

LCA를 이용한 태양광발전의 환경영향분석

최 봉하¹⁾, 박 수억²⁾, 이 덕기³⁾

Environmental Effect Analysis for PV system using LCA

Bongha Choi, Soo-Uk Park, Deokki Lee

Key words : LCA(전과정 평가), Energy Payback Time, 단위 이산화탄소 배출량, 태양광 발전 시스템

Abstract : This paper analyses the environmental effect of 100kw PV system installed in Tibet using Life Cycle Assessment(LCA). Then, energy payback time(EPT) and life-cycle CO₂ emission rate are estimated based on life-cycle of the PV system. As a result of the estimation, 6 year of EPT and 20 g-C/kWh of CO₂ emission rate are obtained. In China, average CO₂ emission rate of fossil fuel power generation plant is 260 g-C/kWh. This shows that PV system would be very promising for global environmental issues. For advanced LCA, we need to collect detailed and various data about raw material of PV system.

subscrip

LCA : Life Cycle Assessment
EPT : Energy Payback Time

1. 서론

태양광발전기술은 무한정, 무공해의 태양에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 기술로써, 햇빛이 비치는 곳에서는 어디서나 전기를 얻을 수 있으며 다른 발전방식과는 달리 대기오염, 소음, 발열, 진동 등의 공해가 전혀 없는 깨끗한 발전방식이다. 이러한 태양광 발전기술은 신재생에너지 기술 중에서도 가장 유망한 대체에너지 기술의 하나로 인정받고 있다.

기존의 태양광발전의 효과에 대한 정량적인 연구는 발전단가 산정을 통한 경제적 측면에서의 접근이 주를 이뤄왔다. 아직까지 태양광발전의 경제성은 기존의 화석연료나 원자력을 통한 발전에 비해 크게 뒤져 있는 것이 사실이므로, 기존의 발전단가 측면에서의 분석만으로는 태양광발전의 장점을 효과적으로 설명하기에 부족하다.

태양광발전의 가장 큰 장점은 청정한 발전 방식이라는 점이다. 하지만, 이를 객관적이고 정량적으로 입증, 비교하기 위한 기존의 연구는 미미했던 것이 사실이며, 새로운 접근 방식이 필요한 시점이다.

어떠한 제품의 환경영향을 평가하기 위해 가장

널리 쓰이는 분석 방법론은 LCA이다. LCA는 대상 시스템이 환경에 미치는 영향을 시스템 전과정에 걸쳐 분석하여 그 영향도를 정량적으로 제시한다.

이에 본 연구에서는 실제 태양광발전 시스템에 LCA를 적용하여 태양광 발전 시스템이 갖는 환경적 이점을 정량적으로 제시하고자 한다.

2. LCA 방법론

LCA는 제품 또는 어떠한 시스템이 환경에 미치는 영향을 “요람에서 무덤까지” 라는 접근방법에 따라 체계적으로 평가하는 방법이다. 이 접근방법은 제품 또는 시스템의 원료획득에서부터 제조, 사용 및 처리에 이르기까지의 전과정에 관련된 환경측면 및 잠재적인 환경영향을 제품이나 시스템과 관련된 투입물과 산출물의 목록화 및 영향평가, 그 결과의 해석 등을 통하여 파악하는 것이다.

즉, 어떤 제품이나 시스템의 전과정에 걸쳐 소모되고 배출되는 에너지 및 물질의 양을 정량화

-
- 1) 한국에너지기술연구원 에너지정책연구부
E-mail : bigunit@kier.re.kr
Tel : (042)860-3489 Fax : (042)860-3135
 - 2) 한국에너지기술연구원 에너지정책연구부
E-mail : supark@kier.re.kr
Tel : (042)860-3034 Fax : (042)860-3135
 - 3) 한국에너지기술연구원 에너지정책연구부
E-mail : deokki@kier.re.kr
Tel : (042)860-3753 Fax : (042)860-3135

하여, 이들이 환경에 미치는 영향을 평가하고 이를 통하여 환경개선의 방안을 모색하고자 하는 객관적인 환경영향 평가기법이라 할 수 있다.

