높은 유효 표면적을 갖는 3차원 TiO2 나노벽 유사구조의 성장

김미리¹, 김기출^{1,2*} ¹목원대학교 지능정보융합학과, ²목원대학교 신소재화학공학과

Growth of 3D TiO₂ Nano-wall-like Structure with High Effective Surface Area

Mee-Ree Kim¹, Ki-Chul Kim^{1,2*}

¹Department of Intelligent Information Convergence, Mokwon University ²Department of Advanced Chemical Engineering, Mokwon University

요 약 높은 유효 표면적을 갖는 나노소재는 고감도 가스센서와 바이오센서 및 높은 촉매효율을 구현하는 기능성 소재로 활용되고 있다. 본 연구에서는 Ti Sheet와 Urea를 이용하는 Chemical Bath Deposition(CBD) 공정으로 기판에 수직 한 방향으로 성장하는, 높은 유효 표면적을 갖는 3차원 나노벽 유사구조의 Titanate Sheet를 합성하였다. CBD 공정에 서 합성온도 및 합성시간 등을 조절하여 3차원 나노벽 유사구조의 최적 합성조건을 탐색하였다. 합성된 3차원 나노벽 유사구조의 Ammonium Titanate를 공기 중에서의 열처리 공정을 통하여 다양한 용도로 활용되는 TiO₂ 3차원 나노벽 유사구조로 변환시켰다. 연구결과 3차원 나노벽 유사구조의 Ammonium Titanate가 균일하게 성장되는 CBD 합성온 도는 90 °C이었고, 550 °C 이상에서 3시간 열처리하였을 경우, 3차원 나노벽 유사구조의 TiO₂ 상으로 변환되었다. 특 히 700 °C에서 열처리하였을 경우, Rutile 상이 우세한 TiO₂ 3차원 나노벽 유사구조를 얻을 수 있었다. 하지만 700 °C의 열처리에서는 3차원 나노벽의 가장자리가 손상되는 현상이 발생하였다.

Abstract Nano-materials with high effective surface areas have been applied to functional materials, such as high sensitive gas sensors and biosensors and high-efficiency catalytic materials. In this study, titanate sheets with a 3D nano-wall-like structure, high effective surface area, were synthesized vertically to the substrate by a chemical bath deposition (CBD) process using a Ti sheet and urea. The synthesis temperature and synthesis duration time were controlled to the optimal conditions of a 3D nano-wall-like structure in the CBD process. The synthesized ammonium titanate sheets with a 3D nano-wall-like structure were annealed in air to transform to TiO₂ with a 3D nano-wall-like structure for various applications. As a result, the optimal temperature in the CBD process for the synthesis of a uniform ammonium titanate sheet with a 3D nano-wall-like structure was obtained from the ammonium titanate sheet with a 3D nano-wall-like structure with a 3D nano-wall-like structure was obtained from the ammonium titanate sheet with a 3D nano-wall-like structure by annealing above 550 °C for three hours. In particular, TiO₂ with a 3D nano-wall-like structure with a dominant rutile phase was obtained by post-annealing at 700 °C. On the other hand, damage to the 3D nano-wall edge was observed after 700 °C post-annealing.

Keywords : Chemical Bath Deposition, Hydrothermal, Nano-Wall, TiO₂, Vertical Growth

본 연구는 2020년도 산학협동재단의 지원을 받아 수행되었음. This work was supported by Korea Sanhak Foundation(KSF) in 2020. *Corresponding Author : Ki-Chul Kim(Mokwon University) email: kckim30@mowkon.ac.kr Received January 5, 2021 Revised March 24, 2021 Accepted April 2, 2021 Published April 30, 2021

