

풍력발전단지 조성 및 운영 사례 연구

변 효인¹⁾, 조 주석²⁾, 류 지윤³⁾, 김 두훈⁴⁾

A case study of wind park development and commercial operation

Hyojin Byun, Joosuk Cho, Jiyoony Ryu, Doohoon Kim

Key words : Wind Park(풍력발전단지), Feasibility study(타당성 연구), Site assessment(발전단지 적합성 평가), Commercial operation(상업운전), Wind energy resource(풍력 에너지 자원), Project risk assessment(사업성 위험요소 평가), Youngduk wind park(YoWiP, 영덕풍력발전단지), Capacity factor(가동율), Availability(이용율)

Abstract : 2005년 말 현재, 국내의 상업운전 중인 풍력발전기는 93.5MW(KPX, 2005)에 불과하여, 민간의 풍력에너지 개발 참여를 위한 사업타당성 조사에서 상업운전에 이르는 풍력발전단지 개발절차에 대한 사례 연구가 미비하다. 최근 신재생에너지 보급을 위한 정부의 강력한 의지와 맞물려 민간의 대규모 풍력발전단지 개발 계획이 속속 진행되고 있는 여건에서, 국내 최초의 대단위 상업용 풍력발전단지인 영덕풍력발전의 개발 및 운영사례를 통해 국내 풍력발전단지 개발시 고려사항과 발생가능한 문제점 및 해결방안을 제시한다.

1. 서 론

풍력에너지는 유럽을 중심으로 지속적인 기술개발이 이루어져 타 신·재생에너지원에 비해 경제성이 탁월하며, 이미 갖추어진 기술력과 상업적 성숙성으로 인해 대규모 분산전원으로 단기간에 보급 가능하다. 대규모 풍력에너지 보급이 진행된 선진국에서는 이미 상당히 기존 에너지원과 경제성을 견주는 주요 전력원의 하나로 인정받고 있으며, 민간의 풍력발전 사업 참여를 유도하기 위한 정책적인 지원체계 외에도 일반화된 풍력발전단지 개발 절차 소개, 발전단지 운영실적을 통한 사업성 위험요소 분석 등을 수행하고 있다³⁾.

우리나라의 풍력에너지 보급은 대부분 시범보급 또는 지역에너지 사업형태의 소규모로 이루어져 왔으나, 에너지 자립과 온실가스 배출량 저감 대책으로 풍력에너지 보급을 위한 법안, 정책 등이 속속 갖춰지고 있다.⁷⁾ 또한, 2004년 4월 경북 영덕군 일대에 조성된 국내 최초의 대단위 상업용 영덕풍력발전단지(39.6MW), 2005년 12월 1단계(14기, 28MW) 사업이 완료된 총설비 98MW 규모의 강원도 평창군 일대의 강원풍력발전단지 및 민간의 대규모 풍력발전단지 개발 계획이 속속 진행되고 있다. 정부에서도 2012년까지 2,250MW의 풍력에너지 보급을 목표로 하고 있으며, 국내 언론기관에 보도된 민간의 풍력발전단지 사업계획들을 정리하면 2013년까지 약 2,700MW를 초과하고 있다. 그러나 일부 사업의 경우 경제성을 예측하는 일련의 과정/절차가 정비되어 있지 않고, 풍력자원의 효율적 이용과 관련한 정보의 부족으로 풍력발전사업의 구체성이 결여되고 경제성이 정확하게 예측되지 못하고 있다⁷⁾.

여기에서는 풍력에너지 개발 참여를 보다 활성화하기 위해 국내 최초의 민간투자 대단위 상업용 풍력발전단지인 영덕풍력의 개발 및 운영사례를 통해 사업타당성 조사에서 상업운전에 이르는 풍력발전단지

개발사업의 일반적인 절차를 알아보고 특히, 개발 및 운영과정에서 발생할 수 있는 문제점을 나열하고 그 해결방안을 제시코자 한다.

2. 풍력발전단지 개발 절차

풍력발전단지 개발절차가 갖는 의미는 두 가지로 요약할 수 있는데, 그 첫 번째는 대상지역의 기술적 적합성 및 풍력에너지 자원의 평가를 위한 일련의 과정이며, 두 번째는 풍력발전사업의 경제성을 검증된 방법과 절차에 따라 정확하게 예측하고 확인하는 일련의 과정으로, 여기에는 사업의 위험요소 분석 및 그 해결책을 모색하여 개발의 가능성을 다양한 관점에서 검토하고 협의하는 과정이 포함된다.

