

다공성 은의 폴리실록센 첨가에 따른 물성 변화

김은석, 김익규, 김광배, 송오성*
서울시립대학교 신소재공학과

Properties of Porous Silver with Polysiloxane Addition

Eun-seok Kim, Ik-gyu Kim, Kwangbae Kim, Ohsung Song*
Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul

요약 20 μm 급 은 분말과 53 μm 급 소금 30 wt%의 혼합체에 폴리실록센을 1~4 wt%까지 첨가시키고 750°C-60min 소결하고, 소금을 선택적으로 녹여내어 액상 향수를 담지할 수 있는 다공체를 제작하였다. 소결전후에 폴리실록센 첨가량에 따라 기공, 경도, 그리고 미세구조의 변화를 확인하였다. 제작한 은 담지체는 소결 전후 모두 열린 기공으로 형성되고, 소결 후에는 지름 및 높이 방향으로 2~7 % 수축하였다. 비커스 경도는 소결 후 모두 증가하였고, 특히 2 wt%의 폴리실록센을 첨가한 경우 소결 전보다 2배 증가하는 것을 확인하였다. 미세구조의 경우 폴리실록센 첨가에 따라 은 담지체 표면상태는 어두워졌고, 기공이 50 μm 에서 10 μm 이하로 작아지는 것을 확인하였다. 조성분포 확인 결과 폴리실록센 2 wt% 첨가하였을 때 고루 분포되어 있었으며, 3 wt%이상 첨가하였을 때 뭉쳐져서 강도가 저하되는 문제가 있었다. 따라서 열린기공을 가진 다공성 은에 대해 주얼리 용도로 2 wt%의 적정량의 폴리실록센을 첨가하여 성공적인 강화가 가능하였다.

Abstract A porous material which can contain liquid perfume was manufactured by adding 1~4 wt% of polysiloxane into a composite containing 20 μm Ag powder and 30 wt% of 53 μm salt, sintering for 60 min at 750°C, and melting salt selectively. The changes in pore, hardness, and microstructure were confirmed according to the polysiloxane content both before and after sintering. The manufactured silver liquid container was formed with open pores both before and after sintering, and the container shrunk by 2~7 % in both perpendicular and parallel directions after sintering. Vickers hardness was increased after sintering and was doubled when 2 wt% of polysiloxane was added. In case of the microstructure, the surface condition of the silver liquid container became darker according to the polysiloxane content, and the pore size was decreased from 50 μm to under 10 μm . The composition distribution result revealed an even distribution when 2 wt% of polysiloxane was added but uneven distribution when over 3 wt% of polysiloxane was added due to decreased hardness by cluster. Therefore, the addition of an appropriate amount of 2 wt% polysiloxane reinforced the porous silver with open pores to offer application for jewelry usage.

Keywords : Ag Powder, Porous Silver, Hardness, Polysiloxane, Perfume Jewelry

1. 서론

은(Ag) 주얼리는 오래전부터 최근까지 장신구의 소재

로 사용되고 있다[1]. 또한, 은 주얼리는 금 주얼리에 비해 매우 낮은 가격으로 다양한 연령대의 소비자들이 쉽게 찾고 구매되고 있고 금(Au) 주얼리 보다 가격 경쟁력

*Corresponding Author : Ohsung Song(University of Seoul)
email: songos@uos.ac.kr

Received May 6, 2020
Accepted August 7, 2020

Revised June 1, 2020
Published August 31, 2020

이 우수하기 때문에 금 합금 제품보다 다양한 디자인과 기능을 추가한 연구가 활발하다[2, 3]. 특히 디자인적인 요소를 부각시키기 위해 경도와 부식성을 향상시킨 연구와 새로운 기능성을 추가한 주얼리가 보고되고 있다. 경도와 부식성을 향상시킨 연구는 Xiang 등[4]이 주석을 첨가하여 변색과 부식성을 감소시킨 스텔링 실버를 보고한 바 있다.

새로운 기능성이 추가된 연구는 Yul 등[5]이 은 주얼리는 기존의 전통적인 디자인을 넘어 혁신적인 기능과 의미를 부여할 필요성을 주장한 이래 시각적 심미성을 넣어 향기 등 오감을 만족하는 새로운 기능이 추가된 주얼리 개발이 필요한 실정이다.

