

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 26, No. 2, 2006

월령단지 풍력발전 예보모형 개발에 관한 연구

김현구*, 이영섭**, 장문석***, 경남호***

*한국에너지기술연구원 풍력발전연구단 (hyungoo@kier.re.kr),

**동국대학교 통계학과 (yung@dongguk.edu),

***한국에너지기술연구원 (msjang@kier.re.kr / nhkyong@kier.re.kr)

A Study on Development of a Forecasting Model of Wind Power Generation for Walryong Site

Kim, Hyun-Goo*, Lee, Yeong-Seup**, Jang, Mun-Seok***, Kyong, Nam-Ho***

*Wind Energy Research Group, Korea Institute of Energy Research (hyungoo@kier.re.kr),

**Professor, Dept. of Statistics, Dongguk University (yslee0813@empal.com),

***Korea Institute of Energy Research (msjang@kier.re.kr / nhkyong@kier.re.kr)

Abstract

In this paper, a forecasting model of wind speed at Walryong Site, Jeju Island is presented, which has been developed and evaluated as a first step toward establishing Korea Forecasting Model of Wind Power Generation. The forecasting model is constructed based on neural network and is trained with wind speed data observed at Gosan Weather Station located near by Walryong Site. Due to short period of measurements at Walryong Site for training statistical model, Gosan Weather Station's long-term data are substituted and then transplanted to Walryong Site by using Measure-Correlate-Predict technique. One to three-hour advance forecasting of wind speed show good agreements with the monitoring data of Walryong site with the correlation factors 0.96 and 0.88, respectively.

Keywords : 풍력발전(Wind power generation), 예보모형(Forecasting model), 신경망회로(Neural network), 측정-상관-예측(Measure-Correlate-Predict)

1. 서 론

풍력발전이 전력시장에서 차지하는 비중이 증가

함에 따라 전체 전력계통 운영에 미치는 풍력발전의 영향에 대한 정밀한 고찰이 필요하게 되었다¹⁾. 이는 바람의 자연적 특성으로 인하여 풍력발전은

간헐적인(intermittent) 동력원인 관계로 기존의 발전방식과는 운영측면에 있어서 전력계통에 상이한 영향을 미치기 때문이다.

미국 내 풍력발전사업자의 전력계통 운영사례에 대한 최근의 종합적인 연구결과들에 의하면, 풍력발전의 공급비율이 증가할수록 계통운동을 위한 추가비용이 증가하며, 풍력발전예보를 포함하여 풍력발전의 계통운영에서 발생하는 여러 가지 불확도 요인을 제거하는 방법들은 실제로 발전사업의 경제성 향상에 분명한 도움이 된다는 결론을 제시하고 있다^{2) 3)}. 다만 현재로서는 풍력발전의 운영기간이 짧고 계통운영에 대한 다양한 연구사례가 부족하여 풍력발전 분담비율에 따른 계통부하의 상관관계 및 풍력발전의 도입에 따른 계통운영 추가비용이 일반적으로 정량화되었다고 할 수는 없겠으나 다수의 관련연구가 진행 중에 있음을 고려할 때 후발 주자인 우리나라로서는 근일 내에 이들 연구사례를 풍력발전 운영지침으로 활용할 수 있을 것이다.

풍력발전에 의한 전력공급량이 전력계통부하에 비하여 미미한 수준이라면 풍력발전의 입출력이 다소 변동하더라도 큰 문제가 되지는 않겠지만, 향후 풍력보급 확대에 의한 풍력분담비율(wind penetration rate)이 크게 상승할 경우에는 풍력의 간헐성을 보상할 수 있는 정확한 예보에 의한 계획된 수급조정이 반드시 필요하다는 것은 미국이나 유럽 등 풍력발전 선진도입국의 운영사례 및 연구결과로부터 확인되는 분명한 사실이다. 한편 유럽연합(EU)의 국가간 계통연계와 같은 계통부하

의 완충장치가 없이 단일 계통으로 구성된 우리나라의 전력계통은 간헐적인 발전원의 계획운영이 더욱더 요구되는 상황이다.

산자부의 「대체에너지이용 발전전력의 기준가격 지침」에 의하면 생산된 재생에너지는 고정단가로 판매되도록 규정되어 있다. 그런데 실제 전력수급 측면에서 보면 전력의 생산시점에 따라 전력공급의 효용가치는 큰 폭으로 차이가 있으며 실제로 이는 전력의 판매단가에도 그대로 반영된다. 따라서 장기적인 측면에서 볼 때 향후 풍력발전의 공급비중이 증가하게 되면 전력계통에 계획된 형태로 공급되도록 재설계되어 운영되어야 할 것이며, 이를 위해서는 전력공급 시점과 같이 전력수급 조건에 따라 차등화된 보상체계 도입 등의 제도적 보완과 더불어 풍력발전량을 사전에 예측할 수 있는 예보모형개발 등 기술적인 문제가 선결되어야 할 것으로 사료된다.

현재 국내 풍력발전단지 개발 활성화와 더불어 단지규모의 대형화 추세를 고려한다면 풍력발전 예보시스템은 조속히 구축되어야 할 것으로 판단되며, 이러한 배경 하에 본 연구에서는 풍력발전 예보시스템 개발의 첫 단계로 단기간(short-term) 풍력발전 예보모형을 구축하고 개발된 모형을 제주도 월령단지에 적용하여 예보 정확도 및 현장 적용성을 검토함으로써 향후 장기간(long-term) 풍력발전 예보시스템으로 발전시켜 나가기 위한 기반을 구축하고자 한다. 참고로 제주도는 풍력발전에 의한 전력공급 비율이 이미 1.6%에 이르고 있으며, 상업발전 중인 영덕풍력발전소와 강원풍력발전소의 설비용량은 각각 40MW와 98MW로 소규모 화력발전소에 상응하는 규모이다.

