

지속가능한 태양광발전시스템의 경제성 분석

박수억*, 이덕기

Economic analysis on Sustainable Photovoltaic Systems

Soo-Uk PARK, Deokki LEE

Abstract This paper analyses the economics of grid-connected photovoltaic systems. With the 2003 cost of photovoltaic systems, under prevailing capital market conditions, with a system lifetime of 30 years, and under the best climatic conditions, it appears that the cost of production of grid-connected electricity could be of 0.21 US \$/kWh, and under medium climatic conditions, European locations, Switzerland, Japan and South Korean could be of 0.28\$/kWh. If the lifetime of the system goes up, due to future technological improvements, to a very large value such as 50 years, these costs can be lowered by 10-20%. Competitiveness of grid-connected photovoltaic electricity, while it still cannot be taken for granted, is a possibility, especially if major technological advances further lowers the costs of photo cells and increases their lifetimes.

Key words Grid-connected photovoltaic systems, Technological change – research and development, Sustainable development, Module and system price

* 한국에너지기술연구원 정책연구부
 ■ E-mail : supark@kier.re.kr ■ Tel : (042)860-3045 ■ Fax : (042) 860-3135

subscrip

PV: Photovoltaic
 Wp: Watt-peak
 L: Load factor
 NC: Nominal Cost
 DC: Deflated Cost

1. 서론

태양광발전 시장은 태양전지의 시장진입에 따라 시장점유율이 변해가고 있으며, 본격적인 시장 진입이 80년대 후반부터 세계적으로 전반적인 지역 분포가 나타나고 있는 가운데 2000년대 초까지 약 10배 이상의 시장이 크게 증가하여 왔다. 특히 경제 블록 중심으로 평가를 해보면 일본의 시장 독주에서 미국

의 진입이 강화하고 있으나 최근 들어 오히려 유럽의 공세가 더 본격적으로 시장진입을 위하여 노력하고 있으며 타 경제 블록으로는 우리나라를 비롯하여 몇몇 개국이 비슷한 증가율로 기술개발에 매진하고 있음을 알 수 있다.

이에 관한 논문들은 전력생산과 경제성에 대해서 연구가 되어왔고 또한 계속적으로 이루어지고 있다. 특히 기술시장에 관한 연구는 경제성에 기반을 두고 있기 때문에 시장진입을 강화하기 위하여 기술의 발전, 특히 태양전지의 효율향상이 중심적인 역할을 이루고 있다. 기본적으로 실리콘이나 다른 반도체를 기본으로 하여 발전하고 있는 태양광기술은 장기적으로 많은 자원을 줄이는 선도적인 역할을 통해 혁신이 기대된다.

본 연구는 태양전지의 비용을 고려하여 연계형 태양광 발전(Grid-connected photovoltaics) 비용의 장기적 예측을 목적

으로 하고 있다. 본 연구 결과는 기술적 진보, 규모적 효과, 온실가스 저감효과, 외부적 효과 등을 모두 고려하고 있으며 구체적으로 이러한 기술들이 경쟁력 상승에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 태양광 발전시스템기술

태양광발전기술(PV, Photovoltaics)의 구성은 핵심소자인 태양전지 기술과 주변장치기술로 나뉘어 진다. 태양전지는 태양을 받아서 전기를 발생하는 광전효과(Photovoltaic Effect)에 의해 기전력이 발생하여 외부에 접속된 부하에 전류가 흐르게 된다. 이러한 태양 전지는 필요한 단위 용량으로 직·병렬 연결하여 기후에 견디고 단단한 재료로 만들어진 태양전지 모듈(Solar cell module)로 상품화 되고 실제 사용부하에 맞추어 모듈을 어레이(Photovoltaic Array) 형태로 구성하여 설치하게 된다. 그리고 태양광발전을 위해서는 태양전지로부터 생성되는 직류전기를 교류로 변환시키는 인버터, 비 또는 눈이 며칠간 계속되는 경우를 대비한 축전지 등의 주변장치(Balance of System)등을 포함한다.

