

LCA기법을 활용한 태양광 시스템의 자원효율성 및 자원요구량 예측 Estimation of Resource Efficiency and Its Demand for Photovoltaic Systems Using the Life Cycle Assessment (LCA) Method

임지호 · 황용우[†] · 김준범* · 문진영
Ji-Ho Lim · Yong-Woo Hwang[†] · Jun-Beum Kim* · Jin-Young Moon

인하대학교 환경공학과 · *트루아공대 환경 및 지속가능센터
Department of Environmental Engineering, Inha University

*CREIDD Research Centre on Environmental Studies & Sustainability, University of Technology of Troyes

(2013년 1월 7일 접수, 2013년 6월 21일 채택)

Abstract : In this study, the resource efficiency and future metal resource requirement in photovoltaic (PV) production system were evaluated by using material balance data and life cycle assesment (LCA) method. As a result, in the resource efficiency of ferrous and non-ferrous metal, lead and tin had higher resource efficiency than other materials in all PV systems (SC-Si, MC-Si, CI(G)S, CdTe). In the resource efficiency of rare metals, gallium and rhenium in silicon system and rhenium and rhodium in thin-film system ranked as the first and second high resource efficiency. In case of rare earth metal, gadolinium and samarium took higher resource efficiency. The results of the future metal resource requirement in PV systems showed that 2,545,670 ton of aluminium, 92,069 ton of zinc, 22,044 ton of copper, 1,695 ton of tin and 31 ton of nickel will be needed by 2030 in South Korea, except resource recycling supplement.

Key Words : Photovoltaic (PV) System, Metal Resource, Resource Efficiency and Requirement

요약 : 본 연구에서는 LCA 기법으로 태양광 시스템 생산 시 소비되는 원료, 부원료, 에너지 등의 물질수지 자료를 분석하여 금속자원의 자원효율성 산정 및 필요금속자원량을 예측하였다. 태양광 시스템 생산 시 투입되는 금속자원의 자원효율성 분석결과 철·비철금속은 4가지 기술(SC-Si, MC-Si, CI(G)S, CdTe)에 대해 동일하게 납, 주석 순으로, 희유금속은 결정질 실리콘 시스템의 경우 갈륨, 레늄 순으로, 박막형 시스템의 경우 레늄, 로듐 순으로, 희토류는 4가지 기술에 대해 동일하게 가돌리늄, 사마리움 순으로 자원효율성이 높은 것으로 나타났다. 2030년까지 우리나라의 태양광 시스템의 증설에 필요한 금속자원량을 예측한 결과 자원순환에 의한 자체 수급량을 제외하고 알루미늄 2,545,670 ton, 구리 22,044 ton, 니켈 31 ton, 주석 1,695 ton 및 아연 92,069 ton이 필요한 것으로 나타났다.

주제어 : 태양광 시스템, 금속자원, 자원효율성, 자원요구량

1. 서론

산업화에 의한 지구온난화 현상이 가속화되면서 전세계적으로 지구온난화를 줄이기 위한 노력이 진행되고 있으며, 그 노력의 하나로 자원의 사용을 줄이고 대체에너지로서 사용할 수 있는 신재생에너지의 개발이 활발히 진행 중에 있다.¹⁻³⁾ 우리나라의 경우 「제3차 신재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획(2009~2030)」⁴⁾에 따른 「신재생에너지 수요전망-목표안」을 고시했다. 이 에너지 보급계획은 신재생에너지 중 에너지 자원의 확보성과 전력 생산성이 기대되는 태양광 시스템을 2010년부터 2030년까지 1.8%에서 4.1%로 증가시키는 등의 중장기적인 목표 설정 및 비전을 제시하고 있다.^{5,6)} 이러한 태양광 시스템의 생산을 위해서는 철·비철금속, 희유금속 및 희토류 등으로 구분되는 금속자원의 투입이 요구된다. 금속자원은 대부분 해외에서 국내 수급량을 맞추는 실정에서 2030년까지의 에너지 수급량을 충족시키기 위해서는 태양광 시스템의 생산이 늘어나야 하는데, 이와 비례하여 금속자원의 사용량도 증가할 것으로 예측된다.

따라서 본 연구에서는 태양광 시스템 특성을 고려하여 생산 시 전과정에서 소모되는 금속자원, 토지 및 에너지 등의 다각적 측면에서 평가하기 위해 LCA (Life Cycle Assessment)를 적용하였다. 또한 2030년 에너지 보급계획에 맞추어 태양광 시스템 생산 시 투입물에 대한 LCI DB^{7,8)}를 연결하여 물질분석을 실시함으로써 금속자원의 자원효율성을 산출하고, 2030년까지 태양광 시스템의 생산 시 필요한 금속자원량을 예측하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구의 범위

본 연구의 시스템 경계를 Fig. 1에 나타내었다. 태양광 시스템을 구성하는 모듈(Module), PCS (Power Conditioning System) 및 BOS (Balance of System)의 전과정 범위 중 원료단계부터 생산단계까지를 모두 포함하여 시스템 경계를 설정하였다. 본 연구에서 선정한 모듈, PCS 및 BOS는 국내

[†] Corresponding author E-mail: hwangyw@inha.ac.kr Tel: 032-860-7501 Fax: 032-865-1425

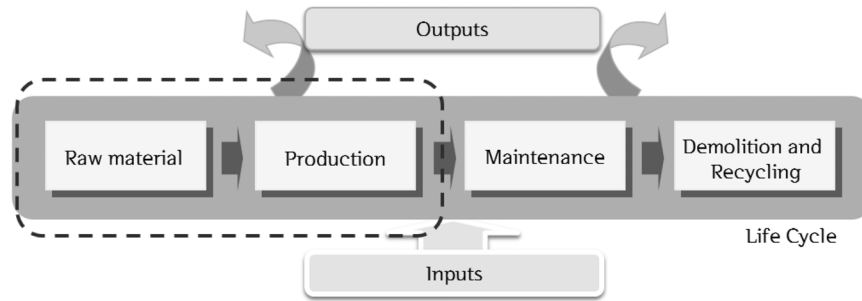


Fig. 1. Life cycle of photovoltaic system.

