

도로용 태양광 모듈 실증 모델 결과 분석

이종환¹, 김봉석¹, 신동휘¹, 한수희², 노재형³ 

¹ 한국전력공사

² 포항공과대학교 창의IT융합공학과

³ 건국대학교 전기공학과

Analysis of Actual Test for Road Solar Module

Jong Hwan Lee¹, Bong Seok Kim¹, Dong-Hwi Shin¹, Soo Hee Han², and Jae Hyung Roh³

¹ Korea Electric Power Corporation, Naju 58322, Korea

² Department of Computing and Control Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang 37673, Korea

³ Department of Electrical and Electronic Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Korea

(Received August 2, 2019; Revised August 7, 2019; Accepted August 9, 2019)

Abstract: Road photovoltaic power generation is a technology that combines photovoltaic power generation while maintaining the function of the existing road by installing special photovoltaic modules on it. In this paper, we developed three types of modules and structures suitable for sidewalk blocks and element technology for the development of a solar road module for a sidewalk and bicycle road. The road solar potential in Korea is 10 GW. After analyzing the daily data obtained after the construction of a 10 kW solar road testbed, it was found that its utilization rate compared to the general photovoltaic energy is 80%.

Keywords: Road solar, Sidewalk/Bicycle road integrated solar, Solar, Renewable energy, Module, Frame

1. 서론

정부에서는 재생에너지 발전량 비중을 2030년까지 20% 높이기 위한 방안으로 “재생에너지 3020이행 계획”을 발표하였다. 이 중 태양광이 차지하는 용량은 30.8 GW이며, 이를 설치하기 위해서는 406.6 km² (여의도 면적의 140배)에 달하는 부지가 필요하다 [1,2]. 3020이행 계획 발표 이후 태양광에 관심과 투자수요가 높아지고 있지만, 보급이 급격히 확대되면서 환경훼손과 입지 갈등, 부동산 투기, 소비자 피해 등의 부작용이 발생하고 있다 [3].

이러한 문제점들을 해결하기 위한 새로운 전력산업 응용 분야로써 공존형태양광이 각광을 받고 있다.

특히 도로 태양광은 도로 위에 태양광 모듈을 설치하여 기존 도로의 기능을 유지하며 추가적으로 태양광 발전을 병행하는 공존형태양광 기술로서 자연환경 훼손이나 주민의 민원 등 주민 수용성 문제를 최소화할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 도로 태양광은 풍부한 부지확보가 가능하고, 도심 내 분산 발전원으로 활용이 가능하기 때문에 프랑스의 Wattway사를 비롯하여 미국, 독일, 중국 등 전 세계적으로 도로 태양광에 대한 기술 개발 및 실증을 통해 기술력을 확보하고 있다 [4,5].

선행연구를 통해 개발된 모듈 전면재의 경우 미끄럼 저항을 높이기 위해 복합소재 플라스틱 계열에 같은 유리 성분의 재료를 코팅 처리하여 사용하거나 몰딩 처리를 한 강화유리를 사용하였다 [4].

이에 본 논문에서는 국내 최초로 도입되는 도로 태

✉ Jae Hyung Roh; jhroh@konkuk.ac.kr

양광의 타당성 검증을 위해 차도가 아닌 도심의 공공적 재원인 공원과 공공기관 등의 많은 면적을 차지하고 있는 보도/자전거 도로를 대상으로 일반 보도블록 크기(300 mm × 300 mm)에 해당되는 모듈을 개발하고 test-bed 구축을 통해 도로 태양광의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 전면재 개발 및 실험 방법

2.1.1 전면재 표면처리 기술

보도/자전거 도로용 태양광 모듈은 도로 바닥 위에 설치하기 때문에 모듈 개발에 있어 가장 중요한 것은 보행자와 자전거를 타고 이동하는 사람들의 안전성이다. 현재 보편적으로 사용하고 있는 태양광 모듈의 전면재는 저항력이 없는 매끄러운 강화유리를 사용하고, 투과율을 높이기 위해 두께는 평균 3.2 mm를 사용하고 있어 도로 태양광 모듈 전면재로 사용하기에는 적합하지 않다 [6].

