

발전용량 및 풍속에 따른 국내 풍력 발전단지의 효율성 분석*

이중우** · 고헌근** · †이기광***

The Effect of Power Generation Capacity and Wind Speed on the Efficiency of the Korean Wind Farms

Joong-Woo Lee** · Kwang-Kun Ko** · †Ki-Kwang Lee***

■ Abstract ■

Of the new and renewable energies currently being pursued domestically, wind energy, together with solar photovoltaic energy, is a new core growth driver industry of Korea. As of May 2012, 33 wind farms at a capacity of 347.8MW are in operation domestically. The purpose of this study was to compare and analyze how efficiently each operational wind farm is utilizing its power generation capacity and the weather resource of wind. For this purpose, the study proceeded in 3 phases. In phase 1, ANOVA analysis was performed for each wind farm, thereby categorizing farms according to capacity, region, generator manufacturer, and quantity of weather resources available and comparing and analyzing the differences among their operating efficiency. In phase 2, for comparative analysis of the operating efficiency of each farm, Data Envelopment Analysis (DEA) was used to calculate the efficiency index of individual farms. In the final phase, phase 3, regression analysis was used to analyze the effects of weather resources and the operating efficiency of the wind farm on the power generation per unit equipment. Results shows that for wind power generation, only a few farms had relatively high levels of operating efficiency, with most having low efficiency. Regression analysis showed that for wind farms, a 1 hour increase in wind speeds of at least 3m/s resulted in an average increase of 0.0000045MWh in power generation per 1MW generator equipment capacity, and a unit increase in the efficiency scale was found to result in approximately 0.20MWh power generation improvement per unit equipment.

Keywords : Wind Farms, Data Envelopment Analysis(DEA), Efficiency Index, Power Generation Capacity, Wind Speed

논문접수일 : 2013년 02월 14일 논문수정일 : 1차(2013년 03월 29일), 2차(2013년 04월 23일)

논문게재확정일 : 2013년 04월 29일

* 본 논문은 2011학년도 인제대학교 학술연구조성비 보조에 의한 것임.

** 인제대학교 경영학부/산업경영연구원

*** 단국대학교 경영학부

† 교신저자, kiklee@dankook.ac.kr

1. 서 론

오늘날 세계 각국들은 유가의 불안정, 기후변화 협약에 대한 규제 대응 등과 같은 국내·외의 환경 변화에 따라 자국이 보유한 자원의 효율적 이용과 환경오염 최소화에 많은 관심을 기울이고 있다. 이와 같은 상황에서 최근 가장 부각되고 있는 산업이 신재생에너지 산업이다. 신재생에너지는 초기투자 비용이 상대적으로 높은 근본적인 한계점에도 불구하고 화석에너지의 고갈문제와 환경문제에 대한 해결 방안이라는 관점에서 많은 국가들이 경쟁적으로 과감한 연구개발과 육성정책 등을 추진하고 있다. 또한, 신재생에너지는 발전설비투자 이후 CO₂ 무방출과 추가적인 화석연료 수입이 불필요하기 때문에 국가와 기업의 치열한 에너지 확보경쟁에까지 일정 정도 기여하는 것으로 평가되고 있다.

2009년 전 세계 신재생에너지 산업의 시장규모는 1,620억 달러로 이 중 풍력 발전 635억 달러, 바이오 연료 449억 달러, 태양광 발전 307억 달러의 세부시장을 구성하고 있다. 이러한 신재생에너지 산업은 2009년 기준으로 메모리 반도체, 디스플레이 산업보다 더 큰 시장 규모를 형성하고 있으며, 2015년에는 약 4,000억 달러, 2020년 8,000억~1조억 달러로 성장할 것으로 예상되고 있다[8].

우리나라의 신재생에너지 기술개발은 1988년 본격적으로 시작되었으며, 1997년 및 2003년 각각 제 1차 및 제 2차 「신재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획」을 수립하여 꾸준히 투자되고 있다. 신재생에너지 중 풍력 발전은 우리나라의 신성장동력 산업의 핵심분야로 1998년 최초로 풍력 발전기를 시험 도입하였는데, 2003년까지 설비용량은 18MW에 불과했다. 그러나 2004년에만 50MW의 발전설비를 도입하여 시장이 확대되기 시작해 2006년과 2009년에는 각각 78.9MW, 113MW의 발전설비를 추가적으로 설치함으로써 현재 우리나라에서는 33개 풍력 발전단지에서 총 설비용량 419MW의 206기 풍력발전기가 운영 중이다[10].

국내 풍력 발전단지 설비의 제조사를 살펴보면,

VESTAS가 62.95%, ACCIONA가 18.65%, NEC-Micon 15.57%, 그리고 국내기업인 Unison, 한진, 효성이 2.1%를 차지하고 있다. 제조사의 원산지별로 보면 덴마크 제품이 78.5%를 차지하고 있다.

