

# 태양광 모듈 오염 방지를 위한 발수 코팅 물질에 대한 연구

박영아, 정다연, 기현철 

한국광기술원 AI에너지연구센터

## Research on Water-Repellent Coating Materials to Prevent Solar Module Pollution

Young-A Park, Da Yeon Jung, and Hyun Chul Ki

AI Energy Research Center, Korea Photonics Technology Institute, Gwang-ju 61007, Korea

(Received December 13, 2023; Revised December 19, 2023; Accepted December 22, 2023)

**Abstract:** Currently, the most developed new energy source is solar energy. Because solar power is installed outside, it is exposed to many pollutants. Pollutants are causing the characteristics of solar energy to deteriorate. Therefore, this study aims to develop a water-repellent coating to prevent contamination of solar modules. Silica and Titania materials are mainly used as water-repellent coating materials. In this study, it was based on silica and the contact angle characteristics were measured according to the change in the amount of silica and ammonia water added and the number of coatings. As a result of the measurement, it was confirmed that the contact angle was more than 60 degrees when 0.5 mol of TEOS was added to 50 mL and 0.15 M when 1 mL of ammonia water was added to 296.47 ml of distilled water. And it was confirmed that the contact angle improved when the number of coatings was applied twice. A water-repellent coating material was applied to low iron tempered glass used to protect dye-sensitized solar cell modules. The characteristics of the module were measured after spraying DI-Water on low-emission tempered glass with a water-repellent coating. As a result of the measurement, the efficiency of the module without application, the efficiency of the module coated once, and the module coated twice were 4.87%, 4.90%, and 4.91%, respectively. It was confirmed that the efficiency of the module increased by applying water-repellent coating. As a result of this study, it is determined that the water-repellent coating material will help improve solar power generation efficiency and lifespan by being self-cleaning and non-reflective.

**Keywords:** Solar cell, Water-repellent coating, DSSC (dye-sensitized solar cell module), TEOS, Contact angle

### 1. 서론

화석연료의 사용량을 줄이기 위하여 신재생에너지에 대한 개발이 집중되고 있으며, 현재까지 신재생에너지원에서 보급 및 실제 발전원으로 태양전지를 활용한 태양광 발전이 주를 이루고 있다. 이러한 태양전지는 옥외에 설치되

고 있으며, 옥외 설치의 경우에 비, 미세먼지, 새의 배설물 등의 오염물로 태양광 모듈 표면이 쉽게 오염되고 있다. 이러한 오염원에 의해서 태양광 모듈의 태양전지에 입사되는 태양광을 차단함으로써 태양전지의 광전 변환 효율을 감소시킴으로써 태양 발전의 발전량을 저하시키는 원인이 될 수 있다. 또한 오염원에 의하여 태양전지의 전자 흐름을 방해하는 요소로써 태양전지 수명을 단축시킬 수 있는 환경적 요인이 될 수 있다.

따라서 태양전지를 보호하고 있는 커버 글라스나 저철분 강화유리 표면의 오염원을 효과적으로 제거하기 위한 발수 코팅 물질이 적용된 기능성 코팅 소재에 대한 연구가

✉ Hyun Chul Ki; [kihc@kopti.re.kr](mailto:kihc@kopti.re.kr)

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

진행되고 있다 [1-3]. 또한 발수 코팅 물질을 태양광에 적용하기 위해서는 발수 코팅 기능뿐만 아니라 반사 방지 기능도 포함되어야 한다. 태양전지의 반사를 최소화시키기 위한 반사 코팅에 대한 연구도 진행되어 오고 있다. 반사 코팅을 구현하기 위하여 다층박막을 이용한 반사 코팅 [4,5], Sol-Gel법을 활용한 실리카 공정 [6,7], 나노 구조를 주기적으로 한 graded-index 반사 방지 코팅 [8,9] 등 다양한 방법으로 진행되고 있다.

