

# 한국 태양광발전사업의 에너지균등화비용(LCOE) 추정: 재무적투자자 참여사업을 대상으로

김영경\*, 장병만\*\*

## Estimation of LCOE for Korean PV Projects : For the Ones that Financial Investors Participated in

Youngkyung Kim\* and Byungman Chang\*\*

### Abstract

LCOE of 11 Korean PV projects, total capacity of 44 MW, were calculated for each project being larger than 1 MW respectively. 9 out of 11 projects were constructed in 2008 under FIT scheme revealed that average LCOE is 600 Korean Won per kilowatt-hour and it becomes reduced to 348 Korean Won per kilowatt-hour for 2 projects that are constructed under RPS scheme in 2012. During the period between 2008 and 2012, installation cost per megawatt became 55% of 2008 value with operation and maintenance cost lowered to 80% while LCOE became only 58% due to reduced project size and lower irradiation for later projects. However, it is found that the ratio of LCOE / unit installation cost looks relatively constant, so that it can be used as an auxiliary parameter to gauge learning effect of BOS portion of a PV project.

### Key words

Photovoltaic project, PV project, Solar project(태양광발전사업), LCOE, Levelized cost of energy(에너지균등화비용), Solar fund(태양광펀드), Financial investor(재무적 투자자)

(접수일 2012. 6. 25, 수정일 2012. 8. 21, 게재확정일 2012. 8. 21)

\* 서울과학기술대 박사과정 (Director, Taekwang Power Holdings)

■ E-mail : mykairos@naver.com ■ Tel : 010-9096-0674

\*\* 서울과학기술대 산업시스템공학과 교수 (Seoul National University of Science & Technology)

■ E-mail : bmc@snut.ac.kr ■ Tel : (02)970-6467

## 1. 서론

### 1.1 연구목적 및 범위

LCOE<sup>1)</sup>는 설치비용, 운영비용 및 금융비용의 총현재가치

를 분석 전체 기간 동안 생산되는 전력량을 동일하게 할인하여 나눈 값이다. 발전차액지원제도 적용을 받는 기간과 RPS 제도하에서 건설된 사업의 LCOE를 분석 비교하여 추이를

1) 균등화비용, 에너지균등화원가 등 여러 표현이 사용되나 본 논문에서는 LCOE (Levelized cost of energy)로 한다.

고찰하고, 국내 태양광발전사업에서 학습효과가 실현된 형태를 살펴보고자 한다.

연기금, 보험사와 같은 재무투자자들은 비교적 일관되고 전문화된 사업성 분석에 따라 투자 및 대출 여부를 결정하는 자본시장의 주요 투자자로서, 이들이 참여한 태양광사업의 경우 금융시장의 기대수익률을 반영했다고 볼 수 있고, 총투자비, 운영비, 발전량 등의 데이터도 신뢰도가 높다고 할 수 있다. 따라서, 국내 태양광발전사업의 LCOE 산정을 위해서 재무적투자자가 참여한 1MW 이상 규모의 사업들을 대상으로 실증분석 하기로 한다.

## 1.2 선행연구

(황재룡, 2012)은 LCOE에 대한 장단점과 유의점에 대해 정리하면서, LCOE 계산에서 주된 가정 요소는 할인율(discount rate), 평균 시스템가격, 재원 조달 방안, 평균 시스템 수명, 에너지 생산의 경년 열화 등 다양하며, 가변성 높은 가정에 근거하고 있어 결과값 절대치에 대한 신뢰도 보다는 다양한 에너지기술의 상대적 비교를 위한 도구로서의 활용도에 의의를 부여하고 있다. (Easan Drury; Paul Denholm; Robert Margolis / NREL, 2011)는 미국신재생에너지연구소(NREL : National Renewable Energy Laboratory)의 기술보고서를 통해 주택, 상업용, 대형발전용 태양광발전사업에 대한 사업성 평가기법들인 순현재가치, 비용편익분석, 내부수익률법 등과 함께 LCOE 방법의 장단점을 정리하고 있다.