1. 서론

반도체 공정기술이 발달하면서 미소 소자를 구현하는 다양한 기술이 개발되었고, 현재 반도체 공정기술은 수 nm 크기의 패턴을 구현할 수 있는 수준에 도달하였다. 4차 산업혁명의 시대에는 다양한 기능성 소자가 개발되 고, 초소형 센서 및 디바이스에 기반한 사물인터넷(IoT, Internet of Things) 시대가 도래할 것으로 예상하고 있 다. 하지만 모든 미소 소자를 톱-다운(Top-Down) 공정 기술인 고가의 반도체 공정기술로 구현하는 것은 소자의 가격을 상승시키는 요인이 된다. 따라서 원자의 자기조립 적 메커니즘(Self-Assembled Mechanism)에 기초한 저가의 버텀-업(Bottom-Up) 소재합성 기술이 주목을 받고 있다[1]. 다양한 나노소재에 대하여 연구가 폭넓게 수행되고, 나노구조의 소재에 대한 이해가 깊어지면서 버 텀-업 공정에 기반한 나노구조의 소재합성 기술이 보고 되었다[2-11]. 벌크(Bulk) 소재와 비교하여 나노구조의 소재는 유효 비표면적이 매우 크기 때문에 반응성이 매 우 높아서 고감도의 가스센서 및 바이오센서의 제작이 가능하고, 높은 촉매효율을 구현할 수 있다. 또한 형상이 제어된 나노소재는 작은 체적에 많은 에너지를 저장할 수 있는 차세대 배터리 기술에도 적용이 가능할 것으로 주목을 받고 있다[1].

기판의 선택적 영역에 나노구조물을 원자의 자기조립 적 공정으로 성장시키는 다양한 기술이 연구되었고, 미세 접촉인쇄(Micro-Contact Print) 기술[2-4], 나노 임프 린트(Nano-Imprint) 기술[5], 원자층 증착(Atomic Layer Deposition) 기술[3,4], 이차 스퍼터링 리쏘그라 피(Secondary Sputtering Lithography) 기술[6] 등이 다양한 조합으로 연계되어 선택적 영역에 다양한 나노구 조물을 버텀-업 공정으로 합성하고 있다. 하지만 이러한 기술들도 버텀-업 공정의 자기조립적 메커니즘을 활용하 고 있지만 일부는 고가의 톱-다운 반도체 공정기술을 활 용하고 있다.

높은 유효 표면적을 갖는 3차원 나노벽 유사 구조의 나노소재를 저가의 버텀-업 자기조립적 공정으로 합성하 는 Chemical Bath Deposition(CBD) 공정이 다양한 금속 산화물 소재에 대하여 적용되었고, 성공적으로 3차 원 나노벽 유사구조가 합성되었음을 보고하였다[7-11]. CBD 공정은 합성 전구체의 농도, 전구체간의 비율, 합성 온도, 합성시 pH, 합성 시간, 기판 등의 변수를 조절하여 3차원 나노벽 유사구조를 저가로 합성할 수 있다[7-11]. 이산화티타늄(TiO₂)은 저렴하고, 독성이 없으며 상이 안정하고, 높은 광촉매 효과를 나타내어, 유기물을 분해 하기 위한 광촉매 물질로 상업적으로 주목을 받는 기능 성 소재이다[12,13]. 이산화티타늄은 초친수성 표면 구현 이 가능하여[11] 실리콘 태양전지의 커버글래스 및 건물 의 유리창에 적용되어 자기세정(Self-Cleaning) 기능을 구현하고, 염료감응형 태양전지(Dye-Sensitized Solar Cell, DSSC)에 적용되어 광전변환효율을 향상시킨다 [14]. 또한 리튬이온전지의 충방전 과정 중 리튬이온의 출입에 따른 전극소재의 부피변화율이 4% 정도로 미미 하기 때문에 높은 싸이클 안정성을 갖는 리튬이온전지의 전극소재로도 활용이 가능하다[15].

본 연구에서는 저가의 CBD 공정을 이용하여 3차원 이산화티타늄 나노벽 유사구조를 합성하였고, 합성 조건 에 따른 형상학적 특성과 열처리 조건에 따른 결정학적 특성을 분석하여 제시하였다.

2. 실험방법

CBD 방법에서는 금속(Metal)과 수용액을 이용하는 Metal Hydroxide 방법을 이용하여 기판에 수직한 나노벽 유사구조의 LaOF[7], ZnO[8-10], NiO[8], Co₃O₄[8], TiO₂[11] 소재를 합성할 수 있다. 특히 수열합성 공정 (Hydrothermal Synthesis Process)으로 간단하게 처 리하는 CBD 방법은 전구체가 자기 조립되는 버텀-업 속 도와 분해되는 톱-다운 속도의 차이를 조절함으로써 기 판 전체에 걸쳐 3차원 나노벽 유사구조를 대면적으로 간 단하게 성장시킬 수 있다.

