차세대 태양전지의 활용 동향 및 스마트 텍스타일 하이브리드 에너지 하베스팅 소자의 미래전망에 관한 연구 : 산업 소재와의 융합 중심

박붕익 대구대학교 자유전공학부 교수

A Study on the Application Trends of Next-Generation Solar Cells and the Future Prospects of Smart Textile Hybrid Energy Harvesting Devices : Focusing on Convergence with Industrial Materials

Boong-Ik Park
Professor, Division of Liberal Studies, Daegu University

요 약 본 논문에서는 차세대 태양전지로 대표되는 유기, 염료 감응형, 페로브스카이트 태양전지의 최신 연구 동향과 건축, 조형예술, 의류패션 등 분야를 막론한 다양한 산업의 소재로의 과제와 활용 가능성을 분석하였다. 더불어, 웨어러블 IoT 장치와 결합하여 자연 및 인공광과 우리 몸의 움직임에 따라 생성되는 크고 작은 진동 에너지를 전기에너지로 공급하는 역할을 하게 될 '스마트 텍스타일 하이브리드 에너지 하베스팅 소자'의 새로운 미래전 망과 그 가능성을 제시하였다. 차세대 태양전지와 마찰 압전소자를 융합한 '하이브리드 텍스타일 에너지 하베스팅 디바이스'는 4차 산업혁명 시대의 웨어러블 IoT 기기에 소재 자체로 결합하여 새로운 '융합 일체형 스마트 의류'로 발전할 것이다. 이 연구가 제안한 차세대 나노기술과 소자가 에너지 하베스팅 기능을 갖는 스마트 섬유 소재 분야에 적용되고, 미래 의류 산업에 융합되어 의료, 헬스케어 등 다양한 분야에 AI 서비스 제공하는 창의적인 제품으로 진화하는 패러다임의 전환점이 되길 바란다.

주제어: 차세대 태양전지, 텍스타일, 하이브리드 에너지 하베스팅, 융합 일체형 스마트 의류, 미래전망

Abstract In this paper, we analyzed the latest research trends, challenges, and potential applications of next-generation solar cell materials in various industrial fields. In addition, future prospects and possibilities of Smart Textile Hybrid Energy Harvesting Devices that will supply electricity by combining with wearable IoT devices are presented. The hybrid textile energy harvesting device fused next-generation solar cells with tribo-piezoelectric devices will develop into new 'Convergence Integrated Smart Wear' by combining the material itself with wearable IoT devices in the era of the 4th industrial revolution. The next-generation nanotechnology and devices proposed in this paper will be applied to the field of smart textile with an energy harvesting function. And we hope it will be a paradigm shift that evolves into creative products which provide AI services such as medical & healthcare by convergence with the future smart wear industry.

Key Words: Next-Generation Solar Cells, Textile, Hybrids Energy Harvesting, Convergence Integrated Smart Wear, Future Prospects

1. 서론

최근 코로나 19 이후 4차 산업혁명은 급격히 우리 생활 곁으로 다가왔다. 사물인터넷과 인공지능 등의 기 술이 현실화 되었고, 이를 구현하기 위해 소형 모바일장 치 및 전자제품의 수요가 폭발적으로 증가하고 있다. 다 국적 기업과 국가의 4차 산업혁명 관련 제품과 서비스 를 생산하는 과정에서 배출되는 온실가스의 적극적 관 리가 더욱 심각해지는 온난화 문제와 에너지 부족 현상 을 해소하기 위한 필수 요소가 된 것이다[1]. 지구 온난 화의 영향을 늦추기 위해 순 탄소 배출량을 줄이는 것은 21세기의 가장 시급한 과제 중 하나가 되었다. 2018년 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 '지구 온난화 1.5℃ 특별보고서'를 통해 지구 평균 온도 상승 폭을 1.5도 이하로 억제하기 위해서 오는 2030년까지 전 세 계가 이산화탄소 배출량을 지금의 절반까지 감축해야 한다고 하였다[2]. 따라서 온실가스를 거의 배출하지 않 는 신재생에 에너지에 관한 중요성이 더욱 대두되었고, 전기에너지를 효율적으로 생산하고 전송하며 화석연료 의 의존도를 절대적으로 낮추는 차세대 신재생 에너지 기술로의 전환이 필수적 요소가 되었다.

