

학습곡선모형을 이용한 해상풍력발전의 경제성평가 기법

박 민혁¹⁾, 이 재걸²⁾, 김 정주³⁾

Methodology of Valuing Economics of Offshore Wind Power System Using Learning Curve Model

MinHyug Park, JaeGul Lee, JungJu Kim

Key words : Learning Curve(학습곡선), Wind power system (풍력발전시스템), Economic value analysis (비용분석)

Abstract : 환경규제 강화와 화석연료에 대한 대안으로 신/재생에너지에 대한 관심이 고조 되고 있다. 그 중 하나인 풍력발전은 각국마다 풍황 조건과 정책에 의해 다양한 시장을 만들어 내고 있다. 본 연구는 해상풍력발전시스템의 투자 전망에 대하여 기존의 재무적 평가기법에 학습곡선효과를 가미하는 방법론을 제시하고자 하였다. NPV 등의 가치 평가기법이 할인된 현금흐름 분석을 하는 것이라면 이에 더하여 현금의 유출에 있어서 학습율을 반영한 원가를 반영하는 것이 제시하고자 하는 연구 방법론의 핵심이다. 해상풍력발전을 투자자 입장에서 모의 해본 결과 국내 풍력발전은 80% 학습율 수준 정도의 혁신적 개선 없이는 투자 타당성을 찾기 어려우며 이러한 현실적인 문제점을 정책적으로 보완해야 할 수 있는 것이 발전가격을 중심으로 하는 정부의 지원제도임을 제시 하였다.

1. 서 론

풍력발전 기술은 현재 10여개 정도의 선진 제작사의 시장 지배 구조 하에서 성장기에 진입하고 있는 기술로 유럽 및 미국 등 10여 개국에 세계 누적 시설 용량의 약 90% 정도를 차지하고 있는 지역 편중이 심한 기술적 특성을 지니고 있다. 기후변화협약과 에너지안보 측면에서 풍력산업의 시장은 향후 지속적으로 성장할 전망이다. 국내 풍력발전 시스템 개발 국가 기술지도에 따르면 현재 기술자립 및 산업화 구축의 단계로 풍력발전기를 구성하는 주요 설계 및 해석 기술을 확보하여 기반기술의 경쟁력을 높이기 위한 시기로 보고 있다. 국내 풍력발전기 기술 개발은 육상풍력 발전기의 경우 현재 750 kW급 풍력발전기의 개발이 완료되어 실증 및 성능평가가 진행 중이며 1,500 kW급 풍력발전기는 개발 후 실증을 완료하였고 2MW용량의 풍력발전기가 개발 중에 있다. 용량만을 비교해 봤을 경우 선진 유럽 국가와 큰 격차가 있지는 않지만 개발 경험과 핵심 요소 기술력에 있어서는 매우 미흡한 실정이다. 해상풍력발전의 경우 해외에서는 최대 3MW급이 상용화 되어 있으며 현재 3MW이상 6MW 급이 시험 중

이나 국내는 이제 3MW급 풍력발전기 개발에 착수한 상태이다. 본 연구는 해외 해상풍력시스템의 건설비용 사례에서 학습효과현상이 있느냐를 살펴보고 국내 건설에 적용할 경우 학습효과현상에 의한 원가 절감 규모가 어느 정도이며 일반적인 재무분석 방법인 순현재가치(NPV) 방법과 비교하여 어떠한 특징이 있는지 투자자 관점에서 분석 하였다.

2. 모형의 이론적 배경

2.1 제품의 주기설 가정

새로운 산업이나 신제품은 흔히 일정한 구분을 할 수 있는 단계들을 거치는 것으로 알려져 있다. 제품의 생명주기는 시장에 처음 소개되고부터

-
- 1) 전력연구원 전력경영연구소
E-mail : bluekite@kepco.co.kr
Tel : (042)865-7631 Fax : (042)865-7619
 - 2) 전력연구원 전력경영연구소
E-mail : jarlllee@kepco.co.kr
Tel : (042)865-7635 Fax : (042)865-7619
 - 3) 전력연구원 전력경영연구소
E-mail : jjkim@kepco.co.kr
Tel : (042)865-7630 Fax : (042)865-7619

퇴장할 때까지 어떤 재화에 대한 판매 곡선을 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. 기업의 수의 변화율로 구분한 산업의 진화단계에서 제1기와 2기 동안 산출량은 증가하고 가격은 하락하되, 산출량의 증가율은 감소하고 가격 하락율도 감소한다. 제3기 가격하락율과 산출증가율은 변하지 않고 시간이 지나도 일정한 수준을 유지한다.