태양전지 표면의 오염 방지를 위한 발수 코팅 물질로 광촉매 효과를 나타내는  $\text{TiO}_2$  필름과 셀프 클리닝 기능과 무반사 효과가 있는 실리카를 이용하는 방법이 효과적이라고 알려져 있다. 또한 태양전지의 경우 대면적이고 저가의 공정이 필요하기 때문에 장비의 의존성이 낮으며 대면적 코팅이 가능한 Sol-Gel [10]법이 주로 활용되고 있다.

본 연구에서는 Sol-Gel법을 이용하여 실리카 나노 입자를 합성하고, 주로 투입되는 실리카 물질과 촉매로 사용되는 암모니아수를 함량을 변화시키면서 유리표면의 접촉각을 측정하여 발수 코팅 현상을 확인하고, 발수 코팅 물질의 코팅 횟수에 따른 변화를 확인하였다. 그리고 최적의 발수 코팅 물질을 태양전지에 적용하기 위하여 염료감응형 태양전지 모듈을 제작하였고, 염료감응형 태양전지 모듈에 적용되는 보호 유리에 발수 코팅 물질을 적용하여 태양전지의 발전 효율의 변화를 확인하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 발수 코팅 물질 합성 및 코팅

현재 널리 사용되는 실리카 나노 입자의 합성은 스토버법(Stober) [11]이다. 이 방법은 실리카 전구체인 테트라에틸 오르소실리케이트(tetraethyl orthosilicate, TEOS)가 알칼리성 촉매를 첨가한 수성-알칼리성 용매에서 가수분해되면서 실리카 나노 입자가 형성된다. 여기에서 촉매로서 암모니아수( $\text{NH}_3$ ), 수산화나트륨( $\text{NaOH}$ ) 등을 사용한다.

실리카 기반의 발수 코팅 물질을 합성하기 위하여 사용된 시약은 TEOS (tetraEthyl orthoSilicate, 대정, 95%), 에탄올(ethyl alcohol, Sigma Aldrich, 95%), 암모니아수(ammonium hydroxide solution 28%, 덕산), 발수 코팅 물질의 코팅 정도를 조절하기 위하여 1-Methoxy-2-Propanol (Sigma Aldrich)와 D.I water을 사용하였다.

실리카 나노 입자의 합성 방법은 TEOS (1 mol) 50 mL, 증류수 148.2 mL에 1 mL을 첨가한 0.1 M 암모니아수 21 mL, 1-Methoxy-2-Propanol을 180 mL를 3시간 교반을

진행하고, D.I water 175 mL를 첨가, 30분 후 1-Methoxy-2-Propanol을 620 mL를 첨가 후 24시간 숙성 공정을 기본으로 진행하였다. 기본 합성 방법에서 TEOS와 암모니아수의 최적의 합성 조건을 도출하기 위하여 TEOS의 첨가량을 25 mL, 35 mL, 75 mL로 변화시켰으며 암모니아수의 첨가량은 0.1 M로 고정하여 진행하였다. 암모니아수의 경우는 증류수 296.47 mL에 1 mL을 첨가한 0.05 M, 증류수 211.76 mL에 1 mL 첨가한 0.07 M, 증류수 98.82 mL에 1 mL을 첨가한 0.15 M을 21 mL로 TEOS는 1 mol 50 mL로 고정하여 진행하였다.

합성된 실리카 나노 입자를 dip coating 공정을 적용하여 슬라이드 기판 위에 코팅을 진행하였다. 슬라이드 기판은 아세톤, 에탄올, D.I water 순으로 5분간 초음파 세정 후  $120^\circ\text{C}$ 에서 10분간 건조를 진행하였다. Dip coating 공정에서의 기판 상승 속도는 합성물질의 점도를 확인하여 0.8 mm/s로 진행하였다. 코팅된 시료는 상온에서 48시간 건조하였고,  $120^\circ\text{C}$ 에서 2시간 열처리를 진행하였다. 코팅된 기판의 발수 특성은 접촉각 측정기(contact angle analyzer, SEO Co, LTD, Phoenix 300)를 활용하여 접촉각을 측정하여 분석하였다.

