

Fine Ceramics의 Casting공정을 위한 다공질 알루미나 몰드의 제조

박 한 수

홍익대학교 무기재료공학과
(1998년 11월 13일 접수)

Fabrication of Porous Alumina Mold for the Casting Process of Fine Ceramics

Han-Soo Park

Department of Inorganic Materials Engineering, Hongik University
(Received November 13, 1998)

초 록

석고몰드의 단점을 극복할 수 있는 다공질 알루미나 몰드의 제조조건을 확립하였다. 다공질 알루미나 몰드의 제조를 위해 활성탄의 질량비에 따라 조성비를 달리하여 첨가한 후, ESA와 유동특성 등을 조사함으로써 안정된 이상 슬러리를 제조하였으며, 이를 석고몰드에 캐스팅하여 얻은 원통형 알루미나 몰드를 사용하여 활성탄의 양과 소결 온도에 따른 수축을 변화와 마모에 대한 저항성을 측정하였다. 다공질 알루미나 몰드의 소결에서는 비수축 소결기구인 표면확산에 의해 입자간 네 강도의 증진을 통한 몰드의 강도 증진을 도모하는 것이 바람직하며, 이를 위해 1,000°C이하에서 유지시간의 변화에 따른 열역학적 방법, 1,000°C이상의 온도에서 알루미나의 수축을 억제하면서 빠른 승온속도로 열처리온도에 따른 동역학적 방법과 이 두가지 방법을 혼합하는 방법 등으로 구분하여 다공질 알루미나 몰드의 소결조건을 분석하였다. 위 방법들에 대한 다공질 알루미나 몰드의 캐스팅 특성을 분석한 결과, 복합 소결법이 최적임을 알 수 있었다. 제조된 다공질 알루미나 몰드는 비교적 높은 강도를 보였으며, 석고몰드에 비해 빠른 건조시간, 산, 염기에 대한 내식성 및 캐스팅 특성이 우수하였다.

ABSTRACT

Manufacturing conditions of the porous alumina mold were established to overcome various limits of the gypsum mold. For the preparation of the porous alumina mold, an activated charcoal was added to the Al_2O_3 with the wt% variation and then mixed. The binary slurry was stably dispersed based on the examination of the ESA and rheological behavior. The cylinder type alumina mold was cast in the gypsum mold and characterized by the shrinkage rate at the variable sintering temperature and the resistance against wear. It was proper to make a sintering of the Al_2O_3 by the surface diffusion which was non-shrinkage sintering mechanism, and intergranular neck grewed stronger while sintering was being made. We studied a sintering by three categories; 1) thermodynamic method below 1,000°C, 2) kinetic method above 1,000°C and 3) combined method. In the results of the respective works, combined method was superior to the others. The prepared Al_2O_3 mold had relatively high strength, low drying rate, the resistance against the acid or base and good casting behavior.

Key words : Alumina mold, Gypsum mold, Slip Casting, Sintering condition

1. 서 론

슬립 캐스팅법은 복잡 형상의 세라믹스를 쉽게 대량으로 만들 수 있는 공정이다. 1) 이런 슬립 캐스팅 공정에 있어서 캐스팅을 위한 몰드로는 가격의 저렴성, 제작 용이, 매우 적은 건조 수축률에 의해 원하는 치수의 정

확한 재현 등 많은 장점을 지닌 석고가 주로 사용되어 왔다. 그러나, 최근의 R&D 방향인 초정밀, 고기능을 요구하는 파인 세라믹스의 제조방법으로 석고 몰드를 사용하는 것은 다음과 같은 몇가지 문제점이 대두된다. 1) 석고의 용출에 의한 시편의 조성 및 물성변화, 2) 몰드의 반복 사용에 의한 모세관력의 감소, 3) 낮은 기계적

강도, 특히 습윤강도에 의한 몰드 표면의 열화현상, 4) 산, 알칼리에 대한 반응성 그리고, 5) 낮은 건조속도 등이다. 특히 처음 두가지 문제점이 가장 크며, 첫 번째의 경우, 석고몰드를 사용할 때, 알루미늄이 지지 내에 100 ppm정도의 CaO가 용출되고 이는 알루미늄의 소성에 영향을 미치므로 그 강도나 인성값에 변화를 준다고 한다.²⁾ 이는 ppm단위의 조성제어를 요하는 파인 세라믹스 공정에 있어서 석고의 용출이 심각한 변수로 작용할 수 있다. 또한, SO₃, SO₂ 등의 원하지 않는 불순물이 캐스트 표면에 용출되어 캐스트의 조성제어가 정확하게 이루어지기 어려우며, 순수한 조직을 얻기도 힘들다.

