CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 20, No. 4, December 2014, pp. 449~456

지속가능경영

결정질 실리콘 태양광시스템의 물 발자국 산정에 대한 연구

나원철, 김영환, 김경남*, 이관영

고려대학교 에너지환경정책대학원 · 고려대학교 그린스쿨
136-713 서울특별시 성북구 안암로 145

(2014년 8월 8일 접수; 2014년 9월 23일 수정본 접수; 2014년 9월 23일 채택)

Analysis on the Water Footprint of Crystalline Silicon PV System

Won-Cheol Na, Younghwan Kim, Kyung Nam Kim*, and Kwan-Young Lee

Green School, Korea University
145 Anam-ro, Seonbuk-gu, Seoul 136-713, Korea

(Received for review August 8, 2014; Revision received September 23, 2014; Accepted September 23, 2014)

요 약

기후변화로 인한 국지적인 이상가뭄 빈발 및 물수지 관련 불확실성 증가 등으로 각국에서는 사용가능한 담수량 확보, 즉 물 안보 문제가 크게 대두되고 있다. 사용가능한 담수량 중 상당부분이 전력을 생산하는 발전 분야에도 사용되기 때문에 그 중요성이 점차 증대하고 있다. 신재생에너지원인 태양광발전은 설비제조, 설치 및 운전의 전 과정(life cycle)에서 수자원을 소비하지만 전통적인 에너지원인 화력발전이나 원자력발전에 비하면 상대적으로 수자원을 적게 사용한다는 장점이 있다. 본 연구에서는 태양광시스템의 원료채취부터 운영발전까지 물 사용량을 알아보기 위해 전 과정의 물 발자국을 측정하여 그 결과를 분석했다. 물 발자국 산정결과 태양광시스템의 전체 물 발자국은 0.989 m^3/MWh이며, 폴리실리콘과 태양전지 공정에서 물 발자국이 높게 나타났다. 폴리실리콘 공정은 에너지 다소비 공정이기 때문에 냉각수 사용량이 많았고 태양전지 공정에서는 고효율 결정질 실리콘 세척을 위한 탈 이온수(deionized water) 사용량이 많았기 때문에 물 발자국이 높은 것으로 보인다. 태양광발전은 기존 에너지원보다 물 사용량이 적은 발전원임을 확인할 수 있었으며, 에너지 분야의 물 사용량을 절감할 수 있는 가치를 가지고 있음을 알 수 있다. 향후 에너지정책 결정에 있어서 신재생에너지의 부가적인 가치로서 물 발자국 개념의 도입이 중요하다.

주제어 : 물 발자국, 결정질 실리콘 태양광시스템, 전과정평가, 물 소비, 전력발전

Abstract : There has been increasing concerns for the problems of water security in countries, caused by the frequent occurrence of localized drought due to the climate change and uncertainty of water balance. The importance of fresh water is emphasized as considerable amount of usable fresh water is utilized for power generation sector producing electricity. PV power system, the source of renewable energy, consumes water for the every steps of life cycle: manufacturing, installation, and operation. However, it uses relatively less water than the traditional energy sources such as thermal power and nuclear power sources. In this study, to find out the use of water for the entire process of PV power system from extracting raw materials to operating the system, the footprint of water in the whole process is measured to be analyzed. Measuring the result, the PV water footprint of value chain was 0.989 m^3/MWh and the water footprint appeared higher specially in poly-Si and solar cell process. The following two reasons explain it: poly-Si process is energy-intensive process and it consumes lots of cooling water. In solar cell process, deionized water is used considerably for washing a high-efficiency crystalline silicon. It is identified that PV system is the source using less water than traditional ones, which has a critical value in saving water. In discussing the future energy policy, it is vital to introduce the concept of water footprint as a supplementary value of renewable energy.

Keywords : Water footprint, Crystalline silicon PV system, Life cycle assessment, Water consumption, Power generation

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: i005034@korea.ac.kr http://cleantech.or.kr/ct/

doi: 10.7464/ksct.2014.20.4.449 pISSN 1598-9721 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licences/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

모든 에너지는 생산, 변환, 유통, 사용 등의 전 과정에서 물을 필요로 한다. 에너지와 물은 복잡하게 연결되어 있다. 물 수요는 원재료 추출, 열처리의 냉각, 세척, 바이오연료 작물의 경작, 동력터빈의 발전 등의 다양한 생산 공정에서 사용된다. 반대로 에너지는 담수화, 수송, 여과처리, 관개사업에 소비되어 사용가능한 수자원 생성에 필요하다. 물 수요는 농업, 에너지, 산업, 가계소비 등 네 가지 핵심적인 사용처에서 이루어진다. 전 세계 10억 명 이상의 인구가 전력 및 청정에너지의 접근성이 부족하며, 인구 및 경제활동 증가는 개발도상국들의 에너지 소비를 더욱 증가시킬 것으로 예상된다. 기후변화는 에너지 생산에 의해 영향을 받으며 이는 수자원에 직접적인 영향을 준다. 따라서 에너지 소비저감 조치는 에너지 사용에 의해 유발되는 물 수요 증가에 대한 압박을 줄일 수 있다. 수자원부문의 기후변화 적응은 궁극적으로 수문학적 기상학적 현상에 적절히 대응하고 계획을 수립하는 것으로 타 부문과의 연관관계를 고려하는 것 또한 중요하다. 특히 일차 에너지 및 전력부문에서 좀 더 효율적인 물 사용기술을 개발하여 물 소비를 저감시킬 필요가 있다[1].