(최봉하, 박수익, 이덕기, 김석기, 송진수, 2006)는 중국 티베트에 위치한 태양광발전단지에 대해 시스템설치 및 운영과 유지보수비용과 연간발전량, 시스템 수명 20년, 할인율 7% 등을 고려한 발전단가를 구한 바 있는데, 누적생산량에 따른 비용절감을 감안하여 2017년까지의 예상 PV시스템 가격을 추정하기 위해 1995년-2005년 기간 동안의 국내 PV시스템의 누적 PV설비용량에 따른 학습률 21%를 적용한 바 있다. (김중영 & 김영국, 2008)은 실물옵션기법을 이용하여 발전차액지원금액을 계산하는 모델을 개발하고, 기존 균등화발전원가법을 이용한 연구와 비교한 바 있고, (박수익 & 이덕기, 2005)는 0.10\$/kWh의 전력생산비용에 도달할 경우 기존 화력발전에 대해서도 태양광발전이 경쟁력을 지닐 수 있을 것으로 보았다. 해외에서는 풍력발전의 기술요인 및 프로

젝트파이낸싱 조건을 감안한 LCOE를 비교 산정한 (Karlynn Cory & Paul Schwabe, 2009)의 연구와 같이 발전사업으로서 신재생분야의 총체적 원가경쟁력으로 LCOE 수준과 추이를 실증 분석한 사례들이 다수 있으나, 국내에서는 태양전지와 같이 핵심 품목에 대해 학습곡선 효과를 적용하여 제조과정의 생산성 향상에 대해 분석한 연구들이 다수로서 발전사업 관점에서 신재생사업의 총체적 원가경쟁력을 고찰한 연구는 LCOE를 이용하여 태양광발전에 대한 발전차액지원단가를 제시한 한국전기연구원의 연구와 이를 재검토했던 (김은일 & 김건훈, 2008)의 정도가 있으나, RPS제도 도입 이후를 포함하여 재무투자자가 참여한 사업을 대상으로 실증적인 분석을 수행한 것은 없는 것으로 이해된다.

## 2. LCOE 장단점 및 해외사례

### 2.1 LCOE의 의미

신기술분야 시장조사기관인 (Lux Research, Inc.)는 (The Slow Dawn of Grid Parity, 2009)에서 태양광발전이 소수의 선구자들이 시험적으로 설치하던 단계에서 본격적인 발전 시설로서 자본재적 성격을 지니게 됨에 따라 투자자 또는 정책당국 입장에서 여타 전력생산시스템과 대비한 상대적 경쟁력을 분석하기 위한 지표로서 LCOE의 의미를 부여하고 있다. 이는 LCOE가 소비자들에게 보다 이해하기 좋은 전기생산비용 비교지표이며, 전력생산기업 입장에서는 생산된 전력의 가격경쟁력을 판단할 수 있는 투자사결정의 도구로서 투자자 입장에서 여타 투자가능자산과 비교하여 태양광분야에 대한 사업성을 손쉽게 가늠할 수 있게 하기 때문이다.

LCOE는 총비용의 순현재가치를 동일하게 할인된 총발전량으로 나눈 것으로, 총비용은 모듈, BOS (Balance of System), 설치비용, 유지보수 비용 및 자본비용이 포함되고 이를 현재가치로 전환하기 위해 적절한 할인율을 적용하되, 송배전비용과 탄소배출 등과 같은 외부효과(externality)로 인한 비용은 포함하지 않는다. 총비용을 현재가치화 하는 것에 추가하여 발전량도 동일하게 할인하는 것은 운영기간 중 대수선비용과 같은 자본적 지출이 있어야 계획된 전력량이 적기에 생산되며, 기술적 복잡도가 높은 사업은 운영기간 중

전력생산이 중단될 확률도 높아 해당시스템의 계획 전력생산량을 불확실성을 감안하여 평가해야 하기 때문이다.

