

## 표면 구조가 다른 실리카 나노입자로 제작된 리튬이온전지의 전기화학적 성능 비교

이경복, 김기출\*  
목원대학교 도시환경화학공학과

### Comparison of Electrochemical Performance of Lithium Ion Batteries Fabricated by Silica Nanoparticles with Different Surface Structure

Kyung Bok Lee, Ki-Chul Kim\*  
Department of Urban Environmental Chemical Engineering, Mokwon University

**요약** 리튬이온전지의 음극소재인 실리콘은 4,200 mAh/g의 높은 이론적 전기용량을 가지고 있지만, 충전과 방전 과정 중에서의 부피팽창률 또한 400 %로 크기 때문에 리튬이온전지의 음극소재로 적용하는데 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 서로 다른 표면구조를 갖고 있는 구형의 실리카 나노입자를 Stöber 합성법(솔리드 실리카)과 마이크로에멀전 합성법(메조포러스 실리카)으로 합성하였다. 합성된 실리카 나노입자의 표면형상을 전계방출형 주사전자현미경으로 분석하였고, 결합 특성을 FT-IR 분광법으로 분석하였다. 실리카 나노입자를 리튬이온전지의 음극으로 적용하여 CR2032 코인셀을 제작하였고, 다양한 조건으로 전기화학적 특성을 평가하였다. 그 결과 메조포러스 실리카 나노입자가 적용된 리튬이온전지의 Coulombic Efficiency가 보다 안정적이었으며, 1,000 mA/g의 높은 전류밀도로 고속 충전/방전 테스트에서 보다 높은 전기용량 값을 나타내었다. 이것은 메조포러스 실리카 나노입자의 유효표면적이 크기 때문인 것으로 판단된다.

**Abstract** A silicon anode material for a lithium ion battery (LIB) has a very large theoretical capacity of 4,200 mA h/g, but the volume expansion during the charge/discharge process also exhibits a large rate of 400%. The large volume expansion rate of silicon limits its application as an LIB anode material. To solve this problem, various studies are being conducted. In this study, spherical silica nanoparticles with different surface structures were synthesized by using the Stöber method (solid silica) and a microemulsion method (mesoporous silica). The surface morphology of the synthesized silica nanoparticles was analyzed using a field emission scanning electron microscope. The bonding properties of silica nanoparticles are characterized by using FT-IR spectroscopy. CR2032 LIB coin cells were fabricated with anode material of silica nanoparticles. Electrochemical performance of the coin cells was evaluated for various conditions. As a result, mesoporous silica nanoparticles exhibit more stable coulombic efficiency and higher capacity at a high current density of 1,000 mA/g in a charge/discharge test. This is attributed to the large specific surface area of mesoporous silica nanoparticles.

**Keywords** : Silica Nanoparticle, Lithium Ion Battery, Electrochemical Performance, Surface Structure, Mesoporous

\*Corresponding Author : Ki-Chul Kim(Mokwon University)

email: kckim30@mowkon.ac.kr

Received February 22, 2022

Revised April 20, 2022

Accepted May 6, 2022

Published May 31, 2022

## 1. 서론

최근 전기자동차용 배터리 및 휴대용 전자 장치 전원용 배터리에 대한 수요가 높아지면서 고성능 리튬이온전지의 개발에 대한 시장의 요구가 커지고 있고, 고성능 리튬이온전지와 관련된 연구개발도 활발하게 진행되고 있다. 특히 세계 각국이 탄소중립을 추진하면서 주요 자동차 제조업체들은 가까운 미래에 내연기관 자동차를 생산하지 않고, 전동화 자동차를 개발하여 출시하겠다고 선언하고 있다. 따라서 차세대 전기자동차를 위하여 현재의 상용 리튬이온전지보다 에너지 밀도가 높고, 짧은 시간동안 충전이 가능한 차세대 리튬이온전지의 연구개발이 매우 활발하게 진행되고 있다.

