

|||||||
論 文
 |||||

쾌속조형 듀라폼몰드와 저융점합금을 이용한 주얼리용 마스터패턴 제작에 관한 연구

주영철[†] · 송오성^{*}

Study of Manufacturing Jewelry Master Pattern by Using the DuraForm Rapid Prototyping Mold and the Low Melting Alloy

Youngcheol Joo[†] and Ohsung Song^{*}

Abstract

A novel jewelry master pattern manufacturing process which reduces manufacturing steps by employing a Duraform rapid prototyping mold and a low melting alloy has been suggested. The novel process follows the steps of 'jewelry 3D CAD design → Duraform RP mold → low melting alloy master pattern' while the previous process follows more complicated steps of 'jewelry idea sketch → detailed drawing → wax carving → flask → silver master pattern.' An upper and a lower part of molds have been manufactured of Duraform powder, of which melting point is 190°C. A master pattern was manufactured by pouring a low melting alloy of Pb-Sn-Bi-Cd, so called Woods Metal, of which melting point is 70°C, into the mold. The master pattern is a shape of a disk of 20 mm diameter that contains various design factors. The variations of dimensions, surface roughness, surface pore ratio were measured by an optical microscope, a surface roughness profilometer, and a Rockwell hardness tester. The pattern made of low melting alloy has sufficient surface hardness, roughness, and surface pore ratio to be used as the jewelry master pattern.

(Received September 18, 2002)

Key words : Casting, Jewelry, Low melting alloy, Master pattern, Rapid prototyping

1. 서 론

주얼리 제품은 일반적으로 귀금속과 보석을 채용한 장신구 제품을 통칭하며 다품종 소량생산을 통하여 매우 큰 부가가치 창출이 가능한 장점이 있다. 특히 혼수 예물용 문화적 수요 때문에 매년 3.5조원 이상의 거대시장을 형성하는 특징이 있어 기존 공정에 비해 원가절감 및 개발기간의 단축에 따른 신기술이 개발될 경우 더욱 큰 부가가치 창출이 가능하다[1]. 이러한 배경에서 주얼리 제품의 디자인개발을 포함한 마스터패턴의 제작까지의 공정은 통상 최종 제품가격의 20% 정도를 차지하므로 전체 주얼리 시장을 고려하여 이미 500억원 이상의 시장이 형성되었다고 판단된다.

기존의 주얼리 제품 중 특히 귀금속 주얼리 제품의

일반 공정은 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 우선 디자이너가 2차원적인 디자인 시안을 작성하고 이를 정밀도면에 옮긴다. 이를 바탕으로 숙련된 기술자가 왁스로 3차원 가공을 하고 이를 석고플라스크를 이용하여 은으로 마스터패턴을 제작한다. 마스터패턴을 은으로 제작하는 이유는 은이 후속 왁스의 대량복제 작업중 마모에 견딜 수 있는 견고한 기계적 물성을 가지고 있으며 경제성, 표면가공성, 내식성을 고려하여 여러 가지 이점이 있기 때문이다. 이 마스터패턴을 이용하여 고무틀을 사용하여 같은 모양새의 음각 고무몰드를 제작하고 이를 이용하여 용융왁스를 주입하여 다량의 왁스형을 제작한다. 이를 이용하여 1배치(batch)에 통상 150~400개 정도의 최종제품을 제작하는 복잡한 공정을 거친다[2,3].

순천향대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Soonchunhyang University)

*서울시립대학교 신소재공학과(Department of Materials Science and Engineering, The University of Seoul)

