

# 발전차액제도가 고려된 태양광 폐모듈 발생량 예측

박종성<sup>1)\*</sup> · 임철현<sup>1)</sup> · 김우람<sup>1)</sup> · 박병욱<sup>2)</sup> · 이진석<sup>3)</sup> · 이석호<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>태양에너지연구소, 녹색에너지연구원, 목포, 58324

<sup>2)</sup>에너지산업팀, 충북테크노파크, 청주, 28116

<sup>3)</sup>분리변환소재연구소, 에너지기술연구원, 대전, 34129

## Prediction of End of Life Photovoltaic Modules with Feed in Tariff

Jongsung Park<sup>1)\*</sup> · Cheolhyun Lim<sup>1)</sup> · Wooram Kim<sup>1)</sup> · Byungwook Park<sup>2)</sup> · Jin-seok Lee<sup>3)</sup> · Sukho Lee<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Solar Energy R&D Dept. Green Energy Institute, Mokpo 58324, Korea

<sup>2)</sup>Next Generation Energy Center, Chungbuk Techno Park, Chunju 28116, Korea

<sup>3)</sup>Advanced Materials and Devices Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Korea

Received November 11, 2019; Revised December 23, 2019; Accepted December 24, 2019

**ABSTRACT:** In this study, we predict the generation of end-of-life photovoltaic modules when Feed in Tariff applied, in Republic of Korea. Based on the installation of photovoltaic modules, we prepared three different scenarios in order to estimate the generation of end-of-life photovoltaic modules. The scenarios are i) early worn-out, ii) mid worn-out and iii) late-worn out scenario. We selected the mid worn-out scenario to estimate the amount of end-of-life photovoltaic modules in this study. Establishment of the end-of-life module generation scenario predicted generation of end-of-life photovoltaic module, and forecasted generation amount of end-of-life module to which Feed in Tariff was applied in consideration of installed photovoltaic modules installed by Feed in Tariff support. The generation of Feed in Tariff-applied end-of-life modules increased from 2021 to 2025 compared to without Feed in Tariff, and since then, the Feed in Tariff-applied end-of-life modules were generated as waste modules during the relevant period (2021 ~ 2025).

**Key words:** End-of-life, Photovoltaic, Module, Recycling

### 1. 서론

태양에너지는 지속가능한 청정에너지원으로 각광 받고 있으며, 이에 따라 태양에너지로 전기를 생산할 수 있는 태양광 산업은 지속적으로 발전 해오고 있다. 태양전지/모듈로 대표되는 태양광 산업은 2018년 전 세계에 100 기가와트(GW)<sup>1)</sup> 이상 설치되었고, 앞으로도 꾸준히 성장할 것으로 예상되며 이에 따라 태양광 모듈의 설치량도 지속적으로 증가할 것으로 예측된다. 실리콘으로 대표되는 태양광 모듈은 일정 수명을 가지고 있으며 해당 수명이 종료되면 폐기처리하게 된다. 일반적인 실리콘 태양광 모듈의 보증수명은 20년~25년이나, 여러 가지 작동환경의 영향 또는 사업성에 관한 이유로 20년 이하 또는 25년 이상 사용되기도 한다. 우리나라의 태양광 모듈 설치 역사는 1990년대로 거슬러 올라가며, 2018년에는 총 2 GW가 설치되었다<sup>1)</sup>.

태양광 모듈의 설치가 증가함에 따라 수명을 다한 태양광 폐모듈의 처리 또한 중요한 이슈가 되고 있다. 현재 수명이 다한 태

양광 모듈은 알루미늄(Al) 프레임을 제거하고 매립하고 있는 실정이다. 이에 따라, 태양광 폐모듈을 처리하기 위한 여러 방안이 연구되어 왔으며, 이 연구들은 태양광 폐모듈의 폴리머 층 제거<sup>2)</sup>, 태양광 폐모듈로부터 실리콘 웨이퍼 회수<sup>2-5)</sup> 및 유기금속 회수 등이 있었다<sup>6,7)</sup>.

