

# 쾌속조형과 진공주형 및 세라믹 몰드를 이용한 금속 주조 시제품 제작 공정에서의 형상정밀도 변화

김기대<sup>#</sup>

## Variations of Form Accuracy in the Process of Metal Cast Prototyping using Rapid prototype, Vacuum casting and Ceramic Mold

Gi Dae Kim<sup>#</sup>

### ABSTRACT

In metal casting process, it is very difficult to predict the form accuracy of cast part and reduce repeatability error. In this study, the variations of form accuracy were measured in the process of metal cast prototyping, where RP part is manufactured from CAD model in the first, and then, wax part is cast in the vacuum environment using the RP part as master model, and finally metal prototype is cast using ceramic mold and the wax part as pattern. To investigate the variations of form accuracy, the averages and standard deviations of error distribution of the parts measured by 3D scanner were compared. It was observed that the biggest shrinkage is generated during the extraction of wax part in the second step and the biggest deterioration of form accuracy is generated during the metal part casting in the last step.

**Key Words :** Metal cast prototype (금속 주조 시제품), Form accuracy (형상정밀도), RP (쾌속조형), Vacuum casting (진공주형), Wax pattern (왁스 원형)

### 1. 서론

개발한 신제품을 양산 제작하기 전에 시제품 (prototypes)을 제작하고 실제 눈으로 확인하는 과정은 반드시 필요하고 이를 위해 시금형 제작, 수정 및 시사출 공정을 반복하게 된다. 신제품의 개발 주기가 단축되고 있기 때문에 빠른 시간 내에 시제품을 제작해야만 하는 요구가 증대되었고, 경우에 따라서는 여러 개의 시제품을 빠른 시간 내에 복제할 필요성이 생겼다. 쾌속조형(RP, Rapid prototyping) 공정은 형상 구속 조건 없이 어떠한

형태의 시제품이라도 빠르게 제작할 수 있는 장점을 가지고 있다. 다양한 RP 공정 기술이 개발되었지만, 장비 별로 사용할 수 있는 재료의 종류 및 한번의 공정으로 제작할 수 있는 시제품의 개수가 제한되어 있다.<sup>1</sup> 만약 수요자가 특정한 재질의 시제품, 예를 들어 양산 제품과 동일한 재질의 시제품을 요구하거나, 10 개 이상의 시제품을 한꺼번에 요구한다면 RP 제품을 마스터 모델(master model)로 하여 진공 주형 공정(vacuum casting) 기술을 적용할 수 있다.<sup>2-4</sup> 또한 금속 재질의 다량의 시제품을 제작하고자 한다면 진공 주형 공정에서 제작한

접수일: 2007 년 1 월 25 일; 게재승인일: 2007 년 4 월 21 일

<sup>#</sup> 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

E-mail: gidkim@cu.ac.kr Tel. (053) 850-2724

왁스(wax)를 원형(pattern)으로 하여 인베스트먼트(investment)법 혹은 로스트왁스(lost wax)법이라고 불리는 정밀 주조법을 적용할 수 있다.<sup>2,4</sup> 이 방법은 여러 가지 주조 공정 중 치수 정확도와 표면정도가 상대적으로 우수하고 미세한 부품을 주조할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 제작 공정이 너무 복잡하고 제작 시간이 너무 오래 걸린다는 단점이 있다. 왁스 패턴을 이용하여 세라믹 주형(ceramic mold)를 제작함으로써 금속 시제품을 더욱 간결한 방법으로 주조할 수도 있다.<sup>5</sup> Chung 등<sup>6</sup>은 세라믹 분말과 수용성 결합제를 혼합한 재료로 통기성이 좋은 몰드를 제작하여 진공 환경에서 신발 제작용 알루미늄 몰드를 제작함으로써 정밀도 및 표면조도 향상을 가져왔다. 또한 왁스 재료로 제작할 수 있는 RP 장비를 사용하거나<sup>7</sup> 퀵캐스트(quick cast) 공법 등을 이용하여 주조 패턴용 마스터 모델을 직접 제작한다면 전체 금속 주조품 제작 시간을 더욱 단축시킬 수 있다. 하지만 이 경우 제품 정밀도가 저하되거나 타고 남은 마스터 모델의 찌꺼기가 문제될 수 있다. 어떤 형태로든 주조 공정 내에는 많은 오차 요인이 존재하고 공정 표준화가 정립되어 있지 않아 부품의 형상 변형을 예측하거나 형상 정밀도를 향상시키는 방법을 모색하기가 어렵다. 따라서 현재 금속 시제품을 제작하고자 할 때는 RP 공정 및 진공 주형 공정을 이용하여 왁스 패턴만을 제작하고 그 이후의 공정은 일반적으로 전문 주조 업체에게 의주를 주어 정밀주조 공법으로 금속 시제품을 제작하고 있다.