[†]E-mail : ychjoo@sch.ac.kr

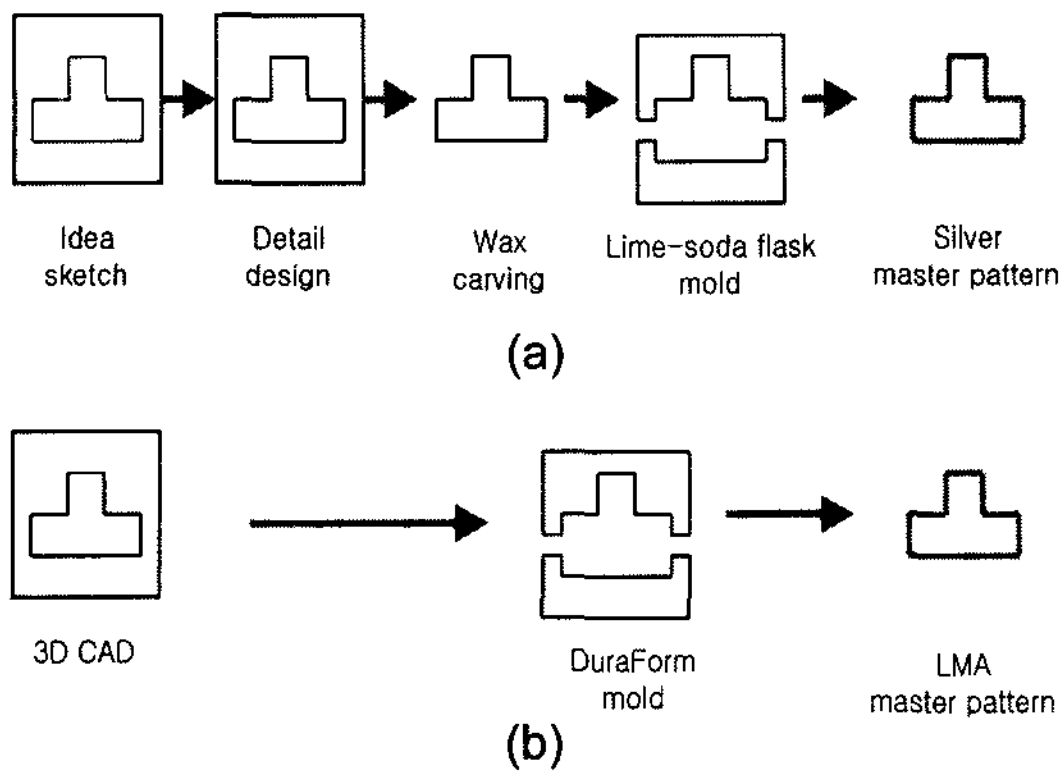


Fig. 1. Process for the jewelry master patterns of (a) conventional silver master pattern (10 days), and (b) LMA master pattern (3 days).

이러한 여러 공정 중 특히 디자인 정밀도면을 기초로 왁스를 가공하고 은 마스터패턴을 제작하는 공정이 핵심가공공정으로 20년 이상 숙련된 전문가가 통상 72 시간 이상의 작업시간을 소요하여 진행하며 이분야 전문가의 수요가 높고 급여도 가장 많은 것으로 알려져 있다. 그러나 최근 이러한 전문숙련기술자의 노령화 및 3D분야의 기피현상으로 이 공정의 작업비와 작업시간은 계속 상승하는 추세여서 최종제품의 가격상승을 유발하고 있다. 따라서 대부분 수작업에 의존하는 기존 공정을 자동화시키고 복잡한 제조공정을 단순화시키는 새로운 공정의 개발이 절실히 요구되고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 본 연구진은 이미 3차원 CAD와 SLS(Selective Laser Sintering)형 쾌속조형기를 사용하여 상기 왁스공정을 대체함으로써 기존의 작업시간을 대폭 줄이면서 듀라폼 성형체를 직접 마스터패턴으로 사용 가능함을 보고한 바 있다[1]. 마스터패턴 제작을 위한 몰드의 물성으로는 치수변형이 작아야 하며, 주입물과의 계면반응이 적어야 한다. 또한 최종적인 금속패턴이 제작되면 선택적으로 제거가 용이하여야 할 뿐 아니라 제작비용도 저렴하여야 한다. 듀라폼을 사용한 몰드는 주영철과 송오성[1]에 의하면 이러한 요건을 만족하는 것으로 보고된 바 있다. 기타 여러 가지 방식의 쾌속조형기를 이용하여 정밀주조물을 제작하는 방법에 대한 연구가 국내외에서 많이 진행되고 있으나[4-6] 모두 여러번의 음각몰드와 양각패턴의 제작과정을 거쳐서 최종제품을 얻는 번거로운 방식이다.

본 연구에서는 Fig. 1(b)와 같이 기존의 공정을 더욱 단순화시켜 듀라폼 성형체를 몰드로 사용하고 저융점합금을 주얼리용 마스터패턴으로 사용할 수 있는지를 확인하는 기초실험을 진행하고자 하였다. 본 연구에서 제안한 저융점합금(상용명: 우드메탈)은 27%Pb-13%Sn-10%Cd-50%Bi계로서 융점이 70°C이므로 융점이 190°C인 듀라폼 성형체를 몰드로 사용할 수 있다. 이러한 저융점합금은 이미 화재진화용 스프링클러의 밀봉장치로 강도와 내구성을 확인받은 재료이고, 얼마전까지만 해도 인쇄용 식자 재료로서 널리 사용되었던 신뢰성있는 재료라는 점, 가격이 18,000원/kg 정도로 기존의 은보다 매우 저렴하다는 점을 고려하여 채택하였다. 특히 용해와 주입공정이 모두 100°C 이하에서 진행되므로 Bi, Cd 등의 흡입을 방지하는 환기장치 내에서 진행된다면 화상방지면에서 매우 안전한 재료라는 특징이 고려되었다[7].

