

쾌속조형기를 이용한 정밀주조물의 쾌속제작에 관한 연구

주영철* · 김태원**

Study on the Rapid Manufacturing for Investment Casting

Youngcheol Joo* and Tewan Kim**

요 약 정밀하고 복잡한 형상의 금속 부품을 제작하는데 사용되는 정밀주조법은 왁스형을 만드는 과정을 수작업으로 진행하므로 많은 시간과 비용이 소요되었다. 왁스형 제작공정을 개선하기 위해 쾌속조형기를 이용하는 방법을 제안하였다. SLS형 쾌속조형기를 이용하여 캐스트폼형을 제작하고 여기에 용융된 왁스를 함침시켜 왁스형을 완성한다. 이 방법을 이용하여 스텐레스 스틸 소재의 금속 주분을 제작하였는데, 시간과 비용이 크게 절감되었으며 정밀도도 향상되었다.

Abstract The investment casting process is used frequently to manufacture precise and complex shape metal parts. The previous wax pattern manufacturing process takes long time and high costs because the process is performed by hands. In order to improve the wax manufacturing process, a new process is developed to manufacture the wax pattern by using a rapid prototyping system. A CastForm pattern is made by a Selective Laser Sintering type RP with CastForm powder. The CastForm pattern is dipped in the melted wax liquid, and the melted wax penetrates into the pores of the CastForm pattern. Wax pattern is obtained after cooling the CastForm pattern slowly. A stainless steel part has been manufactured by the suggested process. By obtaining the suggested process the manufacturing time and costs are reduced largely and the accuracy is improved.

Key Words : 3D CAD, Investment casting process, Rapid prototyping, Wax pattern

1. 서 론

쾌속조형기(Rapid Prototyping, RP)가 국내에 보급된 지 10여년이 지난 지금 국내에는 약 100여대의 쾌속조형기가 산업현장에서 이용되고 있다. 그러나 대부분의 쾌속조형기는 폴리머 소재를 기초로 하여 제품을 만들기 때문에 제품의 활용이 3D CAD로 설계한 것을 눈으로 확인하기 위한 형상확인용이나 송풍기 팬이나 프로펠러와 같은 플라스틱 시제품의 실험을 하기 위한 기능성 부품의 일부 제작에 그치고 있다. 그러나 실제 산업체에서는 많은 금속 부품을 사용되고 있고 금형도 많이 이용되고 있으므로 쾌속조형기를 이용하여 금속의 시제품을 빨리 제작하고자 하는 필요성이 대두되고 있다.

쾌속조형기를 이용하여 금속 소재의 제품을 만드는 시도로서 가장 획기적인 것은 SLS(Selective Laser Sintering)형 쾌속조형기에 금속 분말을 사용하여 금속 부품을 제작하는 방법이다. 이때 사용되는 소재는 스텐

레스 스틸이나 철로 이루어진 분말 형태의 모체와 열분해성 폴리머의 결합분말이 혼합된 분말이다. 이 혼합분말에 레이저를 조사하면 금속 분말은 변화가 없으나 열분해성 폴리머 결합분말은 레이저 에너지에 의해서 용융되어 주위의 금속 분말을 결합하는 역할을 한다. 레이저 적층이 끝나고 충분히 냉각한 후 소결되지 않은 분말을 털어내면 원하는 형상의 금속 분말과 폴리머 결합체의 제품을 얻을 수 있다. 이 상태를 그린 제품이라고 부르는데 아직 강도가 충분치 않으므로 그대로 사용할 수는 없다. 그린 제품을 전기로에 넣고 분말야금법과 비슷한 방법으로 용융점이 낮은 금속의 용탕에 담그면, 폴리머 결합체는 소결되어 날아가고 스텐레스 스틸 금속 분말 사이의 빈 공간에 구리 용액이 채워져서 원하는 금속 제품을 얻을 수 있다. 이러한 공정으로 제작한 금속 제품은 알루미늄을 능가하는 강도를 가지고 있어서 50,000회 이상 사용하는 금형으로도 사용이 가능하다[1]. 그러나 사용되는 금속 분말이 고가이고 전기로와 추가 장비의 비용이 많이 소요되며 제품의 정밀도가 떨어져서 현재는 일반화되지 못하고 있다. 또한 철사 형태의 금속 소재가 노즐을 통과하면서 용융되고 용융된 금속을 적층시켜 금속 제품을 제작하는 RP도 개발

