

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단 학술연구조성비에 의하여 지원되었음.

## R/P 마스터모델을 활용한 정밀주조 공정기술의 개발

임용관\*, 정성일\* 정해도\*\*

### Development of Investment Casting Technique using R/P Master Model

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

#### ABSTRACT

Functional metal prototypes are often required in numerous industrial applications. These components are typically needed in the early stage of a project to determine form, fit and function. Recent R/P(Rapid Prototyping) part are made of soft materials such as plastics, wax, paper, these master models cannot be employed durable test in real harsh working environment. Parts by direct metal rapid tooling method, such as laser sintering, by now are hard to get net shape, pores of the green parts of powder casting method must be infiltrated to get proper strength as tool, and new type of 3D direct tooling system combining fabrication welding arc and cutting process is reported by Song etc. But a system which can build directly 3D parts of high performance functional material as metal part would need long period of system development, massive investment and other serious obstacles, such as patent. In this paper, through the rapid tooling process as silicon rubber molding using R/P master model, and fabricate wax pattern in that silicon rubber mold using vacuum casting method, then we translated the wax patterns to numerous metal prototypes by new investment casting process combined conventional investment casting with rapid pototyping & rapid tooling process. With this wax-injection-mold-free investment casting, we developed new investment casting process of fabricating numerous functional metal prototypes from one master model, combined 3-D CAD, R/P and conventional investment casting and tried to expect net shape measuring total dimension shrinkage from R/P part to metal part.

**Key Words** : rapid prototyping(쾌속모형제작), investment casting(정밀주조), vacuum casting(진공주형), silicon rubber mold(실리콘고무형), rapid tooling(쾌속금형제작), wax pattern(왁스형), slurry coating(슬러리코팅)

#### 1. 서론

현재 국내에서의 쾌속조형(Rapid Prototyping)을 이용한 마스터모델 제작은 자동차와 가전산업을 중

심으로 점차 일반화되어 산업현장에 까지 확산되고 있다. 쾌속조형으로 얻어질 수 있는 조형물은 조형 방법에 따라 수지, 왁스, 종이 등의 비교적 연질소

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부

재를 이용해 왔고, 단지 제품의 형상확인 또는 조립성, 간섭성의 확인에만 유용할 뿐 실제 많은 기계부품들이 사용되는 가혹한 작업환경에서의 내구성이나 수명의 평가에는 사용할 수 없었다.<sup>1)</sup>

또한 레이저소결 등의 직접식 금속쾌속조형에 의한 금속조형물은 현재까지는 정형(定形)을 얻기가 어려우며<sup>2)</sup>, 분말주조법<sup>3)</sup>에서는 내부의 기공을 용침시켜야만 기계부품으로 사용될 수 있을 정도의 강도를 얻을 수 있고 최근에 송용역 등에 의해서 용접아크로 단면을 생성한 후 절삭공정을 통해 금형이나 부품을 구현하는 시스템이 제안되었다<sup>4)</sup>. 그러나 금속 등의 고기능성 소재의 제품을 조형할 수 있는 시스템은 시스템의 개발과 구성에 상당한 노력과 시간을 필요로 하고, 제작할 수 있는 금속 조형물의 개수도 제한적이다. 또한 3-D Systems社의 QuickCast<sup>®</sup>법은 중공의 마스터모형을 슬러리 코팅하여 정밀주조공정을 통해 금속 조형물이나 마스터를 제작할 수 있으나<sup>5)</sup>, 정밀주조시 마스터모형을 태워 없애기 때문에 쾌속조형 마스터모형 하나에 금속 조형물을 하나 밖에 얻을 수 없고, 마스터모형 자체가 중공이므로 진공주형의 과정에서 문제를 발생시킬 수 있다.

한편 본 연구에서는 R/P에 의해 얻어진 마스터모형을 진공주형(Vacuum Casting)에 의해 실리콘고무형(Silicon Rubber Mold)를 제작하고, 그 실리콘고무형에 다시 한번 진공주형공정을 이용하여 다량의 왁스모형(Wax Pattern)을 성형하며, 성형된 왁스모형은 정밀주조공정을 통하여 다수의 금속조형물을 제작할 수 있게 됨으로써, 하나의 R/P 마스터모형을 이용하여 금속 조형물을 대량생산할 수 있는 정밀주조 공정기술을 개발하였다. 또한 3D-CAD, R/P와 종래의 정밀주조공정을 연결, Concurrent化하여 납기를 단축하고 치수수축에 의한 Net Shape예측을 시도하였다.