은 합금은 광택이 우수하고, 귀금속 중 가장 백색에 가까울 뿐만 아니라, 산소에 대한 내부식성도 우수하여 주얼리 및 공예용 소재로 널리 사용된다[6]. 은 합금 제품은 일반적으로 주조법을 이용하여 제조된다. 주조 후에는 기계적인 가공을 통해 표면 질감을 표현하거나, 인레이드(inlaid), 파티네이션(patination) 혹은 에나멜링(enamelling)과 래커(lacquer)를 통해 색상과 무늬를 입히기도 한다[7]. 그러나 기존의 주조법으로는 기공을 제어하거나 소재의 복합화가 어렵기 때문에 은제품에 기능성을 부여하거나, 다양한 공예기법의 적용이 어려웠다. 한편, 분말야금법(powder metallurgy, P/M)은 기공성 제어와 복합화가 용이하며 가격 경쟁력 또한 확보할 수 있어, 주얼리 및 공예품의 향수담지 기능을 가진 제품 제조에 활용하기 위한 연구가 가능하다[8]. P/M은 금속분말과 바인더를 혼합한 다음, 몰드에 넣어 압축하여 성형체(green body)를 제조한 후, 소결하여 제품을 만드는 방법이다. 바인더는 PVA나 PVP 등 고분자 물질로 성형체 제작 시 분말을 접합시키는 역할을 하며, 소결 시 제거된다. 은과 같은 귀금속의 경우 표면산화가 거의 일어나지 않아 성형이 용이하고 적절한 바인더를 첨가하여 강도를 향상시키기도 한다[9]. 이때 바인더 외에도 기공형성을 위한 기공제(space holder)나 1차원 fiber나 0차원 입자 형태의 강화제(reinforcement)를 첨가하여 기공을 제어하거나, 기계적인 강도를 향상시킬 수 있다.

다공성 금속에 형성시킬 수 있는 기공의 종류로, 성형체 외부와 연결되지 않은 닫힌 기공(closed pore)과 외부와 연결되는 열린 기공(open pore)으로 구분할 수 있다. 특히 열린 기공이 형성되면 특정 물질을 담지시킬 수 없고, 높은 연성을 만들 수 있어, 금속에 열린 기공을 형성하기 위한 연구가 이루어지고 있다. P/M에서 금속분말과 기공제를 혼합하고 성형을 할 경우, 소결 전후로

기공제를 제거하여 기공을 형성할 수 있다[10]. 이러한 기공제로는 고분자 물질, 불화계 염을 사용하는 방법, 염화칼슘이나 염화소듐 같은 수용성 염을 사용하는 방법이 알려져 있다[11].

고분자물질을 기공제로 채용한 연구로는 Li 등[12]이 폴리스티렌을 이용하여 규칙적인 기공 배열을 가지는 다공성 금속을 제조할 수 있다고 보고한 바 있다. 그러나 이 방법은 고분자가 소결로 인해 제거되어 기체를 만들기 때문에, 소결체의 크기와 기공도의 조절이 어려운 문제가 있었다.

불화계 염을 채용한 방법은 Brothers 등[13]이 BaF_2 와 같은 불화계 염을 기공제로 채용하여 기공도 조절이 용이한 장점을 보고한 바 있으나, 기공제 제거를 위해 강산의 사용이 필수적이기 때문에 금속 기지의 부식을 일으키는 문제가 있었다. 또한, 수용성 염인 염화소듐이나 염화칼륨을 기공제로 채용하는 경우, Waters 등[14]이 물을 이용하여 기공제만 선택적으로 제거할 수 있어서 기공형성에 용이한 장점을 보고한 바 있으나, 과도하게 기공제를 첨가하면 성형체 제작에 어려움을 유발하고 기계적 강도가 감소하게 되는 문제가 보고된 바 있다[15]. 따라서 기공제의 종류와 첨가량을 조절하여, 열린 기공 유무, 기공도, 기계적 강도를 용도에 따라 최적화할 필요가 있다.

강화제는 금속 매트릭스에 삽입되어 기계적 강도나 전기, 열전도도 등 물성을 개선시킨다[16]. 주얼리나 공예품의 경우, 스크래치 저항과 가공성에 영향을 미치는 기계적 강도와 이를 대표할 수 있는 비커스 경도가 특히 중요하다.

폴리실록센(polysiloxane)은 $Si-C-H-O$ 로 이루어져 있는 무기 고분자이며, $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $SiOC$ 비정질 세라믹으로 변화하여 강도가 급격하게 상승하는 특성이 보고된 바 있다[17]. 이러한 폴리실록센을 다공성 은 주얼리에 첨가하여, 입자간의 결합력(bond strength)를 향상시켜 표면 강도를 향상시키는 것이 가능할 것으로 보인다.

따라서 본 연구에서는 액상 담지가 가능한 새로운 기능이 추가된 다공성 은 주얼리 제작을 위해, 표면 경도 향상을 위해 폴리실록센 첨가량에 따른 경도 변화를 확인하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 폴리실록센 첨가량에 따른 다공성 은

주얼리의 물성을 확인하기 위해, 지지체인 은 분말, 강화제인 폴리실록센 분말, 기공형성을 위한 수용성염인 NaCl 분말을 준비하였다.

Fig. 1에는 본 연구의 다공성 은 시료를 구현하는 분말 준비, 혼합, 성형, NaCl 제거, 소결의 5가지 공정을 도식적으로 나타내었다.