흔히 생산량증가, 가격하락, 신규기업진입, 시장집중도 하락 등이 신규시장에서 관찰될 수 있는 상황인데 해외 풍력발전산업의 경우 1990년대 전 세계적으로 급속히 성장하였던 신/재생에너지 원으로서 1995년부터 1998년까지 본다면 연간 28%의 성장을 보였으며 현재에도 25%의 고 성장률을 보이고 있는 기술이다. 해외에서 풍력발전 시장을 감안하면 해상풍력발전도 제품주기설에서 설명할 수 있는 여러 단계들 즉, 도입, 성장, 성숙, 쇠퇴 등 일련의 과정을 거치게 된다는 사실을 확인할 수 있으며 따라서 학습효과에 의한 비용 절감을 적용할 수 있다.

2.2 학습곡선 개념

학습곡선은 일정한 제품을 생산하는 과정에서 동일한 작업을 반복함으로써 제품 단위당 투입량이 일정한 비율로 감소하는 경향을 설명하는 것이다. 선행연구들에 의하면 학습효과는 제조뿐만 아니라 생산 지원부문이나 서비스부문 엔지니어링 건축 금융 등 노동투입이 있는 곳에서는 어디든지 작용하고 있음을 볼 수 있다.

생산량이 두 배가 될 때마다 생산에 소요되는 누적평균 생산 시간이 20% 줄어들 때 80%의 학습곡선이 작용한다고 하며 이를 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 학습 진보율

$$(-1 \leq b \leq 0) = \ln(1-LR) / \ln 2$$

학습 탄성치 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. 표1은 학습율과 탄성치의 관계를 나타낸다.

표 1 학습율과 탄성치의 관계

학습율 d(%)	탄성치(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 사례 검토

풍력발전 산업은 주로 풍력발전기 설계, 제작과 풍력 자원 개발, 즉 풍력발전 단지 조성 관련으로서 기계/항공, 전기/전자, 기상, 재료, 토목, 해양 등 광범위한 산업 분야와 연결되어 있다. 풍력발전과 연관되어 가치를 창출해 낼 수 있는 산업의 분야는 상당히 넓은 편이어서 부품 부분이 한 항목으로만 되어 있지만 세분하면 대단히 많은 산업이 포함되어 있는 특징이 있다. 학습효과는 비용측면뿐만 아니라 연구개발투자 생산과정의 혁신 원자재가격 규모의 경제 등이 복합적으로 작용하여 이루어진 결과이며 해상풍력발전시스템의 경우 주된 비용은 터빈제작과 건설비용이고 그 외에 입지선정, 계통연계, 투자계획, 조직운영 등이 비용에 영향을 미친다. 국외 연구 사례를 보면 전 세계 풍력발전 단지의 학습율은 77%에서 85% 사이에 있다고 보고되고 있는데 해상풍력발전의 경우 육상풍력에 비해 늦은 출발을 하였으나 육상풍력과 마찬가지로 학습율을 보일 것으로 전망된다. 해상풍력발전의 학습율이 반영된 것으로 볼 수 있는 해외 건설비용 감소 사례는 표2와 같다.

표 2 해외 해상풍력 건설비용 추이

프로젝트명	건설연도	용량(MW)	건설비용 (백만유로/MW)
Vindeby	1991	4.95	2.1
Tuno Knob	1995	5	2.1
Bockstigen	1997	2.5	1.9
Horns Rev	2003	160	1.9
Nysted	2003	158	1.7

3. 모형의 적용

3.1 적용 방법론

전통적으로 자본적 사업평가는 현금흐름의 현재가치를 구하여 사업의 채택여부를 결정하는 것을 주요 내용으로 하고 있다.

$$NPV = PV(R) - PV(C) \quad (4)$$

이때 $NPV \geq 0$ 이면 사업투자는 채택된다.