3차원 나노벽 유사구조의 수직 성장은 수용액에 Metal이 용해되는 양을 pH, 온도, 시간 등을 조절하여 원하는 나노벽 유사구조를 성장시킬 수 있는데, 본 연구 에서는 Ti Metal과 Urea 수용액을 사용하였다. Ti Metal이 Urea 속의 암모늄 이온과 만나 용해되는 과정 은 다음의 Eq. (1)처럼 나타낼 수 있다.

$$nTi + 2NH_4OH + (2n-1)H_2O$$
(1)

$$\rightarrow (NH_4)_2Ti_nO_{2n+1} + 2nH_2$$

3차원 이산화티타늄 나노벽 유사 구조물의 성장에서 온도와 숙성시간의 효과를 조사하기 위하여, Fig. 1에 나 타낸 것과 같이 CBD 공정을 사용하여 Ammonium Titanate 나노구조물을 합성하였다. 3차원 나노벽 유사 구조를 갖는 Ammonium Titanate의 성장은 Teflon-Lined Autoclave 안에서 이루어졌고, 원료물질 은 Urea (JUNSEI, 순도 98.0%), Ti Sheet(ALDRICH, 순도 99.7%, 두께 0.25 mm)를 사용하였다. Teflon Beaker 안에 Urea 5 g을 증류수 40 ml에 용해시킨 후 10 mm × 10 mm 크기의 Ti Sheet를 담그고 오븐 안 에서 일정한 온도(60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C)로 CBD 공정을 12시간 ~ 156시간까지 다양한 조건 으로 진행하였다. Ammonium Titanate가 성장된 후 수열처리 된 Ammonium Titanate Sheet를 증류수에 세척한 후, 3 시간 동안 열처리를 수행하였다. 열처리는 대기 중의 오븐에서 진행하였으며, 열처리 온도는 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 700 °C이었다. 열처리 과정을 통하여 Ammonium Titanate 나노구조물은 TiO₂ 나노구조물로 상이 변환된다.



Fig. 1. Schematic diagram of the 3D TiO₂ nano-wall-like structure grown by chemical bath deposition process

CBD 공정으로 다양한 온도와 숙성시간으로 성장된 Ammonium Titanate 나노구조물의 표면형상과 열쳐 리 후의 표면형상을 전계방출 주사전자현미경(FE-SEM, JEOL JSM- 6500F)으로 관찰하였고, 그 결과를 Fig. 2 와 Fig. 3에 나타내었다. 또한 열처리 전후의 나노구조물 의 결정학적 특성을 X선 회절실험(X-Ray Diffraction, XRD, ThermoFisher Scientific, K-Alpha+, Cu K-Alpha radiation)을 통하여 조사하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

다양한 CBD 공정 조건으로 수열합성 된 Ammonium Titanate 나노구조물의 표면형상을 관찰하기 위하여 FE-SEM 분석을 수행하였다. 96시간동안 CBD 공정을 수행한 시편을 수열합성 온도 각각에 대하여 시편을 수 직방향으로 관찰한 Top-Side View(Fig. 2. a, c, e, g, i)와, 구조의 복잡성을 고려하여 기판에 대하여 45° 각도 에서 관찰한 Tilted View(Fig. 2. b, d, f, h, j)를 Fig. 2에 나타내었다.

