Check for updates

Journal of Climate Change Research 2021 Vol. 12, No. 1, pp. 037~047
DOI: http://dx.doi.org/10.15531/KSCCR.2021.12.1.037

# 태양전지 분야 주요 5개국의 연구논문 동향 및 기술수준 조사·분석

하수진 · 김지예 · 오상진†

녹색기술센터 기술총괄부 연구원

# Photovoltaics Research Trend Analysis and Technology Level Evaluation for Five Major Countries

Ha, Su-Jin · Kim, Jiye and Oh, Sang Jin†

*Researcher, Division of Technology Supervision, Green Technology Center, Seoul, Korea*

## ABSTRACT

Traditional power generation methods based on fossil fuels cause many environmental concerns such as global warming and climate change. Photovoltaics can produce electricity using sunlight, which is a sustainable natural energy source. Thus, photovoltaics are an attractive replacement to overcome these environmental issues and a promising option for addressing climate change. This study sought to determine photovoltaics research trends and analyze the current technology level of five major countries to inform technology development strategies.

In this study, we collected research paper data related to photovoltaics for five major countries (Korea, USA, China, Japan, and EU). Then, we analyzed research activity and research influence, and compared these results for two periods, 2011-2014 and 2015-2019. We also extracted top 5 research institutes having high time cited figures in each country. Finally, based on an expert evaluation method (the Delphi method), we conducted quantitative and qualitative analysis on current technology level by country. The survey results included technology level, technology gap, technology level group, and R&D competency in fundamental and application development technology stages.

***Key words***: *Global Warming, Climate Change, Solar Cells, Photovoltaic, Research Trend, Technology Level Evaluation*

## 1. 서론

화석연료를 기반으로 한 전통적인 전력 생산 방식은 그 과정에서 기후변화, 지구온난화, 대기오염 등의 많은 환경 문제를 야기한다(Sampaio et al., 2018). 한편, 현대의 생활 방식에서 가전제품 및 휴대용 전자기기 등의 사용 증가에 따라 전력 소비는 지속적으로 증가하고 있으며(Sampaio et al., 2018), 기후변화를 일으키는 주요 원인인 온실가스의 배출량도 상승하고 있는 추세에 있다(Choe et al., 2013). 이러한 관점에서, 태양전지 기술은 화석연료를 사용하지 않고 영구적인 에너지원인 태양빛을 활용하여 전력을 생산할 수 있기 때문에 기후변화를 해결할 수 있는 효과적인 에너지 기술수단으로 주목받고 있다(Liu et al., 2019; Im, 2015).

그러나, 온실가스 감축과 기후변화 대응을 위한 국제적인 합의(2015년 파리협약)가 형성되었음에도 불구하고, 파리협약 목표를 달성하기 위해서는 2030년까지 2018년 전세계 태양전지 생산 용량인 480 GW의 6배, 2050년까지는 18배에 해당하는 태양전지를 추가 설치하여야 한다(IRENA, 2019). 즉, 기존의 태양전지 기술 수준으로는 필

† **Corresponding author** : rurouni628@gtck.re.kr (04554, 17th floor, Namsan Square Bldg., 173, Toegye-ro, Jung-gu, Seoul, Republic of Korea. Tel. +82-2-3393-3988)

**ORCID** 하수진 0000-0002-7361-5810 오상진 0000-0003-4782-7016
김지예 0000-0002-2427-8176

Received: December 01, 2020 / Revised: December 21, 2020 / Accepted: January 08, 2021

요한 수요 전력을 충족하고 기후변화 대응에 어려운 점이 있어, 현재의 태양전지 기술을 뛰어넘을 수 있는 기술혁신이 필요하다(Noh et al., 2017). 또한, 기후변화 대응의 미래 핵심기술로써 차세대 태양전지 또는 혁신 기술과 관련하여 선도적 기술 우위를 점하는 것이 요구될 것이다. 이에 따라, 기술혁신을 위해서는 먼저 태양전지 관련 기술이 과거부터 최근까지 어떻게 발전을 해왔는지, 미래사회 및 인류에게 필요한 기술개발 수요가 무엇인지를 파악하여 연구 동향 및 현재의 기술수준을 분석하고, 이를 토대로 과학기술 개발을 위한 전략적 의사결정을 수립하는 것이 매우 중요할 것이다.

한편, 연구 동향 및 현재의 기술수준 분석을 위해서는 전문가 집단의 의견을 바탕으로 하는 델파이 조사 방법이 활용되어 왔다(Flostrand et al., 2020; Gwon et al., 2018; Kim et al., 2017). 델파이 조사 방법은 전문가의 직관적인 판단을 이용하는 기법으로, 제시된 주제에 대해 특정 전문가그룹이 합의를 도출하는 방식으로 진행된다(Crisp et al., 1997). 그러나 현대에 들어서면서 기술의 발전 속도가 점점 가속화됨에 따라 이에 상응하는 연구논문, 특허 및 연구보고서와 같은 기술동향 정보의 생산량도 비약적으로 증가하고 있다. 따라서 과학기술개발 전략을 수립하는 과정에서 전문가 기반의 의견수렴 방식만으로는 빠르게 변화하는 기술들에 대한 객관성 있는 기술수준 비교가 어려운 실정이다. 이와 관련하여, 몇몇 연구자들은 연구논문, 특허 등의 정량항목에 대한 조사·분석을 통해 관련 과학기술 분야의 연구개발수준과 동향을 파악하고자 노력해왔다.(Huang et al., 2019; Sampaio et al., 2018; Choe et al., 2013; Mohammad et al., 2019; Li et al., 2020) 특히, 태양전지 분야에서는 맵핑 방법을 활용한 특허분석(Sampaio et al., 2018), 논문 인용 네트워크 분석(Choe et al., 2013), 특허 및 미디어 데이터 분석을 통한 연구동향 분석(Li et al., 2019), 텍스트 마이닝을 활용한 연구논문 및 특허 갭 비교 분석(Li et al., 2019) 등의 연구동향 및 기술수준에 대한 분석이 수행되었다.

이러한 과정의 연장선상으로, 본 연구에서는 연구개발 성과인 연구논문을 바탕으로 하여 태양전지 관련 주요 5개국가의 연구개발 동향을 분석하고 전문가 델파이 조사를 바탕으로 한 기술수준 조사·분석 결과를 제공하고자 한다.

## 2. 연구방법

본 연구에서는 태양전지 분야의 연구논문 동향 및 기술수준을 정량적인 측정과 정성적인 측정방법 2가지를 적용하여 분석하였다. 정량적인 측정방법으로 논문 동향 분석을, 정성적인 측정방법으로 전문가 델파이 조사를 수행하였으며, 우리나라를 포함한 주요 5개국(한국, 미국, 중국, 일본, EU)을 대상으로 분석하였다.