최근 본연의 기능과 외형적인 다양성에만 집중되었던 조형·건축 및 산업제품의 디자인 분야에서도, 심각해지는 제품의 탄소 발자국(Carbon Footprint) 및 환경문제와 에너지 부족 이슈로 인해 인식의 변화가 일어나고 있다[3-5]. 화석연료가 유발하는 치명적인 지구온난화와 환경오염 문제가 우려되면서 산업제품과 건축, 조형 분야에서도 청정에너지에 관한 관심의 증가와함께, 여러 형태로 재사용할 수 있는 차세대 신재생에너지(Renewable Energy)의 활용과 기술 융합의 중요성이 커지고 있다. 신재생 에너지원은 풍력, 열, 진동,마찰, 태양광 등이 있으며 최근 이와 관련된 진보된 연구가 활발하게 이루어지고 있다[6]. 그중 본 논문에서는 나노테크놀로지 이용해 우리 주변의 태양광 에너지를하베스팅(Energy Harvesting) 하는 차세대 태양전지의다양한 산업 분야의 미래활용에 초점을 맞추고자한다.

위의 차세대 태양전지로 대표되는 유기 태양전지 (Organic Solar Cell, OSC), 염료 감응형 태양전지 (Dye-Sensitized Solar Cell, DSSC) 및 페로브스카이 트 태양전지(Perovskite Solar Cell, PSC)는 고분자 소재를 기반으로 하기 때문에 결정형 실리콘으로 만드

는 기존의 태양전지와는 다르게 투명하고 유연한 박막형태의 소자구현이 가능하다. 또 저온 용액공정과 다양한 코팅기법으로 생산 비용이 낮고 대량생산이 용이하다. 더불어 차세대 태양전지는 나노기술의 발전으로 매우 간단한 공정을 통해 유연하고, 제작자가 원하는 자유로운 크기와 모양, 다양한 색상으로 디자인할 수 있어 모바일 전자기기는 물론 제품디자인 분야와 건축 관련 시설물에 감각적 적용이 가능하다는 큰 장점이 있다. 즉 가지각색인 형태의 산업제품이나 조형물에 태양전지를 적층하기 쉽고, 심지어는 섬유나 종이에 코팅이나 염색 기법으로 도포하여 에너지 하베스팅 기능을 갖는 기능성 완제품을 제작할 수 있는 것이다.

세계 유수의 저널에서 나노소재를 이용한 차세대 에너지 하베스팅 소자의 다양한 시제품 타입이 발표되고 있다. 진보된 나노기술로 유연하고 투명하며 접착성, 신축성, 침투성, 발수성, 생체적합성 등이 획기적으로 개선된 신소재와 에너지 하베스팅 기능을 갖는 나노 소자가 개발되고 있다. 나노 소재기술과 ICT 발달로 산업디자이너의 창의적 감성과 결합한 다양한 기능의 전자장치 구현이 가능해진 것이다.

이 연구는 다수의 2020년 이후의 최신 저명 SCI 논문을 리뷰 하여 조형 및 산업디자인 종사자들에게 '차세대 에너지 하베스팅 소자'의 기본지식과 연구현황을 소개하고 '텍스타일 기반 하이브리드 에너지 하베스팅 소자'의 새로운 응용 분야를 제안하는데 가장 큰 목적이 있다. 본문에서는 차세대 태양전지로 대표되는 유기, 염료 감응형, 페로브스카이트 태양전지의 국내외 최신연구 동향과 건축, 조형예술, 의류패션 등 분야를 막론한 다양한 융합 산업의 소재로의 과제와 활용 가능성을 새롭게 분석하였다. 더불어 웨어러블(Wearable) IoT 장치와 결합하여 자연 및 인공광과 우리 몸의 움직임에따라 생성되는 크고 작은 진동 에너지를 전기에너지로 공급하는 역할을 하게 될 '융합 일체형 스마트 의류'의 독창적인 미래전망 및 그 가능성을 제시하고자 한다.

2. 차세대 태양전지 소자와 소재의 활용과 연구현황

2.1 산업제품과 조형·건축 분야

본 절에서는 최근 주목받는 유기 태양전지, 염료감응 태양전지, 페로브스카이트 태양전지 등을 적용한 산업 제품과 소재를 소개하고 차세대 태양전지의 활용 분야 의 새로운 가능성을 분석하고자 한다. 대안으로 제시된 차세대 태양전지들은 무기물 기반의 실리콘 태양전지 에 비해 상대적으로 낮은 효율과 안정성을 보여주고 있 지만, 가볍고 유연(Flexible)한 특성으로 휴대 가능한 제품에 적합하고 나노기술의 발전으로 고효율 실내 발 전 등에 적합한 특성들을 보여주고 있어 최근 더욱더 주목받고 있다.