에너지와 물 자원부족 문제가 심화되면서 이에 대한 상관관계 연구가 계속되고 있다. 미국의 USGS (U.S. Geological Survey)의 보고에 따르면 2005년에 미국의 총 담수 중에서 41%가 전력발전을 위한 목적으로 사용되었다[2]. 기존에너지원의 많은 물 사용량을 줄이기 위한 방안으로 많은 연구가 진행되고 있다. 태양광발전은 전력발전단계에서 물 사용량이 적은 것으로 알려져 있다. 하지만 전체 시스템에서 수자원 사용량에 대한 정보가 부족하다. 태양광시스템의 물 사용량은 대부분 제조과정에서 발생된다. 태양광 발전소의 운영적인 측면에서는 비교적 적은 물과 에너지를 사용하지만 태양광시스템의 주요 부품인 태양광 모듈 제조과정은 에너지 집약적인 특성을 지니고 있다. 제품을 생산하기 위해 투입되는 에너지 사용량이 높을수록 이를 생산하기 위해 필요한 수자원도 증가한다. 이에 따라 효과적인 물 사용에 대한 관심이 증가하면서 전 과정의 물 사용량을 정량화하는 물 발자국에 대한 연구가 계속되고 있다. 물 발자국이란 하나의 제품이나 서비스 전 과정에 이용되는 물 사용량으로서 제품이나 서비스를 생산하는데 필요한 원재료인 직접수 사용량과 생산, 유통, 폐기의 각 단계에서 투입되는 제품이나 서비스를 생산하는데 필요한 간접수 사용량을 합산한 값이다[3].

본 연구는 태양광시스템의 제품생산부터 발전소 운영까지 전 과정에서 사용되는 물 사용량을 측정하는 물 발자국 측정방식을 토대로 태양광발전의 수자원측면에서 환경적 평가를 재조명한다. 논문의 순서는 다음과 같다. 우선 물 발자국 및 태양광 물 사용량 산정에 대한 기존문헌을 살펴보고, 논문에 사용할 태양광 시스템의 물 발자국 분석 모델을 설정한다. 다음으로 태양광시스템의 가치사슬 각 단계별 물 사용량과 사례시스템의 태양광 발전량을 산정하고, 산정 값을 근거로 하여 물 발자국 결과분석을 하고 결과에 대한 정책적 함의를 제시하고자 한다.

2. 선행연구

2.1. 물 발자국에 대한 연구

물 발자국은 재화를 생산하기 위해 소비자 또는 생산자가 직접 또는 간접적으로 사용하는 물의 총량을 뜻한다[3]. 물 발자국은 인간이 필요로 하는 의식주를 제공하기 위한 자원의 생산과 폐기, 토지비용으로 환산한 생태발자국(ecological footprint)에서 발전된 개념으로써 인간이 자연에 남긴 영향을 발자국으로 표현한 것이다[4].

물 발자국은 영국 런던대학의 Allan교수의 가상수 개념을 확장시킨 새로운 개념이다. Allan[5]은 1998년 「Ground Water」를 통해 가상수의 개념을 소개했다. 가상수란 농산물이나 공산품 등의 단위 제품에 대하여 1 kg당 사용된 물의 총량(L/kg)을 표현한 것이다. 수자원이 부족한 국가에서 농산물을 생산하지 않고 수입하면 농산물에 사용할 물을 생활용수나 공업용수 등에 사용이 가능하다. 또한 농산물을 수입하면 농산물 생산에 사용된 물을 수입하는 효과가 발생한다는 점에 기초하여 가상수라는 개념이 만들어졌다.

Hoekstra[6]는 가상수의 개념을 확장하여 물 발자국이라는 새로운 개념을 소개했다. Hoekstra는 2002년 네덜란드에서 열린 '가상수 무역에 관한 국제 전문가회의(International Expert Meeting on Virtual Trade)'에서 국제 농산물 무역을 가상수 이론과 접목시켜 국가와 지역 간의 국제 가상수 교역에 대한 추세를 분석하고 물 발자국이라는 개념을 소개했다.

물 발자국이 소개되고 초기에는 주로 농업제품에 대한 연구가 진행되었다. Chapagain and Hoekstra[7]는 2004년 네덜란드 UNESCO-IHE에서 농산물을 중심으로 물 발자국개념을 축산물과 공산품으로 확대했다. 이 연구에서 1997~2001년까지의 전 세계 200개국 285개의 농산물과 123개의 축산물 및 공산품이 국제교역을 통해 이동한 가상수의 흐름을 조사했다. 해당 연구를 통해 처음으로 생산대비 물 사용량을 측정하는 생산 비율의 개념이 도입되었다. 전 세계 가상수의 총량은 1조 6,000억 m^3이며, 농산물이 61%를 차지한다. 한국은 가상수 수출입 분석결과 320억 m^3를 수입하여 세계에서 5번째로 가상수 수입이 많은 나라로 분석되었다.

2.2. 태양광시스템의 수자원 소비량 선행연구

태양광시스템의 환경평가와 관련된 연구는 주로 전과정평가(life cycle assessment, LCA)[1]에 대한 연구다. LCA는 주로 에너지사용량과 탄소배출량을 조사하는 탄소발자국(carbon footprint)에 대해 분석하였고 물 사용량을 측정한 연구는 드물다. 몇몇 연구에서는 에너지시스템의 전 과정이 아닌 제조공정의 물 사용량과 발전소 운영 시 전력생산과정에서 사용되는 물 사용량을 측정한 연구가 있다.

태양광시스템의 물 발자국에 대한 연구를 위해서는 전 과정에 사용되는 투입물질에 대한 분석이 실행되어야 한다. 태양광

1) 전과정평가(life cycle assessment, LCA): 제품, 공정, 서비스와 관련된 환경적인 측면과 잠재적인 영향을 평가하기 위한 방법. Mary Ann[13]

시스템의 LCA에 대한 연구와 관련하여 2005년 이전의 연구는 10~15년 전의 기술을 적용하여 분석하였다. Alsema and Wild Scholten[8]은 당시의 태양광 기술을 적용한 LCA를 위해 2005년 태양광시스템의 전과정목록(life cycle inventory, LCI)[2]분석을 실시하였다. Alsema는 결정질 실리콘 모듈의 제조기술에 대해 미국과 유럽의 12개 태양광 부품 제조업체들의 공정에 대한 자료를 바탕으로 LCI분석을 하였다. 이 연구는 태양광 제조산업의 공급 가치사슬인 폴리실리콘부터 태양광 모듈에 이르는 전 과정의 원료, 전력, 용수사용량과 태양광 발전소 건설에 필요한 기자재에 대해 LCI를 실시한 연구이다. Alsema의 LCI자료는 ECN (Energy research Centre of the Netherlands)에서 실시한 Crystal Clear Project의 일환으로 각종 태양광시스템의 전과정평가와 수자원 소비량에 관한 연구에 사용되었다.