태양광 폐모듈의 발생량이 증가할 것으로 예상됨에 따라 해당 폐모듈을 처리하기 위한 재활용센터와 같은 시설이 필요하다. 태양광 폐모듈을 효율적으로 처리하고 대응하기 위해서는 발생량 예측이 선행되어야 한다. 태양광 폐모듈의 발생량은 기본적으로 국내 설치용량을 기준으로 예측할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 태양광 설치용량을 기준으로 3가지 수명예측 시나리오를 설정하여 발생량을 예상하였으며, 발전차액지원제도(Feed in Tariff, FIT)를 고려하여 태양광 폐모듈의 발생량을 예상하였다.

FIT는 우리나라 태양광 정책 중 핵심제도로서 2002년부터 시작되어 태양광 등 신재생에너지 보급과 초기 시장형성에 주도적 역할을 담당하였다. FIT제도는 발전사업자에 대한 직접적인 보조금 지원방식으로 정부의 재정지원을 전제로 하여, 신재생에너지로 생산한 전기의 거래 가격이 에너지원별로 표준비용

\*Corresponding author: jspark@gei.re.kr, sukholee@gei.re.kr

을 반영한 ‘기준가격’보다 낮은 경우 그 차액을 지원하는 제도이다. 한 번 해당 사업자를 지원하면 15~20년간 지원하며 이 제도는 2011년까지만 존속되었고, 이후 폐지되었다.

## 2. 예측방법

본 연구에서 태양광 폐모듈의 발생량을 예상하기 위하여 한국에너지공단에서 제공하는 연도별, 지역별 태양광 보급현황 통계수치(2016년 자료)를 바탕으로 총 3가지 수명예측 시나리오를 고려하여 폐모듈 발생량을 산출하였으며, 재사용은 고려하지 않고 전량 폐기되는 것으로 가정하였다. 모듈의 수명은 15년에서 30년으로 가정하였으며, 1 kW의 설비당 0.1 톤의 폐모듈이 발생하는 것으로 산출하였으며, 발생량 예측은 위에서 언급된 한국에너지공단 신재생에너지 보급통계(FIT 포함) 바탕으로 산출하였다. 수명 예측 계산 시나리오는 총 3가지로 긍정적, 중간, 부정적 시나리오로서, 긍정적인 폐모듈 발생량이 높음을, 부정적 시나리오는 폐모듈 발생량이 낮음을 상정하여 작성하였다. 태양광 모듈의 기술적 발전에 따른 모듈의 사용년수 증가를 고려하여 15년 이하, 30년 이상 사용에 2000년부터 2020년까지 반영하였다. 구체적인 시나리오 조건은 Table 1과 같다. 보다 보편적인 태양광 폐모듈 발생량 예상 및 대표성을 위하여, 본 연구에서는 2010년까지 수명이 15년인 모듈이 35%인 두 번째

시나리오를 적용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 시나리오 2를 적용하여 태양광 폐모듈 발생 예상량을 보여준다. 위 그래프에서 보여지는바와 같이 2010년부터 2018년까지는 수십 톤 수준에서 태양광 폐모듈이 발생하는 것으로 예상되었고 2019년에 처음으로 100 톤 이상 발생하며 2022년에 처음으로 1,000 톤을 넘길 것으로 예상되며, 2044년에는 100,000 톤의 폐모듈이 발생할 것으로 예상된다. 태양광 폐모듈의 재사용을 가정하지 않고 전량 폐기를 가정하였으므로, 예상 발생량은 태양광 설치용량과 같은 양상을 보였다.

지역별 태양광 폐모듈 발생량을 예상하기 위하여 지역별 설치 용량을 시나리오 2에 적용하여 발생량을 확인하였다.