본 연구에서는 쾌속조형 공정과 진공주형 공정 그리고 세라믹 몰드를 이용하여 금속 시제품을 제작하는 신속 주조 공정을 제안하고, 최종 금속 시제품이 제작될 때까지 각 공정 단계, 즉 (1) CAD 모델로부터 RP 제품을 제작하는 쾌속조형 공정 단계, (2) RP 제품을 마스터 모델 혹은 패턴으로 하여 이로부터 실리콘 몰드를 제작하고 왁스 제품을 제작하는 진공 주형 공정 단계, 그리고 (3) 왁스 제품을 패턴으로 하여 세라믹 몰드를 제작하고 금속 시제품을 최종 완성하는 금속 주조 공정 단계에서 부품의 형상 정밀도가 어떻게 변화하는지를 관찰하였다. 이를 위해 테스트 부품을 모델링하고 각 공정 별로 이를 직접 제작한 후, 비접촉 3 차원 측정기(3D scanner)를 이용하여 각 공정

별로 제작된 부품을 각각 측정하고 이들을 서로 비교하였다.

## 2. 세라믹 몰드 이용 금속 주조 공정

금속 재료의 시제품을 주조하기 위해서는 왁스 재료로 제작된 마스터 모델이 필요하며, 이는 RP 장비로 제작한 최초의 RP 제품을 패턴으로 하여 진공주형 공정을 거쳐 제작한다. 진공주형 공정이란 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 우선 RP 공정으로 패턴을 제작한 후 실리콘 재질의 몰드를 제작하고 이를 이용하여 원하는 재질로 다량의 시제품을 복제하는 공정이다. 몰드의 탄성이 커서 어느 정도의 언더컷(undercut)을 가지고 있어도 슬라이딩 몰드(sliding mold) 혹은 코어(core) 없이 일체의 몰드로 제작이 가능하며 모든 공정이 진공 상태에서 이루어져서 몰드 혹은 제품 내에 기포가 최소화되어 정밀도 향상을 가져올 수 있으며, 실리콘의 열수축률이 작아 몰드의 변형과 수축이 작다. 진공 주형 공정으로 왁스 부품이 제작되면 원기둥 모양의 주형틀(flask) 내부에 왁스 패턴을 위치시키고 분말과 물을 혼합한 액상의 세라믹 분말을 채워 넣은 후 상온에서 경화시켜 세라믹 주형을 완성한다. Fig. 2 에 나타난 바와 같이 여기에 원하는 재질의 금속 주괴(ingot)를 넣기만 하면 자동적으로 금속을 용융시켜 주입하고 냉각시키는 과정을 거쳐 금속 시제품을 얻을 수 있다. 일반적

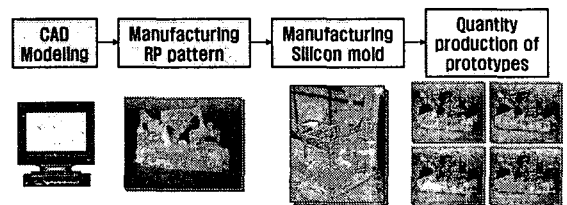


Fig. 1 Procedure of vacuum casting

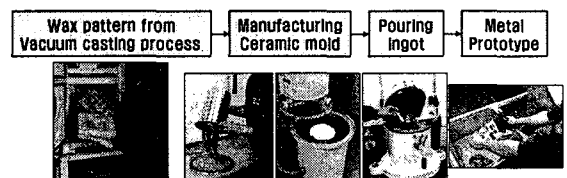


Fig. 2 Procedure of metal cast prototyping

으로 열악한 주조 공정 환경과 비교하여 상대적으로 깨끗한 환경에서 공정이 수행되며 이 방법을 적용하면 CAD 데이터로부터 5~7 일 이내에 금속 시제품 제작이 완료될 수 있다.

