

Sunbelt 지역의 태양광발전 경제성분석

최봉하*, 박수익, 이덕기, 김석기, 송진수

Economic Analysis on VLS-PV System from Sunbelt Region

Bongha Choi, Soo-Uk Park, Deokki Lee, Seokki Kim, Jinsoo Song

Abstract This paper analyses the economics of 50kW PV system installed in Tibet and using domestic technology. We show that this system can be expanded to very large-scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system successfully. Based on this result, we conduct the economic analysis of 100MW VLS-PV system designed assuming that it will be installed from 2008 to 2017 in Tibet. In this analysis, future price of PV module and system are estimated based on the methodology of experience curve. In 50kW PV system, the generation cost is calculated at 567.2 won/kWh and this is lower than the one of domestic PV system. In future 100MW VLS-PV system, the generation cost is calculated at 305.4 won/kWh by declining system price. If the lifetime and efficiency of the system goes up, due to future technological improvements, the generation cost can be lowered. Moreover, under the environmental and political effect, VLS-PV system can be as competitive as the conventional energy within 20 years.

Key words VLS-PV System(대규모 태양광 발전 시스템), PV Module and System Price(PV 모듈 및 시스템 가격), Experience Curve(경험곡선), Generation Cost(발전단가)

* 한국에너지기술연구원 에너지정책연구부

□E-mail : bgunit@kier.re.kr □Tel : (042) 860-3489 □Fax : (042) 860-3135

subscripts

VLS-PV : very large scale photovoltaic

1. 서론

최근 BRICs로 대표되는 개발도상국들의 급격한 경제성장으로 인해 전 세계의 에너지 수요는 빠르게 증가하고 있다. 이러

한 에너지 수요 증가를 충족시키기 위해서는 더 많은 에너지원이 필요하나 현재의 에너지원으로는 지속적이고도 충분한 공급에 어려움이 있으며 많은 양의 온실가스 방출로 인한 환경적인 문제 역시 존재한다. 이러한 상황에서 신재생 에너지의 활용은 온실가스를 발생시키지 않으면서 무한한 에너지 공급이 가능하다는 점에서 큰 기대를 받고 있다.

특히 태양광발전기술은 무한정, 무공해의 태양에너지를 직

집 전기에너지로 변환시키는 기술로서, 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 있으며, 이에 발맞추어 전 세계 태양전지 모듈 생산량은 전년대비 약 40%에 가까운 빠른 증가 속도를 보이고 있다. 이에 2010년에는 약 3-4GW의 생산규모에 300억불 이상의 시장이 형성될 것으로 전망되고 있다.

그러나 태양에너지는 일반적인 환경에서는 그 에너지 밀도가 낮고 기후적인 면에서 많은 제약을 받는 특징을 지니고 있다. 충분한 양의 에너지를 얻기 위해서는 높은 일사량과 함께 넓은 면적을 가진 지역이 필요하며, 연중 건조하고 맑은 날씨와 함께 풍부한 일사량을 보유한 건조한 사막지역과 같은 Sunbelt 지역이 이에 해당한다. 이러한 Sunbelt 지역은 지구 대지의 약 13% 정도인 1,800만 km²를 차지하고 있으며, 전 세계 Sunbelt 지역 면적의 약 10%에 해당하는 지역을 태양광 발전 시스템 설치에 이용할 수 있다면 전 세계의 연간 에너지 소비량과 맞먹는 에너지를 생산할 수 있다. 현재의 기술적인 조건하에서 Sunbelt 지역에서 생산 가능한 전력량은 2,081×10³ TWh로 추정되며 이는 2002년 기준, 전 세계 1차 에너지 공급량인 120×10³ TWh의 약 17배에 해당하는 엄청난 양으로 에너지 생산원으로써 Sunbelt 지역이 가지고 있는 무한한 잠재력을 보여준다²⁾.

또한 Sunbelt 지역에서는 풍부한 일사량과 함께 넓은 면적의 대지 사용이 가능하기 때문에 기존의 도리지방이나 건물의 지붕, 외벽에 설치되어 왔던 소규모 발전 시스템과는 다른 10MW에서부터 수 GW 용량의 대규모 태양광 발전(VLS-PV) 시스템의 설치가 가능하다.