Table 2는 시나리오 2가 적용된 지역별 태양광 폐모듈 발생 예상량을 보여준다. Table 2에 나타나있는 지역미분류 경우 2003년 이전에는 각 지역별 설치량이 조사되지 않아서 지역별 폐모듈 발생량 산정이 불가능하여 지역미분류로 구분하였으며, 2040년 지역별 예측의 경우 각 지역별 설치량을 추이 바탕으로 설치 예측량을 추정하였다. 지역별 발생량 총합은 2020년 223 톤으로 Fig. 1에서 나타나있는 발생량과 일치하며, 설치량이 가장 많은 전남에서 가장 많은 폐모듈 발생량이 예상된다. 2030년

**Table 1.** Scenarios for estimation of end-of-life PV module generation

| Scenarios                            | Condition               |         |                             |         |         |            |       |
|--------------------------------------|-------------------------|---------|-----------------------------|---------|---------|------------|-------|
|                                      | Scenario 1              |         | Year of module installation |         |         |            |       |
| Early worn-out scenario (Scenario 1) | PV module life span (%) | 15 year | By 2000                     | By 2010 | By 2020 | after 2021 | Total |
|                                      |                         | 20 year | 25                          | 25      | 25      | 25         | 100   |
|                                      |                         | 25 year | 20                          | 20      | 20      | 20         | 80    |
|                                      |                         | 30 year | -                           | 10      | 2-      | 30         | 60    |
|                                      |                         | Total   | 100                         | 100     | 100     | 100        | 400   |
| Mid worn-out scenario (Scenario 2)   | PV module life span (%) | 15 year | By 2000                     | By 2010 | By 2020 | after 2021 | Total |
|                                      |                         | 20 year | 30                          | 30      | 30      | 30         | 120   |
|                                      |                         | 25 year | 25                          | 25      | 25      | 25         | 100   |
|                                      |                         | 30 year | 5                           | 10      | 30      | 40         | 85    |
|                                      |                         | Total   | 100                         | 100     | 100     | 100        | 400   |
| Late worn-out scenario (Scenario 3)  | PV module life span (%) | 15 year | By 2000                     | By 2010 | By 2020 | after 2021 | Total |
|                                      |                         | 20 year | 30                          | 30      | 30      | 15         | 105   |
|                                      |                         | 25 year | 30                          | 30      | 30      | 30         | 120   |
|                                      |                         | 30 year | 30                          | 35      | 40      | 55         | 160   |
|                                      |                         | Total   | 100                         | 100     | 100     | 100        | 400   |