두 번째로, 반복사용시 용출되는 석고는 몰드의 평균 기공크기를 증가시키며, 표면적을 감소시킨다. 또한 석고는 70°C 이상에서 건조시킬 경우 변성이 생기기 쉬우므로 미세기공에 함유된 물을 완전히 증발시키지 못하고 재사용하게 된다.³⁾ 따라서 반복사용시 캐스팅 속도는 점진적으로 줄어들게 되며, 이는 캐스트의 정밀한 두께를 drain time으로 예측하는 drain 캐스팅에서는 매우 바람직하지 않은 특성이다.

이와같이 석고몰드의 단점은 캐스팅법을 이용한 파인 세라믹스 제조를 어렵게 하고 있으며 따라서 최근에 석고를 대체하기 위한 재료를 찾으려는 노력이 진행되고 있다. 이러한 연구의 주요 방향은 알루미늄과 같이 구형 입자의 소결시 생기는 기공 channel을 이용하는 방법으로, 이는 환경문제에 사용되는 담체 등의 용용을 위해

활발히 연구되고 있다.⁴⁾

한편, 다공질 세라믹 몰드의 제작방법으로는 상압소결에 의한 방법,⁵⁾ 고분자 첨가물의 burn-out이나 승화성 물질의 첨가로 기공율을 향상시키는 방법, 다공성 고분자물질에 슬러리를 흡수시킨 후 이를 소결하는 방법,⁶⁾ 졸-겔 공정을 이용하는 방법,^{7,8)} 열간 정수압 소결(hot isostatic pressing, HIP)을 사용하는 방법⁹⁾ 등이 보고되고 있다. 이중 알루미늄의 상압소결에 있어서 Kondo 등이⁵⁾ pre-sintering 방법을 사용하여 만든 알루미늄 몰드는 삼투압, 기공율, 젖음성 등의 증가를 보였으며 캐스팅 후에 캐스트 입자들이 기공을 막는 현상도 없다고 보고하였다.

본 연구에서는 파인 세라믹스의 캐스팅 공정을 위해 다공성 알루미늄 몰드가 최적의 특성을 보이도록 슬립캐스팅(slip casting) 방법으로 분산 및 소결 조건 설계를 통해 몰드를 제조하였고, 이를 석고몰드와 비교하였다.

2. 실험방법

알루미늄 몰드 제작에 사용된 알루미늄 분말 Alcoa사의 A16SG powder이고, 일본의 Junsei사 활성탄(activated charcoal)을 사용하였다. 출발물질인 Al₂O₃와 활성탄에 분산제로서 darvan-C와 monopol을 첨가함으로써 안정된 슬러리를 만들었으며, 출발물질의 제반특성을 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Properties of the Starting Materials

Material	Chemical composition (wt%)	Density (g/cm ³)	Mean particle size (μm)	Specific surface area(m ² /g)
Al ₂ O ₃ *	Al ₂ O ₃ : 99.5 Na ₂ O: 0.06 0.1 SiO ₂ : 0.05 0.12 Fe ₂ O ₃ : 0.01 0.02	3.98	0.38	8.76
Activated charcoal**	Carbon: 99.5 Cl: 0.15 Ash: 0.35	≤2.00	0.25	1357.15
Darvan-C*	Polyacrylic acid sodium salt: 40% Water: 60%			
Monopol**	Polyoxyethylene alkyl ether: 25% Water: 75%	1.06		

*Alcoa Co. Ltd.

**Junsei Co. Ltd.

*R.T. Vanderblit Co. Ltd.

**Dongnam synthesis chem. Co.

다공성 알루미늄 몰드를 제작하기 위해 활성탄의 양을 0~45 wt%까지 조성비를 달리하여 혼합한 후, 지르코니아 불을 이용하여 24 시간동안 습식 혼합을 행하였다. 이렇게 제조한 슬러리의 안정성을 electrosonic amplitude analyser(Matec Applied Co. U.S.A, 이하 ESA로 약함.)와 점도계(Viscometer, Brookfield DV-III)로 평가하여 최적설계된 이상 슬러리를 만들었다. 이후, 고르게 혼합된 슬러리를 물과 석고의 비가 50:50인 석고몰드에 캐스팅하여 직경 10 mm, 길이 20 mm인 원통형 몰드를 제조하였다. 캐스팅이 완료된 후 3시간동안 알루미늄 캐스트내의 수분을 충분히 제거함으로써 충분한 캐스트 강도를 가지게해 석고몰드에서 캐스트를 분리할 때에 생기기쉬운 파손¹⁰⁾을 방지하였다. 제조한 알루미늄 캐스트는 70~80°C에서 48 시간 건조한 후, 저항 발열체를 사용하는 전기로(AWF130/12, Lenton furnace, England)에서 여러 승온 속도로, 900~1,400°C까지의 소결 온도범위에서, 0.30 시간동안 유지시키는 등 다양한 소결 조건으로 변화시키면서 열처리를 행하였다. 개략적인 실험 공정은 Fig. 1에 나타내었다.

