

투명 발수 반사방지 코팅의 표면 형상 의존성

김기출

목원대학교 신소재화학공학과

Dependence of Surface Morphology of Transparent Hydrophobic Anti-Reflective Coating

Ki-Chul Kim

Department of Advanced Chemical Engineering, Mokwon University

요약 모바일 디스플레이 및 태양전지의 커버글라스에는 반사방지 코팅 및 셀프클리닝과 같은 기능성 코팅이 필요하다. 최근 들어 나방 눈 또는 연꽃 잎과 같은 자연의 기능성 표면을 모사하여 공학적으로 응용하고자하는 많은 연구가 수행되었다. 특히 실리카 나노입자를 이용한 반사방지 기능성 코팅은 빛의 투과를 증가시키며, TiO_2 광촉매 코팅은 셀프클리닝 기능성 필름에 적용되어왔다. 본 연구에서는 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 나노입자의 박막 코팅에 의한 투명 발수 반사방지 코팅을 sol-gel 공정과 dip-coating 공정으로 글라스 기판 위에 제조하였다. 기능성 코팅의 표면형상 의존성을 원자힘현미경, 접촉각 측정 및 UV-visible 분광광도계 분석으로 조사하였다. 그 결과 TiO_2 나노입자의 코팅은 가시광선 영역에서 투과율을 저하시키지 않고 기판인 슬라이드 글라스와 비슷한 수준의 높은 평균 광 투과율을 나타내었다. 또한 7nm $\text{SiO}_2/7$ nm TiO_2 나노입자의 이중층 기능성 코팅은 접촉각 110° 의 투명 발수 표면 특성을 나타내었으며, 가시광선 영역에서 기판인 슬라이드 글라스 보다 2.3% 높은 평균 투과율의 향상을 나타내었다.

Abstract The cover glass of mobile displays and photovoltaic cells needs a functional coating, such as an anti-reflection and self-cleaning coating. Numerous studies have been conducted on the engineering application of biomimetic functional surfaces, such as moth eye and lotus leaf Anti-reflection coatings of silica nanoparticles could enhance the light transmittance. TiO_2 photocatalyst coatings have been applied to self-cleaning functional films. In this study, transparent hydrophobic anti-reflective coatings consisting of thin layers of $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ nanoparticles were fabricated on a slide glass substrate by the sol-gel process and dip-coating process. The dependence of the surface morphology of the functional coatings was investigated by the atomic force microscopy (AFM), contact angle measurement, and UV-visible spectroscopy. It was found that the coating of TiO_2 nanoparticles exhibited a high average transmittance comparable to that of the bare slide glass substrate in the visible light range. The bi-layered functional coating of 7 nm $\text{SiO}_2/7$ nm TiO_2 nanoparticles exhibits a transparent hydrophobic surface with a contact angle of 110° and an improvement of the average transmittance of 2.3% compared to the bare slide glass substrate in the visible light range.

Keywords : anti-reflection, hydrophobic, self-cleaning, surface morphology, transparent

1. 서론

인류는 지구상에 출현한 이후 끊임없이 자연을 관찰

하면서 그 근본원리를 터득하고 응용하여 현대문명의 기반이 되는 많은 기술들을 개발하여왔다. 자연 생태계에는 우리의 상상을 초월하는 많은 기능성 표면들이 존재

본 논문은 미래창조과학부와 한국연구재단에서 지원하는 2017년도 이공분야 기초연구사업(No. 2017R1A2B4012576)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다. This work (Grant No. 2017R1A2B4012576) was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) funded Ministry of Science, ICT and Future Planning of the Korea government.

