

본 연구는 ERC/NSDM(정밀정형 및 금형가공연구소)의 연구바로 수행되었으며 이에 감사 드립니다

슬립 캐스팅을 이용한 통기성 세라믹형의 쾌속 제작

정성일*, 정두수**, 임용관*, 정해도***, 조규갑****

Rapid Tooling of Porous Ceramic Mold Using Slip Casting

Sung-il Chung*, Du-su Jeong**, Yong-gwan Im*, Hae-do Jeong***, Kyu-Kap Cho****

ABSTRACT

The application field of porous mold is more and more expanded. A mixture of alumina and cast iron is used for making porous mold using slip and vacuum casting method in this study. Slip casting is a process that slurry is poured into silicon rubber mold, dried in vacuum oven, debinded and sintered in furnace. In this procedure, slurry is composed of powder, binder, dispersion agent, and water. Vacuum casting is a technique for removing air bubbles existed in the slurry under vacuum condition. Since ceramics has a tendency of over-shrinkage after sintering, cast iron is used to compensate dimensional change. The results shows that sintering temperature has a great effect on characteristics of alumina-cast iron composite sintered parts. Finally ceramic-metal composite sintered mold can be used for aluminum alloy casting of shoe mold using this process.

Key Words : Slurry(슬러리), Porous mold(통기성형), Slip Casting(슬립 캐스팅), Vacuum Casting(진공주형), Shrinkage(수축), Strength(강도), Porosity(기공률)

1. 서론

산업이 발달함에 따라 알루미늄, 황동등의 비철금속의 사용이 점차로 늘어나는 추세에 있다. 그러나 알루미늄과 같은 비중이 비교적 낮은 금속의 주조공정에서 가장 문제가 되는 점은 용탕 내부의 기포이다. 철제품을 주조로써 만들 때에는 철의 비중이 높기 때문에 용탕 내부의 기포는 철

의 자중에 의해 대부분 외부로 배출이 되기 때문에 기포가 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 알루미늄의 주조공정에서는 기포가 용탕과 금형 사이의 계면에 잔존하여 제품의 품질을 저하시킨다. 그러므로 알루미늄의 주조에 있어서는 진공성형이 가능한 통기성형의 제작이 필수적이다. 통기성형이란 형의 내부 조직을 다공질로 제작함으로써 공기

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 한국신발·피혁연구소

*** 부산대학교 기계공학부

**** 부산대학교 산업공학과

의 흐름을 가능하게 하여 진공성형에 적용할 수 있다. 본 연구에서는 알루미늄분말과 주철분말을 사용하여 통기성형을 제작하였는데, 형의 제작에 있어 가장 중요한 공정은 슬립 캐스팅과 진공 주형이다.

슬립 캐스팅이란 세라믹분말과 유기바인더를 혼합하여 만든 슬러리를 간이형에 흘려(Slip) 넣은 후, 건조, 탈지, 소결의 과정을 거쳐 제품을 얻는 공정이다. 그런데 일반적으로 슬립 캐스팅에 사용되는 간이형으로 석고형이 널리 쓰이고 있지만, 석고형은 복잡한 형상인 경우, 형의 분할이 까다롭고, 또한 내구성이 떨어진다는 단점이 있기 때문에 본 연구에서는 간이형의 제작이 용이한 실리콘고무형을 이용하였다. 실리콘고무형은 석고형에 비하여 간이형의 제작이 간편하고 또한 탄성체가기 때문에 형의 분할 및 형으로부터 마스터 모델(Master Model)의 분리가 용이하다는 장점이 있다¹⁾. 슬립 캐스팅은 분말이 아닌 슬러리를 이용하여 캐스팅을 하기 때문에 표현 가능한 형상의 제한이 적고, 일반적인 세라믹의 가공에 비해서 공정과 비용을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 슬립 캐스팅의 공정 중 탈지(Debinding)공정을 거치게 되면 성형체 내부에 있던 폐놀이가 탈지되면서 기공을 이루게 되는데 이 기공들에 의해 통기성형의 제작이 가능해진다. 그러나 슬러리의 주입시 슬러리내부 및 간이형의 표면에 있는 기공들이 모여 비교적 크기가 큰 기포들을 이루게 되면 이 기포들에 의해 통기성형의 표면의 상태가 나빠지게 되고, 또한 미세한 형상의 표현이 불가능하게 된다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 슬립 캐스팅의 이러한 단점을 보완하기 위하여 진공주형의 방법을 이용하였다. 즉, 실리콘고무형에 슬러리를 주입한 후 진공상태에서 기포를 제거함으로써 통기성형의 특성을 개선시킨 것이다.