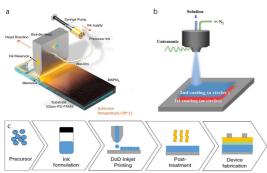


Fig. 1. Schematics of (a) Slot-Die-Coating, (b)Ultrasonic -Spray-Coating and (c) Inkjet-Printing process for thin film solar cells

차세대 태양전지는 유연하고 투명한 기판이나 산업 제품에 낮은 단가로 자유롭게 적용할 수 있는 장점이 있다. 이는 결정질 실리콘 태양전지와는 다르게 용액공 정을 기반으로 하므로 얇은 박막 형태의 태양전지 소자 를 구현할 수 있는 것이다. 즉, 스핀 코팅(Spin Coating)과 Fig. 1 (a) 슬롯다이코팅(Slot Die Coating), (b) 스프레이코팅(Spray Coating), (c) 잉크 젯 프린팅(Inkjet Printing) 등의 매우 간단한 저온 및 액상 공정이 가능하여 낮은 비용으로 필름 형태의 제품 을 대량생산할 수 있는 이점이 있다[7-9].

차세대 유기 태양전지는 실리콘 기반 태양전지와 비 교하여 흡광 특성이 1000배 이상 높고, 태양광을 흡수 하여 전기를 생산하는 활성층(Active Layer)의 두께가 수백nm로 매우 얇아 자유로운 형태와 다양한 색상으 로 제작 가능하며, 가볍고 휘어지는 유연 전자기기나 산업제품 및 조형물에 설치해 전기 에너지원으로써의 역할을 기대할 수 있다. 수년 전에는 이미 많이 보급되 고 상용화된 실리콘과 기반의 태양전지에 비해 유기 태 양전지의 에너지변환 효율이 매우 낮은 편이었다. 하지 만 최근 나노기술을 활용한 소재 및 구조체의 비약적 발전으로 18% 이상의 높은 에너지변환 효율 갖는 유기 태양전지의 관련 연구결과가 보고되고 있다[10].





Fig. 2. A photo of solar powered tents and a bag covered by flexible organic solar

최근 상용화 수준으로 에너지 효율을 높이고 실용적 인 형태와 색깔을 가진 관련 제품이 속속 출시되고 있 다. 차세대 유기 태양전지는 구부리거나 접을 수 있는 제품에 활용 가능하여, Fig. 2와 같이 두루마리 형태의 텐트에 부착하거나 가볍고 얇은 특성으로 가방 표면에 적용되어 전기에너지를 생산하는 기능을 갖는 제품으 로 출시되고 있다[11].

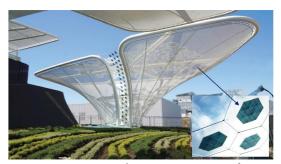


Fig. 3. A photo of 'Organic Solar Trees' from **BELECTRIC**

또 차세대 유기 태양전지는 특정 시설물에서 독립적 으로 전기를 생산하는 '건물 일체형 태양광 발전시스 템'(Building Integrated Photovoltaic System, BIPV)으로 개발되고 있다. Fig. 3처럼 차세대 태양전지 는 곡선형 조형물이나 건축물을 설계하고 디자인할 때 형태, 색상, 투명도 등의 미적 측면을 고려한 아키텍처 (Architecture)와 적용할 수 있는 소재의 선택폭을 크 게 높이고, 신재생 에너지원으로서 다양한 조형·건축 분야에 호환성 및 효율성을 고려하여 에너지 하베스팅 기능을 더한 활용이 가능하다[12].

염료 감응형 태양전지는 태양광을 흡수할 수 있는 다채로운 색깔의 고분자성 나노 염료 입자를 선택하여, 투과 특성 변경이 용이한 필름 형태로 제작 가능해 심 미성과 투광성을 부각할 수 있는 분야에 사용할 수 있 다. 즉 염료 감응형 태양전지는 원하는 색상으로 투명· 반투명한 예술작품이나 건축물의 창호로 손쉽게 만들 수 있어 조형적 아름다움을 충족시키면서도 실용적으 로 전기에너지를 하베스팅 할 수 있는 시설물 적용에 큰 이점이 있다. Fig. 4는 염료 감응형 태양전지를 이용 해 'Swiss Tech Convention Center'의 반투명 유리 외벽을 조성한 BIPV의 예이다.