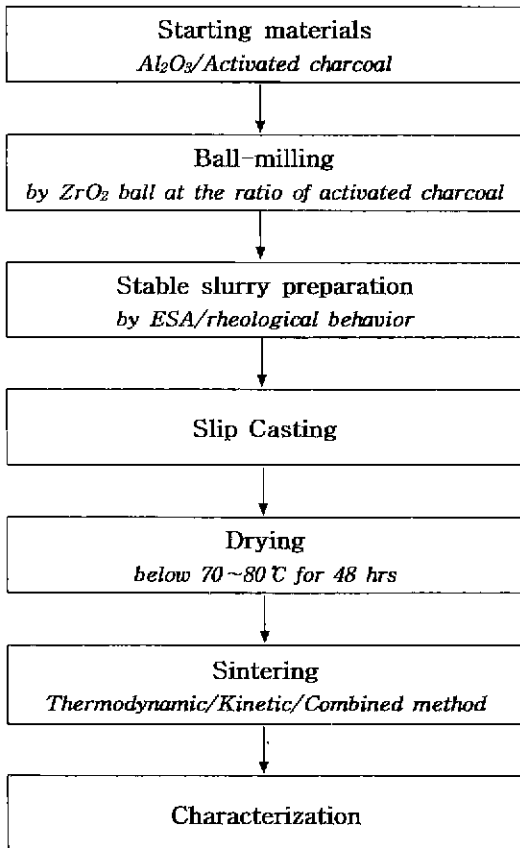


Fig. 1. Experimental procedure diagram.

다공성 알루미늄 몰드의 특성평가를 위해, 다이아몬드 휠커터를 사용하여 일정시간동안 몰드가 절단되는 깊이(length) 또는 시간(time)을 측정함으로써 마모에 대한 저항성(wear rate)을 측정하였고, 이 값은 입자간 넥(neck) 강도에 의존하는 다공질 몰드의 강도치에 비례한다. 기존의 벌크(bulk) 재료에서 흔히 사용되는 곡강도법(MOR)에 의한 강도 평가는 재료내부에 존재하는 기공 때문에 신뢰성이 떨어진다고 알려져 있다. 따라서 본 실험에서는 다이아몬드 휠커터를 사용하여 절삭 시간에 따른 몰드의 상대적 강도를 평가할 수 있었다.

한편, 30 vol% 알루미늄 슬러리를 사용하여 소결 조건의 변화에 따른 건조 및 소결 수축율을 10 μ m까지 측정 가능한 micrometer(Mitutoyo, Mitutoyo co., Japan)로 측정함으로써 알루미늄 몰드의 캐스팅 특성을 분석하고, 이를 석고 몰드의 캐스팅 특성과 비교, 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

슬러리 제조에 앞서, 알루미늄 분산제로 darvan-C와 활성탄의 분산제로 monopol을 각상의 슬러리에 첨가하여 첨가량 변화에 따른 분산성을 슬러리의 점도를 측정 한 결과, Al₂O₃의 경우 0.3 wt% darvan-C를, 활성탄에 대해서는 3 wt% monopol을 첨가하였을 때 가장 낮은 점도값을 보였다. 또한 pH 변화에 따른 각각의 단상 슬러리의 제타전위(zeta-potential)를 ESA를 이용하여 측정하고, 점도계를 사용하여 유동 특성(rheological property)을 조사한 결과, pH 9.0에서 단상 슬러리가 안정된 거동을 보였다. 따라서, 각상에 있어서의 최적 분산 조건은 pH 9.0에서 Al₂O₃ 0.3 wt% darvan-C와 activated charcoal 3 wt% monopol이며, 안정된 이상 슬러리는 각각의 단상 슬러리를 혼합함으로써 얻을 수 있었다. 제조한 이상 슬러리를 석고몰드를 이용하여 캐스팅할 때, 석고/물 비가 50:50인 경우가 내구성과 캐스팅 특성에서 가장 우수한 특성을 나타내었으며, 석고몰드는 석고/물 비가 높을수록 단단하고 내구성이 좋아지나 캐스팅 특성이 저하되므로, 보통 물에 혼합하는 석고의 양은 전체의 40~55 wt% 범위가 된다.