에너지와 물 사용량에 대한 연구는 2008년 Gerbens Leenes and Hoekstra[9]에 의해 바이오에너지와 일차에너지 공급원의 물 발자국을 비교하였다. 일차에너지원의 물 발자국은 원자력(0.09 m^3/GJ), 천연가스(0.11 m^3/GJ), 석탄(0.16 m^3/GJ), 석유(1.06 m^3/GJ)의 순서로 물 발자국이 높았다. 신재생에너지의 물 발자국은 에너지의 종류에 따라 큰 차이를 보였다. 풍력발전의 물 발자국은 0.0 m^3/GJ이며, 태양열 에너지는 0.3 m^3/GJ, 수력은 22.3 m^3/GJ로 나타났다. 바이오매스의 경우 작물의 종류, 농업생산시스템, 기후에 따라 물 발자국이 다르게 나타났다. 바이오매스의 물 발자국은 평균 70 m^3/GJ (10-250 m^3/GJ)로 일차에너지 공급원의 물 발자국과 많은 차이를 보였다. 바이오매스의 공급은 미래의 에너지확보에 기여를 하지만 사용량이 증가할수록 더 많은 물을 필요로 하여 물 부족현상을 더 악화시킬 수 있다.

기존의 에너지원에 대한 물 발자국과 관련된 연구는 전력발전단계에서의 물 발자국을 산정하였다. 에너지원의 전 과정 동안 사용된 물 발자국에 대한 연구는 부족하며, 본 연구에서는 태양광시스템의 원료채취부터 운영발전단계까지의 물 사용량을 근거로 물 발자국을 산정하였다. 서론에서 언급했듯이 미국의 경우 전력발전에 사용되는 물은 사용가능한 물의 약 41%를 차지하고 있다. 전력발전 분야에 많은 물을 사용하여 효율적인 물 사용이 이루어지지 않는다면 물 부족현상을 심화시킬 수 있다. 물은 지역에 따라 매우 불균등하게 분포하여 지역 또는 시기에 따라 물과 관련된 문제가 발생한다. 따라서 한정된 수자원을 효율적으로 사용하기 위해 물 사용패턴에 대한 인식과 수자원의 효율성을 높이기 위한 물 발자국의 개념이 에너지 분야에도 필요하다.

3. 연구방법

3.1. 연구수행범위

본 연구에서는 단결정실리콘모듈을 적용한 태양광 발전 시스템을 대상으로 선정하였다. 단결정실리콘모듈은 결정질 태양광 모듈시장의 76%를 차지하여 많이 사용되는 제품의 물 발자국을 측정하였다. 태양광시스템은 원재료채취, 폴리실리콘 생산, 잉곳과 웨이퍼 생산, 태양전지 제조, 모듈 제조, BOS (balance of system)를 포함한 태양광 발전소 설치 단계로 구분할 수 있으며 Figure 1에 나타냈다.

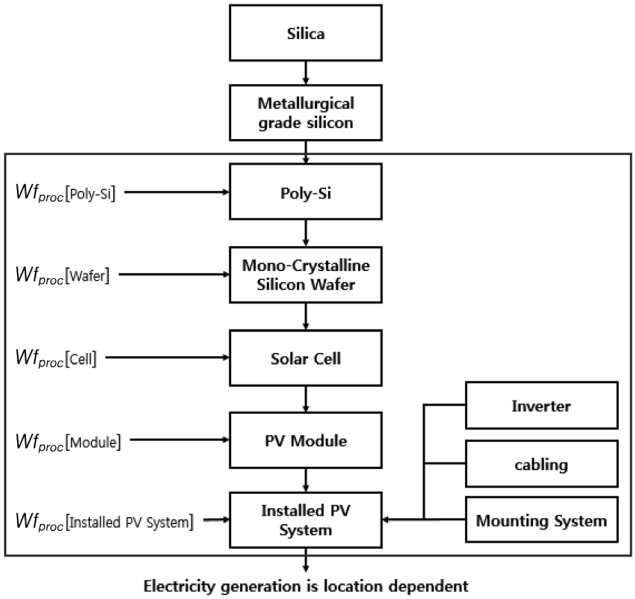

Figure 1. PV system process and study scope.

3.2. 연구수행방법

단결정실리콘모듈을 적용한 태양광시스템의 물 발자국을 산정하기 위해서 다음의 자료를 조사하였다. 태양광시스템의 투입물질에 대한 정보를 알아보기 위해 태양광시스템의 LCI (life cycle inventory) 자료와 물질 별 물 사용량을 나타낸 LCI 자료를 이용하였다[8,11]. 태양광시스템의 전 과정에서 투입되는 전체 물질의 물 사용량에 대한 자료를 100% 수집해야 하지만 자료가 존재하지 않거나 수집의 어려움으로 인해 중량대비 62.4%의 물질을 조사하여 Table 1에 나타냈다. 그 외에 에너지사용, 물 사용에 대한 자료를 추가로 조사하여 물 사용량 산정에 포함하였다.

