



[2019-3-PV-005]

태양광 사용 후 모듈 적정처리를 위한 전주기 단위비용 추정 연구

김보람¹⁾ · 강진영²⁾ · 박시내¹⁾ · 장재민¹⁾ · 홍종호³⁾*

Study of Unit Cost Estimation for the Appropriate Treatment of End-of-life Photovoltaic (PV) Modules

Boram Kim¹⁾ · Jinyoung Kang²⁾ · Sinae Park¹⁾ · Jaemin Jang¹⁾ · Jong Ho Hong³⁾*

Received 27 November 2018 Revised 25 February 2019 Accepted 1 March 2019

ABSTRACT The installation of photovoltaic power in Korea has expanded rapidly owing to various energy subsidies. On the other hand, this has naturally raised concerns regarding the increase in end-of-life photovoltaic (PV) modules and the associated costs for treatment. This research estimated the unit recycling cost of end-of-life PV modules to draw appropriate policy implications by analyzing the data collected from site surveys and a literature review. The results suggest that the decommissioning of PV modules can cost as much as 87% of the entire recycling cost. Moreover, the recycling cost of domestic scale PV modules is approximately twice as higher than that of commercial scale PV modules. Therefore, an increase in the awareness of such costs and the appropriate distribution of the responsibilities in the decommissioning of end-of-life PV modules on a domestic scale is required.

Key words Photovoltaic(태양광), End-of-life management(폐기물 관리), Cost estimation(비용추정), Recycling(재활용), Reuse(재사용), Recycling infrastructure(재활용 인프라), Decommissioning(철거)

1. 서론

우리나라 태양광 산업은 정부의 적극적인 지원에 힘입어 지속해서 성장하고 있다. 2017년 태양광 발전시설 설치 규모는 1,184MW로 2016년 대비 37% 성장하였다^[1]. 정부는 2030년 태양광 에너지 발전 목표량을 36.6GW로 설정하여

지속적인 태양광 산업 확대를 계획하고 있다^[2]. 태양광 산업의 발전에 따라 향후 태양광 사용 후 모듈 발생 또한 급증할 것으로 예상된다. 태양광 모듈의 내구연한은 15~30년으로^[3~5], 1990년대 후반부터 2000년대 중반까지 자체 전력을 조달하기 위해 설치된 중형 발전 시설(30~95kw)의 사용 후 모듈이 발생하고 있다. 보다 본격적인 태양광 모듈 보급은 2002년 신재생에너지 발전차액제도(FIT)와 2012년 신재생에너지공급의무화제도(RPS)가 도입되면서 이루어졌다. 설치 규모의 지속적인 증가 추세를 감안할 때 향후 태양광 사용 후 모듈 발생량은 급증할 것으로 예상된다.

반면, 국내에서 발생하는 사용 후 모듈의 양이나 처리량은 구체적으로 집계되고 있지 않다. 현 시점에서 사용 후 모듈 형태는 크게 3가지 유형으로 분류할 수 있다. 도서 지

1) Ph.D. Student, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

2) Ph.D. Student, Interdisciplinary Program in Environmental Education, College of Education, Seoul National University

3) Professor, Graduate School of Environmental Studies, and Adjunct Researcher, Environmental Planning Institute and AIEES, Seoul National University

*Corresponding author: hongjongho@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-6892

Fax: +82-2-871-8847

역 노후화 물량과 발전시설 교체 제품, 그리고 모듈 제조과정 중 폐기분(scrap)이 여기에 해당한다. 앞으로 계획입지 발전시설에서 발생하는 사용 후 모듈은 물론, 가정용 태양광과 같은 소규모 발전시설에서도 사용 후 모듈이 대량 발생할 것으로 예상된다.

현재 사용 후 모듈 처리는 일반 철거업자 혹은 태양광 사용 후 모듈 전문 처리 재활용 업체를 통해 진행되고 있다. 「폐기물관리법」 제25조에 따라 폐기물 운반·처리·종합 재활용 허가를 받은 업체를 통해 태양광 사용 후 모듈 처리가 이루어지고 있다. 통상 건설폐기물 전반을 취급하는 일반 철거업자가 접근성 측면에서 유리하기 때문에 철거과정에 참여하게 된다. 이러한 경우 사용 후 모듈의 특성에 대한 세심한 고려 없이 일반적인 건설폐기물을 취급하는 방식으로 처리가 이루어진다. 반면, 태양광 사용 후 모듈을 전문으로 다루는 재활용업체가 철거하는 경우 파손을 최소화하고 기존 형태를 유지하는 방식으로 철거를 진행하게 된다. 이 경우 수거된 모듈은 단순 세척 등의 공정을 거친 뒤 재사용을 목적으로 개발도상국 등지로 수출되고 있다.

이상을 종합해 볼 때 일부 재사용되는 물량을 제외한 태양광 사용 후 모듈의 실질적인 재활용은 미비한 실정이다. 유럽연합에서는 폐기물로 발생하는 태양광 모듈을 적절하게 처리하기 위해 2012년부터 확대 생산자책임제도(Extended Producer Responsibility, EPR)를 도입하여 재활용을 법제화하고 있다. 하지만 국내에서는 태양광 사용 후 모듈 적정처리를 위한 관련 제도가 미흡한 실정이다. 나아가 First Solar와 같은 해외 태양광 모듈 제조업체들의 자발적이고 적극적인 재활용 노력과 비교하면 우리나라 기업들은 상대적으로 소극적이다.

2016년부터 산업통상자원부는 충북 진천에 태양광 사용 후 모듈 재활용센터 공사를 진행하고 있다. 현재 재활용센터의 정확한 가동 시점은 알려지지 않았다^[6]. 환경부는 태양광 모듈을 전자제품 생산자책임재활용 대상 항목으로 편입시키

는 법률 개정안을 예고하였으며, 모듈 출고량 보고 등 세부적인 절차를 진행하여 2021년 전면 시행을 준비하고 있다^[7].