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

Tel: +82-42-829-7489 email: kckim30@mokwon.ac.kr

Received August 1, 2017

Revised September 13, 2017

Accepted October 13, 2017

Published October 31, 2017

하는데, 특히 산업적 응용 가능성이 높은 반사방지(anti-reflection) 및 자기세정(self-cleaning)과 같은 기능성 표면들에 대하여 많은 연구가 진행되었다 [1-3]. 디스플레이 산업은 반도체 산업과 더불어서 우리나라의 기업들이 세계적인 경쟁력을 확보하고 있는 대표적인 전자산업 분야이다. 디스플레이 관련 기술이 화면의 대형화 및 고화질화의 방향으로 발전하면서 디스플레이 소자의 표면을 보호하면서 보다 선명한 이미지를 가능하게 하는 기능성 반사방지 코팅기술이 중요해졌다 [4]. 또한 스마트폰과 같은 모바일 기기의 경우, 사용자가 빈번하게 손가락으로 디스플레이의 화면을 터치하는 상황이므로 디스플레이 화면이 지문으로 쉽게 오염되지 않도록 방오 기능을 부여하는 것도 매우 중요하다.

현대문명은 막대한 에너지를 소비하는 형태로 발전되었고, 인류가 소비하고 있는 에너지의 대부분은 화석연료에 의존하고 있다. 세계에너지기구 등의 보고에 의하면 화석연료는 에너지원에 따라 다소 차이는 있으나 50년 ~ 200년 이내에 고갈될 것으로 예측하고 있다 [5]. 따라서 현재의 문명생활을 유지하기 위해서는 재생 가능한 대체에너지원이 개발되어야 한다. 화석연료를 대체할 수 있는 재생 가능한 에너지원의 개발은 인류의 생존과 직결된 문제이기 때문에 매우 중요하지만 현재 개발된 기술들을 검토해보면 각각의 기술은 장점과 단점을 모두 가지고 있어서 하나의 기술로 인류가 직면한 에너지 문제를 해결할 수 없는 상황이다. 지구에서 인류가 사용하고 있는 대부분의 에너지는 태양의 핵융합에너지를 기반으로 하고 있고, 우주천문학자들의 관측과 예측에 의하면 태양은 향후 수 십 억년동안 현재와 같은 안정적인 상태를 유지할 것으로 예상되고 있다 [6]. 따라서 태양에서 지구표면으로 끊임없이 유입되고 있는 태양광에너지를 효율적으로 활용하는 기술을 개발하는 것은 인류의 에너지 문제를 해결하는데 있어서 매우 중요하다. 1839년 A. E. Becquerel에 의해 발견된 광기전력 효과(photovoltaic effect)를 이용하는 태양광 발전은 그동안 낮은 효율과 높은 생산단가로 인하여 그 잠재적인 가치를 인정받지 못하였으나, 최근 그리드패리티(grid parity)에 근접하여 신재생에너지원으로서의 가능성을 주목받고 있다 [7]. 한화그룹에서 태양광 사업의 양대 축이었던 한화큐셀과 한화솔라윈이 2015년 “한화큐셀”로 통합된 이후 2016년 말 기준으로 5.7 GW의 셀과 모듈 생산규모를 확보하여 셀 기준으로는 세계 1위, 모듈 기준으로는

세계 톱5 수준의 태양광 회사가 되었다. 태양전지는 태양광을 전기로 변환시키는 장치로서 태양광이 내리쬐는 옥외에 설치된다. 이때 태양전지를 보호하기 위하여 커버글라스를 장착하게 되는데, 커버글라스 표면은 먼지, 새의 분뇨 등으로 오염되기 쉽다. 이러한 커버글라스의 오염은 태양전지에 입사하는 태양광을 차단하여 태양전지의 에너지 변환효율을 저하시키는 원인이 되고 있다. 따라서 태양전지 커버글라스의 표면에 자기세정 기능과 반사방지 기능을 갖는 기능성 코팅을 구현하는 것이 필요하다 [8-10].