먼저 논문 동향 분석의 경우, 태양전지와 관련하여 도출된 키워드를 기반으로 검색된 논문정보를 분석대상으로 하였다. 논문정보를 검색하기 위해서 Web of Science (WOS) 정보플랫폼을 활용하였다. Web of Science (WOS)는 Clarivate Analytics가 제공하는 데이터베이스로 Science Citation Index Expaned (SCIE)와 Social Sciences Citation Index (SSCI) 등에 게재된 6,000만개 이상의 레코드를 동시 검색할 수 있다. 이때, 논문정보 검색키워드는 다음과 같다.

- TS=((((solar*) near/2 (battery OR batteri* OR recharg* OR cell* OR generat*)) OR solarcell* OR solarbatter* OR photovoltaic* OR photo-voltaic* OR (photo near/1 voltaic*)) near/2 (module* OR inverter* OR ((thin*) near/1 (sheet* OR film* OR membran*)) OR silicon* OR efficien* OR effectiv*))

논문정보 검색 시에 논문의 제목, 초록, 저자 키워드(Author Keyword), 인용 문헌 기반 키워드(Keyworld Plus)의 4가지 항목을 중심으로 검색범위를 설정하였으며, 2010년부터 검색 시점인 2020년 6월까지 게재된 Article, Letter, Reprint, Review 형태의 21,537개 논문을 분석 대상으로 하였다.

논문의 동향분석 과정에 있어서 가장 우선하여 태양전지와 관련 없는 데이터에 대해서는 검토 후 배제하였다. 이후, 분석대상의 논문은 태양전지 관련 주요 5개국(한국, 미국, 중국, 일본, EU)에 소속된 기관에서 게재한 것으로 제한하였다. 이때, 논문이 2명 이상의 저자, 2개 이상의 기관(국가)에 소속되어 있는 경우 각각 1개의 논문을 게재한 것으로 고려하였다.

연구 동향분석을 위해서 2010년에서 2014년까지는 과거 구간, 2015년부터 2019년은 최근 구간으로 설정하고, 과거/최근 구간별 및 국가별 논문의 게재 건수, 저자의 수, 연구 활동력(Activity), 연구 영향력(Influence)을 기본 측정항목으로 하여 분석하였다. 연구 활동력(Activity)은 논문게재건수(A)/저자수(B)이며, 연구 영향력(Influence)는 논문피인용지수(C)/논문게재건수(A)로 정의하였다.

마지막으로 전문가 델파이 조사를 통하여 주요 5개국의 태양전지 분야 기술수준 및 기술격차를 평가하였다. 본

델파이 조사는 2020년 7월부터 10월까지 수행되었으며 태양전지 분야 전문가 11명을 대상으로 총 2차례에 걸쳐 실시하였다. 1차 델파이의 경우 각 전문가가 기술수준, 기술격차, 기술수준그룹, 연구수행능력 등을 평가하였고, 2차 델파이의 경우 1차 델파이의 결과를 제시하여 전문가들이 응답을 수정하는 방식으로 수행하였다. 구체적으로, 기술수준의 경우에는 먼저 주요 5개국 중 최고기술보유국을 조사한 후 최고기술보유국의 기술수준을 100%로 환산하여 최고기술 보유국 대비 그 외 국가의 기술수준을 평가토록 하였다. 기술격차는 최고기술 보유국의 기술격차를 0년으로 하고, 최고 기술 보유국의 현재 기술수준까지 도달하는데 소요될 것으로 예측되는 시간을 평가하도록 하였다. 그 다음으로 국가별 기술수준그룹을 선도(Leading), 추격(Chasing), 후발(Following), 낙후(Lagging) 그룹으로 나누어 전문가 평가 응답 비율을 비교 분석하였다. 선도그룹은 기술 분야를 선도하고 있는 그룹, 추격그룹은 선진기술의 모방개량이 가능한 그룹, 후발그룹은 선진기술의 도입 적용이 가능한 그룹, 낙후그룹은 연구개발 능력이 취약한 그룹으로 정의하였다. 또한, 국가별 기술수준그룹을 종합 분석하기 위해 전문가 응답을 4점 리커트 척도로 점수화한 후 100점 만점으로 환산하여 나타내었다. 국가별 기술수준그룹을 종합 분석한 결과는 4점 리커트 척도 기준으로 3.5점 이상일 경우 선도, 2.5점 이상 3.5점 미만일 경우 추격, 1.5점 이상 2.5점 미만일 경우 후발, 1.5점 미만일 경우 낙후그룹으로 판단하였다. 마지막으로는 연구개발 단계 중 원천 및 응용개발 단계에서의 연구수행 능력에 대해 매우우수, 우수, 보통, 부족, 매우부족의 5점 리커트 척도로 비교 평가를 수행한 후 100점 만점으로 환산하여 나타내었다. 국가별 연구수행능력을 종합 분석한 결과는 5점 리커트 척도 기준으로 4.5점 이상일 경우 매우우수, 3.5점 이상 4.5점 미만일 경우 우수, 2.5점 이상 3.5점 미만일 경우 보통, 1.5점 이상 2.5점 미만일 경우 부족, 1.5점 미만일 경우 매우부족으로 판단하였다.

## 3. 연구결과

### 3.1 전체 연구 동향 분석

연구 동향 분석대상인 2010년부터 2020년 6월까지 게재된 태양전지 관련 유효논문의 수와 국가별 유효논문 수는 Table 1과 같다. 상기의 유효논문은 논문 정보 검색키워드로 받은 논문 데이터에서 필요항목, 분야 등에 대한 검토를 진행한 후 실제 데이터 분석에 활용된 논문을 말한다. 전체 분석대상 논문 21,537건을 기준으로 가장 많은 논문을 게재한 국가는 중국(7,694건)으로 35.7%의 비율을 차지하고 있었다. 다음으로 EU 6,429건(29.9%), 미국 3,389건(15.7%), 한국 2,588건(12.0%), 일본 1,437건(6.7%) 순으로 나타났다.

