	7.66	54

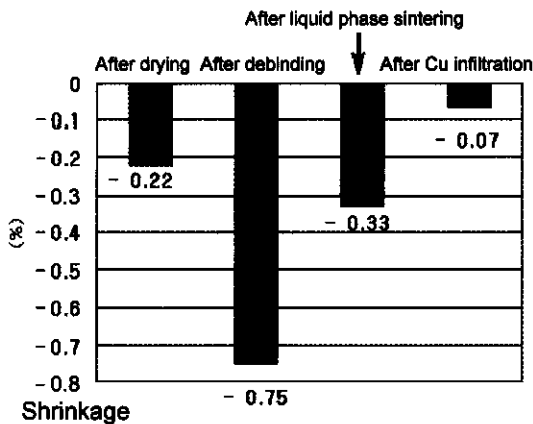


Fig. 9. Dimensional control by mixing copper powder.

을 액상소결(liquid phase sintering)하는 과정에서 0.42%의 팽창이 일어났으며, 마지막 동용침공정에서는 0.26%의 팽창이 일어남으로서 결과적으로 골프공형의 치수변화를 0.07%의 수축으로 치수정밀도를 향상시킬 수 있었다. 이때 마지막에서 수축이라는 의미는, 금형은 보통 여러 가지 코팅을 통한 표면처리를 하는데, 보통의 경우 표면처리를 하게 되면 치수가 커지므로 이러한 표면처리를 고려하여 도면의 정확한 치수보다 작게 제작한다. 따라서 최종의 형상이 수축이기 때문에 코팅을 통해서 치수정밀도를 악화시키지 않도록 할 수 있다.

3.3 표면거칠기와 경도

표 4에서 보는 바와 같이 두가지 분말을 사용하여 제작한 금형의 표면의 거칠기가 Rmax 13 μm였으며, 순수동분말을 혼합하여 제작한 형의 표면거칠기가 Rmax 6.6 μm로 나타나, 동분말을 첨가함으로써 표면

Table 4. Surface roughness according to content of powder

A	Large SUS powder(65 μm) + small SUS powder(5 μm)	Rmax	13(μm)
		Rz	9
		Ra	2.2
B	Large SUS powder(65 μm) + small SUS powder(5 μm) + small Cu powder(10 μm)	Rmax	6.5(μm)
		Rz	4
		Ra	0.9

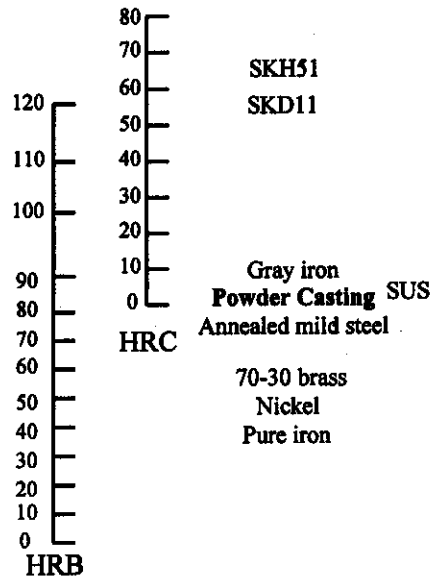


Fig. 10. Hardness of powder casting part.

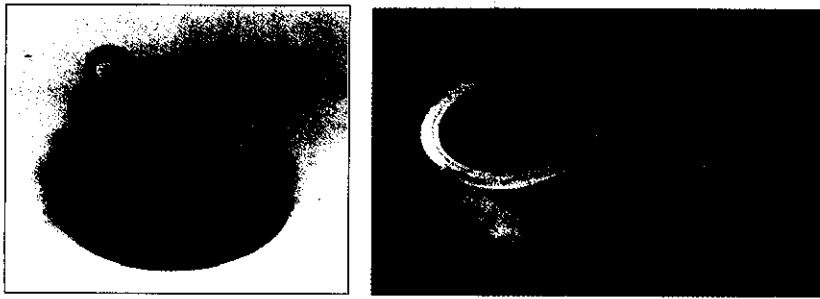


Fig. 11. Injection mold and injected part1 by powder casting.

거칠기도 상당히 개선됨을 알 수 있다.

그림 10에서는 본 실험으로 제작된 사출금형의 경도를 나타내었다. HRB 경도로 88을 나타내었으며, 이것은 열간성형 또는 프레스금형용인 SKD11에는 미치지 못하지만 온도나 압력이 비교적 낮은 사출금형용으로는 그 경도가 충분하여 100,000개 이상의 사출제품을 제작할 수 있는 정도이다. 그림 11은 본 논문의 분말주조를 통해서 제작한 사출금형과 사출제품을 나타낸다.