이러한 배경에서 본 연구는 3D CAD로 주얼리용 요소가 포함된 시편을 설계하고 이를 쾌속조형기를 이용하여 듀라폼 몰드로 만든 후 여기에 저융점합금의 용탕을 주입하여 패턴을 만들었다. 패턴의 표면조도, 강도, 치수정밀도 등을 측정·분석함으로써 주얼리용 마스터패턴으로 사용가능한지를 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 듀라폼 몰드의 제작

상용 3D CAD 프로그램인 CATIA를 사용하여 Fig. 2(a)에 나타낸 직경 20 mm, 두께 3 mm의 여러 가지 형상요소를 가진 시편(test elements group: TEG) 패턴을 디자인하고 이를 위하여 Fig. 2(b)에 나타낸 크기 30×30×12 mm³의 음각 몰드 파일을 제작하였다.

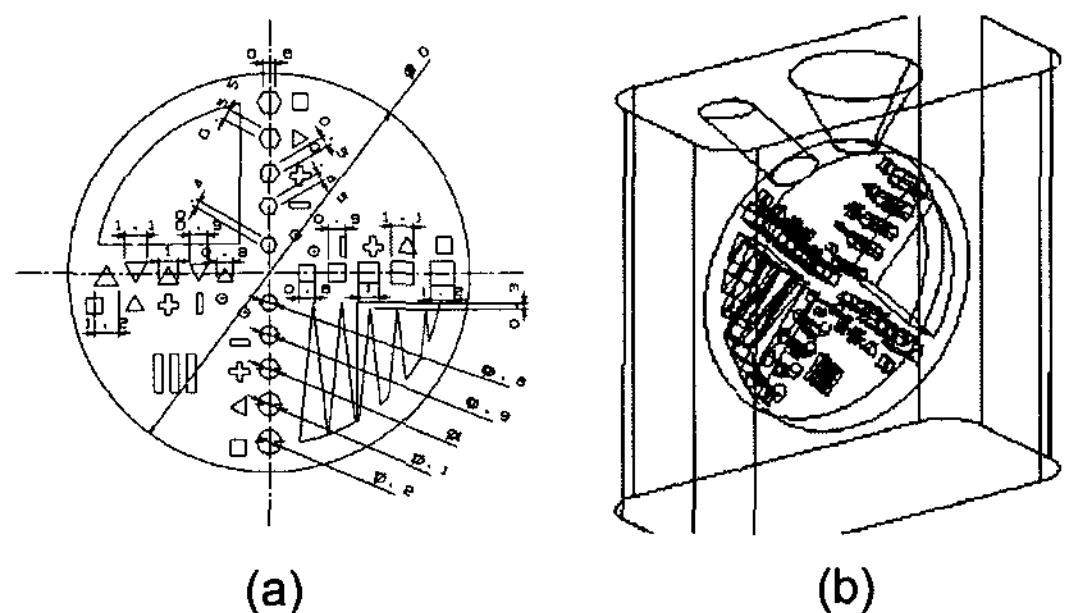


Fig. 2. Mold designs (a) TEG pattern, and (b) Duraform mold

TEG 패턴의 디자인은 시편의 표면조도를 확인하기 위하여 1사분면과 3사분면을 평면 그대로 남겨 두었으며 3사분면에는 시편의 고유번호를 표시하였다. 구멍의 표현가능 한계를 보기 위해 시편의 중앙에서 방사형으로 원형, 육각형, 사각형, 삼각형의 구멍을 지름을 0.8 mm에서 1.2 mm까지 변경시켜가며 설계하였다. 원형구멍은 주얼리에서 가장 많이 쓰이는 요소이므로 마스터패턴으로서 구현 가능한 최대크기를 알기 위해 배치하였고, 정육각형, 정사각형, 정삼각형의 요소들은 각각 둔각, 직각, 예각의 요소들의 구현정밀도를 확인하기 위해 설계하였다. 돌출 부분의 구현가능 한도를 확인하기 위해 4사분면에 뾰족한 삼각형을 설계하였으며, 주조시 용탕의 주입거리 및 주조능을 확인하기 위해 크기별로 배치하였다. 수직평면의 표면조도를 확인하기 위해 2사분면에 수직평면을 설계하였다.

듀라폼 성형을 위한 몰드는 깔대기 모양의 용융금속 주입구와 가스 배출과 응고시 잉여금속 보충을 위한 원통형의 압탕(riser)을 설계하였다. 몰드는 상형과 하형으로 나누어지는 각각 30×30×6 mm³ 크기의 분리형 몰드로 제작하였다. 각 몰드마다 3개 음, 양각 가이드를 넣어 정렬과 결합이 쉽게 이루어지도록 하였다.