보도/자전거 도로용 태양광 모듈의 전면재는 보행자의 안전성을 고려해야 하기 때문에 유리의 표면처리가 필수적으로 이루어져야 하며 두께는 두꺼워질 수밖에 없다. 따라서 모듈의 미끄럼 저항성과 투과율 확보를 위해서는 전면재의 검토가 필수적으로 진행되어야 한다.

본 논문에서는 표면 처리와 작은 규격으로 가공과 제작이 용이하고, 강도와 내구성이 우수하며, 투과율이 높은 저철분 강화유리를 도로 태양광 전면재로 선정하였다. 또한 두께에 따른 빛 투과율의 차이를 확인하고자 투과율 실험을 수행하였다. 기존 태양광에 사용되는 저철분 강화유리의 두께는 보통 약 3.2 mm를 사용하나, 전면재가 받는 수직하중을 고려하여 본 논문에서는 두께는 5 mm 이상을 사용하였다. 그림 1은 전면재 두께에 따른 투과율 특성을 보여주고 있는데 큰 차이가 없음을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

저철분 강화유리의 미끄럼 저항성을 높이기 위한 방법으로는 유리 가공 시 표면처리를 하는 방법이 많이 사용되고 있고, 유리의 표면처리 방법과 특징은 표 1과 같다.

본 논문에서는 가시광선 투과율이 80% 이상으로 높고, 유리 전면 오염이 잘 되지 않는 molded 타입과 acid etching 타입을 전면재로 선정하였다.

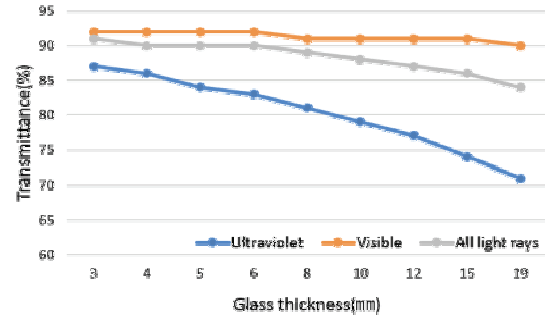


Fig. 1. Transmittance characteristics according to thickness of tempered glass.

Table 1. Front glass properties.

Surface treatment	Transmittance	Method	Contents
Silk screen	60% ↓	Spray coating on glass surface	Need to develop separate coating material for improving transmittance
Molded	85% ↑	Glass forming using mold method	Good anti-pollution but requires optimum design
Acid etching	88% ↑	Melting glass surface by chemical etching method	Similar transmittance with conventional glass
Sand blasting	80% ↑	Sandblasting laminated on glass surface	Bad anti-pollution and need further strengthening test

2.1.2 미끄럼저항성 실험 방법

어떤 물체의 표면이 어느 정도 미끄럼에 강한가를 나타내는 척도를 미끄럼 저항 계수(british pendulum number, BPN)라 하며, 수치가 높을수록 덜 미끄러운 표면을 의미한다 [7]. 서울시 보도 포장 미끄럼 저항 기준에서 일반적인 보도블록의 경우 40 BPN 이상을 만족해야 하지만 본 논문에서는 서울시 보도 포장 기준보다 높은 45 BPN 이상을 만족하는 전면재를 개발하고자 한다. 이에 미끄럼 저항성을 높이고자 일반 etching 타입에 pattern을 그림 2와 같은 시험조건으로 시제품을 만들어 미끄럼 저항성 테스트를 진행하였다.