이러한 VLS-PV 시스템은 Sunbelt 지역의 풍부한 일사량을 이용할 수 있는 장점외에도 단계적인 설치를 통해 발전 용량을 확장시킴으로써, 앞으로의 점진적인 수요증가에 탄력적이고도 빠른 대응이 가능하다. 또한 확장과정에서의 기술 향상과 대량 생산을 통한 규모의 효과에 의해 발전단가를 낮출 수 있다. 그리고 VLS-PV 시스템의 설치는 Sunbelt 지역 국가로의 PV 기술 수출 등을 통한 관련 산업의 성장 및 그로인한 경제성장, 고용증가와 같은 에너지 생산 뿐만 아닌 사회경제적으로 긍정적인 효과를 가져다 줄 수 있다.

본 연구에서는 VLS-PV 시스템의 설치를 위한 사전 실증 단계로써 Sunbelt 지역인 중국 티베트 지역에 국내 기술을 이용하여 설치된 50kW급 태양광 발전 시스템의 경제성을 우선적으로 분석해 보았다. 그리고, 이를 바탕으로 향후 100MW급 VLS-PV로의 확장시 PV 모듈 및 PV 시스템의 시장 확대에 의한 가격 하락을 적용한 발전단가의 변화를 예상하여 향후 티베트 지역의 VLS-PV 시스템의 경제성을 분석해 보고자 한다.

2. 주요 가정 및 경제성분석 방법

2.1 실증 단지

본 연구의 토대가 되는 태양광 발전 실증 단지는 중국 티베트 지역에 위치하고 있으며, 입지 조건은 다음과 같다. 해발고도 4,205m의 고지대에 위치하고 있다. 일평균 조사시간은 7시간 이상이며 일평균 일사량은 5.73kWh/m²/day로써 서울의 일사량이 3.33 kWh/m²/day인 것을 감안하면, 매우 높은 수치임을 알 수 있다. 또한 이 지역의 총면적은 130만 km²으로써 1GW 규모의 태양광 발전 시스템의 설치에 10km² 면적이 필요한 점을 고려할 때 향후 VLS-PV로의 확장에 필요한 충분한 면적을 가지고 있다.

실증단지의 PV 시스템 경제성은 시스템의 설치 및 운영·유지에 들어가는 비용과 연간 발전량, 시스템 수명, 할인율 등을 고려한 발전단가를 구함으로써 알 수 있다. 연간 발전단가를 구하기 위해 본 연구에서 사용한 방법³⁾은 다음의 식 (1)과 같다.

$$P = \left\{ C_T \cdot \frac{R}{1 - (1+R)^{-T}} + AC \right\} / Q_A \quad [\text{원/kWh}] \quad (1)$$

위 식에서 P는 발전단가, C_T는 총자본비용, R은 할인율, T는 시스템의 수명, AC는 연간 유지·운영 비용, Q_A는 시스템의 연간 발전량을 의미한다.

총자본비용은 초기투입비용으로써 PV 모듈가격이 큰 비중을 차지하는 PV 시스템 비용, 건설비용, 자재 운송비용, 송전 비용 등이 포함된다. 그러나 IEA에서 수행한 미래 VLS-PV 시스템과 관련한 연구⁴⁾에 따르면 PV 시스템 비용이 초기투입비용의 95% 이상을 차지하는 것으로 조사되었다. 또한 연간 유지·운영비용은 초기투입비용을 수명기간동안 할인율을 적용

하여 연간균등화한 비용의 1%를 차지할 것으로 동 연구에서 조사되었다. 이에 근거하여, 본 연구에서는 PV 시스템 비용의 경우 초기투입비용의 95%를 차지하며, 연간 유지·운영비용은 초기투입비용을 연간균등화한 비용의 1%를 차지한다는 가정하에 분석을 수행하였다.

시스템 수명은 20년, 할인율은 7%로 각각 적용하였다.