태양광발전의 가장 핵심이 되는 태양전지는 제조기술에 따라 다양하게 분류되고 다양한 태양전지 중에서 현재 태양광발전용으로 널리 쓰이고 있는 것은 기판형 결정질 Si 태양전지이다. 현재 중점적으로 시장을 갖추고 있는 태양전지는 단결정(sc-Si) 및 다결정(mc-Si) 실리콘 태양전지로서 PV시장의 86%를 차지하고 있으며 또한 비정질 실리콘 태양전지(Amorphous Silicon: a-Si)는 PV시장에서 13%의 시장 점유를 하고 있다¹⁶⁾. 새로운 박막소재 분야인 Cadmium Telluride(CdTe) 태양전지와 Copper Indium Diselenide and Alloys(CIS)는 높은 연구실 효율(16~18%) 나타내고 있고 향후 새로운 시장구성의 큰 역할을 기대할 만큼 안정적이고 신뢰성이 높은 제품들이 가격에 도전을 하고 있다.

따라서, 태양광발전시스템의 설치비용 중 태양전지가 약 40%이상을 차지하고 있어 태양전지의 저가화는 태양광발전의 핵심기술이라고 할 수 있다. 그리고 BOS기술은 전체 설치비용의 20% 정도를 차지하고 있다.

태양광발전시스템은 계통선의 연계 유무에 따라 독립형과 계통 연계형으로 구분하고 독립형에는 오지, 도서지역 전력공급과 통신, 양수펌프, 의약품등으로 적용하고, 연계형에는

계통 연계하여 건물에 전력공급용으로 이용하는 분산 배치형과 기존 발전소 대치 또는 계통 전력의 배전망 보강용인 집중 배치형 등으로 구별되어 이용된다. 세계적인 추세를 보면 90년대에 비중이 높았던 외딴지역의 독립형 PV시스템이 도시주변의 연계형 PV시스템으로 집중되고 있는 경향을 나타내고 있다. 두 시스템의 설치 경향을 보면 90년대 초반에는 독립형이 70%이상을 차지하였으나 2000년대에 들어서서는 그 60% 이상을 연계형 시스템으로 변화하고 있으며 태양광 발전의 독립형은 이미 경제적으로 경쟁성을 확보하고 있고, 특히 원거리의 연계형은 비용효과를 나타나고 있다. 그밖에도 태양광발전은 원거리 주택 발전, 냉동, 관개, 보안 등에 다양하게 응용되고 있다. 이러한 상기 적용 예를 통하여 태양광 발전 시스템은 상당히 탄력적으로 운영될 수 있다는 점이 잇점으로 부각되고 있고 연계형 발전이 사용될 수 없었던 개발도상국이나 이미 연계형 발전을 확대하여 사용되고 있는 국가들도 적용 범위를 넓혀 가고 있다.

이와 같이 다양하게 응용되는 태양광발전은 성장속도를 경제성에 최우선을 두고 있으며 이들의 경제적 변수의 효율성을 점검하는 것이 향후 발전 가능성을 가름 할 수 있는 바로미터가 될 수 있다.

3. 태양광발전시스템의 경제성

태양광발전에 의한 전력의 산업적 응용은 매우 느리게 이루어져 왔고 1970년대에 와서야 시작되었다. 이것은 1970년대에는 태양광에 의한 전력이 30 US \$/kWh로 일반 전력이 가정용으로 사용된 가격인 US 0.108\$에 비해 매우 비쌌기 때문이다. 이러한 비용은 현재에 들어서서 상당히 줄어들었는데, 그것은 실리콘과 같은 반도체 소재의 발달, 산업 발전에 의한 태양광 기기의 규모 발전 및 학습효과 등의 기술적 진보 때문이다. 이러한 진보는 태양광시장의 여건 변화로 더욱 발전하는 기세를 보이고 있으며, 화석연료를 쓰는 발전에 비하여 얼마나 경제적인지에 비교를 두고 있다. 그 원인을 두 가지로 보고 있으며 첫째는 일본, 독일 등 주요 국가별 시장 메카니즘의 여건이 좋아지고 있다는 점과 다음은 국가별로 강력한 드라이버를 걸고 있기 때문이다.