리튬이온전지의 에너지 밀도를 높이기 위해서는 전기용량이 높은 전극소재의 개발이 필수적이다. 현재 상용 리튬이온전지의 음극 소재인 흑연(graphite)의 이론적 전기용량은 372 mAh/g으로 다소 낮은 한계점이 있다[1,2]. 흑연을 대체할 음극소재로 매우 다양한 소재가 연구되고 있지만 실리콘 계열의 소재( $\text{SiO}_x$ ,  $(0 \leq x \leq 2)$ )가 특히 주목을 받고 있다. 순수 실리콘 소재(Si)의 이론적 전기용량은 4,200 mAh/g으로 매우 높으며, 실리카( $\text{SiO}_2$ )의 경우에도 이론적 전기용량이 1,965 mAh/g으로 흑연과 비교하여 매우 높다[3]. 실리콘 소재는 지각의 1/3정도를 구성하는 원소이므로 쉽게 구할 수 있고, 환경 친화적이라는 장점도 가지고 있다. 하지만 실리콘 계열의 소재는 충전과 방전 과정 중에 리튬이온의 출입에 의해서 부피가 400% 정도(Si) 변하는 문제점 때문에 고성능 리튬이온전지의 음극소재로의 적용이 제한되고 있다[4,5]. 즉  $\text{SiO}_x$  계열은 충전/방전 중에 리튬과 전기화학적 반응에 의해서 부피가 팽창하고, 그 과정에서 고체 전해질 계면(Solid Electrolyte Interface, SEI)이 지속적으로 형성되는 문제점이 있다[6,7]. 충·방전을 반복하는 과정에서 SEI 층이 형성될 때 액체 전해질 및 음극 활물질의 소모가 발생하고, SEI 층이 지나치게 두껍게 형성되면 전기용량이 급격히 감소하고, 수명이 단축되는 단점이 있다. 이러한  $\text{SiO}_x$  기반 음극소재의 문제점을 해결하기 위하여 다양한 방법들이 제안되었다. 즉 다공성 구조의 실리카(메조포러스 실리카)[8], 실리콘 나노 와이어[9], 속이 빈 실리콘 나노구[10], 실리콘 나노와이어와 환원 그래핀 옥사이드와의 복합체[11] 등 나노 구조의 소재를 적용하면  $\text{SiO}_x$  소재의 부피팽창 문제를 완화시킬 수 있다고 보고되었다.

본 연구에서는 리튬이온전지의 음극소재에 적용하기 위하여 구형의 실리카 나노입자를 합성하였다. 특히 마

이크로에멀전(microemulsion) 합성법을 이용하여[12] 표면의 형상을 제어할 수 있는 메조포러스 실리카(mesoporous silica) 나노입자를 합성하였다. 또한 스토버(Stöber) 합성법으로[13,14] 나노입자의 표면이 매끈한 형태의 솔리드 실리카(solid silica) 나노입자를 합성하여, 비슷한 크기의 실리카 나노입자의 표면형상이 리튬이온전지의 전기화학적 특성변화에 미치는 효과를 직접 비교 평가하였다.