한편, 통기성형의 제작에 있어서 가장 중요한 요소로는 강도와 치수정밀도, 그리고 기공률을 들 수 있다. 본 연구에서는 알루미늄·주철의 혼합소결에 있어서 소결온도가 소결체의 이러한 특성들의 변화에 미치는 영향에 대한 검토를 통해 진공주형을 활용한 슬립 캐스팅 공정 기술을 확립하고 최종적으로 통기성형으로의 적용 가능성을 살펴보았다.

2. 슬러리의 제작방법

슬립 캐스팅에 사용되는 재료는 크게 분말과 바인더로 나눌 수 있는데 본 연구에서 사용한 재료를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Materials

Powder	Binder
Alumina 4.5 μ m (Mean)	Phenol Hardener
Cast Iron 25 μ m (Mean)	Water Dispersion agent

본 연구에서 사용된 분말은 알루미늄(Al_2O_3)와 주철(Cast Iron)의 혼합분말이다. 알루미늄과 함께 주철을 사용한 이유는 알루미늄의 소결시 발생하는 과도한 수축을 어느 정도 보완하여 치수정밀도를 확보하기 위함이다. 즉 주철과 같은 금속분말은 소결과정을 거치게 되면 세라믹분말과는 달리 산화하면서 팽창하는 성질을 가지는데 이 때문에 세라믹분말의 소결시 발생하는 과도한 수축에 대한 보완이 가능한 것이다²⁾. 그리고 바인더로는 작업의 편이를 위해 경화제를 첨가하여 상온에서도 경화가 이루어지는 폐놀을 사용하였으며, 폐놀만으로는 실리콘고무형에 흘려 넣을 수 있을 정도의 점도를 얻는 것이 힘들기 때문에 적당량의 물을 첨가하였다. 그리고 기타 첨가제로 바인더 내에서 알루미늄의 균일한 분포를 위하여 분산제를 사용하였다. 이 때, 분말과 바인더의 비에 따라 소결체의 특성이 달라지게 되는데 바인더의 비가 작

Table 2 Mixing Ratio

Used Materials		Mixing Ratio (Vol%)
Powder	Alumina	26.0
	Cast Iron	14.0
Binder	Phenol	24.0
	Water	29.3
	Dispersion agent	0.7
	Hardener	6.0
Total		100.0

을수록 소결체의 특성은 양호하게 되지만, 간이형에 슬러리를 원활히 흘려 놓기 위해서는 점도를 적절한 수준까지 떨어뜨려 주어야 하기 때문에 바인더의 비를 줄이는 데는 한계가 있다. 작업의 원활함과 소결체의 적절한 강도를 고려하여 본 실험에서 사용한 배합비(Vol%)를 Table 2에 나타내었다³⁾.