LCA의 기본적인 Framework은 다음의 Fig.1과 같이 나타낼 수 있다.

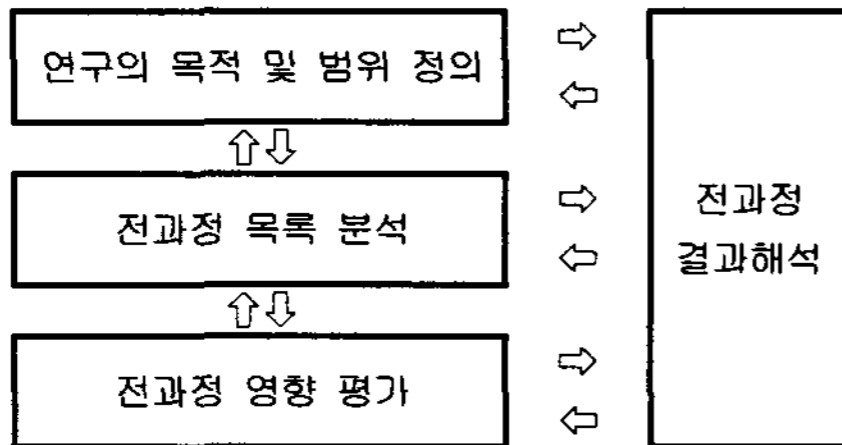


Fig. 1 LCA Framework

1) 연구의 목적 및 범위 정의

LCA연구를 수행하는 목적을 명확히 규명하고, 그 목적을 충족시키기 위해 앞으로 수행될 목록 분석, 영향평가, 해석 등을 기획하는 단계이다.

2) 전과정 목록 분석

목적 및 범위 정의에서 설정된 연구대상 시스템에 대하여 데이터를 수집하고 기능단위에 적합하게 환경부하를 계산하여 제품이나 시스템의 전과정에서 발생하는 환경부하를 파악하는 단계이다.

3) 전과정 영향 평가

전과정 목록 분석 단계에서 규명된 에너지 및 자원의 소요와 배출물이 환경에 미치는 잠재적 영향을 기술적, 정량적, 정성적으로 파악하고 평가하는 과정이다.

4) 전과정 결과 해석

결론과 권고에 이르기 위하여 전과정 평가에서 목록 분석과 영향 평가의 결과를, 또는 목록 분석 결과만을 전과정 평가 연구 목적과 범위에 따라 조합하는 단계이다.

3. LCA 분석

3.1 연구의 목적 및 범위 정의

본 연구의 목적은 미래 주요 신재생에너지원 중 하나인 태양광발전 시스템의 환경영향을 전과정을 통해 정량적으로 평가하는 것이다. 이를 통해 환경적 측면에서 특히 이산화탄소 배출과 관련하여 태양광발전 시스템이 기존의 발전원들과 비교했을 때 확실한 우위를 가짐을 명확히 제시하고자 한다.

본 연구에서의 LCA 대상은 실제 티벳 지역의 100kW급 태양광발전 시스템이며, 분석 범위는 시스템 구축에 들어가는 PV module을 비롯한 시스

템 구성 요소 제조에서부터 운송, 건설, 발전까지의 과정으로 폐기단계를 제외한 시스템의 전과정을 분석 범위로 정하였다.

수집할 투입물 데이터는 에너지양이며, 산출물 데이터는 이산화탄소 배출량으로 결정하였다.

다음의 Fig.2는 LCA를 적용한 시스템의 범위 및 투입물과 산출물의 흐름을 보여 준다.

