

# 태양광 모듈의 반사방지 코팅 성능 평가

강소연\* · 김주희\* · 김정식\*\* · 오원욱\*\* · 천성일\*\*

\*전자부품연구원 융복합전자소재연구센터

\*\*한국교통대학교 산업경영공학과

## Performance Evaluation of Anti-Reflection Coating on Photovoltaic Modules

Kang Soyeon\* · Kim Juhee\* · Kim Jungsik\*\* · Oh Wonwook\*\* · Chan Sungil\*\*

\*Korea Electronics Technology Institute

\*\*Department of Industrial & Management Engineering, Korea National University of Transportation

†Corresponding author: [chansi@keti.re.kr](mailto:chansi@keti.re.kr), [wonwook@keti.re.kr](mailto:wonwook@keti.re.kr)

### Abstract

In this paper, we evaluated the effect of a silica-based Anti-Reflection(AR) coating for PV modules. The coating technique can be easily applied to large-scale PV modules at room temperature with improvements of the optical properties that is qualified by the optical transmission measurements on the coated cover glass of the modules. The power improvement of the large-scale PV modules shows the increasing about 2.4% at standard condition of the coating technique on average. To improve the AR coating effect of the PV modules, we have characterized the individual PV modules by the measurements of DC power output, modified performance ratio(P<sub>RM</sub>) and the regression. The results show that the significant improvements of the AR coating effect are 6.4%, 5.5% and 4.5% of increasing of the performances by using the measurements of DC power output, modified performance ratio(P<sub>RM</sub>) and the regression, respectively.

**Keywords:** 반사방지 코팅(Anti-reflection coating), 성능(Performance), 태양전지 모듈(PV module), 유리(Glass), 회귀분석(Regression analysis), 난반사(Scattered reflection), 전반사(Total reflection)

### 기호설명

$PR_m$  : DC 출력 성능 평가 계수

$E_{DC}$  : DC 출력(kW)

$P_{DC,STC}$  : 표준조건에서 출력(kW)

$G_t$  : 경사면 일사량(kW/m<sup>2</sup>)

$T_m$  : 모듈온도(°C)

$\delta$  : 모듈의 온도계수(%/°C)



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.36, No.5, pp.1-8, A 2016  
<http://dx.doi.org/10.7836/kses.2016.36.5.001>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 14 June 2016

Accepted: 27 September 2016

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

UN 기후변화협약 총회 이후 온실가스 배출을 줄이기 위해 많은 국가에서 신재생에너지의 사용량을 늘리기로 결정하였다. 특히 신재생에너지원 중 태양광은 모든 나라에서 이용할 수 있는 자원이기 때문에 향후 성장이 기대된다. 지난해 세계 태양광 발전은 전년 대비 28% 성장한 58 GW에 달한다. 일반적으로 태양광의 세기가 강하면 태양광 출력도 증가한다. 하지만 태양광의 세기를 인위적으로 조절할 수 없으므로, 효율적으로 태양광을 흡수할 수 있는 방안이 필요하다. 따라서 태양광 모듈에 조사되는 빛의 투과도를 향상시키기 위해서, 2013년 이후 대부분의 상용 태양광 모듈은 반사방지(Anti-Reflection: AR) 기능을 부여한 유리를 사용하고 있다. 반사방지막은 프레넬 방정식(Fresnel equation)에 의해서 다른 매질의 굴절률과 반사되는 빛의 위상차로 인한 상쇄간섭 효과를 이용하여 빛의 투과도를 향상시키는 원리를 이용한다. Gabriela<sup>1)</sup>의 연구에서 AR의 효과로 2.7%의 출력을 더 얻었고, 옥외테스트에서는 3.5~5%의 출력 증가 효과를 보았다. Gary Jorgensen<sup>2)</sup>의 연구에서는 sol-gel 코팅 방법을 통하여 투과율이 4~5% 증가한 결과를 얻었다.