이 연구는 전주기적 관점에서 태양광 사용 후 모듈의 재활용 단위비용 추정을 목적으로 한다. 연구결과는 사용 후 모듈 재활용제도 설계에 유용한 정보를 제공할 뿐만 아니라 향후 재활용처리시설 신증설 결정 및 경제성 평가를 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

현재 태양광 사용 후 모듈에 대한 전주기 재활용 단위비용 산정 연구는 국내외를 막론하고 존재하지 않는다. 이는 자료 축적 미비와 자료의 불확실성을 반영한다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 재활용 업체와 제조업체, 설치업체 등에 대한 현장 면담을 토대로 국내 태양광 모듈 산업의 특성과 처리 방식을 비용추정에 최대한 반영하고자 하였다.

연구목차는 다음과 같다. 제2절에서는 선행연구 개관 및 분석틀을 다루었다. 제3절에서는 전주기 재활용 단위비용을 분석하였다. 마지막 제4절은 결론과 태양광 사용 후 재활용제도 도입을 위한 정책 시사점을 제시하였다.

2. 선행연구 개관 및 분석틀

2.1 용어 정의 및 선행연구 개관

2.1.1 용어 정의

이 연구에서는 철거, 운반, 처리비용을 합산한 후 총 처리량(kg)으로 나눈 값을 재활용 단위비용(원/kg)으로 정의한다. 폐기물에 대한 재활용 기준비용은 환경부에서 고시한 방법 및 연구를 토대로 산정한다. 따라서 이 연구에서 사용한 재활용 기준비용과 회수 기준비용 역시 환경부(2015)^[8]와 법제연구원(2012)^[9], 그리고 한국환경공단(2013)^[10]에서 제시한 전주기 재활용 비용 범위를 참고하여 정의하였다.

자세한 구분은 Table 1과 같다. 회수단위비용(Collection

Table 1. Recycling unit cost classification

Scope	Recycling Unit Cost (KRW/ton)		
	Collection Unit Cost (KRW/ton)		
Cost	1) Decommissioning	2) Transportation	3) Treatment
Definition	Decommissioning cost of end-of-life PV module	Cost of transporting PV module to a recycling facility	Total cost incurred in recycling process

Unit Cost)은 철거비용(Decommissioning Cost)과 운반비용(Transportation Cost)을 포함하고, 재활용 단위비용(Recycling Unit Cost)은 회수단위비용에 처리비용(Treatment Cost)을 더한 값으로 정의된다. 이 구분을 기준으로 3절에서 전주기 재활용 단위비용 분석을 진행하였다.

2.1.2 선행연구 개관

서론에서 언급한 바와 같이 태양광 사용 후 모듈에 대한 전주기 재활용 단위비용 산정에 관한 연구는 현실점에서 찾아볼 수 없다. 하지만 사용 후 모듈 재활용 의무화 제도나 사용 후 모듈 재활용시설에 관한 비용편익분석^[3,4,11,12] 연구는 존재한다.

European Commission(2011)^[11]은 단순 재활용(Simple recycling, 유리만 회수)과 고도화 재활용(High yield recycling, 알루미늄, 납 및 기타 희귀금속 회수) 두 시나리오를 비교하여 2050년 발생이 예상되는 사용 후 모듈 7,290,000톤 재활용에 대한 비용편익분석을 수행하였다. 비용 항목 중 운반비용(Logistics cost)과 단순 재활용비용(Simple recycling cost)은 유럽의 태양광 재활용협회인 PV Cycle의 2010년 값을 적용하였고, 고도화 재활용 비용(High yield recycling cost)은 Okopol et al.(2007)^[13]의 연구를 사용하였다. 시나리오별로 운반비용(Logistics cost)을 산정하였으나 여기에 철거비용은 포함하지 않은 한계가 있다. 사용 후 모듈 철거비용을 소비자가 부담하도록 하는 독일의 사례를 반영한 것으로 해석할 수 있다.

일본의 사용이 끝난 재생가능에너지 설비의 재사용·재활용·적정처분에 관한 검토회(2017)^[12]는 사용 후 모듈 발생량별(10,000톤, 50,000톤, 100,000톤) 재활용에 대한 비용편익분석을 진행하였다. 항목별 근거를 살펴볼 때 철거비용은 업계 설문조사를 바탕으로 시스템 가격의 5%를 가정하였지만, 운반비용에 대한 산정근거는 불명확했다. 재활용 처리 과정은 유리와 알루미늄 등 단순 재활용과 희귀 금속을 회수하는 재활용으로 구분하였다. 분석결과, 철거비용을 제외한 운반·처리비용만을 대상으로 하였을 때 모든 사례에서 비용이 편익을 상회하는 결과가 도출되었다.

한국에너지기술연구원(2015)^[3]은 충북 진천의 3,600톤/년 규모 폐태양광 모듈 재활용처리시설 사업에 대한 비용과 편익을 계산하였다. 비용 항목 중 수집과정에서 발생하

는 환경비용은 고려하였으나 철거 및 운반비용은 고려하지 않았다. 시설 운영비용은 재활용처리시설과 유사시설을 다룬 한국개발연구원(2010)^[14]의 경상운영비와 유지관리비 등을 적용하였는데, 그 결과 재활용처리시설의 수거율이 45% 이상인 경우에만 경제성이 있는 것으로 도출되었다.

산업연구원(2017)^[4]은 분석기간(2020년~2029년) 동안 3가지 시나리오(전량 매립, 알루미늄 프레임만 재활용, 전체 재활용)에 대한 비용편익분석 연구를 진행하였다. 이 연구도 한국에너지기술연구원(2015)^[3]과 마찬가지로 재활용처리시설의 용량을 충북 진천의 폐태양광 모듈 재활용처리시설의 규모인 3,600톤/년으로 가정하여 산정하였다. 연구결과 태양광 사용 후 모듈의 운반비용을 고려하지 않았음에도 세 가지 시나리오 모두 경제성이 없는 것으로 나타났다.