상기와 같이 준비된 몰드용 3D CAD 데이터는 stl(stereo-lithography) 양식으로 변환시켜 쾌속조형기를 사용하여 적층두께 0.1 mm, 배치각 0°의 조건으로 제작하였다. 제작에 사용된 SLS(Selective Laser Sintering) 방식의 쾌속조형기(Sinterstation 2500 plus, 미국 DTM사) 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 제

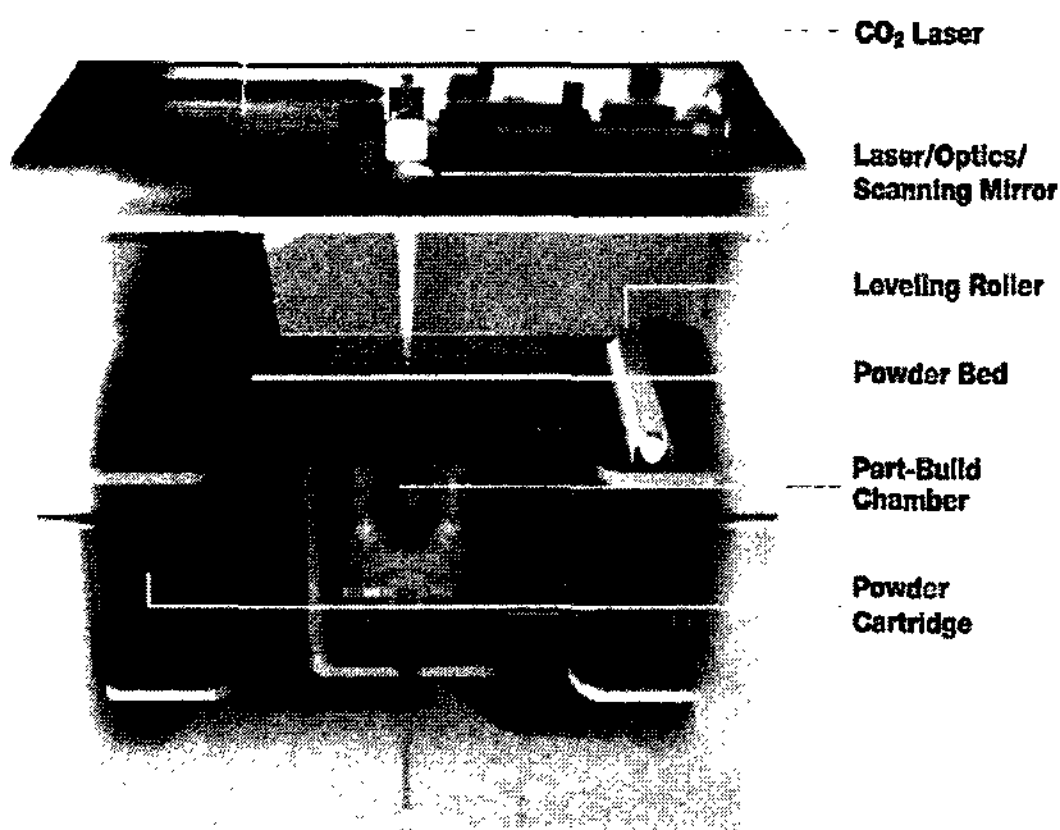


Fig. 3. Schematic illustration of a SLS Rapid Prototype (Sinterstation 2500plus, DTM)

작에 사용되는 분말을 분말 카트리지에 넣고 제작공간 내부를 질소로 충전시키면서 152°C~158°C의 분위기를 만든다. 원하는 제품을 적층시킬 빌드챔버 위에서 25 W CO₂ 레이저가 제품의 단면정보에 따라 빌드챔버의 분말에 지름 50 μm의 레이저빔을 조사하면 분말은 레이저에 의한 광반응으로 딱딱하게 소결된다. 한 층이 소결된 후 빌드챔버가 일정한 높이만큼 내려가면 롤러가 분말 카트리지에서 분말을 밀고 지나가면서 빌드챔버 위에 새로운 분말의 층을 형성한다. 이 층에 다시 레이저가 다음 단면의 형상을 조사하여 소결하는 방식으로 한층씩 쌓아 나가면서 원하는 형상을 적층하여 제작한다. 제작이 끝난 후 열변형을 막기 위해 제품이 상온으로 식을때까지 기다린 후에 레이저 조사를 받아 소결된 부분에서 주변의 분말을 털어내는 후처리를 하면 원하는 제품을 얻을 수 있다. 털어낸 분말은 다시 사용이 가능하다. 최종적으로 완성된 듀라폼 몰드를 Fig. 4(a)에 나타내었다.