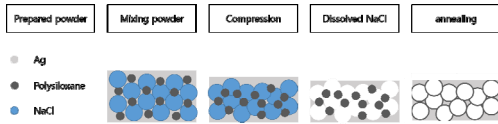


Fig. 1. Illustration of making process of the porous silver jewelry.

Fig. 2에는 준비한 분말들의 미세구조를 나타내었다. (a)는 은 분말의 미세구조이며, 평균입도 $20\ \mu\text{m}$ 은 분말(HKK Solution. Co.)를 확인할 수 있었다. (b)는 폴리실록센 분말의 미세구조이며, 평균입도 $2\ \mu\text{m}$ 폴리실록센 분말(YR3370, GE Toshiba Silicones Co., Tokyo, Japan)를 보였다. (c)에는 분쇄한 NaCl(Daejung Chemicals & Metals Co.)의 미세구조를 나타내었으며, 평균입도 $50\ \mu\text{m}$ 을 확인하였다.

다공성 은 주얼리를 제작하기 위해 은 분말 1.2 g과 폴리실록센 분말 0, 0.012, 0.024, 0.036, 0.048 g을 에탄올 20 ml에 용해한 뒤, 300 rpm-15 min 스테어링 후, 소니케이션 30 min 후 $50\ ^\circ\text{C}$ 오븐에서 건조시켰다. 이후 NaCl 분말을 준비된 은 + 폴리실록센 분말을 Table 1과 같이 칭량하고, 볼텍스를 이용해 60 min 동안 혼합하였다.

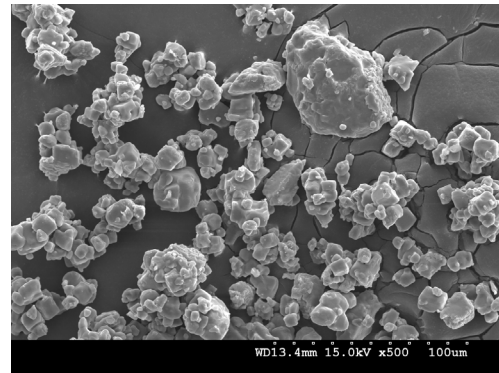
혼합된 파우더를 직경 12 mm의 원통형 스테인리스 몰드에 넣고 375 MPa의 압력을 가해, 직경 12 mm, 두께 2 mm인 성형체를 제작하였다. 이때 비교를 위해 NaCl을 혼합하지 않은 경우도 준비하였다.

준비된 각 성형체를 $100\ ^\circ\text{C}$ 에서 끓는 물에 2 시간 동안 침지하여 모든 NaCl을 선택적으로 제거시키고, 녹은 부분이 기공이 되도록 하였다. 그 후 $70\ ^\circ\text{C}$ 오븐에서 24 hour 동안 충분히 건조시키고, 기공 유무, 정도, 미세구조를 확인하였다.

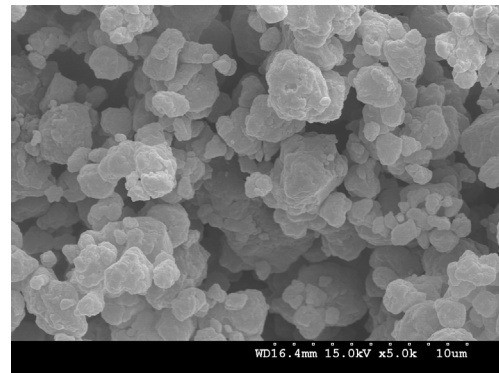
이후 전기로를 이용하여 소결시키고, 이때 조건은 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 승온속도로 $100\ ^\circ\text{C} - 1\ \text{hour}$ 유지시킨 후 최고 온도에서 $750\ ^\circ\text{C} - 1\ \text{hour}$ 유지시키고 공냉하여 완성하였다. 소결 전후 기공의 형태변화는 마이크로 피펫을 이용하여 20 μl 증류수 한 방울을 시편 상부에 떨어뜨리고, 3 min 후 방울의 형태를 분석하였다. 이때 카메라(EOS

400D, Canon)로 방울의 형태와 높이를 확인하여 시편의 기공 형태가 열린 기공과 닫힌 기공 여부를 확인하였다.

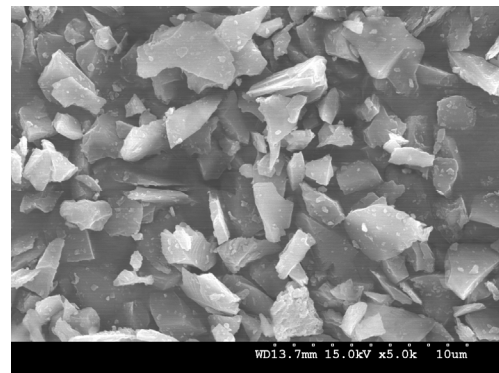
제작한 시편의 소결 전, 후의 지름과 두께에 대한 팽창률은 버니어캘리퍼스(Mitutoyo)를 이용해 측정하였다. 비커스 경도는 비커스 인텐테이션(MVK H1, Mitutoyo)을 사용하여 측정하였다. 이때 10 N으로 15 초 압입하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. FE-SEM Images of prepared powders of (a) $20\ \mu\text{m}$ Ag, (b) $4\ \mu\text{m}$ polysiloxane, and (c) $53\ \mu\text{m}$ NaCl.