## 2. 주요공정

Fig. 1은 본 실험의 전체적인 공정을 개략적인 그림으로 나타내고 있다. 그림에서처럼 먼저 3-D CAD에서 설계, stl변환하고 쾌속조형시스템을 통하여 마스터모형을 제작한다.

마스터모형로부터 진공주형(Vacuum Casting)

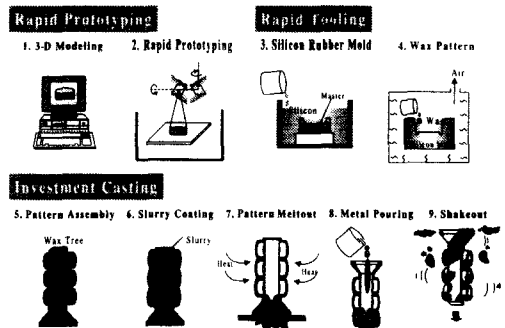
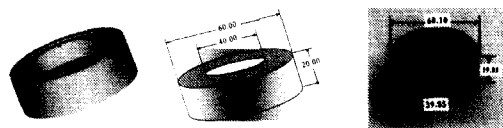


Fig. 1 Process of investment casting using rapid prototyping

공정을 통하여 실리콘고무형을 제작하고, 제작된 실리콘고무형에 고온(85 ~ 90℃), 진공(750 mmHg)하에서 왁스형을 성형하여, 정밀주조공정을 진행하게 된다. 정밀주조공정에서는 먼저 성형된 왁스형들로 왁스트리(Wax Tree)를 조립하여 슬러리코팅(Slurry Coating)을 한다. 여러 회에 걸친 슬러리코팅으로 적절한 두께의 코팅이 이루어지면 고온에서 왁스를 녹여낸 다음, 왁스가 없어진 공간에 고온의 금속 용탕을 부어 넣고, 냉각시킨다. 코팅된 슬러리를 털어내고, 트리에 붙어 있는 탕구부를 절단하고, 가공하여 원하는 금속소재의 마스터모형을 얻을 수 있게 된다.

### 2.1 쾌속조형(Rapid Prototyping )



(a)3D Modeling (b)Dimensions (c)RP master

Fig. 2 Appearance & dimension of master model

Fig. 2는 본 실험을 위하여 제작된 시편의 사진으로 (a)는 Parametric社의 3-D CAD 소프트웨어인 Pro/ENGINEER<sup>®</sup>(Release18)로 설계한 것이며 (b)는 설계시의 치수이며 (c) 3-D Systems社의 SLA-250기종을 이용하여 제작된 마스터모형의 사

진과 실제 마이크로미터로 측정한 치수이다.

광조형(Laser Lithography)으로 제작된 마스터 모델은 0.0088mm의 Chord height와 0.1mm Slice thickness의 조건으로 8시간 조형되었으며 사용된 수지는 아크릴계 SL 5170을 사용하였다.

## 2.2 쾌속형제작(Rapid Tooling)

마스터모델을 이용하여 마스터복제용 실리콘 고무형을 제작하고, 그 실리콘고무형을 그대로 이용하여 왁스모형을 제작한다. 왁스를 녹는점 이상의 온도에서 미리 충분한 유동성을 확보할 수 있도록 액체 상태로 가열하면서 1차 탈포를 실시한다.

실리콘 몰드 역시, 액체 왁스를 주입할 때 액체의 유동성이 떨어지지 않도록 역시 녹는점 이상으로 예열한다. 액체 상태의 왁스를 예열된 실리콘고무형에 주입한 다음 가열한 상태로 진공에서 2차 탈포한다. 탈포공정을 거치지 않고 왁스모형을 성형하게 되면 정밀주조공정의 왁스모형으로 쓸수 없을 정도로 표면에 기포가 잔존하게 되거나 기포가 내부에 존재하여 실리콘고무형에서 분리할 때 쉽게 파손된다. 또한 1차 탈포를 거치지 않고, 실리콘고무형에서만 가열·탈포공정을 거치게 되면 지나치게 오랜 시간 동안 탈포를 해야하기 때문에 실리콘고무형이 장시간 고온에 노출되어 경화되는 등 실리콘 고무형의 수명이 크게 단축될 수 있기 때문이다.