풍력 발전 단지를 지역별로 살펴보면, 강원도가 153.19MW로 가장 많은 설비를 보유하고 있으며, 그 다음으로 경상북도가 101.76MW, 제주도가 94.295MW의 풍력 발전설비를 갖추고 있다.

한국전력거래소에 등록된 풍력 발전기업들의 2006년부터 2009년까지 풍력발전 설비용량과 연간 전력생산량의 변화를 살펴보면, 2006년 대비 2009년에는 설비용량이 2.1배 증가하였지만, 전력생산량은 3배로 높아졌다. 그리고 1MW당 전력 생산량이 1.3GWh에서 1.9GWh로 높아졌으며, 설비 이용률¹⁾도 15%에서 22%로 높아짐을 알 수 있다. 그러나 좀 더 자세히 살펴보면 2007년에는 2006년 대비 1MW당 전력 생산량과 설비 이용률 모두 큰 폭으로 높아졌지만, 2008년에는 전년 대비 오히려 감소하였다가 2009년 다시 증가하는 불안정한 모습을 나타내고 있다. 이와 같은 수치는 아직 풍력 발전시장이 본격적으로 형성된 지 얼마 되지 않은 도입기로서 현재의 기술적, 운영적 효율성이 아직 안정되지 않은 불안정한 상태라고도 볼 수 있다.

에너지 생산의 효율성 분석에 대한 연구는 국내외에서 몇 가지 진행된 바 있는데, 국외에서는 호주와 일본의 발전소별 효율성 분석을 한 연구들이 있었으며[11, 14], 국내에서는 태양광, 풍력, 조력 등 신재생에너지별 효율성을 분석한 연구들[5, 9]이 최근 들어 진행되고 있으나, 대부분 포괄적 비용에 대한 효율성 분석이 대부분이었다.

본 연구에서는 신재생에너지 중 특히 풍력 발전 단지들만을 대상으로 풍력이라는 신재생에너지자원을 얼마나 효율적으로 활용하고 있는지, 그리고 발전설비의 운영 효율성에 풍력이란 기상자원이 어떠한 영향을 미치는지를 정량적으로 분석하고자 한다.

1) 설비 이용률은 발전기의 가동률을 의미함. 일반적으로 이용률은 [실제 발전량/(설비용량×24시간×365일)]로 산출함.

2. 분석 자료

풍력 발전의 경우, 한국전력거래소로부터 2007년부터 2009년까지 3년간 풍력단지별 연간 발전량 데이터를 수집하였다. 연간 발전량 데이터는 현재 21개의 단지가 운영 중이지만, 이중 5개 단지는 2009년과 2010년 설립되어 해당 연도 데이터가 불완전하여 실증분석에서 제외하고 16개 단지를 연구대상으로 하였다.

일반적으로 풍력발전기가 전력 생산을 위해 가동되는 풍속(Cut-in speed)은 풍력 발전기마다 상이하지만 일반적으로 블레이드가 위한 80m 상공에서 3~4m/s 이상이면 가동되는 것으로 조사되었다. 또한, 국내 풍력발전기 제조업체에 따르면, 현재 Cut-in speed 4m/s 기준으로 발전설비 인증이 주어지지만, 실제 풍속 3m/s 이상이면 발전이 가능하며, 최근 풍력 터빈이 점차 고성능화되면서 이

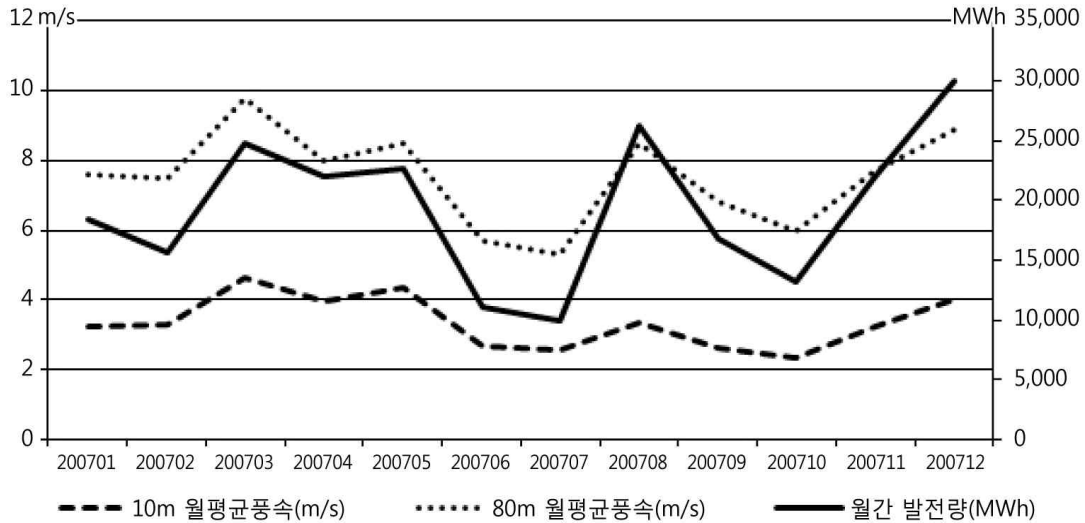
보다 낮은 풍속에서도 충분히 가동이 가능하다는 전제하에 3m/s 이상으로 발전가능조건을 설정하였다.