Table 1. The results of effective papers researched about solar cells

| Country | Number of papers | | Period |
|---|---|---|---|
| Korea | 21,537 | 2,588 (12.0%) | 2010.01. ~ 2020.06. |
| US | | 3,389 (15.7%) | |
| China | | 7,694 (35.7%) | |
| Japan | | 1,437 (6.7%) | |
| EU | | 6,429 (29.9%) | |

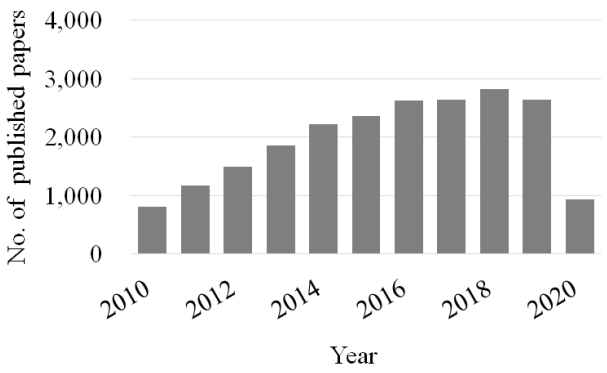



Fig. 1. The number of published papers per year

전체 분석대상 논문의 연도별 게재 추이는 Fig. 1과 같다. 과거 2010년부터 2014년까지는 비교적 선형적인 증가 추이가 나타났다. 반면, 2015년부터 2019년까지 논문의 게재 건수가 소폭 증가하거나 유지되는 경향을 보였다. 이를 통해서, 과거 5년 동안 태양전지 관련 연구가 지속해서 증가하였으며, 최근에는 활동 수준이 과거 5년과 비슷한 수준으로 유지되는 것을 알 수 있다. 최근 2020년에 논문의 게재 건수가 급격히 감속한 것은 논문 검색 시기가 6월인 것에 따른 것으로 사료된다.

### 3.2 연도별 연구 동향 분석

주요 국가별 연구 동향을 분석하기 위해서 개별 국가의 연도별 논문 게재 추이를 Fig. 2와 같이 나타내었다. 전반적으로 한국, 미국, 일본, EU는 2016년까지 혹은 2017년까지 소폭 증가하다 이후 감소하는 경향이 나타났다. 구체적으로 한국은 2014년 329건, 2015년 321건, 2016년 329건으로 해당 시기에 논문이 가장 많이 게재되었다. 미국은 2016년 426건, 일본은 2017년 190건, EU의 경우는 2016년과 2017년에 각각 757건, 758건으로 해당 시기에 가장 많은 논문이 게재된 것으로 나타났다. 다른 4개 국가와 달리 중국은 2019년까지 지속해서 논문의 게재 건수가 증가하는 경향이 나타났으며, 연평균 대략 120건씩 증가하여 2019년에는 1,235건이 게재되었다.

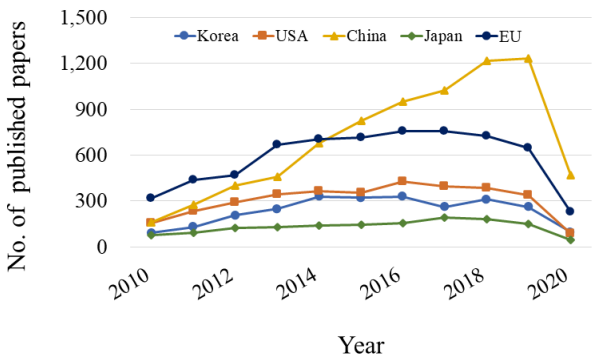
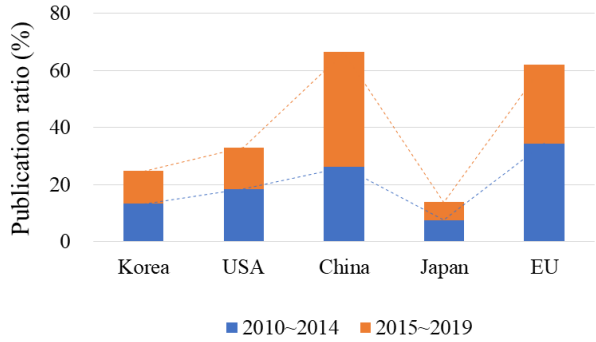
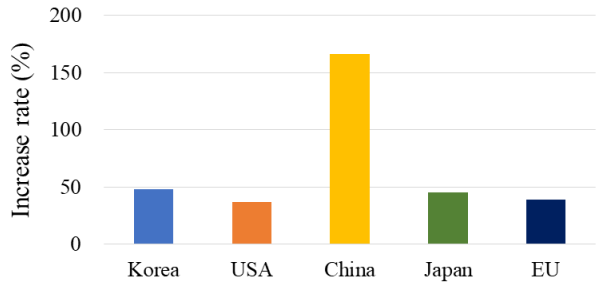



Fig. 2. The number of published papers per year for each country

주요 5개국 대비 각 국가의 과거(2010년 ~ 2014년)와 최근(2015년 ~ 2019년) 5년 연구논문의 비중을 Fig. 3(a)과 같이 비교하였다. 2010년에서 2014년 게재된 논문을 기준으로 EU는 전체 논문 대비 34.5%로 가장 높은 게재 비중을 차지하고 있었다. 다음으로는 중국 26.2%, 미국 18.5%, 한국 13.4%, 일본 7.5% 순으로 나타났다. 그러나 2015년에서 2019년 게재된 논문을 기준으로 비교했을 때, 중국의 논문 비중은 14% 증가한 40.2%로 주요국 5개국 중 가장 높게 나타났다. 다음으로 EU 27.6%, 미국 14.6%, 한국 11.4%, 일본 6.3% 순으로 나타났으며 이는 과거와 유사한 수준으로 볼 수 있다. 이러한 결과를 통해 최근 5년 동안 태양전지 분야에서의 중국의 논문 정보 생산력이 상당히 증가하였음을 유추할 수 있다. 각 국가의 과거(2010년 ~ 2014년) 대비 최근(2015년 ~ 2019년) 5년의 논문 증가비율은 Fig. 3(b)와 같이 나타났다. 앞서, Fig. 3(a)에서 유추할 수 있는 것과 같이, 중국의 논문 생산 증가비율은 과거 대비 166%로 드러났으며. 다음으로는 한국이 47.8%, 일본 45.2%, EU 38.7%, 일본 45.2% 증가 순으로 나타났다.




(a) The ratio of published papers




(b) The increase rate of published papers for each country

Fig. 3. (a) and (b) in past (2010~2014) and current (2015~2019) 5 years period

### 3.3 연구 활동력 및 영향력 분석

태양전지 분야의 주요 국가별 활동력 및 영향력을 계산하여 해당 연구 분야의 연구역량을 비교하고자 하였다. 주요 국가별 활동력은 Table 2 및 Fig. 4와 같다. 2010년에서 2014년 게재된 논문을 기준으로 국가별 연구 활동력을 살펴보면, 한국이 1.26으로 가장 높은 수준으로 확인되었다. 그 다음으로 중국과 미국이 1.23과 1.22로 비슷한 수준의 연구 활동력을 나타냈다. 상위 3개 국가는 5개 국가의 평균 활동력인 1.19에 비해 3%에서 6% 높은 수치였다. 특히, 한국이 높은 연구 활동력을 보이는 것은 비교적 적은

연구자 수(796명)에도 불구하고 높은 논문생산량 수치에서 비롯된 것으로 추정된다. 중국과 미국은 한국의 연구자 수 대비 각각 2배, 1.4배 많은 연구자가 태양전지 분야에서 연구를 수행하고 있었다. 반면, 일본과 EU의 연구 활동력은 각각 1.14와 1.12이었으며 연구 활동력 평균치에 못 미치는 수준이었다. 특히, 일본의 경우에는 연구자 수 및 게재 논문 수 모두에서 주요 5개국 중 가장 낮은 수준에 위치한 것으로 나타났다.

