

학습곡선 모형을 이용한 신재생에너지 원가분석 기법

박민혁, 이재걸, 이윤경, 김정주

한국전력공사

A Learning Curve Model, Applied to Cost Analysis of Developing Renewable Energy in Korea

Park Min Hyug, Lee Jae Gil, Lee Yun Kyeong, Kim Jung Ju

Korea Electric Power Corporation

1. 서론

학습곡선은 일정한 제품을 생산하는 과정에서 동일한 작업을 반복함으로써 제품 단위당 노동투입량이 일정한 비율로 감소하는 경향을 나타내는 것이다. 선행연구들에 의하면 학습효과는 제조뿐만 아니라 생산 지원부문이나 서비스부문 엔지니어링 건축 금융 등 노동투입이 있는 곳에서는 어디든지 작용하고 있음을 볼 수 있다. 비용감소를 유발하는 원인은 노동의 효율성, 전문화, 방법의 개선 등 학습에 의한 감소, 신소재개발 새로운 기법개발 등과 같은 혁신적 연구개발, 연구소와 산업 고객과 정책입안자 등을 연계한 효율적 지식망의 구축, 생산규모의 증대 등이 있으며 많은 경우 이러한 요소들이 복합적으로 작용해 원가 절감이 이루어지고, 연구개발은 주로 초기 원가절감에 많은 영향을 미치며 시장이 성숙해 감에 따라 학습에 의한 원가절감이 영향을 미치게 되는 것이 일반적이다. 본 연구는 신재생에너지 기술개발에 있어서 학습효과현상에 의한 원가 절감 비율이 어느 정도인지 국내 풍력과 태양광의 발전량을 바탕으로 분석하였다.

2. 모형 이론적 배경

2.1 제품의 주기설

제품의 생명주기는 시장에 처음 소개되고부터 퇴장할 때까지 어떤 재화에 대한 판매곡선을 나타낸다. 신제품은 흔히 4가지 단계로 분류하는데 1기는 시장 발달기 또는 도입기라 하여 많은 불확실성과 위험이 도사리고 있다. 2기는 시장성장기인데 판매가 가속화되어 3기에 이르러 시장성숙기에 이른다. 성숙기에는 완만한 성장이 있기는 하나 판매량은 오르지 않게 되며 4기에 이르러 쇠퇴하게 된다. 흔히 생산량증가, 가격하락, 신규기업진입, 시장집중도 하락 등이 신규시장에서 관찰될 수 있는 상황인데 학습효과에 의한 비용 절감을 적용할 수 있다. 이러한 제품의 주기설을 반영하여 Colpier & Cornland (2002)는 천연가스 발전소의 기술 진화와 관련하여 세 단계의 학습과정을 제시하였으며 Grubler et al. (1999)는 NEMS 모델에서 유사하게 세단계의 학습 과정을 구분하였다. 즉, 성숙기술은 시장에서 포화되어 있으며 학습으로 인해 비용 절감 가능성이 없는 기술이고 성장기술은 틈새시장에서 상업화를 하고 학습에 의해 많은 비용 절감이 예상되는 기술이며 기초기술은 시장점유가 없으며 상업화에 이르지 않는으나 학습에 의한 비용 절감 효과가 매우 큰 기술로 볼 수 있으며 본 연구에서는 신재생발전원을 성장기술의 하나로 분류 하였다.

<표 1> 기술단계별 학습계수

기술구분	학습진보율	기술사례
성숙기술	0%	가스터빈, 복합화력, 전통적 석탄화력
성장기술	10-40%	바이오매스, 석탄복합, 풍력
기초기술	>50%	태양열, 태양광

2.2 학습곡선 개념

다품종 소량생산에서 동종 작업이 계속 반복되어지는 경우 작업시간은 일정하지만 새로운 작업이

처음 시작되는 경우 처음에는 속달되지 않았기 때문에 시간이 오래 걸리고 몇 번 반복한 후에는 속달되어 시간이 빠르게 된다. 이는 속련의 향상에 의하여 나타나게 되고 따라서 시간 절감에 의한 원가절감을 가져오게 된다. 이와 같은 현상을 포착한 도구를 학습곡선이라 하는데 생산량이 두 배가 될 때마다 생산에 소요되는 누적평균 생산 시간이 20% 줄어들 경우 80%의 학습곡선이 작용한다고 하며 식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$CN = a * N^b \quad (1)$$