기상자료는 기상청으로부터 2007년부터 2009년까지 매시간별 풍속자료를 수집하여 각 풍력단지별로 정리하였다. 풍속자료는 연구 대상인 16개 풍력 발전단지가 위치한 위도, 경도값을 고려하여 가장 가까운 관측지점의 자료를 사용하였고, 당해년도 동안 풍력발전이 가능한 3m/s 이상의 풍속을 기록한 시간을 합산하였다. 다만, 실제 80m 상공의 풍속자료는 획득하기 매우 어렵고 제한적인 현실을 반영하여 본 연구에서는 현재 기상청에서 관측하고 있는 10m 상공의 풍속 자료를 활용하였다.

10m 상공 풍속자료의 적절성을 검토하기 위해 실제 운영 중인 풍력 발전단지 한 곳을 대상으로 2007년 1월부터 12월까지 1년 동안 측정된 80m 상공 월 평균풍속 자료를 바탕으로 해당 기간월간 발

<표 1> 분석자료

발전단지	설비용량 (MW)	제조사	발전량(MWh)			발전가능시간		
			2007	2008	2009	2007	2008	2009
전북	5.9(07), 7.9(08, 09)	NEC-Micon/ VESTAS	7,958	9,770	10,492	2,569	2,428	2,477
한경(제주)	8.3(07), 21(08, 09)	NEC-Micon	18,415	47,237	51,621	7,269	7,193	7,223
포항(경북)	0.66	VESTAS	445	731	239	6,509	6,195	6,138
대관령(강원)	2.64	VESTAS	4,288	4,949	4,469	4,237	4,192	4,240
매봉(강원)	6.8	VESTAS	11,058	11,306	10,631	1,657	1,809	1,879
영덕(경북)	39.6	NEC-Micon	74,280	73,207	75,993	3,316	3,665	3,667
강원(강원)	98	VESTAS	232,377	223,937	214,978	4,237	4,192	4,240
신창(제주)	1.7	VESTAS	3,572	3,561	2,991	7,269	7,193	7,223
월정(제주)	1.5	한진	2,313	3,445	3,429	5,245	4,826	5,387
양양(강원)	3	ACCIONA	1,908	4,800	4,367	527	475	895
행원(제주)	9.795	VESTAS/ NEC-Micon	13,402	15,319	12,914	5,245	4,826	5,387
효성대기(제주)	2.75	효성	-	409	809	-	3,914	4,070
신안(전남)	3	VESTAS	-	-	6,574	-	-	1,719
태기산(강원)	40	VESTAS	-	-	70,853	-	-	983
고리(부산)	0.75	Unison	-	-	558	-	-	2,353
영양(강원)	61.5	ACCIONA	-	-	164,114	-	-	779



<그림 1> 월간 발전량과 10m 및 80m 상공 월 평균풍속

전량과 10m 상공 월 평균풍속 자료와 함께 상관관계 분석을 실시하였다. 그 결과, 2007년 한 해 동안 월간 발전량과 10m 상공 월 평균풍속 간의 상관계수는 0.61이고, 같은 기간 월간 발전량과 80m 상공 월 평균풍속의 상관계수는 0.84로 도출되었다. 10m 상공 월 평균풍속 자료의 상관계수가 80m에 비해 작게 나오는 것이 당연한 결과이지만, <그림 1>에서와 같이 10m 및 80m 상공 월 평균풍속 간 변화 패턴이 유사하고(상관계수 = 0.67), 본 연구의 분석 대상 기간인 2007년부터 2009년까지 3년간 10m 상공 월 평균풍속 및 월별 발전량 간의 상관계수는 0.83으로서 매우 밀접한 관계를 보임을 알 수 있다. 따라서, 80m 상공 대신 10m 상공 풍속자료를 사용하는 것이 연구결과를 크게 왜곡하지는 않을 것이라고 판단된다. 다만, 보다 정확한 분석을 위해서는 실제 풍력 발전기의 높이에 해당하는 80m 상공의 풍속자료를 획득하는 것이 중요하다는 것도 역시 확인할 수 있다.

3. 연구 방법

본 논문에서는 먼저 현재 운영 중인 국내 풍력 발전단지의 설비용량, 위치, 운영가동일, 발전기 제조사, 발전량 등의 현황 조사를 실시하였다. 이를

기반으로 발전 단지의 효율성 분석을 3단계로 진행하였다. 1단계는 발전 단지별 분산분석으로 설비용량, 지역, 발전기 제조사, 기상자원의 양에 따라 발전단지들을 구분하고 이들의 운영효율성의 차이를 비교분석하였다. 2단계는 단지별 운영 효율성 비교분석을 위해 자료포락분석(DEA, Data Envelopment Analysis)을 이용하여 개별 단지의 효율성 척도를 도출하였다. 마지막 3단계는 회귀분석을 활용하여 발전 단지의 단위 설비용량당 발전량에 풍속이라는 기상자원과 2단계에서 도출한 효율성 척도가 미치는 영향을 분석하였다.

