PRT 차량의 보조 전력공급을 위한 유연소재 태양전지의 적용 가능성 연구

An Exploratory Study on the Applicability of Thin-Film Photovoltaic Cells for Auxiliary Power Supply of a Personal Rapid Transit (PRT) Vehicle

강석원* · 한수진 · 정락교 · 오혁근 · 고상원 · 최두호

Seok-Won Kang · Soo-Jin Han · Rag-Gyo Jeong · Hyuck Keun Oh · Sangwon Ko · Dooho Choi

Abstract Recently, trends in new transportation system development have been primarily focused on sustainable and eco-friendly mobility solutions. The personal rapid transit (PRT) system has been considered a promising candidate in this category; its competitiveness is being improved through convergence with cutting-edge electric vehicle (EV) technologies. However, battery-powered vehicles pose difficult technical challenges in attempts to achieve reliable and efficient operation. In this study, a design approach for a solar-power assisted PRT system is presented with small-scale demonstrations aimed at circumventing challenges facing its adoption, as well as helping speed the transition to electric-powered ground transportation. From the results, it is expected that flexible photovoltaic (PV) cells will be able to supply 11% of the power required by the service equipment installed in a prototype vehicle. In particular, flexible photovoltaic (PV) cells are advantageous in terms of cost, weight, and design considerations. Most importantly, the cells' flexibility and attach-ability are expected to give them great potential for extended application in various areas.

Keywords : Electric vehicle (EV), Flexible solar cells, Personal Rapid Transit (PRT), Photovoltaic conversion, Renewable energy

초 록 최근의 신 교통시스템 개발 동향은 주로 지속가능하고 친환경적인 교통수단을 제공하는데 초점이 맞춰져 있다. 그 중에서도, 수요응답형 순환교통(PRT: Personal Rapid Transit) 시스템은 그 가능성 때문에 주목을 받고 있으며, 첨단 전기 자동차(EV) 개발 기술과의 융합을 통해서 경쟁력은 보다 향상되고 있다. 하지만 전기 배터리에 의해 구동되는 차량의 경우 안정적이고 효율적인 운영의 측면에서 기술적인 어려움에 직면하고 있다. 본 논문에서는, 기술적인 난제를 극복하고 전기에너지를 기반으로 한 교통수단의 보급을 증대하기 위하여 태양전지에 의한 보조 전력 공급을 위한 설계적 접근방법에 대해서 모형실험을 통해서 논한다. 그 결과, 실제 차량에 적용했을 시 보조 전원 공급장치로서 일부 서비스 기기에 소요되는 전력량의 대략 11% 정도를 감당할 수 있을 것으로 예측되었다. 특히, 유연소재 태양전지의 장점은 저렴하고 가벼우며 디자인 의도를 최대한 살릴 수 있다는 데 있다. 무엇보다도 유연함과 용이한 부착성은 다양한 분야에서의 확대 적용 가능성을 보여준다.

주요어 : 전기 자동차, 유연소재 태양전지, 수요응답형 순환교통시스템, 광기전력 변환, 신재생에너지

1. 서 론

수요응답형 순환교통(PRT: Personal Rapid Transit) 시스템은 다수의 루프(Loop)를 포함하는 네트워크(Network)로 구성된 노선상에서 수요자의 요구에 대응하여 목적지까지 무정차로 무인 자율주행 방법에 따라서 운영되는 미래형 신 교통수단으로 정의될 수 있다[1]. 특히, PRT 시스템과 같이 유해가스를 배출하지 않고 교통 혼잡을 완화할 수 있는 친환경 대중교통 시스템(Eco-friendly public transportation)은 전 세계적으로 많은 관심을 받고 있다. 그 예로, 태양광[2] 및

자기부상[3] 기술 기반의 PRT 시스템 개발의 가능성이 개념적으로 제기되기도 하였다. 이러한 흐름 속에서 국내에서도 한국철도기술연구원 주관 하에 한국형 PRT 시스템이 2012년부터 개발되고 있다. 한국형 PRT 시스템은 정차 시 자기유도방식(Inductive power transfer)에 의한 무선 급전(Wireless power supply) 방법에 따라 에너지가 공급되며, 공급되는 에너지는 슈퍼커패시터(즉, LIC: Lithium-Ion Capacitors)에 저장된다[4]. 운행 중에는 차량의 에너지 저장장치로부터만 전력을 공급받을 수 있기 때문에 별도의 전원공급이 불가능하여 배터리의 성능이나 효율성을 향상하기 위한 노력이 요구된다.