본 논문에서는 상온 경화형 실리카를 이용하여 AR 처리가 되지 않은 모듈에 코팅을 하고, 사우디아라비아 제다 지역에 일반모듈(2개)과 AR 코팅모듈(2개)을 설치한 후 1개월 동안 옥외에서 마이크로인버터를 이용해서 출력을 측정하였다. 또한 코팅 유무에 따른 출력 변화를 평가하기 위해 온도 및 경사일사량이 표준상태(Standard Test Condition: STC)에서 초기 출력을 측정하였고 일사량, 모듈온도와 초기 출력이 반영된 발전 성능 지표를 활용하였다. STC 조건에서 측정된 코팅 후의 출력 증가율보다 옥외에서 크게 측정되는 이유를 간단한 광조사각을 변화하여 미니모듈의 출력 측정을 통해 검증하였다.

## 2. 실험방법

코팅은 sol-gel 합성을 이용하였으며 테트라에틸오르토실리케이트(TEOS, Samchun, 95%)를 사용했다. 단분산 실리카 콜로이드 현탁액은 pH 3.5에 고정된 후, 에탄올(Daejung, 95%)과 탈염수혼합물에서 TEOS를 가수분해시켰다. 가수분해 용액의 Gel화되는 것을 막기 위해서 탈이온수, 에틸알코올, 이소프로필알코올(Daejung, 95%)과 콜로이드 실리카를 첨가하고 그 혼합물은 하루 동안 상온 교반해주었다(Fig. 1)<sup>3)</sup>.

코팅의 영향을 확인하기 위해서 AR 기능이 없는 유리를 사용하여 260 Wp급 대면적 결정질 실리콘 태양광 모듈 4개를 제작하였고, 그중 2개에 유리 표면에 실리카 나노입자를 코팅하였다.

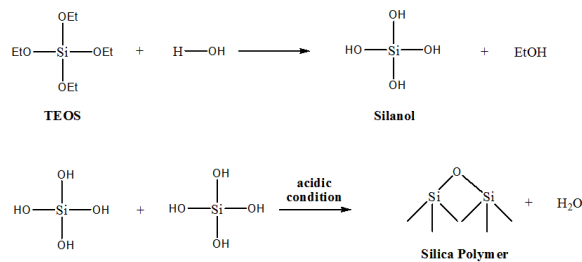


Fig. 1 Sol-gel synthesis using TEOS<sup>3)</sup>

모든 샘플은 STC(1 kW/m<sup>2</sup>, 25°C)에서 초기 출력을 측정하였고, 그중 샘플 #1, #2는 상온에서 실리카 나노 입자를 코팅 시행 후 재측정하였다.

옥외 모니터링은 사우디아라비아 제다에 위치하며 모듈은 마이크로 인버터가 설치된 샘플이다. 관찰 시기는 2016년 1월 19일부터 2016년 2월 18일까지 1달 동안 관찰하였다. 그 기간 중 모듈 클리닝은 2월 5일 오후 5시에 이루어졌으며, 이 기간 동안 비는 관측되지 않았다. 관찰시간은 오전 5시부터 오후 9시로 1분 단위로 데이터가 측정되었다. 측정된 1분 단위의 데이터 값들은 1시간 평균으로 환산한 후 활용하였으며, 개별모듈의 마이크로 인버터에서 추출한 출력과 환경데이터의 모니터링 결과를 이용하였다. 정확한 분석을 위해 모듈온도, 경사일사량, 초기 출력 및 모듈의 온도계수(0.4%/°C)를 반영한 수정된 발전성능 지표(Modified Performance Ratio: PR<sub>m</sub>)를 계산하였고, 그 식은 다음과 같다.

$$PR_m = \frac{E_{DC}}{P_{DC,STC} \cdot (G_t(1 - \delta(25 - T_m)))} \quad (1)$$

또한 AR 코팅의 영향을 확인하기 위해 1시간 단위의 일사량, 모듈온도와 출력 사이에서 도출된 회귀 식을 이용하여 분석하였다. 마지막으로 하루 동안 출력의 변화와 태양광의 광조사각에 대한 영향을 살펴보기 위해, 인공 광원을 조사하면서 코팅된 1셀 미니모듈의 경사각을 0도(수직)~70도까지 변화하여 출력을 비교하였다.

