

## 테이프 캐스팅 거동에 미치는 알루미나의 입도분포의 영향

윤원균 · 김정주 · 조상희  
경북대학교 무기재료공학과  
(1997년 8월 7일 접수)

### Effects of Particle Size Distribution of Alumina on Behaviors of Tape Casting

Won-Gyun Yoon, Jeong-Joo Kim and Sang-Hee Cho

Dept. of Inorg. Mater. Eng., Kyungpook Nat. Univ.

(Received August 7, 1997)

#### 요 약

알루미나 요업체의 테이프 캐스팅시 알루미나 분체의 입도분포에 따른 슬러리에서의 유변학적 거동, 그린시트의 강도 및 밀도 그리고 소결밀도변화를 조사하였다. 알루미나 분체의 입도분포는 평균입경이 각각 3.58  $\mu\text{m}$  및 0.42  $\mu\text{m}$ 인 저소다의 상용알루미나 분체를 서로 혼합하여 조정하였다. 미세한 분체에 조대한 분체를 20% 첨가하는 경우 소결밀도의 큰 저하 없이 성형밀도가 높고 공정 중 다루기 쉬운 그린시트를 제조할 수 있었다. 또한 조대한 입자의 분율이 증가할수록 슬러리의 의가소성성질은 저하되었다.

#### ABSTRACT

Effects of particle size distribution of alumina ceramics on behaviors of tape casting were investigated with emphases on the rheological characteristic of slurry, green density, green sheet strength, and sintering density. For the control of particle size distribution of alumina, the commercial grade low soda alumina, which had different mean particle size of 3.58  $\mu\text{m}$  and 0.42  $\mu\text{m}$ , were chosen and blended together. As results, the mixing of 80 wt% fine powder and 20 wt% coarse powder(designated to FC20) led to the increase of packing density and strength of green sheet, and made it easy to handle during processing without lowering of sintering density. Besides, the pseudoplastic behavior of slurry decreased with increase of the fraction of coarse alumina powder.

**Key words :** Particle size distribution, Alumina ceramics, Tape casting, Pseudoplastic behavior

#### 1. 서 론

닥터 블레이드(doctor blade)를 이용한 테이프 캐스팅법은 세라믹분말에 용매와 분산제를 가하고 여기에 바인더, 가소제 등의 다양한 유기물을 첨가하여 균일한 슬러리상태로 제조한 후 블레이드의 틈새로 캐리어 필름과 함께 정해진 속도로 통과시켜 필름 위에 균일한 두께의 슬러리막을 형성시킨 후 이를 건조시켜 성형 시트로 만드는 방법이다.<sup>1-4)</sup> 이 방법의 장점은 건식성형에서 얻을 수 없는 두께가 얇고 균일한 넓은 면적의 세라믹 시트를 연속성형할 수 있다는 점이다. 그런데, 성형도중 가압하기가 어려워서 다른 성형공정에 비해 성형밀도가 상대적으로 낮을 수 있다.<sup>3,5)</sup>

일반적으로 성형체 상태로 제조된 그린시트의 상태가 소결체의 조직에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 결합이 없는 높은 밀도의 소결체를 얻기 위해서는 먼저, 균일하고 고충전된 그린시트를 제조하는 것이 중요하다.<sup>6)</sup> 이를 위해 먼저 용매내 분체의 분산안정성을 높여 균일한 슬러리를 제조하는 것이 중요하다.<sup>6,7)</sup> 그 외 고충전의 그린시트제조를 위해서는 슬러리의 분산성 이외에 슬러리 내부의 고형분의 분율(solid fraction)을 높여주어야 한다.<sup>8-11)</sup> 그러나 이러한 고형분의 증가는 슬러리 점도를 증가시키므로 성형에 필요한 슬러리의 점도 이상이 되게 고형분을 증가시킬 수는 없게 된다. 결국 고형분 분율을 높여 주는 데는 어려움이 따르게 되며, 보다 높은 성형밀도를 가진 시트를 제조하기 위해서는 성형

후 분체들이 최밀충전형태로 될 수 있게 분체의 입도와 입도분포를 제어하여야 한다.

일반적으로 건식법으로 가압성형하는 경우 분체의 충전률은 입도분포와 밀접한 관련을 갖게 된다. 균일한 크기의 입자의 경우 최밀충전하는 경우 72%를 갖게 되고, 틈새를 채울 수 있는 작은 크기의 입자가 동시에 존재하게 되면 충전률을 상당히 증진시킬 수 있는 것으로 보고되어져 있다.<sup>8-11)</sup> 한편 닥터 블레이드를 이용해 그린시트를 제조하는 경우는 슬러리는 전단속도가 증가할수록 점도가 감소하는 의가소성거동을 나타내어야만 한다.<sup>12)</sup> 즉 성형도중에는 높은 전단속도를 나타내기 때문에 낮은 점도를 나타내지만 성형 후에는 슬러리에 전단변형이 걸리지 않게 되어 용매를 머금은 응집체를 형성하여 점도가 상승하여 성형체 형상유지가 가능해진다. 따라서 그린시트내의 분체충전률은 분체 자체의 입도분포 뿐만 아니라 생성된 응집체의 밀도 및 크기분포에 동시에 크게 의존하게 된다.