Table 1. Composition of composite powders

Sample	Ag powder[g]	Polysiloxane[g]
0	1.2	0.000
1	1.2	0.012
2	1.2	0.024
3	1.2	0.036
4	1.2	0.048

소결 전과 후의 매크로 형상 변화는 저배율 광학현미경(815000, GIA Instrument Co.)을 이용하여 10 배율 이내로 관찰하였다. 시편의 폴리실록센 혼합정도와 기공의 미세구조는 500 배까지 분석이 가능한 광학현미경 (AX-10, Zeiss)과 300 배까지 분석이 가능한 주사전자 현미경(FE-SEM, S-4300, Hitachi)을 이용하여 확인하였다. 또한, 원소별 분포를 확인하기 위해 EDS(EDS, JSM-6010PLUS/LA, Jeol)를 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3에는 은 + 0~4 wt% 폴리실록센 분말을 이용하여 제작한 다공성 시편의 육안 분석 이미지를 나타내었다. (a)~(e)는 은 + 0~4 wt% 폴리실록센 분말을 이용하여 제작한 소결 전 다공성 시편의 이미지이며, (f)~(j)는 (a)~(e) 각 시편의 소결 후 이미지를 나타내었다.

소결 전 다공성 시편들은 기공 형성을 위해 첨가한 NaCl이 제거되면서 옅은 노란색을 나타내는 것을 확인하였고, 이때 폴리실록센의 첨가량에 관계없이 모두 유사한 색을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 시편의 색변화는 NaCl에 의해 형성된 기공 때문에 나타난 현상으로 판단하였다.

소결 후 다공성 시편들은 모두 광택이 없는 은색을 나타내는 것으로 확인할 수 있었으며, 폴리실록센의 첨가량에 관계없이 유사한 색을 확인할 수 있었다. 이는 소결 처리에 따라 NaCl에 의해 형성된 기공이 감소하면서 나타난 현상으로 판단하였으며, 이러한 색을 가진 다공성은 시편은 향수 담지 및 주얼리 용도로 채용이 가능한 미려한 표면으로 판단하였다.

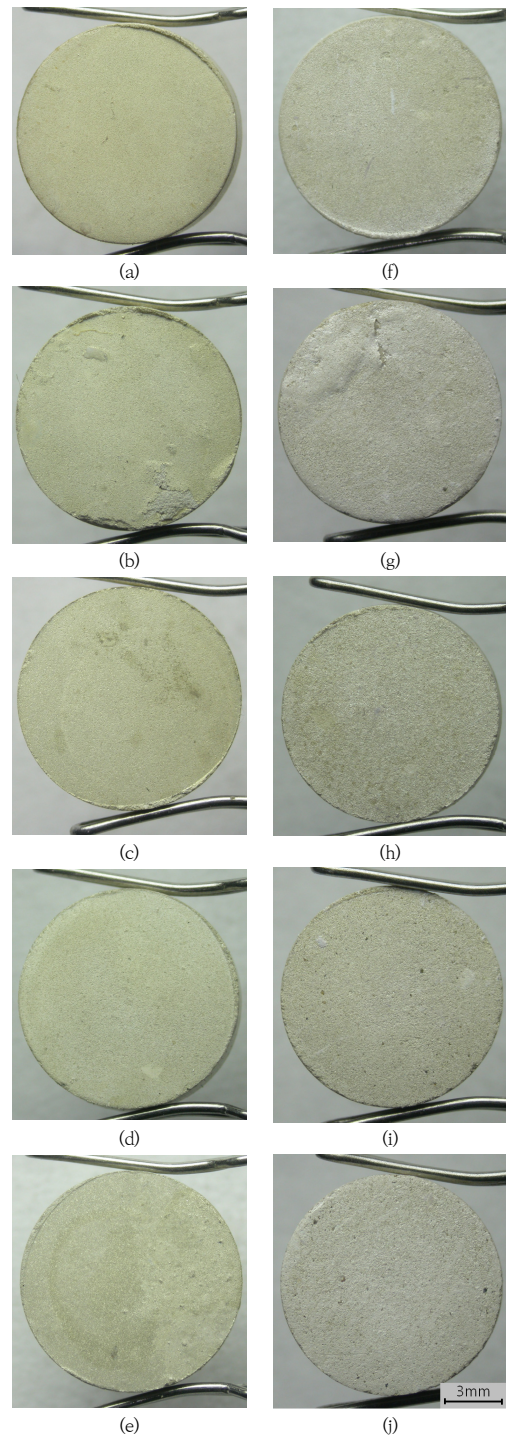


Fig. 3. Optical microscopy images after removing salt, before and after sintering with addition of polysiloxane (a), (f) 0 %, (b), (g) 1 %, (c), (d) 2 %, (d), (i) 3 % and (e), (j) 4 %.