### 3. 실험 결과

Fig. 2는 태양광 유리 및 AR 코팅 후 측정된 투과도 및 반사도이고, 633 nm 기준으로 투과도는 3.1% 증가하였고, 반사도는 3.0% 감소하였다.

Table 1은 STC 조건에서 AR 코팅 전 측정된 4개의 모듈의 출력과 상온에서 샘플 #1, #2 모듈을 AR 코팅을 한 후 재측정한 결과로 초기 출력 대비 각각 2.86%, 2.20%가 상승하였다.

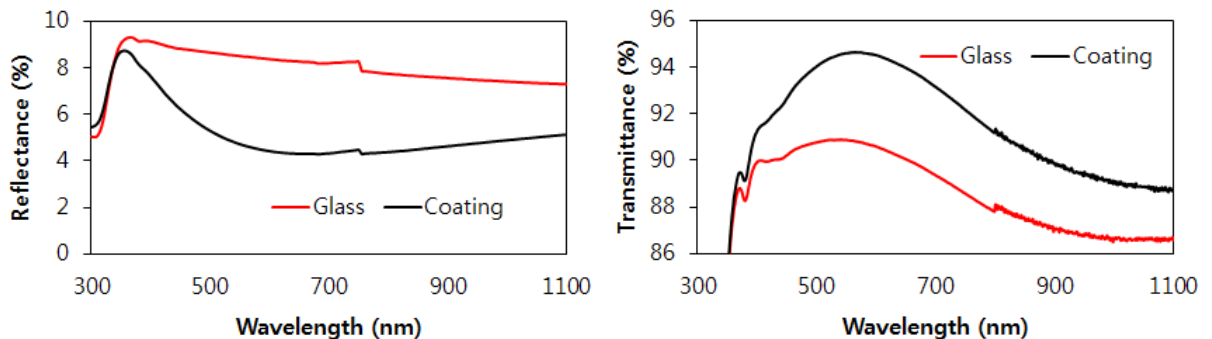


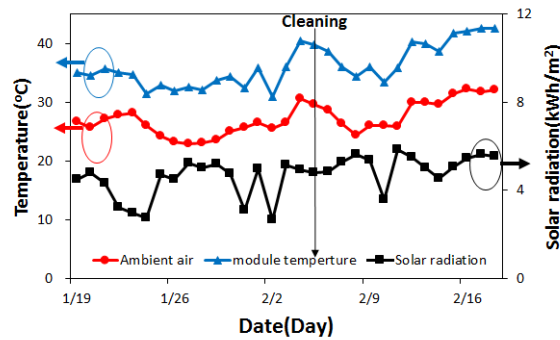
Fig. 2 Reflectance and transmittance

**Table 1** P<sub>max</sub> of PV modules at standard condition

샘플	#1(AR)	#2(AR)	#3	#4
초기 출력 (kW)	0.2622	0.2634	0.2609	0.2568
코팅 후 출력 (kW)	0.2697	0.2692	-	-
출력증가율* (%)	2.86	2.20	-	-