2015년에서 2019년 게재된 논문들을 대상으로 국가별 연구 활동력을 살펴보았다. 가장 높은 연구 활동력을 보이는 국가는 일본(1.03)이었다. 그 다음으로 미국 0.99, EU 0.95, 한국 0.91, 중국 0.78 순으로 나타났다. 주요국 전체 연구 활동력 평균은 0.93으로 이보다 높은 연구 활동력의 국가는 일본, 미국, EU이었다. 반면, 한국과 중국의 최근 5년 연구 활동력은 평균 대비 각각 0.98배, 0.84배 수준이었다. 상대적으로 한국의 연구 활동력은 평균과 유사한 수준이었고 중국은 평균보다 0.15p 낮아 다른 국가들의 연구 활동력과 큰 차이를 보였다. 그러나 절대적으로 중국의 연구자 수(6,769명) 및 게재 논문 수(5,253건)는 모두 5개국 대비 모두 가장 높은 수준이었다.

Table 2. The number of research activities for each country

| Period | Korea | USA | China | Japan | EU | Avg. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2010 ~ 2014 | 1.26 | 1.22 | 1.23 | 1.14 | 1.12 | 1.19 |
| 2015 ~ 2019 | 0.91 | 0.99 | 0.78 | 1.03 | 0.95 | 0.93 |

Fig. 4에서는 과거(2010년 ~ 2014년)와 최근(2015년 ~ 2019년) 연구 기간 동안의 연구 활동력을 비교하였다. 우선 과거와 최근 5년 평균 연구 활동력의 차이를 확인한 결과, 1.19에서 0.93으로 0.26p 감소하여 과거 대비 78% 수준으로 나타났다. 상기 결과를 통해서, 과거 대비 최근 태양전지 분야의 연구 활동력이 전체적으로 약 20% 감소했다는 것을 알 수 있다. 연구 활동력과 관련된 2개의 논문 및 연구자 수 항목을 살펴보면, 상기 기간 동안 연구자는 약 2.4배 증가하였으며, 논문의 경우 약 70% 증가한 것으로 나타났다. 각 국가별 연구 활동력 변화를 살펴보았다. 한국은 0.35p 감소하여 과거 대비 72%, 미국은 0.23p 감소하여 과거 대비 81%, 중국은 0.45p 감소하여 과거 대비 0.63%, 일본은 0.11p 감소하여 과거 대비 90%, EU는 0.17p 감소하여 과거 대비 85% 수준으로 나타났다. 태양전지 분야 주요 5개 국가 중에서 중국의 과거 대비 최근 5년 연구 활동력의 감소폭이 가장 크게 나타났다. 그 다음으로는 한국, 미국, EU, 일본 순으로 나타났다. 이와 관련하여, 중국의 과거 대비 최근 5년 연구자 수는 대략 4.2배 증가하였으며 논문은 그에 비해 낮은 2.7배 증가하였다. 한국의 경우에는 연구자 수는 대략 2.1배 증가하였으며 논문은 1.5배 증가하였다. 그 외 미국, 일본, EU의 경우는 모두 비슷한 수준의 연구자(1.6 ~ 1.7배) 및 논문(1.4 ~ 1.5배) 증가 경향을 보였다.

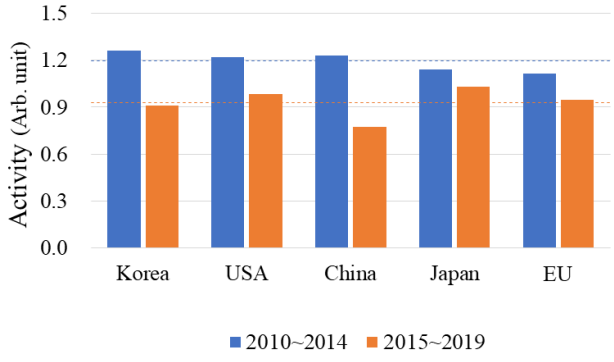



Fig. 4. The research activities in past (2010~2014) and current (2015~2019) 5 years period for each country

그 다음으로 태양전지 분야의 주요 국가별 연구 영향력을 살펴보았으며 그 결과는 Table 3과 Fig. 5와 같다. 2010년에서 2014년 게재된 논문을 기준으로 국가별 연구 영향력을 살펴보았을 때, 미국이 109.7로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 EU, 중국, 일본, 한국 순으로 나타났다. 연구 영향력이 가장 높은 미국의 영향력을 100% 기준으로 하여 국가별 영향력을 살펴보면 EU는 61%, 중국은 48%, 일본은 37%, 한국은 36% 수준이었다. 연구 영향력과 관련한 항목으로 피인용수를 국가별로 비교하였다. EU가 가장 높았으며, 이는 연구 영향력 최고 국가인 미국 대비 대략 1.2배 수준이었다. 그 다음으로 중국은 미국의 70%, 한국과 일본은 모두 20% 수준이었다.

2015년에서 2019년 게재된 논문을 기반으로 연구 활동력을 살펴보았다. 가장 높은 연구 영향력을 보이는 국가는 미국(34.8)이었으며, EU(20.0), 일본(17.4), 한국(17.0), 중국(16.2) 순으로 나타났다. 연구 영향력이 가장 높은 미국

의 영향력을 100% 기준으로 하여 국가별 영향력을 살펴보았다. EU는 미국 대비 57%, 일본은 50%, 한국은 49%, 중국은 47% 수준이었다. 피인용 건수를 기반으로 살펴보면, 중국이 가장 높았으며 이는 미국 대비 약 1.6배 수준이었다. 그 다음으로는 EU는 1.1배 수준이었다. 한국과 일본은 각각 미국 대비 40%와 20% 수준이었다.

Table 3. The number of research influence for each country

| Period | Korea | USA | China | Japan | EU | Avg. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2010 ~ 2014 | 39.2 | 109.7 | 52.4 | 40.7 | 67.0 | 61.8 |
| 2015 ~ 2019 | 17.0 | 34.8 | 16.2 | 17.4 | 20.0 | 21.1 |

Fig. 5에서는 과거(2010년~2014년)와 최근(2015년~2019년) 연구 기간 동안의 연구 영향력을 비교하였다. 다만, 본 분석결과에서는 과거와 최근의 연구 영향력 값의 절대적 비교는 수행하지 않았으며, 국가별 영향력의 변화 경향만 살펴보았다. 이는 피인용 건수가 시간에 따라 누적되는 특성을 고려한 것이다. 과거와 최근 5년 동안 연구 영향력이 가장 높았던 국가는 모두 미국이었으며, 특히 2010년부터 2014년까지의 시기에는 상대적으로 연구의 중심이 미국에 많이 집중되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 2015년에서 2019년까지의 시기에는 이전 시기 대비 미국의 연구 영향력이 크게 감소되었으며, 미국 외 4개 국가의 영향력은 대체로 비슷한 수준인 것으로 나타났다.