Fig. 4에는 은 분말과 0~4 wt% 폴리실록센 분말을 이용하여 제작한 다공성 시편의 소결 전후에 따른 droplet 결과를 나타내었다. 다공성 시편은 소결 전후 모두 열린 기공으로 형성된 것을 확인할 수 있었으며, 이는 30 wt% NaCl 첨가하여 제작한 시편은 담지체로써 충분히 사용 가능함을 확인하였다. 또한, 시편 내부의 독립 기공들은 담지체로써 불리한 부분으로 작용하지만, 단 시간에 흡수되는 것을 고려하면 액상 향수를 담지하는 기능을 부여하는 용도로는 충분할 것으로 판단하였다. 따라서, NaCl 제거 후 폴리실록센 첨가량과 소결 유무에 관계없이 모두 열린 기공으로 형성된 것을 확인하였고, 담지체로써 이상이 없음을 확인하였다.

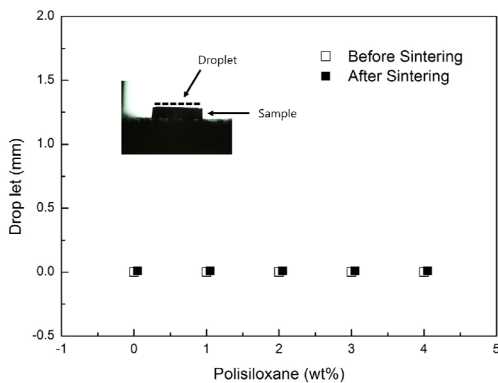


Fig. 4. Droplet shape indicating closed pores and open pores before and after sintering with addition of polysiloxane.

Fig. 5에는 소결 후 폴리실록센 첨가에 따른 두께와 지름 방향의 팽창률을 나타내었다.

모두 2~7 % 범위의 수축을 확인하였다. 전반적으로 폴리실록센 첨가량이 증가할수록 수축 정도가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 NaCl로 인해 형성된 기공이 열처리로 인하여 감소하면서 나타난 현상 또는 폴리실록센이 은 입자 사이로 침투되면서 치밀화로 인해 기공이 감소하여 나타난 현상으로 판단하였다. 이때 폴리실록센이 첨가되지 않은 시편의 경우, 마찬가지로 소결 후 수축이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 Moon 등 [18]이 은 나노 파티클을 400 °C 소결 공정 후 2.5 % 수축하는 현상을 확인하고, 소결 온도가 증가함에 따라서는 나노 파티클 치밀화에 의해 수축률이 상승하는 보고와 일치하는 결과였다. 따라서, 다공성 은 시편의 경우, 750 °C 열처리를 통해 2~7 % 수축정도를 확인할 수 있었다.

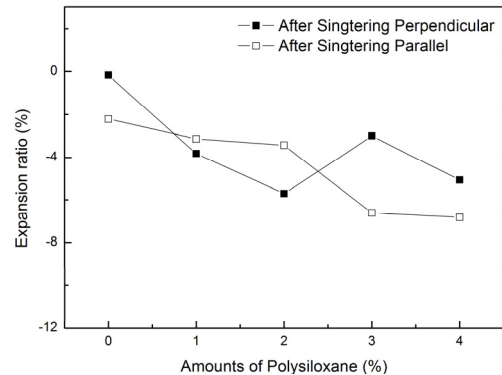


Fig. 5. The expansion rate according to polysiloxane content after sintering.

Fig. 6에는 다공성 은 시편의 폴리실록센 첨가에 따른 소결 전후 비커스 경도를 나타내었다. 소결 처리 전 시편의 결과는 흰색 사각형으로 나타내었으며, 소결 처리 후 다공성 은 시편의 결과는 그래프에 검은색 사각형으로 나타내었다.

소결 전 시편의 경우, 폴리실록센 첨가량에 관계없이 모두 유사한 경도를 확인할 수 있었으며, 소결 후 시편의 경우, 모든 시편에서 경도가 향상된 것으로 확인되었다. 특히 2 wt% 폴리실록센을 첨가하고 소결한 시편의 경우, 소결 전 시편의 경도에 비해 약 88% 향상되는 것을 확인하였다. 이는 2 wt% 폴리실록센 시편에서 폴리실록센이 균일하게 분포되어 결합력(bond strength)을 강화시킨 것으로 판단하였다. 이러한 현상은 Rajpoot 등[17]이 폼드실리카(fumed silica)에 10 wt% 폴리실록센을 첨가하여 압축강도가 약 46% 향상된 것을 확인하였으며, 이는 폼드실리카입자사이에 폴리실록센이 네킹으로 인하여 강도가 향상되고, 온도가 높아질수록 치밀화에 기여한다고 보고한 바와 일치하였다. 또한, 3 wt% 이상 폴리실록센이 첨가된 경우, 2 wt% 보다 감소한 비커스 경도 값을 확인할 수 있었고, 이러한 비커스 경도값은 폴리실록센을 넣지 않은 경우와 유사한 정도로 확인되었다.