하지만 이러한 사업평가 방법은 현금유입이나 현금유출을 어떻게 추정하는지가 명확하지 않다. 이러한 관점에서 출발하여 본 연구에서는 단순화를 위해 고정 제조 간접비 및 일반관리비 판매비 법인세 등의 비용이 없다고 가정한 학습곡선을 이용하여 현금흐름을 예측해 보았다. 즉, 초기에 사업을 채택하면 즉시 F를 투자하게 되며 제품 생산 및 판매는 1기부터 시작하여 모두 말기에 순간적으로 이루어진다고 가정할 경우 다음과 같이 정리할 수 있다.

현금 유입의 현재

$$PV(R) = \sum_{i=1}^n \frac{P \cdot X_i}{(1+k)^i} \quad (5)$$

최초 투자를 포함한 현금유출의 현재

$$PV(C) = F + \sum_{i=1}^n \frac{ca \left[\left(\sum_{j=1}^i X_j \right)^{b+1} - \left(\sum_{j=1}^{i-1} X_j \right)^{b+1} \right] + v \cdot X_i}{(1+k)^i} \quad (6)$$

k : 기업의 기회 수익율

C : 학습곡선이 작용하는 투입요소의 단위당 가격

V : 생산제품 1단위당 투입요소

a : 사업최초 투자금액

b : 학습곡선의 모수

(5)식에서 PX_i 는 I기의 판매액이며 (6)식에서 vX_i 는 학습곡선이 작용하지 않는 투입물의 i기중의 비용을 나타내고 $ca \left[\left(\sum_{j=1}^i X_j \right)^{b+1} - \left(\sum_{j=1}^{i-1} X_j \right)^{b+1} \right]$ 는 I기 중의 학습곡선이 작용하는 투입요소의 비용을 나타낸다.

3.2 기본 가정

학습율을 적용한 투자결과 모의를 위한 기본 가정은 다음과 같다.

- 해상풍력발전시스템의 초기 건설비용

221만원/kW(1유로=1300원 기준)

- X_i : 누적 건설용량
- 발전 단위당 판매 가격 107원/kWh
- T_p : 건설용량 X 8760 X 이용율(40%-60%)
- 연간 총 수입 : 총발전량 X 107.7(원/kWh)
- 할인율 : 9%
- T기 : 누적 건설량이 이전의 2배 시점
- 학습율을 고려하지 않은 T기의 비용현재

$$PV(C) = \sum_{i=0}^T \frac{UC \cdot X_i}{(1+0.09)^i} \quad (7)$$

- 학습율을 고려하지 않은 T기의 수익현재

$$PV(R) = \sum_{i=0}^T \frac{107.7 \cdot T_p}{(1+0.09)^i} \quad (8)$$

3.3 모의 결과 및 시사점

앞서 언급한 기본 가정하에서 이용율을 40%, 50%, 60%로 학습율은 90%, 80%, 70%로 민감도 분석을 하였다. 최초 3MW 설비 건설 이후 매기마다 앞선 T기의 2배 건설용량 누적용량이 증가할 시 어느 T기에 $NPV \geq 0$ 이 되는지 학습율을 적용할 경우와 적용하지 않을 경우로 나누어 비교 분석하였다.

학습율 90%하에서는 해상풍력의 특성 상 높은 투자비용으로 인해 표3과 같이 순 현재가치는 지속적으로 ≤ 0 으로 나타났다.

표 3 90% 학습율 적용 시 NPV 전망(억원)

期	학습곡선 미반영			학습곡선 반영 NPV
	비용	수익	NPV	
1	61	13	-48	-48
3	426	52	-374	-268
5	1,886	208	-1,678	-953
7	7,725	831	-6,894	-3,053
9	31,082	3,324	-27,758	-9,384
13	498,223	53,180	-445,044	-80,738

90% 학습율 하에서 누적건설 용량이 늘어날 수록 적자가 늘어나는 것을 감안하면 획기적인 기술혁신 및 강력한 정부지원제도 없이는 신규투자가 일어날 인센티브가 존재하지 않음을 알 수 있다.