CBD 공정온도에 따라서 Ammonium Titanate 나노 구조물의 표면형상이 전혀 다른 것을 확인할 수 있다. CBD 공정온도 60 °C에서는 수직방향의 Ammonium Titanate 나노구조물이 약간 성장하였고, 온도가 증가할 수록 Ammonium Titanate 나노벽 유사구조가 점차적 으로 더 크고 높게 성장되었다. 특히 90 °C에서 Ammonium Titanate 나노벽 유사구조가 균일하게 잘 성장된 것을 확인할 수 있다. 하지만 100 °C 에서는 높 은 온도로 인하여 Growth Rate 보다 Etching Rate이 높아서 3D 나노벽 유사구조를 유지하지 못하고 Particle 만 남은 모습을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 E. Hosono[11] 등이 100 °C에서 96시간동안 CBD 공정을 수행하였을 때 Ammonium Titanate 나노벽이 잘 성장 되었다고 보고한 결과와 다른 결과이며, 반복 실험을 진 행하여도 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

CBD 공정에서 숙성시간에 따른 Ammonium Titanate Sheet의 성장양상도 온도 의존성과 유사하였다. 12시간 숙성하였을 경우, 나노벽의 성장은 미미하였으며, 숙성시 간이 증가할수록 Ammonium Titanate 나노벽이 더 크 고 높게 성장되었다. 하지만 숙성시간 96시간 이후에는 Ammonium Titanate 나노벽의 성장양상이 거의 변하지 않았다. 이와 같은 성장양상을 보았을 때, 3D Ammonium Titanate 나노벽 유사구조가 균일하게 성장되는 CBD 공정조건은 90 °C (Fig 2. g-h)에서 96시간 CBD 공정 을 수행하는 것이 가장 적합한 것으로 판단된다.



Fig. 2. FE-SEM images of the 3D ammonium titanate nano-wall-like structures grown by CBD process on Ti sheet under various incubation temperature of a-b) 60 °C, c-d) 70 °C, e-f) 80 °C, g-h) 90 °C, i-j) 100 °C for 96 hrs. The magnification of FE-SEM images is 100,000 times. (Left column : top-side-view images, right column : 45° tilted-view images)

CBD 공정으로 성장된 3D Ammonium Titanate 나노벽 유사구조를 다양한 기능성 소재로 활용할 수 있는 3D TiO₂ 나노벽 유사구조로 상변환 시키기 위하여 열처리 공정을 수 행하였다. 90 °C 조건으로 성장된 Ammonium Titanate Sheet를 증류수에 세척한 후, 대기 중에서 3시간 동안 열처 리 공정을 수행하였다. 이때 열처리 수행의 온도는 각각 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 700 °C이었다. 열처리 공정 에 따른 3차원 나노벽 유사구조의 변형여부를 확인하기 위하 여 FE-SEM 분석을 수행하여, Fig. 3에 나타내었다.



Fig. 3. FE-SEM images of the 3D titanate nano-walllike structures grown by CBD process at 90 °C on Ti sheet for 96 hrs and various post annealing temperature of a-b) 450 °C, c-d) 500 °C, e-f) 550 °C, g-h) 600 °C, and i-j) 700 oC for 3 hrs. The magnification of FE-SEM images is 100,000 times. (Left column : top-side-view images, right column : 45° tilted-view images)

열처리 온도에 따라서 3차원 나노벽 유사구조의 형상 이 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 550 ℃ 이하에서 열처리를 수행했을 경우에는 3차원 나노구조물의 표면형 상에 변화가 거의 보이지 않았다. 하지만 열처리 온도 600 ℃ 에서는 나노벽의 가장자리가 미소하게 손상된 것을 관찰할 수 있다. 또한 열처리 온도 700 ℃에서는 나노벽의 손상정도가 보다 광범위하게 진행되었다. 열처 리 온도가 600 ℃ 이상으로 높아질수록 나노벽의 가장 자리 표면이 더 많이 기화(Evaporation)되어 손상되는 것으로 추측된다.

CBD 공정으로 90 °C에서 합성된 3D Ammonium Titanate 나노벽 유사구조와 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 700 °C에서 각각 열처리된 3차원 나노벽 유사구조 의 결정학적 특성을 분석하기 위하여 XRD 분석을 수행하였 고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 90 °C에서 CBD 공정 으로 성장된 3차원 나노구조물의 경우, TiO_{0.176}(▼) (ICDD Card No. 01-082-7490) 피크만 관찰되었고, 34.94°, 37.87°, 39.91°, 52.47°, 62.67°, 69.77°, 75.61°, 76.92° 에서 결정면 (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112), (201)에 대응되는 피크를 확인할 수 있다.



