

합침 공정을 통한 그래파이트 몰드의 표면 개질 연구

김영규^a, 김종범^b, 김영복^c, 이동일^d, 정동연^d, 김석민^{a,b,*}

Study on Surface Roughness Modification of Graphite Mold through Infiltration Process

YoungKyu Kim^a, Jongbeom Kim^b, Young Bok Kim^c, Dong Il Lee^d, Dong Yoen Jung^d, Seok-Min Kim^{a,b,*}^a Department of Computer Science and Engineering, Chung-Ang University^b Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University^c Korea Photonics Technology Institute^d DTK Co., Ltd.

ARTICLE INFO

Article history:

Received	29	August	2025
Revised	15	January	2026
Accepted	29	January	2026

Keywords:

Graphite mold
Surface modification
Impregnation process
Carbonization
Freeform mirror

ABSTRACT

Graphite molds are widely employed in high-temperature glass molding processes because of their excellent thermal stability, machinability, and cost-effectiveness. However, the intrinsic porosity of graphite results in poor surface roughness, which restricts its application in large-area freeform optical components such as automotive head-up display (HUD) mirrors. This study developed a surface modification process based on impregnation and carbonization employing a furan resin to improve the surface quality of graphite molds. An optimal furan-to-ethanol weight ratio of 7:3 enabled effective pore filling and densification of the graphite surface. After carbonization and polishing, the modified graphite mold exhibited a significantly reduced surface roughness of approximately 60 nm (Ra). The proposed impregnation-carbonization approach was successfully applied to a large-area graphite mold for HUD glass mirror.

1. 서론

전방표시장치(Head-up display, HUD)는 항공기의 조종 안정성 향상을 목적으로 최초 개발되었으며^[1], 차량분야에도 그 활용이 증대되고 있다. 차량용 HUD는 Fig. 1과 같이 정보를 생성하는 영상 생성 장치와 해당 장치에서 방출된 광을 평면 미러 및 자유곡면 미러를 이용하여 전방유리에 조사하는 광학계로 구성된다^[2]. 차량용 HUD는 최초 단순한 속도 및 진행 방향을 차량 전방유리 소면적에 투사하는 형태에서, 첨단 안전 차량(advanced safety vehicles)의 구현을 위해 교통 상황 및 위험 정보를 포함한 다양한

정보를 차량 전방유리에 대면적으로 투사하는 방향으로 전환되고 있다^[3,4]. 투사 면적이 증가함에 따라 자유곡면 거울의 대형화가 이루어지고 있으며, 고온 환경에서 형상 안정성을 확보해야 하는 차량 전장 부품의 특성상, 유리소재 대면적 자유곡면 미러 제작과 관련된 기술적 이슈가 대두되었다.

고온 내구성을 갖는 자유곡면 미러는 금속소재의 기계가공을 통해 제작될 수 있으나^[5], 기계가공 공정의 경우 양산 공정에 적용함에 있어 생산성 및 제작 단가 절감이 어려운 문제가 있다. 이에 대면적 자유곡면 미러의 양산공정 개발을 위해, 유리성형 공정을 통해 자유곡면 유리기판을 제작하고 금속층을 코팅하여 자유곡면

* Corresponding author. Tel.: +82-2-820-5877

E-mail address: smkim@cau.ac.kr (Seok-Min Kim).

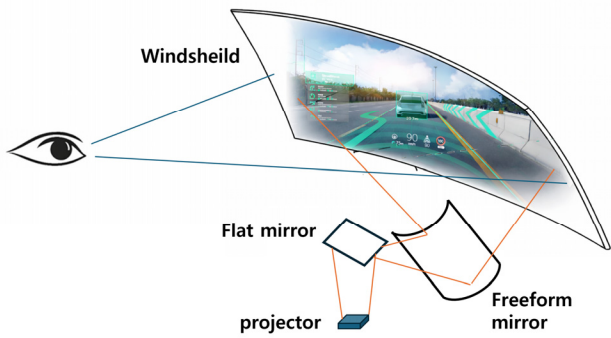


Fig. 1 Structure layout of next generation automotive HUD system (image generated with the assistance of ChatGPT, OpenAI)