태양광시스템의 발전량은 미국의 DOE (U.S. Department of Energy) 산하의 NREL (National Renewable Energy Laboratory)에서 PV Watts 모델을 사용하였다. 대한민국에 발전소를 설치한다고 가정하여 일사량은 대한민국의 평균 일사량을 적용하였다. 발전소의 용량은 3 MW로 가정하였고, PV Watts로 계산된 자료를 태양광발전량 산정에 적용하였다.

물 발자국 산정은 Water Footprint Network의 Water Footprint Manual 2011에서 제시한 방법을 사용하였다[13]. 태양광시스템은 폴리실리콘, 웨이퍼, 태양전지, 모듈, BOS 제품 제조 및 설치단계에서 물이 사용되므로 Water Footprint Manual의 제품의 물발자국 산정방식인 공정합계방식을 사용하였다. 공정합계방식은 다양한 공정으로 이루어져 있는 생산 시스템에서

2) 전과정목록(life cycle inventory, LCI): LCA의 핵심적인 단계로 대상물의 전 과정에 걸쳐서 투입되는 자원과 에너지 및 생산 또는 배출되는 제품 부산물의 데이터를 수집하고 환경부하항목에 관한 입출력 목록을 구축하는 단계

Table 1. Input material of PV system

Material	Amount (kg)	%
Aluminium	5.71	6.4
Back aluminium BSF metallization paste	0.11	0.1
Back contact metallization paste	0.01	0.0
Copper	1.40	1.6
Front metallization paste	0.01	0.0
Glass	16.58	18.7
MG-silicon	1.90	2.1
Polyester	0.08	0.1
Poly-Si	1.68	1.9
Silicon carbide (SiC)	3.83	4.3
Silicone	0.00	0.0
Steel	16.12	18.2
Ammoniak (NH_3)	0.01	0.0
Argon (Ar)	0.04	0.0
Nitrogen (N_2)	2.70	3.1
Oxygen (O_2)	0.15	0.2
Acetic acid, 98% in H_2O	0.06	0.1
Calcium chloride ($CaCl_2$)	0.03	0.0
Hydrochloric acid, 30% in H_2O	0.07	0.1
Hydrogen fluoride (HF) 100%	0.06	0.1
Isopropanol	0.11	0.1
Nitric acid, 50% in H_2O (HNO_3)	0.04	0.0
Phosphoric acid, industrial grade, 85% in H_2O (H_3PO_4)	0.01	0.0
$POCl_3$ phosphoryl chloride	0.00	0.0
Polyethylene glycol (PEG)	4.39	5.0
Sodium hydroxide, 50% in H_2O	0.25	0.3
Total	55.35	62.4

수자원 사용량을 모두 합하여 생산된 제품에 적용한 경우에 사용할 수 있다. 한 생산시스템에서 제품 p의 수자원 사용량은 제품 p공정의 총 수자원 사용량을 제품생산량인 p로 나눈 값과 같으며 산정 식은 식 (1), (2)에 나타냈다.

$$WF_{proc}[p] = \frac{\sum_{s=1}^{k} WF_{proc}[s]}{P[p]} \quad (1)$$

물 발자국은 공정에서 사용된 총 물 사용량을 총 생산물로 나누어 산정한다. $WF_{proc}[s]$는 각 공정의 물 사용량의 합이며, $P[p]$는 생산물의 총 합을 나타낸다.

$$WF_{proc}[s] = (f_i \times W_{fi}) + DW \quad (2)$$

각공정에서 물 발자국은 제품에 사용된 물질의 무게(f_i)와 물 발자국 지수(W_{fi})를 곱한 간접수(indirect water)와 직접수(direct water)를 합하여 산정한다.

$$WF_{PV} = \frac{WF_{proc}[p]}{EG} \quad (3)$$

태양광시스템의 최종적인 물 발자국은 제품에 사용된 총 물의 양($WF_{proc}[p]$)을 전력발전량(EG)으로 나누어 식 (3)과 같이 물 발자국을 산정한다.

물 발자국은 태양광시스템의 전 과정의 물 사용량을 발생된 전력량으로 나누어 산출한다. 물 발자국의 단위는 일반적으로 농산품의 경우 m^3/ton 또는 L/kg을 사용하고, 공산품의 경우 m^3/US$ 또는 한 개의 제품 당 수자원 소모량으로 나타낸다. 예를 들면, 식료품은 m^3/kcal로 나타내고 에너지의 경우는 m^3/joule 또는 m^3/MWh로 나타낼 수 있다. 태양광시스템은 에너지 생산시스템이므로 본 논문에서는 m^3/MWh로 나타내어 물 발자국을 산정하였다.

4. 연구결과

4.1. 태양광시스템의 가치사슬 단계별 물 사용량

Table 2는 본 연구에 적용한 모듈의 사양을 나타낸 표이다. 모듈의 경우 Wild Scholten and Alsema[8]의 LCI분석과 유사한 제품을 적용하였다. 모듈은 LG社의 250 Wp급 단결정 실리콘 태양광 모듈(LG280S1W-K3)을 적용하였으며, 각 공정 단계에서 필요한 물 사용량을 산정하여 나타내었다. 결정질 실리콘 태양광시스템을 대상으로 전 과정의 물질사용량과 물 사용량을 수집하여 각 단계의 물 사용량을 산출하였고 결과는 Table 3~9와 같다.