연도별로 불규칙하게 발생하는 비용과 발전량을 연도별로 균일하게 증가화하여 경제성을 평가하는 방법으로 연간 발전비용법(Annual Generation Cost Method), 계통비용 분석법(System Cost Analysis Method)과 함께<sup>2)</sup> LCOE 방법이 이용되고 있다. 베트남의 민자발전 화력발전사업 경우에도 설비투자 및 고정비 성격의 대수선비와 같은 고정비용은 용량요금으로, 연료비 및 변동비 성격의 유지보수비용은 에너지요금 형태로 보전하여 가중평균자본조달비용을 가산하여 지급하는데, 각 연도별로 달라지는 요금수준을 대표하는 균등화요금(Levelized tariff)를 산정하여 적용하고 있다.

LCOE는 제반 경제성 평가기법 중 소비자, 투자자, 사업자 등 태양광산업의 다양한 이해당사자가 공통으로 이용하기 편리한 지표이며, 화력발전에 대한 상대적 경쟁력 수준을 가늠할 수 있는 도구이기도 하다. (황재룡, 2012)이 지적한 바와 같이 LCOE는 할인율과 입력변수가 매우 가변적일 수 있는 약점이 있으나, 다양한 시나리오의 민감도분석을 통해 이를 보완 가능하며, 태양광산업 발전방안 수립을 위해 LCOE 분석을 통해 산업경쟁력을 판단할 수도 있다.

## 2.2 태양광부문 LCOE 활용 양태

미국신재생에너지연구소인 NREL은 정기적으로 설문조사 등을 통해 사업규모에 따른 LCOE 추이를 조사하여 설치비용과 대비 제공하고 있다. LCOE는 총투자비용 외 발전량 수준이 주요 인자로서 일사량, 설치지역 및 형태[지상 또는 건물지붕, 트랙터 사용여부 등]에 따라 상이할 수 있어 사업규모만으로 구분하는 것은 한계가 있고, 유가 상승, 금융위기에 따른 목표수익률 상승 등의 요인으로 시스템 비용의 지속적인 하락추세와는 달리 NREL이 조사한 미국태양광발전의 사례와 같이 오히려 올라가기도 하는 모습도 보이고 있다.

글로벌 태양광 기업들은 대상시장 또는 지역별로 평균적인 LCOE와 비교하여 자신들의 LCOE수준 및 지속적인 개선을 위한 기술혁신 로드맵으로 LCOE를 활용하고 있다.

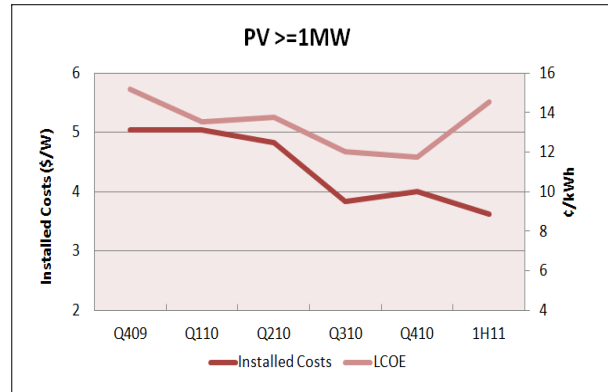


Fig. 1 1MW 이상 규모 미국 태양광발전 LCOE 및 설치단가추이 [NREL]