3.1 이론적 배경

태양광발전의 경제성은 결과적으로 발전시스템의 전력생산 비용에 의존하며 이들에게는 다음의 자본비용, 태양에너지, 유지비용, 그리고 시스템수명 등의 변수 조건에 영향 받는다.

(1) 자본비용(I): 이는 광전지의 비용으로서, US\$/Watt-peak(\$/Wp)¹⁾로 표현된다.

(2) 태양에너지(E): 이는 연간 태양빛에 노출되어 있는 시간 (Ei), 즉 발광시간 또는 실제에너지 투입량 (kWh/KWp)으로 L을 load factor라고 하면 연간 받는 태양에너지(E)는 다음과 같이 표현될 수 있다

$$E = 8760 L \tag{1}$$

(3) 태양전지 운영비용: 이는 태양 전지를 작동시키는 비용으로 주로 유지비용이 대부분을 차지한다.

(4) 시스템의 경제적 수명(T): 이는 기술의 수명과 동일한 것으로 일반적으로 태양광시스템기술은 경제적 수명을 20년으로 보고 있지만, 연계형 전력산업은 30년으로 평가된다⁶⁾.

에너지비용(C)을 구하기 위하여 우선적으로 A를 자본(I)의 연간 감가상각 이라고 할 때, 이는 연간 명목적 상수로 이를 할인율(i)로 나타내면 :

$$A = \frac{i(I+i)^T}{(I+i)^T - I} \tag{2}$$

다른 관점에서, M이 자본금과 운영비의 비율이고, 상수로 가정하면, 생산된 에너지의 비용(C)에 대한 계산²⁾은 :

$$C = \frac{I}{\rho E} (A + M) \tag{3}$$

된다.

C는 I에 비례하고, E 에는 감소한다. 즉 자본금과 유지비용 사이의 비율을 나타내는 값(M)은, 전형적으로 다른 값에 비하여 다소 작다. 이것은 태양전지 유지비가 적게 들거나 전혀 들지 않는다는 것을 반영한 것이다. 식 (2)에 따르면, A 자신은 전지의 수명인 T와 할인율(i)에 영향을 받게 된다. T가 무한대로 갈 때 A의 한계는 할인을 자체가 되고 이자의 비율이 적어서 비용 C도 적게 들게 된다. 이 가치는 전지의 수명인 20년 또는 그 이상의 기간에 대해서는 대단히 대략적인 근사치이다.

그러나 식(3)은 디플레이터 값에 비하여 명목치 이므로, 장비의 전체 수명을 고려했을 때 C는 과대하게 잡힐 수 있기 때문에 명목적으로 인플레이션이 증가한다고 가정하고 연간 디플레이터를 추정한다.

즉, 연간 디플레이터된 계산치 A^o는 i의 명목 할인을 대신에 r의 실제 할인율을 적용하여 이를 아래의 식으로 나타내면 :

$$I + r = \frac{I + i}{I + n} \tag{4}$$

여기서 n은 인플레이션의 기대율이다. 따라서,

$$A^o = \frac{r(I+r)^T}{(I+r)^T - I} \tag{5}$$

비용 방정식 (3)은 real term이 되어,

$$C^o = \frac{I}{\rho E} (A^o + M) \tag{6}$$

된다.

더욱이, 시스템의 수명 T가 무한으로 갈 경우, 그 극한은 계산된 할인율(r)이나 이자율(i)에 대하여 상대적으로 A와 A^o가 같아지게 된다. 즉 i와 r 은 (3)과 (6)되어

$$C = \frac{I}{\rho E} (i + M) \tag{7}$$

$$C^o = \frac{I}{\rho E} (r + M) \tag{8}$$

된다.

그러나 장기적 자본비용의 효과가 나타나고, 수명이 20~30년인 경우에는 이러한 식들은 지나치게 과소평가된 값일 수 있으나 그것은 50년 이상 장기간 동안에 기술의 발전으로 줄어드는 비용이라고 생각할 수 있다.