연구범위 내의 각 공정에서 사용된 물 사용량은 모듈 한 제품을 기준으로 했을 때 폴리실리콘 4,271.6 L, 웨이퍼 763.7

Table 2. Module parameter

Module parameter	Amount	Unit
Number of cells (width)	6	pcs.
Number of cells (length)	10	pcs.
Cell size (length)	15.6	cm
Cell area factor	1	-
Cell efficiency	17.7	%
Module width (w/o frame)	100	cm
Module length (w/o frame)	164	cm
Module area (w/o frame)	1.64	m^2
Module perimeter (= frame length)	5.28	m
Number of cells	60	pcs.
Module power	250	Wp
Module efficiency	15.2%	%

Table 3. Water usage of poly-Si process

Product		Unit	Amount	Water usage per unit	Unit	Water usage(L)
Material	MG-silicon	kg	1.89×10^{0}	5.13×10^{0}	L/kg	9.70×10^{0}
Electricity	Electricity, hydropower	kWh	1.84×10^{2}	3.80×10^{-1}	L/kWh	7.01×10^{1}
Water	Heat/cooling	m^3	4.19×10^{0}	10^{3}	L/m^3	4.19×10^{3}
Total						4.27×10^{3}

Table 4. Water usage of wafer process

Product		Unit	Amount	Water usage per unit	Unit	Water usage(L)
Material	Glass	kg	1.00×10^{-2}	1.00×10^{0}	L/kg	1.00×10^{-2}
	Steel wire	kg	2.17×10^{0}	5.00×10^{0}	L/kg	1.09×10^{1}
	Silicon carbide (SiC), virgin	kg	7.16×10^{-1}	3.31×10^{0}	L/kg	2.37×10^{0}
	Silicon carbide (SiC), from external recycling	kg	3.12×10^{0}	3.31×10^{0}	L/kg	1.03×10^{1}
	Argon (Ar)	kg	9.04×10^{0}	3.00×10^{0}	L/kg	2.71×10^{1}
	Polyethylene glycol (PEG), virgin	kg	1.60×10^{-1}	2.40×10^{1}	L/kg	3.85×10^{1}
	Polyethylene glycol (PEG), from external recycling	kg	3.79×10^{0}	2.40×10^{1}	L/kg	9.10×10^{2}
	Dipropylene glycol monomethyl ether (DPM)	kg	4.42×10^{-1}	2.40×10^{1}	L/kg	1.06×10^{2}
	Sodium hydroxide, 50% in H_2O	kg	2.17×10^{-1}	1.02×10^{2}	L/kg	2.21×10^{0}
	Hydrochloric acid, 30% in H_2O	kg	1.17×10^{-4}	3.00×10^{-1}	L/kg	3.51×10^{-5}
	Acetic acid, 98% in H_2O	kg	5.67×10^{-2}	7.82×10^{2}	L/kg	4.45×10^{0}
Water	Tap water	kg	9.52×10^{-3}	1.05×10^{0}	L/kg	1.00×10^{-3}
	Water, deionised	kg	9.46×10^{1}	1.11×10^{0}	L/kg	1.05×10^{2}
Electricity		kWh	1.46×10^{2}	3.80×10^{0}	L/kWh	5.54×10^{1}
Waste		kg	7.80×10^{0}	5.65×10^{1}	L/kg	4.41×10^{2}
Total						7.64×10^{2}

Table 5. Water usage of cell process

Product		Unit	Amount	Water usage per unit	Unit	Water usage (L)
Material	Nitrogen (N_2)	kg	2.70×10^{0}	3.00×10^{0}	L/kg	8.11×10^{0}
	Oxygen (O_2)	kg	1.50×10^{-1}	3.00×10^{0}	L/kg	4.50×10^{-1}
	Argon (Ar)	kg	3.67×10^{-2}	3.00×10^{0}	L/kg	1.10×10^{-1}
	Ammoniak (NH_3)	kg	9.10×10^{-2}	1.10×10^{0}	L/kg	1.00×10^{-2}
	Sodium hydroxide, 50% in H_2O (NaOH)	kg	2.29×10^{-2}	1.02×10^{2}	L/kg	2.33×10^{1}
	Acetic acid, 98% in H_2O (CH_3COOH)	kg	4.09×10^{-2}	7.82×10^{1}	L/kg	3.20×10^{-1}
	Hydrochloric acid, 30% in H_2O (HCl)	kg	6.67×10^{-2}	3.00×10^{-1}	L/kg	1.97×10^{-2}
	Nitric acid, 50% in H_2O (HNO_3)	kg	3.90×10^{-2}	1.32×10^{2}	L/kg	5.14×10^{0}
	$POCl_3$ phosphoryl chloride	kg	4.17×10^{-4}	2.40×10^{1}	L/kg	1.00×10^{-2}
	Phosphoric acid, industrial grade, 85% in H_2O (H_3PO_4)	kg	1.25×10^{-2}	1.60×10^{0}	L/kg	2.00×10^{-2}
	Calcium chloride ($CaCl_2$)	kg	3.15×10^{-2}	8.00×10^{1}	L/kg	2.52×10^{0}
	Isopropanol	kg	1.15×10^{-2}	2.40×10^{1}	L/kg	2.76×10^{0}
Water	Water, deionised	kg	2.01×10^{2}	1.10×10^{0}	L/kg	2.21×10^{2}
	Water, cooling	m^3	1.46×10^{0}	1,000	L/m^3	1.46×10^{3}
Electricity		kWh	4.42×10^{1}	3.80×10^{-1}	L/kWh	1.68×10^{1}
Waste		kg	1.06×10^{0}	7.62×10^{1}	L/kg	8.05×10^{1}
Total						1.82×10^{3}

Table 6. Water usage of module process

Product		Unit	Amount	Water usage per unit	Unit	Water usage (L)
Material	Aluminium profile	kg	4.22×10^{0}	$2.6.0\times10^{0}$	L/kg	1.10×10^{1}
	Glass sheet, low iron, tempered	kg	1.66×10^{1}	1.00×10^{0}	L/kg	1.66×10^{1}
	Copper	kg	1.75×10^{-1}	8.76×10^{0}	L/kg	1.53×10^{0}
	Silicone	kg	3.86×10^{-3}	2.46×10^{2}	L/kg	9.50×10^{-1}
Water	Tap water	kg	3.55×10^{1}	1.05×10^{0}	L/kg	3.73×10^{1}
Electricity		kWh	1.09×10^{1}	3.80×10^{0}	kWh	4.15×10^{0}
Waste		kg	1.70×10^{-1}	1.00×10^{0}	L/kg	1.70×10^{-1}
Total						7.16×10^{1}