Fig. 2에 알루미늄의 표면 확산 기구¹¹⁻¹³⁾가 주도적으로 일어나는 1000°C 이하의 온도에서의 열처리 유지시간에 따른 다공질 알루미늄 몰드의 소결 수축율을 나타내었다(이하 이를 열역학적 방법으로 명명함.). 900°C보다 950°C일 때 소결 수축율이 약간 크며, 그 차이는 유지시간이 길어질수록 거의 일정한 거동을 보이고있으며, 두 온도에서의 수축율 차이는 약 1% 미만의 낮은 변화를 보이는 점으로 미루어 1000°C 이하의 온도에서는 비수축 소결기구인 표면확산과정에 의해 넥(neck) 강도

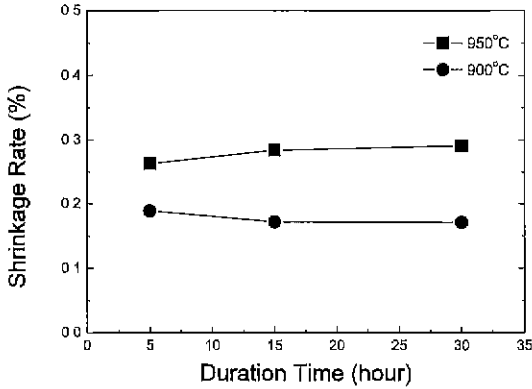


Fig. 2. Diagram of shrinkage rate at the various holding time.

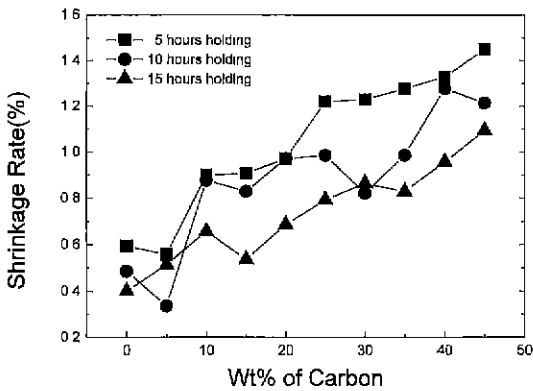


Fig. 3. Shrinkage rate curves at 950°C with a various holding time.

의 증진에 의한 몰드의 강도증진효과가 주로 일어나고 있음을 알 수 있었다. 이를 토대로, 950°C에서 열처리 유지시간의 변화에 대해 활성탄의 비율에 따른 수축을 변화(Fig. 3)와 몰드의 캐스팅 특성(Fig. 4)을 살펴보면, 열처리 유지시간이 길어질수록 수축율은 1% 미만 정도의 변화로써 거의 일정한 거동을 보여 Fig. 2에서 이미 예측한 결과와 일치하고, 캐스팅 특성에 대해 큰 변화를 보이지 않는 것으로 보아, 1000°C이하에서 유지시간 변화가 몰드의 특성에 그다지 기여하지 못한다는 것을 짐작할 수 있었다. 또한, 활성탄의 질량비가 증가할 경우 수축이 증가하여 연속적인 기공 채워의 크기 감소로 인해 캐스팅 특성의 향상을 도모할 수 있었다.

알루미늄의 격자확산기구¹⁴⁾가 주도적으로 일어나는 소결온도, 1000°C이상의 고온에서 소결온도 변화에 따른 소결수축율의 변화를 Fig. 5에, 각각의 캐스팅 특성을 캐스팅 시간을 변화시켜가면서 측정된 결과를 Fig. 6, 7, 8에 나타내었다(이하 이를 동역학적 방법으로 명

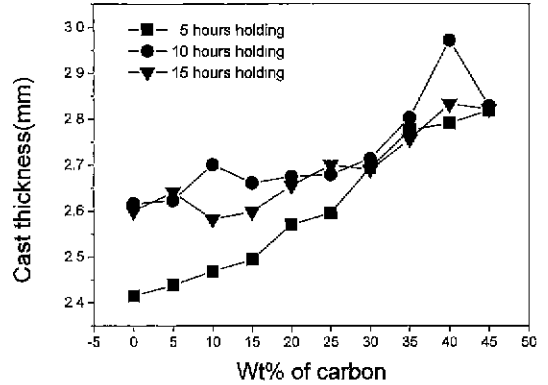


Fig. 4. Cast thickness curves with a various holding time for 10 min casting

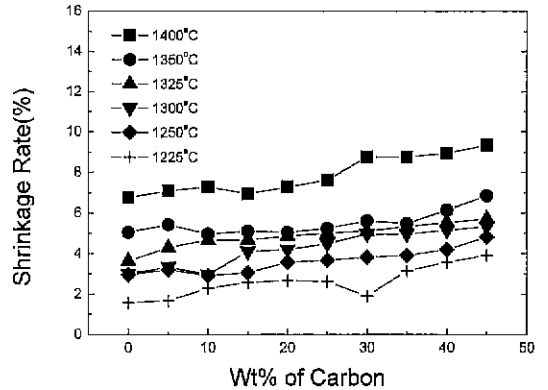


Fig. 5. Shrinkage rate curves with a various temperature.

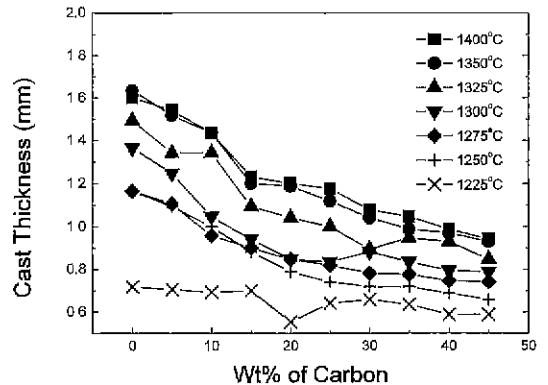


Fig. 6. Cast thickness curves with various temperature for 1 min casting.