또한, 발수물질의 코팅 횟수에 따른 특성을 확인하기 위하여 코팅을 1회, 2회로 진행하였고, 접촉각을 측정하여 분석하였다.

### 2.2 발수물질의 태양전지 적용

합성된 발수물질을 태양전지 적용을 위하여 염료감응형 태양전지 모듈을 제작하여 적용하였다. 염료감응형 태양전지 모듈은  $150 \times 150$  mm로 자체 제작하였고, 굴절률 보정을 위한 충진재를 적용하였고 모듈 보호를 위한 저철분 강화유리 3.2 mm 두께를 적용하였다. 저철분 강화유리에 접촉각 특성이 우수한 합성물질을 위에서 설명한 동일한 실험 방법으로 진행하였다. 발수 코팅 효과를 확인하기 위하여 D.I water을 스프레이로 분사하여 태양전지의 표면을 오염시키는 환경을 구현하였다. 이때 사용된 염료감응형 태양전지 모듈은 동일한 모듈을 이용하였고, 각각의 시료는 저철분강화유리/충진필름/염료감응형태양전지/충진필름/저철분강화유리 구조 시료(S0), S0와 동일한 구조에 발수 코팅 물질 미적용(S1), 발수물질 1회 코팅(S2), 발수물질 2회 코팅(S3)을 준비하여 진행하였다. Solar simulator [(주)맥사이언스]을 이용하여 염료감응형 태양전지 모듈의 특성 변화를 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

합성된 발수물질의 발수 특성 분석을 위하여 접촉각을 측정하였고 기본 합성의 경우의 측정 결과를 그림 1에 나타내었다. 기본 합성의 경우 1회 코팅 시 48.4°, 2회 코팅 시 56.12°의 특성을 나타내었다. 그리고 TEOS와 암모니아수의 첨가량 변화, 코팅 횟수에 따른 결과를 표 1에 나타내었다. 그림 2는 TEOS 첨가량 변화에 따른 2회 코팅 시의 접촉각 측정 결과이며 그림 3은 암모니아수 첨가량 변화에 따른 2회 코팅시 접촉각 측정 결과이다.

TEOS의 경우는 접촉각이 첨가량이 증가함에 따라 접촉각이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 촉매로 사용되는 암모니아수가 TEOS가 증가함에 따라 촉매의 역할을 할 수 없게 됨에 따라 TEOS의 발수 코팅 효과가 감소하는 것으로 판단된다. 코팅 횟수가 증가함에 따라 접촉각은 향상되는 것을 확인할 수 있었으며, TEOS 0.5 mol을 투입하였을 때 1회 코팅 시 52.19°, 2회 코팅 시 66.88°의 특성을 나타내어 발수표면(hydrophobic surface)을 가지고 있다고 판단된다 [2,12].

촉매인 암모니아수 첨가량 변화의 경우는 첨가량과 코팅 횟수가 증가함에 따라 접촉각 특성이 증가하는 것을 확

인할 수 있었다. 이러한 결과는 촉매인 암모니아수가 증가함에 따라 TEOS의 발수 코팅 특성을 향상시키는 것으로 판단되며, 암모니아수 0.15 M을 첨가했을 때 1회 코팅 시 52.83°, 2회 코팅 시 62.06°의 특성을 나타냈으며 이 또한 발수표면을 가지고 있다고 판단할 수 있다.

접촉각 분석 결과 최적의 합성은 TEOS 0.5 mol, 암모니아수 0.1 M을 첨가하였을 때로 분석되었으며, 코팅 횟수는 증가함에 따라 접촉각은 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 코팅 횟수의 경우는 3회 코팅은 진행하지 못하였으나, 코팅 막의 두께가 두꺼워질수록 유리기판과 접착력이 떨어질 수 있는 것을 육안으로 확인할 수 있었다.