3. 슬립 캐스팅의 성형 공정

본 연구에서 세라믹의 성형에 이용한 성형공정을 Fig.1에 나타내었다

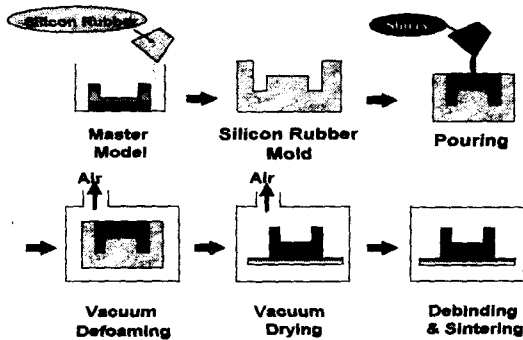


Fig. 1 The Manufacturing Process of Slip Casting

우선 실리콘고무형을 제작하고, 다음으로 분말과 바인더를 혼합하여 슬러리를 제작한다. 이 슬러리를 실리콘고무형에 주입한 후, 진공주형기 내에서 탈포과정을 거치게 된다. 일반적인 세라믹분말의 성형에는 프레스에 의한 가압과정과 고온에서의 소결과정을 통해 분말 내부의 기포들이 완전히 제거되어 고품질의 소결체를 얻을 수 있다. 그러나 본 연구의 목적이 통기성 세라믹형의 제작이므로 이러한 미세한 기공들의 완전한 제거는 불필요하지만, 미세한 기공이 아닌 어느 정도의 크기를 갖는 기포들이 소결체의 내부 또는 표면에 존재할 경우, 표면의 결합으로 남기 때문에 형의 품질이 저하된다. 그러므로 슬립 캐스팅에서는 프레스에 의한 가압이 아닌 다른 방법으로 기포들을 제거해야만 한다. 소포제와 같은 첨가제를 이용하여 슬러리 내부의 기포를 제거하는 화학적인 방법

을 이용할 수도 있지만, 본 연구에서는 슬러리의 주위를 진공상태로 만들어 슬러리 내부와 외부의 압력차이에 의해 직접적으로 슬러리 내부의 기포를 제거하는 방법을 이용하였다. 진공주형을 통해 탈포를 마친 슬러리는 상온에서 경화과정을 거치게 된다. 완전한 경화가 이루어지면 실리콘고무형으로부터 분리한 후, 100℃의 온도에서 진공건조를 시켜 성형체(Green Part)내부의 수분을 증발시킨다. 진공 건조를 거치면 어느 정도의 강도향상과 함께 성형체 내부에 미세한 기공들이 만들어지게 되는데 이 기공들은 다음 공정인 탈지공정 중에 폐놀수지가 증발되는 통로가 되어 탈지시 발생할 수 있는 균열을 방지하는 역할을 한다.

Fig.2는 탈지전후의 표면을 비교한 사진이다.



(a) Before Debinding (b) After Debinding
Fig. 2 Microstructure of Surface

Fig.2(a)는 탈지공정을 거치지 않은 표면을 나타내는데 알루미늄분말과 주철분말이 폐놀수지에 의해 결합되어 있음을 확인할 수 있다. 그러나 탈지후의 표면인 Fig.2(b)를 보면 폐놀수지가 탈지되면서 만들어진 기공을 볼 수 있는데 이 기공들이 통기성형으로서의 기능을 갖게 하는 것이다. 충분한 탈지를 거치고 나면 최종적으로 소결공정을 거치게 된다. 소결에 있어서 가장 중요한 요소는 소결온도이기 때문에 알루미늄과 주철의 복합소결시의 온도에 따른 소결체의 특성을 평가해 보았다.

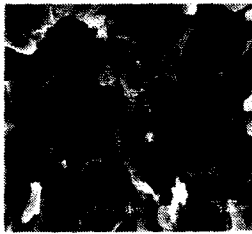
4. 실험결과 및 고찰

세라믹의 특성을 결정짓는 가장 중요한 공정은 소결이다. 본 실험에서는 알루미늄분말과 주철분말을 이용하였는데 이 두 가지를 함께 소결시키면 주철분말의 Fe와 알루미늄의 O₂가 반응하여 Fe₃O₄

되면서 서로를 결합하게 된다.²⁾ Fig.3은 주철분말의 소결온도(1100℃), 주철분말의 용점부근의 온도(1300℃), 알루미나분말의 소결온도부근(1500℃)에서의 내부조직사진이다.



(a) Sintering at 1100℃ (b) Sintering at 1500℃



(c) Sintering at 1500℃

Fig. 3 Microstructure of Sintered Parts

탈지후의 표면인 Fig2(a)와 1100℃에서 소결한 표면인 Fig3(a)를 비교해 보면 주철분말의 소결이 발생하면서 입자의 크기가 커진 것을 볼 수 있다. 그러나 주철분말은 소결이 이루어졌지만, 알루미나분말과의 복합소결이 충분히 이루어지지 않았기 때문에 결합강도가 상당히 낮다. 그런데 1300℃에서 소결한 표면인 Fig.3(b)를 보면 주철분말이 알루미나분말 주위를 감싸고 소결되어 있음을 볼 수 있다. 1300℃에서 액상으로 변한 주철분말이 고체상태의 알루미나분말 주위에서 응고되어 이러한 형상을 이루게 되는 것이다. 이 경우에는 1100℃에서 소결된 것보다 결합강도가 높다. Fig.3(c)는 1500℃에서 소결된 표면을 나타내는데 자세히 살펴보면 주철분말과 함께 알루미나분말도 소결이 일어난 것을 알 수 있다. 이 경우에는 알루미나의 소결이 발생했기 때문에 결합강도는 매우 높지만 그와 함께 상당한 수축이 발생하게 된다. 이상의 결과를 정리한 그래프를 Fig.4에 나타내었으며, 그때의 측정시편의 형상 및 측정기를 Table 3에 나타내었

다. 결과를 살펴보면 압축강도는 소결온도에 비례하여 증가함을 알 수 있다.