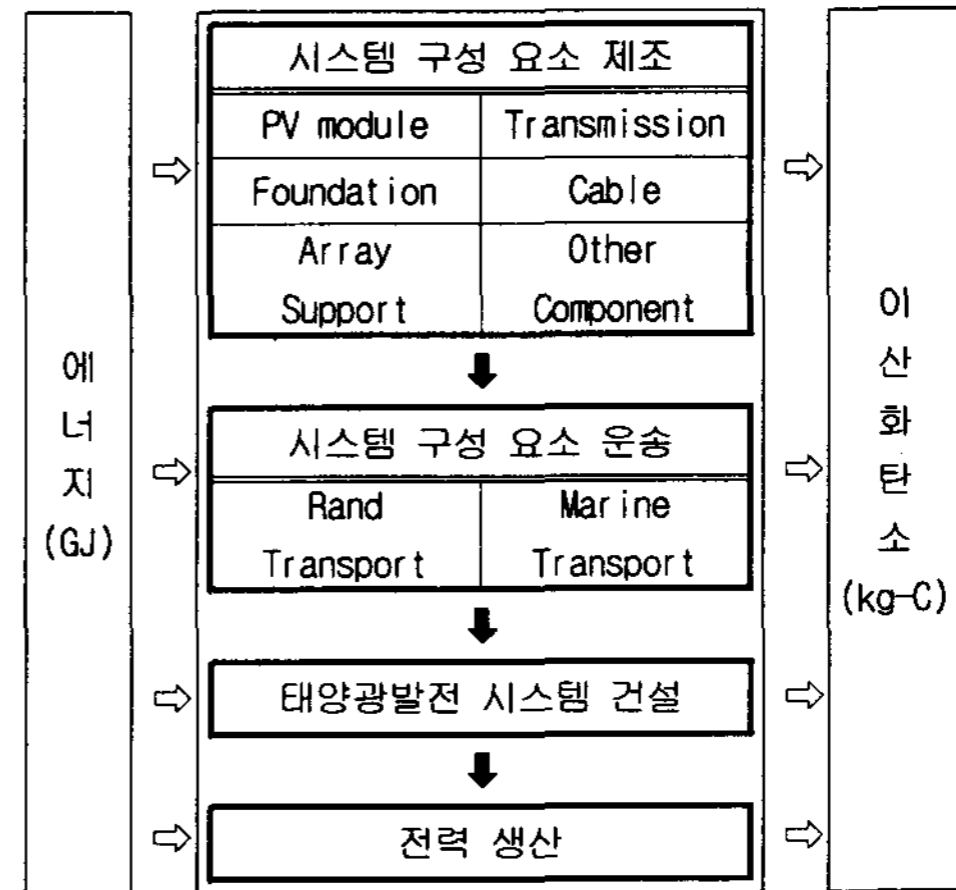


Fig. 2 태양광발전 시스템의 Process Flow

3.2 전과정 목록 분석

본 과정에서는 첫 단계에서 정의한 연구 범위를 대상으로 단계별로 투입된 에너지양과 이산화탄소 배출량을 수집, 계산하였다.

그리고 이를 통해 EPT와 단위 이산화탄소 배출량의 두 가지 지표^[2]를 산정한다. 두 가지 지표는 다음의 식들과 같이 정의 된다.

$$EPT(\text{년}) = \frac{PV\text{시스템구축 전과정동안투입된에너지}(kWh)}{\text{연간발전량}(kWh/\text{년})}$$

EPT는 태양광 발전 시스템 구축 전과정에 투입된 에너지를 자체 생산된 에너지를 통해 회수하는데 걸리는 시간을 의미한다. EPT가 짧을수록 투입 에너지 관점에서 해당 시스템이 더욱 효과적이다.

$$\text{단위 } CO_2 \text{ 배출량}(gC/kWh) = \frac{PV\text{시스템 전과정동안 배출된 } CO_2 \text{ 총량}(gC)}{\text{연간발전량}(kWh/\text{년}) \times \text{시스템수명}(\text{년})}$$

단위 이산화탄소 배출량은 태양광 발전 시스템 구축 전과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 시스템 수명기간동안의 생산한 에너지양으로 나눈 값이다. 이는 해당 시스템이 지구 온난화 측면에서 어느 정도 효과적인지를 알 수 있게 해준다.