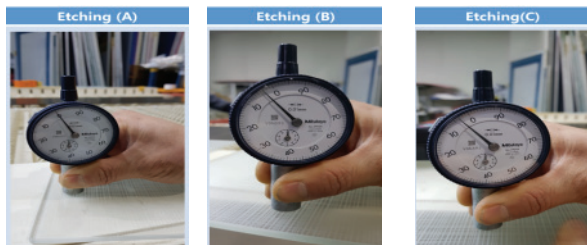
Etching (A)는 일반 etching 타입을 매끄럽게 재처리한 제품이며, etching (B)와 (C)는 etching 타입에 pattern을 입힌 것으로 패턴깊이와 에칭 시간 차이가 있다.

미끄럼 저항성 시험 결과 일반 etching type은 10 BPN, pattern etching type (A)와 (B)는 39 BPN과

60 BPN으로 측정되었다. Pattern etching type (B)만이 45 BPN 이상을 만족하였으며, 이는 패턴 깊이와 에칭 공정 시간에 따라 BPN 수치가 급격하게 변하는 것을 확인하였다.

최종 전면재 제품 선정을 위해 전면재 특성에 따른 미끄럼 저항성을 확인하고자 일반 molded 타입과 etching 타입, 그리고 미끄럼 저항성을 높이기 위해 pattern을 입힌 molded 타입과 etching 타입 이렇게 총 4가지 타입에 대해 미끄럼저항성 시험을 5회에 걸쳐 진행하였고, 그 결과는 그림 3과 같다.

미끄럼저항성 시험 결과 pattern을 입힌 제품이 45 BPN 이상을 만족하는 것으로 분석되었고, 미끄럼 저항성 시험 결과를 토대로 최종적으로 molded pattern과 etching pattern의 전면재를 선정하였다.



Depth: zero Depth: approx. 0.032 mm Depth: approx. 0.034 mm
etching time: approx. 8 min etching time: approx. 9 min

Fig. 2. Pattern etching surface treatment test condition.

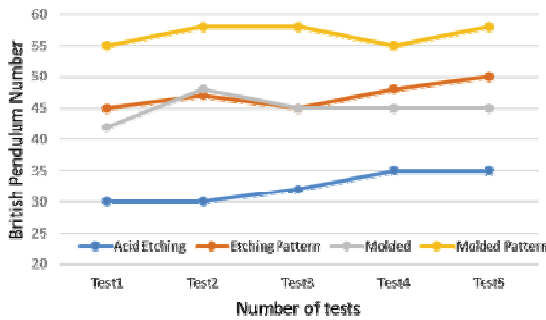


Fig. 3. Results of slip resistance test.

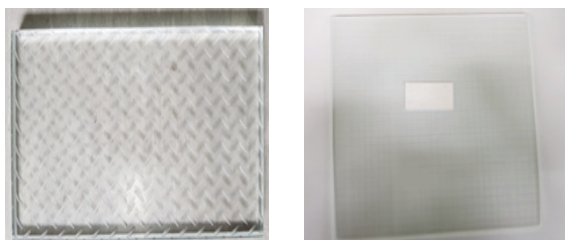


Fig. 4. Molded pattern & etching pattern.

2.2 도로 태양광 모듈 개발 및 실험 방법

2.2.1 충전재와 후면재

충전재는 모듈의 내구성에 있어 가장 중요한 소재이다. 도로 태양광 모듈의 셀과 프레임 간 전위차에 의해 발전능력이 저하되는 PID (potential induced degradation) 현상과 내습·내구성이 우수한 레진을 고려하였으나, ribbon과 이를 고정하기 위한 레진 테이핑 공정이 서로 겹쳐 효율 손실이 예상된다. 이를 해결하기 위해 일반 태양광에 사용하는 충전재보다 체적 저항이 높고, ANTI PID 성능과 내구성이 우수한 폴리올레핀 (polyolefin elastomer, POE) 제품을 적용하여 모듈제작을 진행하였다.

후면재는 하부구조물과 맞닿는 부분으로 압력에 의한 solar cell 파손을 최소화하기 위해 강도가 우수한 강화유리를 적용하였다. Cell 보호 기능을 높이기 위해 2겹의 충전재로 중간재와 접합하고, 정선박스 부착을 위해 상부 일부를 타공하였으며, 타공 부위는 하부구조물과 모듈 접착 시 접착재로 채워 벌어지는 공간이 없도록 설계 제작하였다.