적층두께는 성형체의 제작비와 직접적인 연관을 갖는 중요한 변수로서, 적층두께가 클수록 층수가 작아져서 제작시간과 제작비가 줄어들지만 정밀한 형상을 얻지 못한다. 일반적으로는 0.1 mm의 적층두께가 널리 사용되고 있으므로 본 실험에서도 0.1 mm의 적층두께를 채택하였다. SLS 방식의 쾌속조형기는 다양한 재질을 지원하지만 특히 듀라폼이 국내에서 소모되는 SLS 분말의 주종을 이룬다. Table 1에 나타낸 바와 같이

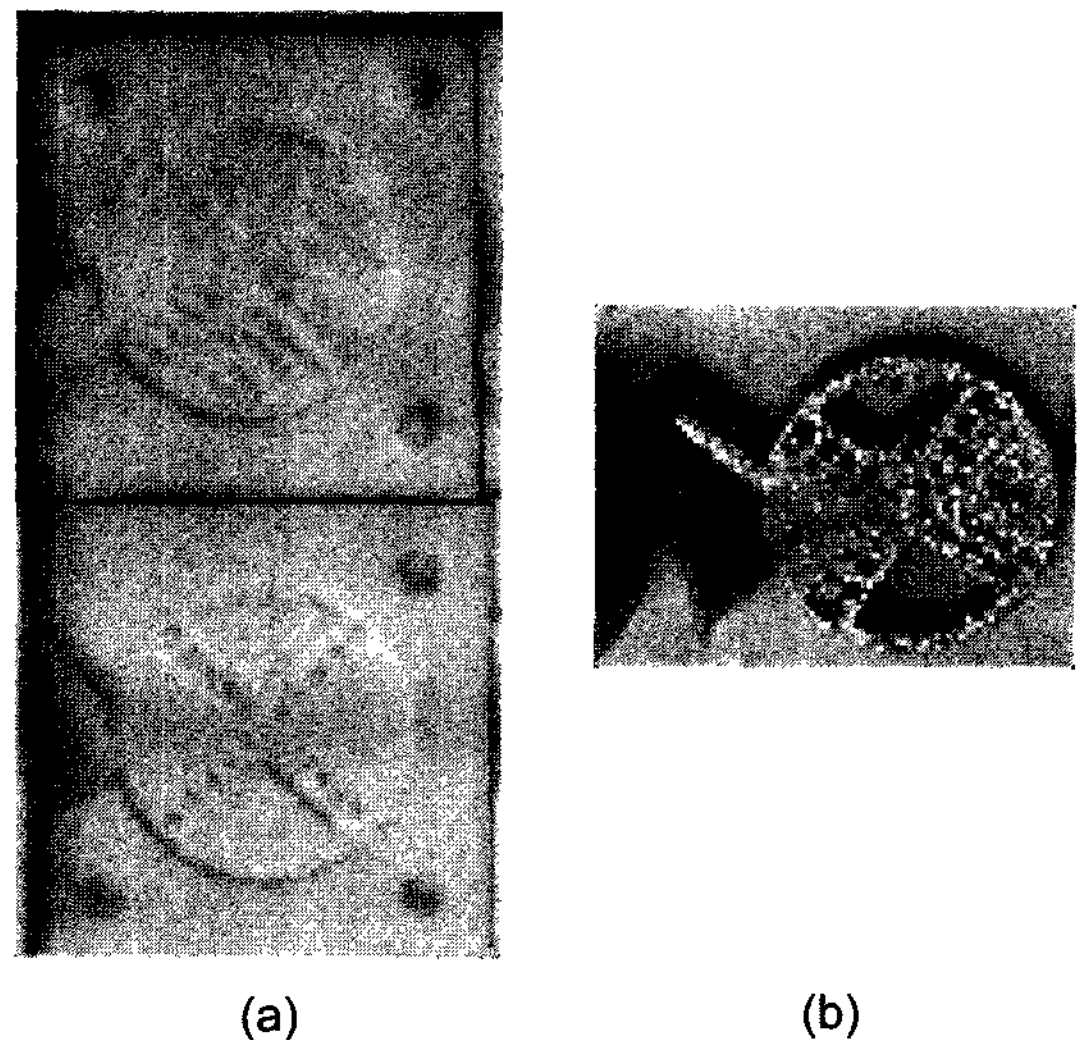


Fig. 4. Images of (a) Duraform molds, and (b) a master pattern.