앞선 연구들에서는³⁾ 태양광발전의 많은 data들이 변화되어 온 내용들을 언급하고 있지만, 오랫동안 태양광발전은 1980년

1) Watt-peak는 전지당 에너지를 표준 태양빛인 1000 W/m² 로 정의 된다.

2) Chabot, 1993, 식(3)에서 에너지효율상수 ρ는 전기생산에서 발생하는 직류->교류 전환에 따른 이론적인 손실로 값은 일반적으로 0.85이다.

3) Derrick, Barlow, McNelis and Gregory 1993, lesourd: 2001

중반까지 대량생산 체제로 도달하지 못했기 때문에 대부분 개략적으로 설명되었다. 이러한 이유로 초기의 가격 data는 실험실 중심의 소규모에 관한 것들이었으나 최근에 태양전지의 기술시장이 확대됨에 따라 이들 중 경제성에 대한 data가 좀더 명료하게 제시되기 시작하였다. 이들에는 몇몇의 자본금이 포함되어 있는데, 이것은 식 (3)에서 주어진 에너지비용의 계산에서 중요한 요소가 되는 모듈의 비용과 전체 시스템의 비용이 포함된 것이다. 이러한 비용은 모듈에 사용되는 재질에 영향을 받으며, 다른 추가비용을 포함시키지만 추가 에너지 저장이 없는 연계형 적용은 초기 자본금이 독립형 보다 적게 들어감을 알 수 있다.

3.2 적용 DATA

태양광발전시스템의 경제성분석의 주요한 요소는 섹터별 태양에너지 조건에 영향을 많이 받는다. Maycock 과 Stirewalt^[11] 에 의하면, 아주 조건이 좋은 sun belt 지역에서는 load factor(L)를 0.27로 예상할 수 있는 반면, 기후조건이 좋은 sun belt 지역을 집중 파악한 kurosawa^[9]에 의하면, 사막 지역과 지중해 연안의 sun belt 지역, 호주에 있는 Great Sandy 사막 등은 0.25의 값을 나타낸다고 지적하고 있고, US DOE^[10]에 의하면 미국 sunbelt 지대에서의 load factor(L)는 0.25, 평균적인 미국에서는 0.20라고 한다. 독일의 평균 조건^[10]에서는 load factor(L)를 0.20으로 가정하고 있다. 일본^[6]에서는 평균조건 0.20, 한국(KIER)도 평균 0.20 등으로 본 연구에 활용하였다.

3.3 PV 경제성 평가

PV 경제성 분석의 가장 중요한 요소인 모듈의 가격 데이터는 많은 변화를 가져왔으나 여기서는 Maycock^[13]와 최근 IEA^[8]에서 제시한 기본가격 시계열자료를 디스플레이된 값으로 계산하여 아래의 fig.1에서 제시하였다. 이들의 값에는 모듈 가격과 시스템 가격 사이에 일정율이 유지되며 1.5에서 2배 사이가량의 상수가 있다. 이는 PV기술의 성장속도와 밀접하며 본 논문에서 적용하는 측정값은 2에 접근함을 알 수 있다.

fig.1은 태양전기에너지의 비용을 추정한 식(3)과 식(6)의 기본적 경우가 된다. 계산에 있어서는 수명을 20년으로 일반적인 기준과 미국의 현재 자본시장 조건아래, 명목상의 할인율은

4.86%, 위험 부담률 1.5%, 그리고 기대인플레이율은 2%로 가정하였다.

분석하는 과정에서 볼 때, 초기 값에서 현재의 자본시장의 조건을 적용하여 계산하는 것은 한쪽으로 치우친 것이라고 생각할 수 있으나, 적어도 이론적인 측면에서 과거의 자본시장의 상태는 오늘의 현실과 매우 다르기 때문에 좀더 현실성을 높이기 위함이다. 그러나 본 연구의 결과는, 전력비용이 자본시장의 여건에 비교할 만큼 상당히 발전하고 있어서 에너지비용에서의 감소는 모듈과 시스템의 비용감소만 반영하였다.