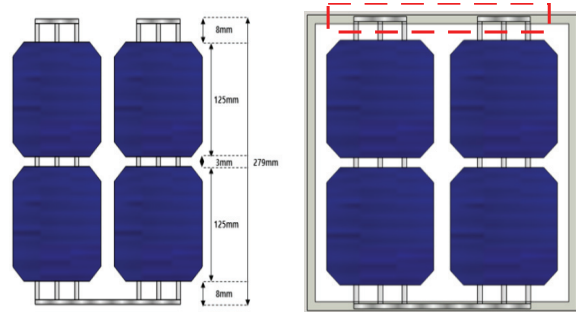


Fig. 5. Overlap of ribbon and resin materials.

2.2.2 태양광 cell

보도/자전거 도로용 태양광 모듈의 경우 한정된 크기의 모듈에서 최적 발전량을 얻기 위해 후면전극 cell (IBC cell)을 사용하였다. 후면전극 cell 이용 시 전면 에 리본이 없어 수광 면적을 최대화하여 효율을 높일 뿐만 아니라 리본에 의한 눈부심 현상을 최소화할 수 있다는 이점과 미세 crack에 의한 출력 저하 영향이 적고 이로 인한 효율 저하가 거의 없다는 장점이 있다. 기존 결정질 cell보다 고가이나 블록형 모듈에 좀 더 적합한 후면전극 cell을 적용하여 개발품을 제작하였다.

2.2.3 도로 태양광 모듈 구조

일반 태양광 모듈(60 cell과 72 cell)에 비해 보도/자전거 도로용 태양광 모듈은 4 cell로 구성된 소형 모듈이고, 그림 6과 같이 일반 모듈 대비 다층의 레이어아웃으로 구성되어 있다.

보도/자전거 도로용 태양광 모듈의 전면재와 후면재는 기존 강화유리와 다르기 때문에 중간 레이어인 backsheet 공정과 후면 강화유리 접합 공정을 2회에 걸쳐 라미네이션 공정을 진행하였다.

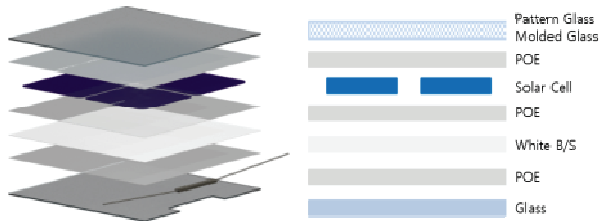


Fig. 6. Module configuration layout.

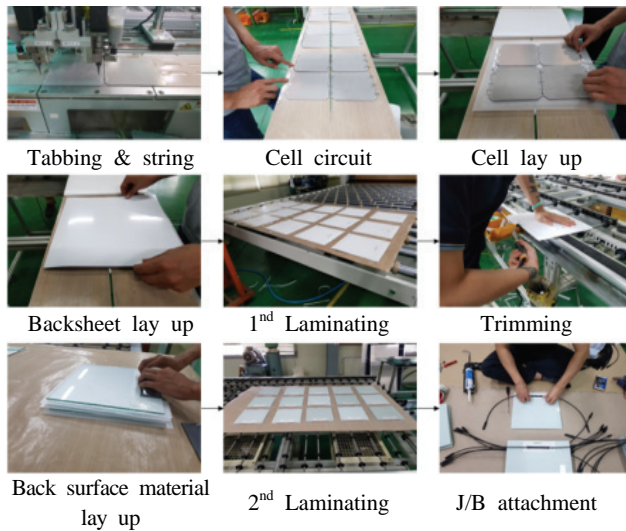


Fig. 7. Road solar module manufacturing process.