2.1 대상지역 선정 및 풍력자원 계측

2.1.1 후보지 선정

풍력개발의 첫 번째 단계는 현장답사를 통해 대상지역의 입지여건에 대한 평가와 기술적 타당성 및 환경영향 예비분석을 통하여 적절한 후보지를 선정하는 것이다.

-
- 1) 유니슨주식회사 기술연구소
E-mail : hbyun@unison.co.kr
Tel : (041)620-3413 Fax : (041)552-7416
 - 2) 유니슨주식회사 기술연구소
E-mail : jscho@unison.co.kr
Tel : (041)620-3427 Fax : (041)552-7416
 - 3) 유니슨주식회사 기술연구소
E-mail : jyryu@unison.co.kr
Tel : (041)620-3410 Fax : (041)552-7416
 - 4) 유니슨주식회사
E-mail : kimdh@unison.co.kr
Tel : (041)620-3456 Fax : (041)552-7416

1) 풍력자원 및 입지여건 평가
 발전단지 후보지 선정에 있어서 가장 중요한 요소는 단연 풍력자원이다. 일단 후보지로 물색되면 대상지역 주변의 이용가능한 모든 풍력자원 데이터 및 결빙, 낙뢰, 온도, 태풍 등 기상개황 자료를 수집한다. 이때 가능한 자료로는 기상대, 군사기지, 공항, 항만 및 관공서 등의 기상관측자료와 이전에 타 연구목적으로 수행된 계측자료가 있을 수 있다.

또한, 대상지역의 지형형상(Orography), 지표면 거칠기(Roughness), 토지이용상태(Obstacle, Dwelling, Ecology)등 지형조건을 분석하고, 대상지역에 맞는 분석·예측방법을 선정하여, 수집된 계측자료를 이용한 풍력자원의 예비 분석과 예측을 수행한다. 이때 가능한 자료로는 기상대, 군사기지, 공항, 항만 및 관공서 등의 기상관측자료와 이전에 타 연구목적으로 수행된 계측자료가 있을 수 있다. 또한, 대상지역의 지형형상(Orography), 지표면 거칠기(Roughness), 토지이용상태(Obstacle, Dwelling, Ecology)등 지형조건을 분석하고, 대상지역에 맞는 분석·예측방법을 선정하여, 수집된 계측자료를 이용한 풍력자원의 예비 분석과 예측을 수행한다. 이때 가능한 자료로는 기상대, 군사기지, 공항, 항만 및 관공서 등의 기상관측자료와 이전에 타 연구목적으로 수행된 계측자료가 있을 수 있다.

2) 기술적 타당성 평가

후보지 선정단계에서는 풍력자원 외에도, 건설을 위한 시공여건, 주변 전력계통망 및 연계점, 설비 및 자재 운반을 위한 도로망, 대상지역 부지 사용여건 등 건설을 위한 주변환경과 인프라 시설에 대한 검토를 통해 대상지역의 적절성을 파악 한다.

3) 환경영향 예비분석

또한, 부지선정 단계에서부터 환경적 영향을 고려해야 하는데 주변 거주지 현황, 자연보호문화재, 군사시설 및 통신·항공시설물에 의한 개발제한 그리고 타 기관에 의한 대상지역 개발현황 및 계획뿐 아니라 환경단체 또는 지역주민의 개발 동의를 얻기 위한 협의안도 고려해야 한다.

2.1.2 풍력자원 계측 및 분석

사업 후보지가 정해지면 대상지역에 대한 경제성 검토를 위해 풍력자원계측기를 직접 설치하여 계측을 수행한다. 이때, 고도별 계측을 통해 실제계측보다 높은 지점의 풍속을 유추해 낼 수 있지만 기본적으로 대상지에 설치될 풍력발전기 허브 높이에서 직접 측정하는 것이 바람직하며, 최소한 2/3높이에서 측정한다. 또한 풍속계 교정 및 계측방법, 데이터 저장방법 등은 MEASNET 및 IEC 규정에 따라 객관적인 방법과 절차를 따라야 한다. 측정기간은 계절별 영향을 포함하도록 1년 이상이 되어야 하며, 데이터 손실이 없는 연속적 자료 확보가 중요하다.