그런데 지금까지 대부분의 닥터 블레이드 성형법에 관한 연구에서는 입자크기에 따른 분산제량의 변화거동 그리고 결합제, 가소제 등의 유기물 종류와 유기물의 양 결정, 이에 따른 유변학적 거동 등에 초점이 주어져 있고 사용하는 분체의 입도분포의 영향에 대하여서는 상대적으로 연구가 드문 편이다.<sup>10,13-17)</sup>

따라서 본 실험에서는 평균입경이 미세한 알루미늄 분말에 조대한 입경을 갖는 분말을 일정한 비율로 혼합하여 인위적으로 입도분포를 제어한 다음 이들 각각에 대하여 슬러리를 제조한 경우의 유변학적인 거동과 성형 및 소결 후 시트의 특성변화에 대한 상관관계를 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 원료물질

본 실험에서 사용된 알루미늄 분말은 SUMITOMO사

의 AM21과 AES11분말을 선택하였다. 이들의 평균입경은 각각 3.58  $\mu\text{m}$ , 0.42  $\mu\text{m}$ 로 이들 두 분체의 평균입경이 8배 이상 차이가 났다. 용매는 톨루엔, 에탄올, n-부틸알콜 혼합유기용매를 사용하였는데 이들의 무게비가 6:2:2인 azeotropic 조성이었다. 분산제는 산노코프(주)의 SN-9228을 사용하였으며 입자크기에 따라 첨가량을 변화시켰다. 그 외 결합제와 가소제는 Monsanto사의 B98과 DBP(dibutyl phthalate)를 사용하였으며 이들은 각각 무게비 2:1로 혼합하여 사용하였다.

Table 1에 슬러리의 배합조성을 나타내었다. 여기서 각 성분은 알루미늄 분체 100 g에 대하여 첨가된 무게를 의미한다. 여기서 FC(AM21 분체의 무게분율)는 입자의 크기분포가 제어된 알루미늄 분체 조성을 표시한다.

### 2.2. 실험공정

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 공정을 나타내었다. 1차 밀링(milling)에서는 무기원료와 혼합용매를 분산제와 함께 24시간 혼합하여 분산제가 분체표면에 흡착되게 하였다. 여기에 다시 바인더와 가소제를 혼합하여 24시간 2차 밀링을 행하였다. 혼합된 슬러리는 감압하에서 탈포(degassing)를 행하여 슬러리 중의 기포 및 과량의 용매를 제거하여 성형에 적절한 7000~10000 cps 정도의 점도를 갖게 하였다.

성형시 닥터 블레이드의 필름이동속도와 블레이드의 높이를 조절하여 전단속도가 15/sec 정도가 되게 조절하였다. 시트는 급격한 건조에 따른 건조균열을 막기 위해 밀폐된 상태에서 건조속도를 제어하였다.<sup>15)</sup> 결합제 및 가소제의 소각을 위해 2°C/min의 승온속도로 500°C 까지 승온한 후 6시간 동안 유지하였다. 소결은 공기 중에서 1650°C로 2시간동안 행하였는데 이때 승온속도는 5°C/min 그리고 로빙하였다.

### 2.3. 측정

분체의 입도분석은 Shimadzu 입도분석기로 행하였으

**Table 1.** Batch Formulations of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Slurries for Doctor Blade

Constituent		FC0	FC20	FC40	FC60	FC80	FC100
Powder	AES11	100	80	60	40	20	0
	AM21	0	20	40	60	80	100
Solvent	Toluene	27	27	27	27	27	27
	Ethanol	9	9	9	9	9	9
	n-Butyl alcohol	9	9	9	9	9	9
Dispersant	SN9228	1.2	1.08	0.96	0.84	0.72	0.6
Binder	PVB	6	6	6	6	6	6
Plasticizer	DBP	3	3	3	3	3	3

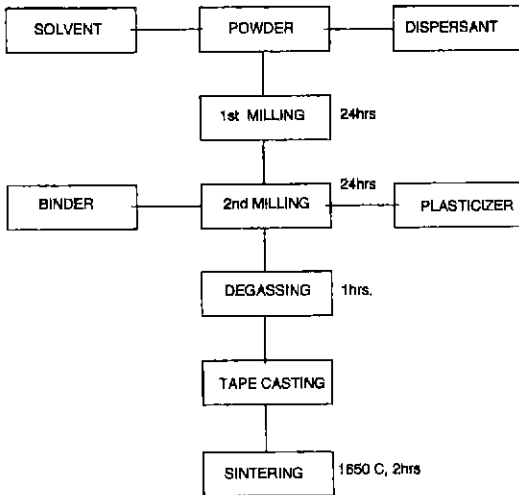


Fig. 1. Experimental procedure.

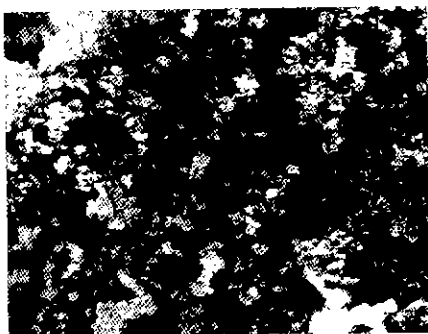
며 증류수에 sodium hexameta phosphate( $(\text{NaPO}_3)_6$ )를 0.2 wt% 섞은 분산액을 이용하여 알루미늄 분말을 잘 분산시킨 후 측정하였다. BET(micromeritics ASAP 2010)를 이용하여 분체의 표면적도 함께 측정하였다. 유변화적인 거동은 점도계(Haake VT500)를 사용하여 조사하였으며 특히 분산체의 최적량결정에 있어서는 일정한 전단변형률에서 분산제량을 변화시킬 때 점도가 가장 낮은 점으로 정하였다. 또한 그린시트의 강도 및 연신률을 조사하기 위해  $1 \times 5$  cm로 절단한 각 3개씩의 시트에 대하여 Autography(Shimadzu사 5 kgf load cell)를 이용하여 stress-strain 특성을 조사하였다. 그 외 시트의 수축률을 버니어캘리퍼스(Mitsutoyo CD-20)를 사용하여 측정하였고 밀도는 시트의 크기와 무게로 계산하였다. 시트 표면의 미세구조는 전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