*순천향대학교 기계공학과
**순천향대학교 화학공학과
Tel: 041-530-1551

되었으나 정밀도에 문제가 있어서 실용화되지 못하고 있다[2-4]. 쾌속조형기로 직접 폴리머 소재의 물드를 만들고 여기에 용융점이 낮은 저융점합금의 용탕을 넣어 제품을 만드려는 시도가 진행되고 있으나, 이 방법은 금속의 용융점이 쾌속조형기의 폴리머 소재보다 낮아야 한다는 제한이 있어서 널리 사용되기에는 어려움이 있다[5, 6]. 기타 여러 가지 방식의 RP를 이용하여 정밀주조물을 제작하는 방법에 대한 연구가 국내외에서 많이 진행되고 있으나[7-9] 모두 여러번의 음각 물드와 양각 패턴의 제작과정을 거쳐서 최종제품을 만드는 번거로운 방식이며 제품의 정밀도 측면에서 정밀 부품의 제작에 이용하기에는 어려움이 있다. 이에 따라 기존에 개발되어 있는 신뢰성 있는 RP를 이용하여 고가 장비의 추가 구입 없이 신속히 금속 제품을 제작하는 신뢰성 있는 공정의 개발이 절실히 요구되어지고 있다.

본 연구에서는 쾌속조형기를 이용하여 정밀주조법에서 사용하는 왁스형을 만들어 주조물을 쾌속제작하는 공정을 개발하고자 한다. 정밀주조법에는 몇가지 방식이 있으나 그중 대표적인 방법이 인베스트먼트 주조법 (investment casting process) 혹은 로스트왁스 주조법 (lost wax casting process)이라고 불리는 왁스를 이용한 방법이다. 이 방법은 제작하려는 제품과 동형의 모형을 왁스로 만들고, 이 모형의 둘레에 유동성이 있는 조형제를 흘려서 모형을 그 속에 매몰한 다음, 건조가열로 주형을 굳히고 왁스를 용해시켜 주형 밖으로 흘려 배출하여 주형을 완성한다. 이 주형에 고온의 용탕을 부어 주물을 얻는다. 이 과정에서 왁스형을 얻기까지 모형과 시작금형의 제작이 수작업으로 이루어져서 많은 시간과 비용이 소요된다[10-12]. 이에 반하여 본 연구에서 개발한 쾌속조형기를 이용하는 공정에서는 3D CAD 데이터를 이용하여 캐스트폼 분말로 캐스트폼 형을 만들고 오븐에서 왁스를 함침시켜 왁스형을 직접 만들 수 있어서 시간과 비용이 크게 절약된다.

2. 제작 과정

2.1 쾌속조형기를 이용한 캐스트폼형 제작

본 연구에 사용된 쾌속조형기는 선택적 레이저 소결법(selective laser sintering, SLS)을 이용하는 장비(Sinterstation 2500^{plus}, 미 DTM사, Figure 1)로서 분말 형태의 재료를 사용한다. 사용 가능한 분말에는 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 캐스트폼 분말을 사용하였다. Table 1은 캐스트폼 분말의 특성을 나타낸다[13].

SLS 방식은 먼저 제작에 사용되는 분말 형태의 재료를 분말 카트리지에 넣고 제작공간 내부를 99.9% 액화 질소로 충전시키면서 분말과 주변부를 80~85°C의 분위

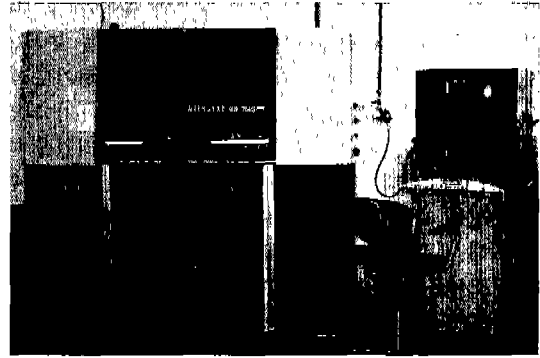


Figure 1. 연구에 사용된 SLS 형식의 쾌속조형기(Sinterstation 2500^{plus}, 미 DTM사)