최적의 발수 코팅 합성물질의 태양전지 효율의 영향을 확인하기 위하여 염료감응형 태양전지 모듈에 적용하였다. 염료감응형 태양전지 모듈을 자체적으로 제작하였으며, 유효면적 100 cm<sup>2</sup>로 측정되었다.

저철분강화유리/충진필름/염료감응형태양전지/충진필름/저철분강화유리 구조로 창호형에 적용한 태양광 모듈 구조로 제작하였다. 상판에 발수 코팅 물질을 적용하지 않는 시료(S0), S1과 동일한 구조에 D.I water 분사(S1), 발수 코팅 물질 1회 코팅 후 D.I water 분사(S2), 발수물질 2회 코팅 후 D.I water 분사(S3)를 준비하여 진행하였다.

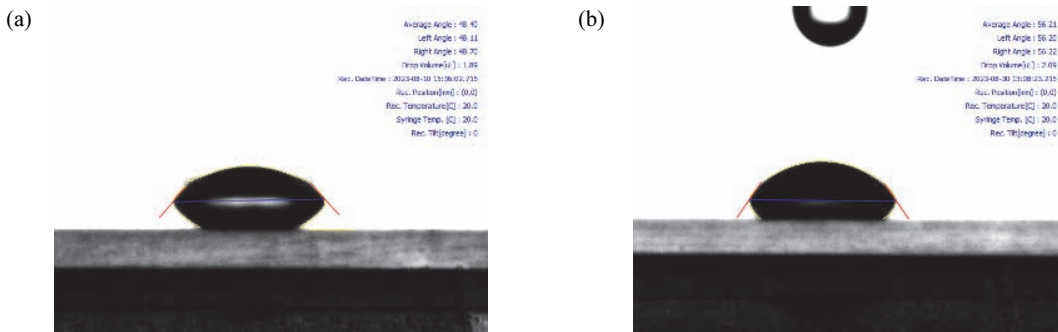
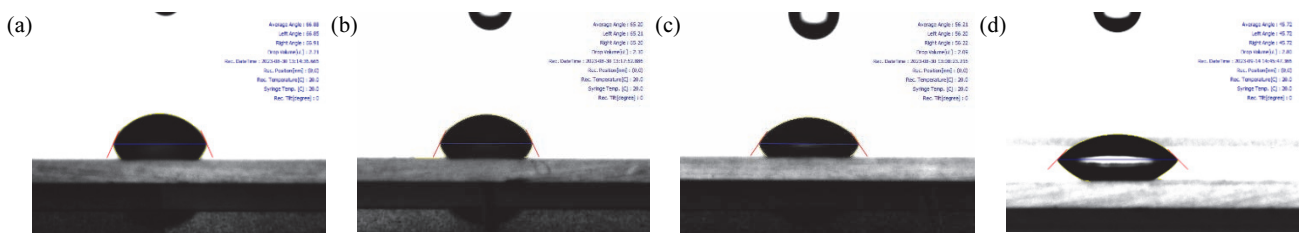


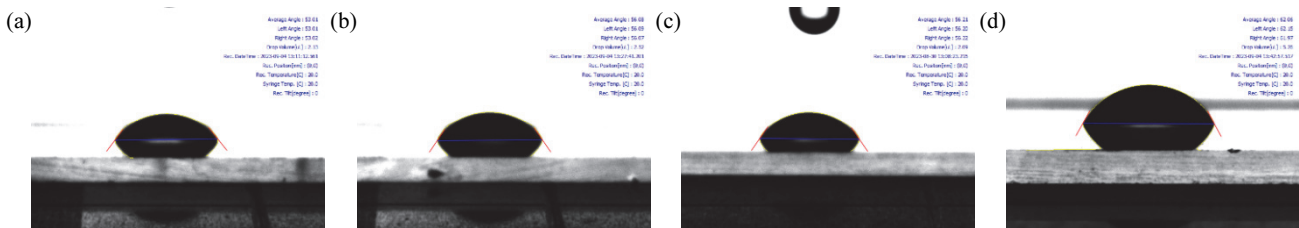
Fig. 1. Contact angle characteristics of basic synthesis (a) one-time coating and (b) two-time coating.