3.1 자료포락분석(DEA)

본 연구에서는 풍력 발전단지 효율성 분석을 위해 DEA를 사용하였다. DEA 분석은 Charnes et al. [12]에 의해 개발된 선형계획법(linear programming)의 일종으로 하나 이상의 투입물과 하나 이상의 산출물로 이루어진 의사결정단위(DMU, Decision Making Units)를 유사한 속성을 가진 집단 내에서 평가하는 상대적 평가기법이다[12, 13]. DEA 기법은 회귀모형과 같은 모수적 접근방법들과 달리 투입요소와 산출물의 관계에 대해 사전적으로 구체적인 함수형태를 가정하지 않기 때문에 투입과 산출의

명확한 인과관계를 밝히기 어려운 DMU의 상대적 효율성을 평가할 수 있는 장점이 있다[7]. 또한, DEA는 분석 대상 DMU들의 효율성 수준을 제공할 뿐만 아니라 비효율적인 DMU가 모범으로 삼아야 할 DMU를 제시해 줌으로써 성과관리를 위한 구체적인 방향을 설정하고 지원해 주는 특징이 있다 [1, 3, 4].

이러한 DEA 모형은 실증분석을 지향하는 방법론으로 경영효율성 과정을 도식화하는데 탁월할 뿐만 아니라 사전에 교수하는 가정이 아주 적다는 점에서 투입과 산출의 인과관계가 명확하지 않은 비영리부문, 공공부문, 서비스 부문 등의 효율성 측정에 널리 사용되고 있다[2, 6]. 이러한 DEA 모형의 유용성은 첫째, 다수의 투입과 다수의 산출 간에 특정한 함수형태를 필요로 하지 않아 이를 평가할 필요가 없다. 둘째, 다수의 투입과 다수의 산출이 존재하는 경우, 이들을 적절한 방법으로 하나의 지수로 종합화하기 힘든 경우에 유효하다. 셋째, 투입자료들 간에 동일한 척도의 크기를 가질 필요가 없다. 넷째, 지수법에 비해 사전적 가중치가 필요하지 않아 자의적 판단을 배제할 수 있다.

DEA 모형은 연구목적에 따라 여러 가지 모형이 개발되었으나, 일반적으로 규모수익의 불변성(Constant Return to Scale; CRS)이라는 가정 하에서 효율성을 평가하는 CCR 모형과 규모수익의 가변성(Variable Return to Scale; VRS)을 반영하는 BCC 모형이 널리 사용되고 있다. 이들 모형은 효율성 측정의 방향에 따라 투입지향적 측정(input-oriented measures)과 산출지향적 측정(output-oriented measures)으로 각각 구분될 수 있다. 본 연구에서는 CCR 모형을 사용하여 산출지향적 측정을 통해 분석하였다.

3.2 CCR산출지향 모형

투입지향 모형에서는 “기술적 효율성을 산출물의 변화 없이 얼마나 투입물을 감소시킬 수 있는가?”라는 문제에 답을 제시하는 것이라면, 산출지

향 모형은 “투입물의 변화없이 얼마나 산출물을 추가적으로 생산할 수 있는가?”라는 문제에 답을 제시하기 위한 것이다. 즉, CCR산출지향 모형은 생산가능집합 내에서 투입물의 값을 최소한 보장 하면서 산출물의 값을 최대로 하는 DMU를 결정하는 모형이다. 따라서, 산출지향 모형은 주어진 투입물을 가지고 산출물을 최대화하는 것을 목적으로 한다.

평가대상 DMU_k의 효율성 척도 θ_k 를 구하기 위한 CCR산출지향 모형은 아래 식과 같다. 단, 각 DMU_j의 *i*번째 투입요소는 x_{ij} , *r*번째 산출요소는 y_{rj} 로 나타내며, λ_j 는 DMU_j의 가중치를 나타낸다. 각 DMU별로 투입요소는 *m*개, 산출요소는 *s*개이며 DMU는 *n*개 존재한다고 가정한다.

$$\begin{aligned} & \text{Max } \theta_k \\ & \text{s.t. } x_{ik} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ & \theta_k y_{rk} \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \quad (r = 1, 2, \dots, s) \\ & \lambda_j \geq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n) \end{aligned}$$

위 모형에서 DMU_k의 효율성 척도 θ_k 의 값은 1보다 큰 값을 갖는다. 이때, θ_k 의 값이 1보다 클수록 DMU_k는 비효율적이라는 의미인데, 본 연구에서는 효율성 척도 θ_k 의 역수인 θ_k^{-1} 로 변환하여 결과를 제시하였다. 즉, θ_k^{-1} 의 값이 1에 가까울수록 DMU_k는 더 효율적이고 0에 가까울수록 비효율적으로 해석한다.