### 3. 시험 방법

Fig. 3 은 알루미늄 재질의 헬리콥터 조정판 제어 핸들의 외관을 모델링한 것이며, Table 1 에 대략적인 치수를 나타내었다. 두 부분으로 나뉘어져 있으며 각 부품을 주조 공정으로 성형한 후에 부품 내부에 여러 가지 전자 부품을 삽입하고 간단한 절삭 가공을 거쳐 하나로 조립되는 구조이다. 여러 가지 RP 공정 중 광조형 공정(SL, stereolithography) 방식이 형상 및 치수 정밀도가 가장 우수하여,<sup>8</sup> 주형의 패턴 제작용으로 가장 많이 이용되고 있으므로 본 연구에서는 먼저 3D systems 사의 SLA5000 장비를 이용하여 RP 부품(패턴)을 제작하였다. 그 이후 실리콘 몰드를 제작할 프레임틀을 만들고 그 속에 RP 패턴을 위치시킨 후 액체 실리콘을 주입하고 오븐 속에서 약 80°C 의 온도로 몰드를 경화시켰다. 경화된 실리콘 몰드에서 RP 패턴을 제거하고 난 후 액체 왁스를 실리콘 몰드로 주입하고 다시 오븐 속에서 60°C 이상의 온도로 왁스를 경화시켜 왁스 패턴을 완성하였다.

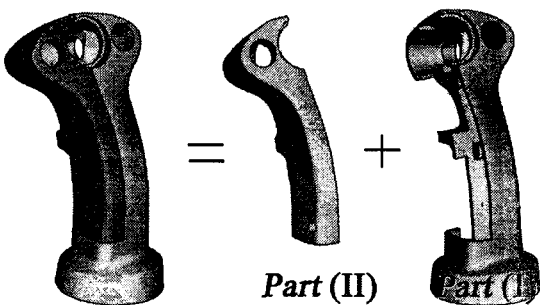


Fig. 3 CAD model of test specimens

Table 1 Dimension of test specimen

	Size ( $x \times y \times z$ [mm <sup>3</sup> ])	Volume [mm <sup>3</sup> ]
Part (I)	67.7 × 110.2 × 152.2	56,504
Part (II)	34.3 × 97.2 × 121.2	25,987

플래스크에 왁스 패턴을 위치시키고 액상의 세라믹 분말을 채워 넣은 후 상온에서 경화시켰고, 로 (furnace)에서 200°C 이상의 온도를 유지하여 왁스를 제거(dewax)하고 세라믹 몰드를 예열시킨 후 알루미늄 주괴를 주입하여 금속 시제품을 주조하였다. 각 공정에서 사용된 장비와 재료를 Table 2 와 3 에 나타내었다.

Fig. 4 는 CAD 모델로부터 순차적으로 제작한 동일한 형상의 제품들을 나타낸 사진이며, 왁스

Table 2 Experimental apparatus

	Apparatus (Maker)	Purpose
Stereolithography RP machine	SLA5000 (3D systems)	Manufacturing of RP pattern
Vacuum casting machine	MCP 5/04 (MCP)	Manufacturing of wax pattern
Metal cast machine	MPA300 (MCP)	Metal cast prototyping
3D digitizer	C100VZ (Steinbichler)	Non-contact 3 dimensional scanning

Table 3 Materials used in experiments

Materials	Trade name	Purpose
Epoxy resin	Somos11120	Pattern for vacuum casting
Silicon	VTV750	Mold for vacuum casting
Wax	WA70	Pattern for metal casting
Ceramic	EBMI+EBMI-LP	Mold for metal casting