## 2. 실험방법

솔리드 실리카와 메조포러스 실리카 나노입자를 합성하기 위한 시약은 TEOS ( $\text{SiC}_8\text{H}_{20}\text{O}_4$ , 95%, Samchun), ammonium hydroxide solution ( $\text{NH}_4\text{OH}$ , 28%, Sigma-Aldrich), ethyl alcohol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , 99.9%, Samchun), urea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ , 98%, Daejung), 1-Butanol ( $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ , 99%, Samchun), cetylpyridinium bromide hydrate (CPB, 98%, Sigma-Aldrich), hydrochloric acid (HCl, 35~37%, Samchun), cyclohexane ( $\text{C}_6\text{H}_{12}$ , 99%, Samchun)을 사용하였다. 솔리드 실리카 나노입자는 Stöber 합성법으로 합성하였다. ethanol 43.2 g, D.I water 13.89 mL를 혼합한 후 10분간 교반한 다음, 전구체인 TEOS 2.72 g을 넣고 동일 조건에서 5분간 추가로 교반한 후에 ammonium hydroxide solution 1.38 g을 첨가하였고, 6시간 동안 상온에서 교반을 진행하였다. 합성된 솔리드 실리카 나노입자를 12,000 rpm으로 원심분리하였고, 수득된 파우더(powder)를 에탄올과 탈이온수로 충분히 세척하였다. 메조포러스 실리카 나노입자는 마이크로에멀전 합성법을 이용하여 합성하였다. 상온에서 CPB 0.5 g과 urea 0.3 g을 D.I water 15 mL에 용해시킨 후, 15 mL의 cyclohexane 및 1-Butanol 0.46 mL를 용액에 첨가하였다. 빠르게 교반하면서 TEOS 1.25 g을 혼합 용액에 방울방울 첨가(dropwise)하였고, 30분간 추가로 교반한 다음, 혼합물을 70 °C에서 16시간 동안 교반하였다. 합성된 메조포러스 실리카 나노입자를 15,000 rpm으로 원심분리하였고, 수득된 파우더를 탈이온수와 아세톤으로 3회 세척해주었다. 또한 계면활성제를 제거하기 위해 메조포러스 실리카 나노입자를 ethanol 50 mL 와 HCl 4 mL 혼합 용액에 분산시켜 70 °C에서 24 hr 동안 교반을 진행하였다. 교반 후 에탄올과 D.I water을 이용하여 충분히 세척하였고, 15,000 rpm으로 원심분리하였

다. 원심분리 후, 실리카 나노입자는 진공 오븐(vacuum oven)을 이용하여 70 °C에서 4시간 동안 진공건조 하였다.

합성된 실리카 나노입자의 표면구조는 전계방출형 주사전자현미경 (JEOL, JSM-6500F, FE-SEM)을 이용하여 분석하였고, FT-IR(Fourier Transform InfraRed) 분광학 분석으로 합성된 나노입자가 실리카 나노입자임을 확인하였다.

실리카 나노입자의 표면구조에 따른 리튬이온전지의 전기화학적 특성을 비교분석하기 위하여 CR2032 코인셀을 제작하였다. 코인셀을 제작하기 위한 음극은 활물질(실리카 나노입자), 도전재(Super-P)와 바인더(PVDF, Sigma-Aldrich)를 5:4:1 중량비로 혼합하여 밀링(milling) 하였으며 NMP(N-Methyl-2-pyrrolidone, 99.5 %, Samchun) 용액으로 점도를 조절하여 슬러리(slurry)를 만들었다. 슬러리를 구리 호일(Alfa Aesar, 25 µm) 위에 닥터 블레이드(doctor blade)법으로 50 µm 두께로 코팅하였고, 24 hr 동안 진공오븐에서 건조한 후에 지름 10 mm 크기로 펀칭(punching)하여 코인셀의 음극으로 사용하였다. 분리막은 미세기공 폴리에틸렌(microporous polyethylene, Celgard 2400)을 사용하였고, 전해액은 리튬이온 이차전지 전해액 품질의 1.0 M LiPF<sub>6</sub>(lithium hexafluorophosphate, Sigma Aldrich) 용액을 사용하였다. 코인셀의 양극은 Li foil(Alfa Aesar, 99.9% metal basis)을 사용하였다. 코인셀은 고순도 아르곤 가스가 채워진 글러브 박스(glove box) 안에서 제작되었고, 제작된 CR2032 코인셀의 전기화학적 특성을 상온으로 온도가 일정하게 유지되는 기기로 내부에서 전기화학분석기(electrochemical analyzer, Wonatech, WBCS 3000)로 분석하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