Table 1. Properties of Duraform Polyamide powder and part

Powder Property	Value	Part Property(SLS processed)	Value
MSDS	DuraForm Polyamide	Tensile Strength at Yield	43 MPa
Specific Gravity, 20°C	0.97	Tensile Modulus	1517 MPa
Powder Density, Tap	0.59 g/cm ³	Tensile Elongation at Break	8%
Average Particle Size	58 microns	Impact Strength(Notched Izod)	216 J/m
Particle Size Range, 90%	25 to 92 microns	Surface Finish, Ra(upper facing)	8.5 μm
Melting Point	184°C	Chemical Resistance	Alkalines, hydrocarbons, fuels and solvents

폴리아미드계의 폴리머분말인 듀라폼은 분말체의 기계적 특성이 우수하며 190°C 이하의 저온 융점을 가지고 있다[8]. 특히 평균 구형분말의 입경이 54 μm로서 섬세한 표면처리가 요구되는 주얼리 제품의 마스터패턴 작업에 표면정밀도를 우수하게 구현할 수 있는 장점이 있다.

2.2 저융점 합금을 이용한 정밀주조

27%Pb-13%Sn-10%Cd-50%Bi 조성의 70°C 융점을 가진 저융점합금(우드메탈)을 400 g을 칭량하여 스테인리스 도가니에 장입하고 산소-부탄가스 토치와 전기발열체를 이용하여 후드 안에서 Bi, Cd의 증기를 제거하며 용융시켰다. 완성된 용탕은 곧 준비된 실온상태의 듀라폼 몰드에 주입하였다. 2개의 상·하형틀로 이루어진 몰드는 접촉면에 있는 3개의 음·양각 가이드를 이용하여 정렬시킨 후 탄성이 있는 테프론 테이프를 이용하여 전체를 감아 이음매가 밀착 되도록 하여 한번의 용탕으로 주입 가능하도록 하였다. 이 때 듀라폼의 형상 강도를 고려하여 용탕을 중력에 의해서만 장입되고 압탕에 충분히 용탕이 올라오도록 장입하였다. 10분 후에 몰드를 이형시켜 주물을 완성하였다.

2.3 마스터패턴의 분석

완성된 저융점합금 마스터패턴은 광학현미경을 이용하여 원형, 육각형(둔각), 정사각형(직각), 정삼각형(예각) 요소들을 크기별로 정량적으로 측정하였다. 한편 마하사의 탐침식 표면조도기를 활용하여 1 mm 주사범위에서 몰드와 패턴의 평균표면조도를 모두 측정하였다. 표면조도 측정이 끝난 시편은 2000번의 연마지를 활용하여 표면을 연마하고 Rockwell 경도측정기를 사용하여 C모드로 측정하고 이때의 표면기공 등 표면의 미세구조를 광학현미경으로 다시 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마스터패턴의 분리와 형상

Fig. 4(a),(b)에 나타난 바와 같이, 완성된 패턴은 별도의 이형재 도포없이 매우 쉽게 몰드로부터 분리가 가능하였다. 따라서 저융점합금은 듀라폼몰드와 계면반응 없이 용이하게 분리가 가능하다고 판단된다.

3.2 주요형상별 치수변화

Fig. 5에 지름 0.8~1.2 mm 크기의 여러 가지 모양의 구멍의 설계치수와 실제 마스터패턴의 제작치수를 나타내었다. 원형과 정사각형은 원래 설계치수보다 약 25% 더 크게 형성되고 육각형은 약 12% 크게 형성되는 특성이 있었다. 이는 마스터패턴의 구멍이 음각몰드에서는 핀의 형상으로 표현되는데, 지름 0.8~1.2 mm의 가는 핀은 미성형 분말을 털어내는 과정에서 파손의 위험이 크기 때문에 미성형 분말을 완전히 제거하지 못하였기 때문이라고 판단된다. 따라서 주얼리 요