3.2.1 데이터 수집

전과정 목록 분석을 위해서는 각 단계에서의 투입 에너지량과 이산화탄소 배출량 데이터를 수집해야 한다.

먼저, 시스템 구성 요소 제조 과정에서의 Process Flow는 다음의 Fig.3과 같다. 구성 요소 제조 과정에서 가장 큰 부분을 차지하는 것은 구성 요소를 이루는 원자재의 생산단계로써 개별 원자재의 생산에 투입되는 에너지량과 이산화탄소 배출량을 알아야 한다.

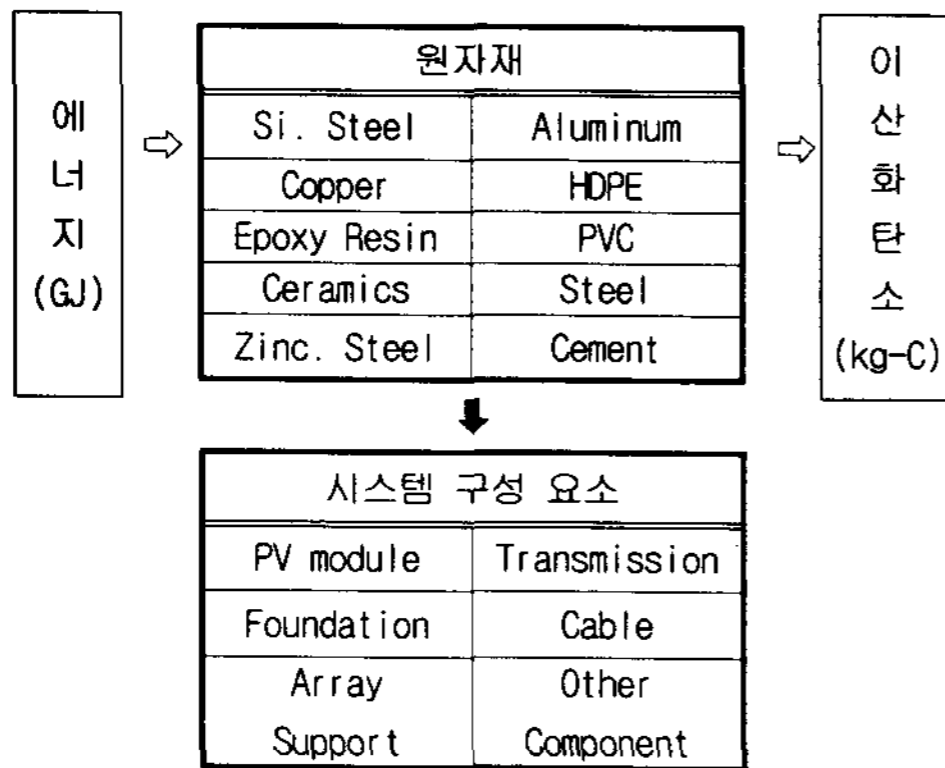


Fig. 3 시스템 구성요소 제조 Process Flow

시스템 구성 요소 운송 과정에서의 Process Flow는 다음의 Fig.4과 같다. 운송 과정에서 투입되는 에너지량과 이산화탄소 배출량은 수송용 연료인 Diesel Oil과 Heavy Oil의 연소시 발생하는 에너지량과 이산화탄소 배출량을 구함으로써 파악할 수 있다.