본 실험에 사용되었던 왁스는 필라(fillar)가 첨가된 왁스로서 필라를 첨가하지 않은 왁스보다 모델의 모서리(edge)부분이나 날카로운 부분을 잘 표현할 수 있는 이점이 있지만, 반면에 탈왁스(Dewaxing)공정에서 첨가된 필라들이 불순물로 작용하기 때문에 탈왁스 시 주의를 요하는 단점이 있다.

본 실험에서는 치수의 안정성과 모서리부분의 정확도를 위해서 필라를 첨가한 왁스를 사용하였다.

## 2.3 정밀주조(Investment Casting)

### 2.3.1 왁스트리(Wax tree)의 조립

일반적으로 제품모형 탕구모형 등은 따로따로 성형한 후에 가열된 인두에 의하여 조립된다. 이 조립이 완성된 것을 트리(Tree) 또는 크러스터(Cruster)라고 부르는데, 왁스모형을 조립하여 트리

를 만들 때 주의할 점은 생산성을 위해서 가능한 많은 왁스모형을 조립하고, 고온에서 왁스모형이 코팅된 슬러리에서 용이하게 흘러내릴 수 있도록 조립하여야 한다. 또한 부품이 먼저 응고하고 탕구 압탕이 나중에 응고할 수 있도록 하여야 한다.

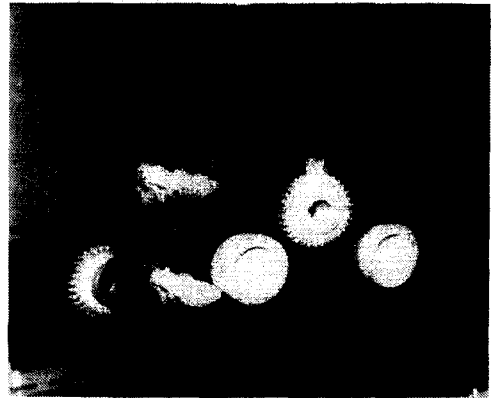


Fig. 3 Wax tree assembly

본 실험에서는 Fig. 3에서 처럼, 왁스모형을 조립하였다. 쾌속조형으로 제작된 원형의 수축시편과 실제 기어와 캐릭터모형을 마스터모델로 하여 왁스모형을 제작하여 트리로 조립하였다.

슬러리코팅 후 왁스모형의 사이가 너무 가까우면 용탕을 붓고 냉각시킬 때 문제가 될 수 있으므로 충분히 거리를 확보할 수 있도록 하였다. 또한 제품의 표면에 미세한 기포나 결함이 생기더라도 후면으로 갈수 있도록 왁스모형을 기울이거나 비틀어서 조립하였다.

### 2.3.2 슬러리코팅(Slurry Coating)

정밀주조공정에서 왁스트리에 내화물을 입히는 작업을 슬러리코팅 작업이라고 한다. 코팅의 방법에 따라, 왁스트리를 미립자의 내화물과 인을 혼합한 슬러리로 코팅하고 페놀레진을 접착제로 하여 입상의 내화물을 뿌려 건조시키는 Solid Mold법과 미립의 슬러리를 여러회 코팅하여 원하는 두께의 내화물 피복을 만드는 Ceramic Shell Mold법이 있는데, 본 실험에서는 Ceramic Shell Mold법을 사용하였다.

코팅공정에서는 왁스모형 표면에 부착되어 있는 이형제를 없애기 위해 알코올 등으로 세척한

다음 내화성 점결제(Binder)와 내화물 미세입자를 혼합한 슬러리(Slurry)에 침적한다. 침적 후 과잉 부착된 슬러리를 제거하고 건조한 내화물을 뿌린 후 건조한다. 일반적으로 이러한 공정을 5 ~ 10 회 반복하여 원하는 두께의 코팅층을 형성한다. 양호한 구조품의 표면상태를 위해서 제 1층의 슬러리는 충전제(Filler)의 첨가량이 많고 점도가 높은 것이 쓰이고 제 2층 이후에는 점도가 낮은 침투성이 좋은 것이 쓰인다<sup>6)</sup>. 본 실험에서는 8회에 걸쳐 코팅층을 형성하였다.