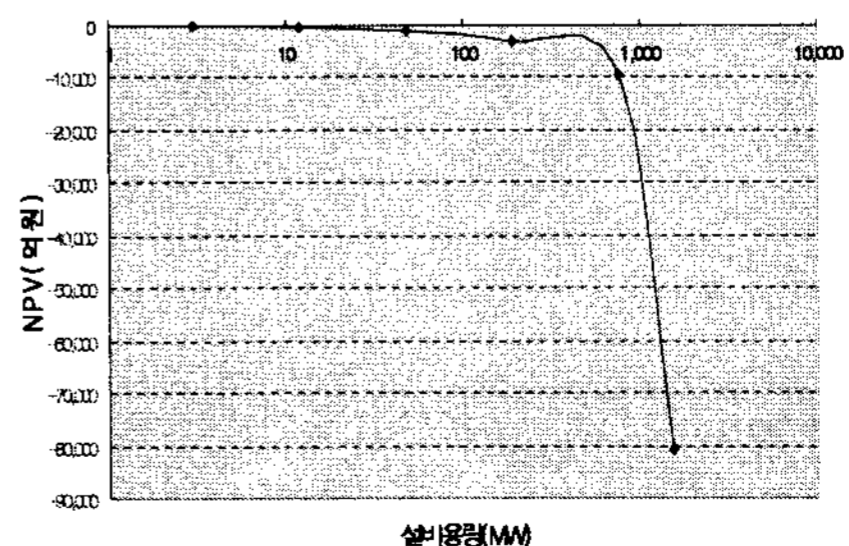


그림 1 90% 학습율에서 NPV 추이

학습율 80%를 적용하였을 경우에는 표4와 같이 제11기 이후부터 NPV≥0으로 나타났다.

표 4 80% 학습율 적용 시 NPV 전망(억원)

期	학습곡선 미반영			학습곡선 반영NPV
	비용	수익	NPV	
1	61	13	-48	-48
3	426	52	-374	-187
5	1,886	208	-1,678	-486
7	7,725	831	-6,894	-1,027
11	124,510	13,295	-111,215	826
13	498,223	53,180	-445,044	21,177

80% 학습율 하에서는 그림 2와 같이 누적 용량이 약 3,000MW 정도 일 때 NPV≥0으로 나타났으며 정부 주도하에 적정 원가를 반영한 요금제도가 해상풍력발전의 투자를 유인 할 수 있는 중요한 요인이 될 것으로 분석된다.

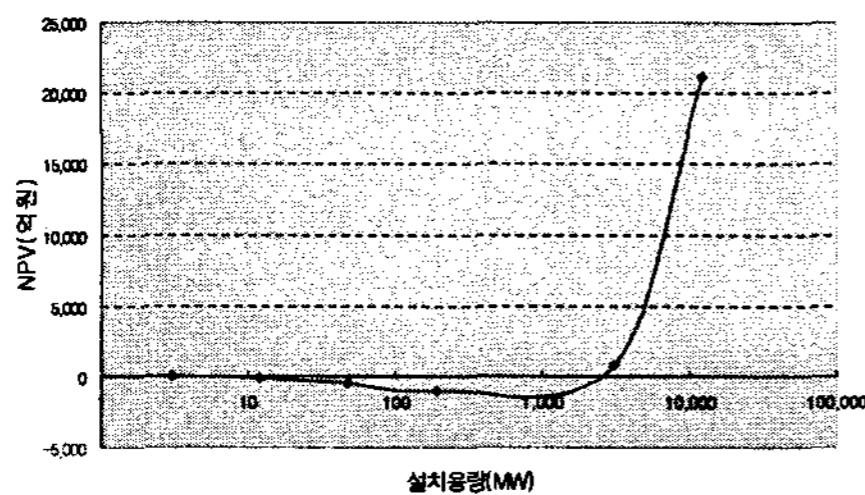


그림 2 80% 학습율에서 NPV 추이

학습율 70%를 적용하였을 경우에는 표4와 같이 제8기 이후부터 NPV≥0으로 나타났다.