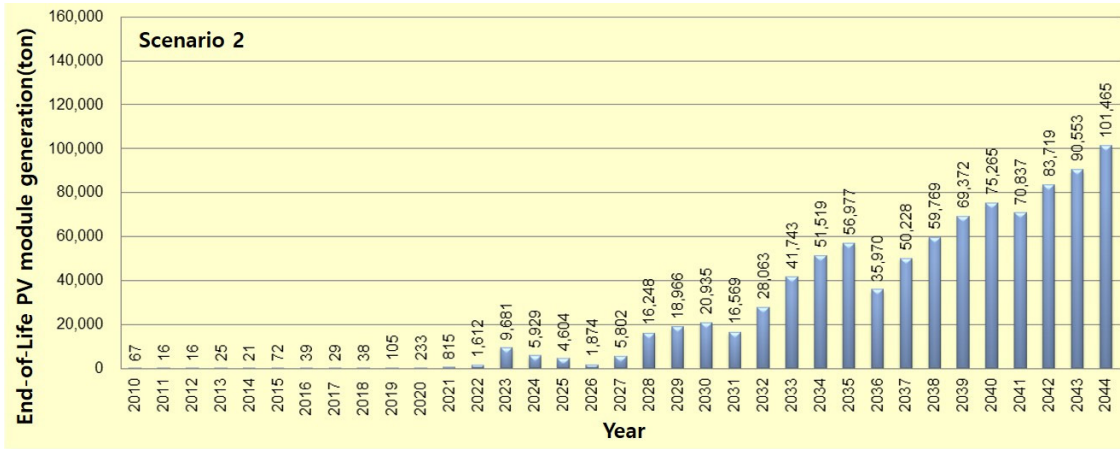


Fig. 1. Estimation of End-of-life PV module generation with Scenario 2

Table 2. Estimation of End-of-life PV modules by region

| Year                   | (Unit: Ton) |          |         |
|------------------------|-------------|----------|---------|
|                        | 2020        | 2030     | 2040    |
| Seoul                  | 9.9         | 333.4    | 1007.8  |
| Busan                  | 1.6         | 153.9    | 1210.6  |
| Deagu                  | 10.0        | 180.9    | 844.9   |
| Incheon                | 3.0         | 153.2    | 957.1   |
| Gwangju                | 14.2        | 445.8    | 1467.0  |
| Daejeon                | 4.6         | 104.9    | 493.1   |
| Ulsan                  | 2.7         | 101.1    | 304.8   |
| Gyeonggi               | 15.2        | 1,084.6  | 4620.9  |
| Gangwon                | 12.4        | 733.0    | 4138.2  |
| Chungbuk               | 0.5         | 988.7    | 4230.4  |
| Chungnam               | 17.3        | 2,784.6  | 9677.6  |
| Jeonbuk                | 3.4         | 3,595.5  | 13229.4 |
| Jeonnam                | 50.0        | 5,501.5  | 17785.5 |
| Gyeongbuk              | 8.0         | 2,584.7  | 7374.3  |
| Gyeongnam              | 14.6        | 1,625.3  | 5352.4  |
| Jeju                   | 7.3         | 506.6    | 2278.4  |
| Sejong                 | 0.0         | 54.9     | 292.7   |
| Sub-total              | 174.7       | 20,932.6 | 75,265  |
| Unclassified by region | 58.3        | 60.4     | -       |
| Total                  | 233         | 20,993   | 75,265  |

에는 전남·전북에서 전국 발생량의 45% (약 90,000 톤)가 발생할 것으로 예상되며, 충남, 경북에서도 각각 2,000 톤 이상의 폐모듈이 발생할 것으로 예상된다.

FIT가 적용된 태양광 폐모듈의 발생량을 확인하기 위하여 지역별 FIT 설치현황을 한국에너지공단을 통하여 확인하였으며, 설치량은 Table 3과 같다. Table 3에서는 FIT가 적용되어 설치량 산정이 시작된 2005년부터 FIT 적용 마지막 년도인 2011년까지의 태양광 설치량을 보여준다. FIT 지원을 받은 태양광 설치량은

Table 3. PV installation status with FIT by region<sup>8)</sup>

| Year      | (Unit: kW) |       |        |         |         |        |       |
|-----------|------------|-------|--------|---------|---------|--------|-------|
|           | 2005       | 2006  | 2007   | 2008    | 2009    | 2010   | 2011  |
| Seoul     | -          | 3     | 153    | 73      | 165     |        |       |
| Busan     | -          | 5     |        | 467     | 337     | 138    |       |
| Deagu     | -          | 100   | 19     | 80      | 343     |        |       |
| Incheon   | 3          | 1,003 |        | 109     | 105     |        |       |
| Gwangju   | -          | 809   |        | 248     | 1,202   | 13     |       |
| Daejeon   | -          |       |        | 218     | 118     |        |       |
| Ulsan     | -          |       | 105    | 181     | 139     | 27     |       |
| Gyeonggi  | 3          | 107   | 1,438  | 1,959   | 3,160   | 335    | 983   |
| Gangwon   | 33         | 1,010 | 197    | 1,045   | 6,081   | 722    |       |
| Chungbuk  | 8          | 119   | 87     | 1,112   | 6,241   | 1,590  |       |
| Chungnam  | -          | 20    | 214    | 20,869  | 5,488   | 6,129  |       |
| Jeonbuk   | 12         | 318   | 1,986  | 48,887  | 28,166  | 11,927 | 1,298 |
| Jeonnam   | 981        | 5,138 | 17,570 | 110,433 | 32,128  | 15,530 |       |
| Gyeongbuk | 200        | 254   | 7,011  | 55,428  | 32,012  | 20,593 |       |
| Gyeongnam | 100        | 20    | 2,109  | 11,525  | 10,915  | 8,825  |       |
| Jeju      | -          | 90    | 168    | 1,428   | 3,218   | 621    |       |
| Total     | 1,340      | 9,043 | 31,066 | 254,256 | 129,826 | 66,450 | 2,281 |

(Provided by Korea Energy Agency)

2008년까지 꾸준히 증가하다가 2009년부터 감소하기 시작하여 2011년에는 약 2,000 kW가 설치되었다. 세종특별자치시는 2012년도에 출범하여 FIT 설비 보급현황에서 제외 하였다.