2.2 VLS-PV 시스템

앞 절에서의 실증 단지 사업은 향후 100MW 이상의 VLS-PV 시스템 개발을 위한 사전 단계로서의 사업이다. 본 연구에서는 실증사업이 끝나는 2008년부터 2017년까지의 10년 동안 매년 10MW 용량의 태양광 발전설비를 단계적으로 설치하여 최종 100MW 용량의 VLS-PV 발전 시스템 개발을 가정했을 때의 VLS-PV의 발전단가 변동을 통한 경제성을 분석해보고자 한다.

입지 조건 및 발전 단가를 이용한 경제성 분석 방법은 실증 단지의 경우와 동일하다.

향후 10년간 티베트 지역의 기후 조건에는 큰 변화가 없을 것으로 예상되는 상황에서 발전단가에 영향을 미칠 수 있는 두 가지 요소는 연간발전량과 초기투입비용이다. 일사량의 변화가 없는 상태에서 발전량을 증가시킬 수 있는 요인은 기술향상을 통한 PV cell의 효율향상이다. 현 수준에서의 효율은 15%이며, 향후 10년간 급격한 향상은 없을 것으로 전망되고 있으므로, 본 연구에서는 PV cell의 효율은 15%를 유지하며, 그에 따라 발전량은 매년 동일하다고 가정하였다.

또 하나의 요소인 초기투입비용은 앞에서 언급하였듯이 비용의 대부분을 PV 시스템 가격이 차지하고 있다. PV 시스템의 가격은 PV 모듈 생산 기술의 향상과 수요의 증가로 인한 생산량 증대에 힘입어 꾸준히 하락하고 있으며, 향후에도 그 흐름이 지속될 것으로 전망되고 있다.

향후 PV 시스템의 가격 전망을 위해 누적생산량과 가격 사이의 관계를 설명해주는 경험곡선(experience curve)을 이용하였다. 경험곡선은 수리적으로 다음과 같이 표현된다²²⁾.

$$P_t = a \cdot X^E \quad (2)$$

여기서, P_t는 t년도의 단위 판매가격이며, X는 t년도의 누적

생산량으로써 t년도의 누적 PV 설비 용량을 뜻한다. E는 경험 지수로 곡선의 경사도를 결정짓는다. 진도율(PR, Progress Ratio)은 경험지수로 2^{-E}이며, 이를 현실에 반영하기 위하여 학습율(LR, Learning Rate)이란 의미로 설명되고 PR을 LR로 변경하면 LR=1-PR 이 된다.

경험곡선을 이용하여 얻은 2017년까지의 예상 PV 시스템 가격을 통해 연차별 초기투입비용을 구하고 이를 경제성 분석에 활용한다.