Fig. 4. XRD patterns of the 3D TiO₂ nano-wall-like structures grown by chemical bath deposition at 90 °C on Ti sheet for 96 hrs and various annealing temperature of 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 700 °C for 3 hrs. Symbols of A, ▼ and R denote Anatase TiO₂(A), TiO_{0.176}(▼), Rutile TiO₂(R), respectively

반면에 550 °C에서 열처리한 경우에는 Anatase TiO₂(A) (ICDD Card No. 00-064-0863), Rutile TiO₂(R) (ICDD Card No. 00-021-1276)의 피크가 약 하지만 관찰되었다. 600 °C에서 열처리한 경우에는 TiO₂-A(101)면과 TiO₂-R(110)면의 피크 세기가 높아 졌고, TiO₂-R 상의 피크가 다수 관찰되었다. 700 °C에 서 열처리한 경우에는 TiO₂-A(101)면의 피크 Intensity 가 상대적으로 감소하고, TiO₂-R(110)면의 피크의 Intensity가 두드러지게 높아졌으며, 전반적으로 TiO₂-R 상의 모든 피크의 Intensity가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 열처리 온도가 상대적으로 낮을 때에는 TiO₂-A(101) 면과 TiO₂-R(110)면이 생성되고 이후 열처리 온도가 높 아짐에 따라 TiO₂-R(110)면의 비율이 증가하고, 점차 전체적으로 TiO₂-R 상의 피크 Intensity가 증가되는 양 상을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 분야에 적용이 가능한 3차원 TiO₂ 나노벽 유사구조를 저가의 CBD 공정으로 합성하 였고, CBD 공정의 최적조건과 열처리 조건에 대하여 분 석하였다. 연구결과는 다음과 같다.

첫째, CBD 공정에서 3차원 나노벽 유사구조를 균일 하게 성장시키는 온도는 90 °C이었다. CBD 공정온도가 낮을 경우에는 3차원 나노벽의 성장이 미미하였고, 100 ℃ 이상에서는 3차원 나노벽 유사구조가 성장되지 않았다.

둘째, 성장된 Ammonium Titanate 3차원 나노벽 유 사구조를 공기 중에서 열처리하여 3차원 나노벽 유사구 조의 TiO₂ 상으로 변환할 수 있었다. 열처리 온도가 550 °C인 경우, Anatase 상과 Rutile 상이 모두 관찰되었으 며, 열처리 온도가 700 °C 경우에는 Rutile 상이 상대적 으로 증가하는 것으로 판단된다.

셋째, 3차원 나노벽 유사구조는 열처리 온도에 따라 표면형상이 영향을 받았다. 열처리 온도 550 °C이하에서 는 영향이 거의 없었지만, 600 °C에서는 나노벽의 가장 자리가 미미하게 손상되었고, 700 °C에서 열처리한 경우 에는 나노벽 가장자리의 손상 영역이 증가하였다.

이상에서 살펴본 것처럼 저가의 CBD 공정으로 합성 된 3차원 TiO₂ 나노벽 유사구조는 높은 유효 표면적을 갖고 있기 때문에 높은 효율의 광촉매에 응용될 수 있을 것이다. 또한 리튬이온 이차전지의 충방전 과정 중에서 부피변화가 흑연을 사용하는 상용 리튬이온 이차전지보 다 2.5배정도 작기 때문에 수명 특성이 매우 우수한 리튬 이온전지의 음극 소재로 적용될 수 있을 것이다.

References

- [1] J. N. Tiwari, R. N. Tiwari, K. S. Kim "Zero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices", *Progress in Materials Science*, Vol. 57, pp. 724-803, 2012. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.08.003</u>
- [2] A. Pick, G. Witte, "Patterned growth of organic

semiconductor: Selective nucleation of perylene on self-assembled monolayers", Langmuir, Vol. 32, pp. 8019-8028, 2016.