Table 1. 캐스트폼 분말의 특성

Power Properties	Value
MSDS	CastForm PS (DCN: 8001-20117)
Specific Gravity, 20°C	0.86
Powder Density, Tap	0.46 g/cm ³
Particle Size Range, 90%	25 to 92 microns
Average Particle Size	62 microns
Glass Transition	89°C
Melt Point (Wax)	63°C
Part Properties (after waxing)	Value
Tensile Strength	2840 kPa
Tensile Modulus	1604 kPa
Impact Strength (Notched Isod)	11 J/m
Surface Finish (Ra)	13 (Processed), 3 (After Polishing) microns

기로 만든다. 원하는 제품을 적층시킬 빌드챔버 위에서 25 W CO₂ 레이저가 제품의 단면정보에 따라 빌드챔버의 분말에 지름 50 μm의 레이저빔을 조사하면 분말은 레이저에 광반응을 해 딱딱하게 소결된다. 사용된 레이저 파워는 8.5 W이고 제품의 표면 향상을 위해 아웃라인에 2 W의 출력과 빔 읍셋값을 사용한다. 한 층이 소결된 후 빌드챔버가 0.15 mm 내려가면 롤러가 분말 카트리지에서 분말을 0.254 mm 밀고 지나가면서 빌드챔버 위에 새로운 분말의 층을 형성한다. 이 층에 다시 레이저가 다음 단면의 형상을 조사하여 소결하는 방식으로 한층씩 쌓아 나가면서 원하는 형상을 적층하여 제작

한다. 제품을 적층하는 과정에서 제품의 높이가 늘어나면서 제품 내부의 열용량이 늘어나서 레이저를 조사받지 않은 분말이 제품에 들어붙는 현상이 발생하기도 한다. 이를 막기 위해 제품 적층 높이가 2.54 mm가 되었을 때 분위기 온도를 3°C 내리고 5.08 mm가 되었을 때 다시 1°C 내린다. 이후 적층 높이 152.4 mm 마다 분위기 온도를 1°C씩 내린다. 제작이 끝난 후 열변형을 막기 위해 제품이 상온으로 식을 때까지 기다린 후에 레이저 조사를 받아 소결된 부분에서 주변의 분말을 털어내는 후처리를 하면 원하는 제품을 얻을 수 있다. 후처리는 솔과 압축공기를 사용하는데 압력이 1.5기압을 넘지 않아야 한다. 털어낸 분말은 새로운 분말과 혼합하여 다시 사용이 가능하다. 제작하고자 하는 물체의 3D CAD 데이터를 Figure 2에 나타내었고, 캐속조형기로 제작한 캐스트폼형을 Figure 3에 나타내었다.

2.2 왁스 함침을 통한 왁스형 제작

캐스트폼형은 취약하여 쉽게 부서지므로 정밀주조 공정을 거칠 수 없다. 이 캐스트폼형에 적당한 강도를 주기 위하여 왁스를 함침시킨다. 사용된 왁스는 J. F. McCaughin Red Dip Wax#2-D504이다. 왁스를 오븐(Isotemp Programable Oven 838F, 미 Fisher Scientific 사)에서 80°C로 가열하면 빨간 잉크모양의 점성이 낮은 액체상태로 녹는다. 액체 상태의 오븐에 캐스트폼형을

넣으면 용융된 왁스가 분말 입자로 이루어진 캐스트폼형의 공극에 함침된다. 본 연구에서는 왁스 함침과정시 예열시간 3분, 함침시간 4분으로 하였다. 함침시간이 너무 길면 제품에 과다한 함침작용이 일어나 제품의 세밀한 부분이 서로 엉겨붙는 현상이 발생하고, 함침시간이 너무 짧으면 왁스가 충분히 함침되지 못하여 강도가 약해진다. 함침작용이 끝나면 오븐 내부의 온도를 매 5분마다 2°C씩 내려 상온까지 낮춘다. Figure 4에 오븐에서 왁스를 캐스트폼형에 함침시키는 과정을 나타내었으며, Figure 5에 완성된 왁스형을 나타내었다.