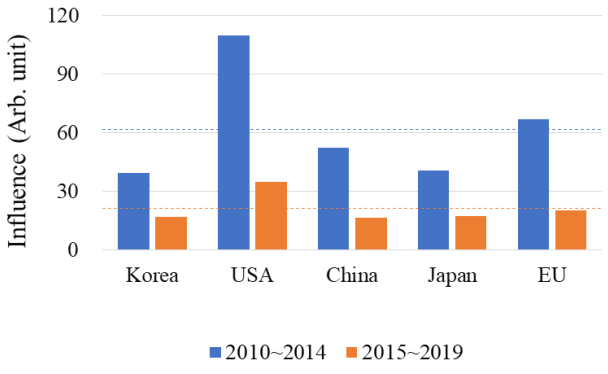



Fig. 5. The research influence in past (2010~2014) and current (2015~2019) 5 years period for each countries

### 3.4 상위 연구기관 분석

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 과거(2010년~2014년)와 최근(2015년~2019년) 연구 기간 동안의 연구 피인용수의 합이 큰 상위 5개 연구기관을 도출한 결과이다. 2010년에서 2014년 동안 게재된 논문을 기준으로 피인용 수가 큰 한국의 연구기관은 차례대로 한국화학연구원, 서울대학교, 성균관대학교, 고려대학교, 울산과학기술원 이었다. 해당 기간 동안 한국의 전체 피인용 건수를 기준으로 살펴보면, 한국화학연구원은 17%, 서울대학교는 10%, 성균관대학교는 9%, 고려대학교는 8%, 울산과학기술원은 7%이었다. 상위 5개 기관 피인용 건수의 합은 전체의 51%에 해당하였다. 미국의 피인용수의 합이 큰 연구기관은 University of Nebraska (5%), National Renewable Energy Laboratory (NREL, 4%), University of Washington (4%), University of California, Los Angeles (UCLA, 3%), Los Alamos National Laboratory (3%) 순으로 나타났다. 상위 5개 연구기관 피인용 합은 미국 전체의 20% 수준으로 확인되었다. 중국의 경우에는 차례대로 Chinese Academy of Sciences (CAS, 27%), University of the Chinese Academy of Sciences (UCAS, 9%), Xi'an Jiaotong University (6%), Peking University (6%), The Hong Kong University of Science and Technology (5%) 순으로 확인되었다. 중국 상위 5개 기관은 중국 전체의 52% 수준이었으며 특히, CAS 기관에서 상대적으로 높은 피인용 건수를 보이고 있었다. 일본의 경우에는 Kyoto University (9%), Kaneka Corporation (5%), National Institute for Materials Science (5%), ADEKA Corporation (5%), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST, 5%)로 확인되었다. 상위 5개 기관의 피인용 건수는 일본 전체 대비 28% 수준으로 확인되었다. 앞서 살펴본 다른 국가와는 달리 일본의 경우 상위 연구 기관에서 2개의 화학회사가 포함되어 있는 것이 특징인데, 이로부터 일본의 태양전지 분야에 대한 기초·원천연구가 산업계에서도 활발하게 이루어지고 있다는 것을 유추할 수 있다. 마지막으로 EU의 경우. Ecole polytechnique federale de Lausanne (Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL, 10%)를 처음으로, University of Oxford (4%), Imperial College London (2%), Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (Fraunhofer ISE, 1%), Helmholtz-Zentrum Berlin (1%) 순으로 나타났다. 상위 5개 기관의 피인용은 EU 전체 대비 18% 수준으로 나타났다. 이와 관련하여, 최상위

기관인 EPFL이 차순위인 University of Oxford와 2배 이상의 피인용 건수를 나타내는 등 상대적으로 높은 피인용수를 가지고 있는 것으로 확인되었다.

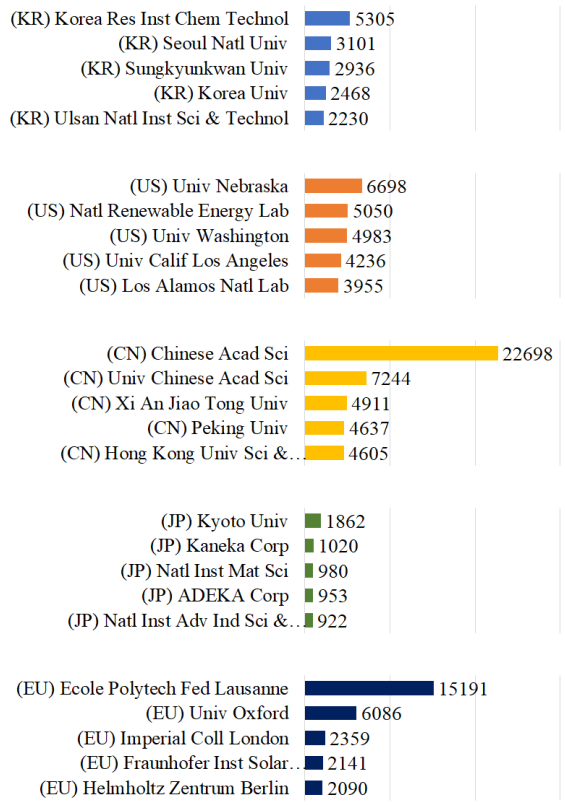



Fig. 6. The top 5 research institutes for each country in past (2010~2014) 5 years period

2015년에서 2019년 동안 게재된 논문을 기준으로 연구 피인용수의 합이 큰 연구기관을 살펴보았다. 한국의 연구기관 중 연구 피인용이 큰 기관은 차례대로 한국화학연구원(21%), 한국과학기술원(KAIST, 9%), 성균관대학교(9%), 고려대학교(8%), 연세대학교(7%)이었다. 상위 5개 기관의 피인용 건수의 합은 전체의 52%에 해당하였다. 상기 결과로부터 최근 10년 간 한국에서 태양전지 분야의 R&D는 한국화학연구원에 상대적으로 집중되어 있다는 사실을 알 수 있었다. 미국의 경우에는 University of California, Los Angeles (UCLA, 26%), Stanford University (12%), University of California Berkeley (10%), University of Washington (9%), National