4. 자료분석 결과

4.1 1단계 : 분산분석 결과

풍력자원의 효율성 분석을 위해 1단계로 분산분석을 실시하였다. 풍력자원의 기초 자료를 바탕으로 2009년도 16개 단지의 설비 이용률을 산출하여 이를 발전용량, 발전기 제조사, 발전지역, 발전가능

시간에 따라 단위 설비당 발전량의 차이가 통계적으로 유의한지를 분석하였다. 설비 이용률은 연간 발전가능용량 즉, <표 1>의 설비용량(MWh)에 24시간 및 365일을 곱한 수치 대비 해당년도 발전량으로 계산하였다.

먼저 풍력 발전의 설비용량에 따른 설비 이용률의 차이를 살펴보기 위해 풍력 발전단지의 설비용량이 3MW 이상인 풍력단지과 3MW 미만인 단지로 구분하여 분산분석을 실시하였다. 그 결과 <표 2>와 같이 3MW 이상의 발전 단지에 속한 발전소들의 단위 설비당 발전량이 3MW 미만 집단보다 높게 나타나고 있으며, 3MW 이상 발전소의 평균 설비 이용률은 약 21.5%이고, 3MW 이하의 발전소는 13.5%로 평균 설비 이용률에서도 차이가 있는 것으로 나타났다. 그리고 이러한 차이는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

<표 2> 발전기 용량별 분산분석 결과

인자 수준	관측수	합	평균	분산	P-값
3MW 이하	6	0.814	0.135	0.009	0.049
3MW 이상	10	2.153	0.215	0.002	

지역별 분산분석은 풍력 발전단지가 위치 곳으로 구분하였다. 지역별로 구분한 결과 16개 발전단지 중 강원도에 6곳으로 제일 많은 풍력 발전단지가 위치하고 있었으며, 다음으로 제주도가 5곳, 경북이 2곳, 그리고 그 외 지역(경남, 전남, 전북)으로 구분하여 분산분석을 실시하였다. 지역별 평균가동률은 <표 3>과 같이 경북이 26%로 가장 높게 나타났으며, 제주도 18%, 강원도 17%, 그 외 지역 16%로 분석되었다. 다만, 통계적으로 유의하지 않았다.

<표 3> 지역별 분산분석 결과

인자 수준	관측수	합	평균	분산	P-값
강원도	6	1.024	0.170	0.005	0.559
경북	2	0.523	0.261	0.003	
제주도	5	0.934	0.186	0.009	
기타	3	0.486	0.162	0.006	

국내 풍력발전소에 설치된 발전기의 제조사는 VESTAS, ACCIONA, NEC-Micon, Unison, 한진 및 효성이다. 이 중 Unison, 한진, 효성은 한 발전 단지에만 설치되어 이들 세 제조사를 기타그룹으로 묶어서 분석하였으며, 한 발전단지에 두 제조사가 병렬로 설치된 경우는 각 제조사의 발전기 용량 비율에 따라 해당 발전단지의 설비용량을 구분하여 분석하였다. 그 결과 <표 4>와 같이 발전기 제조사와 평균풍속에 따른 설비가동률의 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다.

<표 4> 발전기 제조사별 분산분석 결과

인자수준	관측수	합	평균	분산	P-값
VESTAS	7	1.316	0.188	0.004	0.430
NEC-Micon	4	0.772	0.193	0.005	
기타	3	0.379	0.126	0.014	
ACCIONA	2	0.499	0.249	0.001	

발전가능조건으로서 블레이드가 위치한 80m 상공에서의 순간 풍속이 3m/s 이상이 되어야 발전이 가능한 풍력발전의 특성상 발전가능시간이 매우 중요한 요소인데, 이에 대해 각 발전단지별 발전가능시간을 사분위로 나누어 각 사분위의 분산분석을 수행하였다. 그 결과 <표 5>에서 보는 바와 같이 1사분위 즉 발전가능시간이 적었던 발전단지의 평균이 약 23%로서 다른 사분위 그룹에 비해 상대적으로 높은 수치를 보였으나, 통계적으로 유의하지는 않았다.

<표 5> 발전가능시간(3m/s 기준) 사분위별 분산분석 결과

인자 수준	관측수	합	평균	분산	P-값
1사분위	4	0.923	0.230	0.003	0.233
2사분위	4	0.634	0.158	0.003	
3사분위	4	0.738	0.184	0.011	
4사분위	4	0.673	0.168	0.010	

결론적으로 국내 풍력 단지들의 설비 가동률 차이가 어떠한 요인에 의한 것인지를 살펴보기 위해

발전용량, 발전기 제조사, 발전지역, 발전가능조건을 기준으로 발전 단지들을 구분하여 분산분석을 실시한 결과, 발전용량이 유의한 요인으로 밝혀졌으며, 유의하지는 않았지만 발전지역(경북) 및 발전가능시간(1사분위)에서 상대적으로 높은 설비 이용률을 보인 그룹이 존재했다.