Kurokawa^[9]가 제시한, load factor(L) 0.25와 E=2,200 h/y는 아주 좋은 기후조건인 경우인 남부 스페인, 남부 이탈리아, 크레타 섬, 미국의 sun belt 지역, 애리조나, New Mexico, Mojave 사막과 같은 사막, 지중해의 건조한 기후 등의 값을 기본 조건으로 하여, Chabot^[13]의 결과를 따른 $\rho=0.85$ 값과, 유지 비용 상수인 M을 0.005를 적용하여 Base-case를 분석하였을 때 나온 결과인 table 1을 보면 US National Association of Regulatory Utility Commissioners^[15]에서 분석한 값보다 훨씬 덜 낙관적인 값이라고 조심스럽게 추정한다.

Base-case인 table 1은 구성하고 있는 다양한 변수인 일반적인 기후 조건, 다른 자본시장, 그리고 수명에 따라 비용이 어떻게 변화하는지 살펴보았다.

table 1의 조건에서 지역별로 태양에너지 투입영향이 서로 다르게 제시되는, 미국의 sunbelt지역과 평균지역, 유럽 남부 지중해지방, 서부 유럽 평균지역(스위스), 그리고 평균 일본 및 한국 평균지역 등 모든 이러한 지역에서, 각 지역에 적절한 load factor와 자본시장에 따른 명목 할인율과 실제할인율을

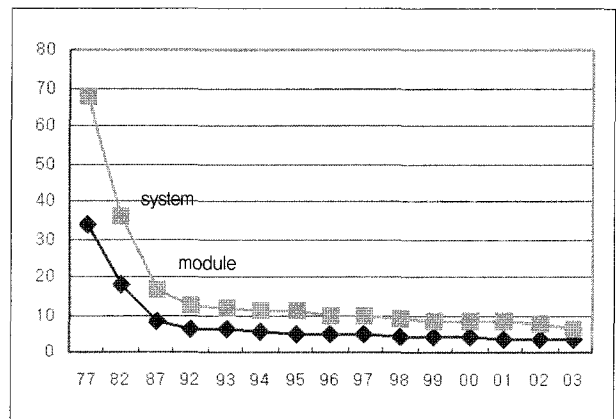


fig.1 Prices for photovoltaic modules and systems (in 2003 US \$)
자료 : Maycock, 1993, IEA, 2003(1992년 이후 data).

사용하였다. 우선적으로 시스템의 수명을 20과 30년으로 사용하였고, 그와 함께 무한의 수명을 실험적으로 계산해보았는데, 이 값은 50년의 수명과 거의 비슷한 값을 나타내었다. 결과는 table 2에 나타내었다.

3.4 원별 발전비용 비교

table 1의 Base-case에서 적용된 바와 같이 제일 선호되는 기후지역인 사막, 매우 건조한 지중해 기후에 해당하는 load factor(L)인 0.25로 계산한 값을 환경 비용을 포함한 다른 기준의 발전소의 비용과 비교해 보았을 때 결과는 table 3에 나타

table 1. Base-case costs for grid- connected photovoltaic electricity (2003 US \$)

년도	NC [c, Equation (2)]			DC [c, Equation (5)]		
	T=20년	T=30년	T=∞	T=20년	T=30년	T=∞
1977	3.41	2.89	2.47	2.91	2.35	1.77
1982	1.82	1.54	1.32	1.55	1.25	0.94
1987	0.82	0.70	0.60	0.70	0.57	0.43
1992	0.62	0.53	0.45	0.53	0.43	0.32
1993	0.61	0.52	0.44	0.52	0.42	0.31
1994	0.57	0.48	0.41	0.49	0.39	0.29
1995	0.54	0.46	0.39	0.46	0.38	0.28
1996	0.49	0.42	0.36	0.42	0.34	0.26
1997	0.48	0.41	0.35	0.41	0.33	0.25
1998	0.46	0.39	0.33	0.39	0.31	0.24
1999	0.43	0.37	0.31	0.37	0.30	0.22
2000	0.43	0.37	0.31	0.37	0.30	0.22
2001	0.40	0.34	0.29	0.35	0.28	0.21
2002	0.37	0.31	0.27	0.31	0.25	0.19
2003	0.33	0.28	0.24	0.28	0.23	0.17

table 2. Cost estimates for grid- connected electricity generation (2003 US \$)