에서 생산되는 제품을 기준으로 선정하였으며, 모듈의 결정질 시스템의 경우, 단결정 실리콘 모듈(SC-Si), 다결정 실리콘 모듈(MC-Si)로, 박막형 시스템의 경우 CI(G)S 박막형 모듈, CdTe 박막형 모듈로 선정하였다.

본 연구에서 사용된 태양광 시스템의 제원 및 물질 구성은 현재 생산되고 있는 제품 자료를 이용하였다. 태양광 시스템 제원의 경우 국내외 태양광 시스템 생산업체 20개사의 대표 제품에 대한 제원 자료를 수집하여 그 중 기술적 및 구조적으로 가장 유사한 제품 제원의 평균 자료를 이용하였다. 또한 태양광 시스템 생산 시 투입되는 원료, 부원료 등의 물질 구성 자료는 각 기술별로 1개 회사를 선정하여 태양광 시스템 생산 시 실제 투입물질을 제공받아 본 연구를 수행하였다.

2.2. 연구의 대상

본 연구에서 선정한 기술별 모듈의 제원을 Table 1에 나타내었다. 4가지 기술별로 동등한 비교를 위해 기능단위를 1 m²로 설정하였으며 기능단위를 기준으로 모듈의 무게 및 전력생산량 등을 환산하였다.

Table 1. The general data of the photovoltaic module

Category	SC-Si	MC-Si	CI(G)S	CdTe
Area/f.u	1 m ²	1 m ²	1 m ²	1 m ²
Weight/f.u	19.5 kg	20.1 kg	17.4 kg	15.8 kg
Capacity/f.u	92.18 Wp	86.42 Wp	98.61 Wp	90.28 Wp
Performance efficiency	90%	91%	90%	89%
Conversion efficiency	21%	19%	13%	9%

본 연구에서 선정한 결정질 실리콘 모듈의 생산 시 투입물질을 Table 2에 나타내었다. 단결정 실리콘 모듈의 경우 Glass sheet, Aluminium 등의 순으로, 다결정 실리콘 모듈의 경우 Glass sheet, Aluminium 등의 순으로 구성되어 있다.

본 연구에서 선정한 박막형 모듈의 생산 시 투입물질을 Table 3에 나타내었다. CI(G)S 박막형 모듈의 경우 Glass sheet, Nitrogen 등의 순으로, CdTe 박막형 모듈의 경우 Glass soda lime, Wire 등의 순으로 구성되어 있다.

본 연구에서 선정한 PCS 및 BOS의 생산 시 투입물질을

Table 2. Input materials of SC-Si module and MC-Si module

Materials (SC-Si)	Weight (kg)	Ratio (%)
Glass	1.01E+01	51.635
Aluminium	3.77E+00	19.345
Ethyl vinyl acetate	1.52E+00	7.788
Silicon carbide	1.48E+00	7.566
Steel wire	9.42E-01	4.833
Others	8.80E-01	4.512
Total, Cut-off	1.87E+01	95.679

Materials (MC-Si)	Weight (kg)	Ratio (%)
Glass sheet	1.00E+01	50.035
Aluminium	3.77E+00	18.862
Silicon carbide	3.01E+00	15.085
Ethyl vinyl acetate	1.42E+00	7.094
Steel wire	9.42E-01	4.712
Others	9.75E-01	4.874
Total, Cut-off	1.89E+01	94.501

Table 3. Input materials of CI(G)S module and CdTe module

Materials (CI(G)S)	Weight (kg)	Ratio (%)
Glass sheet	1.09E+01	62.787
Nitrogen	2.78E+00	15.964
Aluminium	1.70E+00	9.743
Ethyl vinyl acetate	8.68E-01	4.989
Ammonia	2.93E-01	1.686
Others	1.60E-01	0.916
Total, Cut-off	1.67E+01	96.086

Materials (CdTe)	Weight (kg)	Ratio (%)
Glass soda lime	1.29E+01	81.386
Wire	1.94E-01	3.614
Ethyl vinyl acetate	3.76E-01	2.381
Corrugated box	5.71E-01	1.227
Plastics	7.03E-02	0.445
Others	3.70E-01	2.344
Total, Cut-off	1.44E+01	91.394

Table 4. Input materials of PCS and BOS

Materials (PCS)	Weight (kg)	Ratio (%)	Materials (BOS)	Weight (kg)	Ratio (%)
Aluminium	6.82E-01	42.625	Aluminium	7.96E+00	29.334
Transformers	3.10E-01	19.375	Steel	7.21E+00	26.571
ABS	1.48E-01	9.250	Steel section bar rolling	6.15E+00	22.664
Steel	7.80E-02	4.875	Concrete	1.34E+00	4.947
Coils	7.40E-02	4.625	Wire drawing	1.06E+00	3.906
Others	2.70E-01	16.901	Others	6.04E-01	2.227
Total, Cut-off	1.56E+00	97.650	Total, Cut-off	2.43E+01	89.651

Table 4에 나타내었다. 본 연구에서 PCS는 Aluminium, Transformers 등의 순으로 구성되어 있으며, BOS는 Aluminium, Steel 등의 순으로 구성되어 있다.