Table 1. Contact angle results according to change in addition amount and number of coatings.

TEOS (mL)	Ammonium (M@21mL)	Contact angle		TEOS (mL)	Ammonium (M@21mL)	Contact angle	
		1 time	2 time			1 time	2 time
25 mL	0.1 M	52.19°	66.88°	50 mL	0.05 M	48.43°	53.01°
35 mL		52.29°	65.2°		0.07 M	46.84°	56.08°
50 mL		48.4°	56.21°		0.1 M	48.4°	56.21°
75 mL		35.05°	45.72°		0.15 M	52.83°	62.06°



**Fig. 2.** Contact angle results of a glass substrate coated twice with a water-repellent coating material according to a fixed amount of ammonia water of 0.1 M and changes in the amount of TEOS added: (a) 25 mL, (b) 35 mL, (c) 50 mL, and (d) 75 mL.



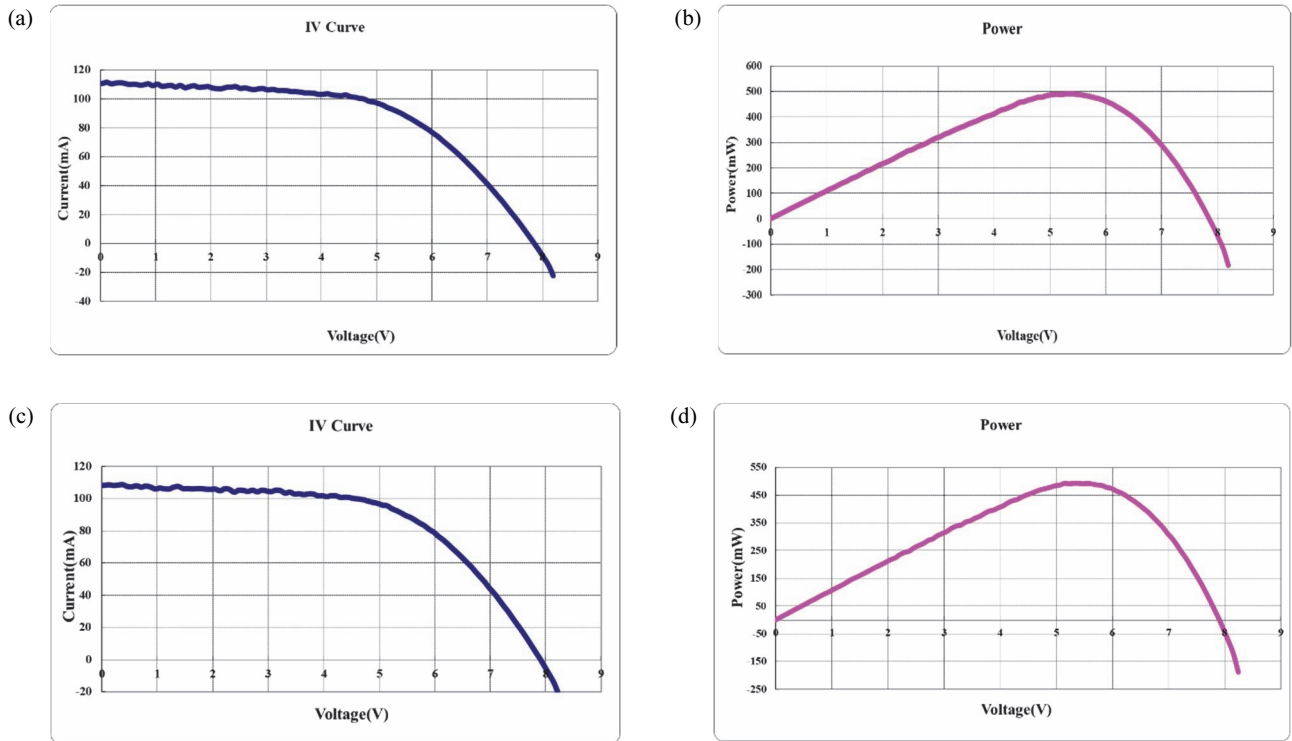
**Fig. 3.** Contact angle results of a glass substrate coated twice with water-repellent coating material according to the change in the amount of ammonia water with a fixed amount of 50 ml of TEOS added: (a) 0.05 M, (b) 0.07 M, (c) 0.1 M, and (d) 0.15 M.