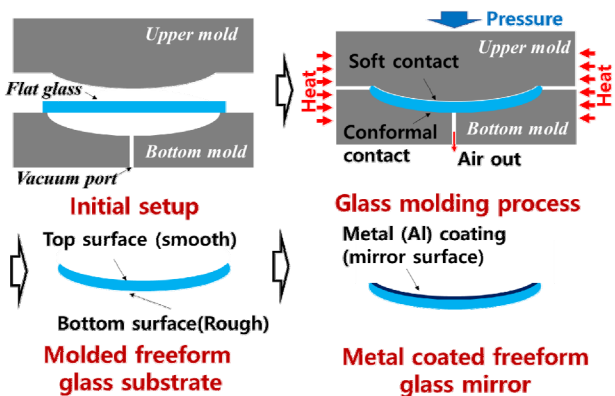


Fig. 2 Fabrication process of freeform mirror using glass molding process with graphite mold

거울을 제작하는 공정이 사용되고 있으며, 자유곡면 미러와 같은 대면적 유리성형 공정에서는 그래파이트 몰드가 널리 사용되고 있다^[6-8]. 본 연구에서는 다공성 소재인 그래파이트의 거친 표면 특성을 개선하기 위해 고탄소 고분자의 함침 공정을 통해 그래파이트의 표면을 개질하는 공정을 개발하고, 이를 통한 그래파이트 몰드 표면거칠기 향상 특성을 분석하였다.

2. 대면적 자유곡면 유리 미러 제작 공정

본 연구에서는 자유곡면 미러의 제작을 위해 Fig. 2와 같이 그래파이트 몰드를 이용한 유리 성형 공정으로 제작된 자유곡면 유리 기판상에 금속층을 코팅하는 방법을 제안하였다. 평면 유리기판이 자유곡면 형상이 가공된 그래파이트 하부 몰드 위에 놓여지며, 소재의 연화점 이상으로 몰드와 유리가 모두 가열된 환경에서 하부 몰드의 진공 포트를 통해 공기의 흡입이 이루어져 평판 유리가 하부 몰드와 밀착하며 자유곡면 형상으로 변형된다^[9]. 상부몰드의 경우 공정초기 일정부분 가압공정이 수행되나, 최종단계에서 상부 몰드가 유리 소재와 완전 밀착되지 않도록 공정을 제어한다. 즉, 상부몰드는 공정 초기 소재의 변형을 인가하는 역할과 공정 중 유

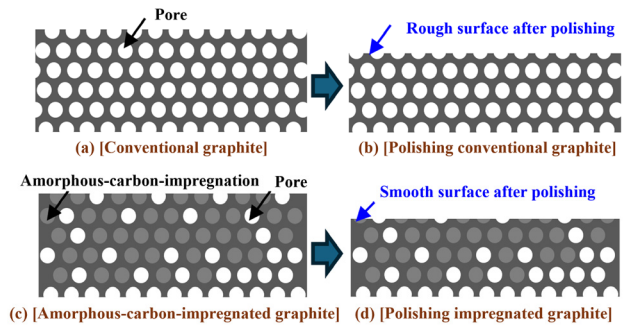


Fig. 3 Conceptual comparison of polishing behavior between conventional porous graphite and amorphous-carbon-impregnated graphite, showing rough surface formation due to exposed pores in untreated graphite and smooth surface generation enabled by pore filling after impregnation and carbonization

리소재 주변에 균일한 온도 분포를 구현하는 역할을 수행하며, 유리 기판에 일정 수준 이상의 변형이 발생한 뒤에는 하부 몰드의 진공 흡입에 의한 밀착이 이루어지도록 공정을 제어한다. 이는 상부 그래파이트 몰드의 거친 표면 형상이 자유곡면 유리기판으로 전사되는 문제를 방지하기 위한 것이다. 진공흡입에 의한 밀착이 발생하는 유리기판 하부면의 경우 그래파이트 몰드의 거친 표면거칠기를 그대로 복제하나, 완벽한 밀착이 이루어지지 않는 유리기판 상부면의 경우 유리소재의 표면장력에 의해 우수한 표면품위의 구현이 가능하다. 최종적으로 표면품위가 우수한 상부면에 금속(알루미늄)층을 증착하여 자유곡면 유리미러를 구현한다.