본 연구에서는 초발수 특성을 갖는 연꽃 잎의 표면돌기 구조 및 완전 반사방지 특성을 갖는 나방 눈 표면돌기 모양을 모사하여 Fig. 1에 나타난 것처럼 투명하면서 발수기능을 갖는 반사방지 코팅을 Sol-Gel 공정으로 구현하였다. (표면구조 및 나노입자의 모양을 다소 과장하여 표현하였다.) 특히 실리카 나노입자의 크기를 조절하여 투명 발수 반사방지 코팅의 표면형상을 조절하였고, 표면형상에 따른 발수기능과 반사방지 기능성의 변화를 조사하였다.

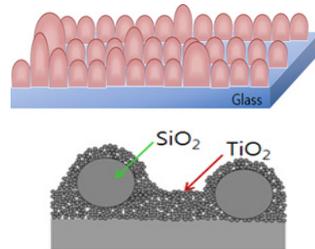


Fig. 1. Schematic diagram of transparent hydrophobic surface of biomimetic, which is consisted with the bi-layer coating of SiO₂/TiO₂ nanoparticles.

2. 실험방법

실리카 나노입자는 바이오분야의 약물전달 시스템, 바이오물질 표지 및 분리, 반사방지 코팅, 도료 등 다양한 분야에 응용되고 있어서 많은 연구가 이루어지고 있다 [11, 12]. 본 연구에서는 스토버(Stöber)법을 기반으로 지름이 약 7 nm, 30 nm, 100 nm, 150 nm 크기를 갖는 실리카 나노입자 졸을 합성하였는데, 실험에 사용된 시약은 TEOS(TetraEthylOrthoSilicate, 삼천, 95%), 에탄올(Ethyl Alcohol, 삼천, 94.5%), 암모니아수(ammonium hydroxide solution 28%, Sigma- Aldrich),

2-propanol(삼천, 99.5%)과 초순수 제조 장치로 얻은 정제된 증류수를 사용하였다. 크기가 다른 실리카 나노입자 졸의 제조방법은 TEOS와 암모니아수의 함량을 조절하여 합성하였다 [13, 14]. 이산화티탄(TiO_2)은 광화학적으로 안정하고 높은 산화력을 갖고 있으며, UV가 조사되면 유기물질을 CO_2 나 H_2O 로 분해시키는 기능성을 가지고 있어서 환경정화용 촉매 및 셀프 클리닝 기능성 코팅에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서 TiO_2 나노입자 졸의 합성에 사용된 시약은 TTIP (Titanium Tetra IsoPropoxide, Sigma-Aldrich, 97%), 2-propanol(삼천, 99.5%), DEA (DiEthanolAmine, Sigma-Aldrich, 99%)와 정제된 증류수를 사용하였다. TiO_2 나노입자 졸의 합성은 TTIP 14.21g, 2-propanol 0.12g, DEA 2.25g, 물 0.9g을 섞은 다음 27 °C에서 3시간 동안 교반하였다 [14, 15]. 합성된 SiO_2 나노입자 졸과 TiO_2 나노입자 졸을 24시간 동안 숙성한 다음, spin-coating 및 dip-coating 공정을 적용하여 세척된 슬라이드 기판 위에 SiO_2 , TiO_2 , $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 의 구조를 갖는 시료를 코팅하였다. dip-coating 공정에서 기판의 인상속도는 1mm/s이었다. TiO_2 졸을 코팅한 다음 시료는 상온, 공기 중에서 48시간 동안 건조하였고, 500 °C에서 30분 동안 열처리하여 rutile상을 갖도록 하였다 [14].

세척된 슬라이드 기판 위에 코팅된 발수 및 반사방지 기능성 코팅 필름의 표면형상 (morphology) 특성은 전계방출 주사전자현미경 (FE-SEM, FEI, Sirion)과 원자힘현미경(AFM, Park System, XE-100)으로 분석하였으며, 코팅된 필름의 광학적 특성은 UV-visible spectrophotometer로 분석하였다. 발수 특성은 Contact Angle Analyzer (SEO Co. Ltd, Phoenix 300 Plus)로 접촉각을 측정하여 평가하였다. 메탄올과 1H,1H,2H,2H-Perfluorodecyltrimethoxysilane(Sigma-Aldrich, 98%)의 희석용액을 dip-coating 공정으로 코팅하여 발수기능을 부여하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Sol-Gel 공정으로 합성된 실리카 나노입자는 합성에 사용된 TEOS와 암모니아수의 혼합비율에 따라 다른 크기를 갖게 되는데, 본 연구에서 합성된 실리카 나노입자의 크기는 Fig. 2에 나타낸 것처럼 평균적으로 약 7 nm, 30 nm, 100 nm, 150 nm 크기를 나타내었다. 실리카 나