3. PV 시스템의 경제성분석

3.1 실증단지의 경제성분석

현 단계에서 실증 사업은 50kW급 시스템의 설치가 완료되

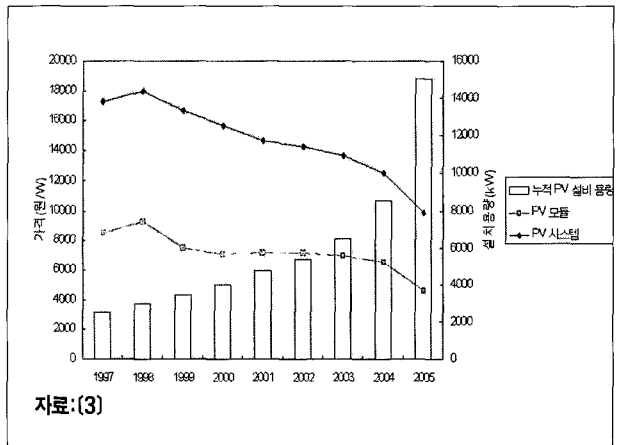


Fig. 1 국내 누적 PV 설비용량 및 PV 모듈, PV 시스템 가격

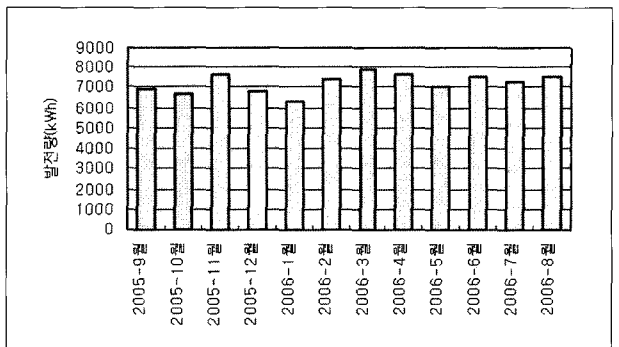


Fig. 2 실증 단지의 월별 발전량

어 시험 발전 중에 있으며, 이 데이터를 바탕으로 경제성을 분석을 수행한다.

Fig.1 은 1997년부터 2005년까지 국내에 설치된 태양광발전 설비의 누적 용량과 그에 따른 PV 모듈 및 계통 연계형 PV 시스템의 가격 추이를 보여준다.

2005년까지 국내에 설치된 태양광 발전 설비의 총 용량은 15,000kW이다. PV 모듈의 가격은 4,600원/W이며 PV 시스템의 가격은 약 2배 정도에 해당하는 9,800원/W으로 조사되었다³⁾.

1년간(2005.9 ~ 2006.8)의 시범운영을 통한 50kW급 실증 시스템의 연간 발전량은 86,702kWh인 것으로 나타났으며 월별 발전량은 다음의 Fig. 2 와 같다.

2장에서 주요 가정 및 식(1)을 이용해 계산한 발전단가는 567.2원/kWh 으로 나타났다. 일사량 차이를 제외한 기타 조건이 같다고 가정했을 때 동일 시스템의 국내 설치시 예상 발전량은 49,933kWh가 될 것으로 추정되며, 그에 따른 발전단가는 984.8원/kWh이 될 것으로 예상된다. 즉, 기후 조건이 좋은 Sunbelt 지역에 설치함으로써 발전단가를 크게 낮출 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 현재 국내 태양광 시장의 확대를 위해 시행중인 Feed-in Tariff 제도(기준가격 의무구매 제도)하에서 태양광 발전을 통한 전력의 가격이 716.4원/kWh 임을 고려할 때 현시점에서 기존의 국내 태양광 발전에 비해 더 나은 경제성을 가짐을 확인할 수 있다.

3.2 VLS-PV 시스템의 경제성분석

VLS-PV 시스템의 경제성분석을 위해서는 사업 기간 동안의 연차별 초기투입비용을 예상하여야 하며 이를 위해서는 PV

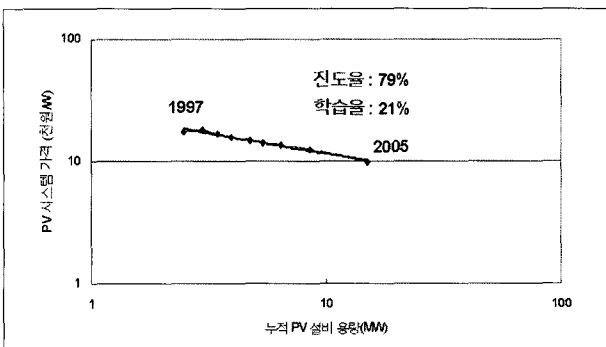


Fig. 3 1997~2005 국내 PV 시스템의 경험곡선

시스템의 가격을 추정하여야 한다. 이를 위해 2.2절에서 설명한 경험곡선을 이용한다.

앞 절의 Fig. 1 의 국내 누적 설비 용량과 PV 시스템의 가격간의 관계를 경험곡선을 이용해 나타내면 다음의 Fig. 3 과 같다.

적용 결과 $E=0.33$ 으로 진도율은 79%, 학습율은 21%로 나타났다.

최근 5년 동안의 세계 PV 시장의 연평균 성장률은 38.4% 이었다⁴⁾. 향후 이 추세가 국내시장에도 적용된다고 가정하였을 때 예상되는 국내 누적 설비 용량은 다음의 Fig. 4 와 같으며, 2018년에는 1GW를 돌파할 것으로 전망된다.