3. 그래파이트 몰드 표면 개질 공정 개발

HUD용 자유곡면 유리 성형에 적용되는 그래파이트 몰드는 고온 내구성과 열 전달 특성이 우수하고 가공이 용이한 장점이 있으나, 다공성을 갖는 소재의 특성상 우수한 표면 조도 확보가 어려운 문제점을 갖는다. 이러한 문제점으로 인해 자유곡면 유리기판의 성형 과정에서 상부 금형은 유리소재와 완전히 밀착되지 않고 하부 금형만 진공 흡입 구조를 통해 소재와 밀착함으로써 자유곡면 유리 기판의 형상 정밀도를 확보하고 금속 층이 코팅되는 상부면의 표면조도를 확보하는 공정을 적용하였으나, 유리기판 하부의 높은 표면거칠기는 광학면인 상부 표면에 영향을 주므로 그래파이트 몰드의 표면 품위를 개선할 필요가 있다. 그래파이트 몰드는 Fig. 3(a)와 같이 다공성 구조를 가져 연마공정을 수행하더라도 표면 조도 향상에는 한계가 있다. 본 연구에서는 Fig. 3(b)와 같이 다공성 그래파이트에 고탄소 고분자 소재인 푸란수지(KC-5302, 강남화성, 대한민국)를 함침한 뒤 탄화하여 그래파이트 몰드의 다공성을 감소시키고 이후 연마공정을 통해 우수한 표면조도의 그래파이트 몰드를 제작한다.

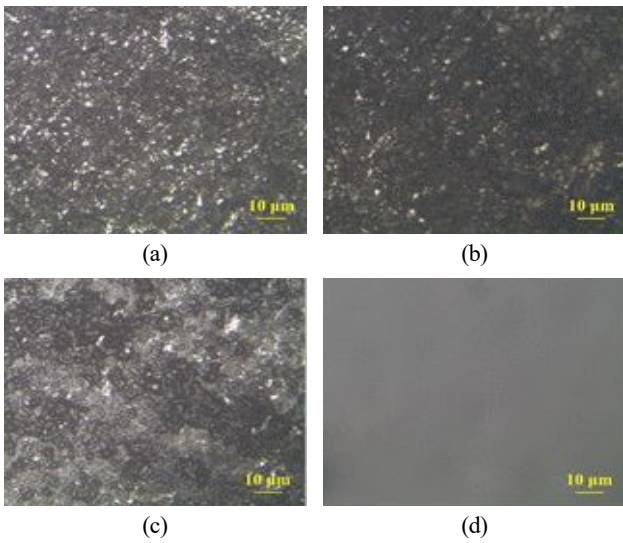


Fig. 4 Optical microscope images of (a) bare graphite, and Furan resin impregnated graphite after (b) 1st, (c) 2nd, (d) 3rd impregnation process

초기 공정 개발을 위한 그래파이트 시편은 50 mm × 50 mm × 10 mm의 크기로 준비하였으며, 그래파이트 시편을 액상 퓨란 수지와 에탄올이 무게비 기준 7:3으로 혼합된 용액에 담가 1시간 동안 함침을 진행한 뒤, 대류오븐에서 100°C의 온도에서 3시간 동안 경화하였다. Fig. 4는 각각 (a) 함침전, (b) 1회 함침후, (c) 2회 함침후, (d) 3회 함침후 그래파이트 표면의 현미경 사진이다. 1회 및 2회 함침시까지 그래파이트 표면의 급격한 변화는 확인되지 않으며, 이는 퓨란 수지와 에탄올의 혼합물이 함침된 뒤 경화하는 과정에서 발생하는 증발 등으로 인해 그래파이트의 표면 기공까지 모두 채우지 못하고 내부 기공만을 채운 것으로 판단된다. Fig. 3(d)에서 3회의 함침을 반복적으로 수행하는 경우 표면 기공까지 함침공정을 통해 채워지는 현상을 확인할 수 있다. 다만 3회의 함침을 수행하는 경우 그래파이트 표면에 여분의 퓨란수지가 존재하며 이는 경화공정 이후 혹은 탄화공정 이후 제거될 필요가 있다. 최종적인 탄화 공정은 Tube furnace에서 최대온도 1000°C에서 10시간 동안 진행되었다^[10, 11].