사업 후보지에서 직접 계측을 수행했다 하더라도 단기간의 자료이므로 20년간 운영될 풍력발전단지의 경제성 평가를 위해서는 장기간 보정(long-term correlation) 분석이 필요하다. 따라서 후보지 선정 단계에서 수집된 신뢰도 높은 기상관측 자료를 이용, 통계적 예측방법을 통한 장기간 풍속 보정 및 풍력에너지 자원 예측이 수행된다.

2.2 경제성 분석 및 위험요소 관리

2.2.1 경제성 분석 및 상세설계

1) 단지배치설계 및 기종선정

단지배치설계란 풍력자원 예측결과를 통해 에너지 생산량 및 단지효율(Park efficiency)이 최대 되도록 풍력발전기 배치를 최적화 하는 것이다. 이때, 대상지역의 풍향 및 기후조건(Site condition)에 적합한 풍력발전기 선별작업이 선행되어야 하며, 다수의 풍력발전기 기종에 대해 에너지 생산량

및 공급조건을 비교하고 경제성 분석을 통해 기종을 선정한다. 이때, 건설비용, 운반비용, 계통연계비용 등의 초기 투자비용과 금융비, 풍력발전기 O&M 비용, 토지임대 비용 등의 연간 비용도 경제성 분석에 함께 고려되어야 한다.

2) 상세설계 및 사업승인

풍력발전기 공급기종 선정이 완료되면 최종 단지 설계를 확정짓고, 건설을 위한 접근로 설계 및 설치공사 부지설계, 풍력발전기로부터 내부 변전실까지의 내부 케이블링 설계, 내부 변전실 위치 및 기기 설계 그리고 내부 변전실에서 송전선로 축 변전소까지의 선로 설계를 한다. 또한, 이때에는 풍력발전기와 송전선로에 의한 환경영향을 분석하고 그 저감대책을 수립해야 하며, 해당관청 사업승인을 얻어야 한다. 국내의 경우 풍력발전단지 사업 승인을 위해서는 도시계획법, 도로법, 사도법, 자연공원법, 국토이용관리법, 농지법, 산림법, 군사시설보호법, 군용항공기법, 초지법, 사방사업법, 광업법, 하천법, 매장묘지에 관한 법률 등 관련법 저촉사항에 대해 환경부, 관광부, 국방부, 지방정부 등의 관할 기관과 협의 과정을 거쳐야 하며, 개별법에 따라 독립적으로 협의 하거나 전원개발 특별법에 의해 산업 자원부에 일괄적으로 신청할 수도 있다.

3) 건설 및 운전

개발자는 모든 건설업무의 수행에 있어서 이전의 환경영향 검토와 사업허가 상의 조건과 의무를 이행해야 한다. 또한, 주변 지역주민의 피해를 최소화하는 방안을 강구해야 할 뿐만 아니라 지역주민을 비롯한 모든 관련 기관/협의체의 의견을 수렴하여 제기되는 모든 쟁점에 대해 해결책을 마련해야 한다.

2.2.2 위험요소 관리

풍력발전단지의 에너지생산량 및 사업의 안정성은 투자자와 은행은 물론 전력가격의 수준과 적용기간 등을 결정하는 정부 그리고 전력을 구매하는 송배전회사 등 사업 참여기관 모두의 이해관계가 얽혀 있는 사안이다. 따라서 객관적이고 표준화된 방법과 절차를 통하여 발전단지 개발사업의 위험요소를 분석하고 사업성을 구명해야 한다.

1) 에너지생산량 예측 불확도(Uncertainty)

에너지생산량은 발전단지 사업의 경제성을 판단하는 가장 중요한 요소이다. 그러나 예측과정에서 풍력에너지 자원 및 과대평가 될 수도 있으며 또는 풍력발전기 성능 및 풍력발전단지의 효율 미달로 인해 실제 에너지생산량이 경제성 평가 당시의 예측치보다 적을 수 있다. 이는 풍력발전사업의 큰 위험요소로서 예측과정의 불확도를 정확히 산정함으로써 사업성을 확보해야 한다. 아래 그림과 표에서 에너지생산량 예측의 일반과정과 불확도를 나타내었다.