이 전망치를 경험곡선에 대입했을 때, 예상되는 PV 모듈과 PV 시스템의 가격 추이는 Fig. 5 와 같이 나타나게 된다.

100MW 발전 설비가 완료될 것으로 예상한 2017년에 PV 모듈의 가격은 2,400원/W 까지 하락할 것으로 전망되며, 계통 연계형 PV 시스템 가격은 3,900원/W까지 하락할 것으로 전망된다.

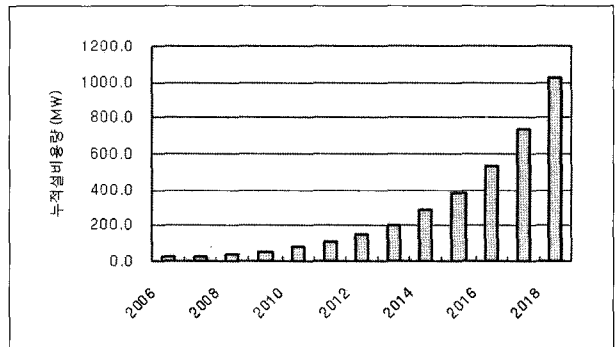


Fig. 4 향후 국내 PV 시스템 누적 설비용량 전망

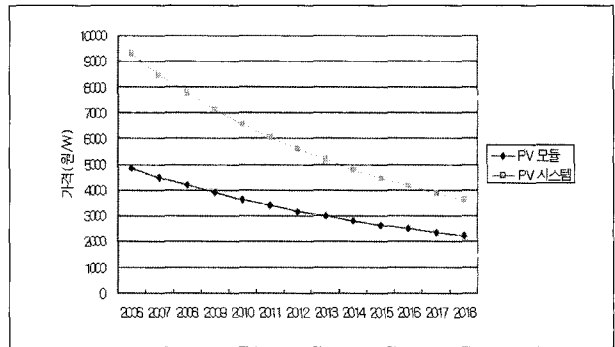


Fig. 5 향후 PV 모듈 및 PV 시스템 가격 전망

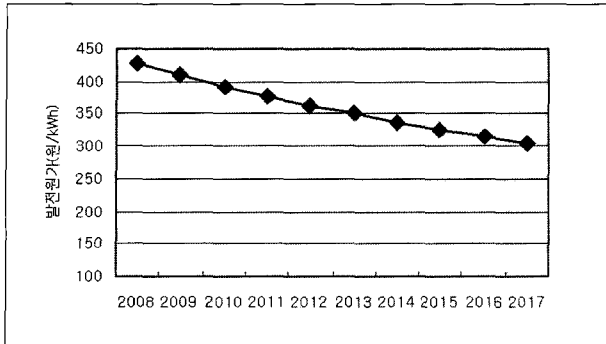


Fig. 6 연간 발전단가 변화 추이

Table 1. 국내 에너지원별 발전단가(2003)

발전원	발전단가 (원/kWh)
원자력	39.75
유연탄	42.16
석유	75.05
LNG 복합	81.52
수력	57.43

자료:(24)

이렇게 구한 향후 10년간의 PV 시스템의 예상 가격추이를 식 (1)에 적용하여 연도별 발전단가를 구하면 Fig. 6 과 같다. 매년 단계적으로 하락하는 PV 시스템의 가격에 의하여 발전단가도 단계적으로 낮아져서 완료시점인 2017년에는 305.4원/kWh에 이를 것으로 예상된다.

현 단계와 비교 했을때, 많이 향상되긴 했지만 Table 1에서 보듯 아직 기존의 발전원과 비교하면 발전단가 측면에서 열세에 있는 것이 사실이다. 그러나 환경적 측면에서의 이점과 국내 산업 발전에 기여하는 점 등의 외부효과를 고려하였을 때 지속적으로 추진할 만한 가치가 있을 것이라 판단된다.