최근 들어, 한정적인 차상 에너지를 보완하기 위한 보조 전원공급원으로서 신재생에너지(Renewable energy)를 많이 고려하고 있다. 그 중에서도, 태양전지(Solar cell)는 반도체 생산 기술의 향상과 더불어 청정 무한 에너지원인 태

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-460-5673, E-mail : swkang@krrri.re.kr

©The Korean Society for Railway 2014

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.2.94>

양의 빛 에너지를 이용해서 전기에너지를 간편히 생성할 수 있는 장점 때문에 다양한 산업분야에서 적용을 시도하고 있다. 최근 2014 북미가전쇼(CES)에서 소개된 포드 태양광 하이브리드 자동차 ‘C-맥스 솔라에너지’는 태양광 기반의 운송 수단의 상용화가 가까워졌음을 보여준다. 그에 따라 실리콘(Si) 기반의 태양전지 개발 이후 그 종류 또한 늘어나는 추세이며, 구성하는 물질에 따라 실리콘, 화합물반도체와 같은 무기소재로 이루어진 무기(Inorganic) 태양전지[5,6]와 유기 물질을 포함하는 유기 태양전지(OPV: Organic Photo-Voltaic)[5,7]로 구분된다. 유기 태양전지에는 염료감응 태양전지(DSSC: Dye-Sensitized Solar Cell)[5,8,9] 및 유기 폴리머(Organic Polymer) 태양전지가 포함된다. 또한, 태양전지의 구조에 따라 분류될 수 있는데, 이 경우 웨이퍼 구조(벌크 실리콘 태양전지), 박막 구조(화합물, 실리콘 박막 및 유기 폴리머 태양전지) 및 광전기 화학구조(염료감응 태양전지)로 분류될 수 있다. 많은 연구자가 전력 생산 단가를 낮추기 위해 모듈 자체의 효율을 높이거나 제조 비용을 절감하기 위한 연구를 다양하게 수행하고 있다[5]. 특히, 최근 들어 박막 형태의 태양전지 제조기술의 향상과 더불어 최대 단점인 낮은 효율을 극복한 다양한 태양전지가 상용화되고 있다. 본 연구에서는 차량의 디자인 측면을 고려하며 경제적/물리적으로 부담이 적은 유연소재(Flexible) 무기 태양전지를 현재 개발 중인 PRT 차량의 보조 전원공급원으로서의 활용성을 검토해 보고자 한다. 필름형 태양전지는 태양광의 입사 각도나 일사량에 따라 성능의 차이를 보이지만 저렴한, 유연함 및 부착의 용이성 등은 장점이라 할 수 있다.

2. 본 론

2.1 태양광 계측 시스템

2.1.1 태양광 계측 장비

한국형 PRT 차량에 적용될 필름형 태양전지의 효율(PCE:

Fig. 1 (a) I-V characteristic curve measurement system for various solar cell types, such as: (b) 6" wafer, (c) CIGS, (d) DSSC, (e) OPV

Power Conversion Efficiency)을 측정하고 평가하기 위하여 Fig. 1(a)와 같은 옥외 태양광 계측장비를 이용하였다. 본 계측 장비는 옥외 자연광을 이용하여 다양한 형태 및 종류의 태양전지에 대하여 전류-전압 특성곡선(I-V characteristic curve)을 얻을 수 있고 그에 따라 효율을 자동으로 계산해 준다. 측정 가능한 태양전지의 종류에 따른 지그(Jig) 형상은 Fig. 1(b-e)와 같다. 그 외, 각 지그의 구동을 위한 소스 미터(Source-meter, Keithley 2400, M9712 및 K101)가 포함되어 있으며, 측정 당시의 일사량을 측정하기 위한 일사량계(Solar power meter, TES 1333R)와 6" 크기의 태양전지의 효율을 측정할 때 태양전지의 표면 온도를 일정하게 유지해주기 위한 온도 제어장치(McScience T901T solar thermostat)가 추가로 장착되어 있다.