노입자의 크기를 확인하기 위한 FE-SEM 분석의 시료는 세척된 슬라이드 글라스 위에 실리카 나노입자 졸을 4,000 rpm의 스핀코팅 공정으로 준비하였다.

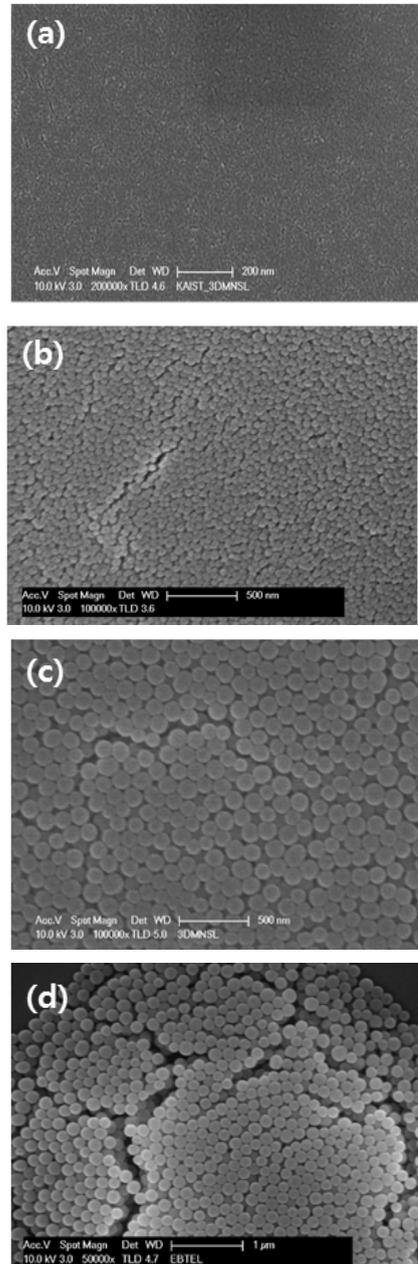


Fig. 2. FE-SEM images of the SiO_2 nanoparticles with the average diameter of (a) 7 nm, (b) 30 nm, (c) 100 nm, and (d) 150 nm, which were coated by spin coating process at 4,000 rpm on cleaned slide glass.