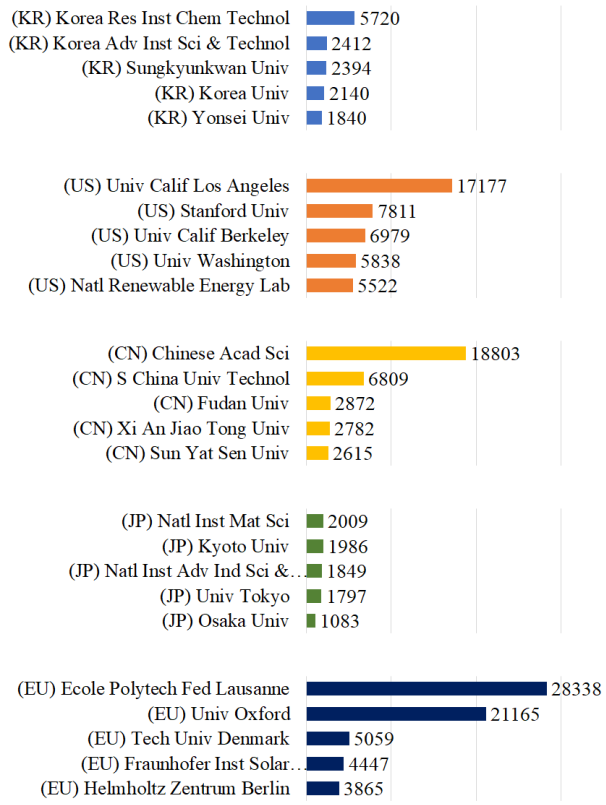



Fig. 7. The top 5 research institutes for each country in current (2015~2019) 5 years period

Renewable Energy Laboratory (NREL, 8%) 순으로 나타났다. 상위 5개 연구기관의 피인용 합은 미국 전체의 64% 수준으로 나타났다. 중국의 경우에는 차례대로 Chinese Academy of Sciences (CAS, 17%), South China University of Technology (6%), Fudan University (3%), Xi'an Jiaotong University (3%), Sun Yat-sen University (2%)로 확인되었다. 중국 상위 5개 기관의 피인용 수의 합은 중국 전체의 31% 수준이었으며, 특히, CAS 기관에서 상대적으로 높게 나타났다. 일본의 경우에는 National Institute for Materials Science (14%), Kyoto University (14%), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST, 13%), The University of Tokyo (13%), Osaka University (8%)로 확인되었다. 상위 5개 기관의 피인용 건수는 일본 전체 대비 63% 수준이었다. 마지막으로, EU의 경우에는 Ecole polytechnique federale de Lausanne (EPFL, 37%), University of Oxford (28%), Technical University of Denmark (7%), Fraunhofer

Institute for Solar Energy Systems (Fraunhofer ISE, 6%), Helmholtz-Zentrum Berlin (5%) 순으로 나타났다. 상위 5개 기관의 피인용 수의 합은 EU 전체 대비 83% 수준으로 나타났다. 이와 관련하여, 상위 2개 기관의 피인용 건수의 합이 65% 수준으로 특히 2개 기관에 많이 집중되어 있었다.

다음으로, 과거(2010년 ~ 2014년)와 최근(2015년 ~ 2019년) 연구 기간 동안의 피인용 건수의 합이 큰 상위 5개 연구기관을 대상으로 상세 비교 분석하였다. 우선 한국의 경우에는 최근 10년 동안 지속적으로 한국화학연구원이 태양전지 분야의 연구 영향력이 큰 것으로 확인되었으며, 특히 최근 5년 동안의 피인용 건수는 전체 대비 21%로 과거 5년 동안의 비중(17%)보다 상승하는 경향을 보였다. 한국화학연구원을 제외한 4개 기관은 비슷한 수준의 피인용 건수를 보였으나, 4개 기관 중 유일하게 성균관대학교만 과거와 최근을 통틀어 상위 5개 기관으로 유지된 것을 확인할 수 있었다. 기관별로 살펴보았을 때, 상위 5개 기관의 연구 피인용 건수 합은 과거 51%와 최근 52%로 비슷한 수준이었다. 미국의 경우 UCLA, NREL, University of Washington 3개 기관이 과거와 최근 5년 동안 꾸준하게 상위 5개 기관 목록에 포함된 반면, 상위 5개 기관 간 순위 변동은 많은 것으로 나타났다. 특히, UCLA의 피인용 건수 비율이 과거에는 3%였으나 최근 5년 동안에 26% 수준으로 대폭 증가한 것으로 드러났다. 중국의 경우, CAS가 과거와 최근 5년 동안 가장 많은 피인용 수를 기록한 연구 기관으로 확인되었다. 그러나 전체 대비 비중은 과거 27%에서 최근 17%로 낮아졌다. 또한 상위 5개 기관의 피인용 합 비중이 과거 52% 수준에서 최근 31% 수준으로 감소하였는데, 이는 중국 내 상위 5개 연구기관으로의 집중이 현저하게 낮아졌음을 보여준다. 일본의 경우에는 National Institute for Materials Science, Kyoto University, AIST 3개 기관이 과거와 최근 5년 동안 모두 상위 5개 기관에 포함되었다. 특히 일본은 다른 국가와 비교해서 상위 5개 연구기관 간의 연구 피인인용 차가 가장 작게 나타났다. 그러나 이에 비해서 과거 대비 최근 5년의 피인용 건수 비중은 과거 28%에서 63%로 크게 상승한 것으로 나타났다. EU의 경우 다른 4개 국가 대비 순위변동이 가장 적었으며. EPFL, University of Oxford, Fraunhofer ISE, Helmholtz-Zentrum Berlin이 과거와 최근 5년 동안 모두 같은 순위를 유지하였다. 기간별로 살펴봤을 때 상위 5개 기관의 피인용 비중은 18%에서 83%로 다른 국가들과 비교하여 연구 집중도가 가장 크게 증가한 것으로 나타났다. 특히, EPFL과 University of Oxford의 경우 과거 10%와 4%에서 최근 37%와 28%로 증가한 것으로 조사되었는데, 이를 통해 EU 내 태양전지 분야에서 2개 기관이 가장 높은 연구 영향력을 발휘한다는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.5 기술수준 및 기술격차 분석

태양전지 분야의 주요 5개 국가의 기술수준 및 기술격차는 Fig. 8과 같이 분석되었다. 이때, 전문가가 평가한 태양전지 분야의 최고 기술 보유국은 미국이었으며, 따라서 미국을 100%로 하여 그 외 국가의 기술수준에 대해 평가를 수행하였다. 분석 결과, 미국 다음으로 높은 기술을 보유한 국가는 차례대로 EU는 94%, 일본은 90%, 한국은 88%, 중국은 85% 순으로 나타났다. 미국과의 기술격차는 EU는 0.5년, 일본은 1년, 한국은 1.5년, 중국은 1년으로 분석되었다. 태양전지 분야의 주요 5개국 모두 기술수준은 15%, 기술격차는 2년 내로 보유 기술 수준의 차이가 크지 않다고 고려된다.