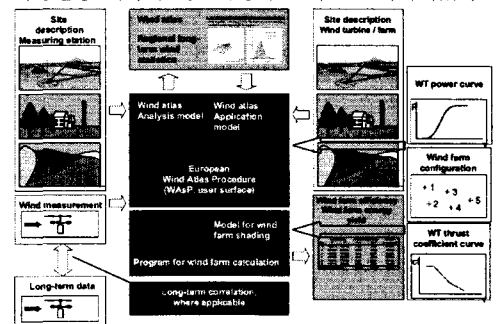


Fig.1: Schematic view of the application of the European Wind Atlas method

Table.1 : Typical uncertainty range in the energy yield⁵⁾

Process	Uncertainty component	Uncertainty range[%]
Wind measurement	Calibration of anemometer	0.5-3
	Selection of anemometer (Influence of vertical inflow and turbulence)	0.5-4
	Mounting of anemometer	0.2-3
	Selection of measuring site	0.5-5
	Selection of measuring period	0.3-3
	Data recording and evaluation	0-2
Wind field modeling	Terrain description (Roughness, Orography, Obstacle)	1-10
	Wind farm model(wake effect)	
WTG inform.	Power curve, Ct curve	3-7
Total Uncertainty		1.5-15.7
Uncertainty in terms of energy production		3-35

Source : DEWI Magazin

2) 프로젝트 위험요소

에너지생산량 예측을 통한 경제성이 증명된 풍력 발전 사업이라 할지라도, 프로젝트를 진행함에 있어 아래와 같은 위험요소는 산재하며, 이에 대한 관리와 대비책 마련은 사업의 안정성 확보를 위한 필수적인 과정이다.

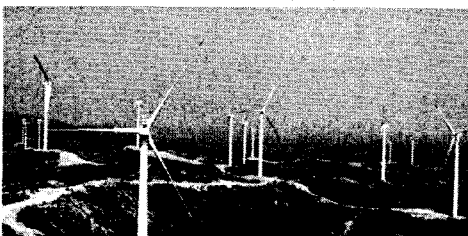
- ① 풍력발전기 사양, 공급계약
 - 풍력발전기 수명 및 안전성(WTG class)
 - 출력성능 및 가동률(Availability) 보증
 - 일반공급조건(공급기한 및 인도조건, 환율)
- ② 건설기간 중 위험요소
 - 운송, 건설시의 사고
 - 건설기간 및 상업운전 지연
 - 인허가 또는 부지확보
 - 자금조달 위험
- ③ 운영시 위험요소
 - 기술적 운전위험
 - 제도, 정치적 위험(가격, 구매)
 - 부지사용 및 환, 금융 위험

따라서, 풍력발전기 뿐 만아니라 운송-건설-계통 연계비, 운전유지비, 투자보수비, 보험 등 총 투입 비용과 투자비 회수기간, 금융이자 및 차입기간 등 금융조건을 포함한 전력판매 수익분석이 수행된다.

3. 영덕풍력발전단지 상업운전 현황

3.1 사업의 개요

위치 : 경북 영덕군 영덕읍 창포리 일대
 시설 규모 : 39.6MW(1650kW×24기, NMS2C(V82))
 예상 발전량 : 96,680MWh/년
 단지 가동율 : 27.9%
 예상 매출액 : 103.6억원/년
 투자 규모 : 약 675억원
 Site condition A : 7.8, k : 1.98
 Site specific certificate : DNV
 상업운전 개시일 : 2005년 3월 7일



3.2 영덕풍력발전단지 상업운전 결과

영덕풍력의 사업성 평가시, 연평균 풍속 6.9m/s, 에너지생산량은 불확도 14%를 적용한 신뢰도 해석을 수행하여 신뢰도 75% 및 송전손실(2%), 단지 이용율(97%)을 적용한 96,680MWh/yr로 예측되었다.

그러나 지난 1년간의 전력판매량은 예측치의 67%에 불과한 64,452MWh로 크게 미치지 못한다. 이에 대한 원인은 낮은 풍력자원과 풍력발전기 기기결함을 생각할 수 있다.

월별 전력판매량과 타당성조사 당시 예측된 전력생산량을 아래 표2에 비교하였다. 또한, 예측모델의 검증용 위하여 단지내에서 계측된 풍속데이터를 모델에 적용한 예측 전력생산량을 그림2에 도시하였다.