2.3 정밀주조공정을 통한 정밀주조물 제작

완성된 왁스형에 주조공정을 할 수 있도록 왁스로 보강재, 탕구, 탕도 등을 붙인다. Figure 6에서 보는 바와 같이 이 왁스형을 슬러리 형태의 인베스트먼트 재료속에 담갔다가 꺼내어 얇게 피복을 입힌다. 인베스트먼트 재료는 내화성 재료로 고온용과 저온용이 있는데, 전자는 규사, 알루미나, 마그네시아 등에 점결제로 규산에스텔, 규산나트륨 등을 가한 것이고, 후자는 규사, 아스베스트파이버 등에 소석고를 가하고 물을 배합한 것이 많이 사용된다. 피복을 충분히 건조시킨 후 슬러리에 담갔다 꺼내는 작업을 되풀이하여 인베스트먼트 재료의 피복층이 두꺼워지도록 한다. Figure 7과 같이 피복층이 충분히 두꺼워져 주형의 역할을 할 수 있을만한 강도를 갖게되면 이를 가압분위기의 노내에 거꾸로 매달

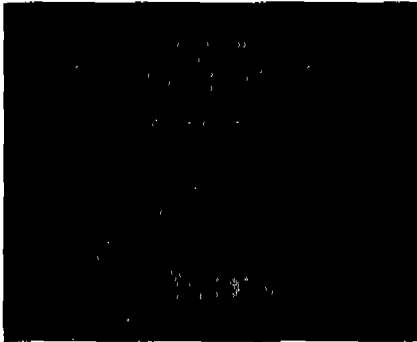


Figure 2. 제작하고자 하는 제품의 3D CAD 데이터

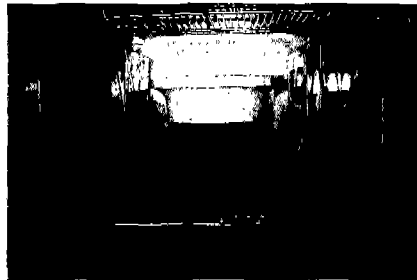


Figure 4. 오븐에서 왁스를 캐스트폼형에 함침시키는 과정

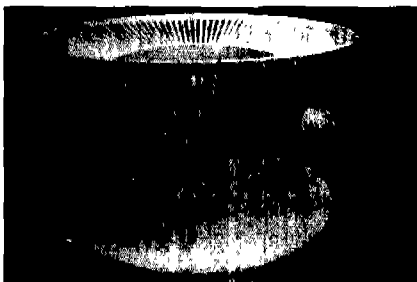


Figure 3. 캐속조형기로 제작한 캐스트폼형

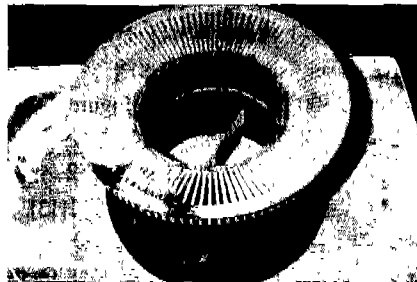


Figure 5. 완성된 왁스형



Figure 6. 주형틀 제작과정

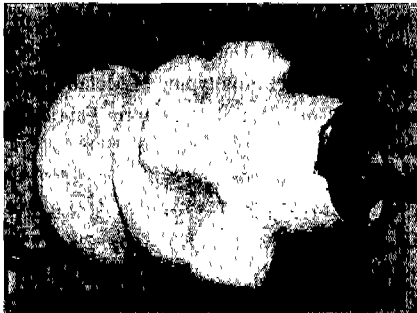


Figure 7. 완성된 인베스트먼트재 주형틀

아 놓고 뜨거운 수증기를 가하여 왁스형과 탕구, 탕도 등의 보강재가 모두 녹아내려 주형 밖으로 배출되도록 한다. 그 후 주형의 강도를 증가시키고 주형내 남아있는 왁스를 완전히 제거하기 위하여 1000°C에서 1~2시간동안 소성하여 주형틀을 완성한다. 주조성을 좋게 하기 위하여 완성된 주형틀을 미리 예열한 후 용융된 금속의 용탕을 주탕한다. 주물의 열응력을 최소화 하기 위해 서서히 금속을 응고시킨 후 주형을 조심스럽게 파괴해가면서 주물을 꺼낸다. 이 주물에 후처리를 하여 Figure 8과 같은 최종 금속주물의 완성품을 얻는다.