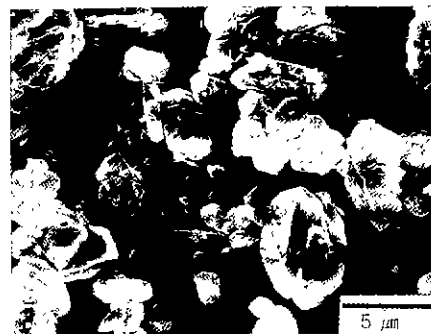
Fig. 2는 원료분체로 사용된 알루미늄 분체의 주사전자현미경사진이다. 먼저 (a)에 나타난 AES11분체는 입자의 형태는 불규칙하지만 대체적으로 등방형이었으며 입자응집이 거의 없는 상태였다. 기체흡착법에 의해 측정되어진 비표면적은  $7.0 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 나타났다. (b)에는 AM21분체를 나타내었는데 평균입경이  $3.58 \mu\text{m}$ 로 입자의 형태 및 응집정도는 AES11분체와 거의 유사하였다. 또한 비표면적은  $1.2 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 AES11과 비교하여 보았을 때 약 1/6 정도로 나타났다.

Fig. 3은 원료분말인 AES11과 AM21분말을 서로 혼합한 경우의 입도분포를 나타낸 것이다. (a)에 나타난 FC0 즉 AES11의 경우  $0.42 \mu\text{m}$ 의 평균입경으로 좁은 입도분포를 가지며, (f)에 나타난 FC100 즉 AM21의 경우는  $3.58 \mu\text{m}$ 의 평균입경에서 FC0의 입도분포보다 다소 넓은 입도분포를 가진다. (b)~(e)에 나타난 혼합분체인 FC20, FC40, FC60 그리고 FC80의 경우는 각각  $0.57 \mu\text{m}$ ,  $0.92 \mu\text{m}$ ,  $2.23 \mu\text{m}$  그리고  $3.49 \mu\text{m}$ 의 평균입경을 가지며 이중(bimodal)의 입도분포를 가진다.

Fig. 4는 FC0 및 FC100에 대하여 분산제량에 따른 1차 밀링 후 슬러리의 전단속도에 대한 점도변화를 나타낸 것이다. 두 가지 전단속도 즉 20, 50[1/s]에 대하여 측정하였는데 전단속도가 높을수록 낮은 점도를 보여주고 있어 이들 각 슬러리는 외가소성거동을 보여줄 수 있다. FC0 슬러리의 경우는 분산제량이 1.2 wt%일 때를 그리고 FC100의 슬러리에서는 0.6 wt%일 때 점도가 가장 낮았는데 이 점을 분산체의 최적량으로 정하였으며 이 경우 전단속도에 따른 분산최적점은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 비표면적의 비와 정확히 일치하지는 않았지만 비표면적이 큰 FC0분말이 FC100분말보다 많은 분산제를 요구함을 알 수 있다. 이



(a) AES11



(b) AM21

Fig. 2. Microstructure of used powders. (a) AESII and (b) AM21

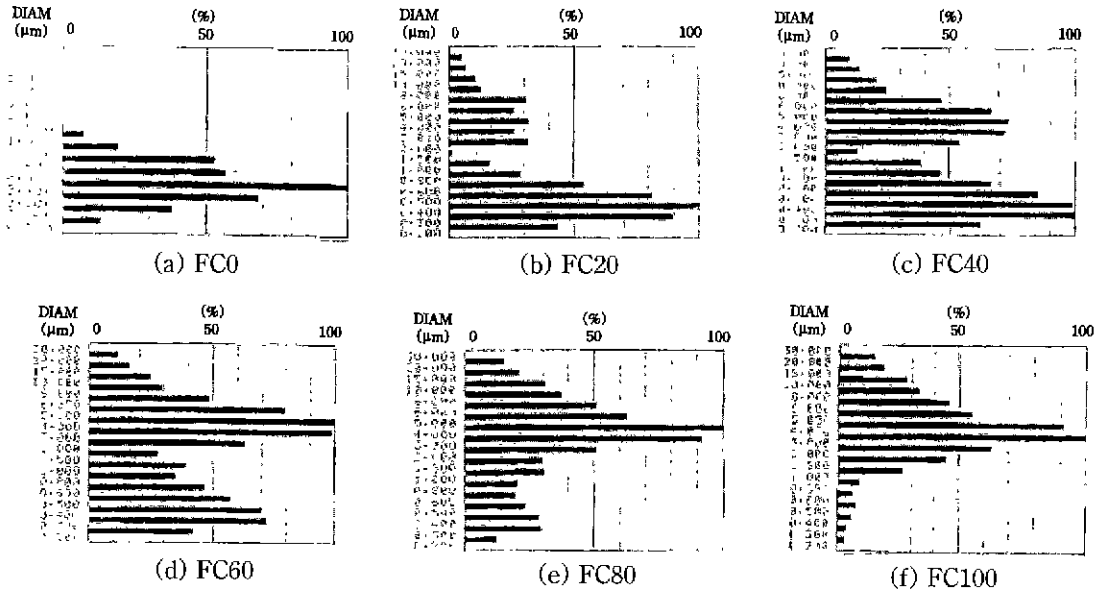


Fig. 3. Particle size distributions of used powders.