2.3. 자원효율성 산정

금속자원의 종류 및 투입량에 따른 태양광 시스템 전력생산의 영향을 파악하기 위하여 자원효율성을 고안된 식 (1)에 의해 산정하였다. 기능단위인 모듈의 넓이(1 m²)를 기준으로, 자원효율성은 모듈의 전력생산량(EP) 및 종류별 금속자원량(MR)을 이용하여 산정하였다. 모듈의 전력생산량은 모듈 자체 전력생산량에 전력 변환효율 및 성능효율을 곱하여 산정하였으며, 종류별 금속자원량은 태양광 시스템 생산 단계에서 투입되는 직접 투입량(MR_{dir})과 원료단계에서부터 생산단계까지 투입되는 간접 투입량(MR_{indir})을 더하여 산정하였다.

$$E/M = \frac{EP}{MR} \quad (1)$$

E/M: 자원효율성(Wp/kg)

EP: 모듈의 전력생산량(Wp/m²)

MR: 종류별 금속자원량(kg/m²)

2.4. 금속자원량 예측

「신재생에너지 수요전망-목표안」⁴⁾에서 고시한 바와 같이 에너지 보급계획을 기준으로 태양광 시스템 증설 시 투입되는 금속자원량을 고안된 식 (2)에 의해 산정하였다. 2030년까지 태양광 시스템 생산 시 필요한 금속자원량은 종류별 금속자원량(MR)에 모듈별 필요면적(Area_i)을 곱하여 산정하였다. 모듈별 필요면적은 년도별 모듈 전력생산량에 기술별 점유율을 적용한 값에 모듈의 전력생산량 및 태양광 시스템의 발전시간을 나누어 산정하였다.

$$\text{Future metal resource requirement} = MR \times Area_i \quad (2)$$

MR: 종류별 금속자원량(kg/m²)

Area_i: 모듈별 필요면적(m²/m²)

3. 연구결과

3.1. 목록분석 결과

본 연구에서 자원효율성 산정 및 2030년까지의 금속자원량을 예측하기 위해 기초자료로 사용되는 목록분석 주요결과를 Table 5에 나타내었다. 본 연구에서는 환경부 및 산업통상자원부에서 제공하는 LCI DB⁸⁾를 이용하였고, 국내에서 존재하지 않을 경우 ecoinvent에서 제공하는 LCI DB⁷⁾를 이용하였다. 태양광 시스템 생산을 위해 투입되는 금속자원은 총 32가지로 나타났으며, 이 중 철·비철금속은 7가지, 희유금속은 18가지, 희토류는 7가지로 분류되었다. 각 금속자원의 질량 분석 결과 철·비철금속이 94.7~96.2%, 희유금속은 3.6~5.3%, 희토류는 0.002~0.138%로 철·비철금속이 압도적인 비중을 차지하는 것으로 나타났다.

3.2. 자원효율성 산정 결과

자원효율성 산정을 위해 우선 각 모듈별 전력생산량을 산정하였고 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 모듈의 전력생산량은 Table 1의 모듈 자체 전력생산량, 성능효율 및 변환효율 자료를 이용하여 산정하였다.

태양광 시스템 생산 시 투입되는 종류별 금속자원량은 Table 5에 나타난 금속자원의 종류별 직·간접 투입량을 합산하여 산정하였다. 예를 들어 아래의 계산에서와 같이 단결정 실리콘 시스템 생산 시 투입되는 알루미늄의 양은 22.9 kg/m²로 나타났다.

$$\begin{aligned} MR_{Al} &= MR_{dir,Al} + MR_{indir,Al} \\ &= 1.30E+01 \text{ kg/m}^2 + 9.90E+00 \text{ kg/m}^2 \\ &= 22.9 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

이와 같이 기술별 전력생산량 및 종류별 금속자원량의 산정결과를 이용하여 자원효율성을 산정하였다. 예를 들어 아래의 계산에서와 같이 단결정 실리콘 시스템 생산 시 투입되는 알루미늄의 자원효율성은 0.76 Wp/kg로 나타났다.

$$\begin{aligned} E/M(\text{Resource efficiency})_{Al} &= 17.42 \text{ Wp/m}^2 \div 22.9 \text{ kg/m}^2 \\ &= 0.76 \text{ Wp/kg} \end{aligned}$$