Fig. 5는 함침공정이 진행되지 않은 그래파이트 시편과 함침 공정 후 탄화공정을 마친 그래파이트 시편을 10,000방 스펄지 사포를 이용하여 표면 연마를 수행하고 동일 조명 환경하에서 촬영한 사진으로, 함침공정이 진행되지 않은 그래파이트 시편의 경우 조명의 반사가 선명하지 않으나, 함침공정이 진행된 그래파이트의 경우 조명이 명확하게 반사되는 것을 확인할 수 있어 정성적인 표면 거칠기 향상 효과를 확인할 수 있다. 각각의 시편에 대해 비접촉 3차원 표면측정기(OLS4100, 올림푸스, 일본)를 이용하여 측정된 표면거칠기(Ra)는 일반 그래파이트의 경우 177 nm이며 함침 그래파이트 시편의 경우 71 nm로 함침을 통해 내부 기공율이 감소하

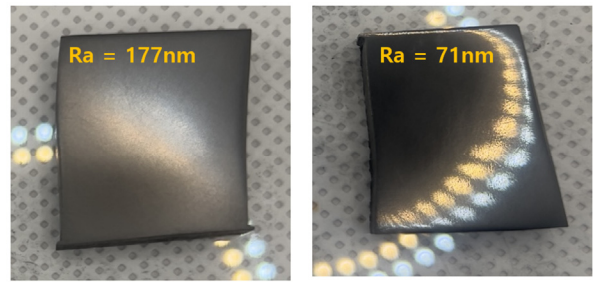


Fig. 5 Pictures of polished graphite surfaces, comparing conventional graphite (Ra = 177 nm) and impregnated-carbonized graphite (Ra = 71 nm), demonstrating improved surface smoothness due to pore filling by impregnation

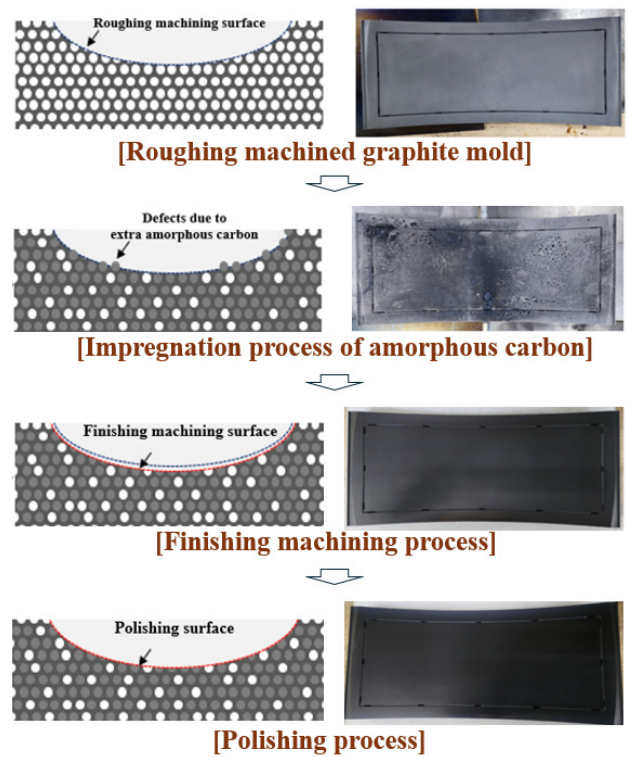


Fig. 6 Pictures and concept of impregnation, finishing machining, and polishing process for smooth surface modification using roughing machining graphite mold

였으며, 이로 인해 연마시 표면거칠기가 향상됨을 확인하였다.

4. 대면적 자유곡면 그래파이트 몰드 표면 개질

HUD용 대면적 자유곡면 글라스 미러용 그래파이트 몰드에 함침 및 탄화공정을 이용한 표면개질 공정의 적용 가능성을 평가하기 위해 355 mm × 170 mm 크기의 하부 그래파이트 몰드에 표면개질 공정을 적용하고 표면 개질 적용여부에 따른 표면특성을 분석하였다. 표면 개질 공정을 적용한 대면적 그래파이트 몰드를 제