명함.). 소결온도가 증가할수록 소결수축율이 열역학적 방법에 비해 한자리정도 큰 scale로 증가함을 알 수 있었으며, 1000°C이상의 고온에서 활성탄 질량비에 따른

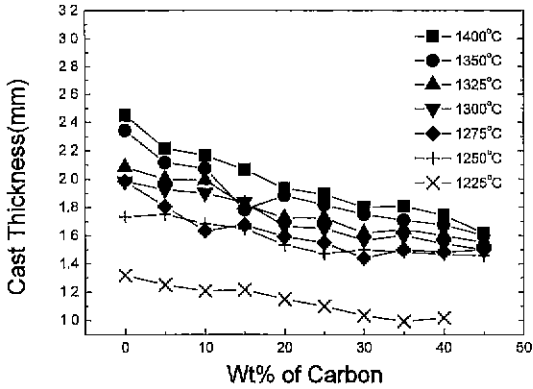


Fig. 7. Cast thickness curves with various temperature for 3 min casting.

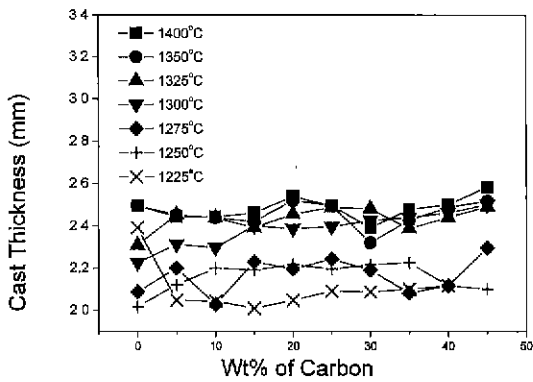


Fig. 8. Cast thickness curves with various temperature for 10 min casting.

수축율은 초기 알루미나 몰드에 비해 1~2 %정도의 변화를 보이고 있으며, 이는 고온에서의 알루미나 소결에 있어 격자 확산과정에 의한 몰드의 치밀화 효과로 이어지는 정도의 수축이 몰드 내에 진행되고 있었기 때문에 활성탄의 첨가에 의한 기공 크기의 변화가 주는 영향이 적어진 것으로 생각된다. 또한, 캐스팅 시간이 증가할수록, 그리고 열처리 온도가 높을수록 몰드의 캐스팅 특성이 향상됨을 알 수 있었다.

Mercury porosimeter 및 주사전자현미경(scanning electron microscopy, S-270, Hitachi, Japan, 이하 SEM으로 약함.)을 이용하여 활성탄이 첨가되는 경우 및 첨가되지 않은 경우의 알루미나 몰드의 미세구조 변화를 조사한 결과(Fig. 9, 10), 활성탄이 존재하지 않는 경우 약 0.1 μm 정도의 입자간 기공만 존재하나 활성탄이 첨가되면 평균 0.5 μm의 비교적 큰 기공이 생성되며, 이를 아래 (1)식에 대입하면 수십배 이상의 투수율 증가가 생김을 알 수 있었다. 몰드의 투수율이 낮을 경우, 몰에 접촉되는 몰드 부분은 매우 빨리 포화되어 결

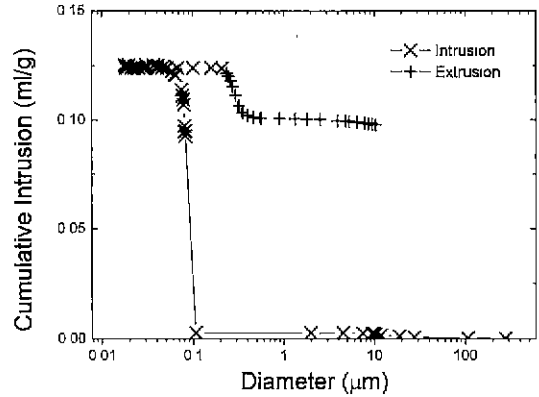


Fig. 9. Diagram of the pore size distribution of Al₂O₃ sintered at 1250°C.