2.2 분석틀

먼저, 선행연구를 통해 전주기 재활용 단위비용 분석에 사용되는 비용 항목을 살펴보았다. 그 중, 사용에 적합한 항목의 산정방법을 참고하여 전주기 재활용 단위비용 자료를 수집하고 단위비용 분석을 진행하였다.

전주기 단위비용 산정을 위한 분석틀은 Fig. 1과 같다. 추정에 필요한 기본 자료는 현장조사를 통하여 확보하였고, 일부 기존 연구 자료를 사용하였다.

철거비용은 업체조사를 통해 확보한 철거사례를 바탕으로 산출하였고, 운반비용은 권역별 사용 후 모듈 발생비용

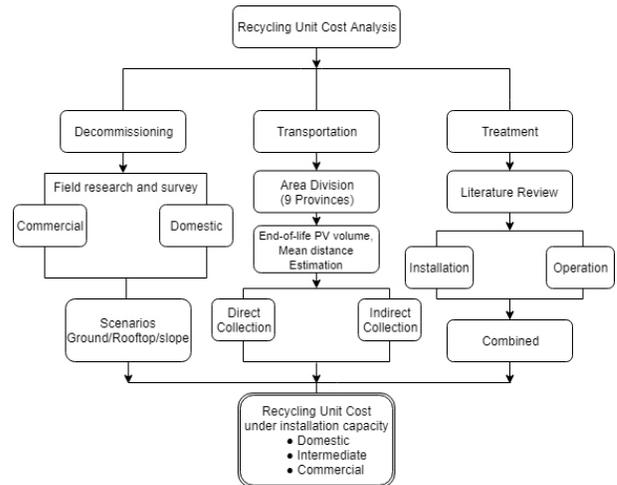


Fig. 1. Recycling unit cost analysis framework

과 평균이동 거리를 추정한 후 전국화물트럭 운반요금표에 따른 평균값을 사용하였다. 처리비용은 충북 진천 폐태양광 모듈 재활용센터 사례를 대상으로 한 산업연구원(2017)^[4] 연구를 참고하였다.

각 비용 항목별 자료를 통하여 철거·운반·처리 단계별로 소요되는 단위비용(원/kg)을 각각 추산하고 이를 합한 값으로 전주기 재활용 단위비용을 도출하였다. 설치 규모 및 범위에 대한 가정은 3장에 기술하였다. 유럽에서는 태양광 사용 후 모듈 재활용 단계를 수거, 운반, 처리로 구분하지만, 이 연구에서는 일본의 사용이 끝난 재생가능에너지 설비의 재사용·재활용·적정처분에 관한 검토회(2017)^[12], 산업연구원(2017)^[4]과 같이 우리나라의 사용 후 모듈 재활용 실정에 맞는 전주기 비용 산정을 위해 철거, 운반, 처리 단계를 사용한다.

3. 전주기 재활용 단위비용 분석

태양광 발전시설 사용 후 모듈 재활용 단위비용 분석을 위해 기존 연구를 바탕으로 비용 분석의 범위와 가정을 설정한 후 재활용 비용을 추정하였다.

3.1 산정범위 및 가정

3.1.1 설치 규모

태양광 설치 규모는 재활용 단위비용을 결정하는 핵심적인 요소다. 시설 규모에 따라 철거·운반·처리방법·단가 등이 모두 상이한 만큼 구분이 필요하다.

기존사례의 규모 기준을 살펴보면 일본의 사용이 끝난 재생가능에너지 설비의 재사용·재활용·적정처분에 관한 검토회(2017)^[12]의 경우 가정용은 10kW 이하, 산업용은 10kW 이상으로 구분하였다. 독일에서는 가정용(B2C)을 태양광 모듈 20 EA(개)로 제한하고 있다. 한편, 국내의 경우 서울 에너지백서^[15]는 가정을 대상으로 하는 서울시 태양광 미니 발전소 지원 분야를 배란다형(~1kW), 주택형(1~3kW), 건물형(3kW~) 세 가지 규모로 구분한다. 또한, 햇빛발전협동조합에서 지원하여 설립된 교육 및 복지시설과 같은 공공·산업 태양광 시설의 대부분은 10~50kW 규모로 나타난다.

이러한 규모 기준을 바탕으로 이 연구에서는 신재생에너

지 보급통계 용도별, 용량별 보급용량 구분을 조합 및 재구성하여 설치 규모를 3가지, 즉 가정용(10kW 이하), 공공·산업용(10~50kW), 그리고 사업용(50kW 이상)으로 구분하였다.

3.1.2 모듈 규격 및 산정범위

한국에너지기술연구원(2015)^[3]은 태양광 사용 후 모듈 발생량을 설비 규모 1MW당 100톤으로 가정하였다. 이는 FIT 제도 도입으로 태양광 모듈 설치가 급증하였던 2008~12년도 당시 태양광 모듈 1EA의 무게인 20kg을 적용한 것이다. 이를 토대로 모듈 1개 당 용량 대 질량 비율을 0.2kW:20kg(1kW=100kg)으로 설정하였다.

태양광 모듈 설치에 사용되는 거치대는 회수 가능 여부에 따라 철거비용이 다르나, 거치대 형태 및 규격이 사례별로 매우 다양하여 본 연구에서는 모듈 철거만을 고려하였다.

3.2 철거비용

철거비용은 설치된 태양광 모듈의 수집 및 운반이 수월하도록 모듈, 거치대, 배터리 등을 분리하고, 운반이 용이하도록 쌓아 올리는 작업에 드는 비용이다.

철거비용 분석은 업체조사를 통해 확보한 실제 철거사례를 통해 이루어졌다. 설치형태(지면·옥상·경사면·복합(옥상+경사면))에 따라 투입 장비가 달라져 발생하는 비용 차이는 가중치(1~1.8)를 부여하여 반영하였다.