Fig. 4. 'Swiss Tech Convention Center' come from dye-sensitized solar cells integrated into the facade in panels made by Solaronix

2021년 한국에너지기술원, UNIST, 로잔공대 연구 진은 세계 최고 에너지변환 효율의 페로브스카이트 태 양전지를 개발했다. 전기전도성이 뛰어난 결정구조의 무기물과 유연한 유기 혼합물을 소재로 하는 페로브스 카이트 태양전지의 광전효율을, 결정질 실리콘 태양전 지와 맞먹는 25.6%까지 10년 남짓한 짧은 기간에 달성 한 것이다[13].



Fig. 5. A semi-transparent and flexible perovskite solar cells with contrasting levels of light transparency

Fig. 5와 같은 페로브스카이트 태양전지는 향후 값비싼 실리콘 태양전지를 대체하여 낮은 비용과 다양한형태와 색상으로 BIPV 및 관련 제품에 적용될 것으로전망된다. 즉, 건축가들과 산업디자이너들이 시설물을건설하거나 해당 제품을 디자인할 때 차세대 태양전지

를 적극적으로 활용한다면 창의적 심미성 물론 다 기능 적인 친환경 전기에너지 생산능력까지 얻을 수 있다.

2.2 의류와 직물 분야

ICT 기술의 발달로 사물인터넷(IoT) 관련 전자기기는 급격히 경량화·초소형화되고 있으며 신체에 부착하거나 입는 웨어러블 제품의 확산으로 이어지고 있다. 사용자가 이질감 없이 IoT 제품들을 착용할 수 있다면 IT서비스를 제공해야 하는 웨어러블 기기의 목적에 맞는 기능을 안정적이고 효율적으로 수행할 수 있다. 4차 산업혁명 시대의 웨어러블 기기의 폭발적 발전과 증가와같은 새로운 변화는, Fig. 6처럼 의류나 착용 가능한 패션 소재에 차세대 태양전지 에너지 하베스팅 장치의 인체공학적인 결합을 자연스럽게 이끌 것이다. 웨어러블 IoT 장치는 차세대 태양전지가 융합하여 추가적인 배터리나 충전 없이도 독립적으로 전기에너지를 하베스팅 하는 자가발전(Self Powered) 형태로 진화할 것이다[14].



Fig. 6. Wearable solar cloth and fashion ornaments

나아가 웨어러블 디바이스에 텍스타일(Textile) 기반의 차세대 태양전지 소재를 적용하기 위한 수많은 연구가세계 유수의 대학과 기업 및 국가 연구소 진행되고 있다[15]. 차세대 섬유를 이용하여 높은 효율로 태양광전기에너지를 생성하는 기초 연구와 이 소재를 실제 의류로 제작하기 위한 시도가 그것이다. 구체적으로 Fig. 7과 같은 섬유 전극 역할을 하는 이산화타이타늄 나노튜브 위에 얇고 연속적인 페로브스카이트 층을 증착하여 차세대 텍스타일 페로브스카이트 태양전지를 개발한 사례가 최근 보고되었다. 이 텍스타일 태양전지는 -40 ~ 16 0℃에서 240시간 동안 높은 안정성의 에너지변환 효율을

나타내어 텍스타일 기반의 태양전지를 실제 섬유나 의류 로 제작 가능함을 보여주었다[16].

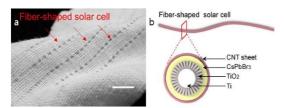


Fig. 7. a) Photograph of a textile perovskite solar cell (scale bar 1cm). b) Schematic illustration to the fiber-shaped solar cell

최근 의류에 다양한 센서를 탑재하여 사람의 체온, 심 박수, 심전도, 근전도, 땀 분비량 등의 생체 정보를 수집하 는 웨어러블 스마트 의류(Smart Wear)의 상품화가 본격 화되었다[17]. 기능성 웨어러블 전자장치의 개발은 차세 대 태양전지 에너지 하베스팅 기능이 적용된 '스마트 텍 스타일'(Smart Textile)의 융합으로 더욱더 가속화될 수 있다. 기능성 스마트 텍스타일은 자연스럽게 태양광 에너 지를 하베스팅 하여 웨어러블 IoT 기기의 다양한 생체센 서에 전기를 공급할 수 있을 것이다. 본문에 소개된 직물 기반의 차세대 태양전지는 매우 다양한 웨어러블 및 모바 일 전자기기의 자가발전 에너지원으로 전기에너지 자가 수집 기능과 더불어, 제품디자인을 훼손하지 않고 심미적 인 요소가 더욱 부각된 산업제품의 개발을 이끌 것이다.

