

전기전도성을 가지는 매크로다공성 알루미노실리케이트 -탄소 복합체 제조

최광민¹, 조우석¹, 김종영^{1,a}, 정종열², 백승우², 이규형^{3,b}

¹ 한국세라믹기술원 이천분원

² (주)맥테크

³ 강원대학교 나노응용공학과

Synthesis of Electro-conducting Macroporous Aluminosilicate-Carbon Nanocomposite

Kwang Min Choi¹, Woo-Seok Cho¹, Jong-Young Kim^{1,a}, Jong-Yeol Jung², Seung-Woo Baik²,
and Kyu Hyoung Lee^{3,b}

¹ Icheon Branch, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Icheon 17303, Korea

² Maxtech Co. Ltd., Daegu 42702, Korea

³ Department of Nano Applied Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

(Received November 1, 2016; Revised November 4, 2016; Accepted November 7, 2016)

Abstract: Recently, macroporous ceramic materials with high electrical conductivity and mechanical strength are urgently needed for semiconductor and display manufacturing devices. In this work, we obtained electro-conducting macroporous aluminosilicate ceramics having surface resistivity of 108~1,010 ohm by dispersing electro-conducting carbon in ceramic matrix. By addition of 0.5~3.0 wt% frit glass, chemical bonding between grains was strengthened, and flexural strength was enhanced up to 160 MPa as a result. We evaluated the characteristics of present ceramics as vacuum chuck module for liquid crystal display manufacturing devices.

Keywords: Macroporous, Aluminosilicate, Anti-static, High strength, Vacuum chuck

1. 서론

다공성 세라믹은 여과(filtration), 흡착(adsorption), 촉매 및 담체(catalysts and catalyst supports), 경량 구조재료(lightweight structural components) 등 다양한 산업적 응용에 사용될 것으로 기대되고 있다.

a. Corresponding authors; jkim@kicet.re.kr

b. Corresponding authors; khlee2014@kangwon.ac.kr

Copyright ©2017 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이에 따라, 다공성 구조를 제어하고 물성을 향상시키려는 다양한 노력이 지난 수십 년간 진행되어 왔다. 이 중에서도 기공크기(pore size)가 50 nm보다 큰 매크로포러스 세라믹(macroporous ceramics)은 디젤입자 흡착 필터(diesel particulate filters) [1-3], 정수필터(water purification filters) [4], 금속 캐스팅용 발포 필터(foam filters for metal casting) [5], 바이오 반응기(bioreactor) [6,7], 전기화학반응 전극(electrochemical electrode) [8], 전자세라믹스(electro-ceramics) [9], 내화물(refractories) [10,11] 등에 적용되어왔다. 최근에는 반도체, 디스플레이용 공정장비에서 웨이퍼 또는 대형 유리 기판을 운반하는 진공척 등 모듈부품에도

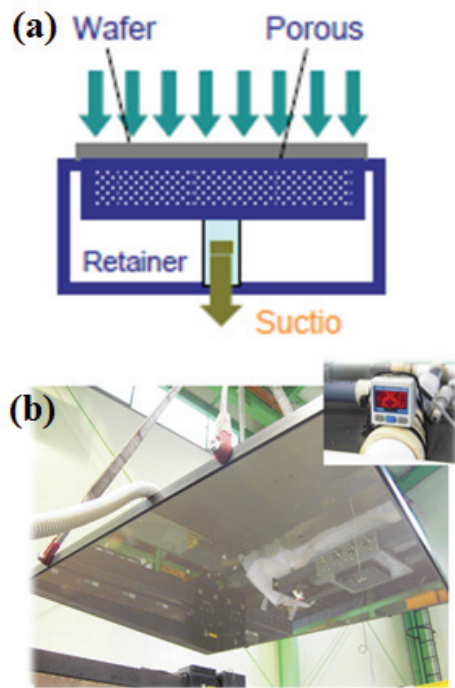


Fig. 1. (a) A schematic of vacuum chucking using porous ceramics and (b) vacuum chucking device for LCD substrates.

다공성 세라믹이 적용되고 있다(그림 1). 이러한 다공성 세라믹을 제조하는 공정은 부분소결(partial sintering), 복제템플릿 법(replica templates), 직접발포 법(direct foaming) 등으로 나누어진다.