스토버 합성법과 마이크로에멀전 합성법으로 합성된 실리카 나노입자의 표면구조를 FE-SEM으로 분석하여 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1 (a, b)는 솔리드 실리카 나노입자의 모습이고, Fig. 1 (c, d)는 메조포러스 실리카 나노입자의 모습이다. 실리카 나노입자의 합성조건(용매, 합성온도, 합성 시간 등)에 따라서 다양한 크기와 표면형상을 갖는 실리카 나노입자가 합성되었다. 실리카 나노입자의 표면형상이 리튬이온전지의 전기화학적 특성에 미치는 효과를 조사하기 위해 최적의 합성조건으로 솔리드 실리카와 메조포러스 실리카 나노입자를 합성하였고,

표면형상 분석결과를 Fig. 2에 나타내었다. 솔리드 실리카 나노입자의 경우 표면이 매끈한 형상을 가지고 있으며(주름 하나 없는 형태) 평균적인 크기는 약 200 nm 정도였다. 반면에 메조포러스 실리카 나노입자는 깊고 굽은 주름이 비교적 균일하게 형성되어 있었으며, 평균적인 크기는 약 100 nm 정도였다.

합성된 나노입자가 실리카 나노입자로 잘 합성되었는지를 확인하기 위하여 FT-IR 분광학 분석을 실시하여 Fig. 3에 나타내었다. 솔리드 실리카 나노입자는 파수 455, 802, 965, 1075 및 3314 cm<sup>-1</sup> 에서 전형적인 실리카 나노입자의 특성 피크가, 메조포러스 실리카 나노입자는 파수 448, 802, 934, 1083 및 3342 cm<sup>-1</sup> 에서 전형적인 실리카 나노입자의 피크들이 관찰되어 실리카 나노입자가 성공적으로 합성되었음을 알 수 있었다[15].

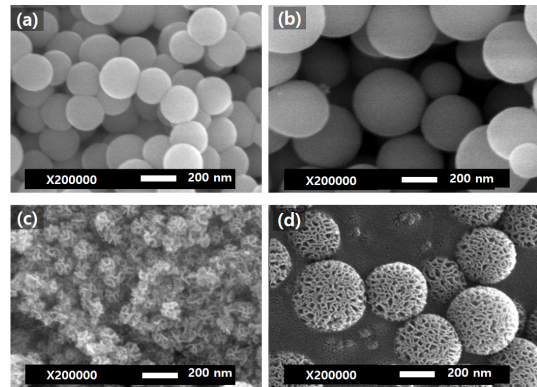


Fig. 1. FE-SEM images of (a), (b) solid silica nanoparticles (NPs)(Stöber method) and (c), (d) mesoporous silica NPs(microemulsion method) with various synthesis conditions

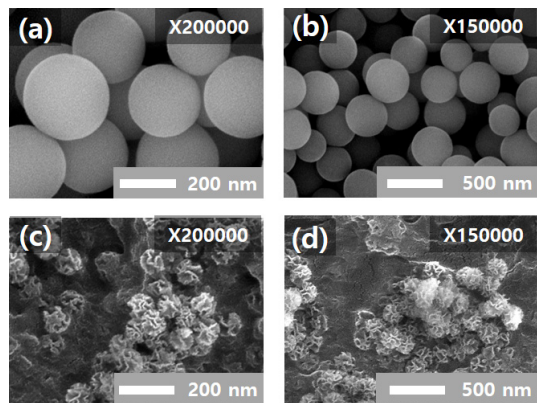


Fig. 2. FE-SEM images of (a), (b) solid silica NPs and (c), (d) mesoporous silica NPs with best synthesis conditions

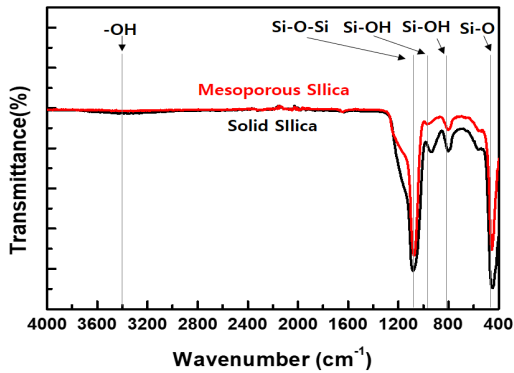


Fig. 3. FT-IR analysis results of solid silica NPs(black line) and mesoporous silica NPs(red line)