**Table 2.** I-V characteristic results of dye-sensitized solar modules with or without water-repellent coating applied: S0 does not apply water-repellent coating, S1 D.I water sprays on a substrate without water-repellent coating, and S2 and S3 D.I water spray on a substrate coated with water-repellent coating 2 and 3 times, respectively.

Items	Unit	Result			
		S0	S1	S2	S3
$V_{oc}$	V	7.85	7.84	7.85	7.90
$I_{sc}$	mA	108.65	108.51	110.68	108.39
$J_{sc}$	mA/cm <sup>2</sup>	1.087	1.085	1.107	1.084
Fill factor	%	57.78	57.29	56.43	57.35
$I_{max}$	mA	93.409	89.595	91.424	92.551
$V_{max}$	V	5.281	5.441	5.365	5.313
$P_{max}$	mW	493.292	487.486	490.489	491.724
Efficiency	%	4.932	4.874	4.904	4.917
Shunt res.	Ohm	779.533	691.12	683.519	725.841
Series res.	Ohm	19.732	20.266	20.301	20.109

태양광 모듈의 전압-전류 특성을 측정한 결과를 표 2에 나타내었다. 그림 4는 발수 코팅 1회와 2회의 전압-전류 특성 곡선을 나타내었다. 발수 코팅을 적용하지 않았을 때의 초기 모듈의 광전 변환 효율은 4.93%이며, D.I water 분사한 모듈과 발수 코팅을 1회, 2회 적용 후 D.I 분사한 모듈의 광전 변환 효율은 각각 4.87%, 4.90%, 4.91%로써 초기 D.I water를 분사하지 않는 모듈과 비교하여 광전 변환

효율은 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 결과는 유리 표면에 있는 D.I water의 입자에 의하여 효율이 감소되는 것으로 판단된다. 발수 코팅을 적용하였을 때 0.03~0.04%로 증가되는 것을 확인할 수 있었으며 이러한 결과, 발수 코팅을 적용할 경우 태양광 모듈의 광전 변환 효율 향상을 얻을 수 있으며, 적용한 D.I water의 경우 불순물이 들어가 있지 않기 때문에 발수 코팅의 효과가 뚜렷하지 않



**Fig. 4.** Voltage-current characteristic curve results of dye-sensitized solar cells according to the number of water-repellent coatings: (a) Voltage-current when coated once, (b) voltage-power when coated once, (c) voltage-current when coated twice, and (d) voltage-power when coated twice.

지만 오염물이 적용되었을 경우 발수 코팅의 효과는 향상될 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 옥외에 설치된 태양광 모듈을 오염원으로부터 보호하기 위하여 발수 코팅 합성을 진행하였다. 발수 코팅에서 자가세정 기능이 우수한 실리카 기반으로 합성을 진행하였으며, 합성법은 스퍼터링을 활용한 Sol-Gel 법으로 진행하였다.