Table 5. The result of material analysis of the photovoltaic system

Category	Metal material	Unit	SC-Si		MC-Si		CI(G)S		CdTe	
			Direct	Indirect	Direct	Indirect	Direct	Indirect	Direct	Indirect
			Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value	Value
Ferrous & Non ferrous metal	Aluminium	kg	1,3E+01	9,9E+00	1,3E+01	9,9E+00	1,1E+01	7,5E+00	8,7E+00	5,5E+00
	Copper	kg	1,2E-01	1,5E-01	1,2E-01	1,5E-01	4,7E-02	9,4E-02	3,4E-02	6,3E-02
	Iron	kg	0,0E+00	7,7E+00	0,0E+00	7,7E+00	0,0E+00	7,7E+00	0,0E+00	7,5E+00
	Lead	kg	3,5E-03	9,1E-03	3,5E-03	9,1E-03	0,0E+00	4,0E-03	0,0E+00	3,6E-03
	Nickel	kg	1,7E-04	4,1E-01	1,7E-04	4,1E-01	0,0E+00	4,1E-01	0,0E+00	4,0E-01
	Tin	kg	5,7E-03	1,6E-02	5,7E-03	1,6E-02	1,1E-02	1,8E-02	0,0E+00	4,9E-03
	Zinc	kg	2,7E-01	2,9E-01	2,7E-01	2,9E-01	2,8E-01	3,1E-01	2,7E-01	2,9E-01
Total	kg	1,3E+01	1,9E+01	1,3E+01	1,9E+01	1,1E+01	1,6E+01	9,0E+00	1,4E+01	
Rare metal	Bentonite	kg	0,0E+00	7,2E-01	0,0E+00	8,2E-01	0,0E+00	6,2E-05	0,0E+00	1,1E-04
	Cadmium	kg	0,0E+00	9,2E-06	0,0E+00	9,3E-06	3,4E-02	7,7E-01	0,0E+00	6,2E-01
	Chromium	kg	0,0E+00	1,6E-01	0,0E+00	1,6E-01	0,0E+00	1,6E-01	0,0E+00	1,5E-01
	Cobalt	kg	0,0E+00	1,4E-07	0,0E+00	1,4E-07	0,0E+00	1,2E-07	0,0E+00	1,2E-07
	Gallium	kg	0,0E+00	2,0E-10	0,0E+00	2,1E-10	1,1E-02	1,4E-02	0,0E+00	1,2E-10
	Gold	kg	0,0E+00	8,0E-05	0,0E+00	8,0E-05	0,0E+00	8,0E-05	0,0E+00	8,0E-05
	Indium	kg	0,0E+00	1,6E-07	0,0E+00	1,6E-07	5,5E-03	1,1E-01	0,0E+00	1,7E-07
	Manganese	kg	0,0E+00	2,0E-01	0,0E+00	2,0E-01	0,0E+00	2,0E-01	0,0E+00	2,0E-01
	Molybdenum	kg	0,0E+00	1,0E-01	0,0E+00	1,0E-01	1,1E-02	1,3E-01	0,0E+00	1,0E-01
	Pd	kg	0,0E+00	8,8E-08	0,0E+00	3,5E-07	0,0E+00	7,7E-08	0,0E+00	6,5E-08
	Pt	kg	0,0E+00	1,2E-03	0,0E+00	4,6E-09	0,0E+00	3,2E-09	0,0E+00	2,8E-09
	Rh	kg	0,0E+00	2,1E-09	0,0E+00	2,2E-09	0,0E+00	1,6E-09	0,0E+00	1,3E-09
	Rhenium	kg	0,0E+00	5,7E-10	0,0E+00	5,9E-10	0,0E+00	4,5E-10	0,0E+00	3,7E-10
	Silver	kg	8,8E-03	9,3E-03	8,8E-03	9,3E-03	0,0E+00	2,4E-03	0,0E+00	4,2E-03
	Tantalum	kg	0,0E+00	6,2E-07	0,0E+00	6,2E-07	0,0E+00	6,9E-07	0,0E+00	5,9E-07
	Tellurium	kg	0,0E+00	4,6E-04	0,0E+00	4,6E-04	0,0E+00	1,2E-04	0,0E+00	4,0E-04
TiO ₂	kg	0,0E+00	5,6E-03	0,0E+00	1,6E-02	0,0E+00	5,1E-03	0,0E+00	4,8E-03	
Zirconium	kg	0,0E+00	8,3E-07	0,0E+00	8,3E-07	0,0E+00	9,4E-07	0,0E+00	8,0E-07	
Total	kg	8,8E-03	1,2E+00	8,8E-03	1,3E+00	6,2E-02	1,4E+00	0,0E+00	1,1E+00	
Rare earth metal	Cerium	kg	0,0E+00	5,8E-15	0,0E+00	5,8E-15	0,0E+00	4,5E-15	0,0E+00	3,4E-15
	Gadolinium	kg	0,0E+00	8,8E-17	0,0E+00	8,8E-17	0,0E+00	6,7E-17	0,0E+00	4,9E-17
	Lanthanum	kg	0,0E+00	1,1E-15	0,0E+00	1,1E-15	0,0E+00	7,4E-16	0,0E+00	5,2E-16
	Neodymium	kg	0,0E+00	3,0E-15	0,0E+00	3,0E-15	0,0E+00	2,3E-15	0,0E+00	1,7E-15
	Praseodymium	kg	0,0E+00	2,5E-16	0,0E+00	2,5E-16	0,0E+00	1,9E-16	0,0E+00	1,4E-16
	Samarium	kg	0,0E+00	1,1E-16	0,0E+00	1,1E-16	0,0E+00	8,3E-17	0,0E+00	6,1E-17
	Uranium	kg	0,0E+00	4,6E-02	0,0E+00	4,9E-04	0,0E+00	2,4E-03	0,0E+00	9,2E-04
Total	kg	0,0E+00	4,6E-02	0,0E+00	4,9E-04	0,0E+00	2,4E-03	0,0E+00	9,2E-04	

Table 6. Result of power production of the photovoltaic system

Category	Unit	SC-Si	MC-Si	CI(G)S	CdTe
Power production	Wp/m ²	17,42	14,94	11,54	7,23

이와 같이 산정한 자원효율성 산정결과를 Fig. 2에 나타내었다. 금속자원은 종류별로 가치가 서로 상이하기 때문에 철·비철금속, 희유금속 및 희토류를 각각 분류하여 분석하였다. 철·비철금속의 경우 4가지 기술(단결정 실리콘, 다결정 실리콘, CI(G)S 박막형, CdTe 박막형)에 대해서 동일