Locations	T = 20년		T = 30년		T = ∞	
	NC	DC	NC	DC	NC	DC
1.USA	0.33	0.28	0.28	0.23	0.24	0.17
2.USA	0.41	0.35	0.35	0.28	0.30	0.21
3.Europe	0.32	0.27	0.26	0.21	0.22	0.15
4.Europe	0.39	0.34	0.33	0.27	0.27	0.19
5.Swiss	0.35	0.30	0.29	0.23	0.22	0.14
6.Japan	0.45	0.38	0.36	0.28	0.26	0.16
7.S. Korea	0.42	0.36	0.36	0.29	0.31	0.21

주: 1)

내었다.

아래 제시된 table 3 에서의 결과는 의미있게 분석하여야 한다. Lesourd¹⁰⁾에 의하면, 그것은 이들의 분석치 중 25%에서 30%에 달하는 불확실성이 가정시된다. 그 이유로는 본 연구에서의 추정치가 기존의 에너지원 전력비용과의 비교에 어려움이 있는데 그것은 PV를 포함한 신재생 발전이 소규모의 실증 사업으로 수행되어 왔기 때문에 규모의 경제를 이루기 어렵다는 점이다. 따라서 대규모의 시스템과 비교할 만한 태양광 발전시스템의 실증사업들이 운영되어야 함이 전제조건일 것이다. 즉, Awebush¹¹⁾가 말했듯이 태양광발전시스템은 이미 완료된 기술에 비해서는 매우 큰 불확실성을 가지고 있음을 인식할 필요가 있다.

이러한 불확실성을 감안할 때, table 3에서 제시한 태양광발전비용은 아직은 경쟁력이 떨어진다는 것을 알 수 있다. 이것은 다른 기존의 몇몇 기술과 비교했을 때도 마찬가지이다. 여기서 table 1, 2를 보고 제기할 문제는 이것이 경쟁력의 문제가 아니라 기존의 연계형 발전비용과 비교했을 때, 미래에 지속적으로 비용의 저감율이 어떻게 변하는가를 보는 것이다. 이것은 물론 학습곡선과정에 따른 규모경제의 가능성과 관련되어 있고, 또한 태양광기기의 기술적 발전의 산업에도 관련되어 있

table 3. Average costs estimates for grid- connected electricity generation in USA with various technologies (2003 US \$)

Sources	Base Cost	Overall Cost (including Environmental Costs)
GAS	0.07	0.08
COAL	0.06	0.10
OIL	0.06	0.10
NUCLEAR	0.10	0.15
WINDMILL	0.10	0.10
SOLAR THERMODYNAMIC	0.10	0.10
PHOTOVOLTAIC	0.28	0.28

자료 : Flavin과 Lenssen⁶⁾의 갱신된 자료

- 1) 1. 미국 sunbelt 지역(load factor=0.25);
2. 미국 평균지역 (load factor=0.20);
3. 남부 유럽의 지중해 지방 (30년간 안전이자율 4.28%, load factor= 0.25);
4. 서부 유럽 국가 평균 지역 (load factor=0.20);
5. 스위스 지역 평균 (30년간 안전이자율: 2.9%, load factor=0.20);
6. 일본 지역 평균 (30년간 안전이자율 : 2.38%, load factor= 0.15);
7. 한국 지역 평균 (30년간 안전이자율 : 5.1%, load factor= 0.20)

다. 전자가 토론된 만큼, 모듈과 시스템가격의 몫으로 상수 2만 큼 줄어드는 비용은 10년 동안 보아왔듯이, 위에서 제일 선호 되는 sunbelt 지역에서는 2007년까지 0.11\$/kWh에 충분히 가능할 것이고, 그러한 일사량을 보이는 지역(지중해와 열대기 후)에서는 태양광발전이 경제성 있다. 일본의 경우, 자본시장 측면에서 타 지역보다 우세하나 load factor의 열세로 0.14\$/kWh의 결과가 예상되고 서유럽의 기후와 자본 시장의 조건을 예상할 때, 대응되는 값인 0.13\$/kWh은 일본의 경우 보다 더 선호된다. 한국의 경우 일본과 거의 유사한 상황이며 자본시장이 좀더 향상되면 경제성이 나아질 것이다.