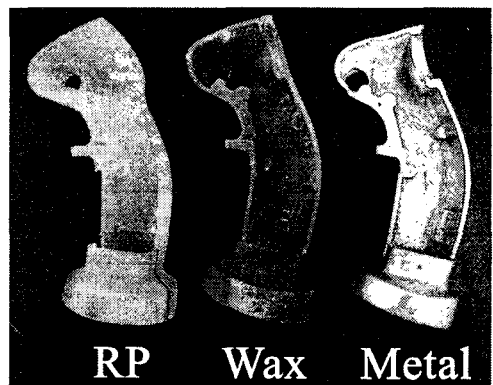


Fig. 4 Photograph of RP part, wax part and metal cast prototype of part (I)

패턴과 금속 시제품은 하나의 RP 제품에 대해서 각각 2 개씩 제작하였다. 3D 스캐너로 이 제품들을 주사(scanning)하여 점 데이터군(point clouds)을 차례로 얻고 이들을 비교함으로써 형상 정밀도의 변화를 관찰하였다. CAD 모델과 각각의 점 데이터 군, 또는 각 점 데이터 군끼리 오차를 비교하기 위하여 두 데이터 군을 병합(merge)하고 가장 오차(차이)가 작게 나도록 정합(best fitting)한 후, 일치하지 않는 부분을 형상 정밀도 오차로 규정하였다.

#### 4. 시험 결과

3D 스캐너를 이용하여 Fig. 4 에 나타난 RP part (I) 를 측정하여 점 데이터 군을 얻고 이를 CAD 모델 데이터와 비교하였다. RP part (I) 과 CAD 모델과의 차이의 분포는 Fig. 5 에 나타나 있으며, 이 결과를 Fig. 6(a)에 보다 명확하게 나타내었다. 같은 방식으로 Fig. 6 에는 RP 부품과 이를 마스터 모델 혹은 패턴으로 하여 얻은 왁스 부품, 그리고 왁스 부품과 이를 패턴으로 하여 얻은 알루미늄 부품을 서로 비교한 결과가 나타나 있다.

Fig. 6 에서 알 수 있는 바와 같이 RP 부품을 측정된 점 데이터 군은 CAD 모델 데이터로부터 평균  $-15\mu\text{m}$  벗어나 있었고, 왁스 부품은 RP 패턴으로부터 평균  $-168\mu\text{m}$ , 알루미늄 시제품을 측정된 점 데이터 군은 왁스 패턴으로부터 평균  $-23\mu\text{m}$  벗어나 있는 것으로 측정되었다. 본 연구에서 제안하고 있는 공정 방식으로 금속 시제품을 제작할 때 RP 부품(패턴)으로부터 왁스 부품을 주조하는

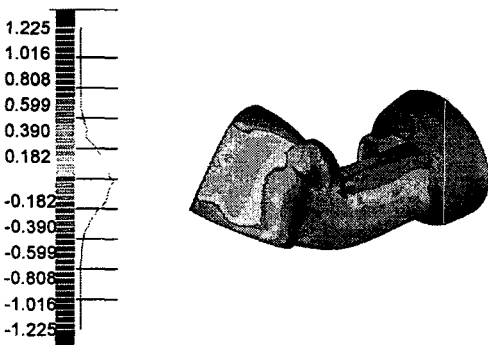


Fig. 5 Distribution of deviation between RP part (I) and CAD model data

두 번째 단계에서 오차들의 평균값이 음의 방향으로 가장 크게 차이가 났다는 것은 이 단계에서 수축이 가장 크게 발생하였다는 것을 말하며, 이는 왁스 재료의 상 변화로 인한 수축 및 온도 변화로 인한 열 수축이 매우 크다는 것을 의미한다.