4. 고 찰

4.1 바인더 침투 후 진동에 의한 영향

금속분말을 이용한 캐속금형제작에 있어서, 금형의 밀도와 치수정밀도와 관계가 깊은 것은 제작과정에서의 분말의 충전밀도 때문이다. 분말입자간의 접촉이 긴밀하여야만 높은 분말의 밀도를 얻을 수 있고, 후공정에서의 치수제어가 가능하기 때문에 본 실험에서는 바인더를 혼합함에 있어서 기존의 분말과 바인더를 혼합하여 주입하는 습식 슬러리캐스팅(Wet-type slurry casting)형태가 아닌 분말 충전 후 바인더를 충전하는 건식(Dry-type)을 채택함으로써 높은 충전밀도를 얻을 수 있었다.

충진밀도의 향상과 고른 충진을 위해서 첫번째 진동은 분말을 채운 실리콘고무형에 주었으며, 두번째 진동은 액상의 바인더를 혼합분말에 침투시킨 후 가한다. 그림 12에서와 같이 분말의 밀도가 변화하는 것을 알 수 있다. 그림에서 보면 바인더침투 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

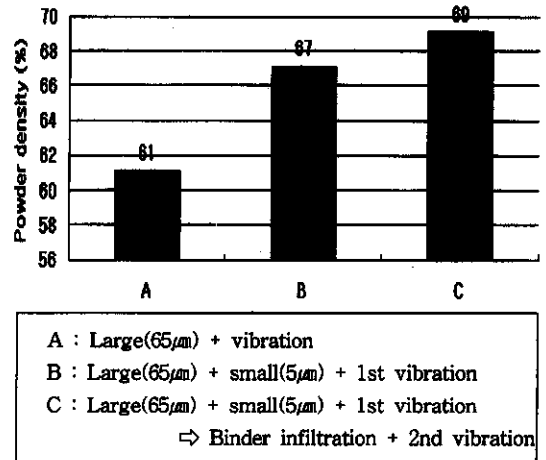


Fig. 12. Tap density change by vibration.

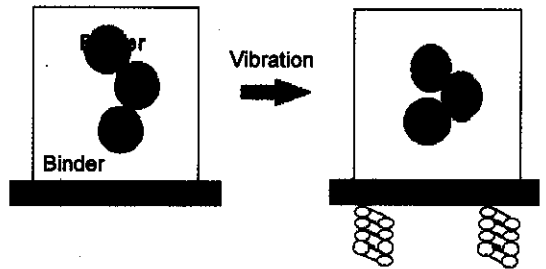


Fig. 13. Thixotropic behavior.

의해 바인더의 점성이 떨어지면서 분말사이의 마찰력 감소로 인하여 분말의 접촉각을 줄임으로서 그림 13에서 보는 것과 같이 결과적으로 충전밀도가 향상되는 것으로 사료된다.⁴⁾

4.2 진동에 의한 형상치수의 변화

바인더 침투 후 진동을 가하지 않은 실험에서는 용침후 치수변화가 0.4% 수축하였다. 이에 반해 진

등을 가한 형은 앞에서 두 가지 분말을 통한 실험
 예에서와 같이 0.83% 팽창하는 것을 알 수 있다. 진
 동을 가하지 않은 것은 분말밀도가 높지 않아 진조,
 디바인딩시 크게 수축하여 동용침시 구리의 침투로
 인하여 팽창함에도 불구하고 결과적인 최종치수가 수
 축으로 나타났다. 진동을 가한 것은 분말의 충전밀도
 가 높기 때문에 진조, 디바인딩시 크게 수축하지 않
 았기 때문에 동용침시 구리의 침투로 최종치수가 팽
 창하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구의 분말주조법은 쾌속조형틀 이용한 쾌속
 금형제작을 시도함에 있어서 쾌속금형제작은 기존 쾌
 속조형의 시간적, 비용적인 장점을 유지하면서, 기존
 의 한가지 평균입자 크기의 분말을 쓰는 대신에 두
 가지 평균입자 크기의 스테인레스 분말을 사용하거
 나 다시 그 혼합분말에 순수 동분말을 첨가하여, 최
 종 금형의 표면조도의 향상과 함께 치수변형을 0.1%
 이하로 제어함으로써 앞에서 지적한 치수정밀도의 문
 제를 개선할 수 있었다. 또한 기존 Rapid Tool이나
 3-D Keltool의 프로세스가 바인더와 분말을 혼합하여

충진하는 습식의 슬러리 타입을 채택하고 있는데 반
 해 본 연구의 분말주조(Powder Casting)에서는 분말
 을 충전하고 바인더를 함침시키는 전식을 채택하여
 작업성을 향상시켰고, 분말 충전시와 바인더 침투 후
 진동을 가함으로써 분말의 충전밀도를 높여 금형의
 강도와 치수정밀도를 향상시킬 수 있었다.

후 기

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단 학술연구조성
 비에 의하여 지원 되었음.

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 東京(1997)107.
2. 이관행: 제2회 쾌속조형 및 금형기술혁신 심포지움, 2, (1997) 38.
3. Takeo Nakagawa, Hirouki Noguchi, : Proceedings of 10th Rapid Prototyping Symposium, 10(1996)17
4. Frank M White : Fluid Mechanics, Mcgraw-Hill New York (1987) 43.