3.5 지속가능한 경제 효과

다른 가정이지만, 기술의 향상 등으로 모듈과 시스템가격의 몫으로 상수가 3~4만큼 줄어든다면 약 1.5~2\$/Wp의 시스템 비용을 가져다 줄 것이고 전력비용이 0.06~0.10 \$/kWh로 이것은 기존의 화력발전과 비교했을 때 태양광발전이 확실한 경쟁력을 보여준다.

증가하는 시스템의 수명은 예상했듯이 30년 정도가 되면, 15%에서 20% 사이의 비용감소를 가져올 것이고 이것은 태양 광시스템의 경쟁력을 효과적으로 개선시키는 반면, 전력저장 설비가 없는 시스템을 대상으로 한 것이므로, 특히 peak hour 에 기존의 시스템을 보조동력으로 이용할 수 있다. 이 경제성은 더욱이, 선호되는 기후조건인 지중해와 열대지역뿐만이 아니라, 기후가 온화해서 선호도가 약한 일조기간을 보이는 지역에서도 마찬가지로 경향을 나타낼 것이다. Bloss and Pfisterer²⁾에 의하면, "1 \$/Wp보다 낮아지는 상당한 비용 감소는, 실제 기술적 약진을 통해서만 가능하다." 고 하였듯이 더욱이 태양 광산업이 지금 싼 실리콘과 다른 재질로 만들어지고, 이것은 대량 규모로 이루어지지 않기 때문에, 큰 규모의 태양광 모듈의 생산의 경제적인 가능성을 기술혁신에 크게 의존하고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 Chabot³⁾에 의하여 제시된 태양광에너지 방정식에 의한 결과를 real-term과 deflated version으로 계산 하였다. 여기서 이 방정식들은 기후 조건을 이용하여 몇몇 가 설을 만들어 적용하여 연계형 태양광발전에너지의 비용을 고

려하여 보면, 30년의 수명으로 볼 때 선호지역인 미국의 sunbelt나 남부유럽의 경우 평균 0.27 \$/kWh까지의 범위로 나타났다. 분석한 기후조건은 사막 또는 지중해, 미국 sunbelt area, 남부 유럽, 그리고 덜 선호되는 지역인 서부 유럽, 북부 유럽, New England States와 같은 북미 지역, 일본 그리고 우리나라까지 분석하였다. 추가로, 자본 시장변수를 다양화하여 식 내에 포함시켰는데, 그것은 태양광 전력 비용에 있어서 자본비용이 그만큼이나 중요하기 때문이다.

결론적으로, 태양광발전비용을 디플레이트 된 값으로 분석 하면, 제일 선호하는 기후조건 지역은 0.22\$/kWh로 일반적인 평균지역은 0.28\$/kWh로 나타났다. 이러한 값들이 아직은 경쟁력에 거리가 있으나 여러 가지 가설을 통하여 볼 때 태양광 발전 산업인 모듈과 시스템기술 개발의 속도가 중요한 영향 요소임을 나타내고 있다. 그리고 가설에 의한 태양광 모듈과 시스템 기기와 시스템 사이의 몫이 3~4의 상수를 나타내면, 대략 2\$/Wp이거나 조금 적은 값이 되며 태양광 발전비용은 최적 조건에서 약 0.10 \$/kWh정도로 경쟁력에 매우 가까이 있게 된다.

그러나 분명하게 경제성을 가지기 위해서는 태양광모듈의 확실한 가격 하락을 통해서만, 시스템의 가격을 1\$/Wp로 떨어 Em린 다음에 가능하다. 여기서, 지난 많은 예측들이 지나치게 낙관적이었기 때문에, 이러한 비용의 하락이 가능한지에 관해서 불확실성이 존재하지만, 기술혁신에 의한 발전과 대량생산 여건 조성이 태양광발전의 경제성에 대한 핵심을 가지고 있다.