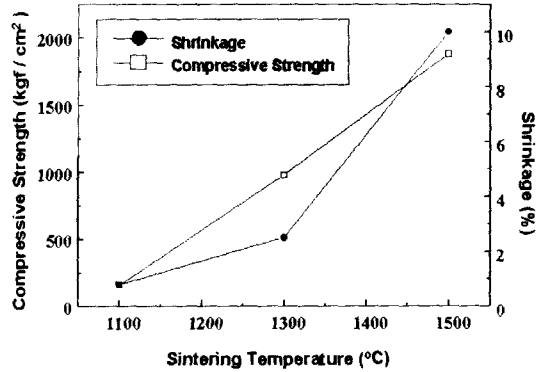


Fig. 4 Compressive Strength and Shrinkage

Table 3 Specimen and Test Equipment

	Compressive Strength	Shrinkage
Specimen Shape	Cylinder Dia : 10mm Height : 15mm	Cylinder Dia : 40mm Height : 40mm
Test Equipment	MTS, Sintech2000	Calipus

그러나 수축률의 변화는 압축강도의 그래프와는 다른 양상을 나타낸다. 즉, 주철의 용점인 1200℃~1300℃부근까지는 완만한 변화를 보이지만, 알루미나의 소결온도에 이르면 급격히 증가함을 확인할 수 있다. 수축률과 압축강도를 고려하여 1300℃의 온도에서 제작한 기어의 형상 및 특성을 Table 4와 Fig.5에 각각 나타내었다. 실제 프레스 성형후의 소결을 거친 세라믹제품의 압축강도인 10~20t/cm²에 비하면 압축강도가 매우 낮음을 알 수 있다. 그 이유는 세라믹의 소결이 아닌 주철의 소결에 의해 결합이 이루어졌으며, 또한 제품의 내부가 다공질로 이루어졌기 때문에 강도에 한계를 갖기 때문이다.

이상의 결과를 바탕으로 통기성 세라믹형의 소결에 있어서의 이상적인 소결은 온도는 주철의 용점부근임을 알게 되었다. 주철의 용융은 120

0℃ ~ 1300℃ 사이에서 시작되기 때문에 1200℃, 1250℃, 1300℃로 나누어 소결을 하여 특성을 평가해 보았다.

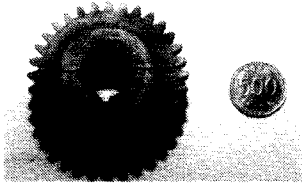


Fig. 5 Gear by Slip Casting (1300℃)

Table 4 The Properties of Gear

Compressive Strength	976 kg/cm ²
Shrinkage	2.5 %
Porosity	20.8 %
Density	2.83 g/cm ³

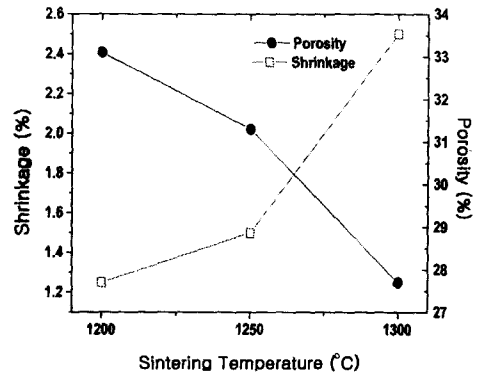
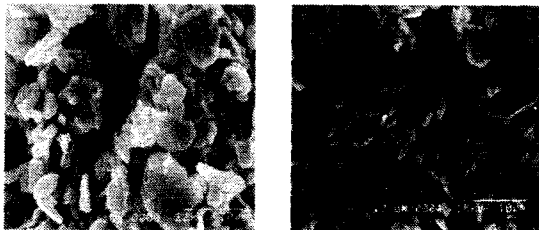