3. 차세대 태양전지 과제와 새로운 미래활용 전망

3.1 차세대 태양전지의 과제

4차 산업혁명 시대를 맞이한 지금, 저전력 소자 및 웨어러블 전자기기의 역할이 점점 두드러짐에 따라 차 세대 태양전지의 활용 분야와 사용되는 환경특성을 고 려한 맞춤형 연구가 필요한 시점이다. 그중 웨어러블 & 모바일 IoT 기기가 실제 많이 사용되는 저조도나 실내 조명 환경에서의 전기에너지 하베스팅에 관한 연구의 중요성이 대두되고 있다. 어떠한 환경 조건에서도 원활 하게 전자기기를 사용할 수 있게 태양광이 약하게 입사 되는 곳이나 실내 인공조명의 폭넓은 광도 범위에서 전 기에너지 생산이 용이한 차세대 태양전지의 개발 시급 한 것이다.

고려대학교 심재원 교수팀과 울산과학기술원 송현곤 교수팀은 각각 저조도용 유기 태양전지와 DSSC 소자 를 최근 발표하였다. 연구결과 저조도의 실내조명하에 IoT 소자 구동을 선보여 차후 상용화 가능성을 보여주 었다[18-20]. 이와 같은 IoT 기기의 전력원으로 특히 실내 광을 활용한 저조도 태양전지의 발전방식이 필수 적인데, 차세대 태양전지는 실외발전용 태양전지와 비 교했을 때 열화 스트레스, 에너지 효율, 동작 환경이 판 이하므로 다양한 환경 요인의 이해와 최적화의 시간이 아직은 다소 필요하다. 따라서 차세대 태양전지가 실제 활용되는 다양한 환경에서 효율적으로 전기에너지를 공급하기 위해서는 유기, 염료, 페로브스카이트 차세대 태양전지의 안정적인 에너지변환 효율 확보와 신뢰성 을 담보할 수 있는 새로운 소재 및 제조 공정의 보다 적극적인 연구개발이 필요할 것이다.

3.2 차세대 태양전지 새로운 미래활용 전망

3.2.1 하이브리드 태양전지의 개발 필요성

지금까지 태양전지는 상당 부분 실외발전에 초점을 두고 개발이 진행됐다. 하지만 IoT 기기를 사용하는 장 소에 따라 자연 및 인공 광량이 천차만별이므로 저조도 차세대 태양전지 개발은 물론 '간헐적 전력생산'과 같은 태양광 소자의 한계점을 극복해야 한다. 이를 위해서 압 전·마찰전기(Piezoelectric & Triboelectric) 에너지 하베스팅 소자와의 융합을 통한 하이브리드 태양전지 시 스템의 개발도 병행되어야 할 것이다.

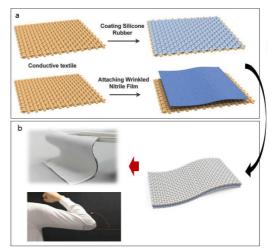


Fig. 8. Fabrication process of the T-TENG and Image of a TENG textile attached to the shirts on the elbow location

Fig. 8은 2021년 저널 'Nano Energy'에 발표된 텍스타일 기반 마찰전기 나노 발생 장치(Textile based Triboelectric Nanogenerator, T-TENG) 이다. 이 장치는 한쪽 전도성 텍스타일에 양(Positive) 의 마찰전기 에너지를 발생시키는 주름 나이트릴 필름(Wrinkled Film of Nitrile)과 반대쪽의 실리콘 고무로 코딩된 전도성 텍스타일을 그림 8(b) 와 같이 스티칭(Stitching) 하여 만든 직물 기반 나노 마찰 에너지 하베스팅 소자이다[21]. 이 소자는 인간의 다양한종류의 움직임에 의한 미세한 압전·마찰 에너지가 양쪽 텍스타일의 진동이나 마찰을 유발하면 전하의 분극 현상과 전위차가 텍스타일 내에 생성되어 전기에너지를 발생시킨다.

앞 절에서 소개한 텍스타일 소재 차세대 태양전지와 위의 직물 기반 압전·마찰 압전소자의 '하이브리드 에너지 하베스팅 장치'를 하나의 의류로 제작한다면 사람의 움직임에 의해 발생하는 진동·마찰 에너지와 생활속 자연 및 인공광 에너지를 손쉽게 하베스팅 할 수 있는 '스마트 의류'의 개발이 가능할 것으로 예상한다. 본연구에서 제안된 '스마트 의류'와 같이 다음 세대의 하이브리드 에너지 하베스팅 기능을 갖는 제품들은 추가적인배터리나 전력원이 없이도 저조도나 심지어 태양광이 없는 환경에서 사람의 미세한 동작으로 생성되는 '미세 에너지를 하베스팅 하는 나노 시스템'(Nano Energy Nano System, NENS)으로 IoT 기기에 전력 공급을 가능하게 할 것이다.