표면구조가 다른 실리카 나노입자를 음극소재로 적용하여 제작된 CR2032 코인셀의 전기화학적 특성을 비교 분석하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4 (a, b)의 경우, 전류밀도 100 mA/g으로 충전/방전 특성을 평가한 결과이다. 70 및 134 사이클(cycle)에서의 전기용량은 솔리드 실리카는 101 mAh/g, 102 mAh/g으로 유지되는 반면, 메조포러스 실리카는 105 mAh/g, 107 mAh/g으로 유지되어, 실리카 나노입자의 표면구조 차이에 따른 전기용량의 차이는 5%정도 증가하였다. Fig. 4 (c, d)는 전류밀도를 변화시키면서 충전/방전 특성을 평가한 C-rate (5 사이클씩 100, 200, 500, 1000, 100 mA/g으로 평가) 결과인데, 실리카 나노입자의 표면구조에 의한 차이는 거의 없었다. Fig. 4 (e)는 실리카 나노입자의 표면구조에 따른 코인셀의 쿨롱효율(Coulombic efficiency) 분석결과이며, 미미하지만 솔리드 실리카보다 메조포러스 실리카가 적용된 코인셀의 쿨롱효율이 보다 안정적(stable)으로 유지되었다. 이것은 메조포러스 실리카 나노입자가 부피팽창의 효과를 완화시킨 것에 기인한다.

코인셀의 고속 충전/방전 특성을 1,000 mA/g의 높은 전류밀도로 분석하여 Fig. 5에 나타내었다. 350 사이클, 700 사이클에서 메조포러스 실리카 나노입자로 제작된 코인셀의 전기용량은 86 mAh/g으로 유지된 반면, 솔리드 실리카 나노입자로 제작된 코인셀의 전기용량은 60 mAh/g으로 메조포러스 실리카 나노입자보다 30%정도 낮았다. 전류밀도 500 mA/g 이하의 충전/방전에서는 실리카 나노입자의 표면구조에 따른 전기용량의 차이가 크지 않았지만 1,000 mA/g의 고전류밀도 테스트에서는 비표면적이 넓은 메조포러스 실리카 나노입자가 솔리드 실리카 나노입자보다 급속한 부피팽창을 완화시켜서 우수한 전기용량 특성을 나타내었다.