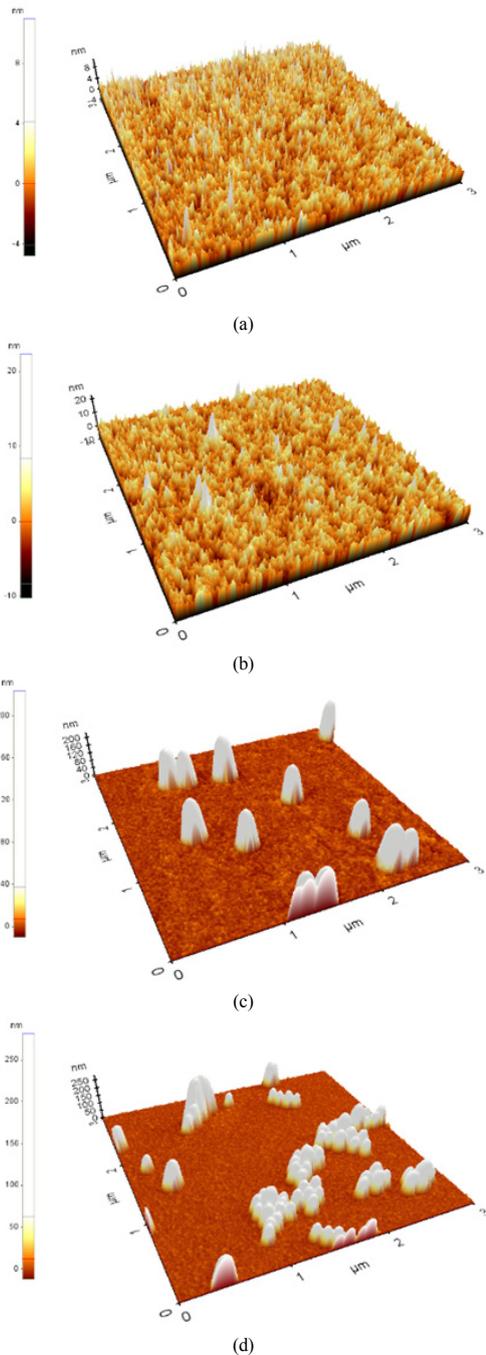


Fig. 3. AFM images of the coating surface of bi-layer $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ NPs with (a) 7nm $\text{SiO}_2/7\text{nm TiO}_2$ NPs, (b) 30nm $\text{SiO}_2/7\text{nm TiO}_2$ NPs, (c) 100nm $\text{SiO}_2/7\text{nm TiO}_2$ NPs, and (d) 150nm $\text{SiO}_2/7\text{nm TiO}_2$ NPs, which were coated by dip-coating process with a withdrawal speed of 1mm/sec on cleaned slide glass and analyzed with the non-contact mode.

자연에 존재하는 발수기능의 연꽃 잎의 표면 및 반사 방지 기능의 나방 눈에는 주기적인 나노구조물이 형성되어 있고, 나노구조물의 주기성과 크기 및 높이가 발수 및 반사방지 기능성에 매우 중요하게 작용한다 [1, 16]. 투명 발수 반사방지 기능성 코팅의 표면형상 의존성을 조사하기 위하여 다양한 조합의 기능성 코팅을 실시하였다. 세척된 슬라이드 글라스 위에 각각 다른 크기를 갖는 실리카 나노입자와 이산화티탄 나노입자의 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 이중층(bi-layer)을 코팅하고, 발수기능을 부여한 후에 필름 표면의 거칠기를 AFM으로 분석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 크기가 다른 실리카 나노입자와 7 nm 크기를 갖는 이산화티탄 나노입자의 이중층 기능성 코팅 7 nm, 30 nm, 100 nm, 150 nm $\text{SiO}_2/7\text{ nm TiO}_2$ 필름의 평균 표면 거칠기는 각각 1.00 nm, 2.13 nm, 14.76 nm, 21.77 nm로 분석되었다. 고체 표면의 젖음성(wetability)은 물방울이 고체표면에 놓여있을 때 고체-액체-기체 간에 작용하는 힘의 열역학적인 평형상태의 결과인 Young의 공식으로 표현되며 [1], 접촉각의 측정으로 확인할 수 있다. 즉 물방울이 에너지를 최소화 시킬 수 있는 상태에 따라 구조물 위에서의 물방울의 모양이 결정된다. Fig. 3에 나타난 원자힘현미경 분석 결과에 의하면 150 nm $\text{SiO}_2/7\text{ nm TiO}_2$ 시료의 표면요철이 가장 크기 때문에 접촉각의 크기도 가장 클 것으로 예상할 수 있다 [1].