3.2.1 철거사례 분석 및 가중치

대표성 있는 철거비용을 산출하기 위해서 신뢰할 수 있는 철거사례 확보가 필요하다. 이를 위해 공식 인허가를 받은 업체 혹은 국가 지원정책·사업에 참여하고 있는 사업자 중 사용 후 모듈 재활용을 활발히 수행하는 업체를 선별하여 철거사례를 확보하였다.

1) 가정용 태양광발전소 철거비용

가정용 사례는 서울시에서 선정한 2018년 미니태양광 보급업체^[16] 및 한국에너지공단 신·재생에너지센터 선정 2018년 대여사업자^[17] 유선 인터뷰 조사 자료를 사용하였다. 조사된 철거비용은 권역 내 이동비용이 포함된 것으로 대여사업의 경우, 만기(7년) 전 계약을 파기할 경우 소비자

에게 철거비용을 청구하고 있다. 미니태양광 보급업체와 대여사업자를 통해 확보한 설치용량별, 형태별 사용 후 모듈의 예상 철거비용 값은 Table 2와 같다.

Table 2. Domestic PV power station decommissioning cost case study

Classification	0.26~0.3kW (KRW)	3kW (KRW)	3~10kW (KRW)
Ground (A)	200,000	800,000	960,000
Rooftop (B)	-	1,040,000	1,248,000
Slope (C)	-	960,000	1,152,000
Combined (D)	-	1,200,000	1,440,000

2) 사업용 태양광발전소 철거비용

사업용은 대표적 재활용업체의 재사용 목적 철거비용 견적을 바탕으로 구성하였다. L社는 국내 최대 규모의 사용 후 모듈 재활용업체로 수집된 사용 후 모듈의 90% 이상을 개발도상국 등지로 수출하고 있다^[18]. L社가 국내에서 수행한 사업용 태양광발전소 철거실적을 바탕으로 발전소당, 모듈당 철거비용을 Table 3과 같이 설치형태별로 정리하였다.

Table 3. Commercial PV power station decommissioning cost case study

Case	Capacity	Classification	No. of modules (EA.)	Estimated Cost (thousand KRW)	Per module ¹⁾ (thousand KRW)
1	100kW	Ground	500	6,900	13.8
2	100kW	Rooftop	500	8,950	17.9
3	100kW	Rooftop + Slope	500	10,682	21.4

¹⁾ For reuse purpose

3) 가중치 산정

폐기 여부와 설치형태에 따라 철거비용은 상이한 만큼 비용에 이를 반영하기 위한 가중치를 부과하였다.

재활용 업체에서 통상 폐기 목적의 철거비용은 재사용 목적 견적가에서 20%를 할인하고 있다^[18]. 태양광 사용 후 모듈의 철거비용은 설치형태에 따라 다른데, 설치형태는 다음과 같이 분류할 수 있다.

- ① 지면(A): 일반 토지, 마당
- ② 옥상(B): 평평한 옥상, 지붕일체 형태
- ③ 경사면(C): 산악지대/경사가 있는 지형
- ④ 복합(D): ② 옥상 + ③ 경사면

사업용과 가정용 사례조사를 바탕으로 설치형태와 목적별 가중치를 Table 4와 같이 도출하여 전 규모에 적용하였다.

이 연구의 전주기 재활용 단위비용 분석은 폐기목적 재활용 처리를 기준으로 하였다. 따라서 철거비용 산정에 폐기 목적 가중치(Table 4 “for disposal”)를 적용하였다.

Table 4. Decommissioning cost weight value

	Ground (A)	Rooftop (B)	Slope (C)	Combined (D)
For disposal	0.8	1.04	0.96	1.2
For reuse	1	1.3	1.2	1.5

3.2.2 가정용 철거 단위비용 산정

가정용 철거 단위비용은 신재생에너지 보급통계 보급용량에 따라 3가지(~1kW/1~3kW/3~10kW)로 구분하여 산정하였다. 비용 산출의 기준이 되는 구간별 질량은 Table 5와 같이 규모별 모듈 개수 중간값을 적용하였다.

Table 5. Domestic PV power station Mass

Classification	Capacity (Intermediate value)	No. of modules (Intermediate value)	Total mass (kg)
~1kW	0.5kW	2.5	50
1~3kW	3kW ¹⁾	15.0	300
3~10kW	6.5kW	32.5	650

¹⁾ It has been confirmed by the installation company that the majority of 1~3kW power stations has 3kW capacity. Hence, the capacity value is based on 3kW instead of the intermediate value.

사례조사 결과(Table 2)와 가중치 및 구간별 발전량 비중을 고려한 가정용 철거 단위비용은 Table 6과 같다. 지면 형태의 1kW 미만 가정용 태양광 사용 후 모듈의 철거비용은 3.20원/kg로 나타났다. 이는 Table 2의 각 규모 구간

및 설치형태별 견적가를 Table 5에서 구한 질량(Total mass)으로 나눈 뒤 Table 4의 해당 설치형태별 가중치를 곱한 값이다.

Table 6. Domestic PV power station unit decommissioning cost (for disposal)

unit : thousand KRW/kg

Capacity	Power (kW)	A	B	C	D
Weight value		0.8	1.04	0.96	1.20
~1kW	4,568 (1.9%)	3.20	4.16	3.84	4.80
1~3kW	215,065 (87.7%)	2.13	2.77	2.56	3.20
3~10kW	25,697 (10.5%)	1.18	1.54	1.42	1.77
Unit decommissioning cost		2.05	2.67	2.46	3.08

가정용 태양광 사용 후 모듈의 철거단위비용 산출 결과를 정리하면 다음과 같다. 지면을 기준으로 할 때 kg당 1,180원~3,200원의 분포를 보인다. 규모별 발전 비중을 고려하여 지면의 철거 단위비용을 산출하면 2,050원/kg의 철거비용이 가정용 태양광 사용 후 모듈에서 발생하는 것을 알 수 있다.