Table 7. Water usage of BOS

Product		Unit	Amount	Water usage per unit	Unit	Water usage(L)
Material	Aluminium	kg	6.08×10^{0}	2.60×10^{0}	L/kg	1.58×10^{1}
	Copper	kg	6.55×10^{-1}	8.76×10^{0}	L/kg	5.74×10^{0}
	Polyester	kg	7.50×10^{-2}	3.00×10^{1}	L/kg	2.25×10^{0}
	Steels	kg	1.40×10^{1}	5.00×10^{0}	L/kg	6.97×10^{1}
Electricity		kWh	4.39×10^{0}	3.80×10^{-1}	L/kWh	1.67×10^{0}
Total						9.52×10^{1}

Table 8. Water usage of PV life cycle (unit: L)

Process	Material	Electricity	Water	Waste	Water usage
Poly-Si	9.7	70.1	4,191.8	0.0	4,271.6
Wafer	162.8	55.4	105.0	440.5	763.7
Cells	42.8	16.8	1,681.7	80.9	1,822.1
Modules	30.0	4.1	37.3	0.2	71.6
Installed PV system	93.5	1.7	0.0	0.0	95.2
Total					7,024.2

Table 9. Direct and indirect water usage (unit: L)

Process	Direct (L)	Indirect (L)	Total	Rates (%)
Poly-Si	4,191.8	79.8	4,271.6	60.8
Wafer	105.0	658.7	763.7	10.9
Cells	1,681.7	140.4	1,822.1	25.9
Modules	37.3	34.3	71.6	1.0
Installed PV system	0.0	95.2	95.2	1.4
Total	6,015.7	1,008.5	7,024.2	100

L, 태양전지 1,822.1 L, 모듈 71.6 L, 태양광시스템 설치에서 95.2 L가 사용되었고 총 7,024.2 L의 물이 사용되었다. 폴리실리콘 공정에서는 직접수의 사용이 4,191.8 L로 가장 많았고, 투입물질과 전력에 소비된 간접수사용량은 79.8 L를 사용하였다. 웨이퍼 공정의 물 사용량은 763.7 L를 필요로 하며, 전체 물 사용량과 비교해 볼 때 10.9%로 폴리실리콘 공정과 태양전지 공정에 비해 적은양이다. 웨이퍼 공정은 간접수사용량이 직접수사용량 보다 많으며 86.3%를 차지한다. 태양전지 공정의 물 사용량은 직접수 사용량이 많으며 전체 물 사용량의 25.9%를 차지한다. 직접수사용량은 1,681.7 L로 태양전지 공정 물 사용량의 92.3%를 차지하고 있다. 태양전지 공정의 간접수는 투입물질에 필요한 용수와 폐기물 처리에 필요한 용수가 차지하고 있다. 모듈공정의 물 사용량은 직접수와 간접수가 비슷한 양을 필요로 하며, 직접수는 37.3 L, 간접수는 34.3 L를 사용한다. 모듈공정에 필요한 물은 전체 물 사용량과 비교해볼 때 약 1%로 매우 적은양이다. 태양광시스템의 설치에 필요한 물 사용량은 100% 간접수가 사용되며 직접수는 사용되지 않는다. 태양광 발전소의 운영기간동안 물 사용량은 먼지세척을 제외하고 매우 적은 양이며[14], 물 발자국에 미미한 영향을 끼치므로 적용하지 않았다. 태양광시스템의 전 과정에서 직접수와 간접수의 사용량의 비교에서는 직접수가 더 많이 사용된 것으로 나타났다. 직접수는 6,015.7 L로 전체 물 사용량의 85.6%를 차지하였고 간접수는 1,008.5 L로 전체 물 사용량의 14.4%를 차지하였다. 물 사용량 산정결과 폴리실리콘과 태양전지 공정에서 물 사용량이 많은 것으로 나타났다. 폴리실리콘과 태양전지 단계의 물 사용량은 태양광시스템 전체로 볼 때 86.7%를 차지하여 전 과정에서 대부분의 물을 사용하는 것으로 나타났다.

4.2. 태양광시스템의 발전량 산정

모듈은 4.1절에서 설명한 것과 같이 Wild Scholten and Alsema[8]의 LCI분석과 유사한 제품을 적용하였고, 3 MW의 태양광 발전소를 대한민국에 설치한다고 가정하여 물 발자국을 산정하였다. 태양광시스템의 발전량은 미국의 NREL (National Renewable Energy Laboratory)의 PV Watts를 사용하여 발전량을 산정하였다. 발전량을 산정하기 위한 모듈의 사양은 Table 2와 같다. 3 MW의 태양광 발전소를 건설하기 위해서는 12,000개의 모듈이 필요하며 발전수명은 25년으로 하였다. 일사량은 대한민국의 평균인 3.56 kWh/m^2/day를 적용하였고 일일발전시간은 3.55시간을 적용하였다. 3 MW 태양광

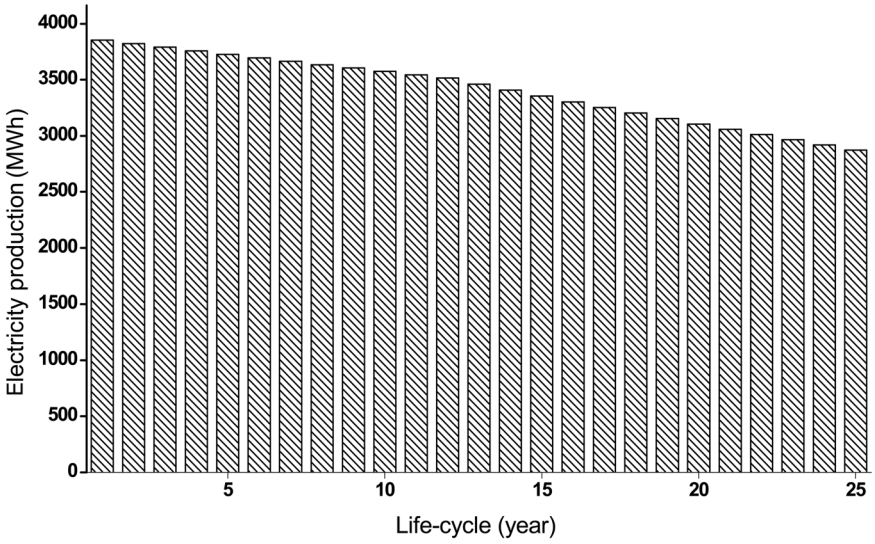

Figure 2. 3 MW PV plant elecrticity production (MWh).