2.1.2 효율 측정 원리

태양전지의 효율(η)[10]은 식 (1)과 같이 표준시험조건(STC: Standard Test Conditions)하에서의 입사광 에너지(P_m)에 대한 최대 출력 에너지(P_{max})의 비로 계산된다. IEC(International Electro-technical Commission) 규격에 명시된 표준시험조건은 표면온도 25°C 및 AM 1.5G(100mW/cm²)의 조도 조건을 의미한다. 최대 출력 에너지는 단락 전류(J_{sc}), 개방 전압(V_{oc}) 및 충전율(FF)의 곱으로 정의된다. 각 변수의 실제 값은 Fig. 2와 같은 전류-전압 특성곡선으로부터 얻어진다. 참고로, 본 곡선은 0V에서부터 개방 전압까지 전압 값을 변화시키면서 전류 값을 측정함에 의해서 정의된다. 여기서 단락 전류(Short-circuit current)란 태양전지 회로가 단락되었을 때 태양전지에 흐를 수 있는 최대 전류로서 광자 유속 밀도(Photon flux density)의 영향을 받는다. 개방 전압(Open-circuit voltage)은 회로가 개방되었을 때 태양전지가 인가되는 최대 전압으로 보통 태양전지의 재조합(Recombination) 정도에 크게 좌우되는 값이다. 충전율(FF : Fill Factor)은 식 (2)와 같이 단락 전류와 개방 전압의 곱에 대한 최대 출력의 비로 나타나는데 셉트(Shunt) 저항이 클수록, 직렬저항이 작을수록 그 값이 증가한다.

Fig. 2 I-V characteristic curve of a typical solar cell and definition of each parameter

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{J_{SC} V_{OC} FF}{P_{in}} \quad (1)$$

여기서,

$$FF = \frac{P_{\max}}{J_{SC} V_{OC}} = \frac{\text{area } A}{\text{area } B} \quad (2)$$

2.1.3 계측 시스템 검증

구축된 계측시스템의 검증을 위하여 교정된 기준 태양전지(Reference solar cell: Si)를 이용하여 효율을 측정하였다. 태양 전지의 전류-전압 특성곡선은 계측장비의 공급업체인 McScience, Inc.에서 제공하는 소프트웨어(K3000)를 이용해서 얻었다. 그 결과, Fig. 3과 같이 측정효율은 대략 11.11%로 기준 태양전지의 공급업체(McScience Inc.)에서 제공한 성적서 효율(15.39%)에 비해서는 다소 낮지만 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 참고로, 성적서 상의 효율은 표준시험조건 하에서 인조광원 및 솔라시뮬레이터(Solar simulator)를 이용해서 측정한 결과이기 때문에 옥외의 자연광 조건에서의 결과 값에 비해 높게 측정된 것으로 판단된다.

Fig. 3 Efficiency measurement of the reference solar cell: (a) Reference solar cell (Si, 20×20mm) (b) Measurement results

2.2 필름형 태양전지의 적용

2.2.1 필름형 태양전지

현재 구축된 계측장비에는 단위 셀(Cell) 및 모듈(Module)을 포함해서 다양한 종류의 태양전지를 계측할 수 있도록 지그가 준비되어 있다. 서론에서 언급된 종류별 태양전지는 예

너지의 생산 원리나 제조 방법이 서로 상이하다. 무기 태양전지는 고전적인 무기 반도체 소자의 p-n접합 다이오드(p-n junction diode)에 의해 광기전력(Photoelectro-motive force)을 생산하는 방법으로 가장 오래되고 범용화된 기술이다. 실리콘(Si) 계열, CdTe, GaAs 및 CIGS(Copper Indium Gallium Selenide)[6] 태양전지 등이 이 범주에 속하는데 가장 큰 장점으로 Table 1에 보이는 바와 같이 유기 태양전지에 비해 높은 효율을 보여준다는 점이다. 특히, 광 흡수 과정 대역을 확장하기 위한 다중 구조(Multi-junction)의 태양전지는 60% 이상의 효율을 보여주기도 하였지만, 모듈로서 상용화되기에는 공정의 신뢰성이 아직 확보되지 못했다[5]. 또한, CIGS 태양전지의 경우 비 실리콘계열 태양전지 중 가장 높은 효율을 보여주지만, 재료(예: Indium)의 희소성, 높은 수입 의존도와 대면적 제작을 위한 높은 공정비용 및 버퍼층(Buffer layer)을 형성하는데 사용되는 재료(예: Cd)의 인체 유해성은 해결해야 할 숙제이다[6]. 그 외, 광합성의 원리를 응용한 염료감응 태양전지(DSSC)[8]나 유기반도체 물질을 근간으로 한 유기 태양전지(OPV)[7]는 박막 형태로의 제조가 쉽고 가격이 저렴하지만, 효율이 낮고 내구성이 좋지 않아서 수명이 짧은 단점이 있다. Table 1은 최근(2013년 7월 기준) 발표된 태양전지의 종류별 공인 효율을 정리한 표이다[11].