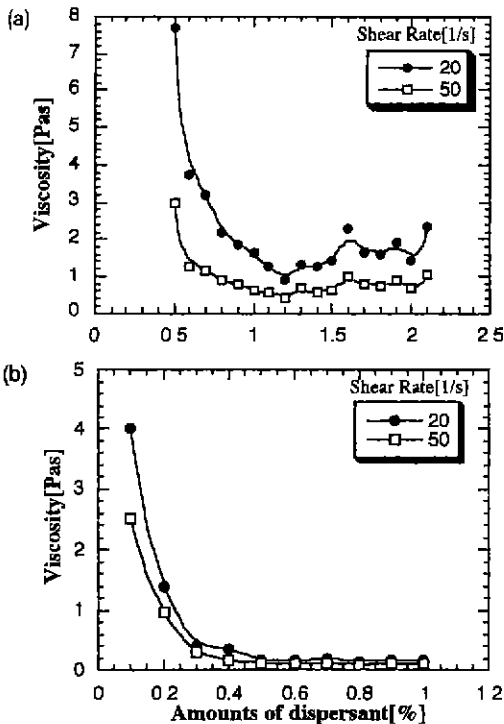


Fig. 4. Variations of viscosity with addition of dispersant in (a) FC0 and (b) FC100 slurry.

에 따라 FC20에서 FC80 사이의 혼합분체의 경우 FC0 및 FC100의 각각의 최적분산제량을 기준으로 지렛대법칙을 이용하여 Table 1에 나타낸 바와 같이 정하였다.

요약학회지

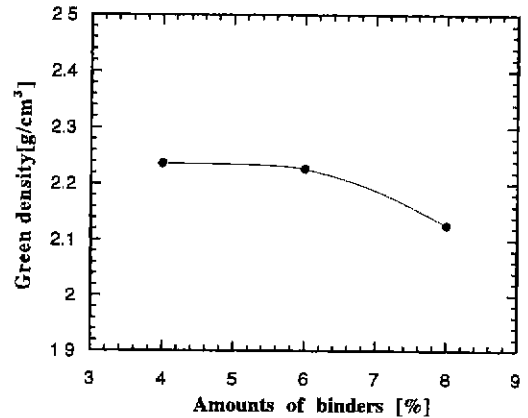


Fig. 5. Variations of green density with addition of binder.

그 외 FC100의 슬러리의 경우 FC0보다 전반적으로 높은 점도를 나타내었는데 이는 슬러리내 단위부피당 입자수가 많은 FC0의 경우 입자끼리의 충돌횟수가 증가하여 상대적으로 슬러리내에 응집체의 분율이 증가되었기 때문으로 추정하였다.<sup>19-21)</sup>

Fig. 5는 FC100 조성을 갖는 슬러리내에 대하여 Table 1에 나타낸 바와 같이 기타의 유기원료를 고정하고 결합제량만을 4%, 6%, 8%로 각각 변화시켰을 때 성형된 그린시트의 밀도인데 6% 이상의 결합제 첨가시 시트의 밀도가 감소됨을 알 수 있다. 결합제는 시트제조시 무기원료를 결합하여 주는 역할을 해주고 건조균열을 막아주지만 과량으로 첨가시 그린시트의 밀도를 급격히

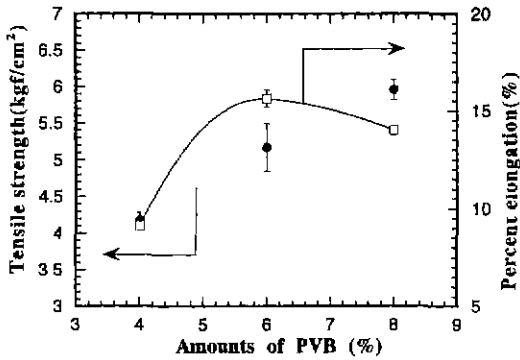


Fig. 6. Variations of tensile strength and % elongation of a green sheet of FC0 with addition of binder.

감소시키며 조각시 기공이나 결함을 남기게 된다.<sup>4)</sup>

한편 이러한 바인더의 최적량에 대한 결정을 위해서는 기타의 최종시트의 성질 또한 중요하다.<sup>22-24)</sup> Fig. 6은 Fig. 5에 나타낸 것과 동일한 시편에서의 결합제량에 따른 그린시트의 인장강도 및 연신률을 동시에 나타낸 것이다. 결합제량이 증가할수록 전반적으로 인장강도는 증가하지만 6%일 경우 가장 높은 연신률을 나타내고 있다. 이로서 그린시트의 밀도, 인장강도, 연신률 등을 고려하여 결합제의 최적함량을 6%로 정하였다.

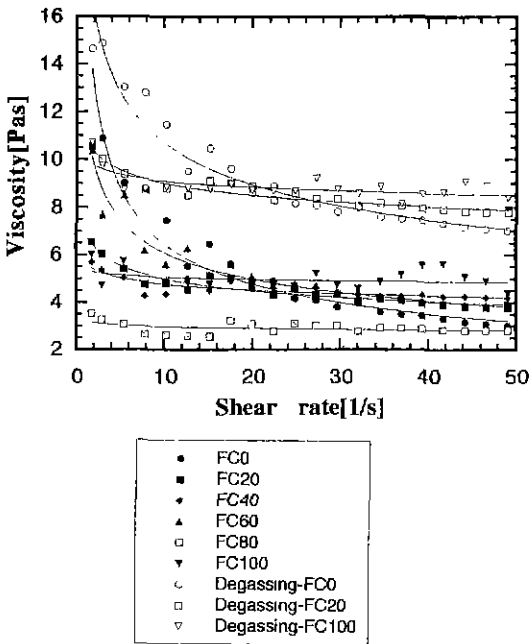


Fig. 7. Variations viscosity as a function of shear rate in the slurry after 2nd milling and degassing process.