따라서 2 wt% 폴리실록센을 첨가하였을 때 소결 전보다 비커스 경도가 약 88% 향상되는 것을 확인하였으며, 이러한 경도는 은 주얼이 제품 또는 담지체로서 사용이 가능한 정도의 경도로 확인하였다.

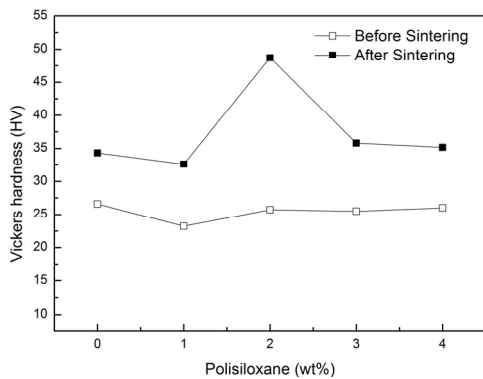


Fig. 6. Vickers hardness with polysiloxane addition before and after sintering.

Fig. 7에는 0, 2, 4 wt% 폴리실록센 시료의 소결 후 FE-SEM 이미지를 나타내었다. 큰 이미지는 300 배의 저배율 이미지이며, 우 상단에는 점선으로 표시한 부분을 1500 배 확대한 이미지를 나타내었다. 저배율 이미지에서는 폴리실록센의 증가에 따른 기공율, 즉 단위 면적당 기공의 개수 변화를 확인하고자 하였으며, 우 상단 확대 이미지에서는 각 기공의 크기를 비교하였다.

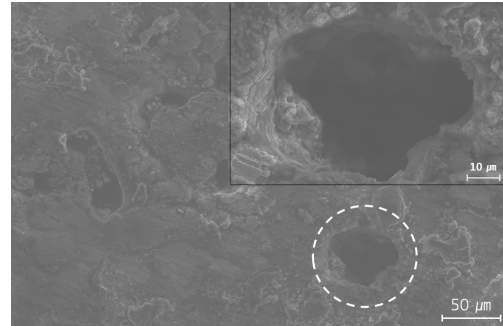
(a)의 폴리실록센 0 wt%의 경우, 기공제로 첨가한 NaCl의 입도와 동일한 약 50 μm 이하의 기공을 확인할 수 있었다. (b), (c)에는 각각 2, 4 wt% 폴리실록센이 첨가된 시편의 이미지를 나타내었으며, 폴리실록센 첨가량이 증가함에 따라 기공율은 유사하게 확인되었고, 기공의 크기는 약 30, 10 μm 로 점차 감소하는 것을 확인하였다.

동일한 소결공정 입에도 불구하고 폴리실록센이 증가함에 따라, 기공의 크기가 감소하는 결과는 폴리실록센의 증가로 인해 상대적으로 두꺼운 은 + 폴리실록센 입자가 형성되고, 750 $^{\circ}\text{C}$ 소결 과정에서 은의 형태가 변화하면서 기공 크기가 감소하는 것으로 판단하였다. 이는 앞서 확인한 수축데이터와도 일치하는 결과였다.

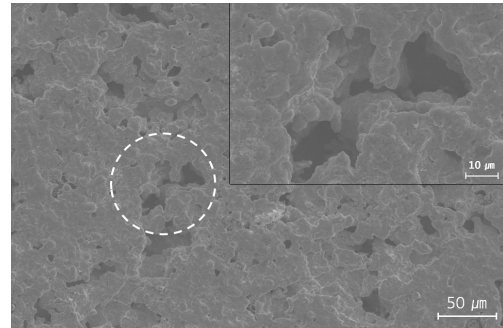
또한, 이러한 기공 크기의 감소는 앞서 보인 경도값의 변화와도 일치하는 결과였으며, 특히 2 wt% 폴리실록센 조건에서 가장 높은 경도값을 보인 이유는 폴리실록센이 바인더로 작용하여 은 치밀화와 기공크기의 감소 효과로 인하여 나타난 현상으로 판단하였다. 그러나 3 wt% 이상의 폴리실록센이 첨가될 경우, 경도 값이 감소하였으며, 이는 과도한 폴리실록센 첨가가 오히려 부정적인 원인이 될 수 있음을 의미한다.