References

- [1] S. Awerbush, *Determining a Bid Price for PV-Generated Electricity under an IPP Agreement, Report, Sandia Laboratory, March 1992.*
- [2] W.H. Bloss and F. Pfisterer, *Photovoltaic Systems, in M. Palfy (Ed.), Proceedings of the ISES World Congress, Budapest, 1993, Volume 3. Photovoltaic Systems, pp. 35-49, especially p. 46.*
- [3] B. Chabot, *Analyse conomique des filires d'nergie solaire, Sommet Solaire Mondial, UNESCO, Paris, July 1993.*
- [4] A. Derrick, R.W. Barlow, B. McNelis, and J.A. Gregory, *Photovoltaics: A Market Overview, James-James, London, 1993.*

- [5] Ch. Flavin and N. Lenssen, *Power Surge: Guide to the Coming Energy Revolution*, Norton and Co., New-York, 1994.
- [6] Y. Hamakawa, *Sunshine Project and Recent Progress in Photovoltaic Technology in Japan*, Proceedings of the Tenth EC Photovoltaic Solar Conference held at Lisbon, Portugal, 8-12 April 1991. Kluwer, Dordrecht, 1991, pp. 1375-1380.
- [7] IEA (International Energy Agency), *Added Values of Photovoltaic Power Systems*, Report IEA PVPS T1-09, IEA, Paris, 2001.
- [8] IEA (International Energy Agency), Trends in Photovoltaic Applications Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2003, Report IEA-PVPS T1-13, 2004
- [9] K. Kurokawa, 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*, 47, 1997, pp. 189-196.
- [10] J.B. Lesourd, Solar Photovoltaic Systemsthe economics of a renewable energy resource. *Environmental Modelling and Software*, 16 (2), 2001, pp. 147-156.
- [11] P. Maycock and E. N. Stirewalt, *Photovoltaics : Sunlight to Electricity in One Step*, Brick House, New-York, 1981.
- [12] P. Maycock, 1993, PV Efficiencies to Rise Sharply. Costs to Crumble by 2010. *The Solar Letter*, 23 July 1993.
- [13] P. Maycock, 1994. 1993 Module Shipments, *Photovoltaic News*, February 1994.
- [14] P. Maycock, 2004. PV market update, *Renewable Energy world*, 7-8 2004
- [15] NARUC(National Association of Regulatory Utility Commissioners), *Electric Power Technology. Options for Utility Generation and Storage*, Staff Paper, Technology Subcommittee, Finance and Technology Committee, February 1991.
- [16] M. Palfy (Ed.), *Proceedings of the ISES World Congress, Budapest, 1993, Volume 3. Photovoltaic Systems*.
- [17] D.L. Pulfrey, *Photovoltaic Power Generation*, Van Nostrand, New-York, 1978.
- [18] A. Ricaud, *Les modules photovoltaïques. Evaluation et prospective*, Acts, Journe du CUEPE 1997, University of Geneva, Geneva, Switzerland, 30 October 1997, pp. 75-90.
- [19] US DOE (US Department of Energy), *Utility Flat-Plate Thin Film Photovoltaics*, Working Paper, 1998.
- [20] A.Wiese, *Photovoltaic Electricity Generation in Germany. Potential, Costs, Implementation Strategies*, in M. Palfy (Ed.), *Proceedings of the ISES World Congress, Budapest, 1993, Volume 3. Photovoltaic Systems*, pp.89-95.
- [21] K. Zweibel, *Harnessing Solar PowerThe Photovoltaics Challenge*, Plenum Publishing, New-York, 1990.
- [22] 윤경훈, 태양광기술현황, KIER, 2004

박수익



1981년 아주대학교 산업공학과 공학사
 1991년 프랑스 EHESS 경제학석사
 1994년 프랑스 EHESS 경제학박사

현재 한국에너지기술연구원 정책연구부 책임연구원
 (E-mail : supark@kier.re.kr)

이덕기



1988년 청주대학교 산업공학과 공학석사
 2001년 충북대학교 경영학과 경영학박사

현재 한국에너지기술연구원 정책연구부 책임기술원
 (E-mail : deokki@kier.re.kr)