대표적인 광촉매 물질인 이산화티탄의 자기세정 기능성은 표면이 초친수성(superhydrophilicity)을 갖거나 초발수성(superhydrophobicity)을 가질 때 효과적으로 동작한다 [2, 14]. 하지만 초친수성 표면의 경우, 물기가 완전히 증발되기 이전에는 이산화티탄 코팅면에 포함된 습기가 기판과 이산화티탄 코팅간의 접착력 약화를 유도하여 이산화티탄 코팅층이 쉽게 벗겨지는 원인을 제공한다. 따라서 이산화티탄 코팅 표면이 초발수성을 가질 때 광촉매효과가 장시간 유지될 수 있다 [14]. 크기가 다른 실리카 나노입자와 7 nm 크기를 갖는 이산화티탄 나노입자의 이중층 기능성 코팅 7 nm, 30 nm, 100 nm, 150 nm $\text{SiO}_2/7\text{ nm TiO}_2$ 필름의 접촉각 특성을 분석하였고, 그 측정결과를 Fig. 4에 나타내었다. 접촉각은 각각 110.3° , 110.7° , 110.4° 및 121.2° 로 분석되어 모든 시료가 발수특성을 나타내었다. 특히 원자힘현미경 분석에서 가장 큰 표면요철 특성을 나타내었던 150 nm $\text{SiO}_2/7\text{ nm TiO}_2$ 시료의 발수특성이 가장 좋은 것으로 분석되었다.

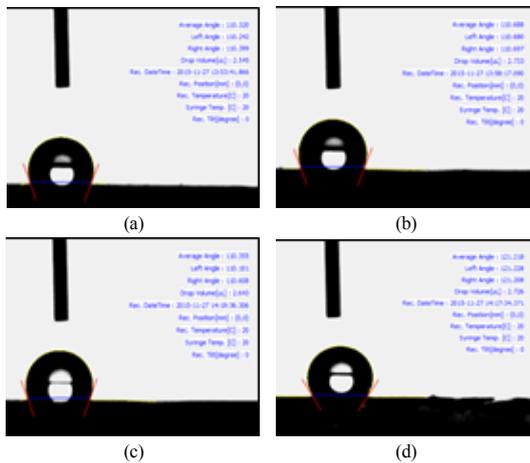


Fig. 4. Contact Angle(CA) measurement images of the coating surface of bi-layer $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ NPs with (a) 7nm $\text{SiO}_2/7\text{nm TiO}_2$ NPs, (b) 30nm $\text{SiO}_2/7\text{nm TiO}_2$ NPs, (c) 100nm $\text{SiO}_2/7\text{nm TiO}_2$ NPs, and (d) 150nm $\text{SiO}_2/7\text{nm TiO}_2$ NPs, which were coated by dip-coating process with a withdrawal speed of 1mm/sec on cleaned slide glass. The measured CA values are 110.3°, 110.7°, 110.4°, and 121.2°, respectively.

이산화티탄 코팅은 우수한 광촉매 기능을 바탕으로 우수한 자기세정 효과를 나타내지만 이산화티탄의 함량이 증가할수록 빛의 투과율이 급격히 떨어진다 [9, 10]. Titanium n-butoxide (n-BuTi)로 합성된 이산화티탄 코팅은 필름의 두께가 8 nm로 매우 얇음에도 파장 500 nm에서 투과율은 85.0%(기판은 91.1%)로 분석되었으며, 이산화티탄 필름의 두께가 두꺼워질수록 투과율은 급격히 낮아졌다 [10]. Titanium Acetylacetonate ($\text{TiO}(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)_2$)를 분해하여 이산화티탄 필름을 제조한 경우, 이산화티탄의 함량이 20% 미만일 경우에 비교적 매끈한 표면형상을 가지며 투과율은 가시광선 영역에서 기판의 투과율보다 평균 2~3%정도 낮았다 [9]. Fig. 5에서 볼 수 있는 것처럼 본 연구에서 제조된 이산화티탄 필름의 경우, 가시광선 영역(400 nm ~ 800 nm)에서의 평균 투과율은 89.6%로 분석되어 슬라이드 기판의 평균 투과율 90.0%와 거의 비슷하게 분석되었고, 광촉매 기능도 잘 구현되었다 [14]. 모바일 디스플레이의 커버글라스 또는 태양전지의 커버글라스의 응용에 있어서 빛의 반사를 최소화시키는 반사방지 기능성과 커버글라스 표면이 쉽게 오염되지 않는 방오 기능 및 자기세정 기능의 동시 구현은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 실