3. 고 찰

3.1 왁스형 제작의 시간과 비용 절감

기존의 정밀주조공정에서 왁스형을 제작하는 과정은 2차원 설계 도면을 근거로 금속, 목재, 합성수지를 이용하여 모형을 제작하고, 이 모형을 이용하여 왁스형 제작용 시작금형을 제작한다. 왁스형 제작용 시작금형은 보통 저융점금속(예, 주석-창연합금)이나 강으로 만들며, 때로는 목재로 만들 때도 있다. 강으로 만들 때는 직접 금형재에 공동부를 파서 만들며, 저융점금속을 사용할 때는 모형을 사용하여 금형을 주조하여 만든다. 때로는 원형을 만들지 않고 금형을 직접 절삭하여 만들기도 한다. 제작된 금형에 용융된 왁스를 주입하여 왁스형을

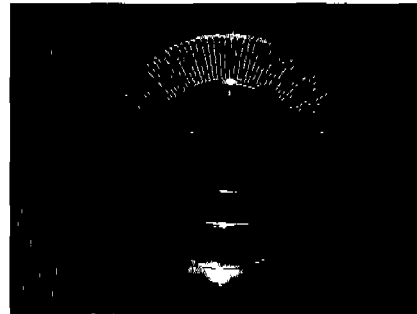


Figure 8. 최종 금속주물

제작한다. 이와 같이 왁스형을 제작하는데 여러 단계의 과정을 거치므로 시간과 비용이 많이 소요된다. 또한 모형 제작과 시작금형 제작이 대부분 수작업으로 진행되고 왁스형의 응고시 수축도 많이 일어나므로 정밀도가 많이 떨어지게 된다.

이에 반하여 본 연구에서 제안한 폐속조형기를 이용하는 왁스형 제작공정은 3D CAD를 이용하여 캐스트 폼형을 만들고 여기에 왁스를 함침하여 왁스형을 제작하는 간단한 과정으로 이루어지므로 제작 시간과 비용이 획기적으로 절감되고 정밀도도 기존 공정에 비하여 상대적으로 향상된다. Table 2에 기존의 금형을 이용하는 방법과 폐속조형기를 이용하는 방법을 비교하였다. 제작 기간은 50일에서 3일로 획기적으로 줄어들었으며, 제작 비용도 1000만원에서 200만원으로 크게 줄어들었다.

제작하고자 하는 제품이 최종 양산제품이라면 기존의 공정을 따라서 제작하여야겠지만, 제품 개발단계에서 시제품을 제작하려고 한다면 기존의 공정보다는 폐속조형기를 이용하는 공정이 왁스형 제작에 큰 도움을 줄 것이다.

3.2 제품의 치수 정밀도

3D CAD로 설계한 데이터를 RP로 캐스트폼형을 만드는 과정에서 치수의 변형이 일어나는데, 치수변형의 정도는 빌드챔버의 가열 온도와 냉각속도, 레이저 빔의 파워, 제품의 모양과 크기에 따라 변한다. 캐스트폼을 왁스형으로 만드는 과정에서도 치수변형이 일어나는데, 오븐 내부의 온도와 함침 시간이 가장 중요한 변수이며 제품의 모양과 크기에 따라서도 치수변형의 차이가 난다. 완성된 왁스형을 이용하여 주형을 만들고 이 주형