본 연구에서는 부분 소결법을 이용하여 알루미늄 실리케이트 다공구조를 유도하고 프리트(frit)를 첨가함으로써 입자 사이의 목 형성(neck formation)을 강화하여 우수한 기계적 강도를 지니는 매크로포러스(macroporous) 프리트결합 알루미늄실리케이트(frit-bonded aluminosilicate, ASF) 세라믹소재를 개발하고자 하였다. 부분소결법(partial sintering)은 다공성 세라믹을 만드는 가장 전통적인 방법 중 하나 이면서도 최근 많은 기술적인 진보를 이루어왔다. 성형체의 입자들은 열처리 공정을 통하여 표면 확산(surface diffusion) 또는 증발-응결(evaporation-condensation) 과정을 통하여 결합이 형성되고 열처리 공정 중 완전소결이 이루어지지 않도록 함으로써 균일한 다공성구조를 이루도록 하는 방법이다. 기공 크기(pore size)과 기공율(porosity)을 원료 입자의 크기와 소결정도를 조절함으로써 제어하게 된다. 다공체의 기계적 성질은 기공율, 기공크기 뿐 아니라,

그레인(grain)간의 목형성(neck growth)에 의존하게 된다. Green 등은 표면확산(surface diffusion)에 의한 인접한 그레인 간의 목형성이 모듈러스(elastic modulus) 값을 완전 소결체의 10%까지 증가시킴을 보인바 있다 [12,13]. 이러한 방법에 의한 기공율은 대개 50%이하까지 가능하며 산업적으로는 용융금속 필터(molten metal filters), 에어레이션 필터(aeration filters in wastewater treatment plants) [14], 정수필터(water purification membranes) [4] 등에 사용되고 있다.

최근에는 다공성 세라믹의 입자간 결합과 기계적 강도를 증가시키기 위하여 다양한 세라믹공정이 적용되고 있다. Oh [15], Jayaseelan [16], Yang [17] 등은 방전플라즈마 소결법(spark plasma sintering)을 이용하여 다공성 Al_2O_3 복합체를 소결하였으며 기계적강도가 두껍고 강한 목형성으로 주목할 만큼 증가시킨 바 있다. 또한, 반응소결(reactive sintering)을 이용한 부분소결법은 반응물이 그레인에 에피택시얼하게 석출되어 잘 발달된 목형성 구조를 이룬다고 알려져 있다 [18,19]. Suzuki 등은 천연 dolomite [$CaMg(CO_3)_2$]와 합성 지르코니아(zirconia) 분말의 반응소결을 이용하여 3차원 목형성 구조를 가진 다공성 $CaZrO_3/MgO$ 세라믹을 합성한 바 있다 [20,21]. She 등은 산화-결합공정(oxidation-bonding process)을 이용하여 우수한 산화저항성을 갖는 다공성 SiC 세라믹을 저온에서 합성하는데 성공하였다 [22]. 분말성형체를 비활성분위기(inert atmosphere) 대신에 산화분위기에서 열처리하였다. 열처리 중 표면산화가 일어나고 SiC 입자가 산화된 SiO_2 glass로 인하여 서로 결합한 구조를 가지고 있다.

최근 반도체 및 디스플레이 제조 산업에서 다공성 세라믹을 이용한 핸들러, 진공척 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 5세대 이상 LCD 디스플레이 공정에서 1 m 이상 대형유리기판의 사용이 보편화되면서 대형화가 진행되고 있으며 이와 더불어 대전방지 기능을 가진 고부가가치 제품에 대한 요구가 급증하고 있다. 플라스틱 기판을 사용하는 OLED, Flexible display 공정에는 대전방지 기능이 필수적이다. 기존에는 도전제를 수지와 컴파운딩하여 코팅하는 방법을 주로 사용하였으나, 수지의 물성이 낮아 내마모성이 요구되는 부품에서는 파티클이 발생하는 이슈가 있다. 본 연구에서는 흑연을 첨가하여 대전방지에 적합한 $10^8 \sim 10^{10}$ ohm의 표면저항을 가지며 우수한 기계적 강도를 가지는 다공성 세라믹을 개발하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 원료