발수 코팅의 최적의 합성 조건을 도출하기 위하여 실리카 나노 입자의 기반인 TEOS와 촉매인 암모니아수의 첨가량을 조절하여 진행하였다. TEOS는 0.5 m과 암모니아수 0.1 M의 경우가 가장 좋은 접촉각 특성을 보였다. 촉매로 사용되는 암모니아수의 첨가량에 따른 TEOS의 성능을 확인할 수 있었으며, 촉매인 암모니아수의 첨가량이 증가할수록 접촉각이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 코팅 횟수를 증가함으로써 접촉각 특성이 향상되는 것을 확인할 수 있었으며 접촉각은 66.88°의 특성을 나타내어 발

수표면(hydrophobic surface)을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

합성된 물질을 염료감응형 태양광 모듈의 저철분강화유리에 적용하여 광전 변환 효율 변화를 확인한 결과, 발수 코팅을 적용하지 않았을 때의 초기 모듈의 광전 변환 효율은 4.93%이며, D.I water 분사한 모듈과 발수 코팅을 1회, 2회 적용 후 D.I 분사한 모듈의 광전 변환 효율은 각각 4.87%, 4.90%, 4.91%로서 초기 D.I water을 분사하지 않는 모듈과 비교하여 광전 변환 효율은 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 발수 코팅을 적용하였을 때 약간의 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과 발수 코팅을 적용할 경우 태양광 모듈의 광전 변환 효율 향상에 영향을 줄 수 있다고 판단된다.

본 연구 결과 제조된 발수 코팅 물질이 태양전지의 자가세정 역할이 가능한 것을 확인하였고, 이를 무반사 박막까지 적용하였을 경우 태양광 발전 효율과 수명 향상에 영향을 줄 수 있을 것이다.

#### ORCID

Hyun Chul Ki

<https://orcid.org/0000-0001-8784-924X>

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 결과이며 (No.20223030010080), 또한 중소벤처기업부와 중소기업 기술정보진흥원의 ‘지역특화산업육성+(R&D, S3257339)’ 사업의 지원을 받아 수행된 연구 결과임.

### REFERENCES

- [1] R. Prado, G. Beobide, A. Marcaide, J. Goikoetxea, and A. Aranzabe, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **94**, 1081 (2010).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.02.031>
- [2] M. Faustini, L. Nicole, C. Boissière, P. Innocenzi, C. Sanchez, and David Grosso, *Chem. Mater.*, **22**, 4406 (2010).  
doi: <https://doi.org/10.1021/cm100937e>
- [3] D. Lee, M. F. Rubner, and R. E. Cohen, *Nano Lett.*, **6**, 2305 (2006).  
doi: <https://doi.org/10.1021/nl061776m>
- [4] S. Chhajed, M. F. Schubert, J. K. Kim, and E. F. Schubert, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 251108 (2008).  
doi: <https://doi.org/10.1063/1.3050463>
- [5] M. L. Kuo, D. J. Poxson, Y. S. Kim, F. W. Mont, J. K. Kim, E. F. Schubert, and S. Y. Lin, *Opt. Lett.*, **33**, 2527 (2008).  
doi: <https://doi.org/10.1364/OL.33.002527>
- [6] J. Moghal, J. Kobler, J. Sauer, J. Best, M. Gardener, A.A.R. Watt, and G. Wakefield, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **4**, 854 (2012).  
doi: <https://doi.org/10.1021/am201494m>
- [7] J. Moghal, S. Reid, L. Hagerty, M. Gardener, and G. Wakefield, *Thin Solid Films*, **534**, 541 (2013).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.03.005>
- [8] Y. Li, J. Zhang, and B. Yang, *Nanotoday*, **5**, 117 (2010).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2010.03.001>
- [9] K. S. Han, H. Lee, D. Kim, and H. Lee, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **93**, 1214 (2009).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.01.002>
- [10] S. H. Oh, D. J. Kim, S. H. Hahn, and E. J. Kim, *Mater. Lett.*, **57**, 4151 (2003).  
doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00281-7](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00281-7)
- [11] W. Stöber, A. Fink, and E. Bohn, *J. Colloid Interface Sci.*, **26**, 62 (1968).  
doi: [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(68\)90272-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(68)90272-5)
- [12] A. Nakajima, K. Hashimoto, T. Watanabe, K. Takai, G. Yamauchi, and A. Fujishima, *Langmuir*, **16**, 7044 (2000).  
doi: <https://doi.org/10.1021/la000155k>