Fig. 7은 각각의 슬러리에 대하여 2차 밀링 후 및 탈포공정 후의 전단속도에 대한 슬러리 점도변화를 동시에 나타낸 것이다. FC0와 같이 미세한 입자의 경우 전단속도가 증가할수록 점도가 하강하는 의가소성(pseudoplastic)거동을 보여주고 있으며 조대한 입자의 분율이 증가할수록 뉴턴(newtonian)거동으로 변화하는 경향을 보여주고 있다. 이는 평균입경증가에 따라 분체간 충돌횟수가 감소하게 되어 상대적으로 응집이 억제되며 이에 따라 뉴턴거동이 가까운 특성을 나타낸 것으로 추정하였다.<sup>25)</sup> 이외에도 서로 크기가 다른 분체가 혼합된 경우에는 전단속도가 낮아 슬러리내에서 응집체를 형성하더라도 굵은 입자사이의 공극에 가는 입자가 틈새 충전하여 응집체의 밀도는 높아질 수 있다. 이 경우에는 응집체내부에 포획되는 용매의 양이 상대적으로 줄어들게 되며 결국 응집체 파괴전 후 전단속도변화에 따른 슬러리내의 유효수(free liquid)의 양은 크게 변화하지 못하기 때문에 뉴턴거동을 나타낼 수도 있다. 한편 탈포 후에는 탈포과정시 용매의 증발에 의하여 슬러리 점도는 7000~10000 cps 정도로 점도가 증가하였다. 이 경우도 2차 밀링한 슬러리의 경우와 마찬가지로 전단속도가 증가될 때 점도가 감소하는 의가소성(pseudoplastic)거동을 보이며 조대한 입자의 분율이 증가할수록 의가소성 현상이 억제되었다. 그 외 본 실험에서는 전단속도를 증가 및 감소시 점도변화의 이력은 관찰되지 않았다.

일반적으로 현탁액의 겔보기점도( $\eta_s$ )는  $\eta_s = K(\dot{\gamma})^{n-1}$ 의 멱함수로 표시된다.<sup>26)</sup> 여기서 K는 연도지수, n은 뉴턴거동으로부터 이탈되는 정도를 나타내는 상수로서 의가소성일 때는 1 이하이다. Fig. 8은 각각의 슬러리에 대한 n값의 변화를 나타낸 것이다. 가는 입자에 조대한 입자가 첨가됨에 따라 의가소성거동이 억제되고 있다. 그런데 FC60 즉 조대한 입자의 분율이 60%인 경우에는 심한 의가소성거동을 보였으며 예상된 감소경향에서 크게

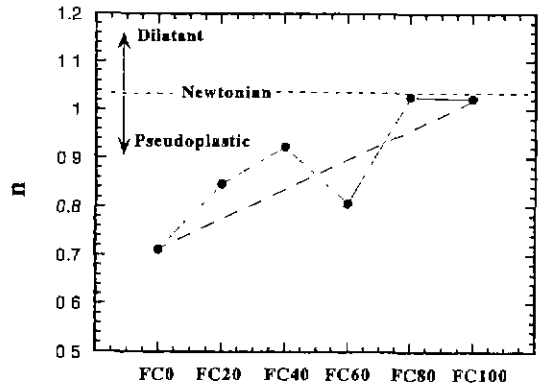


Fig. 8. Variations of n value in slurry with the changes of particle size distribution.

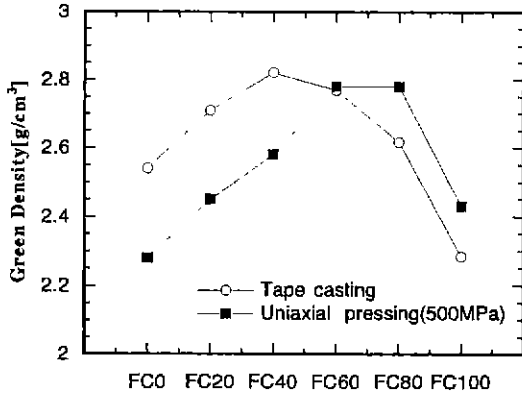


Fig. 9. Variations of green density with the changes of particle size distribution.

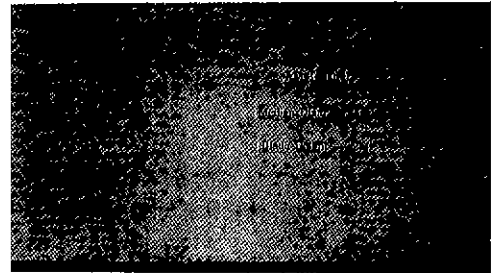
벗어났다. 특히 의가소성경향의 증가현상은 응집체 내부에 함유하는 용매량이 많다는 것을 암시하고 이에 따라 응집체의 밀도가 낮아져 그린시트의 밀도 또한 낮을 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 9는 닥터 블레이드방법으로 제조한 시편의 경우의 그린시트 밀도와 500 MPa의 압력으로 가압성형한 시편의 성형밀도의 변화를 동시에 나타내었다. 가압성형한 경우에는 FC60 및 FC80에서 가장 높은 성형밀도를 나타내었는데 단순히 굵은 입자의 틈새자리에 미세한 입자의 충전되는 일반적인 Furnas' model과 잘 일치하고 있다.<sup>26)</sup> 닥터 블레이드방법으로 성형한 경우에는 FC40 즉 미세한 분체와 조대한 분체를 각각 60:40으로 혼합한 경우 가장 높은 밀도를 나타내었다 또한 의가소성현상이 두드러졌던 FC60에서는 상대적으로 낮은 밀도를 나타내었다. 결국 닥터 블레이드방법으로 제조된 그린시트의 밀도는 단순한 입자충전 이외에도 의가소성을 나타내는 슬러리내의 입자들이 응집체를 이루어 충전에 참가하기 때문에 응집체의 밀도 및 이들간의 충전이 중요한 영향을 주는 것을 암시한다.