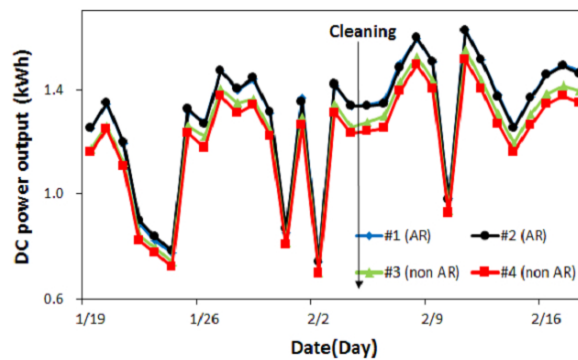
\*출력증가율 (%) = (코팅후출력-초기출력)/초기출력×100

Fig. 3은 모니터링 기간 동안 일사가 되는 시간의 일별 평균 외부온도와 모듈온도 그리고 일별 총일사량 값을 나타낸다. 관찰 기간 중 평균 외부온도는 27.2°C이며, 최고온도는 32.0°C 그리고 최저온도는 23.0°C이다. 반면, 평균 모듈온도는 36.2°C, 최고온도는 42.6°C, 최저온도는 32.1°C로 대체적으로 외부온도에 비해 약 10°C 높은 경향을 나타낸다. 일간 총일사량 평균은 4.67 kWh/m<sup>2</sup>, 최고 일사량은 5.83 kWh/m<sup>2</sup>, 최저 일사량은 3.10 kWh/m<sup>2</sup>이다.



**Fig. 3** Average daily of ambient air, module temperature and total daily of solar radiation

일일 총출력은 Fig. 4와 같다. 각 모듈의 평균 일일 총 출력은 AR 코팅을 했을 경우, 각각 #1은 1.29 kWh, #2는 1.29 kWh이다. 반면, 일반모듈의 경우, #3은 1.23 kWh, #4는 1.20 kWh이다. AR 코팅을 한 경우, 일반모듈에 비해 평균 0.078 kWh 높으며 코팅모듈(#1, #2)과 일반모듈(#3, #4)의 평균 일일 총출력 차이율은 평균 6.4%이다.



**Fig 4** Total daily values of DC power output

또 다른 방법을 통해서 코팅의 영향을 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 모듈온도, 경사일사량, 초기 출력이 포함된 PR<sub>m</sub>의 일일 평균을 분석하였다. 각 모듈의 평균 일일 PR<sub>m</sub>은 코팅을 하였을 경우, 모듈 #1은 1.117, 모듈 #2는 1.114인 반면, 일반모듈 #3은 1.067, #4는 1.048로 코팅모듈의 PR<sub>m</sub>이 평균이 0.058이 더 높다. 평균적으로 코팅모듈이 일반모듈에 비해 일일 PR<sub>m</sub>이 약 5.5% 높다.

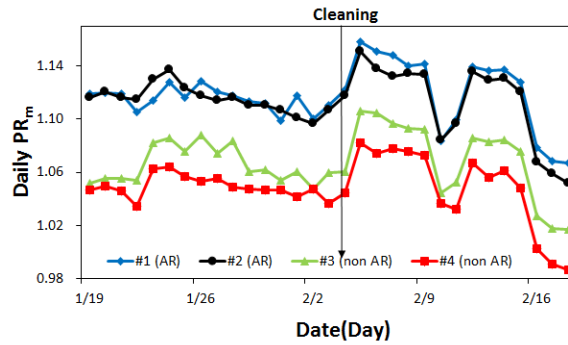


Fig. 5 Daily of PR<sub>m</sub>

일사량, 모듈온도와 출력 사이 관계를 분석하기 위해 회귀분석을 하였다. 회귀분석이란 종속변수에 독립변수가 미치는 영향을 알아보는 통계적 방법이다. 회귀 분석에서 R<sup>2</sup>(결정계수)이 1에 가까울수록 회귀 모델의 설명력이 높다고 본다. 출력(종속변수)과 일사량, 모듈온도(독립변수)의 회귀 모델의 R<sup>2</sup>을 보면 0.9981(#1, #2, #3), 0.9983(#4)으로 설명력이 높은 것을 나타낸다(Table 2).

Table 2 Regression equations

No.	회귀식	R <sup>2</sup>
#1	$Y=0.2973 \times G_t - 0.0005 \times T_m + 0.0087$	0.9981
#2	$Y=0.2966 \times G_t - 0.0005 \times T_m + 0.0099$	0.9981
#3	$Y=0.2837 \times G_t - 0.0005 \times T_m + 0.0091$	0.9981
#4	$Y=0.2786 \times G_t - 0.0005 \times T_m + 0.01$	0.9983