따라서 2 wt% 폴리실록센이 첨가된 다공성 시편에서

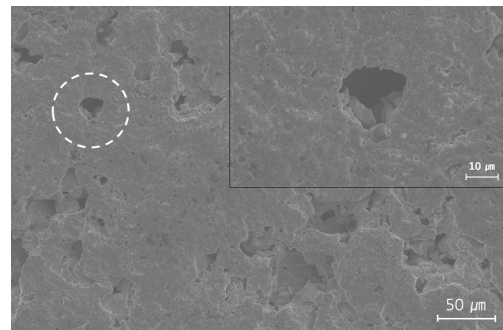
폴리실록센으로 인한 치밀화와 기공크기 감소가 경도향상의 원인으로 판단하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. FE-SEM images of sample after sintering with polysiloxane addition of (a) 0 wt%, (b) 2 wt%, and (c) 4 wt%.

Fig. 8에는 0, 2, 3, 4 wt% 폴리실록센이 첨가된 다공성 은 시편의 소결 후 500 배 확대 조건에서 Si 원소의 분포를 나타내었다. (a)에는 0 wt% 폴리실록센이 혼합되었으므로, 목적인 바와 같이 폴리실록센의 주요성분인 Si가 검출되지 않은 것을 확인할 수 있었다. (b)는 2 wt% 폴리실록센의 Si 분포로 전체 확인 범위에서 비교적 균일하게 분포되어 은 치밀화에 도움을 주고 있음을 확인하였고 이는 앞서 보인 결과와 일치하였다. 반면 (c), (d)의

3, 4 wt% 폴리실록센이 첨가된 경우, 폴리실록센의 응집(agglomeration)이 발생하여 약 30 μm 크기의 응집체가 오히려 기계적 강도의 취약지점으로 작용하여 앞서 확인한 비커스 경도에서 3 wt% 폴리실록센 이상에서는 강화현상이 나타나지 않은 이유임을 확인하였다.

따라서 폴리실록센은 2 wt% 정도로 적절하게 혼입되어야 은 기지내에 균일하게 분포하여 이들의 치밀화와 기공 미세화에 기여하여 경도를 향상시킬 수 있었다.

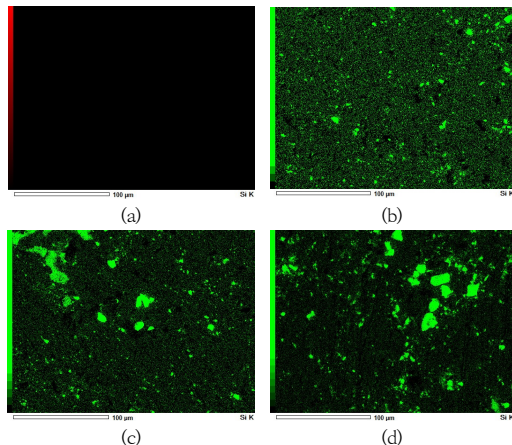


Fig. 8. EDS results of Si element distribution with polysiloxane addition; (a) 0 wt%, (b) 2 wt%, (c) 3 wt%, (d) 4 wt%.

4. 결론

다공성을 형성하기 위한 30 wt% NaCl를 첨가한 은 분말에 0~4 wt% 폴리실록센을 1 wt% 단위로 첨가하고 증탕하여 NaCl을 제거한 후 750°C-60 min에서 소결하여 액상 향수를 담지하는 주얼리용 다공성 은 시료를 제작하였다. 폴리실록센 첨가에 따라 주얼리 용도 및 담지체로 채용이 가능한 미려한 표면을 확인하였다. 소결처리와 폴리실록센 첨가량에 관계없이 모든 시편은 열린 기공으로 확인되었고, 폴리실록센 첨가에 따라 소결 후 지름, 두께 각각 2~7 % 수축한 것을 확인하였다. 비커스 경도의 경우 소결 후 모두 증가한 것을 확인하였으며, 특히 2 wt%의 폴리실록센을 첨가한 경우 소결 전보다 약 88 % 증가한 것을 확인하였다. 이는 폴리실록센이 2 wt% 정도에서 균일하게 분산되어 바인더로서 은 기지의 치밀화와 기공 미세화에 기여하였기 때문이었다.