N : 누적생산량
CN : N만큼 생산했을 때 생산물 1단위당
누적평균 생산단가
a : 첫 번째 생산물의 단가
b : 실수로 표현한 학습계수 (-1 ≤ b ≤ 0)

한편 학습탄성치 b를 추정하기 위해 양변에 대수를 취하여 선형으로 표시하면 다음과 같다.

$$\ln CN = \ln a + b \ln N \quad (2)$$

일반적으로 정상적인 학습이 일어난다면 b는 0보다 적은 값을 나타낸다. 학습 탄성치 자체로는 경험이나 학습에 의한 비용 저하의 정도를 파악하기 어렵기 때문에 이를 반영하는 지표로 학습율 지표를 많이 사용하게 되는데 학습율 d는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$d = 2^b \quad (3)$$

여기서 학습율 d가 의미하는 것은 누적생산량이 2배되는 시점에서 제품단위당 소요되는 실질 단가는 원래 단가의 d%정도 된다는 것을 의미한다.

<표 2> 학습율과 학습계수(탄성치)의 관계

학습율 d(%)	학습계수 (b)
95	-0.074001
90	-0.152003
85	-0.234465
80	-0.321928
75	-0.415037
70	-0.514573
65	-0.621488
60	-0.736966
55	-0.862496