$$Y = aG_t + bT_m + c \quad (2)$$

회귀 식의 Y는 출력, G<sub>t</sub>는 경사일사량(kWh/m<sup>2</sup>), T<sub>m</sub>은 모듈온도(°C)이고 a는 경사일사량계수, b는 모듈온도계수이고, c는 상수이다. Fig. 6과 Table 3은 4개의 회귀 모델에 경사일사량 1 kW/m<sup>2</sup>, 모듈온도 25°C일 때 계산되는 출력을 초기 출력으로 나눈 결과이다. 초기 출력을 기준으로 필드에서 출력이 얼마나 더 나오는지 알 수 있다. 회귀 모델에서 일사량 1 kW/m<sup>2</sup>, 모듈온도 25°C일 경우 #1은 0.2944 kW #2는 0.2941 kW의 출력이 계산된다. 반면 일반모듈 #3은 0.2809 kW, #4는 0.2757 kW이다. 코팅모듈 #1은 초기 출력 대비 12.3%, #2는 11.7% 높은 출력이 나왔다. 반면, 일반모듈 #3은 7.6%, #4는 7.4% 높은 출력이 나왔다. 초기 출력 대비 필드 증가율을 보면 코팅한 경우는 평균 12.0%, 일반모듈의 평균은 7.5%이다. 일반모듈에서 증가한 7.5%를 감안해도 코팅모듈은 4.5%만큼 초기 출력대비 필드에서 출력이 더 잘나왔다.

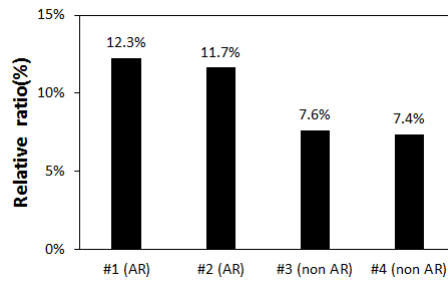


Fig. 6 Relative ratio of Values of DC power ( $G_t=1$  kW,  $T_m=25$  °C) and initial  $P_{max}$

Table 3 Information of Fig. 6

Category	#1	#2	#3	#4
$Y_{(G_t=1, T_m=25)}$	0.2944	0.2941	0.2809	0.2757
Initial $P_{max}$	0.2622	0.2634	0.2609	0.2568
Ratio	12.3%	11.7%	7.6%	7.4%

Fig. 7은 3가지의 분석 결과를 정리한 것이다. 출력을 통한 비교는 다른 방법보다 더 큰 차이를 보이지만 각 모듈의 초기 출력 차이가 반영되지 않았다. 반면,  $PR_m$ 은 출력에 영향을 주는 일사량, 초기 출력과 모듈온도가 반영되어 각 모듈 성능의 평가가 비교적 잘 표현된다. 회귀 모델을 통한 비교는 각 모듈의 초기 출력을 기준으로 하기 때문에 필드 출력이 초기 대비 얼마나 더 잘 나왔는지 확인할 수 있다.

분석방법에 따라 AR 코팅 효과를 보면  $PR_m$ 으로 비교 시 일반모듈보다 코팅모듈의 성능이 5.5% 높게 평가된다. 회귀 모델로 비교 시 일반모듈보다 코팅모듈이 초기 출력 대비 4.5%만큼 더 잘 나온 효과가 있다. STC 조건에서 측정한 AR 코팅 후 출력 증가율의 평균 2.4%보다 필드에서는 더 높은 증가율을 보이고 있다.

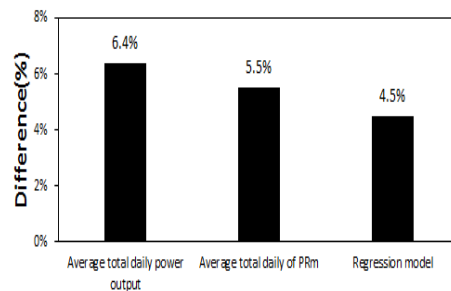


Fig. 7 Difference between coating modules and non coating

Fig. 8은 실제 필드에서 더 높은 효과를 보이는 이유를 알아보기 위해서 관찰기간 중 하루를 선정하여 출력을 분석하였다. 관찰기간은 모듈 청소 후 안정적인 일사량이 측정된 2월 16일로 선정하였다. 일반모듈 #4를 기준으로 코팅 유무에 따른 시간대별 DC 출력 변화 및 증가율을 분석하였다. Fig. 8(a)는 코팅모듈 #2와 일반모듈 #4를 비교한 것이고, Fig. 8(b)는 일반모듈 #3과 일반모듈 #4를 비교한 것이다.