발전소의 25년 동안 연평균 발전량은 약 3,411 MWh/yr이며, 25년간 총 발전량은 약 85,264 MWh이다.

4.3. 태양광시스템의 전 과정 물 발자국 산정

에너지시스템의 물 발자국은 에너지 한 단위를 생산하기 위해 필요한 물 사용량을 나타낸다. 태양광시스템의 물 사용량과 전력발전량을 구하였고 물 사용량을 전력발전량으로 나누어 물 발자국을 산정하였다. 4.1절에서는 결정실 실리콘 모듈 한 제품을 생산하기 위한 물 사용량이며, 3 MW 태양광 발전소를 건설한다고 가정하여 발전소에 필요한 물 사용량을 구하였다. 3 MW 태양광 발전소에 필요한 물의 총 사용량은 84,290 m^3이며 발전소 수명인 25년 동안 필요한 물의 양이다.

분석결과 태양광시스템의 물 발자국은 0.989 m^3/MWh로 산정되었고, 각 단계의 물 발자국은 Figure 3에 나타냈다. 각 단계의 물 발자국은 폴리실리콘 0.601 m^3/MWh, 웨이퍼 0.107 m^3/MWh, 태양전지 0.256 m^3/MWh, 모듈 0.010 m^3/MWh, 태양광시스템 설치 0.013 m^3/MWh로 산정되었다. 물 발자국인 높은 공정은 폴리실리콘 공정과 태양전지 공정에서 높게 나타났다. 직접수와 간접수 사용량 중에서 직접수는 폴리실리콘과 태양전지 공정에서 많이 사용되고 간접수는 웨이퍼 공정에서 많이 사용되었다. 태양광시스템 설치 공정에서는 직접수 사용량이 없었으며 전부 간접수가 사용되었다.

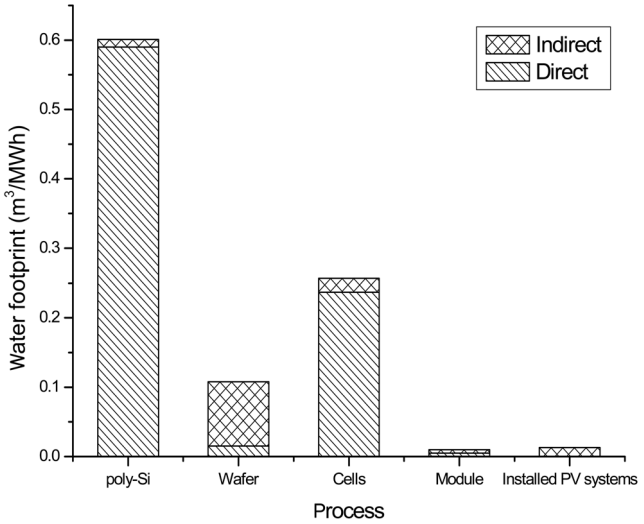

Figure 3. 3 MW PV plant water footprint.

Table 10은 물발자국과 직접수와 간접수의 비율을 나타낸 것이다. 전체 물 발자국은 0.989 m^3/MWh이며 직접수 물발자국은 0.847 m^3/MWh로 85.6%이고, 간접수 물 발자국은 0.142 m^3/MWh로 14.4%를 차지한다. 직접수 사용량이 간접수 사용량보다 많은 것으로 보아 제조 현장에서 세척 또는 냉각용으로 필요한 직접적인 물 사용량이 많다는 것을 알 수 있다. 직접적인 물 사용량이 많아져 물 발자국이 높아졌고 전체 시스템의 물 발자국을 높이는 결과를 보여주고 있다.

Table 10. Water footprint of 3MW PV plant and water footprint rates

Process	Water footprint (m^3/MWh)			Water footprint rates (%)		
	Total	Direct	Indirect	Total	Direct rates (%)	Indirect rates (%)
Poly-Si	0.601	0.590	0.011	60.8	59.7	1.1
Wafer	0.107	0.015	0.093	10.9	1.5	9.4
Cells	0.256	0.237	0.020	25.9	23.9	2.0
Module	0.010	0.005	0.005	1.0	0.5	0.5
Installed PV systems	0.013	-	0.013	1.4	-	1.4
Total	0.989	0.847	0.142	100	85.6	14.4