알루미늄 분말 (99.8%, 3 μm , AES-11, Sumitomo), 실리카 (CA-20, Sibelco Korea), Mn-Fe-Co 안료 ($\text{MnCO}_3:\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{Co}_3\text{O}_4 = 6:3:1$, MnCO_3 Hubei Kaiyuan Chemicals Kaiyuan, Fe_2O_3 Daejin Korea, Co_3O_4 Umicore Europe)를 분말상태의 세라믹 원료로 사용하였다. 소결조제로 프리트(frit) 분말(14-3982M, TOMATEC)을 사용하였다. 이러한 세라믹원료에 전기전도성을 부여하기 위하여 흑연(graphite, Superior Graphite, Superior Carbon, USA)을 첨가하여 복합분말을 제조하였다.

2.2 프리트 결합 알루미늄 실리케이트(frit-bonded aluminosilicate, ASF)분말합성

ASF 슬러리를 제조하기 위해 증류수에 알루미늄, 실리카, Mn-Fe-Co 안료를 질량비로 각각 8:1.5:0.5로 첨가하였다. 사용된 분산제와 결합제는 polycarboxylate ammonium(Cerasperse 5468-CF, San Nopco Co. Ltd.)와 polyvinyl alcohol (PVA-205, Kuraray)이며 각각 고형분 대비 1.0 wt%와 10.0 wt%로 첨가하였다. 결합제로 프리트를 적절한 함량 첨가하였다. 균일한 슬러리를 제조하기 위해 $\varnothing 2$ ($\varnothing = 2$) 알루미늄 볼을 이용하여 6시간동안 110 rpm의 회전조건에서 볼 밀링을 하였다.

제조된 슬러리는 열풍온도 180°C, 배풍온도 80°C, 디스크 회전속도 8,500 rpm, 슬러리 투입량 0.3 L/min 조건으로 스프레이 드라이어(HCSY-01, 화창기연)를 이용하여 건조하였다. 스프레이 드라이 후 제조된 ASF 분말 과립은 유동성이 뛰어나고 균일한 구형상을 나타내었다. 이후 154 μm sieve에 통과시켜 분말 상태로 완전 건조하였다.

2.3 ASF-흑연 복합체 분말합성

증류수에 동일한 세라믹 원료 분말을 고형분 60 wt%가 되도록 첨가하였다. 전기 전도도를 증가시키기 위하여 흑연분말을 각각 고형분 대비 0.2~3.0 wt%로 첨가하였다. 균일한 슬러리를 제조하기 위해 $\varnothing 2$ 알루미늄 볼을 이용하여 6시간동안 110 rpm의 회전조건에서 볼 밀링을 하였다. 슬러리는 오븐에 넣고 100°C에

서 24시간 동안 증류수를 증발시켰으며, 건조 과정에서 에탄올을 일정시간 분사하였다. 이후 154 μm sieve에 통과시켜 분말 상태로 완전 건조하였다.

2.4 성형 및 소결

과립을 bar형 금속몰드(30 mm \times 60 mm)를 이용하여 일축가압성형(45 g, 3 ton, 2 min)하여 bar 형태로 압축하였다. 성형체는 용융로(Thermal System & technology)를 사용하여 Ar 분위기에서 탈지하였으며, 탈지 후 전기로를 사용하여 N_2 분위기에서 각각 1,200°C, 1,300°C에서 상압 소결하였다.

2.5 전기전도성 평가 방법

표면저항은 저항측정기(Trek resistance meter 152-1, TREK inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 2단자법 프로브(152-2P), 또는 링형 단자법 프로브(152-CR-1)를 이용하여 ANSI/ESD 어소시에이션(association) 표준 중 평판물질에 대한 표준인 STM11.11(Surface resistance measurements of static dissipative planar materials) 및 IEC 61340-2에 준하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 합성법