Fig. 8(a)는 일사가 되는 오전 9시~오후 5시 시간대에는 코팅모듈 #2와 일반모듈 #4의 DC 출력 차이가 평균 7.7%이다. 반면, Fig. 8(b)는 일반모듈 #3과 #4의 출력 차이를 비교하면 (a)에서 보인 차이와 달리 평균 3% 정도 차이가 난다.

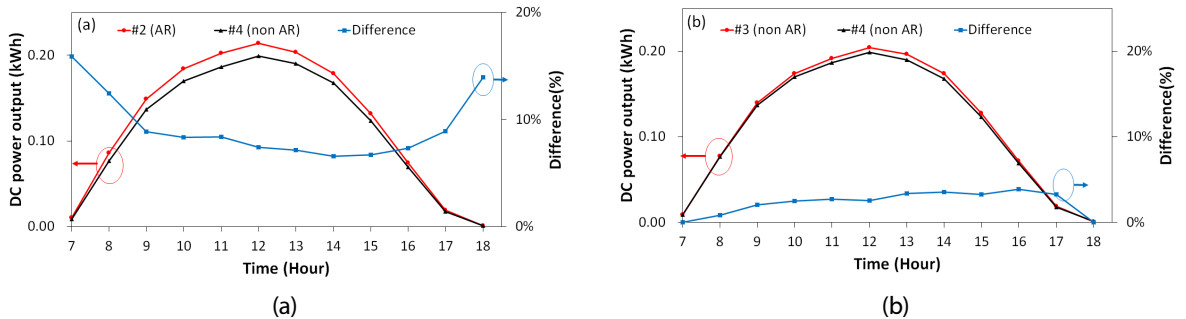


Fig. 8 During power output change and ratio of (a) #2(AR)-#4(non AR)(b) #3(non AR)-#4(non AR)

Fig. 9는 코팅 전후의 모듈에 빛이 입사되는 각도에 의한 출력과 출력 증가율을 간단하게 1셀 미니모듈을 이용해서 측정한 결과이다. 수직(0도)의 상태에서부터 각도가 커질수록 코팅의 난반사 및 전반사에 의해서 코팅하지 않은 모듈 대비하여 증가율이 증가한다. 이러한 특성은 코팅모듈과 코팅하지 않은 모듈에서 나타나는 특성으로 코팅면의 프랙탈 구조에 의한 증가분이다.

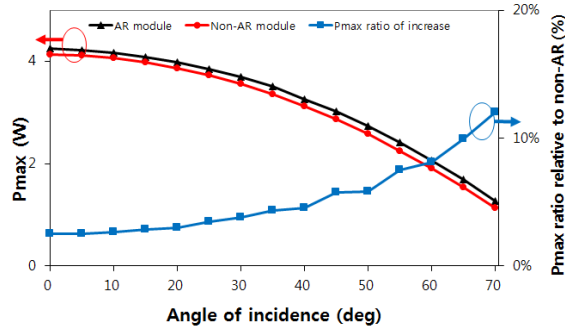


Fig. 9 Power output and rate of increase of Mini-module according to the incidence of the light