또한 PV 시스템 가격이 3,900원/W 에 이를 것으로 전망되는 2017년의 10MW 용량에 대한 발전단가는 212.9원/kWh으로 전망되며, PV 시스템 가격이 2,000원/W 까지 하락할 것으로 예상되는 2027년경에는 110.0원/kWh까지 절감될 것으로 전망된다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 기술로 티베트 지역에 설치된 50kW급 실증 단지에서의 태양광 발전의 경제성을 분석하였다. 그리고 이에 기반하여 향후 10년동안 매년 10MW씩, 최종 100MW 급의 VLS-PV 시스템 설치를 가정하고 이에 대한 연차별 발전단

가를 구함으로써 경제성분석을 수행하였다. 이 과정에서 경험곡선을 활용하여 미래 PV 모듈 및 PV 시스템의 가격을 예상하여 적용하였다.

현 단계에서 발전단가는 567.2원/kWh 으로 나타나 국내에서의 태양광발전에 비해 더 나은 경제성을 가짐을 알 수 있었다. 또한 향후 VLS-PV 시스템으로 확장시 매년 발전단가를 낮춰 10년 후 305.4원/kWh 의 발전단가를 확보할 수 있을 것으로 전망된다.

또한 마지막해인 2017년의 설비에만 국한하였을때는 212.9원/kWh, 20여년 후에는 110.0원/kWh까지 절감될 것으로 전망되어, 기존의 발전원들과의 격차는 크게 줄일 수 있을 것으로 전망되지만 원자력이나, 유연탄, 수력등에 비하면 여전히 높은 발전단가를 유지할 것으로 예상된다.

그러나 본 연구에서는 향후 PV 모듈의 효율과 시스템의 수명이 현 기술수준과 동일하다는 가정하에서 분석을 수행하였다. 즉, 기술 발전으로 인한 PV 시스템의 효율 및 수명이 향상될 경우에는 발전단가를 더욱 낮출 수 있을 것으로 전망되며, 고유가의 지속에 의해 발전 단가가 상승할 것으로 예상되는 석유나 LNG와 비교시에는 경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 기대된다.

특히 자원의 대부분을 수입에 의존하고 있으며, 향후 기후변화협약의 온실가스 감축의무를 받게 될 가능성이 높은 우리나라의 현실에서 VLS-PV 사업에의 참여는 석유나 LNG 등을 대체할 수 있는 매력적인 대안이 될 것이다.

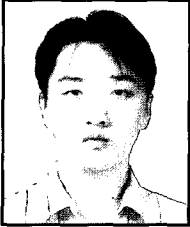
또한 막대한 양의 에너지 획득 효과 외에도 PV 모듈 및 주변 장치의 대량 생산 및 수출로 인한 관련 산업의 활성화와 그에 따른 경제 발전 및 고용 창출 효과를 기대할 수 있다. 이와 더불어 국내기술의 우수성을 해외에 알릴 수 있는 좋은 기회가 될 것이다.

국내에서는 점차로 MW급 태양광발전 시설이 추진되고 있기 때문에 이같은 용량 확장은 국내의 VLS-PV에 접근하기 위한 초석이 될 것이다. VLS-PV에 적절한 입지 조건을 갖춘 대부분의 Sunbelt 지역들은 태양광 발전 가능성을 제외한 다른 부분들에 있어서는 크게 낙후된 지역이다. 이러한 점들은 향후 VLS-PV 사업에 있어서 가장 큰 불확실 요소들이다. 이러한 불확실 요소들을 제거하고 성공적인 VLS-PV 사업을 위해서는 세계 시장을 선도할 수 있는 기술 및 가격경쟁력의 확보가 무엇보다도 선행되어야 할 것이며, 해당 지역 국가와의 긴밀한 협력 역시 필요할 것이다.