본 연구에서는 고온에서 제조되는 다공질 알루미늄 세라믹스의 제조온도를 획기적으로 낮추고, 보다 경제적인 제조방법을 개발하고자 알루미늄 분말(~3 μm)에 실리카(SiO_2) 및 Mn-Fe-Co안료를 첨가하여 1,250°C에서 소성함으로써 다공성 알루미늄실리케이트 세라믹스를 제조하였다. 특히 프리트를 0.5~15.0 wt% 범위에서 첨가하여 다공질 알루미늄실리케이트 입자의 목을 강화시킴으로써 기계적 강도가 개선된 세라믹스를 제조하고자 하였다. 프리트의 첨가량 및 소결조건이 미세조직, 기공률 및 꺾임강도에 미치는 영향을 고찰하였다. 그림 2에 보이는 바와 같이 흑연이 첨가된 ASF 세라믹스의 경우, XRD 회절패턴에서 알루미늄 이외 피크는 나타나지 않으며 이는 첨가된 실리카, Mn-Fe-Co안료, 프리트는 주로 비정질로 존재하면서 입자간 결합을 증가시키는 효과를 보임을 예상할 수 있다.

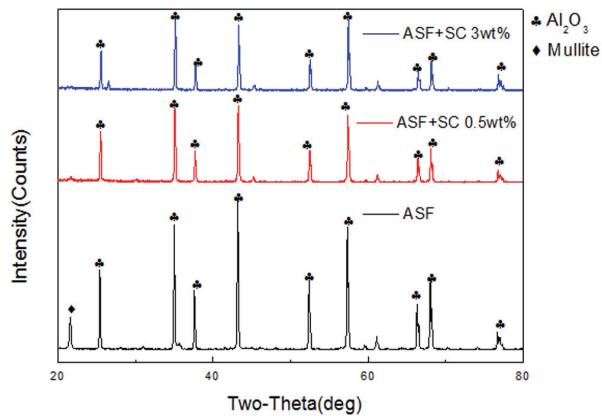


Fig. 2. XRD patterns of ASF and ASF/carbon (SC 0.5/3.0 wt%) ceramics sintered at 1,300°C.

3.2 미세구조

그림 3은 1,300°C N₂분위기에서 2시간 동안 소결한 다공질 ASF 세라믹스에서 프리트(frit) 함량 및 소결온도의 변화에 따른 미세조직의 변화를 보여준다. 흑연(SC) 함량은 0.5 wt%로 조절되었다. 그림 3(b)의 미세조직은 1.0 wt%의 프리트가 첨가된 ASF세라믹으로써 첨가된 프리트의 함량이 상대적으로 적고 소결온도가 낮아서 프리트가 입자 사이의 공간을 일부만 채우고 있으며 충분히 목 형성을 이루지 못하고 있음을 관찰할 수 있다. 그림 3(c)는 2.0 wt%의 프리트가 첨가된 시편의 미세조직으로써, 프리트의 함량이 증가함에 따라 입자 사이에 좀더 넓은 영역에서 프리트에 의한 결합이 형성되는 것을 알 수 있다. 입자 사이에 프리트에 의한 결합이 비교적 잘 일어난 것을 관찰할 수 있고, 1.0 wt% 첨가된 시편에 비해 프리트에 의한 치밀화가 일부 진행되어 좀 더 치밀한 미세조직을 보여준다. 그림 3(d)는 5.0 wt% 프리트가 첨가된 시편의 미세조직으로, 프리트가 입자 사이의 기공을 채워서 3.0 wt% 프리트를 첨가한 시편에 비해 상당한 치밀화가 진행된 것을 관찰할 수 있다. 상기 관찰결과는 일반적인 세라믹스-유리 복합체의 점성유동 소결거동에 의해 이해되어질 수 있는데 [23,24], 본 공정에서 온도가 증가함에 따라 프리트의 유리화가 진행되면, 모세관 힘에 의하여 유리상이 원래의 자리로부터 알루미늄 입자 사이의 기공으로 이동하여 알루미늄 입자 사이에 결합을 형성하고, 프리트의 함량이 더 많아지게 되면 일부 기공을 채워서 치밀화를 일으킨다는 것을 알 수 있다.