2.2.4 구조물 개발

본 논문에서는 후면전극 cell 크기와 중량 등을 고려하여 일반 보도블록으로 많이 사용되는 300 mm × 300 mm × 60 mm 치수를 구조물 크기로 선정하였다. 구조물 소재는 인장강도와 강성이 높고, 성형 사출시 구조물 탈착성능을 높이기 위해 저/고밀도 혼합 폴리에틸

렌 소재를 적용하였다. 특히 상부구조물은 구조물 위에 도로 태양광 모듈을 끼우는 방식이며, 상부 블록에는 정선박스 설치 공간과 cable을 넣을 수 있도록 제작하였다. 하부구조물은 상부구조물에서 나온 cable을 연결하기 위한 별도 공간이 있도록 설계하였으며, 빗물이 배출될 수 있도록 경사 및 홈이 있도록 설계 제작하였다.



Fig. 8. Frame of road solar.

2.2.5 도로 태양광 모듈 개발

본 논문에서는 표 2와 같이 검은 backsheet를 적용한 etching black과 흰색 backsheet를 적용한 etching white, molded white 총 3가지 타입의 모듈을 개발 제작하였다 [8].

Table 2. Types of road solar modules.

Etching white	Etching black	Molded white
Forming by melting glass surface by chemical etching	Glass forming using mold method	Glass forming using mold method
White backsheet	Black backsheet	White backsheet
The transmittance is similar to that of conventional tempered glass	Excellent anti-pollution	Sandblasting laminated on glass surface

2.2.6 도로 태양광 모듈 출력 실험 방법

최대 출력 시험은 환경시험 전후에 모듈의 최대 출력을 결정하는 시험으로 인공 광원법에 의해 태양광 모듈의 I-V 특성시험을 수행하며, 표준시험 조건(AM 1.5,

방사조도 1 kW/m², 온도 25°C)에서 시험을 실시하였다. 공인 출력 시험은 공인인증기관을 통해 측정하였고, STC조건 시험 결과 평균 11.82 W가 측정되었다.

2.3 Test-bed 구축 및 발전량 분석 실험 방법

2.3.1 어레이 결선

태양광 어레이 구성은 molded white 2.9 kW, etching black 2.9 kW, etching white 2.9 kW, etching white와 molded white가 섞인 1.4 kW 총 4개 구역이며, 설치 용량은 10 kW이다. 또한 2.9 kW급 시스템의 경우 각 122 직렬 2병렬, 1.4 kW급 시스템의 경우 122직렬 1병렬로 구성하였다. 모듈과 어레이의 전기적 사양은 표 3과 같다.

Table 3. Module & array description.

Class	Module	Array	
		2.9 kW	1.4 kW
Peak power [W]	11.9	2,904	1,451
Open circuit voltage [V]	2.89	352.58	352.58
Short circuit current [A]	6.15	12.3	5.15
Maximum power voltage [V]	2.24	273.28	273.28

2.3.2 도로 태양광 test-bed 구축

도로 태양광 test-bed 구축 장소는 한전 본사 홍보관 앞이며, 모듈 설치 형태는 폭 1.5 m, 길이 51 m 길이로 모듈 855장을 설치하였다. 모듈 설치를 위해 모래 다짐 후 그 위에 수평을 유지하며 그림 9와 같이 'ㄱ'자 형태로 모듈 한 면씩 하부 구조물끼리 서로 겹쳐 결속하는 방식으로 설치하였다.

또한 주변 일반 보도블록과 도로태양광 모듈을 분리하고 부분침하를 막기 위해 그림 10과 같이 스테인레스강 (steel use stainless, SUS) 소재 분리대를 설치하였으

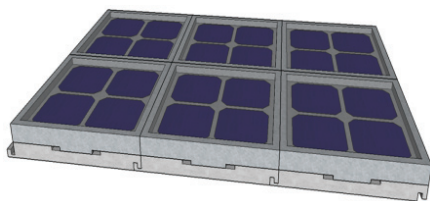


Fig. 9. Module installation.