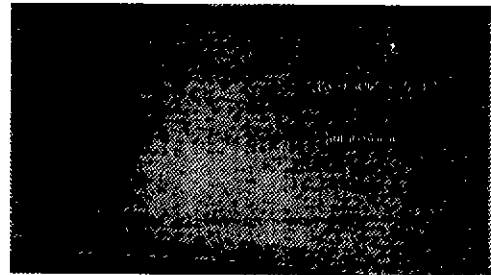
Fig. 10는 성형된 그린시트의 사진이다. (a)에 나타난 FC0조성에서는 사진에서와 같이 심한 건조균열이 발생하였는데 블레이드 높이가 1.6 mm로 시트의 두께는 0.8 mm였다. FC0의 경우 블레이드 높이가 0.8 mm부터 2.0 mm에 이르기까지 변화시켜 시트의 두께를 제어하였는데 1.2 mm 이상의 블레이드 높이의 경우에 건조균열이 발생하였다. (b)에 나타난 FC100의 경우는 블레이드 높이가 2.2 mm로 하여 시트의 두께가 1.1 mm로 된 경우였는데 건조균열이 거의 없는 시트이다. FC100의 경우 블레이드 높이가 2.4 mm까지 모두 건조균열이 없는 균일한 시트를 제조할 수 있었다. 이로써 조대한 입자의 경우 더욱 쉽게 건조균열이 없는 시트를 제조할 수 있었다.



(a) FC0, Sheet Thickness=0.8mm



(b) FC100, Sheet Thickness=1.1mm



(c) FC20, Sheet Thickness=1.1mm

Fig. 10. Photographs of green sheet.

그리고 (c)에 나타난 FC20의 경우는 블레이드 높이가 2.0 mm인 경우로 시트의 두께가 1.1 mm였는데 건조균열이 관찰되지 않았다. 즉, 건조균열이 매우 심한 FC0에 조대한 분체를 20 wt% 첨가함으로써 효과적으로 건조균열을 막을 수 있었다. 실제로 굵은 입자와 가는 입자가 혼합된 FC20, FC40, FC60, FC80의 슬러리는 블레이드 높이를 1.2 mm~2.4 mm까지 다양한 높이의 시트를 제조하였을 때 건조균열이 발생하지 않은 경우가 대부분이었으며 건조균열이 발생한 경우도 그 크기가 매우 적었다.

Fig. 11은 제조된 각 시트의 인장강도와 연신률을 나타낸 것이다. FC0의 경우가 FC100의 경우보다 높은 인장강도를 나타내 미세한 분체의 경우보다 높은 인장강도를 나타내었다. 특히 크기가 서로 다른 분체를 혼합한 경우 즉 FC20, FC40, FC60, FC80의 시트가 단일 무기 원료의 슬러리로 제조한 FC0과 FC100보다 높은 인장

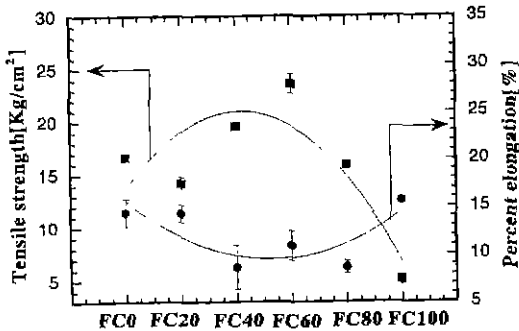


Fig. 11. Variations of tensile strength and percent elongation of green sheets with the change of particle size distribution.

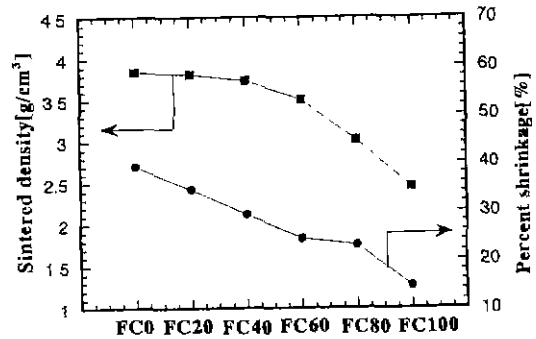


Fig. 12. Variations of sintered density and percent shrinkage with the changes of particle size distribution.