4.2 2단계 : DEA분석 결과

1단계 분산분석에서 발전기 용량에 따라 설비 이용률에 유의한 차이가 있었고, 발전가능시간의 경우 유의하지는 않았지만 발전가능시간이 비교적 적게 주어진 1사분위에 속한 그룹의 설비이용률에 타 그룹 대비 상당한 차이가 있음을 발견하였다. 이와 같은 분석 결과를 바탕으로 2단계에서 DEA 분석을 수행하기 위해 고려할 투입요소로서 발전기 용량 및 발전가능시간을 선정하였다. 발전지역에서도 경북지역의 설비 이용률이 타지역 대비 매우 높았으나 발전지역은 수치화가 어려운 요소이므로 투입요소에서 제외하였다.

본 연구에서 수행한 풍력 발전단지의 DEA 모형은 하나의 투입요소와 하나의 산출물을 가정한 CCR 산출지향 모형으로서 DEAP Ver 2.1 프로그램을 활용하였다. 투입요소로는 발전단지별 풍속 3m/s 이상이었던 연간 누적시간 즉, 연간 발전가능시간 및 설비용량을 곱한 수치를 사용하였으며, 산출요소로는 연간 누적 발전량을 고려하였다. 일반적으로 많이 사용되는 투입지향 모형 대신 산출지향 DEA를 사용한 이유는 풍력발전의 특성에 기인한다. 즉, 풍속은 기상현상으로 하나로 인위적인 통제가 불가능한 요소이기 때문이다.

<표 6>은 16개 발전단지(DMU)에 대해 2007년에서 2009년까지 년도별로 입력요소와 출력 데이터를 활용하여 DEA분석을 수행한 결과를 나타낸다. 각 발전단지별 효율성 결과는 정책적으로 민감한 사안이기 때문에 본 연구에서는 실제 발전단지명을 사용하지 않고 임의로 알파벳 표기를 하였다.

<표 6> DEA에 의한 단지별 효율성 척도(θ^{-1})

발전단지	2007	2008	2009
A	0.153	0.149	0.157
B	0.111	0.258	0.281
C	0.03	0.052	0.017
D	0.112	0.131	0.117
E	0.287	0.269	0.243
F	0.414	0.402	0.417
G	1	0.967	0.925
H	0.084	0.085	0.071
I	0.086	0.139	0.124
J	0.358	1	0.479
K	0.081	0.095	0.078
L	-	0.011	0.021
M	-	-	0.374
N	-	-	0.526
O	-	-	0.094
P	-	-	1

<표 6>에서 보는 바와 같이 2007년도부터 2009년도까지 발전단지 G, J, P의 효율성 척도가 각각 1로서 가장 높게 나타났다. 년도별 발전단지의 효율성 척도는 당해년도에서 효율성 척도 1의 값을 가진 가장 효율적인 발전단지 대비 상대적인 효율성으로 해석할 수 있다. 따라서, 가장 효율적인 발전단지 대비 10% 미만의 성능을 나타낸 발전단지는 C, H, K, L, O임을 알 수 있다. 특히, 발전단지 C, H, K는 2007년도부터 2009년도까지 3년간 계속된 비효율성을 보이며 시간이 지남에 따른 성능 향상도 없다는 점에서 개선이 반드시 필요한 단지로 해석할 수 있다.

효율성 척도의 년도별 변화를 살펴보기 위해 2007년부터 2009년까지 3년 동안 가동한 A에서 K까지 10곳의 발전단지들을 대상으로 각 년도별 효율성 척도를 DEA로 도출하여 <표 7>과 같은 결과를 산출하였다. <표 7>에서 보는 바와 같이 발전소 가동을 계속 진행함으로써 학습효과를 통해 효율성이 향상되고 있는 발전단지로 A, B, I, J 네 곳을 들 수 있다. 반대로 초기보다 효율성이 오히

려 감소한 발전단지는 E, F, G 세 곳이 있다. 이는 풍력 발전의 경우 국내에서는 시장이 형성되는 도입기의 단계로 아직 기술 및 운영 측면에서 안정화가 중요한 문제라는 것을 단적으로 나타내고 있다.