### 2.3.3 디왁싱(Dewaxing)과 소성(Burn-out)

디왁싱(Dewaxing)공정은 고압가마(Auto-clave) 내에서 가열하여 슬러리카스팅된 왁스트리 내의 왁스를 녹여 없애는 공정이며 왁스의 팽창을 무시하면 코팅에 균열이 생긴다. 따라서 왁스모형 전체가 가열되어 팽창하기 전에 왁스모형의 전체가 가열되어 팽창하기 전에 왁스모형의 표면이 급속하게 용융, 유출되도록 급격히 가열해 주는 것이 중요하다.

소성(Burn-out)공정에서 디왁싱 후 주형에 부착 잔존하는 왁스를 완전히 연소시키고, 주형에 강도를 주는 공정이며 산화분위기에서 약 1시간 동안 유지하였다.

### 2.3.4 주조

주형내의 용탕을 고온상태로 유지하여 유동성을 떨어뜨리지 않고 주입하였으며, 용탕이 주형에 접촉하였을 때 용탕의 misrun 등의 결함을 막기 위해서 주형의 온도를 890 ~ 1037℃로 유지하였으며 또한 주형의 온도강하를 막기 위해서 주형의 주위를 dry sand로 back-up하였다. 본 실험에서는 SNCM 410과 SUS 304 두가지 금속재료를 사용하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 형상오차

Fig. 4에서 처럼 본 실험에서는 패속조형에 의한 마스터모델, 왁스모형, 구조품을 제작하였으며, 각각 공정 단계별 치수와 오차를 Table 1에 나타내었다.

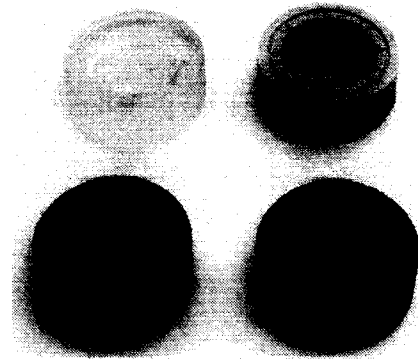


Fig. 4 Master model(upper,left), wax pattern(upper, right), casting part(lower,left: SUS304, lower, right : SNCM410)

Table 1 Demension & deviation of processes

Specimen		Dimension (avg. outside/inside) (mm)	Deviation (%)
Master model		60.10 / 39.85	0
Wax pattern		59.88 / 39.75	0.36 / 0.2
Casting part	SNCM 410	59.40 / 39.38	1.16 / 1.17
	SUS 304	58.65 / 38.98	2.41 / 2.18

최초의 모델링치수는 내경, 외경이 각각 60, 40mm였으나, 패속조형공정을 거친 마스터모델의 치수는 60.10, 39.85mm이었으며, 편의상 공정의 단계별오차는 마스터모델을 기준으로 하였다. 특히 왁스모형이 상온에서 경화될 때의 치수오차가 0.36/0.2%로 나와 매우 양호한 결과를 얻을 수 있었으며, 이것은 실험실에서 자체적으로 에폭시수지로 진공주형을 통해서 복제한 복제품의 치수오차(0.11%)와 비교해서도 뒤지지 않는 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

주조품은 SNCM 410이 마스터모델과 1.2%, SUS 304가 2.3% 정도 수축하는 것을 알 수 있다. 하지만 이것은 주조 후 후처리를 하지 않은 상태에서 측정된 값이므로 실제 후처리를 감안한 수축 오차를 고려하여 마스터모델을 제작하여야 할 것이다.

### 3.2 납기

다음의 Table 2에서와 같이 기존의 정밀주조 공정의 납기/비용과 본 실험에서 진행된 것과 같이 R/P 공정을 이용하여 정밀주조공정을 진행하였을 때의 납기/비용을 비교하였다. 여기에 3.1절의 내용을 입력하시오.