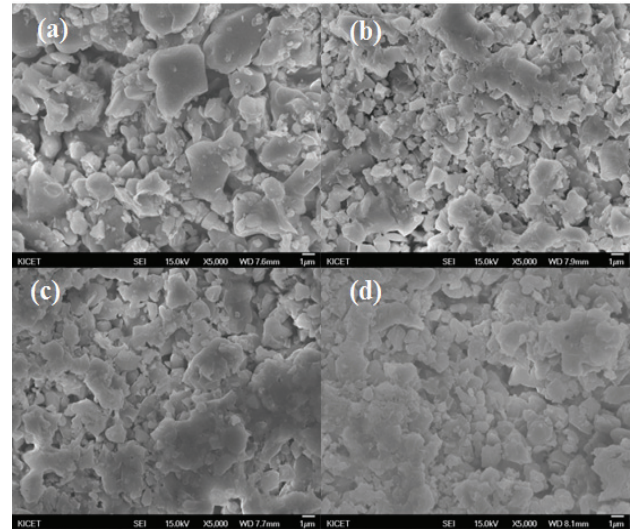


Fig. 3. FE-SEM images of ASF/SC(carbon) 0.5% ceramics sintered at 1,300°C. (a) ASF/SC 0.5%/no frits, (b) ASF/SC 0.5%/frit 1%, (c) ASF/SC 0.5%/frit 2%, and (d) ASF/SC 0.5%/frit 5%.

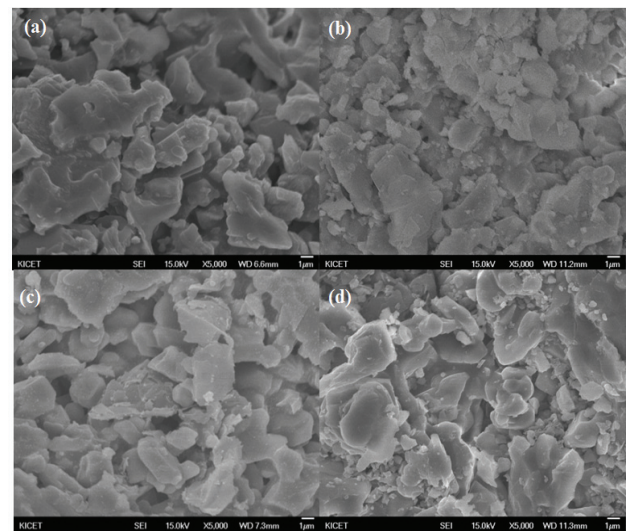


Fig. 4. FE-SEM images of ASF/SC(carbon) 3.0% ceramics. (a) ASF/SC 3.0%/frit 1% (sintered at 1,200°C), (b) ASF/SC 3.0%/frit 1% (sintered at 1,300°C), (c) ASF/SC 3.0%/frit 2% (sintered at 1,300°C), and (d) ASF/SC 3.9%/frit 5% (sintered at 130°C).

그림 4는 흑연(SC)이 3.0 wt% 함유된 다공질 ASF 세라믹스의 미세구조로 비슷한 양상을 보여줌을 알 수 있다.

3.3 기계적 성질

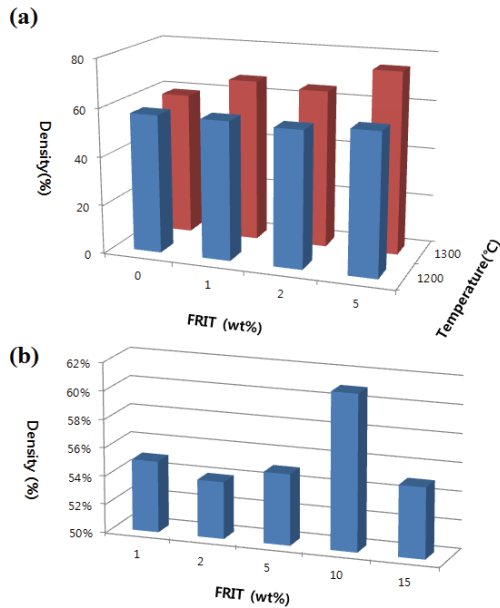


Fig. 5. (a) Evolution of density of ASF ceramics (SC 0.5 wt%) according to amounts of frit and sintering temperature and (b) evolution of density of ASF ceramics (SC 3.0 wt%) according to amounts of frit.