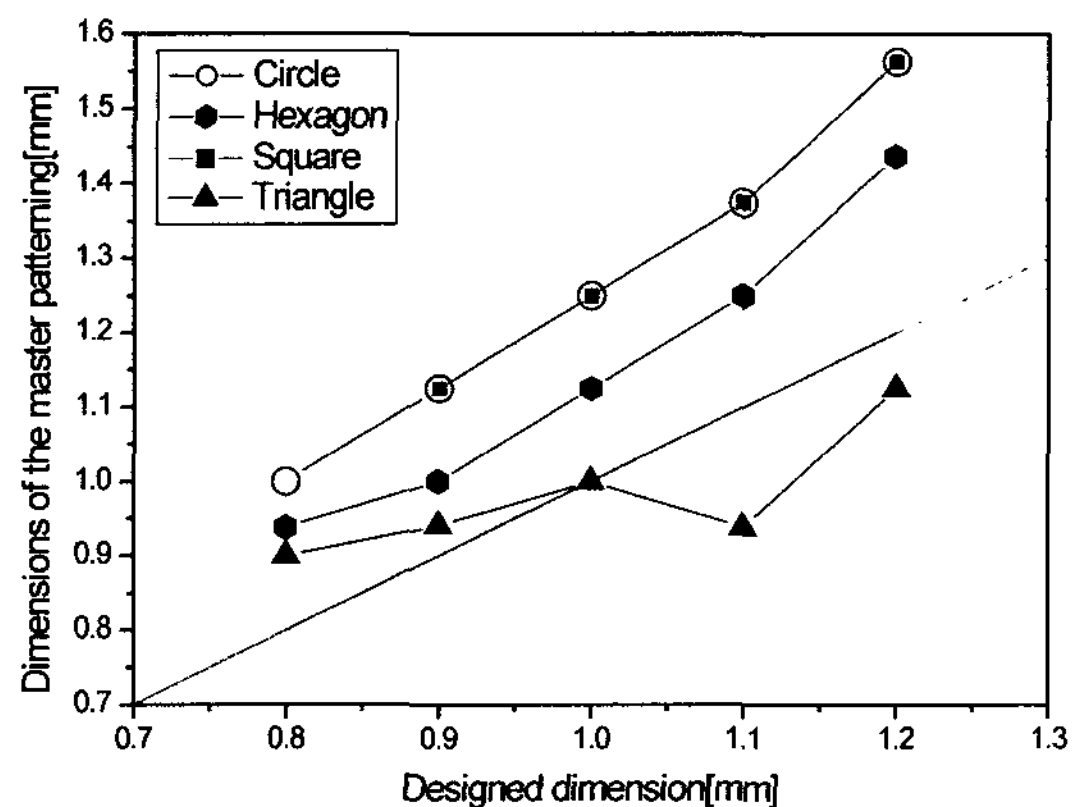


Fig. 5. Plot of the patterns dimensions versus designed dimensions.

소에서 미세한 구멍을 제작하고자 할 때에는 듀라폼 음각몰드의 강도를 고려하여 적어도 지름이 1.2 mm 이상의 요소를 설계하는 것이 바람직하고, 굳이 1.2 mm 이하의 미세한 구멍을 제작하고자 할 때에는 25%의 변형율을 고려하는 것이 좋다.

3.3 패턴의 경도와 미세구조

Table 2에 로크웰 경도측정결과를 나타내었다. 5번 측정된 평균치는 18.4로서 다른 문헌에 보고된 바와 매우 잘 일치하고 있다. 이러한 저융점합금의 전형적인 물성치는 항복강도 41.5 kg/cm², Rockwell Hardness number C 18.4(Brinell hardness 9.2) 정도로 연마, 절삭 등 후속 기계가공이 용이한 특징이 있다[7]. 이 정도의 경도값은 SnPb공정솔더, Sn-Ag-20Bi 등의 솔더와 비슷한 경도로서 충분한 기계적 특성을 유지하면서 2차가공이 가능한 정도이므로 후속공정으로 왁스패턴을 실리콘주형으로 대량생산할 때 충분한 내구성을 유지하며 절삭, 연마등의 2차가공이 용이하다는 것을 의미한다.

Fig. 6에 정밀주조가 완료된 시편을 미세연마지 2000번을 이용하여 연마한 후 표면의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 결과를 나타내었다. Fig. 6(a)는 저배율 사진으로 10 μm이상의 큰 기공을 표면에서 확인할 수 없었다. 듀라폼성형체를 직접 마스터패턴으로 채택하는 경우 이를 완전히 제거하기 어려워 표면에서 잔류물질이 발생하여 이를 제거하기 위한 후속공정비가 많이 드는 것으로 알려진 것을 고려하면 매우 바람직하다고 할 수 있다.

Fig. 6(b)에는 비슷한 부분의 고배율 관찰결과를 나타내었다. 약 30 μm의 판상석출물이 많이 보이는데 이는 50% 이상의 Bi가 Sn과 4%정도 고용되고 주변에 보이는 수지상 공정조직을 형성하고 남은 석출물이라고 판단된다. 이러한 석출물의 분포 때문에 최종적으로 경도증가와 함께 항복강도가 향상되었다고 판단되

었다.