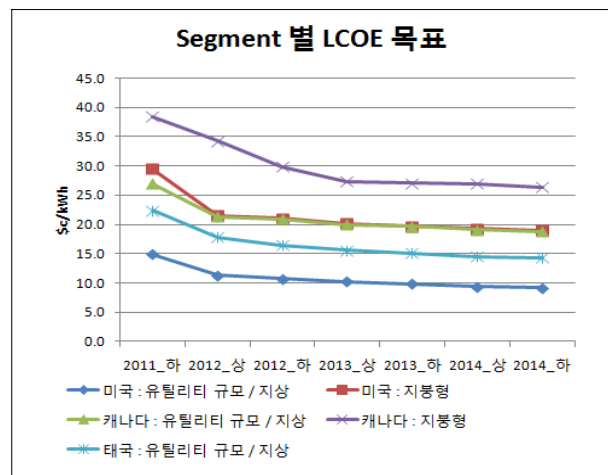


Fig. 2 글로벌 태양광기업의 LCOE 관리 사례 [2012.5월 기준 미래 전망치]

## 3. 국내태양광발전사업 LCOE 분석

### 3.1 분석대상사업

2008.1부터 2012.4까지 국내에서 건설 준공된 태양광발전사업 중 1MW 이상으로 프로젝트 파이낸싱을 통해 건설자금이 조달되었거나, 준공 후 재무적투자자가 직접 또는 태양광펀드를 조성하여 투자한 11개 사업을 대상으로 한다<sup>3)</sup>.

3) 어윤석(2010)은 에너지관리공단 내부자료를 활용하여 2008년 발전 중인 119개 사업을 대상으로 단위투자비 당 발전량을 조사한 바 있다. 이는 LCOE의 역수와 유사한 개념이나, LCOE와 달리 할인율이 반영되지는 않았다.

2) 한진 경제연구소, 발전원가와 전원개발계획 II

Table 1. 분석대상사업 개요

사업명	A	B	C	D	E	F	G	H	I	평균1 A-G	평균2 H-I	평2/평1
사업규모[MW]	3.0	1.5	6.0	1.0	1.5	3.0	24.0	1.0	3.0	5.7	2.0	35%
총투자비(억원)	223	124	414	74	110	241	2000	47	110	455	79	17%
최초년도 연간운영비용(백만원)	165	122	412	67	82	170	430	65	80	207	73	35%
최초년도 1일 발전시간	3.30	3.50	3.59	3.60	3.80	3.80	4.05	3.80	3.30	3.7	3.6	97%
준공년도 [년, 월]	2008.1	2008.03	2008.05	2008.06	2008.08	2008.09	2008.11	2012.03	2012.4	n/a	n/a	n/a

이 중 2008년5월에 준공된 3개 사업은 투자비, 사업규모 및 추정 발전량을 사업규모로 가중 평균한 단일사업으로 하여 분석하였다. 분석기간은 20년으로 하고, 25년, 30년의 운영기간에 대한 LCOE를 구해서, 시스템 수명기간에 따른 LCOE 추이도 함께 살펴본다.

### 3.2 주요가정 및 고려사항

(김은일 & 김건훈, 2008)은 타인자본에 대한 법인세 절감 효과를 반영하여 자기자본 기대수익률 관점에서 LCOE를 분석한 바 있다. 이는 사업비를 자체조달하는 30kW 이하의 소규모 사업에는 타당할 방법이나, 1MW 이상 사업의 경우 자기자본 외 타인자본 조달을 전제로 한 자금계획이 사업계획의 기본 구도로서 가중평균자본비용이 투자자의 기대수익률 하한선으로 적용되는 할인율이 되는 바, 사업규모에 따른 산정절차 차이에 유의해야 한다.

신뢰성 있는 LCOE를 산정하기 위해서는 총사업비용, 발전량 및 운영비용의 정확도가 중요하다. 이를 위해 Table 1의 사업들에 투자한 태양광펀드를 운용하는 자산운용기관에서 수집한 자료를 기초로 총사업비 및 운영비용을 산정하였고, 개별사업에 따라 다소 상이하나 태양광사업에 대해 통상 태양광펀드를 운용하는 자산운용기관의 수수료를 포함한 사업 수익률 기대치가 7%~8% 수준으로 형성된 점을 감안하여 분석을 위한 할인율은 7.5%를 적용하였다<sup>4)</sup>.