하게 납, 주석, 구리 등의 순으로 자원효율성이 높게 나타났다. 희유금속의 경우 결정질 실리콘 시스템은 갈륨, 레늄, 로듐 등의 순으로, 박막형 시스템은 레늄, 로듐, 백금 등의 순으로 자원효율성이 높은 것으로 나타났다. 희토류의 경우 4가지 기술에 대해서 동일하게 가돌리늄, 사마리움, 프라세오디뮴 등의 순으로 자원효율성이 높은 것으로 나타났다. 상기의 결과를 종합하면 대체적으로 CI(G)S 박막형 시스템이 각 금속에 대해 자원효율성이 높은 것으로 나타났으며, 자원효율성이 낮은 기술은 CdTe 박막형 기술인 것으로 나타나

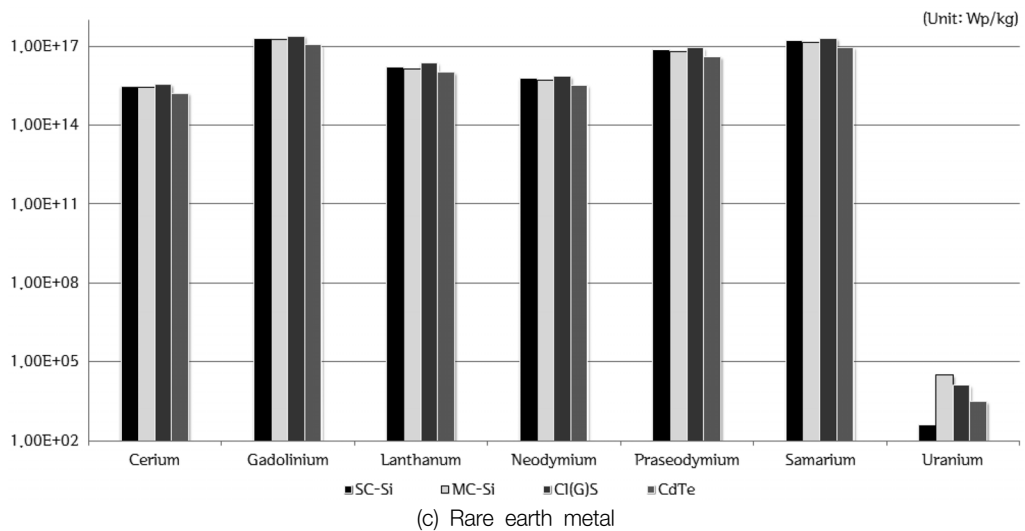
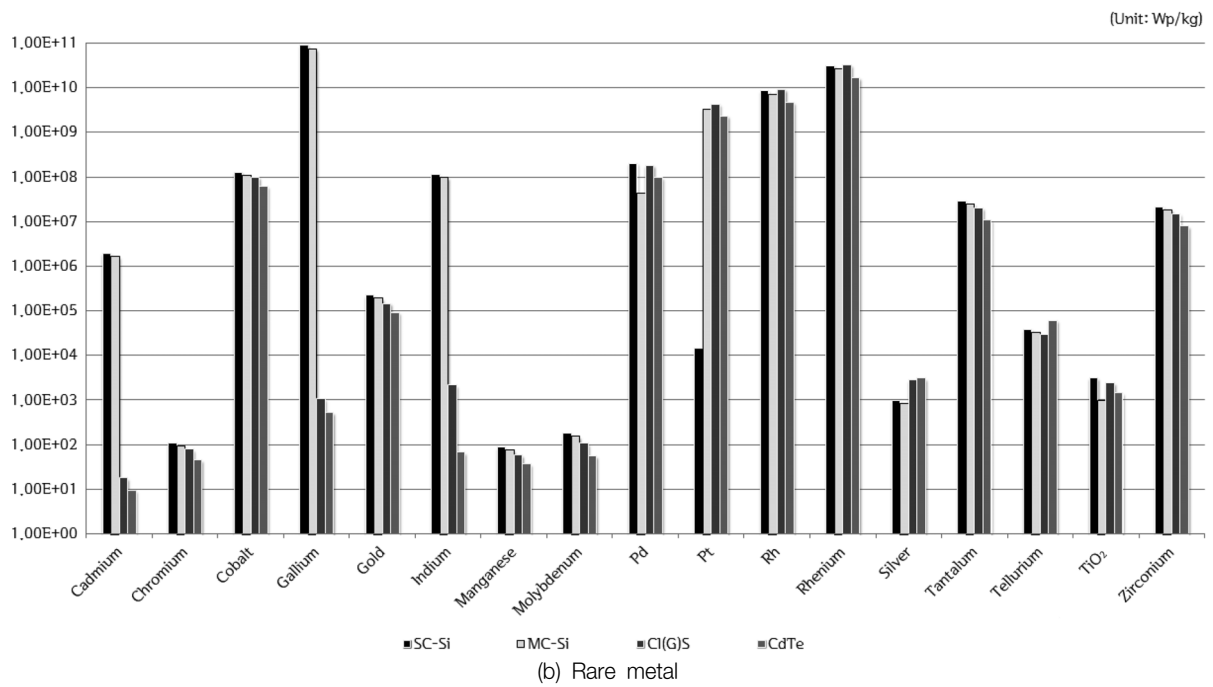
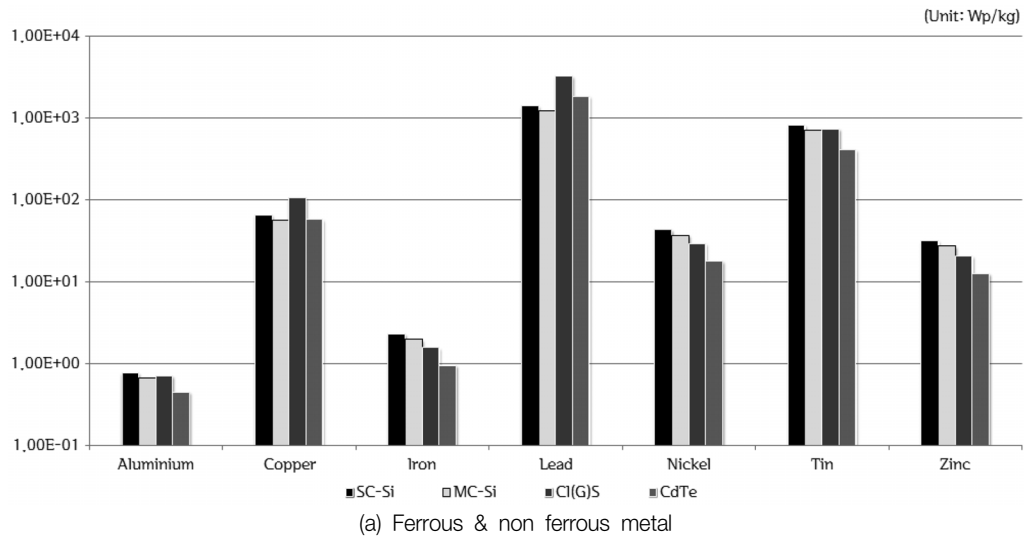