작하기 위해 Fig. 6과 같이 황삭 공정이 수행된 그라파이트 몰드에, 퓨란수지와 에탄올이 무게비 7:3으로 혼합된 퓨란 전구체 레진으로 함침 및 경화 공정 후 탄화 공정을 수행하였다. 함침 공정 이후 표면에 존재하는 여분의 퓨란 레진이 탄화공정 이후에도 몰드 표면에 비정질 탄소로 전환되어 지속적으로 남아있는 것을 확인할 수 있으나 이는 후속 정삭 공정을 통해 쉽게 제거됨을 확인할 수 있다. 정삭 공정이 수행된 대면적 그라파이트 몰드는 10,000방 스폰지 사포를 이용한 최종 표면 연마가 진행되었다. 또한 비교를 위해 표면개질이 진행되지 않은 일반적인 그라파이트 기관의 황삭 및 정삭 공정으로 제작된 대면적 그라파이트 몰드 역시 동일한 10,000방 스폰지 사포를 이용한 연마를 수행하였다.

표면 개질 공정이 적용되지 않은 HUD용 그라파이트 몰드와 표면개질이 적용된 몰드를 Fig. 6과 같이 제작하고 이의 표면거칠기를 비교하였다. 대면적 그라파이트 몰드의 표면거칠기를 체계적으로 측정하기 위해 접촉식 광학표면 측정 시스템(UA3P, 파라소닉, 일본)을 이용하여 수평면 중심축을 기준으로 상부 50 mm 위치 25 mm 위치, 중심, 하부 25 mm, 하부 50 mm 위치에서 가로방향으로 측정하여 평균값을 분석하였다. 일반 그라파이트 몰드의 경우 연마전 표면거칠기 316 nm (Ra)에서 연마후 137 nm (Ra)로 개선되었으며, 함침 및 탄화공정으로 표면개질이 수행된 몰드의 경우 연마전 정삭공정으로 가공된 몰드의 표면거칠기가 216 nm (Ra)로 일반 그라파이트 몰드 대비 약간 개선되었으며, 연마후 60.7 nm로 개선되었음을 확인할 수 있다. 이는 표면 개질 과정을 통해 그라파이트 몰드의 기공이 감소하였기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 자동차용 HUD에 적용되는 대면적 자유곡면 유리 미러 제작을 위해, 다공성 그라파이트 몰드의 표면 품위를 향상시키는 함침 및 탄화 기반 표면 개질 공정을 제안하였다. 퓨란 수지와 에탄올을 혼합한 저점도 전구체를 이용하여 그라파이트 내부 기공을 효과적으로 충전하였으며, 반복 함침 후 탄화 공정을 통해 표면 기공 밀도를 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 기존 그라파이트 몰드 대비 연마 후 표면 거칠기가 현저히 개선되어 355 mm × 170 mm 대면적 몰드에서 약 60 nm 수준의 표면 조도를 확보하였다. 비정질 탄소소재 함침 그라파이트 몰드의 경우 표면 조도 향상 뿐 아니라 내구성 향상이 가능할 것으로 추정되며, 개발 몰드를 실제 HUD용 대면적 자유곡면 유리 성형 양산 공정에 적용하여 기존 그라파이트 몰드 대비 자유곡면 미러의 표면 품위 특성 및 몰드 내구성을 분석할 예정이다. 한편 현재의 표면조도는 유리성형을 통해 광학면을 구성하지 않는 HUD용 대면적 자유곡면 유리 성형 공정에 적용할 수 있는 수준이나 유리성형을 통해 광학면을

복제하는 비구면 렌즈 등에는 적용이 어려운 수준이다. 이에 함침 조건 등의 개선을 통해 추가적인 표면조도 향상을 구현하여 비구면 렌즈와 같은 고정밀 광학 부품 유리성형 공정에 표면개질 그라파이트 몰드의 적용을 위한 후속 연구를 계획중이다.

후 기

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원 (KEIT) 연구비지원에 의한 연구입니다(RS-2024-00441990).