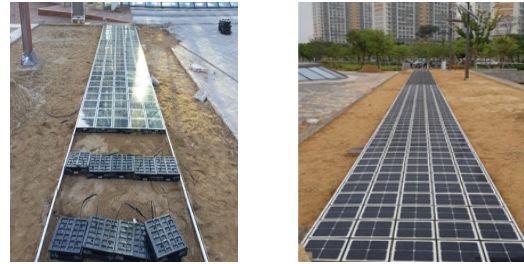


Fig. 10. Road solar module installation process.

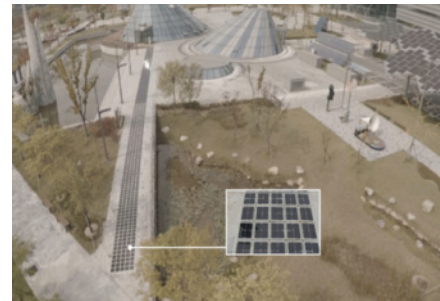


Fig. 11. Completion of 10 kw test site for road solar.

며, 모듈 연결부 사이에는 기존 블록 공사와 마찬가지로 모래를 채워 틀어짐이나 움직임이 없도록 설치하였다.

2.3.3 Test-bed 발전량 분석 실험 방법

도로 태양광 10 kW test site 구축을 2018년 9월 20일 완료하였고, 대표적인 일일 데이터를 분석한 결과는 그림 12와 같다.

분석 일자는 2018년 9월 28일이며, 일일 일사량은 3,922 Wh/m²이다. 총 4가지 모듈 타입에 대하여 각각의 일일 발전량을 분석한 결과 molded white 10.7 kWh, etching black 9.0 kWh, etching white 7.1 kWh, etching & molded white 4.4 kWh로 분석되었다.

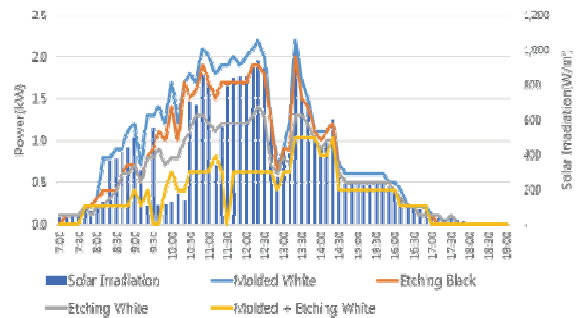


Fig. 12. Road solar capacity analysis.

Molded white 모듈을 제외한 나머지 모듈의 경우 발전 시간대에 가로등과 나무의 그림자 영향으로 출력 저하가 발생하는 것을 확인하였고, molded white의 경우 낮 시간 동안에는 그림자 영향이 없으나, 오후 4시 이후 주변 조형물로 인해 그림자 영향을 받는 것으로 분석되었다.

3. 결과 및 고찰

일반 태양광 대비 출력 및 이용률 특성 분석을 위해 도로 태양광 설치 모듈 중 그림자 영향이 가장 적은 molded white 3 kW와 일반 3 kW급 지상 태양광을 활용하여 특성 비교 분석하였다.

이때, 도로 태양광 설치 주변에 데이터 확보 가능한 3 kW급 태양광이 부재중으로, 전남 무안군 현경면에 연구 목적으로 설치한 일반 3 kW급 지상 태양광을 대상으로 비교하고자 한다. 가장 유사한 일사량 분포를 보인 날을 선정하였고, 이때 일사량은 나주 3,922 Wh/m², 무안 4,080 Wh/m²이며, 분석 결과는 그림 13과 같다.

지상 태양광과 도로 태양광의 이용률을 분석한 결과 17.96%, 15.43%로 분석되었고, 지상 태양광 대비 도로 태양광의 이용률은 86% 수준으로 분석되었다. 하지만 이는 일일 측정 데이터 결과이기 때문에 신뢰성은 떨어지나 계절별 특성을 고려한다면 연중 평균 이용률은 일반 지상 태양광 대비 약 80% 수준으로 예상된다.