기존 태양광 보급현황에는 FIT가 적용되어 있는 총 설치량이므로 FIT 설치량을 제외하기 위하여 해당 년도의 태양광 설치량에 FIT 설치용량을 제외한 후 시나리오 2를 적용하여 발생량을 재산정하였다. FIT지원으로 설치된 태양광의 경우 15년까지 정부 지원이 가능한 것으로 설정하였으며, 지원이 종료되는 15년 후 사업성이 저하되어 설치량의 50%가 폐기되는 것으로 가정 하였다.

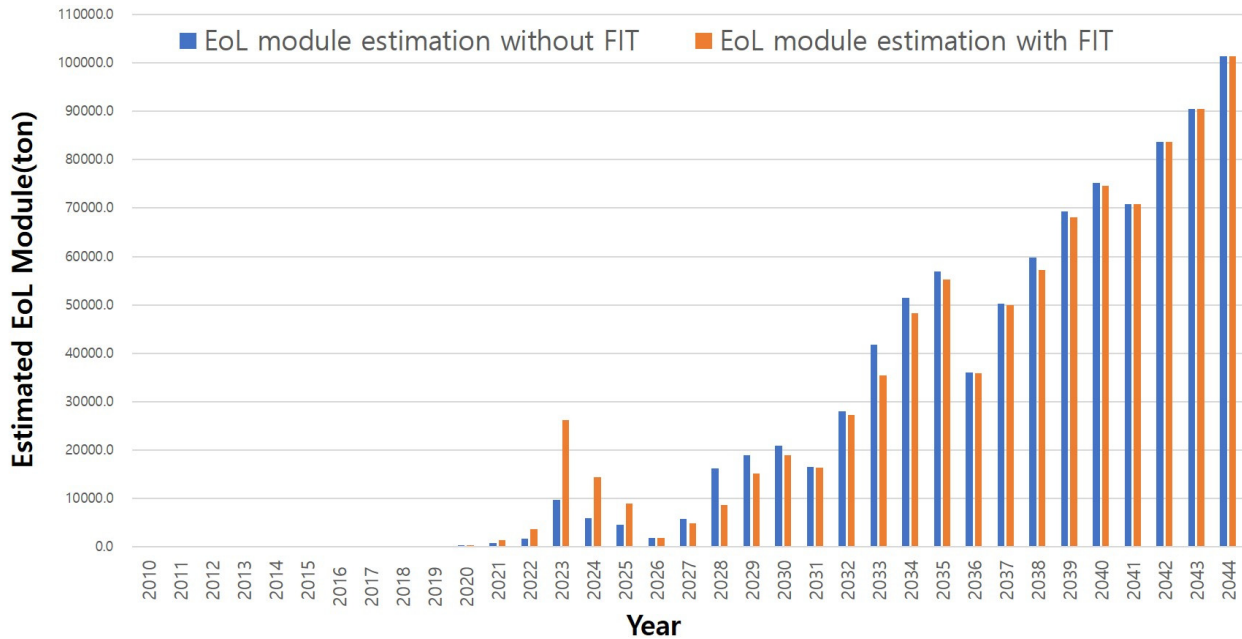


Fig. 2. Comparison of the amount of end-of-life PV modules with and without FIT by year

Fig. 2는 앞에서 예상한 기존 태양광 폐모듈 발생량과 FIT 적용으로 변경된 태양광 폐모듈 발생량을 비교하여 보여준다. 해당 그림에서 보여지듯이 FIT 적용 태양광 폐모듈의 발생량은 기존 대비 2021년부터 2025년까지 증가하는 것으로 확인되었으며, 그 이후부터는 FIT 적용 태양광 모듈이 해당 기간(2021~2025년까지) 폐모듈로 발생되어 기존 발생량보다 적은 발생량을 보여주고 있다. 2041년 이후부터는 기존 예상 발생량과 FIT 적용 발생량이 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 시나리오 2와는 다르게, FIT 적용 태양광 모듈의 경우 설치 후 15년 경과하는 해당년도에 폐기가 되는 것을 가정하였기 때문이다.