표5 70% 학습율 적용 시 NPV 전망(억원)

期	학습곡선 미반영			학습곡선 반영NPV
	비용	수익	NPV	
1	61	13	-48	-48
3	426	52	-374	-125
5	1,886	208	-1,678	-197
8	15,511	1,662	-13,849	447
9	31,082	3,324	-27,758	1,599
10	62,225	6,647	-55,577	4,208

70% 학습율 하에서는 그림 3과 같이 누적 용량이 약 100MW 정도 일 때 NPV≥0으로 나타났다. 현실적으로 70%의 학습율을 갖는다는 것은 매우 어려운 일이므로 국외 선형 연구에서 언급되어진 선진국 최선의 수준인 75%의 학습율을 지니기 위하여 무엇보다 인프라 구축을 위한 초기 연구개발의 역할이 중요하다.

4. 결론

본 연구를 통하여 학습곡선을 고려한 경우와 학습곡선을 고려하지 않은 경우 투자하고자 하는 사업의 재무적 가치는 크게 다르게 나타남을 알 수 있었다.

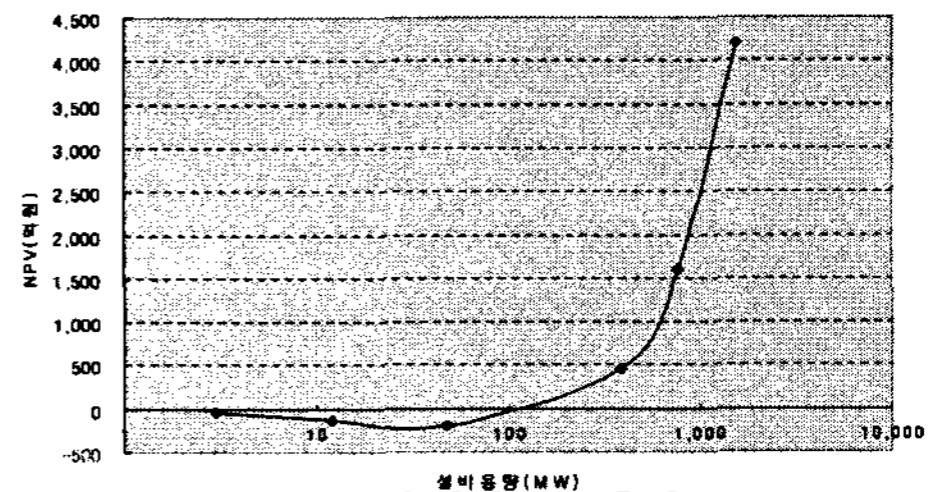


그림 3 70% 학습율에서 NPV 추이

해상풍력발전의 투자 유인을 위한 관건은 연구개발에 의한 혁신적 학습효과에 따른 인프라 구축 여부이다. 즉, 수익 전망이 불투명한 90% 학습율 하에서 해상풍력발전의 확산을 위하여는 과감한 연구개발과 인프라 구축 그리고 적정 요금체제 구성 등 지속적인 정책지원이 필요하다. 80% 학습율에서는 중장기 연구개발지원 등의 보조정책이 필요하고 70%의 학습율에서는 초기 기술개발에 집중적인 투자를 하고 현행 차액지원제도를 유지한다면 중장기적으로 투자자들 간의 경쟁이 가능한 여건이 형성될 것으로 본다. 본 연구는 많은 가정에 의한 학습곡선효과의 방법론을 제시하는 차원에서 진행되어진 것이므로 구체적인 해상풍력발전 기술개발의 학습율과 원가분석을 바탕으로 하는 실제의 재무상황을 규명하지 못한 한계가 있으며 향후 보완연구 예정이다.

References

- [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] M. Junginger, Global experience curves for wind farms, 2005 Energy Policy 33 (2005) 133-150
- [5] OFFSHORE WIND EXPERIENCES, IEA 2005
- [6] EXTOOL - EXCETP 6-workshop, IEA, Paris, Jan. 22-24, 2003
- [7] 허영채, 학습곡선이 작용할 때의 경영계획과 통제, 고려대 경영학과