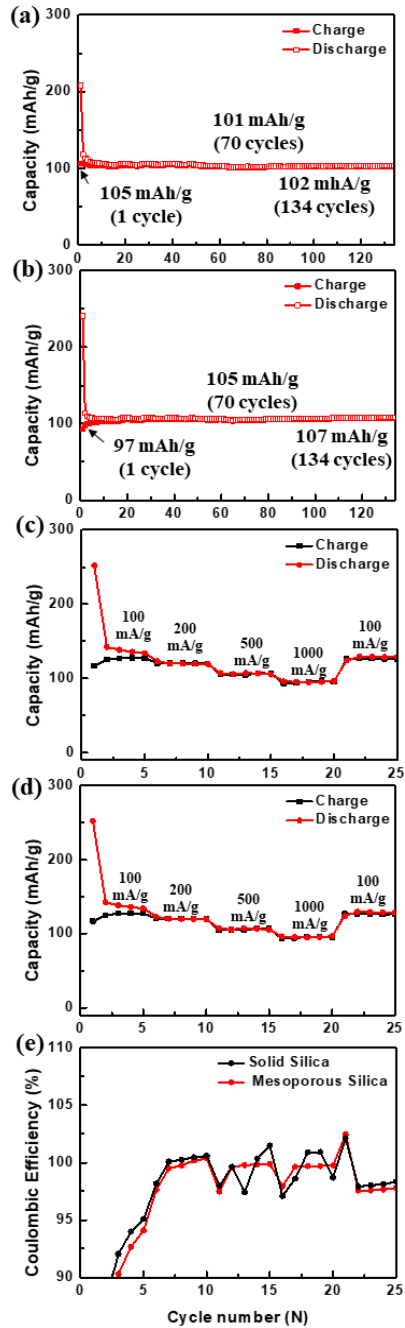


Fig. 4. Electrochemical performance of CR2032 coin cells. Cyclic performance of (a) solid silica NPs, (b) mesoporous silica NPs with current density of 100 mA/g. C-rate(current density) performance of (c) solid silica NPs, (d) mesoporous silica NPs. (e) Coulombic efficiency of solid silica NPs(black line), and mesoporous silica NPs(red line)

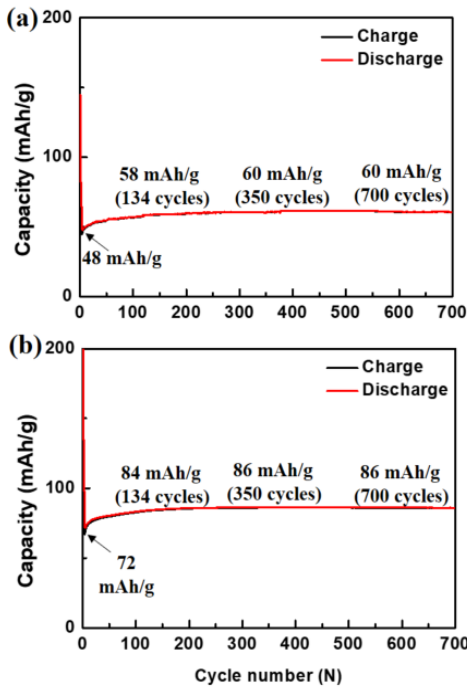


Fig. 5. Cyclic performance of (a) solid silica NPs, (b) mesoporous silica NPs with high current density of 1,000 mA/g charge/discharge test

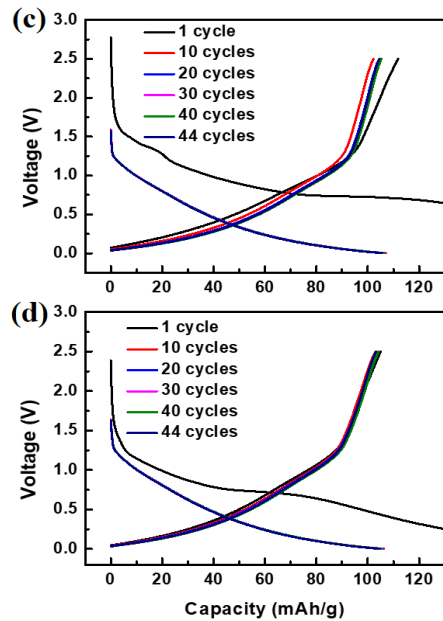
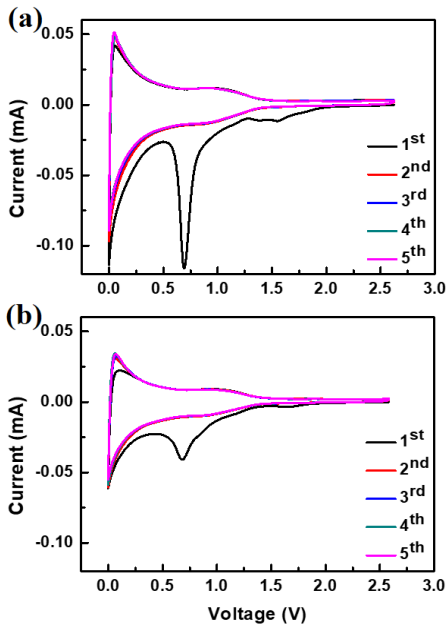