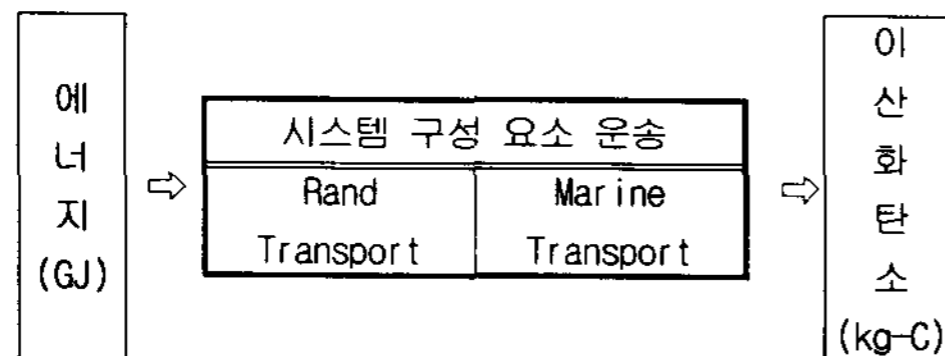


Fig. 4 시스템 구성요소 운송 Process Flow

본 연구에서는 시스템 건설과정과 발전과정에서의 에너지 투입량과 이산화탄소 발생량은 없는 것으로 가정하였다.

데이터 수집 작업을 위해서는 해당 원자재 및 연료 생산 과정에 대한 상세한 조사가 필요하다. 이는 많은 비용과 시간이 걸리는 작업이며 현실적으로도 많은 제약을 가지고 있다. 그러므로 본 연구에서는 일본 NEDO에서 기초 원자재를 대상으로 조사한 결과^{[11],[13]}를 인용하였다.

태양광발전 시스템의 구축에 들어가는 각종 원자재의 생산에 투입된 에너지량과 이산화탄소 배출량은 Table 1과 같다.

이 값들을 분석 대상인 티베트의 100kW급 태양광발전 시스템에 투입된 원자재의 양에 적용하여

시스템 구축과정에 투입된 에너지량과 이산화탄소 배출량을 산출한다.

Table 1. 주요 원자재의 전과정 목록 데이터

Item	에너지투입량 (GJ)	CO ₂ 배출량 (kg-C)
PV Module (piece)	2.0	30
Silicon Steel(ton)	13.4	321
Aluminum (ton)	227.0	2,130
Copper (ton)	46.5	771
HDPE (ton)	15.8	264
PVC (ton)	29.4	373
Epoxy Resin (ton)	40.5	754
Ceramics (ton)	0.8	20
Steel (ton)	47.3	1,170
Zinc-plated Steel (ton)	94.6	2,340
Cement (ton)	5.1	126
Item	에너지발생량	CO ₂ 배출량
Diesel Oil	38.5 MJ/l	18.7 gC/MJ
Heavy Oil	40.6 MJ/l	19.4 gC/MJ

자료:[1],[13]

3.2.2 투입 에너지량 및 EPT 계산

Table 1의 자료를 통해 태양광발전 시스템 구축 전 과정에 투입된 에너지의 양과 구성 요소별 비중은 다음의 Table 2와 같다.

Table 2. 요소별 에너지 투입량

구성요소	에너지투입량 (GJ)	비 중 (%)
PV module	1,207	29.8
Array Support	1,130	27.9
Foundation	160	4.0
Cable	39	1.0
Transmission	547	13.5
Other	28	0.7
Transportation	937	23.1
Total System (A)	4,048	100.0
연간 발전량 (B)	674 GJ/년	
EPT (A/B)	6.0 년	

총 4,048 GJ의 에너지가 투입되었으며, 연간 발전량 674 GJ이 일정하게 지속되었을 경우 6년 만에 투입량 이상의 에너지를 생산할 수 있음을 의미한다. 태양광 발전 시스템의 수명이 20년임을 감안하였을 때, 상대적으로 짧은 기간이다.

구성 요소별로 봤을 때 투입 에너지의 29.8%가 PV module의 제조에 소요되어 가장 큰 비중을 차지하였다. 그 다음으로는 27.9%의 Array Support 제조 공정이 두 번째로 큰 비중을 차지하고 있다. 운송 과정에서의 에너지 소비는 23.1%로 세 번째로 큰 비중을 차지하고 있다. 이는 Solar Cell을 비롯한 주요 부품들의 경우 국내에서 제

조 되었기에 중국까지의 장거리 운송과정이 포함 되었기 때문이며, 시스템이 설치된 티벳 지역 역시 중국 내에서도 먼 지역으로 여러 자재들의 장거리 운송과정이 요구되었기 때문인 것으로 분석된다.