리카 나노입자 졸과 이산화티탄 나노입자 졸을 이용하여 우수한 반사방지 기능과 자기세정 기능의 동시 구현성과, 기능성 코팅의 표면형상이 발수 특성과 반사방지 특성에 미치는 영향을 조사하였다. UV-visible 분광광도계로 분석된 기능성 코팅의 광학적 특성을 Fig. 5에 나타내었다. 크기가 다른 실리카 나노입자와 7 nm 크기를 갖는 이산화티탄 나노입자의 이중층 기능성 코팅 7 nm, 30 nm, 100 nm, 150 nm $\text{SiO}_2/7\text{nm TiO}_2$ 필름의 가시광선 영역(400 nm ~ 800 nm)에서 평균 투과율은 92.3%, 91.1%, 89.9%, 89.9%로 분석되었다. 특히 7 nm $\text{SiO}_2/7\text{nm TiO}_2$ 필름의 경우, 슬라이드 글라스의 평균 투과율보다 2.3% 높았다.

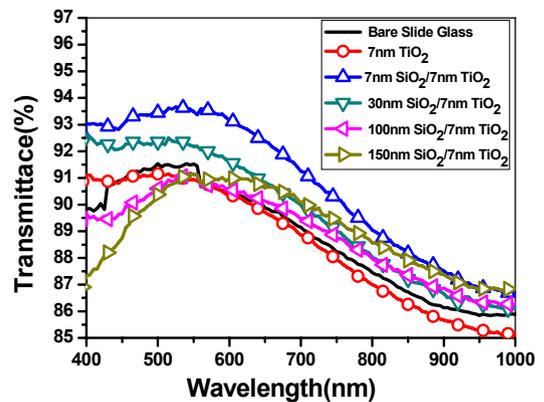


Fig. 5. Transmittance curves of the bare slide glass, TiO_2 NPs coating, $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ NPs bi-layer coatings with a hydrophobic surface, which were coated by dip-coating process on cleaned slide glass.

4. 결론

본 연구에서는 sol-gel 공정으로 다양한 크기를 갖는 실리카 나노입자 졸 및 7 nm 크기를 갖는 이산화티탄 나노입자 졸을 합성하고, 실리카 나노입자/이산화티탄 나노입자의 이중층 구조의 필름을 dip-coating 공정으로 제조하였다. 필름의 표면형상에 따른 기능성 코팅의 발수특성 및 반사방지 특성을 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 합성된 이산화티탄 나노입자 졸을 이용한 기능성 코팅의 경우, 광학적 특성의 열화를 유도하지 않았

고, 광촉매 기능도 잘 구현하였다.

2. SiO₂/TiO₂ 이중층 구조의 기능성 코팅의 경우, 접촉각 110° 이상으로 발수 표면특성을 나타내었으며, 기능성 코팅의 표면오염이 증가하면 발수특성도 향상되는 것으로 나타났다.
3. 발수 기능과 반사방지 기능의 동시 구현성을 검토한 결과 7 nm SiO₂/7 nm TiO₂ 필름의 접촉각은 110.3°로 측정되어 우수한 발수 특성을 나타내었으며, 가시광선 영역에서의 평균 투과율은 92.3%로 슬라이드 글라스의 평균 투과율보다 2.3% 높게 분석되어, 효과적인 발수 기능 및 반사방지 코팅인 것으로 분석되었다.