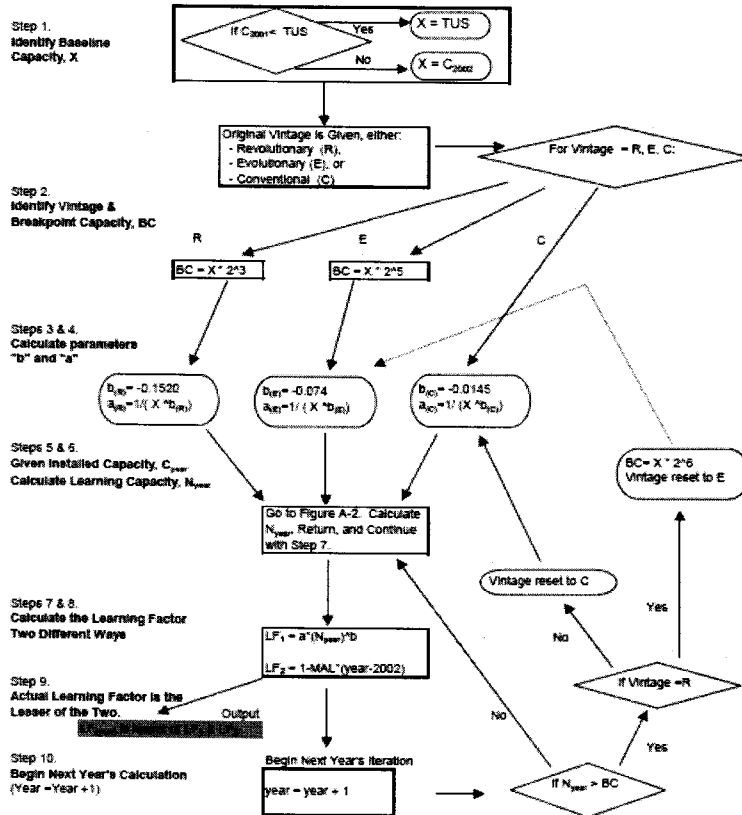
2-3 규모의 경제와 학습효과

규모의 경제는 현재생산량과 그 기간의 평균비용과의 관계를 나타낸 것이고 학습효과는 축적된 경험, 즉, 누적생산량과 해당 기간의 평균 비용과의 관계를 나타낸다는 것에서 차이점이 있다. 따라서 학습효과는 일종의 동적인 규모의 경제로 해석될 수 있다. 학습효과가 규모의 경제에 비해 상대적으로 크게 작용하는 경우 기존기업의 현재생산량 확대는 다음기간의 생산 비용을 감소시켜 신규기업에 비해 비용상의 잇점이 있으므로 신규기업의 시장진입은 어려워지게 된다. 반대로 규모의 경제가 강하게 나타나는 경우에는 신규기업도 해당 시점에 생산량을 증기시키면 비용의 절감을 달성할 수 있기 때문에 진입은 상대적으로 용이하다고 볼 수 있다. 이와 같이 두 효과의 상대적 크기에 따라 기업의 최적 생산량 수준, 진입장벽의 정도가 달라지게 되고 이에 따라 가격절정도 달라지므로 양자의 상대적 비중을 규명하는 것은 기업전략과 시장의 성과를 분석하는데 매우 중요하다. 학습곡선을 유발하는 중요 요인은 경험혁신이다. 최초 생산단가가 큰 경우 학습진보율은 빠르다고 알려져 있는데 이는 제조 과정이 복잡할 수록 학습현상이 크게 작용한다는 것을 시사한다.

3. 모형의 적용

3.1 적용 방법론

학습곡선의 작용하는지는 모수 a와 b의 값을 도출하는 것이 중요하다. 모수를 추정하려면 생산량 및 투입요소 소요량에 관한 자료를 수집해야 하는데 이러한 정보는 유사시스템의 과거자료 동종시스템의 과거자료 또는 국가기관이나 협회에서 발표되는 자료를 참고해야 한다. 본 연구에서는 학습효과에 의한 원가 절감율을 미국 NEMS모형에서 사용하는 알고리즘을 참고하였으며 2002년 국내 발전량을 베이스라인으로 설정하였다. 학습효과에 의한 원가절감 분석과정은 그림1과 같다.



<그림 1> 학습곡선 모형이용 원가 절감을 추정 과정

본 연구에서 사용한 기술분류 기준은 크게 혁신기술, 진화기술, 전통기술의 세 가지로 나눌 수 있는데 기술별 전환점은 혁신기술이 2 * 3회의 용량 확대가 있는 시점에서 진화기술로 전환되고 진화기술은 2 * 5회의 용량 확대가 있는 시점에서 전통기술로 전환 되어 결국 혁신 기술이 전통 기술로 전환하기 위하여 용량 확대 규모는 $N = X * 2^8$ 시점이 된다. 이때 학습율과 학습계수의 관계는 표3과 같다.

<표 3> 성장기술의 학습율과 학습계수

구 분	학습율(LR= 2^b)	학습계수(b)
혁신기술	10%	-0.152
진화기술	5%	-0.074
전통기술	1%	-0.0145

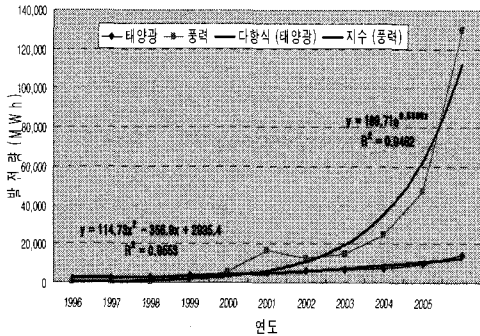
3-2 베이스의 설정

베이스의 설정을 위하여 연도별 신재생에너지 발전량을 참고 하였으며 표4와 같다.

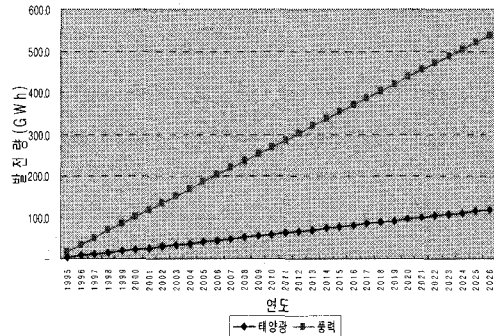
<표 4> 연도별 신재생에너지 발전비율(MWh)

년 도	태양광	바이오	풍력	연료전지	신재생에너지 공급비중(%)
1995	2,228	0	432	0	0.05
1996	2,556	0	348	0	0.04
1997	3,100	0	808	0	0.04
1998	3,796	0	1,475	0	0.05
1999	4,572	0	5,839	0	0.05
2000	5,284	0	16,685	0	0.04
2001	6,184	0	12,590	0	0.04
2002	7,044	70,783	14,881	0	0.07
2003	7,752	100,193	24,865	0	1.56
2004	9,872	146,927	47,442	0	1.33
2005	14,399	129,595	129,888	2,103	1.08

신재생에너지원 중에서 풍력과 태양광을 선택하여 발전실적 추세를 식으로 표현하면 그림 2와 같으며 이러한 추세를 반영하여 베이스 용량을 가정한 발전량 규모는 그림 3과 같다.