References

- [1] Liu, Y. -C., 2003, Effects of Using Head-up Display in Automobile Context on Attention Demand and Driving Performance, *Displays*, 24:4-5 157-165, <https://doi.org/10.1016/j.displa.2004.01.001>.
- [2] Wei, S., Fan, Z., Zhu, Z., Ma, D., 2019, Design of a Head-up Display based on Freeform Reflective Systems for Automotive Applications, *Appl. Opt.*, 58:7 1675-1681, <https://doi.org/10.1364/AO.58.001675>.
- [3] Bark, K., Tran, C., Fujimura, K., Ng-Thow-Hing, V., 2014, Personal Navi: Benefits of an Augmented Reality Navigational Aid Using a See-Thru 3D Volumetric HUD, *Proc. 6th Inter. Conf. Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 1-8, <https://doi.org/10.1145/2667317.2667329>.
- [4] Jing, C., Shang, C., Yu, D., Chen, Y., Zhi, J., 2022, The Impact of Different AR-HUD Virtual Warning Interfaces on the Takeover Performance and Visual Characteristics of Autonomous Vehicles, *Traffic Inj. Prev.*, 23:5 277-282 <https://doi.org/10.1080/15389588.2022.2055752>.
- [5] Kumar, S., Zhong, W., Williamson, J., Kumar, P., Furness, T., Lou, S., Zeng, W., Jiang X., 2025, Design, Fabrication, and Testing of Freeform Mirror-based Head-up Display System, *Optics and Laser Technology*, 186 112653, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.112653>.
- [6] Yang, W., Zhang, Z., Ming, W., Yin, L., Zhang, G., 2022, Study on Shape Deviation and Crack of Ultra-thin Glass Molding Process for Curved Surface, *Ceram. Int.*, 48:5 6767-6779, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.228>.
- [7] Zhou, T., Du, Y., Zhou, J., Chen, Z., Liang, Z., Wang, X., 2018, High Efficiency Fabrication of 3D Curved Glass by Full-motor-driving Precision Molding, *Proc. SPIE 10847, Optical Precision Manufacturing, Testing, and Applications*,

1084712 , <https://doi.org/10.1117/12.2505822>.

- [8] Asgar, M. A., Kim, J., Haq, M. R., Kim, T., Kim, S., 2021, A Comprehensive Review of Micro/Nano Precision Glass Molding Molds and Their Fabrication Methods, *Micromachines*, 12:7 812, <https://doi.org/10.3390/mi12070812>.
- [9] Jeong, Y., Lee, Y., Jeong, D., 2023, Forming Device with Vacuum Forming Unit, Korean Patent 10-2023-0074042, <https://doi.org/10.8080/1020230074042>.
- [10] Badshah, M. A., Kim, J., Yeom, J., Abbas, N., Haq, M. R., Kim, Y., Lu, X., Kim, S., 2021, Glass Nanoimprinted Plasmonic Nanostructure for High Power Laser Stable Surface-enhanced Raman Spectroscopy Substrate, *Appl. Surf. Sci.*, 542 148587, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148587>.
- [11] Jang, H., Haq, R. M., Kim, Y., Kim, J., Oh, P., Ju, J., Kim, S., Lim, J., 2018, Fabrication of Glass Microchannel via Glass Imprinting using a Vitreous Carbon Stamp for Flow Focusing Droplet Generator, *Sensors*, 18:1 83, <https://doi.org/10.3390/s18010083>.



Youngkyu Kim

Research professor in the Department of Computer Science and Engineering, Chung-Ang University. His research interests include design and fabrication of micro/nano structured devices using a carbonized vitreous carbon materials.

E-mail: kykdes@cau.ac.kr



Jongbeom Kim

Master candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University. His research interests include surface modification of graphite mold for glass molded optical components.

E-mail: whdkja401@cau.ac.kr



Young Bok Kim

Researcher in the Intelligent Optical Module Research Center, Korea Photonics Technology Institute. His research interests include design and fabrication of optical lenses.

E-mail: ybkim@kopti.re.kr



Dong Il Lee

Researcher in the DTK Co., Ltd. His research interests the R&D of lens molding processes, as well as the design and manufacturing of roll-to-roll and optical equipment.

E-mail: mrz0529@dibt.co.kr



Dong Yean Jung

Researcher in the DTK Co., Ltd. His research interests include the design and manufacturing of factory automation equipment and optical equipment.

E-mail: dy.jung@dibt.co.kr



Seok-Min Kim

Associate professor in the Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University. His current research interests include design and fabrication of micro/nanostructures for optical biosensors, micro fluidic chips, concentrator photovoltaic system, digital display, LED lighting, and enhanced boiling heat transfer surface.

E-mail: smkim@cau.ac.kr