References

- [1] H. Lim, J. Park, and W. Kim, "Micro/nanostructured Superhydrophobic Surface", *Elastomers and Composites* Vol. 44, No. 3, pp. 244-251, 2009.
- [2] H. Zhang, D. Fan, T. Yu, C. Wang, "Characterization of anti-reflective and self-cleaning SiO₂-TiO₂ composite film", *Journal of Sol-Gel Science Technology*, Vol. 66, pp. 274-279, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10971-013-3004-y>
- [3] M. Faustini, L. Nicole, C. Boissière, P. Innocenzi, C. Sanchez, D. Grosso, "Hydrophobic, Antireflective, Self-Cleaning, and Antifogging Sol-Gel Coatings: An Example of Multifunctional Nanostructured Materials for Photovoltaic Cells" *Chemistry of Materials*, Vol. 22, pp. 4406-4413, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1021/cm100937e>
- [4] S-D. Wang, Y-Y Shu, "Superhydrophobic anti-reflective coating with high transmittance", *Journal of Coating Technology Research*, Vol. 10, No. 4, pp. 527-535, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11998-012-9468-9>
- [5] Korea Energy Management Corporation, "2015 Korea Energy Handbook", pp. 3-10, 2015.
- [6] P. G. Hewitt, S. Lyons, J. Suchocki, J. Yeh, "Conceptual Integrated Science", 2nd Ed., PEARSON, pp. 624-680, 2013.
- [7] KEPCO Economy & Management Research Institute, "KEMRI REVIEW", Vol. 24, pp. 1-10, 2016.
- [8] Ö. Kesmez, H. E. Çamurlu, E. Burunkaya, E. Arpaç, "Sol-gel preparation and characterization of anti-reflective and self-cleaning SiO₂-TiO₂ double-layer nanometric films", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 93, pp. 1833-1839, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.06.022>
- [9] A. Nakajima, K. Hashimoto, T. Watanabe, "Transparent Superhydrophobic Thin Films with Self-Cleaning Properties" *Langmuir*, Vol. 16, pp. 7044-7047, 2000.
DOI: <https://doi.org/10.1021/la000155k>
- [10] R. Prado, G. Beobide, A. Marcaide, J. Goikoetxea, and A. Aranzabe, "Development of multifunctional sol-gel coatings: Anti-reflection coatings with enhanced self-cleaning capacity" *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 94, pp. 1081-1088, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.02.031>
- [11] P. Peng, Y. Su, Y. Zhong, C. Fan, S. Lee, Y. He, "Silicon Nanomaterials Platform for Bioimaging, Biosensing, and Cancer Therapy", *Accounts of Chemical Research*, Vol. 47, No. 2, pp. 612-623, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ar400221g>
- [12] J. Moghal, J. Kobler, J. Sauer, J. Best, M. Gardener, A. A. R. Watt, and G. Wakefield, "High-Performance, Single-Layer Antireflective Optical Coatings Comprising Mesoporous Silica Nanoparticles", *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 4, pp. 854-859, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1021/am201494m>
- [13] W. Glaubitt, P. Löbmann, "Anti-soiling effect of porous SiO₂ coatings prepared by sol-gel processing", *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, Vol. 59, pp. 239-244, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10971-011-2489-5>
- [14] Y-A. Noh, K-C. Kim, "Transparent Hydrophobic Anti-Reflection Coating with SiO₂/TiO₂ Thin Layers", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 18, No. 3, pp. 1-6, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.3.1>
- [15] A. Shokuhfar, M. Alzamani, E. Eghdam, M. Karimi, S. Mastali, "SiO₂ - TiO₂ Nanostructure Films on Windshields Prepared by Sol-Gel Dip-Coating Technique for Self-Cleaning and Photocatalytic Applications", *Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 2, pp. 16-21, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.5923/j.nn.20120201.04>
- [16] N. Yamada, O. N. Kim, T. Tokimitsu, Y. Nakai, H. Masuda, "Optimization of anti-reflection moth-eye structures for use in crystalline silicon solar cells", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 19, No. 2, pp. 134-140, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1002/ppp.994>

김기출(Ki-Chul Kim)

[중심회원]



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

<관심분야>

기능성 나노소재, 에너지관련 소재, 기능성 박막