3.2.2 스마트 텍스타일 하이브리드 에너지 하베스팅 소자의 새로운 활용전망 제시

다양한 기능의 웨어러블 전자장치는 평상복과 산업용 작업복, 헬스케어·스포츠의류에 적용되고 있다. 유연하며 투명하고 신축성, 침투성, 접착성, 발수성, 생체적합성 등의 소재특성이 개선된 초소형의 웨어러블 소자의 연구도 계속되고 있다. ICT와 나노 소재기술의 발전으로 향상된 에너지 하베스팅 기능과 새로운 사물인터넷 서비스 제공이 가능한 제품 연구도 활발히 진행될것으로 예상한다.

앞으로는 각종 텍스타일 기반 전자기기를 의류 자체에 제작할 수 있으므로 스마트 섬유 분야의 엄청난 성장과 변화가 일어날 것이다. 따라서 다양한 기능 갖는 새로운 스마트 텍스타일 소재와 공정의 개발은 웨어 러블 기기에 적용과 활용을 위해 필수적이다. 본 연구에서 제안하고 제시한 그림9의 'Fiber Synthesis' 같은 차세대 나노기술과 제조 공정은 에너지 하베스팅 기능을 갖는 스마트 섬유 소재 분야에 적용될 것이고 미래의류 산업에 융합되어 웨어러블 IoT 제품으로 상용화될 것이다. 스마트 텍스타일은 하이브리드 에너지 하베스팅 소자를 통해 다양한 웨어러블 IoT 장치와 결합하여 우리가 자연스럽게 일상생활을 하면서 얻게 되는 여러 형태의 에너지를 전기에너지로 변환해 공급하게 된다. 이 소자는 태양광이나 실내조명, 일상생활 움직임에의해 발생하는 압전, 마찰 에너지를 하베스팅 하여 전기에너지로 변환하고 이를 자가 전력원으로 하는 웨어러블 IoT 디바이스의 각종 생체센서(Biometric Sensor)나 통신 장치 등을 동작시킬 수 있을 것이다.

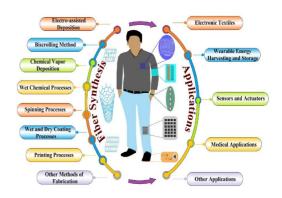


Fig. 9. Illustration of the overall structure of the fiber synthesis and applications in smart wear

또 Fig. 9의 'Application'은 본 논문이 제안한 스마트 의류의 미래활용 방향을 보여준다. 구체적으로 스마트 텍스타일 위에 융합된 여러 섬유 생체센서를 통해우리 몸의 온도, 심전도, 근전도, 호흡수, 심박 수 등의생체 정보를 수집할 수 있을 것이다. 미래에는 자가발전 기능을 갖춘 스마트 텍스타일 기반 웨어러블 IoT 디바이스로 수집한 우리 몸의 생체 자료를 AI 기술로 분석하여 헬스케어, 의료 등의 각종 ICT 서비스를 외부충전이나 추가 배터리 없이 지속적으로 제공할 수 있게된다. 다양한 용도의 스마트 의류 자체를 텍스타일 기반 생체센서와 하이브리드 에너지 하베스팅 디바이스를 결합하여 제작할 수 있는 것이다. 즉 의류 소재인 텍스타일로 IoT 장치와 에너지 수집장치를 동시에 구현한 진정한 의미의 새로운 '융합 일체형 스마트 의

류'(Convergence Integrated Smart Wear)의 제작을 기대할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 다수의 2020년 이후의 최신 페이퍼를 분 석하여 조형 및 산업디자인 종사자들에게 기본지식과 연구현황을 소개하고 새로운 응용 가능성을 제시하는 데 가장 큰 목적이 있다. 최신 유명저널과 Impact Factor가 높고 산업디자인 및 조형 관련 분야 학술인 들은 접하기 쉽지 않은 SCI 논문 내용을 알기 쉽게 리 뷰하고 '스마트 텍스타일 하이브리드 에너지 하베스팅 소자'의 과제와 새로운 미래전망을 제시하였다.