Fig. 2. Results of resource efficiency of the photovoltaic system.

Table 7. The necessary area of the photovoltaic system

Category	Unit	Year				
		2010	2015	2020	2025	2030
SC-Si	m ²	12,207,036	27,686,974	46,658,006	65,760,740	107,248,938
MC-Si	m ²	13,916,809	31,564,936	51,871,741	73,109,085	121,923,345
CI(G)S	m ²	1,638,511	3,716,333	11,469,578	16,165,456	36,439,064
CdTe	m ²	4,574,780	10,376,131	23,527,440	33,160,051	77,515,526
Total	m ²	32,337,136	73,344,374	133,526,765	188,195,332	343,126,873

투입물에 대한 자원효율성 측면에서 기술개발이 필요할 것으로 사료된다.

3.3. 금속자원량 예측 결과

3.3.1. 필요 금속자원량 산정 결과

본 연구에서는 2030년까지 태양광 시스템 보급계획을 바탕으로 금속자원량을 산정하였다. 태양광 시스템 생산 시 투입되는 금속자원량을 산정하기 위해 태양광 시스템의 모듈별 필요면적을 산정하였고, 그 결과를 Table 7에 나타내었다. 모듈별 필요면적을 산정하기 위해 년도별 태양광 시스템 전력생산량, 국내 기술별 태양광 시스템 점유율 및 태양광 시스템 발전시간 등을 적용하였다. 2030년까지 총 필요한 모듈별 면적은 현재의 약 10.6배에 해당하는 343,126,873 m²로 나타났다.

종류별 금속자원량은 Table 5에 나타난 금속자원의 종류별 직·간접 투입량을 합산하여 산정하였다. 위와 같은 산정결과를 이용하여 2030년까지의 태양광 시스템 보급계획에 따른 기술별 금속자원량을 Fig. 3에 나타내었다. 년도별 필요 금속자원량은 해당년도까지 총 필요 누적량을 의미한다. 각 기술별로 금속자원량을 예측한 결과, 2030년까지 철·비철금속 및 희유금속은 다결정 실리콘 시스템, 단결정 실리콘 시스템, CdTe 박막형 시스템, CI(G)S 박막형 시스템 순으로, 희토류는 단결정 실리콘 시스템 CdTe 박막형 시스템, 다결정 실리콘 시스템, CI(G)S 박막형 시스템 순으로 금속자원량이 많이 필요할 것으로 예측되었다. 또한 각 종류별로 금속자원량을 예측한 결과, 철·비철금속의 경우 알루미늄 7.11E+06 ton, 철 2.64E+06 ton, 아연 1.94E+05 ton 등의 순으로, 희유금속의 경우 결정질 실리콘 시스템은 망간 4.58E+04 ton, 크로뮴 3.67E+04 ton, 몰리브덴 2.29E+04 ton 등의 순으로, 박막형 시스템은 카드뮴 8.35E+04

Table 8. The prediction of rate of resource recycling for internal metal materials

Metal resource	Unit	Year				
		2010	2015	2020	2025	2030
Aluminium	%	34,348	35,378	35,909	36,555	37,213
Copper	%	28,415	29,267	29,706	30,241	30,786
Nickel	%	17,463	17,987	18,257	18,585	18,920
Tin	%	0,641	0,660	0,670	0,682	0,694
Zinc	%	0,933	0,961	0,975	0,993	1,011