운영비용은 매년 3% 물가상승율을 적용하였고, 매년 0.5%의 발전량 감소를 가정하였다. 분석대상사업의 총투자비, 운영비, 운영 최초년도 발전량 및 2008년 준공사업 9건과 2012

4) 재무투자들은 사업전체를 인수하는 형태로 투자 및 대출을 함께 실행하고, 최대한 부채비용을 높여 이자비용에 대한 세액절감을 추구하므로, 법인세 절감효과는 이미 반영되어 있다.

년 건설사업 2건 각 그룹별 평균치는 Table 1과 같다.

LCOE 산정의 주요 오차는 다음과 같은 요인에 의해 발생한다.

- ① 총비용 산정의 부정확성 : 사업규모 및 개별사업 시행 시점의 금융여건, 사업시행자의 신용도 등에 따라 자기자본 비율이 상이하고, 담보대출 또는 프로젝트 파이낸싱 대출 등 타인자본 조달형태 및 부대비용도 상이하며, 운영비용도 사업규모, 운영자와 사업주의 관계 등에 따라 차이 발생
- ② 적용할인율의 부정확성 : 개별사업에 대한 가중평균자본비용이 총비용을 현재가치로 산정하기 위한 할인율이 되나, 사업자의 신용도, 사업시점 등에 따라 차이 발생. 사업자 관점에서 자기자본에 대한 기대수익률을 할인율로 사용하면 운영기간 중 발생하는 전력량을 높게 할인하므로 LCOE가 높아지는 효과가 발생
- ③ 총발전량 추정의 부정확성 : 국내 태양광사업의 경우 사업부지에서 별도로 측정할 일사량 자료 대신 인근 기상관측소의 일사량 자료에 기초하여 발전량을 추정하는 것이 관행이며, 태양전지 특성, 시스템 구성, 인버터 특성 등에 따라 발전량 편차 발생

### 3.3 분석결과

운영기간 20년을 기준으로 할 때 발전차액지원제도가 적용 2008년에 건설된 A-G사업의 평균 LCOE는 600원/kWh, RPS 제도가 시행된 이후인 2012년에 준공된 2개 사업은 평균 348원/kWh으로 계산되었다. 2012년에 건설된 I사업을 기획했던 시점에서 REC 매매가격 220원/kWh, 계통한계가격 120원/kWh를 가정하고 사업 준비를 했던 사례가 있는 바, 산정된 LCOE는 RPS입찰 결과 및 2012년도 시장상황에 부합하는 것으로

Table 2. 분석결과 요약

사업명	A	B	C	D	E	F	G	H	I	평균1 A-G	평균2 H-I	평2/평1
LCOE_20년 (원/kWh)	643	695	565	599	551	601	549	381	314	600	348	58%
LCOE_25년 (원/kWh)	599	650	529	560	514	560	507	359	294	560	326	58%
LCOE_30년 (원/kWh)	574	625	509	537	493	536	483	346	282	537	314	59%
MW당 1년 운영비 [백만원/MW]	55.0	81.3	68.7	67.0	54.7	56.7	17.9	65.0	26.7	57.3	45.8	80%
MW당 투자비 [억원/MW]	74	83	69	74	73	80	83	47	37	77	42	55%
LCOE_20 * 10 / MW당 투자비	86.5	84.0	81.9	80.9	75.2	74.8	65.9	81.1	85.7	78.4	83.4	106%
누적규모 [MW]	3.0	4.5	10.5	11.5	13.0	16.0	40.0	41.0	44.0	n/a	n/a	n/a
비고	FIT 기간						RPS 기간			n/a	n/a	n/a

판단되며, 2008년도 발전차액지원제도의 태양광지원 단가인 677.38원/kWh도 비교적 적정했던 것으로 이해된다.