강도를 나타냈다. 반대로 연신률은 단일의 FC0과 FC100보다 혼합의 FC20, FC40, FC60, FC80이 낮게 나타났다. 즉 인장강도는 그린시트의 밀도와 비례하며 연신률은 반비례하는 것으로 나타났다.<sup>27,28)</sup>

Fig. 12에는 제조된 시트 각각의 소결밀도와 수축률을 나타내었다. FC0의 경우가 가장 높은 밀도를 나타내었으며 조대한 입자가 첨가될수록 소결밀도가 점점 감소하였다. 소결밀도는 FC0에서 FC40까지는 완만한 감소를 보였으며 FC60에서 FC100까지는 급격한 감소를 보였다. 수축률 또한 그와 유사한 거동을 보였다. 혼합된 무기원료를 사용한 경우의 그린시트 밀도가 높게 나타났지만 소결밀도는 그린시트의 밀도와 상관없이 굵은 입자의 첨가에 따라 점점 감소하였다. 이는 서로 크기가

다른 분체를 혼합하는 경우 조대한 입자들 사이의 공극을 미세한 입자들로 채워 성형밀도를 높일 수 있으나 전체적으로 입자크기가 증가하여 소결구동력을 저하시켰기 때문으로 추정하였다.<sup>29)</sup> 한편 FC20의 경우는 FC0와 필적할만한 소결밀도를 나타내었다.

Fig. 13은 제조된 시트의 소결체 미세구조이다. 소결은 2°C/min으로 600°C까지 승온하여 6시간 동안 바인더를 소각하고 5°C/min로 1650°C까지 올려 2시간 동안 유지하여 로냉하였다. 굵은 입자의 분율이 증가할수록 소결체의 입자크기는 오히려 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 굵은 입자가 첨가될수록 치밀화가 어렵고 이에 따라 소결체내부에 존재하는 기공이 입자성장을 억제하였기 때문으로 믿어졌다.

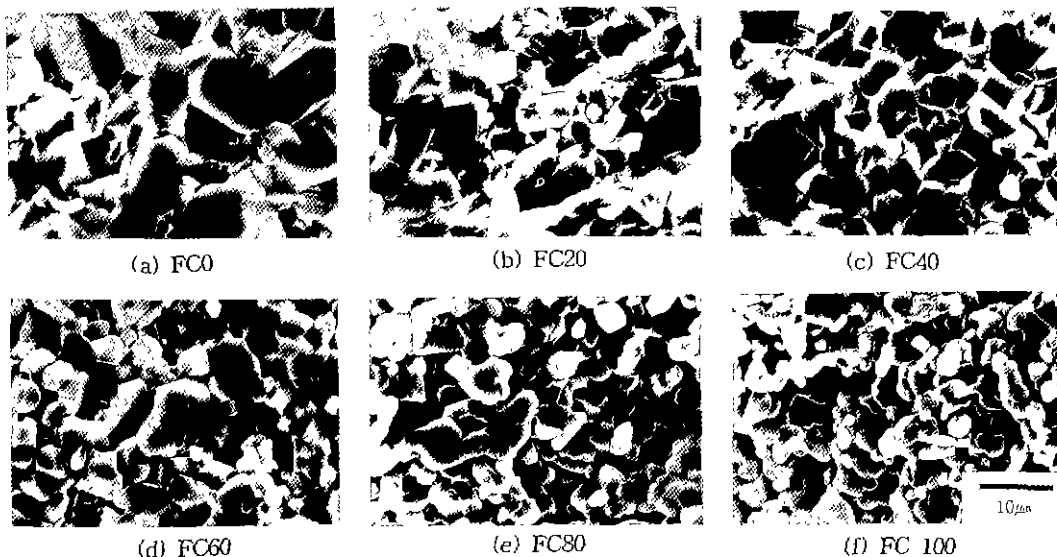


Fig. 13. Photographs of specimens sintered at 1650°C for 2 hours.

#### 4. 결 론

미세한 알루미늄이나 분체에 조대한 입경을 갖는 알루미늄 분체를 일정비율로 혼합하여 인위적으로 입도분포를 제어하여 이들을 닥터 블레이드방법으로 성형할 경우 슬러리의 유변학적 특성과 소결특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 조대한 입경의 분율이 증가할수록 슬러리의 유변학적 특성에서 의가소성성질이 약화되었다. 또한 그린시트에서 건조균열이 줄어들어 공정이 보다 쉽게 이루어지나 소결밀도는 감소하며 아울러 입자크기가 미세해졌다.

2. 닥터 블레이드방법으로 제조한 경우 FC40 조건에서 최대성형밀도를 나타내었으나 건식법의 경우 FC60과 FC80에서 최대성형밀도를 나타내어 서로 상이한 결과를 나타내었다. 이는 FC60으로 슬러리를 제조한 경우 상대적으로 심한 의가소성을 나타내었고 이 경우 생성된 응집체의 밀도가 낮기 때문으로 추정하였다.

3. 닥터 블레이드를 이용한 성형공정에서는 FC20의 경우와 같이 미세한 분체에 일부 조대한 입자를 첨가하면 시트제조공정이 보다 용이하며 아울러 성형밀도를 모두 상승시킬 수 있고 소결밀도도 미세한 분말만 사용한 경우(FC0)와 필적할만 하였다.