최근 들어 무기반도체 소자의 박막 형태의 태양전지 제조 기술(예: MOCVD 혹은 MBE)이 향상됨에 따라 실리콘 계열의 필름형 무기 태양전지의 연구 또한 활발하다[5]. 무엇보다도 박막 형태의 무기 태양전지는 낮은 제작 비용, 소재의 유연함과 검증된 높은 효율 및 내구성 때문에 수요가 증가하고 있다. 이와 더불어 실제 운송 시스템에 적용하는 단계에서는 단순 효율보다는 단위 무게당 출력 에너지 값(Specific weight in Watts per gram)이 더 중요한 요소가 된다[12]. Fig. 4에 나타난 바와 같이 모듈의 성능에서는 단위 셀에 비해서는 큰 성능 차를 보이지 않았기 때문에, 제조 단가 및 모듈의 특성이 중요한 요소가 될 수 있다. 비결정질 실리콘(Amorphous Si) 필름은 상용화된 모듈 중에서는 가장 낮은 효율을 보여주지만, 대량 생산 가능성 및 낮은 생산 단가의 장점 외에 태양광의 입사 각도나 여름철 고온 환경에서의 온도에 대한 영향이 적은 장점이 있다. 따라서 본

Table 1 Confirmed cell and module efficiencies measured under the global AM 1.5 spectrum (100mW/cm²) at a cell temperature of 25°C

Classification		Efficiency [%]		Description (Module)
		Cell	Module	
Inorganic	α-Si	10.1 ± 0.3	10.9 ± 0.4	Oerlikon solar lab, Neuchatel (LG electronics)
	CdTe	19.6 ± 0.4	16.1 ± 0.5	GE global research (First solar)
	CIGS (Thin-film)	19.8 ± 0.6	15.7 ± 0.5	NREL (Miasole)
	c-Si	25.0 ± 0.5	22.9 ± 0.6	UNSW PERL (UNSW/Gochermann)
	Poly-Si	20.4 ± 0.5	18.5 ± 0.4	FhG-ISE (Q-Cells)
	InGaP/GaAs/InGaAs	37.9 ± 1.2	-	Sharp
Organic	DSSC	11.9 ± 0.4	-	Sharp
	Organic (Thin-film)	10.7 ± 0.3	-	Mitsubishi chemical

Fig. 4 Specific weight of various photovoltaic technologies: for complete modules and individual cells

연구에서는 차량 디자인의 의도를 최대한 살리고 상용화되어 가격이 저렴한 실리콘 계열의 필름형 태양전지를 보조 전원공급원으로서 PRT 개발 차량에 적용하고자 한다.

2.2.2 태양전지의 적용(안) 및 효율 측정 결과

본 연구에서는 실제 차량에 적용하기 전의 설계 단계에서의 적용성을 검토할 목적으로 Fig. 5(a)와 같이 실 차량의 1/6 크기의 모형차량을 이용해 효율을 측정하였다. 차량의 루프(Roof)에 맞는 적절한 크기를 가진 PowerFilm사의 MPT15-75 태양전지를 사용했으며 기본 사양은 아래의 Table 2와 같다.

필름형 태양전지를 차량에 부착하기 전에 측정한 결과 계측환경의 차이 때문에 업체에서 제공한 성적서의 효율인 5~7%보다 낮은 결과(대략 3%)를 나타냈으며, 차량 부착 후 측정한 경우 또한 아래의 Table 3과 같이 대략 3~4%의 낮은 효율을 나타내었다. 하지만 이는 계측장비에서 효율을 계산할 때 1sun(100mW/cm²) 기준으로 계산하지만, 실제 태양광 조건은 실험실 환경(표준시험조건)이 아닌 자연광으로 입력되는 광의 특성(Power density 혹은 Wavelength)을 알 수 없는 상황에서의 측정값이기 때문에 효율에 대해서는 단순 비교 자료로만 활용될 수 있다. 이와 더불어 모형 차량의 소재는 합성수지(Resin)로 열전도율이 낮아 태양의 고도가 가장 높은 시간대에는 표면 온도가 대략 65°C도 이상으로 상승하여 성능을 보다 저하한 것으로 판단된다. 이에 본 연구