Table.2 : 전력판매량 및 예측 에너지생산량 비교

월	타당성 조사		상업운전 결과				예측량 대비 판매량(%)
	풍속	예측량	판매량	가동율	이용율		
5년4월	6.9	7,981	6.0	6,934	24.3	95.8	86.9
5월	7.1	8,496	5.0	4,361	16.5	97.3	57.3
6월	5.1	5,899	4.5	2,795	9.8	92.1	47.4
7월	5.5	6,574	4.4	2,367	8.0	92.2	36.0
8월	6.2	7,410	5.5	5,687	19.3	93.4	76.7
9월	7.1	8,212	5.4	4,334	15.2	95.0	52.8
10월	6.3	7,530	5.4	4,413	15.0	87.9	58.6
11월	7.33	8,444	6.0	4,358	15.3	64.9	51.6
12월	7.7	9,203	8.5	10,076	34.2	65.3	109.5
6년1월	8.6	10,279	6.3	5,955	20.2	66.3	57.9
2월	7.9	8,528	6.5	6,120	23.0	66.4	71.8
3월	6.8	8,128	6.0	6,553	22.2	77.9	80.6
평균	6.9	96,680	5.8	64,452	18.6	82.9	66.7
기기결함 정지시간 제외			23.3	98.8			83.5

단위 : 풍속[m/s], 예측량, 판매량[MWh], 가동율, 이용율[%]

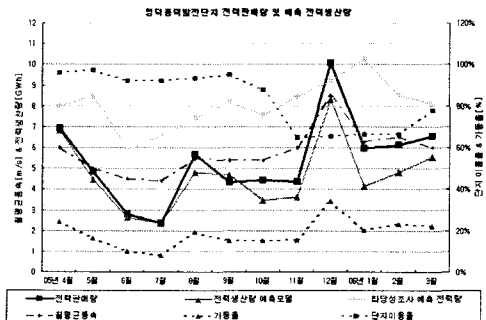


Fig.2 : 영덕풍력 전력판매량, 이용율 및 가동율

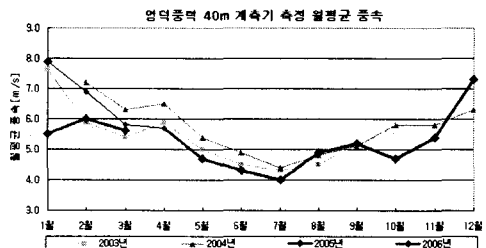


Fig.3 : 영덕풍력 단지내 40m 계측기 측정 월평균 풍속

나셀 풍속계 및 계측기는 블레이드 또는 풍력발전기의 후류와 난류의 영향권 안에 있기 때문에 정밀도를 보장할 수는 없다. 그러나 계측풍속의 불확실성을 고려하더라도 평균풍속은 5.8m/s로 예상치인

6.9m/s보다 16% 하회하였다. 이는 순수에너지 생산량에 있어 29%까지의 저조함을 유발할 수 있다. 특히 풍력에너지자원이 풍부한 겨울철(1월)에 풍속이 저조하여 전력판매량 감소에 크게 영향을 미쳤음을 알 수 있다.

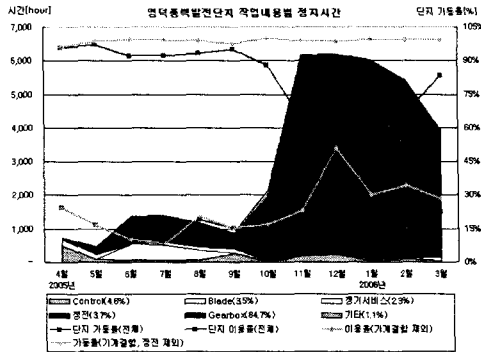
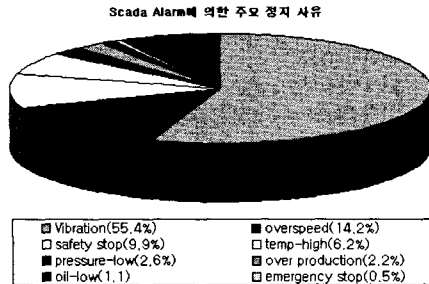


Fig. 4 : 작업내용별 정지시간, 이용률 및 가동율

상업운영기간 전체 정지시간의 85%를 차지하는 기기결합(기어박스)에 의해 이용률은 83%, 가동율은 18.6%에 불과했다. 그러나 기어박스 리콜로 교체 작업에 의한 정지시간을 제외할 때, 이용률은 제작사 보증치(97%)를 상회하는 98.8%임에도 가동율이 예상치(27.9%)를 하회하는 23.3%에 불과했다. 이는 낮은 풍력자원이 전력판매량 저조의 가장 큰 원인을 알 수 있게 한다.

기기결합을 제외한 운전제어에 의한 정지시간은 1.2%로 제작사 보증치를 만족하였다. 그러나 운전제어에 의한 정지도 운전초기인 4월에 주로 발생했으며(40%), 주요 원인은 기기결합으로 생각할 수 있는 블레이드 진동으로 이에 대한 개선작업이 이루어졌다.