Table 2 Comparison conventional with new process of delivery & cost

Conventional investment casting (10set)	New investment casting using R/P, R/T (10set)
Master model (mock-up) (15days / ₩2,500,000)	Rapid Prototyping (1day / ₩1,000,000)
Machining of Al for wax injection (15days / ₩1,500,000)	Rapid Tooling - Silicon rubber molding (1day/₩150,000)
Injection (1day / ₩100,000)	- Wax pattern fabrication using vacuum casting (4days/₩100,000)
Investment casting (6days/₩300,000)	Investment casting (6days/₩300,000)
37days / ₩4,400,000	12days / ₩1,550,000

Table에서 보는 것과 같이 기존의 정밀주조 공정을 그대로 사용하기 때문에 정밀주조 공정에서의 시간/비용은 그대로 이지만, 마스터모델의

제작과정에서와 특히 Wax Pattern성형과정에서 금형을 제작할 필요가 없기 때문에 전체적인 납기/비용을 줄일 수 있게 되었다.

### 4. 결론

Fig. 5는 앞에서 제작된 수축율 측정용 시편 외에 본 실험을 통하여 제작된 기어와 캐릭터인형의 마스터모델과 실리콘고무형, 금속주조품을 보여주고 있다.

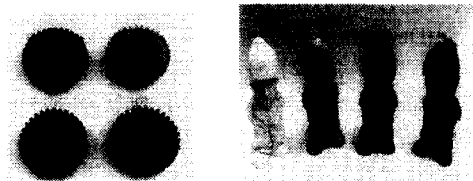


Fig. 5 Master model and casting part of gear and character goods

현재 국내에 도입된 여러 가지 쾌속조형에 의한 마스터모델의 제작방법에서는 디자인체크 혹은 조립성이나 간섭성 등의 확인에만 사용되어 왔고, 실제 현장에서 쓸 수 있는 금속재료의 마스터모델은 대부분 절삭가공에 의해 제작되었다. 그러나 산업현장에서 쓰이는 부품은 고강도의 난삭재일 경우가 많아 절삭가공에 의해 제작된 마스터 조차도 실제로는 적용할 수 없는 경우가 많았다. 본 연구에서는 디자인, 간섭, 조립성 체크용 쾌속조형 마스터모델을 제작한 다음, 왁스모형의 사출을 위한 별도의 금형을 별도로 제작하지 않고 마스터모델의 진공주형에 의한 복제공정에서 사용되는 실리콘고무형을 그대로 사용하여 왁스모형을 제작하는 공정을 시도하였다.

또한 하나의 R/P 마스터모델을 이용하여 금속조형물을 대량생산할 수 있는 정밀주조기술의 개발을 시도하였으며, 마스터모델을 기준으로 왁스모형과 주조품의 치수오차를 측정하여 원하는 치수의 주조품을 제작하고자 했을 때 마스터모델의 확대제작 비율을 제시하였고, 다량의 금속 마스터

모델을 제작할 경우에는 절삭에 의한 방법보다 적은 비용과 빠른 납기의 이점이 있다. 그리고 본 연구의 학술적 가치는 3차원 CAD와 쾌속조형기술을 이용하여 전통적인 정밀주조공정을 동시공학적으로 접근시키고자 함에 있다.

### 참고문헌

1. 中川成雄, 丸谷洋二 저, 정해도 역, “적층조형 시스템,” 성안당, 1998.
2. 이관행, “외국의 Rapid Tooling 사례,” 제 2회 쾌속조형 및 금형기술혁신 심포지움, 한국과학기술원 금형기술혁신연구센터, pp 38 ~ 48, 1997.
3. 임용관, 정해도, 김범수, 배원병, “급속금형제작 (1) : 분말주조에 의한 정형(定形)에의 도전,” 한국정밀공학회지, 제 15권 제 7호, pp 85 ~ 90, 1998.
4. 송용익, 박세형, 조정권, 황경현, 최두선, 신보성, 지해성, “3D Welding and Milling for Rapid Tooling,” 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp 940 ~ 944, 1998.
5. Paul F. Jacobs, Stereolithography and other RP&M Technologies, Society of Manufacturing Engineers, PP 209~ 237, 1995.
6. 日本鑄物協會精密鑄物研究會, “精密鑄造法,” 日刊工業新聞社, 1987.