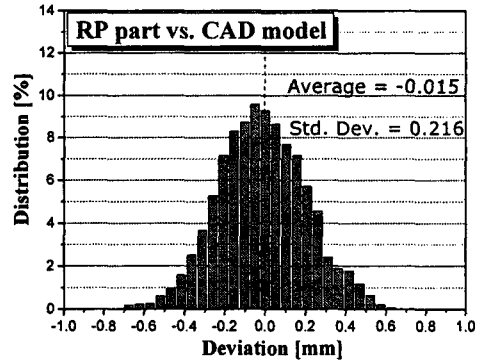


Fig. 6(a) Error distribution of RP part from CAD model (part I)

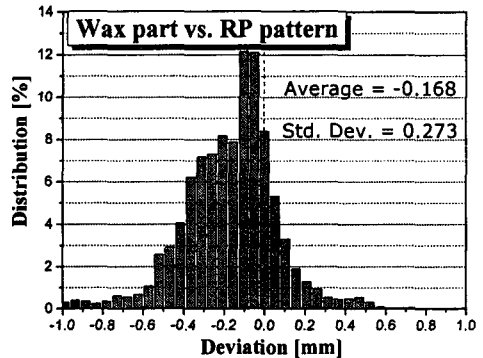


Fig. 6(b) Error distribution of wax part from RP pattern (part I)

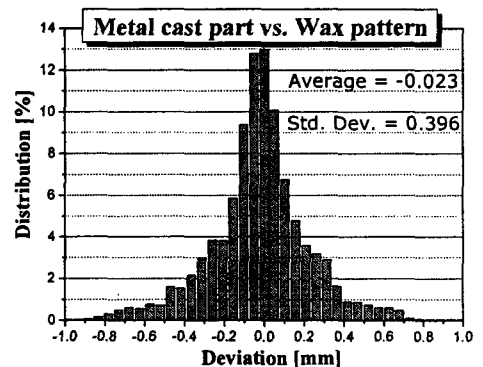


Fig. 6(c) Error distribution of metal cast part from wax pattern (part I)

이에 반해 오차들의 표준 편차의 변화를 살펴 보면 주조 공정의 단계가 진행될수록 216 $\mu\text{m}$ , 273 $\mu\text{m}$ , 396 $\mu\text{m}$  로 점점 증가하는 것으로 나타났다. 왁스 패턴으로부터 알루미늄(금속) 시제품을 주조하는 마지막 세 번째 단계에서는 왁스 패턴과 금속 시제품과의 전체 형상의 차이 값, 즉 점 데이터 군의 오차 평균값은 작았지만 표준 편차가 가장 컸다. 이는 액상 금속이 상변화할 때 전체 치수에 걸쳐 비교적 균일하게 발생하는 수축은 왁스 재료에 비해 크지 않지만 뒤틀림과 같은 국부적인 형상 변형이 크다는 것을 의미한다.

Fig. 7 은 두 번째 단계에서의 결과물인 왁스 부품과 마지막 단계에서의 금속 주조품로부터 얻은 점 데이터 군과 원래 데이터인 CAD 모델 데이터 자체와 비교하여 얻은 오차의 분포를 보여주고 있다. 예측할 수 있는 바와 같이 오차들의 표준 편차가 점차 증가하고 있다. 이는 금속 시제품

을 추출하기 위한 주조 공정 단계가 진행될수록 각 단계에서 발생한 오차가 누적되어 처음 설계한 데이터와의 차이, 즉 제품의 형상 정밀도가 점차 감소하고 있음을 보여주고 있는 것이다. 왁스 패턴에 비해 금속 시제품의 오차 평균 값이 오히려 감소한 것은 제품의 특정 부분에서의 형상 변형이 과도하게 (+) 값으로 나타난 영향 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 3 에서 나타나 있는 part (II) 에 대해서도 part (I) 과 같은 방식으로 주조 공정 순서대로 금속 시제품을 제작하고 각 단계에서 추출된 부품을 측정하고 서로 비교하였다. 점 데이터 군을 비교할 때 part (I) 는 측정된 3 차원 데이터를 모두 사용하였지만, part (II) 의 형상은 전체적으로 고르게 약 2.5mm 의 두께를 가지고 있기 때문에 전체 점 데이터 중 부품의 변형 특성이 가장 잘 나타날 것