References

- [1] J. Jarernros, P. Srisuro, C. Phuangsuwan, "The Influence of Background Color of Silver Jewelry Advertising on Purchasing Decision", *Journal of Color Science Association of Japan*, Vol.43, No.3, pp.211-213, May. 2019.
DOI: https://doi.org/10.15048/jcsaj.43.3_211
- [2] M. Guerra "Physicochemical Approaches to Gold and Silver Work, an Overview: Searching for Technologies, Tracing Routes, Attempting to Preserve" *Physical Sciences Reviews*, Vol.4, No.3, pp.1-11, Oct. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0015>
- [3] I. Kim, K. Kim, E. Kim, O. Song, "Fabrication of a Sterling Silver Ring with Folding Process", *Journal of the Korea Academia-Industrial*, Vol.20, No.9, pp.382-389, Sep. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.9.382>
- [4] X. Xiang, M. Cheng, W. Gong, "Effect of Tin Additions on the Anti-Tarnish Properties of Sterling Silver Alloy", *Key Engineering Materials*, Vol.727, pp.67-71, Jan. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.727.67>
- [5] Q. Yul, K. Meng, J. Guol, "Research on Innovative Application of Silver Material in Modern Jewelry Design", *MATEC Web of Conferences*, Vol.176, pp.1-4, July. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817602013>
- [6] E. Nisaratanaporn, S. Wongsrirkusa, S. Pongsukitwat, G. Lithongkum, "Study on the Microstructure, Mechanical Properties, Tarnish and Corrosion Resistance of Sterling Silver Alloyed with Manganese", *Materials Science and Engineering A*, Vol.445-446, No.15, pp.663-668, Feb. 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.09.106>
- [7] C. Stromberg, "A Technical Study of Three Cloisonné Enamels from the Botkin Collection", *The Journal of the Walters Art Gallery*, Vol.46, pp.25-36, Jun. 2016.
<http://www.istor.org/stable/20169039>
- [8] P. Rew, "Development of a Powder Metallurgical Technique for the Mass Production of Carat Gold Wedding Rings", *Gold Bulletin*, Vol.33, No.3, pp.79-88, Sept. 2000.
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03215482>
- [9] B. Henriques, P. Pinto, J. Souza, J. C. Teixeira, D. Soares, F. Silva, "On the Hot Pressing of Coloured High-Gold Alloys Powder Compactions Applied to the Manufacturing of Innovative Jewellery Items", *Gold Bulletin*, Vol.46, pp.117-125, June 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13404-013-0089-6>
- [10] J. Banhaet, "Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Forms", *Progress in Materials Science*, Vol.46, pp.559-632, Jan. 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5)

- [11] X. Han, Q. wang, Y. Park, C. T'Joel, A. Sommers, A. Jacobi, "A Review of Metal Foam and Metal Matrix Composites for Heat Exchangers and Heat Sinks", *Heat Transfer Engineering*, Vol.33, No.12, pp.991-1009, Apr. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1080/01457632.2012.659613>
- [12] Z. Li, L. Yang, Y. Li, Y. Yang, C. Zhou, Y. Ding, J. Zhao, Y. Li, "Effects of Pore Size on the Mechanical Properties of Three-dimensionally ordered Macroporous Nickel", *Materials and Design*, Vol.45, pp.52-55, Mar. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.009>
- [13] A Brothers, R. Scheunemann, J. Def ouw, D. Dunand, "Process and Structure of Open Cell Amorphous Metal Foams", *Scripta Materialia*, Vol.52, No.4, pp.335-339, Feb. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.10.002>
- [14] C. Waters, S. Ajinola, M. Salih, "Dissolution sintering technique to create porous copper with sodium chloride using polyvinyl alcohol solution throughiut powder metallurgy", *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol.9, No.1, pp.155-165, Feb. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2016.155.165>
- [15] H. Wadley, "Cellular metals manufacturing", *Advanced engineering materials*, Vol.4, No.10, pp.726-733, Oct. 2002.
DOI: [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(20021014\)4:10<726::AID-ADEM726>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/1527-2648(20021014)4:10<726::AID-ADEM726>3.0.CO;2-Y)
- [16] J. Kaczmar, K. Pietrzak, and W. Włosiński, "The production and application of metal matrix composite materials", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.106, No.1-3, pp.58-67, Oct. 2000.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00639-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00639-7)
- [17] S. Rajpoot, R. Malik, Y. Kim "Effects of Polysiloxane on Thermal Conductivity and Compressive Strength of Porous Silica Ceramics", *Ceramics International*, Vol.45, No.17, pp.21270-21277, Dec. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.109>
- [18] K. Moon, H. Dong, R. Maric, "Thermal Behavior of Silver Nanoparticles for Low-Temperature Interconnect Applications", *Journal of Electronic Materials*, Vol.34, pp.168-175, Feb. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-005-0229-8>

김 은 석(Eun-Seok Kim)

[준회원]



- 2018년 6월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재학과 석사과정

<관심분야>

구조 세라믹스, 다공성 물질

김 익 규(Ik-Gyu Kim)

[준회원]



- 2018년 6월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재학과 석사과정

<관심분야>

주열리소재, 내식성 재료의 에칭과 스트리핑

김 광 배(Kwangbae Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 서울시립대학교 신소재공학과 (공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 박사과정

<관심분야>

태양전지, 반도체 재료

송 오 성(Ohsung Song)

[종신회원]



- 1988년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학석사)
- 1994년 5월 : MIT 재료공학 (공학박사)
- 1996년 3월 : NTT 기초연구원
- 1997년 8월 : 삼성전자 CPU 기술팀

- 1997년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 교수

〈관심분야〉

태양전지, 반도체재료, 자성재료, 세라믹재료, 주열리소재