3.2.3 CO₂ 배출량 및 단위 CO₂배출량 계산

Table 1의 자료를 통해 태양광발전 시스템 구축 전 과정에서 배출된 이산화탄소의 양과 구성 요소별 비중은 다음의 Table 3과 같다.

Table 3. 요소별 이산화탄소 배출량

구성요소	CO ₂ 배출량 (kg-C)	비중 (%)
PV module	18,480	24.3
Array Support	27,963	36.8
Foundation	3,966	5.2
Cable	617	0.8
Transmission	6,906	9.1
Other	571	0.8
Transportation	17,523	23.0
Total System (A)	76,026	100.0
발전량 (B)	187,276 kWh/년	
시스템 수명(C)	20 년	
단위 CO ₂ 배출량 [A/(B*C)]	20.3 g-C/kWh	

시스템 전과정에 걸쳐 76,028 kg-C의 이산화탄소가 배출 되었으며, 연간 발전량인 187,276 kWh가 수명 기간인 20년 동안 지속되었을 경우 1kWh의 에너지를 생산하는데 20.3 g-C의 이산화탄소를 배출하는 것으로 나타났다.

구성 요소별로 봤을 때 이산화탄소 배출량의 36.8%가 Array Support의 제조에 소요되어 가장 큰 비중을 차지하였다. 그 다음으로는 24.3%의 PV module 제조 공정이 두 번째로 큰 비중을 차지하고 있다. 운송 과정에서의 이산화탄소 배출량은 23.0%로 세 번째로 큰 비중을 차지하고 있다. 순서의 차이가 있을 뿐 앞서 많은 에너지가 투입된 부분에서 이산화탄소 배출량 역시 큰 비중을 보이고 있음을 알 수 있다.

3.3 전과정 영향 평가

본 과정에서는 두 번째 단계에서 목록화된 산출물 데이터를 바탕으로 환경영향에 대한 기여도를 산정한다.

이를 위해서는 이산화탄소외의 여러 공해 물질 데이터의 수집이 필요하다. 그러나 이 역시 앞 절에서 언급하였던 현실적 어려움으로 인해 데이터 수집의 한계가 존재하며, 이산화탄소와 같은 기존의 조사 결과 역시 부족한 실정이다.

이에 따라 본 단계는 이번 연구에서 이뤄지지 못하였으며 향후 충분한 데이터 수집 과정을 거쳐 보완되어야 할 것이다.

3.4 전과정 결과 해석

앞 절에서의 목록분석을 통해 분석 대상 태양광발전 시스템의 단위 이산화탄소 배출량은 20.3 g-C으로 나타났다. 현재 중국내 발전소의 평균 단위 이산화탄소 배출량^[2]이 순수 발전과정에서만 260 g-C/kWh인 것을 고려했을 때 7.8%에 해당하는 매우 적은 배출량이다. 즉, 이산화탄소 배출의 환경적 관점에서 봤을때, 태양광발전은 기존의 발전 방식에 비해 매우 큰 경쟁력을 가짐을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 LCA 분석 방법을 실제 티벳 지역에 설치된 100kW급 태양광 발전 시스템에 적용하였다. 이를 통해 시스템을 구성하는 구성 요소들의 제조 단계에서부터 운송, 건설, 발전의 전과정에 걸쳐 투입된 에너지의 양과 이산화탄소 배출량을 산정하였다. 이를 연간 발전량 및 시스템 수명과 연계하여 EPT 및 단위 이산화탄소 배출량을 산출하였다. 그 결과 EPT는 6년으로 나타났으며, 단위 이산화탄소 배출량은 20.3 g-C/kWh으로 기존의 중국내 발전소에 비해 훨씬 적은 이산화탄소를 배출함을 정량적으로 확인할 수 있었다.