그림 5는 1,200~1,300°C에서 2시간 동안 소결하여 제조한 다공질 ASF 세라믹스의 밀도(100%-기공률)를 보여준다. 다공질 ASF 세라믹스의 밀도는 프리트 함량과 소결 온도에 따라 55~75% 범위를 나타냈고, 낮은 온도에서 밀도는 프리트 함량의 변화에 대해 거의 변화가 없었으나, 높은 온도(1,300°C)에서는 프리트의 함량이 증가함에 따라 65%에서 75%까지 증가하였다. 이러한 결과는 그림 3, 4에서 보여준 미세 조직 관찰결과에 의해 해석되어질 수 있는데, 소결온도가 증가할 때 유리화된 프리트가 점성유동에 의해 일부 기공을 채움으로써, 치밀화를 일으키고 프리트 함량이 일정수준이상(본 연구에서는 10%)으로 증가되면 급격한 치밀화가 진행되는 때문으로 생각된다. 1,300°C에서 소결한 시편의 경우, 1.0, 2.0 wt% 프리트가 첨가된 시편의 밀도는 ~55%이었고, 5.0 wt% 프리트가 첨가된 시편의 밀도는 ~75%이었다. 반면, 흑연함량이 0.5%에서 3.0%로 증가한 경우, 1,300°C에서 소결한 시편의 경우에도 밀도는 프리트 함량에 관계없이 ~55%로 일정하였다. 이것은 입계에 분산된 흑연입자가 유리화된 프리

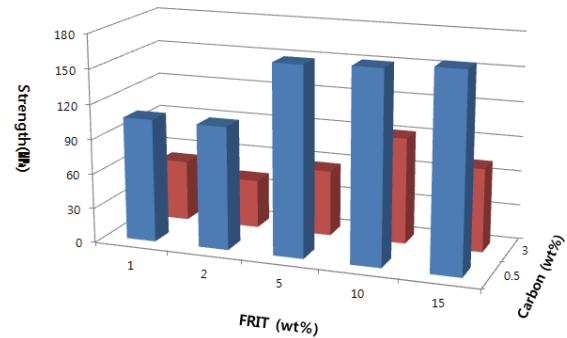


Fig. 6. Evolution of fracture strength of ASF ceramics according to amounts of frit and carbon.

트를 통한 확산을 막아 소결을 방해하기 때문으로 생각된다.

그림 6은 소결온도 및 프리트 함량에 따른 다공질 ASF 세라믹스의 꺾임강도를 보여 준다. 다공질 ASF 세라믹스의 꺾임강도는 카본이 0.5 wt%인 경우, 100 ~ 160 MPa 범위로서 프리트 함량이 증가할수록 증가하였고, 1,200°C에서 1,300°C로 소결온도가 증가하면 증가하였다. 카본이 0.5 wt%인 경우는 1,300°C 소결 시편의 경우에, 2.0 wt% 프리트를 첨가한 시편은 100 MPa의 꺾임강도를 나타냈고, 5.0 wt% 프리트를 첨가한 시편은 160 MPa의 꺾임강도를 나타냈다. 이러한 꺾임강도의 증가는 프리트 함량이 증가함에 따라 입자 사이의 결합면적이 증가되고, 치밀화에 기인한 기공율의 감소에 기인한다(그림 3, 4). 일반적으로 다공질 세라믹스에서 기공율의 감소는 강도의 증가를 가져온다는 것은 잘 알려진 사실이다 [25,26]. 한편, 3.0 wt% 카본을 첨가한 시편의 경우에 프리트를 2.0 wt% 첨가한 시편은 56 MPa의 곡강도를 나타내었고, 프리트를 5.0 wt% 첨가한 시편은 92 MPa의 강도를 나타내었다. 이러한 결과는 1,300°C 소결온도에서 프리트 함량이 증가할수록 입자 사이에 좀더 강한 결합을 형성하기 때문이라고 판단된다.

다공성 ASF 세라믹스에서 꺾임강도와 기공률의 상관관계를 고찰하기 위하여 꺾임강도 값을 밀도의 함수로 그림 7에 나타내었다. 다른 공정으로 제조된 일반적인 다공질 세라믹스에서와 마찬가지로 꺾임강도는 밀도가 증가함에 따라 증가하였다. 프리트 함량이 늘어날수록 밀도가 증가하고 결합재로 작용하는 프리트에 의한 입자를 결합하는 정도가 증가하여, 그 결과로 꺾임강도가 향상된 것으로 판단된다.