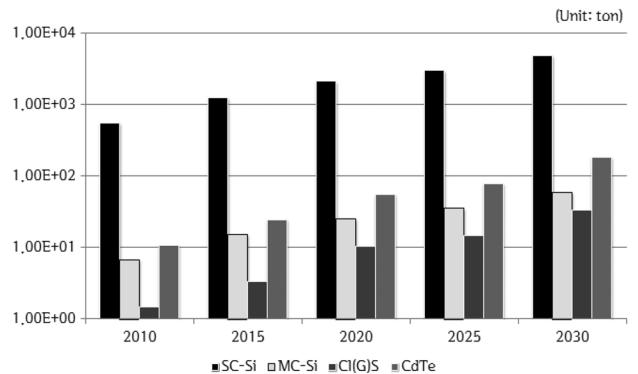
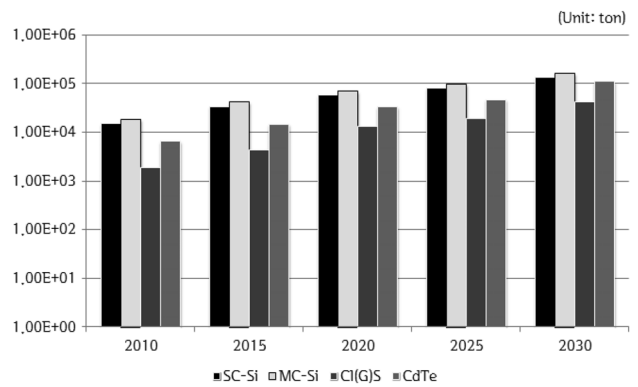
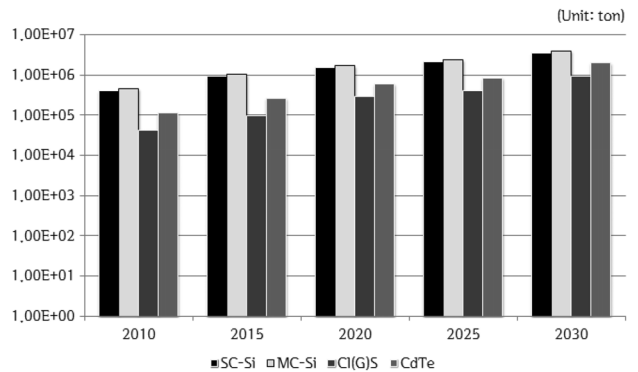


Fig. 3. Results of metal resource requirement of the photovoltaic system.

ton, 망간 2.28E+04 ton, 크로뮴 1.79E+04 ton 순으로, 희토류의 경우 우라늄이 5.21E+03 ton으로 가장 많은 필요량을 나타내었다.

3.3.2. 자원순환을 적용 분석

2030년까지 필요한 금속자원량 중 자원순환에 의해 국내에서 자체 수급 가능한 양을 제외하고 실제 필요한 금속자원량을 파악하기 위해 자원순환율을 적용하였다. 본 연구에서 적용된 자원순환율은 국내 산업에서 투입되는 금속자원의 총량에 대비하여 사용 후 재활용되는 금속자원량을 나타내는 지표로 정의하였다. 자원순환율이 적용된 금속자원량을 산정하기 위해 녹색성장위원회 및 환경부에서 고시한 자원순환 기본계획^{5,9)}을 바탕으로 2030년까지의 자원순환율을 예측하였다. 본 연구에서는 태양광 시스템 생산 시 투입되는 금속자원 중 95% 정도 차지하는 철·비철금속에서 주요 투입물질인 알루미늄, 구리, 니켈, 주석 및 아연 등 5개

금속자원으로 연구범위를 제한하였다.

국내 산업에서 태양광 시스템 생산 시 투입되는 금속자원량을 파악하기 위해 기존연구¹⁰⁾ 및 산업통상자원부에서 제공하는 MFA 자료¹¹⁾ 이용하여 5가지 금속자원의 물질흐름을 조사하였다. 2030년까지 필요 금속자원량에 자원순환율을 적용하여 분석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 자체 수급량이 가장 많을 것으로 예상되는 금속자원은 알루미늄 $1.50E+06$ ton이고, 가장 적은 금속자원은 주석 $1.20E+01$ ton으로 나타났다. 금속자원별로 자원순환에 의해 자체 수급되는 양을 제외하고 알루미늄 $2.5E+06$ ton, 구리 $2.2E+04$ ton, 니켈 $3.1E+00$ ton, 주석 $1.7E+03$ ton 및 아연 $9.2E+04$ ton 정도 필요한 것으로 나타났다.