FIT 지원 종료 기간을 고려하여 폐모듈 발생량을 재예측하였을 경우, FIT 적용 마지막해인 2011년(2,281 kW)의 설치량이 기존 발생량 보다 적어 2026년의 폐모듈 발생량이 감소하는 것으로 예상되었으나, 그 외에는 보급량에 따라 최소 108.7%부터 최대 139.4%까지 증가하는 것으로 예상되었다. 이는, 발전사업자가 15년동안 모듈 교체를 하지 않는다는 전제에 근거한 예측량 데이터이므로, 국가의 지원기간 동안 모듈 관리를 가변적으로 교체한다는 가변량을 적용한 경우, 폐모듈 발생량 예측 수치는 감소할 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 태양광 폐모듈의 발생량을 예상하기 위하여 태양광 설치용량을 바탕으로 폐모듈 발생 시나리오를 수립하여 전국, 지역별 태양광 폐모듈 발생을 예상하고, FIT 지원으로 설치된 태양광 설치량을 고려하여 FIT가 적용된 태양광 폐모듈의

발생량을 예상하였다. FIT 미적용시 2010년부터 2018년까지는 수십 톤 수준에서 태양광 폐모듈이 발생하는 것으로 예상되었고 2044년에는 100,000 톤의 폐모듈이 발생할 것으로 예상되었다. FIT 적용시 FIT 지원으로 설치된 태양광의 경우 15년까지 정부 지원이 가능한 것으로 설정하여, 지원 종료시 사업성의 저하로 설치량의 50%가 폐기되는 것으로 가정하여 발생량을 재산정하였다. FIT 적용 태양광 폐모듈의 발생량은 기존 대비 2021년부터 2025년까지 증가하는 것으로 확인되었으며, 그 이후부터는 FIT 적용 태양광 모듈이 해당 기간(2021~2025년 까지) 폐모듈로 발생되어 기존 발생량보다 적은 발생량을 보여주었다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부, 한국에너지공단의 태양광 재활용센터 구축기반조성 사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### References

1. Kang, J, "Photovoltaic Industry Trends for Q4 2018," The export-import bank of Korea, Vol 2019-2, 2019.
2. Park, J., Kim, W., Cho, N., Lee, H. and Park, N., "An eco-friendly method for reclaimed silicon wafers from a photovoltaic module: from separation to cell fabrication," Green Chemistry, Vol. 18, No. 6, pp.1706-1714, 2016.
3. Shin, J., Park, J., Park, N., "A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers," Solar Energy Materials and Solar Cells,

- Vol. 162, pp.1-6, 2017.
4. Lee, J.K., Lee, J.S., Ahn, Y.S., Kang, G.H., Song, H.E., Lee, J.I., Kang, M.G., Cho, C.H., "Photovoltaic performance of c-Si wafer reclaimed from end-of-life solar cell using various mixing ratios of HF and HNO<sub>3</sub>," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 160, pp.301-306, 2017.
  5. Park, J., Park, N., "Wet etching processes for recycling crystalline silicon solar cells from end-of-life photovoltaic modules," *RSC advances*, Vol. 4, No. 66, pp.34823-34829, 2014.
  6. Jung, B., Park, J., Seo, D., Park, N., "Sustainable system for raw-metal recovery from crystalline silicon solar panels: from noble-metal extraction to lead removal," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, Vol. 4, No. 8, pp.4079-4083, 2016.
  7. Yang, E.H., Lee, J.K., Lee, J.S., Ahn, Y.S., Kang, G.H., Cho, C.H., "Environmentally friendly recovery of Ag from end-of-life c-Si solar cell using organic acid and its electrochemical purification," *Hydrometallurgy*, Vol. 167, pp.129-133, 2017.
  8. Kang, N, "New & Renewable Energy Statistics 2016 (2017 Edition)," KOREA ENERGY AGENCY, 2017.