- ① 운영기간을 20년, 25년, 30년으로 하여 LCOE를 산정한 바, 시스템 내구성이 증가하여 운영기간 20년 대비 5년 증가시 6%, 10년 증가시 11% 정도 감소되는 것으로 분석되어 태양전지의 생산비용, 효율 외 시스템 전반의 내구성도 중요한 인자임이 확인되었다.
- ② 2012년 분석대상사업의 MW당 설치비용은 2008년 대비 55% 수준이며, 운영비는 80%수준으로 낮아졌으나 LCOE는 58%로 설치비용 감소 수준에 약간 미달된다. 이는 신규사업부지의 일사량이 2008년 사업들 대비 3% 정도 열위에 있고, 개별사업규모 감소(설치용량 감소 \* 투자비용감소)로 인해 규모의 경제효과 감소에 의한 것으로 생각된다.
- ③ 2008년에 건설된 9개 사업의 경우, MW당 총투자비는 2008년 1년 동안 큰 변화가 없었으나, LCOE/MW당 투자비 비율 자료를 대상으로 한 추세분석에서는 선형적인 추이가 확인되었다<sup>5)</sup>. 그러나, 이 기간 동안의 단위용량당 설치비용에서는 선형감소 추세가 없는 바, 2008년도의 MW당 투자비에 대비한 LCOE 감소추세는 발전차액지원제도의 적용 마감시한이 임박했던 상황에서 일사량이 우수한 대형사업들이 하반기에 건설되어 규모의 경제효과를 보였기 때문으로 생각된다. 따라서 LCOE / MW당 설치비용은 비교적 일정한 범위의 값으로 보이며, 태양광 모듈을 제외한 개발, 건설, 운영 및 자금조달과 같은 요인들의 학습효과를 추정하

는 지표로 활용할 수 있을 것이다.

- ④ 2008년과 2012년 사업을 비교할 때 LCOE의 감소가 확연하게 나타나나, 학습효과를 추정하기에는 샘플 크기가 충분하지 않다. RPS제도하에서도 시장경쟁을 통해 비용절감, 우수한 사업부지 발굴이 이루어지면 2008년과 같이 LCOE 감소가 가능할 것이다.

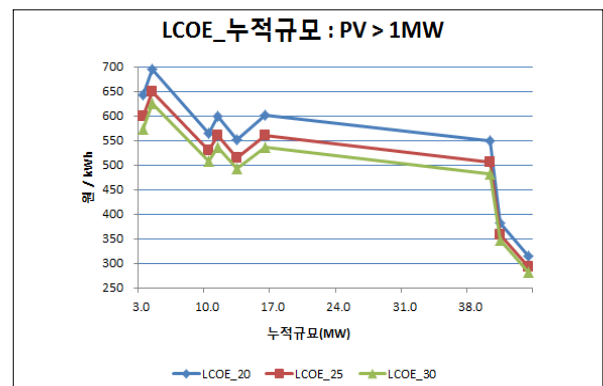


Fig. 3 LCOE 추이 분석결과

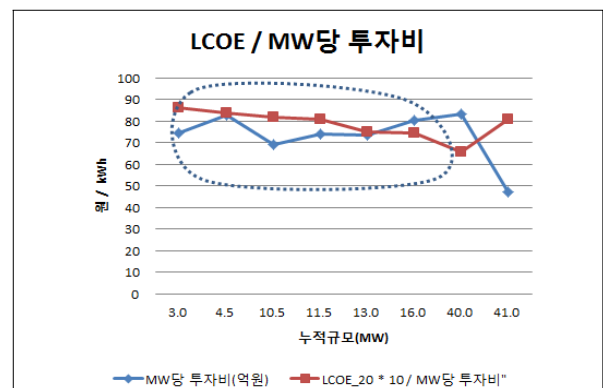


Fig. 4 단위 규모 설치비용 대비 LCOE 비율

5) Fig. 4 그래프의 점선 부분.