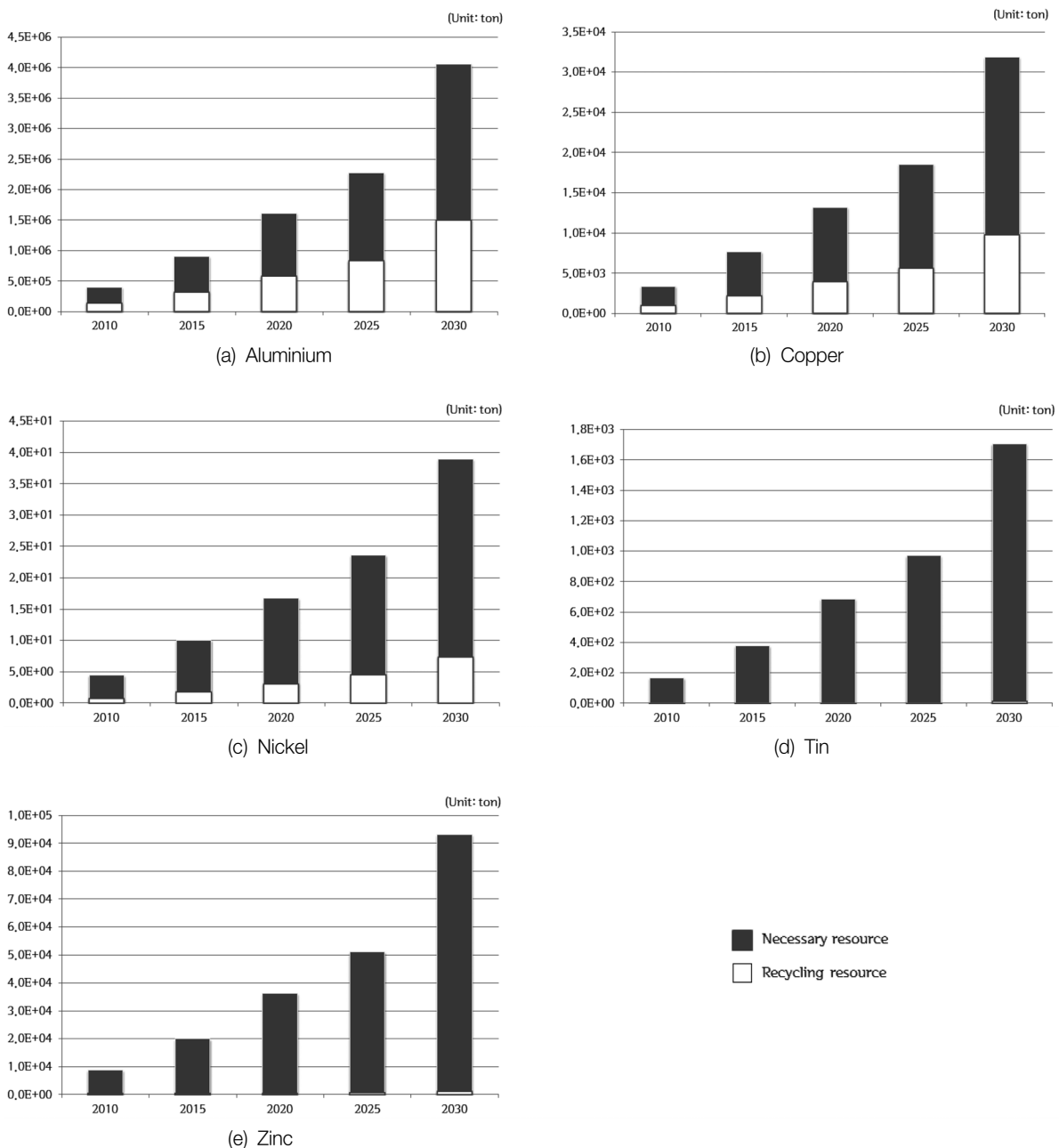


Fig. 4. Metal material requirements by the year 2030 (application of resource recycling).

4. 결론

태양광 시스템의 자원효율성 산정 및 필요 금속자원량 예측을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

태양광 시스템은 단결정 실리콘, 다결정 실리콘, CI(G)S 박막형, CdTe 박막형 등 4가지 기술로 구분할 수 있다. 4가지 기술에 대한 자원효율성 분석결과 철·비철금속 및 희토류에서는 각각 납 및 가돌리늄의 자원효율성이 높은 것으로 나타났다. 희유금속의 경우 결정질 실리콘 시스템은 갈륨, 박막형 시스템은 레늄의 자원효율성이 높은 것으로 나타났다.

4가지 기술에 대한 태양광 시스템의 2030년까지의 필요 금속자원량을 예측한 결과 철·비철금속 및 희토류에서는 각각 알루미늄 및 우라늄이 가장 많이 필요하였다. 희유금속의 경우 결정질 실리콘 시스템은 망간, 박막형 시스템은 카드뮴이 가장 많이 필요하였다.

위와 같이 분석된 결과를 바탕으로 철·비철금속의 주요 5개 금속자원을 선정하여 자원순환율의 적용 결과를 보면 2030년까지 자원순환에 의한 자체 수급량을 제외하고 알루미늄 2.5E+06 ton, 구리 2.2E+04 ton, 니켈 3.1E+00 ton, 주석 1.7E+03 ton 및 아연 9.2E+04 ton 정도 필요한 것으로 나타났다.

사사

본 논문은 인하대학교의 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

KSEE

참고문헌

1. Kang, Y., "Outlook and trend for new-renewable energy research and development," *Energy&Climate Change*, **404**, 74~83(2010).
2. Molin, H., Xiliang, Z. and Jiankun, H., "Causality relationship between the photovoltaic market and its manufacturing in China, Germany, the US, and Japan," *Frontiers in Energy*, **5**(1), 43~48(2011).
3. Benjamin, K. S., "National energy governance in the United States," *J. World Energy Law Business*, **4**(2), 97~123(2011).
4. Ministry of Trade, Industry & Energy, "The 3rd basic plan for new and renewable energy development promotion (2009~2030)," (2008).
5. Presidential committee on Green Growth, "National Strategy and 5-year plan for green growth (2009~2013)," (2009).
6. Lim, D. and Yu, J., "Market tendency and outlook of solar energy industry," *J. Kor. Solar Energy Soc.*, **10**(4), 3~11(2010).
7. Ecoinvent, <http://www.ecoinvent.org>.
8. Korean Environmental Industry & Technology Institute, <http://www.edp.or.kr>
9. Ministry of Environment & Interagency, "The 1st basic plan for renewable resources(2011~2015)(2011).
10. Ministry of Trade, Industry&Energy, "A Study of the intergrated material flow analysing management system,"(2010).
11. Korea material flow analysing management system, <http://www.k-MFA.kr>