더욱더 심각해지는 온난화와 환경오염 및 에너지 부 족 이슈로 인해 관련 산업과 제품디자인 분야에서도 패 러다임의 변화가 일어나고 있다. 즉 화석연료가 유발하 는 온실가스의 배출 관리를 위해 차세대 태양전지와 같 은 신재생 에너지가 그 해법으로 주목받고 있다. 유기, 염료 감응형, 페로브스카이트 등의 차세대 태양전지는 가볍고, 투명하고 유연하며 저렴한 공정특성으로 BIPV 같은 곡선형 조형물이나 건축물, 관련 산업제품을 설계 하고 디자인할 때 미적 측면을 고려한 활용 가능하다. 즉 가지각색인 형태의 건축·조형물이나 예술작품 자체 에 손쉽게 태양전지를 적층하기 쉽고, 심지어는 텍스타 일이나 의류에 나노 코팅 등과 같은 다양한 차세대 공 정으로, 태양광 에너지를 하베스팅 하는 기능의 제품을 제작자의 감수성을 충분히 반영하여 자유로운 디자인 으로 제작할 수 있는 것이다. 차세대 나노기술과 공정 은 에너지 하베스팅 기능을 갖는 스마트 섬유 소재 분 야에 적용되고, 미래 의류 산업에 융합되어 웨어러블 IoT 제품으로 상용화될 것으로 예상한다.

앞으로는 웨어러블 IoT 전자기기의 전력 공급을 위 해 실내 저조도의 환경과 인체 활동의 미세한 움직임을 이용해 전기에너지를 수집하는 복합 하베스팅 소자가 필요하다. 차세대 태양전지와 마찰·압전소자를 융합한 텍스타일 기반 '하이브리드 에너지 하베스팅 디바이스' 는 그 대표적인 대안이다. 텍스타일 하이브리드 에너지 하베스팅 디바이스는 4차 산업혁명 시대의 웨어러블 IoT 기기에 소재 자체로 결합하여 새로운 '융합 일체형스마 트 의류'로 발전할 것이며, 나아가 의료, 헬스케어 등 다 양한 분야에 AI 서비스 제공하는 창의적인 제품으로 진 화할 것이다. 나아가 이러한 차세대 기술은 웨어러블 제

품이나 의류의 내구성 및 심미성을 훼손하지 않고 관련 산업 분야에 광범위하게 융합되고 적용될 것이다.

본 연구에서는 나노기술이 적용된 차세대 에너지 하 베스팅 소재와 소자의 최신 연구 동향을 리뷰하고, 새 로운 '스마트 텍스타일 하이브리드 에너지 하베스팅 소 자'를 전망하였다. 이 연구를 통해 광범위한 산업 분야에 종사하는 연구자들이 차세대 에너지 하베스팅 소재를 활 발히 활용하는 계기가 되길 바란다. 앞으로 본문의 신소 재와 소자의 독창적인 응용과 적용 분야는 제품을 제작 하고 디자인하는 사람들의 창의적 아이디어 방향에 의 해 실현될 수 있을 것이다. 나아가 본 논문이 차후 건축, 조형, 첨단전자 및 패션, 기능성 의류 등 해당 분야의 관 련 시설물을 설계하거나 산업제품을 디자인할 때 위와 같은 차세대 소재를 적극적으로 이용하는 '기술 융합' 패러다임의 전환점이 되길 간절히 희망하는 바이다.

REFERENCES

- [1] M. Riede, D. Spoltore & Karl. (2021). Organic Solar Cells-The Path to Commercial Success. Advanced Energy Materials, 11(1), 2002653. DOI: 10.1002/aenm.202002653
- [2] Intergovernmental Panel Change(IPCC). (2020). Global warming of 1.5 °C, (Online). https://www.ipcc.ch/sr15/
- [3] K. U. Kwon. (2019). A Study on the Energy Performance Evaluation of Building Evaporative Cooling System for Building Construction in Response to Climate Change. Journal of Convergence for Information Technology, 9(1), 54-60.

DOI: 10.22156/CS4SMB.2019.9.1.054

- [4] D. S. Seo. (2021). EV Energy Convergence Plan for Reshaping the EuropeanAutomobile Industry According to the Green Deal Policy. Journal of Convergence for Information Technology, 11(6), 40-48.
 - DOI: 10.22156/CS4SMB.2021.11.06.040
- [5] H. J. Park. (2019). A Study on the Educational Game Design for Practicing Energy Saving in Elementary School Students. Journal of Convergence for Information Technology, 9(5),

DOI: 10.22156/CS4SMB.2019.9.5.014

[6] R. M. Elavarasan et al. (2020). A Comprehensive Review on Renewable Energy Development, Challenges, and Policies of Leading Indian States With an International Perspective. *IEEE Access*, 8, 74432-74457.

DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2988011

- [7] A. S. Subbiah et al. (2020). High-Performance Perovskite Single-Junctionand Textured Perovskite /Silicon Tandem Solar Cells via Slot-Die-Coating. ACS Energy Letters, 5(9), 3034-3040. DOI: 10.1021/acsenergylett.0c01297
- [8] J. Cheng et al. (2020). Intensification of Vertical Phase Separation for Efficient Polymer Solar Cell via Piecewise Spray Assisted by a Solvent Driving Force. RRL Solar, 4(3), 1900458. DOI: 10.1002/solr.201900458
- [9] M. Buffiere et al. (2020). Inkjet-Printed Compact TiO₂ Electron Transport Layer for Perovskite Solar Cells. Energy Technology 8(10), 2000330. DOI: 10.1002/ente.202000330
- [10] Y. Cai et al. (2021). A Well-Mixed Phase Formed by Two Compatible Non-Fullerene Acceptors Enables Ternary Organic Solar Cells with Efficiency over 18.6%. Applied Materials Early View, 33(33), 2101733.
 DOI: 10.1002/adma.202101733
- [11] L. Li et al. (2018). Recent advances of fexible perovskite solar cells. *Journal of Energy Chemistry*, 27(3), 673-689.

 DOI: 10.1016/j.jechem.2018.01.003
- [12] Q. Li & A. Zanelli. (2021). A review on fabrication and applications of textile envelope integrated flexible photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 139,* 110678. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110678
- [13] J. Jeong et al. (2021). Pseudo-halide anion engineering for α-FAPbI₃ perovskite solar cells. Nature, 592, 381-385. DOI: 10.1038/s41586-021-03406-5
- [14] J. Zhang, W. Zhang, H. M. Cheng & S. Silva. (2020). Critical review of recent progress of flexible perovskite solar cells. *Materials Today*, 39, 66-88.

DOI: 10.1016/j.mattod.2020.05.002

- [15] M. Shabbir, S. Ahmed & J. N. Sheikh. (2020). Textiles in Solar Cell Applications. Frontiers of Textile Materials: Polymers, Nanomaterials, Enzymes, and Advanced Modification Techniques. DOI: 10.1002/9781119620396.ch10
- [16] L. Xu et al. (2020). Perovskite solar cell textile working at 40 to 160°C. Journal of Materials Chemistry A, 8, 5476-5483. DOI: 10.1039/C9TA13785H

[17] B. I. Park. (2020). A Study on the Latest Trends and Development Prospects of Wearable Healthcare Industry: Focusing on Healthcare Products and Latest Research of a Renowned International Journal. Journal of Next-generation Convergence Technology Association, 4(2), 161-172.

DOI: 10.33097/JNCTA.2020.04.02.161

[18] Y. J. You et al. (2019). Highly Efficient Indoor Organic Photovoltaics with Spectrally Matched Fluorinated Phenylene Alkoxy benzothiadiazole Based Wide Bandgap Polymers. Advanced Functional Materials, 29(27), 1901171.

DOI: 10.1002/adfm.201901171

[19] B. M. Kim et al. (2020). Indoor light energy harvesting dye sensitized photo rechargeable battery. *Energy & Environmental Science, 13,* 1473-1480.

DOI: 10.1039/c9ee03245b

[20] M. H. Lee et al. (2021). Electrochemically Induced Crystallite Alignment of Lithium Manganese Oxide to Improve Lithium Insertion Kinetics for Dye-Sensitized Photorechargeable Batteries. ACS Energy Letters, 6(4), 1198-1204.

DOI: 10.1021/acsenergylett.0c02473

[21] J. Zhu et al. (2021). Machine learning enabled textile-based graphene gas sensing with energy harvesting-assisted IoT application. *Nano Energy*, 86, 106035.

DOI: 10.1016/j.nanoen.2021.106035

박 붕 익(Boong-Ik Park)

[정회원]



- 2009년 2월 : 포항공과대학교 정 보통신공학과(석사)
- · 2013년 8월 : 포항공과대학교 전 자전기공학과(박사)
- · 2015년 4월 ~ 현재 : 대구대학교 자유전공학부 부교수
- · 관심분야 : 차세대 에너지 하베스팅 소자&소재, 웨어러블 디바이스
- · E-Mail: boongik@daegu.ac.kr