<표 7> DEA에 의한 연도별 효율성 척도(θ^{-1})

발전단지	2007	2008	2009
A	0.977	0.950	1.000
B	0.902	0.919	1.000
C	0.579	1.000	0.330
D	0.857	1.000	0.893
E	1.000	0.937	0.848
F	1.000	0.892	0.925
G	1.000	0.974	0.924
H	0.993	1.000	0.836
I	0.618	1.000	0.892
J	0.358	1.000	0.483
K	0.805	1.000	0.755

4.3 3단계 : 회귀분석 결과

기상자원(풍속 3m/s 이상이 지속된 시간)과 단지 운용의 효율성이 풍력 발전량에 미치는 영향을 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 분석에서 종속변수는 단위설비당 발전량을 사용하였으며, 이는 연간 누적 발전량을 설비용량으로 나눈 값이다. 독립변수로는 환경적 요인과 기술적 요인의 효과를 살펴보기 위해 풍속 3m/s 이상이 지속된 시간, 즉 발전가능시간과 앞선 2단계에서 구한 효율성

척도(θ^{-1})를 선정하였다. 발전가능시간의 기준인 풍속은 3년간 모든 발전단지에서 측정된 10m 상공의 풍속자료와 2009년도에 일부 7개 발전단지에서 제한적으로 측정된 80m 상공의 풍속자료가 있다고 2장에서 언급하였는데, 이 두 가지 자료 각각에 대해 별도로 회귀분석을 실시하였다. <표 8>은 10m 상공 기준의 풍속자료를 활용한 발전가능시간 자료를 활용한 결과이며 <표 9>는 80m 상공 기준 자료의 회귀분석 결과이다. 두 가지 회귀분석 결과 모두 발전가능시간(풍력자원)과 효율성 척도(θ^{-1})가 단위설비당 발전량에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

10m 상공의 풍속 자료를 활용한 <표 8>의 회귀분석 결과를 살펴보면, 결정계수는 0.3916으로 다소 낮게 나왔지만, 10m 상공에서 3m/s 이상의 풍속이 1시간 증가하면 이로 인해 발전설비 1MW당 약 1.5×10^{-5} MWh의 발전량이 증가하고, 효율성 척도가 0.1 향상되면 단위설비당 약 0.016MWh의 발전량 향상을 가져올 수 있음을 알 수 있다.

<표 9>의 결과는 <표 8>의 결과에 비해 기상자원의 효과가 더욱 크게 분석되었지만, 7개 발전단지의 매우 적은 자료만을 이용하여 도출된 결과여서 이를 일반화하기에는 어렵다고 판단된다. 즉, 80m 상공의 풍속자료와 10m 상공의 풍속 자료를 이용한 결과의 차이를 살펴보면, 10m 높이의 풍속 자료로부터 추정된 풍력 자원의 가치는 실제보다 과소 추정되었을 가능성이 존재한다고 할 수 있다.

본 연구에서는 10m에서 3m/s 이상의 바람이 불

<표 8> 10m 상공 풍속 기준 회귀분석 결과

	자유도	제곱합	제곱평균	F 비	P-값
회귀	2	0.075	0.037	11.590	0.0001
잔차	36	0.117	0.003		
계	38	0.193			

	계수	표준오차	t 통계량	P-값
Y 절편	0.078	0.027	2.834	0.007
발전가능시간	1.5E-05	4.9E-06	3.051	0.004
효율성 척도	0.163	0.034	4.707	3.6E-05

<표 9> 80m 상공 풍속 기준 회귀분석 결과

	자유도	제곱합	제곱평균	F 비	P-값
회귀	2	0.043	0.021	4.748	0.087
잔차	4	0.018	0.004		
계	6	0.062			

	계수	표준오차	t 통계량	P-값
Y 절편	-0.277	0.081	-3.411	0.003
발전가능시간	4.5E-05	1.02E-05	4.376	0.0004
효율성 척도	0.206	0.047	4.324	0.0004

때 풍력 발전이 되는 것을 가정하고 있으나, 실제로는 10m에서 3m/s 이상의 바람이 불지 않더라도 블레이드가 있는 실제 높이에서는 3m/s 이상의 바람이 불 수 있는 가능성이 존재하기 때문이다. 실제 80m 높이의 풍속자료와 10m 높이의 풍속 자료를 살펴보면, 3m/s 이상의 시간이 7개 단지 평균 6,510시간으로 나타나고 있다. 그러나 국내 모든 풍력 단지의 실제 80m 높이에서의 풍속자료 측정이 현실적으로 어렵기 때문에 이러한 과소추정의 문제는 본 연구의 한계점으로 지적될 수 있으며, 보다 자세한 기상자원의 가치 추정을 위해서는 실제 높이에서의 자료가 필요하다.

5. 결론 및 시사점

본 연구에서는 국내 풍력 발전단지의 현황을 살펴보고, 국내 풍력 단지들을 대상으로 기상 자원의 효과에 대한 분석을 실시하였다. 향후 우리나라 정부의 정책에서 신성장 동력산업으로 부상하고 있는 신재생에너지 산업 중 태양광 산업과 함께 특히 풍력발전 산업에 많은 투자와 지원을 할 것으로 예측되는데, 이에 본 연구가 줄 수 있는 시점은 아래와 같이 정리될 수 있다.

첫째, 풍력 발전의 경우 몇 개 단지만이 상대적으로 높은 기술적 효율성 수준을 보여주고 대다수의 단지들이 낮은 기술적 효율성을 나타내고 있는 수준이다. 따라서 풍력 발전 단지의 전력 생산 향상을 위해서는 발전 단지에 대해 차별화된 접근이

요구된다.