3.2.3 사업용 철거 단위비용 산정

사업용 철거 단위비용도 가정용 철거 단위비용과 같은 방식으로 산정하였다. 사례조사(Table 3)에 가중치(Table 4)를 적용하여 산출한 사업용 철거 단위비용은 Table 7과 같다.

산출 결과 사업용 태양광 사용 후 모듈 철거단위비용은 지면을 기준으로 모듈당 11,040원, kg당 550원으로 나타났다.

Table 7. Commercial PV power station unit decommissioning cost (for disposal)

50kW~	A	B	C	D
Weight value	0.80	1.04	0.96	1.20
Unit cost (thousand KRW/EA)	11.04	14.35	13.25	16.56
	0.55	0.72	0.66	0.83

3.2.4 공공·사업용 철거 단위비용 산정

공공·사업용 철거 단위비용은 도출된 가정용과 사업용 철거단위비용의 중간값을 적용하였다. 설치형태별 가중치를 적용한 철거 단위비용은 Table 8에 제시하였으며, 공공·사업용 사용 후 모듈 철거 단위비용은 모듈당 17,340원, kg당 870원이 발생하는 것을 알 수 있다.

- 1) 가정용(3~10kW): 1.18천 원/kg
- 2) 사업용: 0.55천 원/kg
- 3) 공공·사업용: $(1.18 + 0.55)/2 = 0.87$ 천 원/kg

Table 8. Intermediate PV power station unit decommissioning cost (for disposal)

10~50kW	A	B	C	D
Weight value	0.80	1.04	0.96	1.20
Unit cost (thousand KRW/EA)	17.34	22.54	20.80	26.00
	0.87	1.13	1.04	1.30

3.2.5 철거비용 종합

규모별, 설치형태별 철거 단위비용을 종합해 보면 가정용 철거비용이 사업용의 약 3.7배로 큰 차이를 보였다. 산출된 철거 단위비용은 폐기 목적의 철거비용으로 재사용 목적의 비용에서 20% 할인된 값이다.

여기서 산출한 가정용 철거비용의 경우 철거된 모듈을 권역별 집적소까지 이동하는 운반비용을 포함하였으나 사업용의 경우에는 제외하였다. 소규모 사용 후 모듈 철거작업은 트럭으로 철거 및 단거리 운반이 가능하여 혼합작업을 진행하는 것이 효율적이지만, 사업용과 같은 대규모 철거작업은 철거와 운반 작업이 별도로 이루어지기 때문이다. 규모별, 설치형태별 철거 단위비용을 종합한 결과는 Table 9에 나타나 있다.

Table 9. Decommissioning cost by scale and installation form unit : thousand KRW/kg

	A	B	C	D
Domestic ~10kW	2.05	2.67	2.46	3.08
Intermediate 10~50kW	0.87	1.13	1.04	1.30
Commercial 50kW~	0.55	0.72	0.66	0.83

3.3 운반비용

운반비용은 철거 및 집적된 태양광 사용 후 모듈을 재활용 처리시설까지 운반하는 비용을 의미한다. 운반비용 산정과정은 다음과 같다.

이 연구에서 상정한 재활용 처리시설 위치는 충북 진천이다. 앞으로 건립될 태양광 사용 후 모듈 재활용센터 위치를 고려한 것이다. 다음으로 전국을 9개 권역(경기, 충남, 충북, 강원도, 전남, 전북, 경남, 경북, 제주)으로 구분한 뒤, 지역별 사용 후 모듈 발생량을 추정하였다. 마지막으로 권역별 집적소에서 사용 후 모듈 처리시설까지의 평균 이동 거리를 추정한 후 이에 따른 평균운반비용을 산정하였다.

3.3.1 운반비용 산정방법

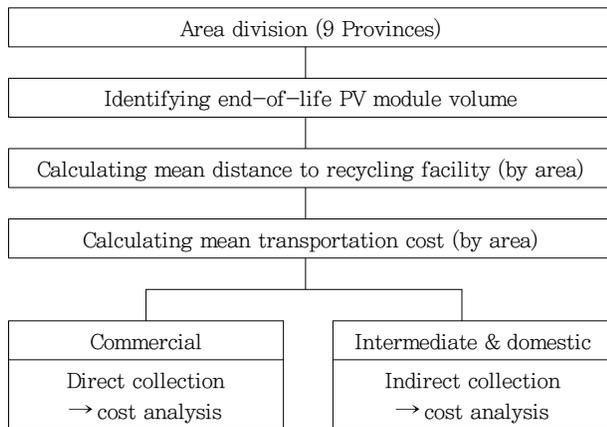


Fig. 2. Transportation cost calculation process

사용 후 모듈의 운반 시 트럭 운영 효율성을 고려하여^[18] 6톤 운송 트럭(후축 개조) 이용을 가정하였으며 비용은 전국 화물트럭 운반요금표를 기초로 추정하였다.

Table 10. Cargo optimization

Classification	Standards
Weight/module	20kg/1 module, 1ton/50 modules
Truck dimension	6ton (remodeled ver.) length: 850cm, height: 200cm, wide: 230cm
No. of modules transported	250 modules per delivery

3.3.2 태양광 사용 후 모듈 규모별 운반비용 산정

사용 후 모듈의 규모별 운반비용을 산정하기 위하여 수거 형태를 직접수거(중대규모)와 간접수거(소규모)로 구분하였다. 이 구분은 트럭의 최적 용량(모듈 개수 250장)을 고려한 것이다(Table 11 참고). 트럭 용량 이외 운반비용 산정을 위하여 고려해야 할 항목으로는 이동 거리별 비용, 섬 지역의 추가 이동비용, 도로통행비용 및 기타비용이 있다(Table 12 참고).