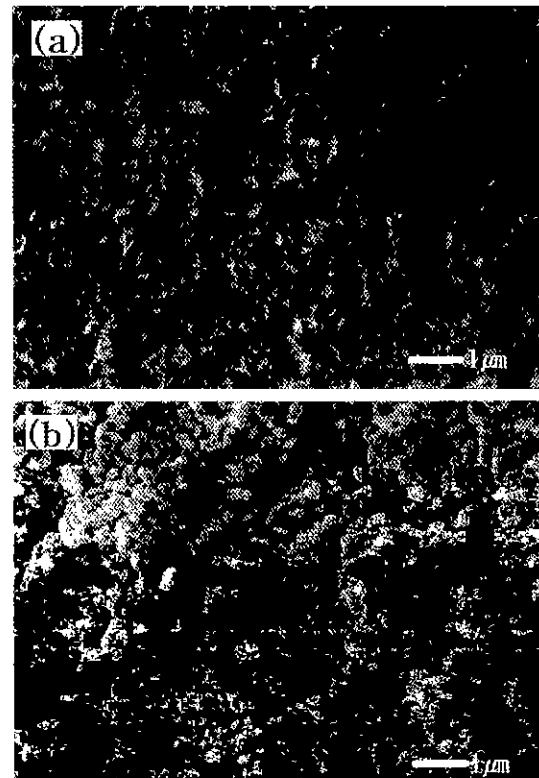


Fig. 10. SEM Photographs of the Al₂O₃ sintered 1275°C. (a) without and (b) with activated charcoal

과적으로 몰드의 캐스팅 속도가 떨어지게 된다. 치밀하게 충전된 입자들로 이루어진 시편의 투수율은 다음과 같다.¹⁵⁾

$$K_p = \frac{\Phi r_f^2}{K_1} \tag{1}$$

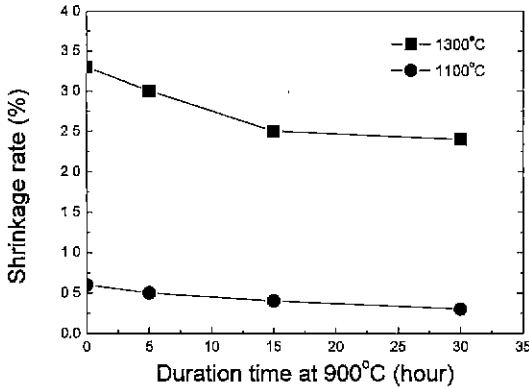


Fig. 11. Schematic diagram of the shrinkage rate using a combined schedule.

K_p : 비투수율 계수

r_1 : 평균 기공 반경

K_1 : 기공 형상 인자 (원통형기공의 경우=8)

소결온도를 변화시키는 동역학적 방법은 열역학적 방법과는 달리 몰드의 마모율이 수축율에 반비례하는 경향을 나타내었으며, 따라서 캐스팅 특성이나 기계적 특성 중 한쪽이 우수하면 다른 쪽의 물성이 나빠짐을 알 수 있었다.

앞에서 얻은 결과를 바탕으로 두가지 방법의 장점을 조합하기 위한 복합소결을 행하였다. Fig. 11에 저온에서의 유지시간 및 소결온도 변화에 따른 소결수축율을 나타내었다. 동일한 소결온도라면 저온에서 장시간 유지할수록 소결수축율은 감소하며, 캐스팅 속도는 증가함을 알 수 있었다. 이는 저온소결의 유지시간이 길어질수

록 표면확산기구에 의해 알루미늄 분말의 소결구동력은 감소하게 되어 고온에서 소결수축을 유발하는 부피확산이 감소하기 때문으로 생각된다. 일정시간동안 동일한 저온에서 소결한후 소결온도를 올려주었을 경우에는 소결온도가 증가할수록 소결수축율은 감소하지만, 저온에서 열처리하지않은 시편에 비하여 소결수축율이 낮아지며, 강도는 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 12에 열역학적 방법, 동역학적 방법 및 복합소결 방법으로 제조한 알루미늄 몰드 중 각각 가장 우수한 특성을 보이는 알루미늄 몰드들의 소결 수축율, 캐스팅 특성, 마모 저항성 및 제조 시간을 나타내었다. 열역학적 방법은 우수한 캐스팅 특성을 나타내지만, 제작에 시간이 너무 많이 걸리고, 또한 제작된 몰드의 강도가 여러 번 사용하기에는 너무 약함을 알 수 있었다. 반대로 동역학적 방법은 짧은 제작시간동안 캐스팅하여 충분한 강도를 얻을 수 있었으나, 캐스팅 특성이 나빠지며, 두 방법을 조합한 경우 제작 시간을 줄이면서도 만족할 만한 캐스팅 특성 및 적절한 몰드 강도를 얻을 수 있었다. 따라서 알루미늄 몰드 제작을 위한 최적의 소결조건은 복합소결임을 알 수 있었다. 또한, 알루미늄 몰드의 마

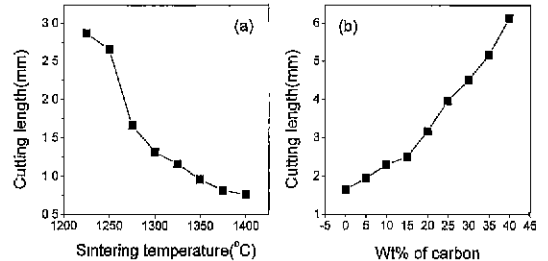


Fig. 13. Relative wear rates of alumina mold with the variation of (a) sintering temperature and (b) wt% of carbon.