3.4 표면조도

표면조도는 마스터패턴으로서 1 μm 이내의 표면조도를 가져야 시각적 광택효과를 가지는 것으로 알려져 있어 가능하면 주조상태에서도 표면조도가 작아 후처리가 간단할수록 좋다. Table 3에 몰드의 표면조도와 주조직후 마스터패턴의 표면조도를 나타내었다. 마스터패턴의 표면조도가 더 작은 이유는 응고수축 때문이라고 추측된다. 마스터패턴의 5 μm 정도의 표면조도는 통상 석고플라스크를 써서 제조한 은 마스터패턴의 10 μm이상의 표면조도와 비교하여 매우 우수한 특성이고, 특히 경도가 작고 절삭성이 우수하여 광택작업에 매우 유리한 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 6. Microstructure image of the patterns (a) low magnification (b) high magnification.

Table 2. Measurements of surface hardness

No.	Hardness (HRC)
1	19.6
2	19.0
3	19.0
4	16.4
5	18.2
Average	18.4

Table 3. Surface roughness of master pattern and mold.

	top	bottom
Ra [μm] of master pattern	5.20	4.77
Ra [μm] of mold	11.66	11.35

3.5 마스터패턴 제작기간 및 저온주조공정

기존의 마스터패턴 제작공정은 전문숙련기술자가 수공으로 왁스패턴을 제작하는데 통상 7일 이상이 소요되고, 이를 다시 석고플라스크를 이용하여 은 마스터패턴으로 제작하는데 3일정도 소요되므로 약 10일의 기간이 소요되었다. 그나마 갈수록 전문숙련기술자의 노령화와 3D 분야의 기피현상으로 인력이 부족하여 2002년 월드컵이나 아시안게임을 겨냥한 주얼리 기념품 제작과 같이 많은 종류의 제품을 짧은 기간내에 제작할 때에는 많은 어려움이 있었다. 이에 반하여 쾌속조형기와 저융점합금을 이용한 마스터패턴의 제작공정은 3D CAD가 완성된 때부터 마스터패턴 제작까지 3일밖에 소요되지 않으므로 다품종 생산시 아주 유리하다.

또한 본 연구에서 채택한 저융점합금을 이용하는 주조법은 전공정이 100°C 이하의 저온에서 진행되므로 상대적으로 높은 온도에서 진행되는 은을 이용하는 방식에 비하여 화상 등의 위험이 없는 안전한 방법이며, 시설비 및 운영비 면에서 경제적인 방법이다.

4. 결 론

주얼리 마스터패턴 제작을 위해 쾌속조형 듀라폼몰드와 저융점합금을 이용한 새로운 공법을 제안하였다. 여러 가지 설계요소가 포함된 시편을 제작하여 측정·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 저융점합금은 듀라폼몰드와 계면반응 없이 용이하게 분리가 가능하다.
- 2) 저융점합금 마스터패턴은 충분한 내구성과 경도를 가지고 있고 표면조도도 아주 우수하므로 마스터패턴 제작에 적합하다.
- 3) 원형, 육각형, 사각형, 삼각형 등의 구멍은 크기가 1.0 mm 이하에서는 제작에 문제점이 있으므로 피하는 것이 좋고, 굳이 제작할 때에는 25%의 변형율을 고려

하여야 한다.

- 4) 듀라폼몰드와 저융점합금을 이용한 마스터패턴 제작공정은 기존의 은마스터패턴 제작공정에 비해 제작기간과 저온공정에 따른 경제적인 방법이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지역협력연구센터(R12-2002-007-04003-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Joo and O. Song: Journal of Korean Foundrymen's Society, "Jewelry Model Cast Elements Evolution with Alignment Angle in DuraForm Rapid Prototyping," Vol. 21, No. 5 (2001) 290.
- [2] Tim McCreight: The Complete Metalsmith, David Publication, Inc., (1991) 84.
- [3] Huitack Eum, Kyewon Lee, and Choosik Kang: Foundry Engineering, Munwoondang, (1979) 5.
- [4] K. Cooper and G. Williams: Rapid Prototyping and Manufacturing Conference, "NASA on the Fast Track: A case Study in Cost Savings with the Application of RP and Investment Casting," Cincinnati, Ohio, U.S.A., May 15-17, (2001).
- [5] D.G. Ahn, S.H. Lee and D.Y. Yang: Transactions of Materials Processing, "Investigation into Net-Shape Manufacturing of Three-Dimensional parts Using VLM-SP and Its Applied Technology," Vol. 10, No. 6, (2001) 500.
- [6] D.G. Ahn, S.H. Lee, H.S. Choi, K.D. Kim, and D.Y. Yang: Proceedings of Fall Conference of Korean Society of Material Processing, "Investigation Into the Manufacture of 3D Functional parts Using VLM-ST and Its Applied Technology," (2001) 190.
- [7] H. H. Manko: Solders and Soldering, 3rd edition, McGraw-Hill Inc., (1992) 138.
- [8] "The Sinterstation System, Guide to Materials: DuraForm Polyamide," DCN:8001-10014, DTM (1997).