Table 11. Transportation cost evaluation

Classification	Direct collection	Indirect collection
Process	source → Recycling facility	source → Collection point → Recycling facility
Capacity	over 50kW	50kW or less
No. of modules	over 250	250 or less

Table 12. Decision criteria for transportation cost analysis

Classification	Standard
Cost/distance	Nation-wide freight truck transportation cost list ¹⁾
Additional cost (island area)	Weight value applied (island area : 3.0)
A toll	Expressway Corporation transport charge ²⁾
Others	Returning fee, Tax, Remodeled truck fee etc. Nationwide freight truck transportation cost list

¹⁾ 전국화물트럭 운반요금표

²⁾ 도로공사 운임료

트럭의 최적 용량과 기타 고려사항을 고려한 사업용 규모의 운반비용 산출과정은 Table 13과 같다.

먼저 재활용 처리시설까지의 권역별 평균이동 거리를 기준으로 내륙 화물비용을 산출하였다. 다음으로 일부 지역에 해양화물비용에 따른 가중치를 적용하고, 이동 거리별 통행료를 합하여 권역별 운송비용을 확정하였다. 확정된 값에는 권역별 사용 후 모듈 발생량 비중을 반영하였고, 이를 토대로 최종 운반비용을 산출하였다. 사업용 사용 후 모듈의 최종운반비용은 6톤당 300,961원, kg당 50.16원으로

Table 13. Transportation cost calculation

unit : KRW

9 Provinces	Mean D. (km)	Cost		③ toll fee	④ Total (KRW) (=①×②+③)	⑤ Power %	⑥ Unit cost (=④×⑤)
		① Inland	② Weight				
1. Capital area (Seoul, Gyeonggi, Incheon)	100	154,060	1.0	5,000	159,060	7%	10,815
2. Gyeongnam (Busan, Ulsan)	260	217,620	1.0	13,000	230,620	9%	21,714
3. Gyeongbuk (Daegu)	185	203,000	1.0	9,250	212,250	13%	26,940
4. Chungnam (Daejeon, Sejong)	90	146,880	1.0	4,500	151,380	13%	19,515
5. Jeonnam (Gwangju)	260	217,620	1.2	13,000	274,144	28%	77,549
6. Gangwon	180	191,620	1.0	9,000	200,620	5%	9,961
7. Chungbuk	50	115,420	1.0	2,500	117,920	4%	5,107
8. Jeonbuk	150	185,850	1.0	7,500	193,350	18%	34,451
9. Jeju	450	320,520	3.0	22,500	984,060	3%	27,549
Total	-	-	-	-	-	100%	233,601

Transportation Cost	Remodeled truck fee	Returning fee	Tax (10%)	Total
233,601	20,000	20,000	24,550	300,961

로 추산되었다.

사업용 운반비용(Table 13) 산출과 동일한 방법으로 가정용(~10kW)과 공공·상업용(10~50kW) 운반 단위비용을 산출하였다.

3.3.3 운반비용 종합

운반단위비용 산정에 있어 규모별 차이점은 가정용 및 공공·상업용 사용 후 모듈은 철거된 후 권역별 집적소에 보관된다는 가정이다. 이 가정에 따라 모듈이 일정규모(250장) 이상 모이는 기간 동안 사용 후 모듈은 권역집적소에 보관되고, 250장 이상 모듈이 모였을 때 6톤 트럭으로 중앙 재활용처리센터로 이송된다.

비용 구분에 따라 정리하면 각 지역에서 권역 집적소까지 운반비용은 철거비용에 포함되며, 권역별 집적소의 운영 및 관리비용은 본 연구 범위에서 제외하였다. 권역별, 발전소 규모별 차이를 고려하여 종합한 운반단위비용 결과는 다음(Table 14)과 같다.

Table 14. Transportation cost by scale

Unit	Domestic	Intermediate	Commercial
KRW/6 ton	269,397	270,593	300,961
KRW/kg	44.90	45.10	50.16

3.4 처리비용

재활용 처리비용은 사용 후 모듈을 분해하여 물질별로 회수하는 과정에서 소요되는 비용이다. 산업통상자원부가 건설 중인 충북 진천 소재 태양광 모듈 재활용센터(3,600톤/1년)를 처리시설로 가정하여 비용을 산정하였다.

처리비용은 산업연구원(2017)^[4]의 결과를 사용하였으며, 센터 조성비용과 유지관리비용으로 구분하여 산정하였다. 나아가 KDI 예비타당성조사의 민감도분석 방식에 따라 할인율 및 내구연한 변화에 따른 비용을 분석하였다.

3.4.1 재활용 처리시설 조성비용

재활용 처리시설 조성비용은 아래 식 (1)과 같이 설비투자액에 자본회수계수를 곱한 뒤 처리용량으로 나누어 산정하였다. 설비투자액은 산업연구원(2017)^[4]을 참고하여 장비 구축비와 공장 건축비로 구분하였다. 장비구축비는 한국에너지기술연구원(2015)^[3] 단가표에 따라 총 67.06억 원을 산정하였다. 공장 건축비는 조달청(2017)^[19] 공사유형별 단위면적당 공사비의 공장부분 단가(1,501천원/m²)를 적용하여 45.03억 원으로 추정하였다. 자본회수계수(Capital Recovery Factor, K)란 특정 기간에 해당되는 투자비용을 산정하기 위한 계수로 수식 (2)와 같이 해당 자본의 예상 할인율과 사용 기간을 이용하여 도출할 수 있다. 이 연구에서는 2017년 기획재정부의 사회적 할인율 지침^[20]에 따라 할인율은 4.5%로, 내구연한은 20년으로 상정하였다. 처리용량은 진천 태양광 모듈 재활용센터의 규모를 반영하여 3,600톤/년으로 하였다. 산정 결과, 재활용 처리시설 조성비용은 239,362원/톤으로 도출되었다.