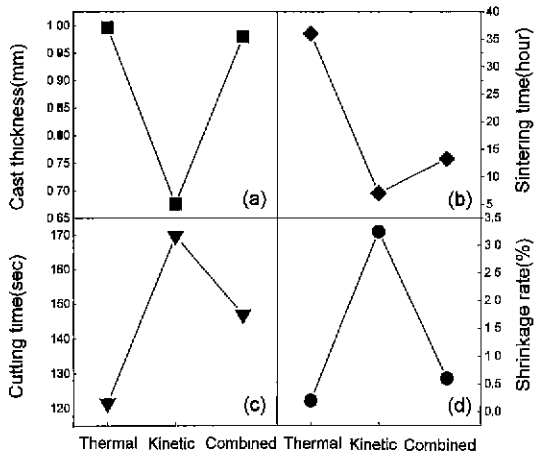


Fig. 12. Properties of the alumina mold by thermodynamic, kinetic and complex sintering methods. (a) casting property, (b) shrinkage rate, (c) strength and (d) sintering time

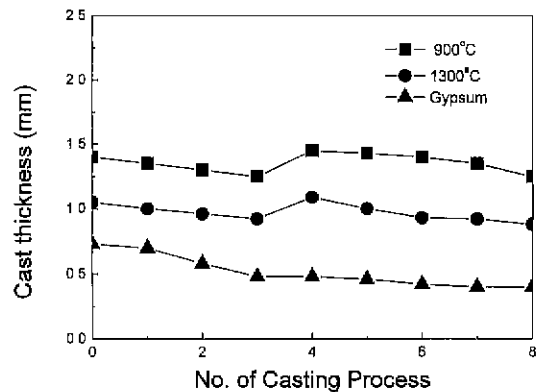


Fig. 14. Diagram of casting rate decrease on repeated casting.

Table 2. Weight Loss of Gypsum and Aluminum Mold with pH Variation

Mold	Weight(g)	Acid(g) (pH 1.0)	Base(g) (pH 11.5)	Acid weight loss rate(%)	Base weight loss rate(%)
Gypsum	1.447	0.801	1.345	44.644	7.049
Aluminum	2.05	2.05	2.048	0.000	0.097

모 저항성은 Fig. 13에 보여지듯이 소결온도가 높을수록, 활성탄의 양이 적을수록 좋은 특성을 보였다.

Fig. 14에 1 wt% polyvinyl alcohol(PVA)를 첨가한 슬러리를 알루미늄 및 석고 몰드를 사용하여 반복적으로 캐스팅할 때의 두 몰드의 캐스팅 속도 저하를 나타내었다. 석고 및 알루미늄 몰드 모두 반복사용에 따라 캐스팅 속도가 감소되며 알루미늄 몰드는 기공 크기가 작기 때문에 흡착되는 유기물의 영향을 석고 몰드보다 더 많이 받는 것으로 보인다. 그러나 800°C에서의 열처리, 즉 고온에서의 건조과정으로 원래의 캐스팅 속도를 회복할 수 있었으며, 이는 800°C 이하에서 완전히 강열 감량되는 PVA 및 Na-CMC의 TG-DTA 데이터에서도 예측할 수 있었다.

석고몰드와 알루미늄 몰드의 강산 또는 강염기성 환경하에서 부식에 대한 저항성에 대해 조사하였다. Table 2에서 보여지듯이 각각의 환경하에서 24시간동안 침적시켜 유지시킨 뒤의 몰드의 질량 감소율을 나타낸 결과이다. 석고몰드의 경우, pH 1.0의 강산에서 40% 이상의 질량감소를 보이고 있으며, 이는 산에 잘 녹는 석고의 기본 물성에 미루어 짐작되는 결과이다. 이에 비해 다공질 알루미늄 몰드는 산성과 염기성 모두 침적 전후의 질량감소가 거의 일어나지 않는 우수한 내식성을 보여주고 있으며, 환경오염에 의한 담체 재료의 개발에 있어서 가혹한 환경에서의 알루미늄 몰드의 응용이 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

다공질 알루미늄 몰드를 고온에서 산화되는 활성탄을 혼합하여 알루미늄 몰드내에 연속적인 기공 채널을 형성시킴으로써 제조하였다. 알루미늄 몰드를 캐스팅법으로 제조하기위해 단상 및 이상 슬러리의 분산조건을 ESA, 유동 특성 등을 분석하여 확립하였다. 이때, 최적의 분산 조건은 pH 9.0에서 $Al_2O_3 + 0.3$ wt% darvan-C 와 activated charcoal+3 wt% monopol이었다.