References

- (1) M. Oliver, T. Jackson, "The evolution of economic and environmental cost for crystalline silicon photovoltaics" *Energy Policy*, Vol. 28, pp. 1011-1021, 2000
- (2) Kosuke Kurokawa, "Energy from the desert" Earthscan, London, 2006
- (3) IEA(International Energy Agency), "Trends in Photovoltaic Applications Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2005", Report IEA-PVPS T1-15, 2006
- (4) M. Ito, K. Kato, H. Sugihara, T. Kichimi, J. Song, 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
- (5) Kyung-Hoon Yoon, "National Survey Report of PV Power Applications in Korea 2003", IEA-PVPS Task 1, 2004
- (6) Kyung-Hoon Yoon, Jinsoo Song, "Status of PV Activities in Korea : From the IEA/PVPS Survey Report", ISES-AP, 2004
- (7) E. Alsema, "PV cost and development - PV experience curves from the PHOTEX database", PHOTEX workshop, Brussels, 2003
- (8) IEA(International Energy Agency) "Added Values of Photovoltaic Power Systems", Report IEA-PVPS T1-09, 2001
- (9) J.B. Lesourd, "Solar Photovoltaic Systems: the economics of a renewable energy resource", *Environmental Modeling and Software*, Vol.16, pp.147-156, 2001
- (10) B. Zwaan, A. Rabl, "The learning potential of photovoltaics: implications for energy policy", *Energy Policy*, Vol.32, pp.1545-1554, 2004
- (11) 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
- (12) P. Maycock, "PV market update", *Renewable Energy world*, 2004
- (13) P. Maycock and E. N. Stirewalt, "Photovoltaics : Sunlight to Electricity in One Step", Brick House, New-York, 1981
- (14) P. Maycock, "PV Efficiencies to Rise Sharply. Costs to Crumble by 2010", *The Solar Letter*, 23 July 1993
- (15) A. Derrick, R. W. Barlow, B. McNelis, and J. A. Gregory, "Photovoltaics: A Market Overview", James-James, London, 1993
- (16) M.R. Nouni, S.C. Mullick, and T.C. Kandpal, "Photovoltaic projects for decentralized power supply in India: A financial evaluation", *Energy Policy*, Vol.34, pp.3727-3738, 2006
- (17) V. Quaschnig, "Technical and economical system comparison of photovoltaic and concentrating solar thermal power systems depending on annual global irradiation", *Solar Energy*, Vol. 77, pp.171-178, 2004
- (18) B.A. Andersson and S. Jacobsson, "Monitoring and assessing technology choice: the case of solar cells", *Energy Policy*, Vol.28, pp.1037-1049, 2000
- (19) A.N. Celik, "Present status of photovoltaic energy in Turkey and life cycle techno-economic analysis of a grid-connected photovoltaic-house", *Renewable & Sustainable Energy Review*, in press, 2005
- (20) IEA(International Energy Agency) "Environmental Aspects of PV Power Systems", Report on the IEA PVPS Task 1 Workshop, Utrecht, 1997
- (21) R. Battisti and A. Corrado, "Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology", *Energy*, Vol.30, pp.952-967, 2005
- (22) 박수역, 이덕기, "미래에너지 시장트렌드", *에경M&B*, 2006
- (23) 부경진, "태양광발전 시스템의 경제성 분석", *에너지경제연구원*, 2006
- (24) 산업자원부, "지속가능발전을 위한 에너지 정책 방향", 2004

최 봉 하



2003년 포항공과대학교 신소재공학과 공학사
2003년 포항공과대학교 산업공학과 공학사
2006년 포항공과대학교 산업경영공학과 공학석사

현재 한국에너지기술연구원 에너지정책연구부 연구원
(E-mail ; bigunit@kier.re.kr)

박 수 익



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

현재 한국에너지기술연구원 에너지정책연구부 책임연구원
(E-mail ; supark@kier.re.kr)

이 덕 기



2002년 충북대학교 경영학과 경영학박사

현재 한국에너지기술연구원 에너지정책연구부 책임연구원
(E-mail ; deokki@kier.re.kr)

김 석 기



1988년 대전산업대 전기공학과 공학사
1995년 충남대학교 전기공학과 공학석사
2002년 충남대학교 전기공학과 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 태양전지연구센터 선임연구원
(E-mail ; skkim@kier.re.kr)

송 진 수



1971년 고려대학교 전기공학과 공학사
1976년 고려대학교 전기 및 전자재료과 공학석사
1986년 고려대학교 전기 및 전자재료과 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 태양전지연구센터 책임연구원
(E-mail ; jsong@kier.re.kr)