- 조성비용(원/톤)

$$= \frac{\text{설비투자액} * \text{자본회수계수}(K)}{\text{처리용량(톤)}} \quad (1)$$

- 자본회수계수(K)

$$= \frac{i*(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

n = 처리시설 내구연한

i = 할인율

- 조성비용 : 239,362원/톤, 239원/kg

3.4.2 재활용 처리시설 유지관리비용

재활용 처리시설 유지관리비용은 산업연구원(2017)^[4]에서 산정한 공정운영비를 반영하여 산정하였다. 톤당 유지관리비용은 3,600톤/년 규모의 공정을 운영하는데 필요한 인건비, 에너지투입비용, 물질투입비용, 장비 및 공정의 유지보수비용 등을 합한 공정운영비용 10년 치(68.49억)의 평균을 구하고, 이를 시설용량으로 나누어 산정하였다. 그 결과 재활용 처리시설의 유지관리비용은 190,256원/톤, 190원/kg로 산출되었다.

3.4.3 재활용 처리비용 종합 및 민감도분석

진천 태양광 모듈 재활용 센터를 가정할 때 총 처리과정에는 시설 조성비용과 유지관리비용의 합인 429,618원/톤, 430원/kg이 필요한 것으로 나타났다. 처리비용에 영향을 미칠 수 있는 중요한 변수인 처리설비의 내구연한과 할인율에 대해서는 각 변수가 변화할 경우 처리비용이 어떻게 바뀌는지 파악할 필요가 있다. 이를 위해 다음과 같이 민감도 분석을 수행하였다.

1) 내구연한

재활용처리설비의 내구연한이 늘어날수록 재활용처리비용은 감소한다. 현재 시공 중인 충북 진천 태양광 모듈 재활용센터의 정상가동 시점이 불분명하여 시설 내구연한을 주요 종속변수로 사용하였다. 여기에서는 기본 가정인 20년 외에 추가로 내구연한이 10년에서 30년으로 5년씩 늘어날 경우의 처리비용 변화를 살펴보았다.

Table 15. Sensitivity analysis on facility life expectancy
unit : KRW/kg

Life expectancy	10yrs	15yrs	20yrs	25yrs	30yrs
Treatment cost	584	480	430	400	381

2) 할인율

할인율이 증가할수록 재활용 처리비용 및 재활용 단위비용이 증가한다. 장래의 불확실성을 고려하여 할인율을 4.5%를 기준으로 3.5~6%까지 다양하게 적용하였다.

Table 16. Sensitivity analysis on discount rate
unit : KRW/kg

Discount rate (%)	3.5	4	4.5	5.5	6
Treatment cost	409	419	430	440	451

3.5 전주기 재활용 단위비용

지금까지 살펴본 태양광 사용 후 모듈의 철거·운반·처리 단계별 소요비용을 합산하여 전주기 재활용 단위비용(원/kg)을 산출하면 Table 17과 같다. 태양광 사용 후 모듈 설치형태별로 가정용 2,528~3,555원/kg, 공공·상업용

Table 17. Unit recycling cost summary

unit : KRW/kg

	Commercial				Intermediate				Domestic			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1)	552	718	662	828	867	1,127	1,040	1,300	2,054	2,670	2,464	3,080
2)	50	50	50	50	45	45	45	45	45	45	45	45
3)	430	430	430	430	430	430	430	430	430	430	430	430
SUM	1,032	1,197	1,142	1,308	1,341	1,602	1,515	1,775	2,528	3,144	2,939	3,555

1) Decommissioning unit cost

2) Transportation unit cost

3) Treatment unit cost

1,341~1,775원/kg, 사업용 1,032~1,308원/kg의 전주기 재활용 단위비용이 도출되었다. 단위비용은 사용 후 모듈 규모, 재사용 고려 여부, 내구연한, 할인율 등에 따라 가변적이다.

4. 결론 및 시사점

태양광 사용 후 모듈 재활용 전 과정에 소요되는 단위비용(원/kg)은 총 1,032~3,555원으로 추산되었다. 추정에 필요한 자료는 선행연구와 현장 조사를 통해 확보하였다. 철거·운반·처리로 구분되는 재활용 주기 중 철거 시 발생하는 비용이 전체 비용의 53~87%를 차지하여 가장 큰 비중을 나타냈다.

사업용의 경우 철거비용이 전체 재활용 비용의 53~63%를 차지하는데 반해, 가정용은 81~87%로 그 비중이 더 높았다. 규모별로는 가정용 태양광 시설에서 발생하는 사용 후 모듈의 처리 단위비용이 사업용이나 공공·상업용에서 발생하는 경우보다 약 2배 정도 높은 것으로 나타났다. 따라서 사용 후 모듈 관리정책의 수립 시 처리비용이 많이 발생하는 철거과정 및 가정용 발생량에 초점을 맞출 필요가 있다.

전주기 단위비용 추산에 의거한 정책 시사점은 다음과 같다. 첫째, 철거비용에 대한 사회적 인식을 제고할 필요가 있다. 가정용 태양광의 경우 철거 시 발생할 비용에 대한 이해 없이 지자체 등에서 제공하는 설치보조금에 의존하여 사용을 결정하는 경우가 많다. 철거 시 적지 않은 비용이 발생할 수 있음을 충분히 사용자에게 인식시킬 필요가 있으며, 이를 토대로 재활용 정책을 집행할 필요가 있다.

둘째, 철거비용 부담주체에 대한 논의가 이루어져야 한다. 2015년부터 태양광 사용 후 모듈을 생산자책임재활용 제도로 관리하는 독일에서는 철거비용을 생산자가 아닌 소비자에게 부담시키고 있다^[18]. 2017년 제정된 미국 워싱턴 주 PV 모듈 책임관리 프로그램(SB 5939)에서도 철거비용을 제외한 수거, 운반, 재활용 의무만 생산자에게 부담시키고 있다^[21]. 우리나라에서는 설치 보조금 등 다양한 지원정책 및 민간재활용 시장의 특성을 고려하여 철거비용 부담주체를 결정할 필요가 있다. 최근 환경부는 태양광 모듈을

전자제품 생산자책임 재활용 대상 항목으로 편입시키는 계정을 예고하였다^[7]. 모듈 출고량 보고 등 세부적인 준비절차를 진행하면서 2021년 전면 시행을 목표로 하고 있다. 만약 태양광 사용 후 모듈을 기존의 폐전기·전자제품 목표관리제의 대형기기 군에 포함시켜 에어컨과 같이 철거 책임을 소비자에게 귀속시킨다면 유가성이 높은 사용 후 모듈의 특성상 부적절하게 처리될 가능성이 상존한다. 따라서 철거 시에도 지자체가 기존 폐기물 인프라를 활용하거나 보조를 확대하는 방안을 검토할 필요가 있다.