향후 EPT를 단축시키고, 단위 이산화탄소 배출량을 더욱 줄이기 위해서는 기술의 향상을 통한 PV 모듈 효율의 향상 및 수명 기간의 연장이 가장 빠른 방법이 될 것이다. 기술의 향상은 발전량의 증가를 가져올 뿐만 아니라 동일한 발전용량의 건설을 위해 필요한 Array Support나 Foundation과 같은 부대 시설의 축소, 운송량의 감소로 이어져 더욱 큰 효과를 가져 올 수 있기 때문이다.

LCA 분석 방법을 보다 정확히 적용하기 위해서는 태양광 발전 시스템 구축 전과정에서의 상세하고 직접적인 데이터 수집 과정과 이를 통한 구성 요소들에 대한 구체적인 전과정 목록 분석 작업이 필수적이다. 이는 대단히 많은 시간과 노력이 요구되는 작업이며, 정확한 집계가 어려운 부분들도 많아서 현실적인 제약이 크다. 이에 본 연구에서는 기초 원자재 관련 데이터의 대부분을 외국 데이터들에 의존하였다.

또한 본 연구에서는 환경에 영향을 미치는 배출 물질로써 이산화탄소 하나만을 적용하였다. 좀 더 정확하고 실제적인 환경영향분석을 위해서는 시스템 전과정에서 발생하는 다양한 오염물질들에 대한 데이터의 수집이 요구된다. 그러나 이 부분 역시 현실적인 데이터의 제약으로 인해 이루어지지 못하였다.

향후 좀 더 정확하고 국내실정에 맞는 LCA 분석을 위해서는 여러 배출 물질이 포함된 국내 전과정 목록 구축이 선행되어야 할 것이다.

그리고 LCA 분석 방법을 기존의 발전 시스템에도 적용하여 동일한 관점에서의 비교를 통해 환

경제적 관점에서 태양광발전이 갖는 장점을 명확히 제시 하여야 할 것이다.

LCA 분석 방법은 태양광발전 뿐만이 아닌 다른 신재생에너지원에도 적용 가능하다. 그리고 그 결과는 신재생에너지가 가지고 있는 환경적 측면의 장점을 좀 더 설득력있고 명확하게 전달해주며, 향후 신재생에너지 보급 확대 정책의 강화 및 신재생에너지에 대한 대중의 인식 제고에 큰 도움이 될 것이다.

References

- [1] Kosuke Kurokawa, "Energy from the desert" Earthscan, London, 2006
- [2] M. Ito, K. Kato, H. Sugihara, T. Kichimi, J. Song and K. Kurosawa, " A preliminary study on potential for very large scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental viewpoints", Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 75, pp. 507-517, 2003
- [3] Development of Technology Commercializing Photovoltaic Power Generation System, Research and Development of Photovoltaic Power Generation Application System and Peripheral Technologies, Survey and Research on the Evaluation of Photovoltaic Power Generation, NEDO, 2000
- [4] K. Kurosawa, T. Takashima, T. Hirasawa, T. Kichimi, T. Imura, T. Nishioka, H. Iitsuka, and N. Tashiro, " Case Studies of Large-Scale PV systems in Desert Areas of the World", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol.47, pp.189-196, 1997
- [5] 에코경영컨설팅, "알기쉬운 LCA"
- [6] European Environment Agency, "Life Cycle Assessment - A Guide to Approaches, Experiences and Information Sources", 1997
- [7] M. Gorree, J.B. Guinee, G. Huppes, L. van Oers, "Environmental Life Cycle Assessment of Linoleum", Centre of Environmental Science, Leiden University, 2000
- [8] C. Koroneos, A. Dompros, G. Roubas and N. Moussiopoulos, "Life Cycle Assessment of Hydrogen Fuel Production Processes", International Journal of Hydrogen Energy, Vol.29, pp.1443-1450, 2004
- [9] 과학기술부, "21세기 프론티어 연구개발 사업 정책연구 - CO₂ 저감 및 처리 기술개발 정책 연구", 2005
- [10] 서창석, 홍호식, 박잠전, 안중우, "섬유산업에서의 디지털 날염기술 및 전과정평가", 한국LCA학회 2002년 학술연구논문집, pp.93-100