Table 2. 왁스형 제작법에 따른 기간과 비용의 비교

	기존의 제작법	폐속조형기를 이용한 제작법
제작 기간	50일	3일
제작 비용	1000만원	200만원

으로 주물을 제작하는 과정에서 가장 큰 치수변형이 일어나는데, 금속의 종류, 용탕의 온도, 냉각 속도, 제품의 크기와 모양 등이 중요한 변수이다. 이러한 각 과정의 치수 변형을 고려하여 최종 제품의 치수가 설계 치수의 공차 범위내에 들 수 있도록 stl 파일을 일정 비율로 확대하여 최초의 과정인 캐스트폼을 제작한다. 본 연구에서는 설계된 CAD 데이터보다 1.4% 크게 하여 캐스트폼형을 제작하였다. 제품의 설계치와 기계가공을 가한 후 최종 금속 주조 완제품의 측정치수를 비교한 결과 일부 수치가 오차의 한계를 벗어났지만 전체적으로 측정치수가 설계치수와 근접한 만족할만한 값을 나타내었다. 이번 연구에서는 초기에 왁스형 제작에 시행착오를 되풀이하였고 과정의 수행시간이 충분치 않아서 각 과정마다 치수변형에 대한 측정 및 고찰을 충분히 하지 못하였다. 향후 여러 가지 크기와 형상들의 시편이 각 과정마다 얼마나 혹은 어떻게 변형하는지에 대한 체계적인 연구가 수행되어져야 할 것이다.

4. 결 론

폐속조형기를 이용하여 정밀주조에 사용되는 왁스형을 폐속 제작하는 공정을 개발하였다. 이 공정은 기존의 금형이나 수작업으로 왁스형을 제작하던 방법에 비하여 제작기간을 크게 단축시켰으며 제작비용도 절감할 수 있었다. 또한 3차원 CAD 데이터를 직접 이용함으로써 수작업에 비하여 정밀도를 크게 향상시킬 수 있었다. 이 공정은 제품을 대량으로 생산하는 양산 공정에 적용하기에는 어려움이 있지만 제품의 개발 초기에 시제품을 빨리 제작하는 데에는 커다란 이점이 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 항공우주기술개발사업의 연구지원과 천지산업(주)의 연구협조로 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] C. K. Chua, and K. F. Leong, "Rapid Prototyping:

Principles & Applications in Manufacturing", Singapore, John Wiley & Sons, 1997.

[2] A. Fischer, and S. Park, "Reverse Engineering: Multi-Level of Detail Models for Design and Manufacturing", Int. J. of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, pp. 566-572, 1999.

[3] Sehyung Park, Yong-Ak Song, and Sungdo Ha, "Comparison Between Five-axis Machining and Rapid Tooling for Manufacture of a Free-form Shaped Functional Part", Proceedings of Israel-Korea Geometric Modeling Conference, Tel Aviv, pp. 41-45, Feb. 1998.

[4] Yong-Ak Song, Sehyung Park, Kyunghyun Hwang, Doosun Choi, and Haeseong Jee, "3D Welding and Milling for Direct Prototyping of Metallic Parts", Proceedings of the '98 Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin USA, September 1998.

[5] 주영철, 송오성. "폐속조형 듀라폼 성형체에서의 배치 각 변화에 따른 주얼리주조모형의 형상요소변화", 한국주조공학회지, Vol. 21, No. 5, pp. 290-295, 2001.

[6] 주영철, 이창훈, 송오성, 송미희, "주얼리용 마스터패턴의 폐속제작에 관한 연구", 산학기술성공학회 2002년 춘계학술대회, pp. 67-69, 5월, 2002.

[7] K. Cooper, and G. Williams, "NASA on the Fast Track: A case Study in Cost Savings with the Application of RP and Investment Casting", Rapid Prototyping and Manufacturing Conference, Cincinnati, Ohio, U.S.A., May 15-17, 2001.

[8] 안동규, 이상호, 양동열, "연속형 가변 적응 폐속 조형과 응용기술을 이용한 3차원 제품의 정형가공에 관한 연구", 한국소성가공학회지, Vol. 10, No. 6, pp. 500-508, 2001.

[9] 안동규, 이상호, 최홍석, 김기돈, 양동열, "발포폴리스티렌 폼을 이용한 단속형 가변적응 폐속조형공정과 응용기술을 이용한 3차원 기능성 제품 제품 제작에 관한 연구", 한국소성공학회 2001년도 추계학술대회 논문집, pp. 190-194, 2001.

[10] 김동항, "기계공작법", 청문각, 1991.

[11] 염영하, "신편 기계공작법", 동명사, 1983.

[12] 강명순, 손명환, "최신 기계공작법", 보문당, 1995.

[13] "The Sinterstation System Reference Guide", DCN: 8002-00021-001, DTM, 2000.