둘째, 바람 자원의 영향을 고려하여 입지를 선정하고, 소용량보다는 대용량으로 발전 단지를 구축하는 것이 적절할 것으로 보이며, 바람 자원의 활용을 극대화하기 위해서는 운영 효율성을 향상시키는 것이 중요하다고 판단된다. 이는 DEA분석 결과 주로 대용량 발전단지의 효율성 척도 수치가 높게 나타난 점에 기인한다. 즉, 풍부한 바람 자원을 기반으로 하고 이를 충분히 활용할 수 있는 기술적 효율성을 갖춘 발전단지를 설치하여야 풍력 자원의 효과적 활용이 가능하기 때문이다.

셋째, 풍력 발전의 전력 생산에 영향을 미치는 환경적 요인이 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 그러므로 풍력 발전설비를 설치하려는 기업이나 개인은 설치하려는 지역의 과거 풍속 및 기상 정보를 반드시 확인하여 예상 발전량과 설치 및 운영에 필요한 비용 등을 고려한 B/C분석을 실시하여 풍력 발전의 경제적 타당성을 검토하여 사업을 수행해 나아가야 할 것이다. 이 과정에서 현재 기상청에서 제공하고 있는 기상자원지도가 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

넷째, 각 발전단지에서 실제 측정된 풍속 데이터의 확보가 기상자원지도의 경제적 가치를 산출하는 가장 중요한 자료임을 확인할 수 있다. 본 연구에서 수행한 실제 풍력 발전단지 1곳의 사례 분석을 통해서 알 수 있듯이, 풍력 발전단지의 경우 80m 높이의 실시간 풍속 자료와 발전량 자료를 분석하여 보면, 풍속이 발전량에 미치는 영향을 보다

정확하게 분석할 수 있다. 그러므로 향후 기상자원의 경제적 가치를 추정하기 위해서는 실제 측정된 정확한 자료의 획득이 선결되어야 할 과제로 제기된다.

다만, 본 연구의 한계점으로는 풍력발전이 비교적 초기 단계인 관계로 보다 다양한 투입 및 산출요소를 고려한 분석이 수행되지 못했다. 이는 추후 인력소요, 예산비용, 발전단가 등의 관련 자료가 축적되는 시점에서 보다 다양한 분석이 가능할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] 강수민, 민재형, “자본시장통합법 시행에 따른 금융회사 효율성의 변화”, 『경영과학』, 제29권, 제3호(2012), pp.23-43.
- [2] 김대환, 문종범, 유왕진, 이동명, “DEA 모형을 이용한 음식물류 폐기물 자원화 시설의 효율성 분석”, 『한국품질경영학회보』, 제38권, 제2호(2010), pp.215-216.
- [3] 김범석, 김명석, 민재형, “자료포괄분석(DEA)을 이용한 주식의 가치 평가”, 『경영과학』, 제28권, 제3호(2011), pp.61-72.
- [4] 김수욱, 박지영, 조정은, “DEA를 활용한 의료서비스 산업의 효율성 국제비교 연구”, 『생산관리학회지』, 제19권, 제4호(2008), pp.107-130.
- [5] 김홍희, 박성준, 이덕주, “DEA를 이용한 국내 신재생에너지원별 효율성 비교분석”, 『2012 한국경영과학회 추계학술대회』, pp.927-932.
- [6] 서상범, 박명섭, “우선순위제약 DEA모형을 이용한 서비스조직의 성과평가”, 『경영과학』, 제23권, 제2호(2006), pp.93-107.
- [7] 안정남, “비교쇼핑을 위한 판매자 추천 방법에 관한 연구 : DEA 모형을 이용해서”, 『서울대학교 대학원 박사학위논문』(2007).
- [8] 에너지관리공단 신재생에너지 센터, 『신재생에너지 산업·정책 동향 2010』, 2010.
- [9] 윤상흠, 하귀룡, 최석봉, “그린에너지 산업의 경영효율성 분석”, 『경영교육학회지』, 제70권(2011), pp.65-90.
- [10] 한국풍력발전협회 홈페이지(<http://www.kweia.or.kr/>).
- [11] Abbott, M., "The productivity and efficiency of the Australian electricity supply industry," *Energy Economics*, Vol.28(2006), pp.444-454.
- [12] Charnes, A., W.W. Cooper, and E. Rhodes, "Measuring the efficiency of decision making units," *European Journal of Operational Research*, Vol.2, No.6(1978), pp.429- 444.
- [13] Cooper, C.B., W.M. Hochachka, and A.A. Dhondt, "Latitudinal trends in the reoccupation of nest boxes and its implications," *Journal of Avian Biology*, Vol.36(2004), pp.1-39.
- [14] Honma, S. and J.L. Hu, "Total factor energy efficiency of regions in Japan," *Energy Policy*, Vol.36(2008), pp.821-833.