이후의 제어정지는 기어박스 결함에 의한 과속 센서 동작(과열, 오일부족)등으로, 기어박스 교체와 함께 개선되고 있다. 즉, 제어정지가 1.2%에 불과하였지만, 상당한 원인이 기기결합에서 기인하였고, 운전 초기단계의 풍력발전기를 안정화시켜 정상운전하게 되면 제어정지로 인한 손실도 줄일 수 있을 거라 판단된다.

4. 결론

지난 1년간의 영덕풍력의 상업운영 실적은 평년보다 낮은 풍속과 풍력발전기 기기결합에 의한 운전시간 손실로 인하여 예상 전력생산량에 미치지 못하였다.

타당성 연구당시 주변 기상데이터와 상관관계가

낮아 장기간 풍속보정을 수행치 못하고, 5%의 불확도를 통해 장기간 풍력자원 변화에 대한 위험요소를 대비코자 하였다. 그럼에도 평균풍속은 예측치 대비 16%의 차이를 나타내었고, 기기결합에 의한 운전정지를 제외한 가동율(전력판매량)이 예측치 대비 83.5%라는 점에서 낮은 풍력자원이 전력판매량 저조의 주원인을 알 수 있다. 물론, 예측된 평균풍속은 풍력단지 운영기간(20년)의 전체 평균이므로, 1년의 운영결과만으로 평균풍속 예측의 정확성을 논하기엔 이른다. 또한, 현재의 계측기는 발전단지의 영향으로 인해 정밀도를 보장할 수 없다.

따라서, 향후, EWTC에 따르는 복잡지형에서의 출력성능 측정시, 풍속측정 및 풍력자원 변화에 대한 검토가 요구된다. 또한 영덕단지와 같이 복잡지형 또는 인근에 기상관측 지점이 없어서 상관성있는 기상자료의 수집이 어려운 경우, 장기간 풍력자원 예측 및 불확도 적용 연구가 요구된다.

단지 이용률에 가장 큰 손실 원인인 기어박스 교체작업은 2006년 5월 완료 되었으며, 기기결합에 의한 운전제어의 개선작업도 마무리 되었다. 그러나 블레이드 진동 및 회전속도 초과에 의한 운전제어 정지는 기기결합 뿐 아니라 영덕발전단지의 지형적 조건 및 발전기 배치에 의한 영향을 배제할 수 없다. 따라서, 복잡지형에서 난류와 발전기간 후류에 의한 운전제어 및 발전단지 효율에 미치는 영향도 향후 발전단지 정상 운영결과를 바탕으로 연구해야 할 과제로 남는다.

그러나 무엇보다도 풍력발전사업에 있어 성능이 입증된 풍력발전기를 적용하고, 보증조건에 의한 위험요소를 방지한다 하더라도, 공급되는 풍력발전기 제작사의 설비공장에서 검수 또는 제작공정의 감리 등 품질에 대한 사전확인 작업의 중요성이 부각되었다.

References

- [1] EWEA, "European Best Practice Guidelines for Wind Energy Development"
- [2] BWEA, 1994, " Best Practice Guidelines for Wind Energy development"
- [3] 김두훈, 류지윤, 홍승기, 2003, "국내 풍력발전단지 개발절차 및 표준 가이드라인 제정의 필요성", 한국풍력기술연구회 Workshop
- [4] 변효인, 류지윤, 김두훈, 2005, "풍력자원해석 및 에너지예측을 통한 풍력발전단지 설계연구", J. of KSNRE, Vol.1, No.2, pp.19~25, 2005
- [4] 김현구, 2005, "포항지역 풍속전단 형태분석과 측정-보정-예측법의 응용", J. of KSNRE, Vol.1, No.2, pp.26~33, 2005
- [5] M.Strack, W.Winkler, 2003, "Analysis of Uncertainties in Energy Yield Calculation of Wind Farm Projects", DEWI Magazin Nr.22, pp.52~62, 2003
- [6] H.Klug, 2002, "Contractual Issues Dealing with Energy Production Warranties", Global Wind Power Conference, 2002
- [7] 풍력기술개발사업단, 2004, "풍력에너지 기술개발 및 보급목표 달성을 위한 중장기 전략", 산업자원부, 2004
- [8] European Commission, "European Wind Turbine Standards II", ECN, 1998