셋째, 태양광 모듈의 설치규모는 가정 및 공공·사업용, 사업용에 따라 다양하므로 그 특성을 반영하여 수거체계를 마련해야 한다. 분산되어 발생하는 가정용 사용 후 모듈의 특성상 권역별 집적소 구축과 같이 지방자치단체에 일정한 역할을 분담할 필요가 있을 것이다. 독일에서는 지자체가 운영하는 전자·전기폐기물 수거 거점(Collection point)의 별도 관리지침에 의거하여 태양광 사용 후 모듈을 회수하고 있다. 미국 워싱턴 주에서는 2021년부터 모든 태양광 모듈 생산자가 권역별로 수거센터를 의무적으로 설치하고 운영해야 한다^[21]. 미국 뉴욕 주에서도 비슷한 법안이 계류 중이다^[22].

이 연구는 우리나라에서 태양광 설치가 본격적으로 이루어지는 초기에 수행됐기 때문에 정확한 사용 후 모듈 발생량 예측에 어려움이 있다는 한계가 있다. 또한 아직 재활용 시장이 활성화되지 못한 이유로 자료 확보에 일정한 제약점을 가지고 있다. 나아가 태양광 기술의 발전에 따른 용량, 질량, 구성 성분 등 사용 후 모듈의 특성 변화를 충분히 분석에 반영하지 못했다는 문제도 있다. 향후 후속 연구가 태양광 사용 후 모듈 재활용 산업 활성화와 제도 구축에 보다 실질적인 도움을 줄 수 있기를 기대한다.

이 연구는 국내 최초로 태양광 사용 후 모듈에 대한 재활용 단위비용을 산정했다는 데 의의가 있다. 연구결과는 재활용 규모에 따른 총비용 산정에 직접 사용할 수 있음은 물론, 재활용 시설의 경제성 및 사업성 분석에 유용하게 적용할 수 있다. 나아가 사용 후 모듈의 효과적인 재활용시스템 구축을 위한 제도 설계에 다양한 시사점을 제공할 것으로 기대한다.

감사의 글

이 연구는 한국법제연구원에 제출한 “태양광 사용 후 모듈 재활용제도 구축연구” 보고서 내용 중 전주기 단위비용 추정에 관한 분석 부분을 수정·보완한 것이다. 연구비를 지원해 준 한국법제연구원에 감사를 표한다.

References

- [1] The Export-Import Bank of Korea, Foreign Economy Research Institute, 2018, “2018 first-quarter photovoltaic industry trend”.
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017, “3020 renewable energy transition plan”.
- [3] Korea Institute of Energy Research, 2015, “A research on photovoltaic module recycling system development”, pp. 118-144.
- [4] Korea Institute for Industrial Economics and Trade, 2017, “Revitalization of renewable energy industry through post-management system development”, pp. 68-88.
- [5] IRENA, 2016, “End of Life Management Solar Photovoltaic Panels”.
- [6] Korea Energy Press, 2017, “End-of-life photovoltaic module turns into a new business”, <http://www.koenergy.co.kr/news/articleView.html?idxno=87751>
- [7] Ministry of Environment Press, 2018, “Recycling policy for future end-of-life photovoltaic modules to be arranged”, <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=913050&menuId=286>
- [8] Ministry of Environment, 2015, “A research on improvement plan of extended producer responsibility policy on batteries”.
- [9] Korea Legislation Research Institute, 2012, “A research on legislation groundwork for implementing recycling target management system to waste electrical and electronic equipment”.
- [10] Korea Environment Corporation, 2013, “Reality of standard recycling cost under extended producer responsibility policy”.
- [11] European Commission, 2011, “Study on PV panels supplementing the impact assessment for the recast of the WEEE directive”.
- [12] Japan- Review of reuse, recycling, and disposal of end-of-life renewable energy system, 2017, “A report on reuse·recycling·treatment of solar powered facilities”.
- [13] Okopol et al., 2007, “Study on the development of a take back and recovery system for photovoltaic products”.
- [14] Korea Development Institute, 2010, “Sensitivity touch platform development and new industrialization support project”.
- [15] Seoul City, 2016, “Energy Encyclopedia”.
- [16] The Seoul City, 2018, “Mini-solar panel installation enterprise list”, <http://solarmap.seoul.go.kr/mini/>
- [17] Korea Energy Agency Renewable Energy Center, 2018, “Solar panel rental enterprise list 2018”, https://www.knrec.or.kr/customer/notice_read.aspx?no=1349&searchfield=TITLE&searchword=%EC%B0%B8%EC%97%AC%EA%B8%B0%EA%B4%80&page=1
- [18] Seoul National University, Graduate School of Environmental Studies, 2018, “End-of-life Photovoltaic Module Recycling Policy Design”.
- [19] Public Procurement Service, 2017, “Construction cost per area on construction types for 2016 orders”.
- [20] Ministry of Economy and Finance Press, 2017, 「Preliminary Feasibility Study」 Policy Reorganization.
- [21] Washington State Department of Ecology, 2018, “Draft Manufacturer Plan Guidance for the Photovoltaic Module Stewardship Program”.
- [22] The New York State Senate, 2018, “Senate Bill S2837B-Enacts the “solar panel collection act” <https://www.nysenate.gov/legislation/bills/2017/s2837>