DOI: https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b01833

- [3] B. H. Lee, M. M. Sung, "Selective atomic layer deposition of metal oxide thin films on patterned self-assembled monolayers formed by microcontact printing", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 7, No. 11, pp. 3758-3764, 2007. DOI: https://doi.org/10.1166/jnn.2007.18067
- [4] M. H. Park, Y. J. Jang, H. M. Sung-Suh, M. M. Sung, "Selective atomic layer deposition of titanium oxide on patterned self-assembled monolayers formed by microcontact printing", Langmuir, Vol. 20, pp. 2257-2260, 2004. DOI: https://doi.org/10.1021/la035760c
- [5] W. Zhao, H. Y. Low, P. S. Suresh, "Cross-linked and chemically functionalized polymer supported by reactive reversal nanoimprint lithography", Langmuir, Vol. 22, pp. 5520-5524, 2006. DOI: https://doi.org/10.1021/la052523w
- [6] W-B Jung, S-Y. Cho, B. L. Suh, H-W. Yoo, H-J Jeon, J. Kim, H-T. Jung, "Polyelemental nanolithography via plasma ion bombardment: From fabrication to superior H₂ sensing application", Advanced Materials, Vol. 31, Issue 6, p. 1805343, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/adma.201805343
- [7] E. Hosono, S. Fujihara, T. Kimura, "Fabrication of nanoparticulate porous LaOF films through film growth and thermal decomposition of Ion-modified Lanthanum diacetate hydroxide", Langmuir, Vol. 20, pp. 3769-3774, 2004. DOI: https://doi.org/10.1021/la036370t
- [8] S. Fujihara, E. Hosono, T. Kimura, "Fabrication of porous metal oxide semiconductor films by a self-template method using layered hydroxide metal acetate", Journal of Sol-Gel Science and Technology, Vol. 31, pp. 165-168, 2004.
- [9] E. Hosono, S. Fujihara, I. Honma, H. Zhou, "The fabrication of an upright-standing zinc oxide nanosheet for use in dye-sensitized solar cells", Advanced Materials, Vol. 17, pp. 2091-2094, 2005. DOI: https://doi.org/10.1002/adma.200500275
- [10] E. Hosono, S. Fujihara, T. Kimura, H. Imai, "Growth of layered basic zinc acetate in methanolic solutions and its pyrolytic transformation into porous zinc oxide films", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 272, pp. 391-398, 2004. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.10.005
- [11] E. Hosono, H. Matsuda, I. Honma, M. Ichihara, H. Zhou, "Synthesis of a perpendicular TiO₂ nanosheet film with the superhydrophilic property without UV irradiation", Langmuir, Vol. 23, pp. 7447-7450, 2007. DOI: https://doi.org/10.1021/la701117a
- [12] M. Ge, J. W. Li, L. Liu, Z. Zhou, "Template-free synthesis and photocatalytic application of rutile TiO₂

hierarchical nanostructures", Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 50, pp. 6681-6687, 2011. DOI: https://dx.doi.org/10.1021/ie1023113

- [13] A. Das, M. Patra, R. R. Wary, P. Gupta, R. G. Nair, "Photocatalytic performance analysis of Degusa P25 under various laboratory conditions", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 377, p. 012101, 2018. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012101
- [14] Y. H. Jang, X. Xin, M. Byun, Y. J. Jang, Z. Lin, D. H. Kim, "An unconventional route to high-efficiency dye-sensitized solar cells via embedding graphitic thin films into TiO2 nanoparticle photoanode", Nano Letters, Vol. 12, pp. 479-485, 2012. DOI: https://dx.doi.org/10.1021/nl203901m
- [15] M. Madian, A. Eychmuller, L. Giebeler, "Current advances in TiO2-based nanostructure electrodes for high performance lithium ion batteries", Batteries, Vol. 4, p.7, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/batteries4010007

김 미 리(Mee-Ree Kim)

[정회원]



- 2016년 2월 : 목원대학교 신소재 화학공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 충남대학교 신소재 공학과 (공학석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 지능정보융합학과 (박사 과정)

〈관심분야〉 에너지관련 소재, 기능성 소재, 그래핀, 가스센서

김 기 출(Ki-Chul Kim)

[종신회원]



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

〈관심분야〉 에너지 저장소재, 가스센서, 에너지 하베스팅 소재