Fig. 5 Small-scale demonstrations: (a) Flexible solar cells attached on a roof, (b) I-V characteristic and power curves

Fig. 6 Variations of maximum power in specific conditions: (a) Horizontal and (b) Vertical directions

에서는 실제로 태양전지를 적용했을 시 얻을 수 있는 기대 효과인 최대 출력 값(P_{max})을 통해서 그 가능성을 검토하였다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)에서 보이는 바와 같이 태양전지 필름을 전도성 양면테이프를 이용해서 부착했을 경우에 얻어진 전류-전압 특성 곡선을 나타낸다.

실질적으로 차량에의 적용 가능성을 평가하기 위해서 낮 동안(대략 6시간: 오전 10시 ~ 오후 4시) 생산 가능한 전력량을 측정해 보았다. 초가을의 구름 없는 날씨에 오전부터 해가 가려질 시간까지 시간대별로 입사각에 따른 영향을 비교하기 위하여 90°의 차이를 두고 두 가지 방향에 대해서 측정을 시도하였다. Fig. 6은 방향별 측정된 광량 및 출력 에너지량의 측정 결과를 나타낸다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 일사량에 따라 최대 출력 에너지량은 변화하였으며, 예측한 대로 일사량이 줄어들수록 출력 에너지량도 감소하였다. 하지만 방향의 변화에 따른 영향은 크지 않았다. 실험 환경의 특성상 오후 3시경 이후로 해가 가려져 광량이 급격히 떨어져 전체적인 출력 에너지량이 많이 감소함을 확인하였다.

Table 2 Specifications of thin-film solar cell MPT15-75

Operating voltage [V]	Power [W]	Current [mA]	Width [mm]	Length [mm]	Weight [g]
15.4	0.77	50	73	253	13

Table 3 Power conversion characteristics of thin-film solar cell MPT15-75 under natural illumination

V_{OC} [V]	J_{SC} [mA/cm ²]	FF	PCE [%] ^a	V_{max} [V]	I_{max} [A]	P_{max} [W]
54.26	0.11	54.71	3.21	39.32	0.041	1.63

^aCalculated assuming 1 sun AM 1.5G radia 1

Table 4 Power consumption of service equipment

Equipment	Rated capacity [W]	Operating ratio [%]	Number of units	Load [W]
Head light	32	50	4	64
Tail light	32	50	4	64
Dome light	32	100	4	128
LCD	150	100	2	300
Fire alarm	20	100	1	20
Emergency phone	10	100	1	10
Door Control Unit (DCU)	200	50	2	200
Wireless antenna	10	100	1	10
Video transmission device	10	100	1	10
Voice transmission device	10	100	1	10
Total load [W]				816

2.2.3 보조전원 공급원으로서의 가능성 검토

실제 차량의 적용 시에도 모형실험에 적용된 방법과 마찬가지로 PRT 차량 외형 디자인의 심미성과 전력 생산의 효율성을 극대화하기 위해 아래의 Fig. 7과 같이 차량의 루프에 필름형 태양전지를 설치하고자 한다. 부착 가능한 루프의 면적은 대략 3.88m^2 이며, 계측에 사용된 필름형 태양전지의 면적은 0.055m^2 이다. 이에 따라, 실 차량의 루프에 부착 가능한 필름형 태양전지 모듈의 개수는 본 실험에 사용된 모듈의 크기로 대략 70개로 예측되었고, 최대 출력 에너지(Maximum power point) 기준으로 대략 114W의 전력 혹은 549.92Wh(가로 방향)/506.1Wh(세로 방향)의 전력량(즉, Fig. 6에서 푸른색 영역의 넓이)이 생산 가능할 것으로 예측되었다. 현 차량의 주요 서비스 기기 전력 소비(예측)량은 위의 Table 4와 같으며 전체적으로 요구되는 전력의 총합은 816W로 필름형 태양전지를 사용할 경우 일부 서비스 기기(등 구류, 전송장치 및 통신장치)에 전력을 공급할 수 있을 것으로 기대된다. 즉, Fig. 6과 같이 6시간을 운영한다고 가정했을 때 요구되는 전력량은 4,896Wh이고 태양전지에 의해 대략 11%정도의 전력 공급이 가능하다고 할 수 있다. 또한, 표면의 온도 조건이 현재보다 개선된다면 더욱 향상된 성능을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 7 Estimated areas for attachment of flexible solar cells on the roof of the PRT vehicle