석고 몰드로 캐스팅하여 얻어진 알루미늄 몰드의 소결은, 유지시간을 변수로 하는 열역학적 방법, 최고 온도를 변화시키는 동역학적 방법과 두 가지 방법을 혼합하여 이용하는 방법 등으로 나뉘어 연구되었으며, 소결온

도가 높을수록, 그리고 유지시간이 길수록 몰드의 수축이 크고, 입자간의 넥 강도의 증진에 의해 적절한 몰드 강도가 발현될 수 있었다. 일정시간동안 알루미늄 몰드로 캐스팅하였을 때, 열역학적 방법에 비해 동역학적 방법이 우수한 특성을 나타내고 있으며, 이는 작은 크기의 기공 채널이 연속적으로 형성되어 있음을 말해준다.

위 세가지 방법에 대한 소결 수축을 변화, 캐스트 특성과 마모에 대한 저항성 등을 분석한 결과, 열역학적 방법은 우수한 캐스팅 특성을 나타내지만, 제작에 시간이 너무 많이 걸리고, 또한 제작된 몰드의 강도가 여러 번 사용하기에는 너무 약하였다. 이와는 반대로 동역학적 방법은 단시간동안의 캐스팅으로 충분한 강도를 얻을 수 있었으나, 캐스팅 특성이 나빠졌으며, 두 방법을 조합한 경우 제작 시간을 줄이면서도 만족할 만한 캐스팅 특성 및 적절한 몰드 강도를 얻을 수 있었다. 따라서 알루미늄 몰드 제작을 위한 최적의 소결조건은 복합소결임을 알 수 있었다.

또한, 제조한 다공질 알루미늄 몰드는 800°C부근에서의 고온 건조에 의해 일정한 캐스팅 rate를 회복할 수 있으며, 극한의 산, 염기성에 대한 내식성이 강해 가혹한 환경에서의 응용이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 한국과학재단 핵심전문연구(과제번호: KOSEF 961-0802-024-2)의 지원을 받아 수행한 것입니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. 백운규, "Slip Casting," *요업재료의 과학과 기술*, 8(3), 218-224 (1993).
2. 박재관, "석고몰드에서 용출된 Ca이 주입성형 알루미늄 소결체의 미세구조 및 파괴인성에 미치는 영향," *요업학회지*, 28(12), 943-952, (1991).
3. J.S. Reed, "Principles of Ceramics Processing," pp. 492-524, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, U.S.A 1995.
4. 유재근, "알루미늄의 복합 분리막에 제조에 관한 연구," pp.35-51, *한양대학교 박사학위논문*, 한양대학교, 서울, 1994.

5. Y. Kondo, "Slip Casting of Alumina Using Porous Alumina Mold," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **101**(8), 928-931 (1993).
6. K.S. Chou, "Microstructure Evolution During Fabrication of a Porous Ceramic Filter," pp.101-110, Ceramic Transaction, Vol. 31, Ed. by K. Ishizaki and L. Sheppard, Am. Ceram. Soc., Westerville, OH, U.S.A, 1993.
7. S. Sakka, "Preparation of Porous Materials by Sol-Gel Method," pp.27-40, Ceramic Transaction, Vol. 31, Ed. by K. Ishizaki and L. Sheppard, Am. Ceram. Soc., Westerville, OH, U.S.A, 1993.
8. A. Atkinson, "Gel Processing Route to Porous Ceramics," pp.41-50, Ceramic Transaction, Vol. 31, Ed. by K. Ishizaki and L. Sheppard, Am. Ceram. Soc., Westerville, OH, U.S.A, 1993.
9. A. Kazjkevics, "Production of Porous Alumina by Hot Isostatic Press," pp.111-116, Ceramic Transaction, Vol. 31, Ed. by K. Ishizaki and L. Sheppard, Am. Ceram. Soc., Westerville, OH, U.S.A, 1993.
10. H. Tanaka et. al., "Effect of Moisture on the Structure and Fracture Strength of Ceramic Green Bodies," *J. Am. Ceram. Soc.*, **77**(12), 3077-3080 (1994).
11. R.L. Coble, "Initial Sintering of Alumina and Hematite," *J. Am. Ceram. Soc.*, **41**(2), 55-61 (1958).
12. 이준근, "세라믹스의 소결," pp.114. 반도출판사, 서울, 1994.
13. W.D. Kingery and M. Berg, "Study of the Initial Stages of Sintering by Viscous Flow, Evaporation-Condensation and Self-Diffusion," *J. Appl. Phys.*, **26**(10), 1205-1212 (1955).
14. W.D. Kingery et. al., "Introduction to Ceramics," pp. 469-490, John Wiley & Sons, New York, NY, U.S.A, 1976.
15. J.S. Reed, "Principles of Ceramics Processing," pp.367-370, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, U.S.A 1995.