Fig. 7 Porosity and Shrinkage

이 때, 각 소결온도에 있어서의 내부조직의 변화를 Fig.6에 수축률과 기공률의 변화를 Fig.7에 각각 나타내었다. 소결온도가 높아짐에 따라 주철분말의 용융이 활발해지기 때문에 알루미늄분말을 감싸는 주철분말의 양이 점차로 많아지게 되어 기공률이 감소하게 되고 동시에 수축이 발생하게 된다. 1200℃의 온도에서는 주철의 용융이 활발하지 못하고, 반면에 1300℃의 온도에서는 주철의 용해가 완전히 이루어져 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 제작한 알루미늄 신발금형을 위한 세라믹형을 Fig.8에 나타내었다. Table 5에서 표면조도를 살펴보면, 실제 형으로 적용하기에는 다소 큰 값이다. 그 이유는 치수의 정밀도를 위하여 충분한 소결을 행하지 않았기 때문에 분말사이의 공간이 표면조도를 떨어뜨리게 되는 것이다.



(a) Sintering at 1200℃ (b) Sintering at 1250℃



(c) Sintering at 1300℃

Fig. 6 Microstructure of Sintered Parts

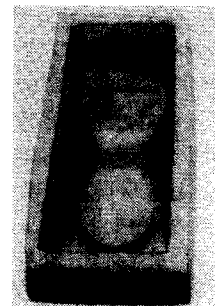


Fig. 8 Shoes Mold by Slip Casting (1250℃)

Table 5. The Properties of Shoes mold

Compressive Strength	300 kg/cm ²
Shrinkage	1.5 %
Porosity	31.3 %
Density	2.66 g/cm ³
Ra	4 μ m
Rmax	26 μ m

그러나 본 연구에서 제작한 통기성형은 알루미늄의 주조를 위한 형이기 때문에 주조과정을 거친 후, 샌드 블라스팅(Sand Blasting)을 이용하여 주조품의 후처리를 행하면 실제 양산을 위한 금형으로 적용이 가능한 정도의 표면조도를 얻을 수 있기 때문에 큰 문제는 되지 않는다.

5. 결론

이상의 결과를 정리해보면 다음과 같다.

1. 주철의 소결온도(1100℃)에서 소결을 행하면 수축은 거의 발생하지 않지만, 주철과 알루미늄의 결합이 불완전하여 결합력이 매우 낮다.
2. 알루미늄의 소결온도부근(1500℃)에서 소결을 행하면 주철과 알루미늄과의 결합은 매우 양호하지만, 알루미늄이 소결되면서 과도한 수축을 발생시키기 때문에 수축률이 매우 높다.
3. 주철의 용접부근의 온도인 1200℃~1300℃의 영역에서는 주철분말의 용융은 이루어 지지만, 알루미늄분말의 소결이 거의 발생하지 않기 때문에 수축은 비교적 적으면서 어느 정도의 강도를 가지는 소결체를 얻을 수 있다.

본 연구에서 제작한 세라믹형의 특성은 일반적인 세라믹 제품에 비해서 강도의 측면에서는 떨어지지만, 세라믹형의 내부가 다공질이기 때문에 강도가 크게 중요하지 않은 금형, 즉 프레스 금형이 아닌 진공성형을 위한 금형으로의 적용으로는 충분히 가능하다. 특히 복잡한 형상의 금형

을 1주일이라는 짧은 공정기간동안에 제작이 가능하다는 장점을 함께 가지고 있기 때문에 진공성형을 위한 금형의 제작으로 그 활용가치가 높을 것이다.

후기

본 연구에 사용된 페놀수지의 제공과 함께 많은 조언을 해 주신 강남화성 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 中川威雄, 丸谷洋二, 정해도, "적층조형 시스템 - 3차원 카피 기술의 신전개," 日本工業調査會 · 성안당, pp. 21-22, 1998.
2. 柳澤章, 野口裕之, 中川威雄, "セラミック・金屬粉末焼結による通氣性成形型," 先端素材開發工學に關する研究, 東京大學生産技術研究所 大型共同研究成果概要 第6号, pp. 64~70, 1991.
3. 정두수, 정성일, 임용관, 정해도, 조규갑, "슬립 캐스팅을 이용한 급속 세라믹형 제작," 한국정밀공학회 '98년도 춘계학술대회 논문집 pp. 936-939, 1998.