## 4. 결론 및 한계

### 4.1 결론

- ① 재무투자자들이 참여한 1MW 규모 이상의 태양광발전 사업 11건, 44MW 규모의 사업에 대해 LCOE를 산정하였다.
- ② 2008년에 건설된 9개 사업 평균 LCOE는 600원/kWh, RPS제도가 시행된 이후인 2012년에 준공된 2개 사업은 평균 348원/kWh으로 산정되었다.
- ③ 2012년 분석대상사업의 MW당 설치비용은 2008년 대비 55% 수준이며, 운영비는 80%수준으로 낮아졌으나 LCOE는 58%로 설치비용 감소 수준에 약간 미달되게 나타났다.
- ④ NREL이 조사한 미국 사례와 달리 한국의 경우는 LCOE와 단위 규모당 설치비용 추이가 유사성이 높게 나타났다.
- ⑤ 산정방식, 기관에 따라 LCOE 결과치는 상이할 수 있으나 태양광발전이 자생적인 원가경쟁력을 갖출 수 있도록 NREL과 같이 일정한 방식으로 정기적으로 조사하고 LCOE / MW당 투자비와 같은 보조지표들을 개발하여 추이를 고찰할 필요가 있다.

### 4.2 한계

- ① LCOE 산정기간 중 FIT에서 RPS로 제도변경이 된 점이 고려되지 않았다.
- ② 분석대상 사업의 조사대상 샘플 개수가 충분하지 않고, 자료 수집의 한계로 인해 재무투자자들이 본격적으로 태양광사업에 참여한 기간에 한정되었다.

## 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

### References

- [1] 김은일, 김건훈, 2008, 신·재생에너지원 발전전력 차액지원을 위한 현행 기준가격의 재산정. “한국 태양에너지학회 학술대회 논문집”, pp. 281-286.
- [2] 김중영, 김영국, 2008, 실물옵션모형을 활용한 부동산 개발 가치 평가. “한국감정평가학회지 제7권 제2호(통권 제10호)”, pp. 1-18.
- [3] 박수역, 이덕기, 2005, 지속가능한 태양광발전시스템의 경제성 분석. “한국신재생에너지학회”, Vol. 1, No. 3, pp. 35-41.
- [4] 어윤석, 2010, 국내태양광보급사업의 평가 : 발전차액지원제도를 기준으로, 아주대 에너지시스템학부 석사논문
- [5] 최봉하, 박수역, 이덕기, 김석기, 송진수, 2006, Sunbelt 지역의 태양광발전 경제성분석. “신재생에너지학회.”
- [6] 황재룡, 2012, “태양광발전의 균등화 비용.” 과학기술정보연구원.
- [7] 한국전력공사 경제연구소, “발전원가와 전원개발계획 II, 전력경제론(38)”, 월간전기기술 2000-1, pp. 91-96.
- [8] Easan Drury; Paul Denholm; Robert Margolis / NREL. 2011, “The Impact of Different Economic Performance Metrics on the Perceived Value of Solar Photovoltaics : Technical Report TP-6A20-52197.” NREL.
- [9] Lux Research, Inc. 2009, “The Slow Dawn of Grid Parity.”
- [10] Karlynn Cory, Paul Schwabe / NREL. 2009, “Wind Levelized Cost of Energy: A Comparison of Technical and Financing Input Variables”, NREL.

### 김 영 경



1990년 서울대학교 기계공학과 공학사  
1999년 하와이대학교 경영학과 석사 (MBA)

현재 서울과학기술대학교 박사과정 / 태광파워홀딩스 재무팀 이사  
(E-mail : mykairos@naver.com)

### 장 병 만



1974년 서울대학교 산업공학 공학사  
1984년 서울대학교 산업공학 공학석사  
1989년 서울대학교 산업공학 공학박사

현재 서울과학기술대학교 산업정보시스템공학과 교수  
(E-mail : bmc@seoultech.ac.kr)