<그림 2> 연도별 신재생에너지 발전량 추세



<그림 3> 신재생에너지 발전량 가정

3-3 모의결과

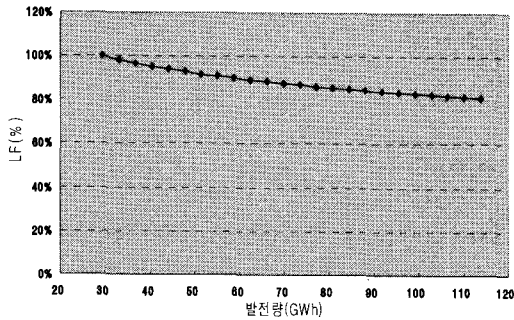
태양광 발전의 기술분류는 혁신적기술로 하였는데 모의 결과 태양광발전에 의한 발전량이 235GWh가 되어야 혁신기술에서 진화기술로 전환 되어지는 것으로 나타나, 상용화를 위하여 충분한 시간이 소요되어야 함을 알 수 있다.

기술	태양광	C_bese	29
vintage	Revolutionary	b	-0.152
MAL per year	0.0087	a	1.672
Typical Unit Size	1GWh	BC	235 GWh

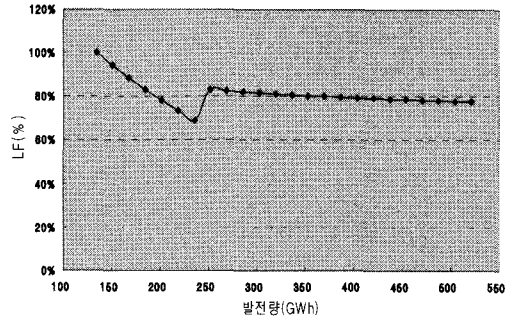
반면 풍력발전의 경우 119GWh에 이를 시 혁신기술에서 진화기술로 전환 되어 지는데 이는 풍력발전기술이 상당 부문 상용화에 근접할 수 있는 경쟁력이 있는 기술임을 추정할 수 있다.

기술	풍력	C_bese	15
vintage	Revolutionary	b	-0.152
MAL per year	0.0087	a	1.507
Typical Unit Size	1GWh	BC	119 GWh

회귀분석에 의한 발전량 추정치 및 기술분류 특성에 의한 학습율을 반영한 학습곡선 모형에 의하면 태양광발전의 원가는 2002년 대비 2020년에 81% 수준으로, 풍력발전은 2002년 대비 2020년에 78%에 이르는 것으로 각각 전망 되었다.



<그림 4> 태양광발전 원가 전망



<그림 5> 풍력발전 원가 전망

특히 풍력발전은 혁신기술에서 2008년 이후 진화기술로 전환을 하여 기술개발 및 투자와 함께 큰 폭의 비용절감이 있을 것으로 예측되었다.

<표 5> 모의에 의한 신재생에너지 원가하락 비율 전망

구 분		2002	2010	2015	2020
풍 력	원가비율	100%	82%	80%	78%
	증 감	0%	-18%	-20%	-22%
태 양 광	원가비율	100	90%	86%	81%
	증 감	0%	-10%	-14%	-19%

2004년 국외의 선행 연구에 의하면 기존의 수화력 원자력 기술은 학습효과에 의한 원가절감을 이 한계에 달하였으며 신재생에너지원 중에서 풍력부문은 포화되어진 기술로 보고 있다. 이와 달리 연료전지와 태양광의 경우 원가절감 가능성을 매우 크게 보고 있으며 기술개발의 여지가 많은 분야로 보고 있다. 미국의 경우 분산전원 우대정책에 따라 1970년 후반부터 제도적 지원이 이루어져 왔으며 특히 풍력발전이 신재생에너지 보급확산에 많은 영향을 미친 것을 감안할 때 이제 막 시스템 국산화를 시도하고 있는 국내의 여건과 비교하면 기술수준과 시장여건에 있어서 많은 격차가 존재하고 있음을 알 수 있다.