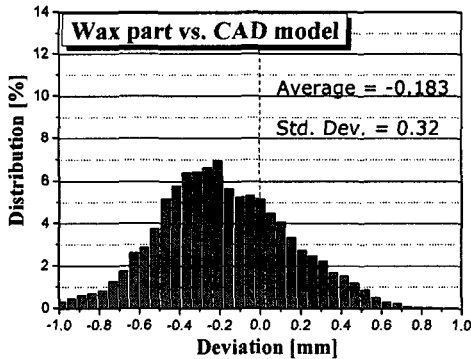


Fig. 7(a) Error distribution of wax part from CAD model (part I)

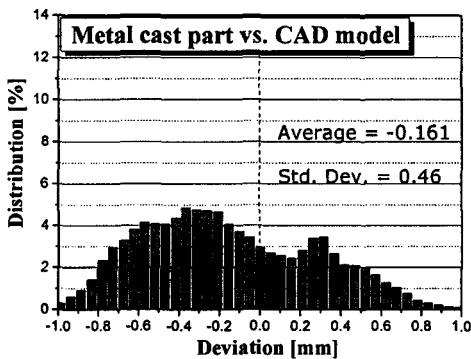


Fig. 7(b) Error distribution of metal cast part from CAD model (part I)

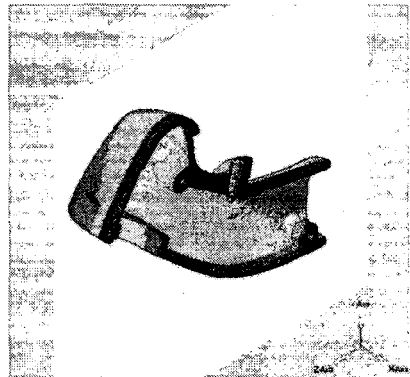


Fig. 8(a) Intersection of 3 dimensional part (II) and yz plane(x=11mm)

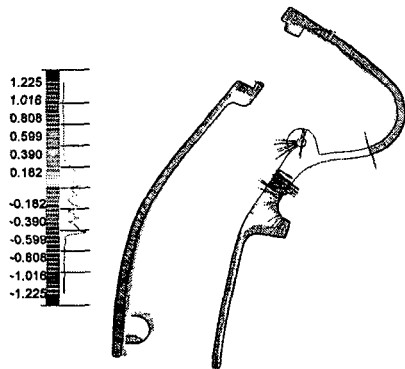


Fig. 8(b) Error distribution in the specified 2 dimensional field of part (II)

으로 예측되는 특정한 2 차원 영역만을 대상으로 하여 형상 정밀도 변화를 관찰하였다. 즉, Fig. 8 에서 나타난 바와 같이 제품 끝단으로부터 x 방향으로 11 mm 떨어져 있는 yz 평면으로 부품을 절단하고 절단된 2 차원 영역에서의 변형 오차의 분포를 관찰하였다.

주조 공정 단계별로 오차의 평균값과 표준 편차의 변화를 Fig. 9 에 정리하여 나타내었다. 먼저 CAD 모델과 RP 부품과의 오차의 평균값이 약 +15 $\mu$ m 로 나타난 반면, RP 패턴과 왁스 부품과의 오차가 약 -180 $\mu$ m 로 가장 크게 나타났고, 왁스 패턴과 금속 시제품과의 오차는 약 -51 $\mu$ m 로 나타났다. 또한 주조 공정의 단계가 진행될수록 RP 부품, 왁스 부품, 그리고 금속 시제품과 CAD 모델과의 오차의 표준 편차가 각각 202 $\mu$ m, 336 $\mu$ m, 461 $\mu$ m 로 점차 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 Figs. 6, 7 에서 보여진 part (I) 의 형상 정밀도 변화 경향과 동일하게 part (II) 에서도 두 번째 단계인 RP 패턴으로부터 왁스 부품을 추출할 때에 가장 큰 수축이 발생하였고, 마지막 단계인 왁스 패턴으로 금속 시제품을 제작할 때에 국부적인 변형으로 인한 형상 및 치수 정밀도 변화가 증가하였다. 또한 공정이 거치면서 발생한 누적된 오차로 인해 주조 공정의 단계가 진행될수록 형상 정밀도가 점차 감소하였다.