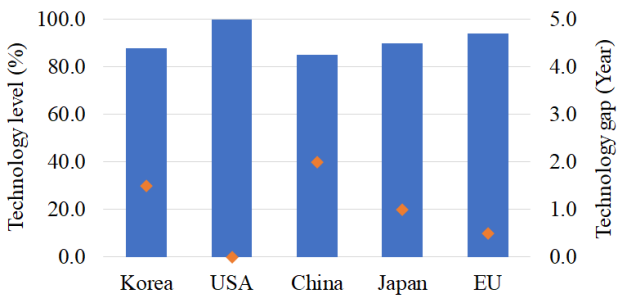



Fig. 8. The technology level and technology gap between US and the other countries

Fig. 9에서는 국가별 기술수준그룹을 선도(Leading), 추격(Chasing), 후발(Following), 낙후(Lagging) 그룹으로 나누어 5개국을 분류한 결과를 보여준다. 한국이 태양전지 분야의 연구를 선도하고 있다고 평가한 비율은 20%이었다. 그리고 추격 그룹에 속한다고 평가한 비율은 65.5%, 후발 그룹에 속한다고 평가한 비율은 12.7%, 낙후 그룹에 속한다고 평가한 비율은 1.8% 이었다. 주요 5개 국가 중 선도 그룹이라고 평가된 비율은 가장 낮았으며. 전문가 대부분이 한국은 태양전지 분야에 추격 그룹에 속한다고 평가하고 있음을 확인할 수 있었다. 미국의 경우에는 선도

그룹이라 평가한 비율이 72.7%이었으며, 그 다음 추격, 후발 그룹이라고 평가한 비율은 각각 25.5%와 1.8%이었다. 앞서 최고 기술 보유국이라고 평가된 것과 동일하게, 태양전지 분야의 기술을 선도하고 있다는 응답이 다른 국가 대비 높게 평가되었다. 중국의 경우에는 선도그룹에 대한 비율은 21.8%이었다. 그리고 추격 및 후발 그룹에 대한 평가 비율을 각각 63.6%와 14.5%이었다. 중국의 평가 비율은 한국과 가장 유사한 경향을 보였으며, 대부분의 전문가가 중국을 추격그룹으로 평가하고 있었다. 일본의 경우, 선도그룹과 추격그룹에 대한 평가 비율이 각각 40%, 50.9% 이었으며, 후발 그룹이란 평가 비율은 9.1% 수준이었다. EU는 선도그룹에 대한 평가 비율이 65.5%로 미국 다음으로 높게 나타났다. 그리고 추격그룹과 후발 그룹에 대한 평가가 각각 30.9%와 3.6%로 나타났다. 국가별 기술수준그룹 평가를 100점 만점으로 환산한 결과, 미국이 90.3로 가장 높았으며 그 다음으로 EU 87.3, 일본 77.0, 중국 69.1, 한국 67.9로 확인되었다. 이에 따라 선도그룹은 미국과 EU이며, 추격그룹은 일본, 중국, 한국이었다.

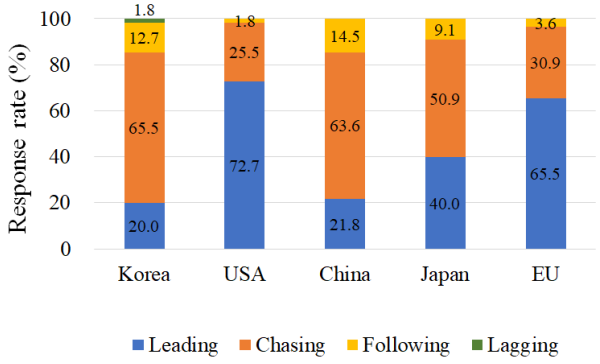



Fig. 9. The response rate for technology level group

마지막으로 Fig. 10에서는 연구개발 단계 중 기초연구 및 응용개발 단계에서의 연구수행 능력에 대한 분석을 수행한 결과를 보여준다. 이때, 전문가들은 각각의 연구단계에 대해 매우우수, 우수, 보통, 부족, 매우부족 5단계로 평가한 후, 100점 만점으로 환산하여 분석하였다. 우선, 기초연구 분야에서 주요 5개 국가 중 가장 연구역량이 높다고 평가되는 국가는 미국으로 88.2이었다. 그 다음으로는 EU 84.5, 일본이 82.7, 한국이 72.3, 중국이 71.8로 평가되었다. 기초연구 분야에서 연구 역량이 '매우 우수'로 평가되는 국가는 미국이 유일하였고 다른 4개 국가의 경우 모두 '우수' 수준으로 평가되었다.

응용개발 단계에서의 연구수행 능력에 대한 분석결과를 살펴보았다. 기초연구 단계의 역량 평가 결과와 같이, 미국의 응용 개발 단계 연구역량이 85.5로 가장 높게 나타났다. 하지만 EU는 기초연구 단계에서 85.0의 연구역량이 평가되어 기초연구에 비해 미국과의 격차는 적게 나타났다. 한국이 78.2로 그 다음 높은 연구역량을 나타내었고 그 다음으로 일본 77.3, 중국 76.8로 확인되었다. 한국, 중국, 일본은 응용개발 단계에서 비슷한 수준의 연구역량이 나타났는데 특히, 일본의 경우 기초연구 대비 응용개발 단계에서 연구역량이 낮게 평가되었다. 응용개발 단계에서는 모든 국가가 우수 수준의 역량을 갖는 것으로 평가되었다.

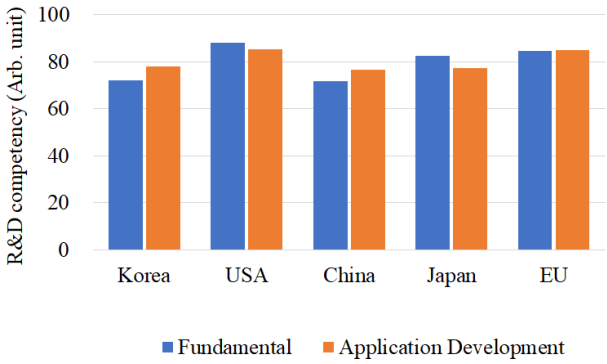



Fig. 10. The R&D competency for each country in fundamental and application development stage

Table 4. The point for technology level group and R&D competency for each country

| Classification | Korea | USA | China | Japan | EU |
|---|---|---|---|---|---|
| Technology Level Group | 67.9 | 90.3 | 69.1 | 77.0 | 87.3 |
| | Chasing | Leading | Chasing | Chasing | Leading |
| R&D Competency | 72.3 | 88.2 | 71.8 | 82.7 | 84.5 |
| | Good | Very Good | Good | Good | Good |

## 5. 결론 및 시사점

본 연구는 태양전지 분야의 기술개발 전략 수립을 위한 기초자료로써 활용될 수 있도록, 태양전지 분야의 주요 5

개국(한국, 미국, 중국, 일본, EU)의 연구 동향 및 현재 기술수준 조사·분석 결과를 제공하고자 하였다. 이를 위해, 태양전지 분야의 연구개발 성과물인 연구논문 게재정보를 수집하여 연구동향에 대한 정량적인 분석을 수행하였다. 그리고 전문가 델파이 조사를 통하여 태양전지 분야의 기술수준 및 기술격차에 대한 정성적인 분석을 수행하였다.