#### REFERENCES

- Andreas Roosen, "Basic Requirement for Tape Casting of Ceramic Powders," pp.675-692, Ceramic Transactions Vol. 1, Ceramic powder science, Ed. Gary L. Messing, The American Ceramic Society, Inc., Westerville, Ohio, 1988.
- J. C. Williams, "Doctor Blade Process," pp.173-198, in Treatise on Materials Science and Technology, Vol 9, Ceramic Fabrication Processes, Ed. by F. Y. Wang, Academic Press, New York, 1976.
- R. E. Mistler, D. J. Shancfield, R. B. Runk, "Tape Casting of Ceramics," pp. 411-448, in Ceramic Processing before Firing, Ed. by Y. Onoda, Jr. and Larry L. Hench, John Wiley & Sons, New York, 1978.
- 김영민, 홍양기, "Alumina기판 양산용 Tape Casting기술," *요업재료의 과학과 기술*, 8(3), 225-235 (1993).
- Theodore P. Hyatt, "Electronics : Tape Casting, Roll Compaction," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 74(10), 56-59 (1995).
- Koichi Nagata, "Rheological Behavior of Suspension and Properties of Green Sheet-Effect of Compatibility between Dispersant and Binder," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 100(10), 1271-1275 (1992).
- 이명재, 김재룡, "세라믹 Slip Casting에 있어서 분산기구 및 유동 특성에 대한 고찰," *요업재료의 과학과 기술*, 6(1), 53-63 (1991).
- David C. C. Lam And Mitsuo Nakagawa, "Effect of Particle Size Distribution Shape on Composite Packing Density of Bimodal Mixtures," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 102(2), 133-138 (1994).
- R. J. Mackinnou and J. B. Blum, "Particle Size Distribution Effects On Tape Casting Barium Titanate," pp.150-157, in Advances in Ceramics, Vol. 9, Forming of Ceramics, Ed. by J. A. Mangels, The American Ceramic Society, Inc. Columbus, Ohio, 1984.
- G. W. Phelps and M. G. McLaren, "Particle Size Distribution and Slip Properties," pp.221-225, in Ceramic Processing before Firing, Ed. by Y. Onoda, Jr. and Larry L. Hench, 1978.
- Seiichi Taruta, Kunio Kitajima, Nobuo Takusagawa, Kiyoshi Okada And Nozomu Otsuka, "Influence of Coarse Particle Size on Packing and Sintering Behavior of Bimodal Size Distributed Alumina Powder Mixtures," *J Ceram Soc. Jpn.*, 101(5), 583-588 (1993).
- T. A. Ring, "A Model of Tape Casting Bingham Plastic and Newtonian Fluids," pp.569-577, in Advances in Ceramics, Vol. 26, Ceramic Substrates and Packages for Electronic Applications. Ed. by Man F. Yan, The American Ceramic Society, Inc., Westerville, Ohio, 1989.
- K. Niwa, Y. Imanaka, N. Kamehara and S. Aoki, "Low-K and low-T Sintering Materials for Multilayer Circuit Boards," pp.323-337, in Advances in Ceramics, Vol. 26, Ceramic Substrates and Packages for Electronic Applications, Ed. by Man F. Yan, The American Ceramic Society, Inc., Westerville, Ohio, 1989.
- Gideon S. Grader and Limor Zuri, "Tape Casting Slip Preparation by in Situ polymerization," *J. Am. Ceram. Soc.*, 76(7), 1809-14 (1993).
- E. S. Torney, R. L. Pober and H. K. Bowen, P. D. Carvert, "Tape Casting-Future Developments," pp.140-149, in Advances in Ceramics, Vol. 9, Forming of Ceramics, Ed. by John A. Mangels, The American Ceramic Society, Inc., Columbus, Ohio, 1984.
- Richard E Mistler, "Tape Casting:The Basic Process for Meeting the Needs of the Electronics Industry," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 69(6), 1022-1026 (1990).
- Rodrigo Moreno, "The Role Of Slip Additives In Tape Casting Technology:Part I-Solvents and Dispersants," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 71(10), 1521-1531 (1992).
- George W. Scherer, "Theory of Drying", *J. Am. Ceram. Soc.*, 73(1), 3-14 (1990).
- K. R. Mikeska and W.R.Cannon. "Dispersants for Tape Casting Pure Barium Titanate," pp.164-183, in Advances in Ceramics, Vol. 9, Forming of Ceramics, Ed. by John A. Mangels, The American Ceramic Society, Inc., Columbus, Ohio, 1984.
- Rodrigo Moreno and Gonzalo Cordoba, "Oil Dispersion of Alumina for Tape Casting," *Am. Ceram. Soc.*



- Bull.*, **74**(7), 69-74 (1995).
21. Peter A. Smith, "Particle Crowding Analysis of Slip Casting," *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**(3), 809-12 (1995).
  22. W. R. Cannon And R. Becker, "Interactions Among Organic Additives Used for Tape Casting," pp.525-541, in *Advances in Ceramics*, Vol. 26, Ceramic Substrates and Packages for Electronic Applications, Ed. by Man F. Yan, The American Ceramic Society, Inc, Westerville, Ohio, 1989.
  23. Michael J. Cima, Jennifer Alan Lewis and Alan D. Devoe, "Binder Distribution in Ceramic Greenware During Thermolysis," *J. Am. Ceram. Soc.*, **72**(7), 1192-99 (1989).
  24. Laurel M Sheppard, "The Changing Demand for Ceramic Additives," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **69**(5) (1990).
  25. Rangarajan Pitchumani, "Generalized Fluid Flow Model for Ceramic Tape Casting," *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**(9), 2497-503 (1995).
  26. James S. Reed, Introduction to The Principles of Ceramic Processing, pp.167-178. John Wiley and Sons, Inc, 1988.
  27. R. L. Hoffman, "Discontinuous and Dilatant Viscosity Behavior in Concentrated Suspensions, II Theory and Experimental Tests," *Journal of colloid and interface science*, **46**(3), 491-506 (1974).
  28. Angela Karas, Oshiya Kumagai, And W. Roger Cannon, "Casting Behavior and Tensile Strength of Cast BaTiO<sub>3</sub> Tape," *Advanced Ceramic Materials*, **3**(4), 374-377 (1988).
  29. R. M. German and M. Bulger, "A Model for Densification by Sintering of Bimodal Particle Size Distributions," *Intern. J Powder Met.*, **28**, 301-331 (1992).