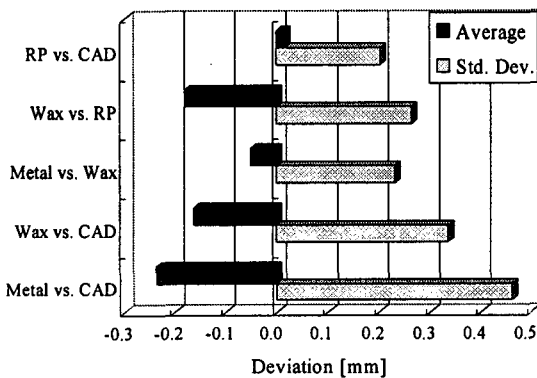


Fig. 9 Averages and standard deviations of error distributions in the process of metal cast prototyping

### 5. 결 론

항공기용 주조 부품을 CAD 모델링하고 광조형

방식의 패속조형 장비를 이용하여 RP 부품을 제작하였고, 이를 마스터 모델로 하여 진공주형 공정으로 왁스 부품을 주조하였다. 그리고 왁스 부품을 패턴으로 이용하여 세라믹 몰드를 제작하고 알루미늄 금속 시제품을 완성하였다. 비접촉 3 차원 스캐너를 이용하여 각 공정 단계별로 제작된 부품들을 측정하고 점 데이터 군을 얻었으며 이들을 비교한 단계별 차이(오차)들의 평균과 표준 오차의 변화를 관찰한 결과, 두 번째 단계인 RP 패턴으로부터 왁스 부품을 주조할 때 상 변화와 온도 변화로 인한 수축이 가장 크게 발생하였고, 마지막 단계인 왁스 패턴으로부터 금속 시제품을 주조할 때 국부적인 형상 변형으로 인한 치수 정밀도 변화가 크게 발생하였으며, 주조 공정 단계가 진행될수록 제작 오차가 누적되어 형상 정밀도가 점차 감소함을 확인하였다.

### 참고문헌

- Ahn, D. G. and Yang, D. Y., "Principle of Rapid Prototyping and its Trends," Journal of the KSPE, Vol. 22, No. 10, pp. 7-16, 2005.
- Im, Y. G., Chung, S. I. and Jeong, H. D., "Development of Investment Casting Technique using R/P Master Model," Journal of the KSPE, Vol. 16, No. 6, pp. 52-57, 1999.
- Jeong, H. D. and Kim, H. Y., "Development of Rapid Tooling using Investment Casting & R/P Master Model," Journal of Korean Foundrymen's Society, Vol. 20, No. 5, pp. 48-53, 2000.
- Choi, S. R., Kim, C. K., Park, K. and Oh, C. H., "Development of Precision Casting Technology for Inlet Gear Box using Selective Laser Sintering," Journal of KSMTE, Vol. 9, No. 1, pp. 30-37, 2000.
- Kim, G. D., "Technology of Rapid Prototyping, Vacuum Casting, and Metal Cast Prototyping," Journal of KSMTE, Vol. 15, No. 2, pp. 17-21, 2006.
- Chung, S., Im, Y., Jeong, H., Jeong, D., Cho, K., Lee, S., Choi, B. and Choi, H., "Rapid fabrication of aluminum shoe mold using vacuum sealed casting process," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 142, No. 2, pp. 326-333, 2003.
- Kim, H. C., Lee, S. and Lee, S. H., "Rapid Tooling Technology for Producing Functional Prototypes

using Ceramic Shell Investment Casting and Patterns Produced Directly from Thermo-Jet 3D Printer,” Journal of the KSPE, Vol. 23, No. 8, pp. 203-210, 2006.

8. Kim, G. D. and Kim, J. Y., “Benchmark Study on Surface Roughness and Mechanical Properties of Rapid Prototypes,” Transactions of KSMTE, Vol. 15, No. 4, pp. 56-62, 2006.