5. 결 론

본 논문에서는 태양광시스템 운전기간을 포함한 태양광 가치사슬 단계별 물 사용량을 산정하고, 사례시스템의 기대 발전량 데이터와 함께 태양광시스템 전 과정의 물 발자국 결과를 분석했다. 그 결과 첫째, 태양광시스템의 물 발자국은 0.989 m^3/MWh로 산정되었다. 전체 공정에서 폴리실리콘과 태양전지 공정의 물 발자국이 0.601 m^3/MWh과 0.256 m^3/MWh으로 나타난 것으로 보아 물 사용량이 많은 것으로 보인다. 폴리실리콘 제조산업은 에너지 다소비 산업이기 때문에 많은 물이 사용되었고, 태양전지는 고순도 실리콘 태양전지를 생산하기 위해 많은 양의 탈 이온수의 사용으로 물 발자국이 높게 측정되었다. 둘째, 태양광시스템의 직접수와 간접수 사용량은 직접수 사용량이 더 많다. 직접수는 85.6%, 간접수는 14.4%를 차지하여 직접수 사용량이 더 많았다. 이 결과를 통해서 태양광시스템은 직접수 사용량이 더 많았고 에너지 다소비산업임을 알 수 있다. 전 과정에서 직접수 사용량이 높다는 것은 태양광시스템의 제조 산업은 물에 대한 영향력이 크다고 할 수 있다. 특히 폴리실리콘 제조공정은 직접수 사용량이 98%를 차지하기 때문에 다른 공정에 비교해 볼 때 물에 대한 의존도가 높은 산업임을 알 수 있다. Kim and Hun[11]은 원단위 용수계수가 큰 산업은 경제가 성장하여 산업의 규모가 커질 때 다른 산업에 비해 용수 사용량이 크다고 하였다. 이와 마찬가지로 태양광 산업의 규모가 커지면 폴리실리콘 공정과 태양전지 공정의 직접수와 간접수 사용량에 따라 각 공정의 용수사용량이 늘어날 것이다.

제품에 대한 환경적인 평가와 분석 시 수자원이 얼마나 사용되는지 제품의 생산 공정에서 수자원이 어떤 식으로 연관되어 이동되는지에 대한 정확한 분석이 없다면 수자원을 효율적으로 사용하기 위한 계획수립은 어려울 것이다. 본 논문은 태양광시스템의 물 발자국을 통해 직접수와 간접수가 전 과정에서 어느 부분에 많이 사용되는지 수치화하여 제시하였다. 또한 기존 연구의 물 사용량을 비교해 볼 때 태양광시스템의 물 발자국은 기존 에너지원인 화석연료 및 원자력 에너지의 전력발전 단계에서의 물 사용량보다 낮았고, 이는 태양광 발전이 기존 발전원보다 물 소비량이 적은 발전원임을 확인할 수 있었다.

본 논문을 통해 신재생에너지인 태양광시스템은 인류의 에너지원뿐만 아니라 물 부족문제를 해결할 수 있는 대안으로서 가치를 가지고 있음을 알 수 있다. 향후 에너지정책 결정에 있어서 신재생에너지의 부가적인 가치로서 물 발자국개념의 도입이 중요하다. 물 발자국에 대한 연구는 물 사용에 대한 인식전환과 수자원 효율성을 높이는 생활방식으로 전환하는 정책도구로 활용이 가능하며, 물 발자국 개념의 도입은 사업 및 지역개발에 지속가능성을 확보할 수 있다.

본 논문은 태양광시스템의 전 과정에서 직접, 간접적인 물 사용량을 산정하기 위해 단계별 소비되는 재료획득을 위한 물 사용량을 조사하여 포함했지만 모든 원재료가 아닌 주요 원재료에 한해서 물 사용량을 분석한 한계점을 지니고 있다. 향후 단계별 소비되는 전체 투입재료에 대한 물 사용량을 포함시키는 보다 정확한 물 발자국 연구가 이루어진다면 보다 가치가 있는 확장연구가 될 것이다.

감 사

이 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2014, 특화전문대학원 연계 학연협력 지원사업).

References

1. UN, “Managing Water under Uncertainty and Risk,” *WWDR,* **4**, 52-59 (2012).
2. Kenny, J. F., Barber, N. L., Hutson, S. S., Linsey, K. S., Lovelace, J. K., and Maupin, M. A., “Estimated Use of Water in the United States in 2005,” USGS 4-41(2005).
3. Hoekstra. A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., and Mekonnen, M. M., “The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard,” Earthscan, pp. 1-6(2011).
4. Wackernagel, M., and Rees, W., “Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth,” New Society Publishers(1996).
5. Allan, J. A., “Virtual Water: A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits,” *Groundwater*, **36**(4), 545-546 (1998).
6. Hoekstra, A. Y., and Hung, P. Q., “Virtual Water Trade: A Quantification of Virtual Water Flows between Nations in Relation to International Crop Trade,” Value of Water Research Report Series No. 11(2002).
7. Chapagain, A. K., and Hoekstra, A. Y., “Water Footprint of Nations,” UNESCO-IHE, No. 16 (2004).
8. Wild-Scholten, M. J., and Alsema, E. A., “Environmental Life Cycle Inventory of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production,” Materials Research Society, Materials Research Society Fall 2005 Meeting(2005).
9. Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y., and Vander Meer, Th. H., “Water Footprint of Bio-energy and Other Primary Energy Carriers,” *Res. Report Series*, **29**, 19-24 (2008).
10. Althaus, H. J., Hischier, R., Osses, M., Primas, A., Hellweg, S., Jungbluth, N., and Chudacoff, M., “Life Cycle Inventories of Chemicals,” Ecoinvent Centre, Ecoinvent Report No. 8(2007).
11. Kim, J. B., Kang, H., and Park, K. H., “Astudy about Water Footprint Evaluation of Industrial Sectors,” *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **35**(6), 400-406 (2013).
12. Mary, A., “Life Cycle Assessment: Principles and Practice,” EPA, EPA/600/R-06/060(2006).
13. Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya M. M., and Mekonnen M. M., “The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard,” *Earthscan*, pp. 19-71(2011)
14. Fthenakis, V., and Kim, H. C., “Life-cycle Uses of Water in U.S. Electricity Generation,” *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **14**(7), 2039-2048 (2010).
15. Ju, H.-S., Yeon, S.-M., Shin, Y.-J., Kim, B. S., Lim, N.-H., Jeong, H.-C., and Hong, E.-P., “A Comparative Study for Product Carbon footprint of Detergent, Heat Insulating Material, Vacuum Cleaner (Korea, UK and Japan),” *Clean Technol.*, **18**(4), 440-445 (2012).