3. 결 론

본 논문에서는 모형 차량을 이용한 실험 결과를 토대로 필름형 무기 태양전지를 이용하여 현재 개발 중인 PRT 차량에 보조 전원을 공급하는 것이 가능한지에 대해서 검토하였다. 연구에 사용된 필름형 태양전지는 유선형 디자인이 많은 현재 차량 외형 디자인의 의도를 그대로 살리면서 적용할 수 있고 가벼우며 내구성이 좋은 장점이 있다. 하지만 태양 전지의 적용 시 차량 형상의 특성 때문에 태양광의 입사 각도에 따라서 성능이 저하될 수 있다는 단점을 확인하였다. 하지만 그 적용 가능성을 실험적 방법을 통해서 성공적으로 입증하였고, 실제 차량에 적용했을 시 보조 전원 공급장치로서 일부 서비스 기기에 소요되는 전력량의 대략 11% 정도를 감당할 수 있을 것으로 예측되었다.

후 기

본 연구는 산업기술연구회에서 지원하는 한국철도기술연구원의 2014년도 기관주요사업인 “수요응답형 순환교통시스템(PRT) 핵심기술 개발(PK14006)”과제의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

References

- [1] J.H. Irving, H. Bernstein, H., C.L. Olson, J. Buyan (1978) *Fundamentals of Personal Rapid Transit: Chapter 1. Service Concepts*, D.C. Health and Company, Lexington M.A., pp. 1-31.
- [2] R. Baertsch (2008) Solar-powered personal rapid transit (PRT): electric vehicles without batteries or congestion, *Proceedings of the Solar Conference*, 2, pp. 1180-1201.
- [3] R. Baertsch, J. Dunnmon (2010) Renewable energy use advantages of maglev-based personal rapid transit, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2146(1), pp. 69-75.
- [4] B-H. Kim, R.-G. Jeong, S.-G. Chung, S.-W. Kang (2013) A

development of the electric power supply system for PRT vehicle, *The Transactions on the Korean Institute of Electrical Engineers*, 62(2), pp. 196-200.

- [5] W.S. Han, H.S. Kim, B.S. Choi, D.K. Oh (2007) Trends of the next-generation solar cell technology, *ETRI Electronics and Telecommunications Trends*, 22(5), pp. 86-94.
- [6] J.H. Kim (2010) Compound semiconductor CIGS thin film photovoltaic devices, *Ceramist*, 13(3), pp. 13-22.
- [7] J.-Y. Lee, S. Yoo, B. Kim (2012) Toward the commercialization of organic photovoltaic cells, *Physics & High Technology*, 21, pp. 20-30.
- [8] S.H. Seo, D.Y. Lee, W.J. Lee (2007) Photoelectrochemical dye-sensitized solar cell technology, *Physics & High Technology*, 16, pp. 16-19.
- [9] Y. Jo, J. Lim, H. Nam, Y. Jun (2009) Electrochemical approaches to dye-sensitized solar cells, *Journal of the Korean Electrochemical Society*, 12(4), pp. 301-310.
- [10] S.K. Ahn, K.S. Shin, K.H. Yoon (2011) Performance evaluation technique for solar cells (measurement and correction), *Polymer Science and Technology*, 22(6), pp. 570-576.
- [11] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop (2014) Solar cell efficiency tables (version 43), *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(1), pp. 1-9.
- [12] M. Kaltenbrunner, M.S. White, E.D. Głowacki, T. Sekitani, T. Someya, N.S. Sariciftci, S. Bauer (2012) Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility, *Nature Communications*, 3:770, pp. 1-7.

Seok-Won Kang : swkang@krri.re.kr

New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Soo-Jin Han : sjhan1215@krri.re.kr

New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Rag-Gyo Jeong : rgjeong@krri.re.kr

New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Hyuck Keun Oh : hkoh@krri.re.kr

High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Sangwon Ko : sko@krri.re.kr

Eco-Transport Research Division, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Doocho Choi : dhchoi@krri.re.kr

New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do 437-757, Korea

접수일(2013년 10월 22일), 수정일(2014년 3월 10일),
게재확정일(2014년 3월 19일)