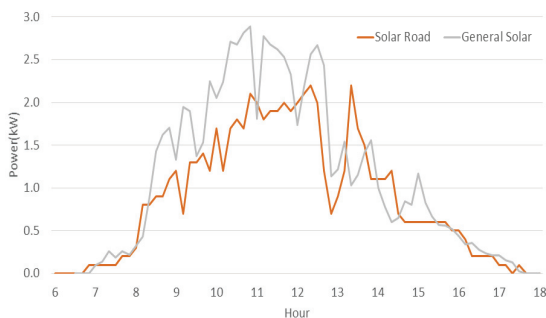


Fig. 13. Comparison of solar power and generation.

4. 결론

최근 프랑스 와트웨이사에서 개발한 도로태양광 모듈은 파손 및 낮은 효율로 문제가 있다는 내용이 보고되고 있다. 하지만 국내에서는 재생에너지 3020 이행 계획에 따라 2030년까지 태양광 30 GW 신설을 목표로

하여 태양광 부지 1.5억 평이 필요하다. 도로 태양광은 태양광 부지 확보 및 미래적 가치를 위해서는 반드시 필요한 기술로 현재 국내외에서 연구 및 실증단계이다.

현재 도로 태양광 모듈 가격은 일반 대비 5~10배 정도로 고가이나 적정 수준의 생산 물량 확보와 기술 성숙도에 따라 모듈 가격은 하락이 예상된다. 또한 도로 태양광은 일반 지상 태양광 대비 연중 평균 이용률이 80% 수준으로 정부의 재생에너지 3020 이행 계획 목표 달성에 기여가 가능함을 10 kW test-bed를 통해 검증하였다. 이에, 도로태양광 보급 초기에는 정부의 신재생에너지 공급인증서(renewable energy certificate, REC) 등 정책적 지원이 필요하다

향후 최소 1년 이상의 데이터 확보로 미세먼지, 낙엽 등 모듈 오염에 따른 도로 태양광에 대한 발전량 분석과 경제성 평가 등 타당성 검증을 수행할 예정이다.

추후 도로태양광 경제성 확보를 위해 현재 상업용 모듈 크기로 키워 제조사의 태양광 모듈 제조 공정 변경 없이 제작할 수 있고, 구조물이 없는 도로에 부착할 수 있는 형태로 개발될 경우 대폭적인 투자비 저감이 기대된다. 또한, 보행자에 대한 전기안전 및 구조적 안정성 확보 등 지속적인 연구가 필요하다.

ORCID

Jae Hyung Roh

<https://orcid.org/0000-0002-7285-7375>

REFERENCES

- [1] Ministry of Trade Industry and Energy (MOTIE), "Implementation Plan for the 3020 Renewable Energy", 2017.12.20.
- [2] K. B. Kim and H. K. Jung, "Direction of R&D Investment in Electric Power Sector Based on Government's Energy Conversion Policy", *Korea Institute of S & T Evaluation and Planning*, **228**, 2018.
- [3] S. K. Jeong, *News Inf. Chem. Eng.*, **36**, 330-348 (2018).
- [4] Solar Roadway Homepage, <http://www.solarroadways.com/>
- [5] H. T. Han, *Convergence Road and PV panel*, <https://renewableenergyfollowers.org/2656> (2018).
- [6] Korea Ceramic Engineering and Technology, "Smart Glass Industry Competitiveness Survey", p. 58, 2010.
- [7] D. G. Park, S. Y. Jeong, J. G. Kim, and H. G. Jeong, *Korean J. Road Eng.*, **13**, 33 (2011).
- [8] J. H. Lee, S. H. Han, J. H. Roh, D. H. Shin, B. S. Kim, and M. S. Jeong, *Proc. Electrical Machinery & Energy Convergence System (EMECS) Spring Conference (KIEE, Busan, 2019)* p. 183.