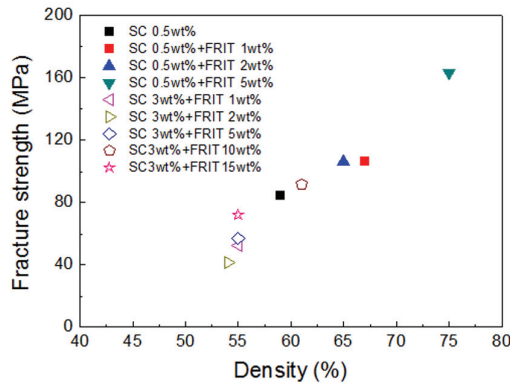


Fig. 7. Evolution of fracture strength of ASF ceramics as a function of density.

3.4 전기적 성질 및 vacuum chucking

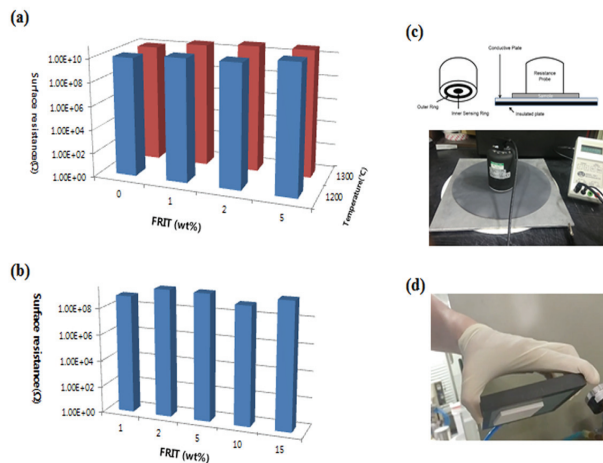


Fig. 8. (a) Evolution of surface resistivity of ASF ceramics (carbon 0.5 wt%) as a function of frit amount and sintering temperature, (b) evolution of surface resistivity of ASF ceramics (carbon 3.0 wt%) as a function of frit amount, (c) a schematic of surface resistivity measurement, and (d) a demonstration of vacuum chucking using ASF ceramics.

그림 8에는 프리트 함량, 흑연 함량 및 소결온도에 따른 표면저항의 변화를 나타내었다. 흑연을 0.5 wt% 함유한 ASF 세라믹스는 프리트 함량이나 소결온도에 관계없이 10^{10} ohm 정도의 거의 일정한 표면저항을 보여준다. 반면 흑연을 3.0 wt% 함유한 ASF 세라믹스

는 $10^8 \sim 10^9$ ohm 범위로 프리트 함량에 따라 약간 증가하는 경향을 보여준다. 이러한 표면저항은 대전방지 기능으로 가장 적합한 10^8 ohm 정도의 값이 흑연 함량에 따라 가능하다는 것을 의미한다. 그림 8(d)은 소결된 ASF 세라믹스를 이용한 진공척 모듈을 이용하여 알루미늄기판을 흡착한 사진으로 진공척으로 충분히 잘 기능하고 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 다공성 $Al_2O_3-SiO_2-(Mn,Fe,CoO_x)$ 기지상에 전도성 흑연을 분산시켜 소결함으로써 대전방지 기능에 적합한 $10^8 \sim 10^{10}$ ohm의 표면저항을 가지는 매크로포러스 세라믹스를 제조하였다. 또한 프리트를 첨가함으로써 기지상 입자 사이의 결합을 증가시켜 목형성(neck formation)을 강화함으로써, 그 결과로 기계적 강도를 증가시켜 160 MPa의 높은 격임강도를 구현하였다. 이러한 우수한 기계적 강도 및 전기전도성을 가진 다공성 세라믹스는 LCD 디스플레이 진공척용 모듈에 적합할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 전략적핵심소재 기술개발사업(10053585)과 기관고유사업(KPP10004-1)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] J. Adler, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, **2**, 429 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2005.02044.x>]
- [2] A. Shyam, E. L. Curzio, T. R. Watkins, and R. J. Parten, *J. Am. Ceram. Soc.*, **91**, 1995 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02381.x>]
- [3] A. J. Pyzik and C. G. Li, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, **2**, 440 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2005.02045.x>]
- [4] M. Wakita, *Bull. Ceram. Soc. Jpn*, **45**, 796 (2010).
- [5] Z. Taslicukur, C. Balaban, and N. Kuskonmaz, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **27**, 637 (2007).
- [6] Y. Zhang, J. Yu, S. Chen, and S. Wan, *Int. J. Environ. Pollut.*, **38**, 318 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1504/IJEP>]