Fig. 6. Cyclic voltammety results of (a) solid silica NPs, (b) mesoporous silica NPs using scan rate of 0.1 mV/s. Voltage profiles of (c) solid silica NPs, and (d) mesoporous silica NPs using 100 mA/g current density

코인셀의 산화/환원 과정에서 SEI 층의 형성 유무를 확인하기 위해 scan rate 0.1 mV/s, scan range 0.001~2.5 V에서 순환 전압전류법(cyclic voltammety) 분석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6 (a, b)의 첫 번째 싸이클에서 나타난 0.6~0.7 V 사이의 피크는 SEI 층의 형성으로 나타난 환원 피크이며, 두 번째 싸이클 이후에는 나타나지 않았다. 메조포러스 실리카의 경우 SEI 층이 얇게 형성되어서 첫 싸이클의 피크 크기가 작게 측정되었다. Fig. 6 (c, d)는 voltage profile인데, 첫 싸이클 이후 메조포러스 실리카 나노입자가 적용된 코인셀의 전압특성이 솔리드 실리카 나노입자가 적용된 코인셀보다 안정적이었다. 이것은 충방전 과정 중에 메조포러스 실리카 나노입자의 부피변화가 작기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 스토버 합성법과 마이크로에멀전 합성법으로 표면구조가 다른 실리카 나노입자를 합성하였고, 실리카 나노입자의 표면구조가 리튬이온전지의 전기화학



적 성능에 미치는 효과를 비교 분석하였다. 연구결과를 요약하면,

첫째, 스토버 합성법으로는 표면이 매끈한 지름 200 nm의 구형 실리카 나노입자가 합성되었고, 마이크로에 멀전 합성법으로는 표면에 굽고 균인할 주름이 형성된 지름 100 nm의 구형 메조포러스 실리카 나노입자가 합성되었다.

둘째, 표면구조가 다른 실리카 나노입자를 리튬이온전지의 음극으로 적용하여 CR2032 코인셀을 제작하고, 전기화학적 특성을 평가한 결과, 충전/방전 테스트의 전류 밀도가 100 mA/g으로 낮을 경우에는 실리카 나노입자의 표면구조 차이에 따른 효과가 미미하였으나, 전류 밀도가 1,000 mA/g으로 높을 경우에는 메조포러스 실리카 나노입자가 적용된 코인셀의 전기용량이 30%정도 우수하였고, 전압특성도 우수하게 분석되었다.

따라서 메조포러스 실리카 나노입자로 제작된 리튬이온전지의 전기화학적 특성이 보다 안정적이며, 전기용량도 우수하였다. 이것은 메조포러스 실리카 나노입자의 넓은 비표면적으로 인해 SEI 층이 보다 균일하고 안정적으로 형성된 것에 기인하는 것으로 판단된다. 전기자동차용 배터리의 전기용량을 높이기 위해 실리콘 소재를 흑연 음극에 첨가제로 적용할 때, 비표면적이 큰 메조포러스 실리카를 적용한다면 고속 충전에서 보다 우수한 전기화학적 특성이 구현될 것으로 예상된다.