#### 4. 결론

본 논문에서는 실리카 나노 입자를 이용한 AR 코팅을 상온에서 적용하여 STC 조건에서 평균 약 2.4% 상승하였다. 옥외에서 한 달간 DC 출력 모니터링 결과 약 6.4%, PR<sub>m</sub> 비교 결과 5.5%, 회귀 식을 이용한 비교 결과 4.5%만큼 출력이 상승하였다. 3가지 방법 중 DC 출력으로 비교한 것은 초기치가 반영되지 않았다. 따라서 이 논문에서는 AR 코팅 후 5.5%(PR<sub>m</sub>), 4.5%(회귀식)만큼 출력이 상승한 효과가 있다고 본다. STC 조건과 필드에서의 AR 코팅에 따른 출력 차이가 발생하는 이유는 모듈에 대한 빛의 입사각이 증가할수록 실리카 나노 입자의 프랙탈 구조에 의해 전반사가 일어나므로 빛의 투과율이 증대되기 때문이다. 2013년 이후로 대다수의 태양광 모듈은 AR 코팅 유리를 사용한다. 하지만 2013년 이전에 설치된 태양광 모듈은 AR 코팅되지 않는 유리가 대부분이기 때문에 2013년 이전에 옥외 설치된 태양광 모듈에

상은 경화형 코팅이 적용된다면 4.5% 이상의 출력 향상이 기대된다. 또한 AR 유리를 사용한 모듈의 경우에도 수년 후 코팅의 기능이 저하될 수 있고, 이를 개선하는 데 적용 가능할 것으로 기대된다. 향후 코팅의 균일성 및 내구성 확보되고 저가화가 실현되면, 효과적인 유지보수 방법으로 태양광 발전 시스템에 적용될 것으로 기대된다.

## 후기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20153030012750).

## REFERENCES

1. Gabriela Bunea, Grace Xavier, and Doug Rose, Lauren Nelson and Jack Peurach, Performance and Reliability of Modules with Anti-Reflective Coated Glass, Sun Power, 2010.
2. Gary Jorgensen, Stefan Brunold, Michael Köhl, Per Nostell, Henk Oversloot, and Arne Roos, Durability testing of antireflection coatings for solar applications, National Renewable Energy Laboratory, 1999.
3. Oh, W. W., Kang, B. J. Choi, S. Bae, S. H., Jeong, S. J., Kim, S. M., Lee, H. S., Kim, D. H., Hwang, H., and Chan, S. I., Evaluation of Anti-Soiling and Anti-Reflection Coating for Photovoltaic Modules, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 16, pp. 10689-10692, 2016.
4. Raquel Prado, Garikoitz Beobide, Arrate Marcaide, Josu Goikoetxea, and Ana 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.
5. Oh, W. W. and Chan, S. I., The Performance Loss by the Soiling of Photovoltaic Modules, Journal of the Korean Solar Energy Society (in Korean), Vol. 35, pp. 63-71, 2015.
6. Kim, J. Y., Hwang, J. H., Lim, T. Y., Lee, M. J., Hyun, S. K., and Kim, J. H., Fabrication of Anti-Reflection Coating Film by Using Sol-gel Method, Journal of Photonic Science and Technology, Vol. 3, No. 2, pp. 65-68, 2013.
7. Karsten H. Nielsen, Dominik K. Orzol, Svetoslav Koynov, Steve Carney, Eric Hultstein and Lothar Wondraczek, Large area, low cost anti-reflective coating for solar glasses, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 128, pp. 283-288, 2014.
8. Kim, J. K., Park, J. J., Hong, J. H., Kim, N. S., Kang, G. h., Yu, G. J. and Song, H. E., Characteristics of Crystalline Silicon Solar Cells with Double Layer Antireflection Coating by PECVD, Journal of the Korean Solar Energy Society (in Korean) Vol. 30, No. 6, pp. 125-130, 2010.
9. Priyanka Singh and Ravindra, N. M., Temperature dependence of solar cell performance-an analysis, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 101, pp. 36-45, 2012.
10. Ayompe, L. M., Duffy, A., McCormack, S. J., and Conlon, M., Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland, Energy Conversion and Management, Vol. 52, pp. 816-825, 2011.
11. Dragana D. Milosavljević, Tomislav M. Pavlović, and Danica S. Piršl, Performance analysis of A grid-connected solar PV plant in Niš, republic of Serbia, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 44, pp. 423-435, 2015.