<표 6> 주요 발전 기술의 원가 하락 전망(미국 2002년 기준)

기술 구분	2005	2010	2015	2020
기존 터빈	0.99	0.98	0.97	0.96
연료전지	0.97	0.73	0.69	0.68
기존 원자력	0.97	0.95	0.95	0.95
수력	0.99	0.98	0.97	0.96
풍력	0.99	0.99	0.99	0.99
태양광	0.77	0.69	0.66	0.64

4. 결 론

본 논문은 학습곡선 모형을 이용해서 원가 하락을 전망에 대하여 미국 NEMS 모델에서 사용하고 있는 방법론을 적용하여 보았다. 엔지니어링 비용의 분석은 설비 건설의 출발점이며 이러한 측면에서 학습에 대한 결과가 비용의 절감에 중요한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 미국의 사례와 달리 국내에서 풍력발전은 개발초기 단계로서 향후 원가인하 가능성이 상대적으로 크며 태양광은 지속적으로 원가인하가 전망되나 상업화를 위한 충분한 시간이 필요함을 알 수 있다. 기업은 기술개발 자본투자 등 시장 점유율 획득을 위한 노력을 통해 생산비용을 줄일 수 있지만 시장 점유율을 획득하기 위해서는 이외에도 광고와 마케팅 비용 같은 것들도 지불해야 하며 나아가 제품의 가격도 낮춰야 한다. 따라서 모형의 적용은 기업이 저 원가에만 의존하여 경쟁할 수 있으며 다른 전략은 없다는 묵시적인 가정을 하고 있지만 시장이 성숙될수록 저 원가 이외의 전략들이 사용될 수 있으므로 학습곡선 모형을 모든 상황에 엄격하게 적용하는 것은 분석의 한계가 있다. 그러함에도 불구하고 학습곡선모형이 시사점을 주는 이유는 조건들이 동일하다면 누적생산량이 높은 기업이 더 낮은 평균 생산비용을 가질 수 있으므로 비록 비용절감을 위해 시장점유율을 증가시키려는 노력이 기업에게 평균 이상의 경제적 성과를 제공해주지 않지만 모든 생산측면에서의 경험은 원가우위의 원천이 될 수 있다는 점에 있다 할 것이며 이러한 관점에서 향후 국내 상황에 적합한 학습율의 산정 등 추가연구가 필요하다.

참고문헌

1. Ibenholt, K., 2002. Explaining learning curves for wind power. *Energy Policy* 30 (13), 1181-1189
2. Klaassen, G., Larsen, K., Miketa, A., Sundqvist, T., 2002. The impact of R&D on innovation for wind energy in Denmark, Germany and in the United Kingdom.
3. Stephane Isoard, Technical change dynamics: evidence from the emerging renewable energy technologies *Energy Economics* 23 2001, 619-636
4. Colpier, U.C. and Cornland D. 2002. The economics of the combined cycle gas turbine - an experience curve analysis. *Energy Policy*. 30(4):309-316, 2002 Mar.
5. Energy Information Administration (EIA) 2002. Model Documentation Report: The Electricity Market Model of the National Energy Modeling Systems. Report#:DOE/EIAM068(2002) Washington D.C. April
6. Grubler, A. N. Nakicenovic, and D. G. Victor, 1999. Dynamics of Energy Technologies and Global Change. *Energy Policy* 27 (1999) 247-280.
7. Etan Gumerman & Chris Marnay, Learning and Cost Reductions for Generating Technologies in the National Energy Modeling System (NEMS) Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory University of California Berkeley, 2004
8. 허영채, 학습곡선이 작용할 때의 경영계획과 통제, 고려대 경영학과
9. 우재식, 학습곡선의 한일 산업간 비교, 생산성논집 제13권 제1호 1999