## References

- [1] J.-M. Tarascon, M. Armand, "Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries", *Nature*, Vol. 414, pp. 359-367, 2001.  
DOI: <https://doi.org/10.1038/35104644>
- [2] P. Lian, X. Zhu, S. Liang, Z. Li, W. Yang, H. Wang, "Large reversible capacity of high quality graphene sheets as an anode material for lithium-ion batteries", *Electrochimica Acta*, Vol. 55, pp. 3909-3914, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.02.025>
- [3] Q. K. Hanai, T. Ichikawa, M.B. Phillipps, A. Hirano, N. Imanishi, O. Yamamoto, Y. Takeda, "Improvement of cyclic behavior of a ball-milled SiO and carbon nanofiber composite anode for Lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, Vol. 196, pp. 9774-9779, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.08.005>
- [4] W.-J. Zhang, "A review of the electrochemical performance of alloy anodes for lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, Vol. 196, pp. 13-24, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.07.020>
- [5] U. Kasavajula, C. Wang, A. J. Appleby, "Nano- and bulk-silicon-based insertion anodes for lithium-ion secondary cells", *Journal of power sources*, Vol. 163, pp. 1003-1039, 2007.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.09.084>
- [6] J. Xiao, W. Xu, D. Wang, D. Choi, W. Wang, X. Li, G. L. Graff, J. Liu, J.-G. Zhang, "Stabilization of silicon anode for Li-ion batteries", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 157, pp. 1047-1051, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1149/1.3464767>
- [7] R. L. Sacci, N. J. Dudney, K. L. More, L. R. Parent, I. Arslan, N. D. Browning, R. R. Unocic, "Direct visualization of initial SEI morphology and growth kinetics during lithium deposition by in situ electrochemical transmission electron microscopy", *Chemical Communications*, Vol. 50, pp. 2104-2107, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1039/c3cc49029g>
- [8] Y. Wang, K. Xie, X. Guo, W. Zhou, G. Song, S. Cheng, "Mesoporous silica nanoparticles as high performance anode materials for lithium-ion batteries", *New Journal of Chemistry*, Vol. 40, pp. 8202-8205, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1039/c6nj01698g>
- [9] A. M. Chockla, K. C. Klavetter, C. B. Mullins, and B. A. Korgel, "Tin-seeded silicon nanowires for high capacity Li-ion batteries", *Chemistry of Materials*, Vol. 24, pp. 2378-3745, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/cm301968b>
- [10] Y. Yao, M. T. McDowell, I. Ryu, H. Wu, N. Liu, L. Hu, W. D. Nix, Y. Cui, "Interconnected silicon hollow nanospheres for lithium-ion battery anodes with long cycle life", *Nano Letters*, Vol. 11, pp. 2949-2954, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/nl201470i>
- [11] B. Wang, X. Li, X. Zhang, B. Luo, M. Jin, M. Liang, S. A. Dayeh, S. T. Picraux, L. Zhi, "Adaptable Silicon-Carbon Nanocables Sandwiched between Reduced Graphene Oxide Sheets as Lithium Ion Battery Anodes", *ACS Nano*, Vol. 7, No. 2, pp. 1437-1445, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/nn3052023>
- [12] D.-S. Moon, J.-K. Lee, "Tunable synthesis of hierarchical mesoporous silica nanoparticles with radial wrinkle structure", *Langmuir*, Vol. 28, pp. 12341-12347, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/la302145j>
- [13] W. Stöber, A. Fink, "Controlled growth of monodisperse silica spheres in the micron size range", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 26, pp. 62-69, 1968.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(68\)90272-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(68)90272-5)
- [14] H.-M. Kim, C.-H. Lee, B. Kim, "Sonochemical synthesis of silica particles and their size control", *Applied*

*Surface Science*, Vol. 380, pp. 305-308, 2016  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.048>

- [15] A. Maleki, M. Hamidi, "Dissolution enhancement of a model poorly water-soluble drug, atorvastatin, with ordered mesoporous silica: comparison of MSF with SBA-15 as drug carriers", *Expert Opinion on Drug Delivery*, Vol. 13, pp. 171-181, 2016  
DOI: <https://doi.org/10.1517/17425247.2015.1111335>
- 

이 경 복(Kyung Bok Lee)

[준회원]



- 2022년 2월 : 목원대학교 도시환경화학공학과 (공학사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 재료공학부 (석사 과정)

<관심분야>

에너지관련 소재, 기능성 소재, 그래핀 복합소재

---

김 기 출(Ki-Chul Kim)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학사)
- 1996년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학석사)
- 2002년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학박사)
- 2002년 4월 ~ 2006년 3월 : 한국 전자통신연구원 선임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 교수

<관심분야>

에너지 저장소재, 가스센서, 기능성 나노소재, 나노바이오소재