- 2009.027232]
- [7] L. Le Guéhennec, P. Layrolle, and G. Daculsi, *Eur. Cells Mater.*, **8**, 1 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.22203/eCM.v008a01>]
- [8] T. Suzuki, H. Zahir, Y. Funabashi, T. Yamaguchi, Y. Fujishiro, and M. Awano, *Applications: Science*, **325**, 852 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1176404>]
- [9] E. Roncari, C. Galassi, F. Craciun, C. Capiani, and A. Piancastelli, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **21**, 409 (2001). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(00\)00208-9](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00208-9)]
- [10] E. Y. Litovsky and M. Shapiro, *J. Am. Ceram. Soc.*, **75**, 3425 (1992). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1992.tb04445.x>]
- [11] E. Litovsky, M. Shapiro, and A. Shavit, *J. Am. Ceram. Soc.*, **79**, 1366 (1996). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb08598.x>]
- [12] S. C. Nanjangud, R. Brezny, and D. J. Green, *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**, 266 (1995). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1995.tb08401.x>]
- [13] D. Hardy and D. J. Green, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **15**, 769 (1995). [DOI: [https://doi.org/10.1016/0955-2219\(95\)00045-V](https://doi.org/10.1016/0955-2219(95)00045-V)]
- [14] M. Scheffler and P. Colombo, *Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications* (Wiley-VCH, Weinheim, 2006) p. 645.
- [15] S. T. Oh, K. I. Tajima, M. Ando, and T. Ohji, *J. Am. Ceram. Soc.*, **83**, 1314 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01380.x>]
- [16] D. D. Jayaseelan, N. Kondo, M. E. Brito, and T. Ohji, *J. Am. Ceram. Soc.*, **85**, 267 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2002.tb00079.x>]
- [17] Y. Yang, Y. Wang, W. Tian, Z. Wang, C. G. Li, Y. Zhao, and H. M. Bian, *Scr. Mater.*, **60**, 578 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.12.016>]
- [18] N. Claussen, S. Wu, and D. Holz, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **14**, 97 (1994). [DOI: [https://doi.org/10.1016/0955-2219\(94\)90097-3](https://doi.org/10.1016/0955-2219(94)90097-3)]
- [19] J. H. She and T. Ohji, *Mater. Chem. Phys.*, **80**, 610 (2003). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(03\)00080-4](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(03)00080-4)]
- [20] Y. Suzuki, P.E.D. Morgan, and T. Ohji, *J. Am. Ceram. Soc.*, **83**, 2091 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01519.x>]
- [21] Y. Suzuki, N. Kondo, T. Ohji, and P.E.D. Morgan, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, **1**, 76 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2004.tb00157.x>]
- [22] J. H. She, J. F. Yang, N. Kondo, T. Ohji, S. Kanzaki, and Z. Y. Deng, *J. Am. Ceram. Soc.*, **85**, 2852 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2002.tb00542.x>]
- [23] K. S. Kim, K. Y. Song, S. Y. Park, S. Kim, S. J. Kim, and S. O. Yoon, *J. Kor. Ceram. Soc.*, **46**, 609 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.4191/KCERS.2009.46.6.609>]
- [24] W. D. Kingery and M. Berg, *J. Appl. Phys.*, **26**, 1205 (1955). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1721874>]
- [25] S. H. Chae, Y. W. Kim, I. H. Song, H. D. Kim, and M. Narisawa, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **29**, 2867 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2009.03.027>]
- [26] J. H. Eom and Y. W. Kim, *Met. Mater. Int.*, **16**, 399 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-010-0609-3>]