우선, 정량적인 분석을 위해서 논문의 게재 건수, 피인용 건수, 연구 활동력(Activity), 연구 영향력(Influence)의 분석항목 살펴보았다. 특히, 2010년에서 2014년 게재된 연구논문을 기준으로, 한국은 연구 활동력이 주요 5개국 중 가장 높아 연구자 수 대비 논문의 생산량이 매우 높은 것으로 확인되었다. 그에 반해, 연구 영향력은 연구 영향력이 가장 높은 미국(100%) 대비 36% 수준으로 5개국 중 가장 낮게 나타났다. 그러나 2015년에서 2019년 게재된 논문을 기준으로, 한국의 연구 영향력은 연구 영향력이 가장 높은 미국(100%) 대비 49% 수준으로 다소 향상되었다. 전체적으로 논문 게재 건수를 감소하였으나 영향력 있는 연구결과가 증가했다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 상위 연구기관 분석을 통해서 최근 10년간 한국에서 태양전지 분야의 R&D는 한국화학연구원에 상대적으로 집중되어 있다는 사실을 알 수 있었다.

다음으로, 정성적인 분석을 위해서 기술수준, 기술격차, 기술수준그룹, 연구수행능력의 항목에 대해 전문가 델파이 조사를 수행하였다. 특히, 기술수준 및 기술격차와 관련하여, 태양전지 분야의 최고 기술 보유국은 미국으로 조사되었으며 한국은 미국(100%)에 비해 기술수준 88%, 기술격차 1.5년이라는 결과가 도출되었다. 연구개발 단계에 따른 연구수행 능력 분석 결과에 따르면, 한국의 기초연구 분야 연구 역량은 100점 만점으로 환산하였을 때 72점 수준으로 5개 주요 국가 중 4번째 순위로 분석되었다. 그러나 응용개발 단계의 연구수행은 78점으로 미국과 EU 다음 3번째 순위로 확인되었다. 이 결과를 통해, 한국의 응용개발 단계에서의 연구수행능력이 기초연구보다 다소 높게 평가된다는 것을 확인할 수 있었다.

온실가스 감축과 기후변화 대응을 위한 미래 핵심기술로써 태양전지 관련하여 선도적 기술 우위를 점하고, 기술혁신을 위한 지속적인 노력을 기울이는 것은 매우 중요하다. 이와 관련하여, 본 연구에서는 연구개발의 성과물인 연구논문의 정량적, 정성적 평가를 수행하였으며, 미래의 태양전지 기술을 선도하기 위한 전략 수립의 기초자료로써 활용될 수 있을 것이라 고려된다. 아울러, 주요국 및 기관별 세부 연구 분야에 대한 추가 보완 연구를 통해 기술개발의 세부전략에 기여할 수 있기를 기대한다.

## 사사

본 연구는 녹색기술센터의 주요사업 중 하나인 “기후기술 수준조사 및 중점 육성분야 발굴 연구(2020)”(과제번호: R20121)의 지원을 통해 수행되었다.

## References

Choe H, Lee DH, Seo IW, Kim HD. 2013. Patent citation network analysis for the domain of organic photovoltaic cells: Country, institution, and technology field. Renew Sustain Energy Rev. 26:492-505.

Crisp J, Pelletier D, Duffield C, Adams A, Nagy S. 1997. The Delphi Method?. Nursing Research. 46:116-118

Flostrand A, Pittb L, Bridson S. 2020. The Delphi technique in forecasting–A 42-year bibliographic analysis(1975–2017). Technol Forecast Soc Change. 150:119773

Gwon SY, Lee YS. 2018. Application of delphi method to the technology level assessment of food safety. Food Sci Ind. 51:209-217

Huang Y, Porter AL, Zhang Y, Lian X, Guo Y. 2019. An assessment of technology forecasting: Revisiting earlier analyses on dye-sensitized solar cells (DSSCs). Technol Forecast Soc Change. 146:831-843.

Im. 2015. Research trend of perovskite solar cell. Bulletin of the Korea Photovoltaic Society. 1:34-41.

International Renewable Energy Agency. 2019. T. FUTURE OF SOLAR PHOTOVOLTAIC Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects_Executive Summary.

Kim H, Park S, Lee K, Lim B, Yoo S. 2017. Capability Assessment on Korean Meteorological Technology : A Comparative Analysis of US, Japan, and UK. Journal of Korea Technology Innovation Society. 20:34-61

Li X, Fan M, Zhou Y, Fu J, Yuan F, Huang L. 2020. Monitoring and forecasting the development trends of nanogenerator technology using citation analysis and

text mining. Nano Energy. 71:104636.

Li X, Xie Q, Daim T, Huang L. 2019. Forecasting technology trends using text mining of the gaps between science and technology: The case of perovskite solar cell technology. Technol Forecast Soc Change. 146:432-449.

Li X, Xie Q, Jiang J, Zhou Y, Huang L. 2019. Identifying and monitoring the development trends of emerging technologies using patent analysis and Twitter data mining: The case of perovskite solar cell technology. Technol Forecast Soc Change. 146:687-705.

Liu D, Liu J, Wang S, Xu M, Akbar SJ. 2019. Contribution of international photovoltaic trade to global greenhouse gas emission reduction: the example of China. Resour Conserv Recycl. 143:114-118.

Ministry of Science and ICT. 2018. Science and technology level evaluation.

Madvar MD, Ahmadi F, Shirmohammadi R, Aslani A. 2019. Forecasting of wind energy technology domains based on the technology life cycle approach. Energy Reports. 5:1236-1248.

Noh JH, Ko MJ. 2017. Convergence technology of organic-inorganic hybrid perovskite solar cells, Seoul, Korea: Korea Institute of Science and Technology. Convergence Research Review. 2017-3.

Sampaio PGV, González MOA, de Vasconcelos RM, dos Santos MAT, de Toledo JC, Pereira JPP. 2018. Photovoltaic technologies: Mapping from patent analysis. Renew Sustain Energy Rev. 93:215–224.

Web of Science. 2020; [Accessed 2020. Nov. 2]. https://clarivate.com/webofsciencegroup/ko/