2. 풍력발전 예보모형 개요

유럽연합은 1997년 재생에너지 백서의 출간을 계기로 2010년 재생에너지에 의한 전력생산 비중을 12%로 증가시키기 위한 실천계획을 추진함에

- 1) Soens, J., Impact of Wind Energy in a Future Power Grid, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, Ph.D. Dissertation, 2005.
- 2) Parsons, B et al., Grid Impacts of Wind Power: A Summary of Recent Studies in the United States, Wind Energy. Vol. 7, No. 2, pp. 87-108, 2004.
- 3) Smith, J.C. et al., Wind Power Impacts on Electric Power System Operating Costs: Summary and Perspective on Work to Date, National Renewable Energy Laboratory, USA, NREL/CP-500-35946, 2004.

따라 특히 풍력발전의 보급 확대 및 기술개발이 가속화 되었다. 풍력발전의 보급이 확대되면서 앞서 설명한 바와 같이 풍력발전 예보시스템의 필요성과 중요성이 대두되어 2002년 10월부터 4년간 유럽 연합 7개국 공동으로 ANEMOS 프로젝트를 수행하고 있다⁴⁾. ANEMOS 프로젝트는 단일 풍력단지로부터 도서, 지역, 국가, 국가간 규모까지의 육·해상 풍력 발전을 모두 고려하되 최대 48시간 선형 예보에 대한 현수준 최상의 예보기술 개발과 예보시스템의 온라인 통합 운영을 연구목표로 설정하고 10개 실행분야로 세분하여 연구를 수행하고 있다.

이에 풍력발전 선진국의 풍력발전 예보시스템에 대한 선행연구를 면밀하게 고찰하고, 이를 바탕으로 국내의 개발환경 및 자연조건에 적합한 개발방향을 선택함으로써 국내에서도 단기간 내에 동등수준 이상의 예보모형을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

풍력발전량 예보시스템의 핵심은 풍력발전기가 설치된 위치에서의 정확한 풍속을 예측하는 것이다. 일반적으로 풍속 예보모형은 다음의 두 가지로 대별할 수 있다.

(1) 통계모형(statistical model): 다양한 통계적 기법을 이용하여 풍속을 예보하는 모형으로 1~6시간 이내의 단기간 예보에 적합하다.

(2) 물리모형(physical model): 중규모 기상 변화에 따라 국지적인 바람장 변동을 고려하는 기상물리학적 예보모형으로 6~8시간 이후의 장기간 예보에 적합하다.

통계모형은 국지규모 바람의 변동특성은 기본적으로 짧은 시간 내에서는 지속적(persistent) 성질을 유지하면서 무작위적인 변동이 포함된 형태라고 가정하여 이를 통계학적으로 예측하는 것이며, 물리모형은 수치기후예측(NWP: Numerical

Weather Predictions)에 의해 대기의 종관규모(synoptic scale) 변화를 고려하여 국지의 바람장(wind field)을 예측하는 방법이다. 일반적으로 대기의 종관규모 변화는 대략 6~8시간 간격으로 진행되며 일단 종관규모가 변화하면 국지적인 기상 통계학적 변동특성도 완전히 변화하기 때문에 통계모형의 시간적 예측한계는 종관규모 특성이 유지된다고 가정할 수 있는 6~8시간 이내로 제한적이다. 한편 수치기후예측에 의한 수치모의(numerical simulation) 결과에는 필연적으로 알고리즘의 오차, 입력자료의 오차 등이 포함되며 이러한 시스템적인 예측오차를 제거하기 위해서는 통계모형을 적용하는 경우도 많다.

ANEMOS의 풍력발전 예보모형 개발방향은 물리모형과 통계모형의 복합모형이며, 이는 단기간 및 장기간 육·해상 예보를 위해서는 필수적인 선택이라 할 수 있다. 한편 국지 풍속 예보모형으로는 전통적인 다중회귀(multiple regression) 보다는 신경망회로(neural network)와 자기회귀평균이동(autoregressive moving average) 모형이 가장 많이 사용되고 있는 것으로 조사되었다. 최근 들어 신경망회로 모형이 각광을 받고 있는데 이는 복잡한 구조를 가진 자료에서의 예측문제를 해결하기 위해서 사용되는 유연한 비선형 모형로, 입력인자 간, 또는 입력과 출력 간의 상호 인과관계가 불분명한 경우, 서로의 관계를 효율적으로 찾는 장점이 있기 때문이다. 그러나 신경망회로모형은 모형의 결과를 물리적으로 해석하기가 어렵기 때문에 시계열 변동에 포함된 물리적인 현상을 파악하는 목적으로는 적당하지 않다.

일반적으로 다양한 통계기법이 출현하게 된 계기는 모든 경우에 항상 우수한 통계모형은 존재하지 않으며, 자료의 특성이나 환경, 분석목적에 따라 적합한 알맞은 모형이 다르기 때문이다. 그러므로 최적의 예보모형을 구축하기 위해서는 다양한 형태의 통계기법 및 알고리즘을 적용하여 가장 적합한 모형을 찾는 학습경험이 무엇보다 중요하

4) Kariniotakis, G., et al., The ANEMOS Project: Next Generation Forecasting of Wind Power, Proceeding of DEWEC 2004, Germany, 2004.
<http://anemos.cma.fr>

다5). 따라서 실질적인 예보모형의 개발 및 운영측면에서는 다수의 예보모형을 복합적으로 사용하며 예보경험을 축적함과 동시에 학습진행에 따라 예보모형을 지속적으로 수정·보완하는 노력이 필요할 것으로 사료된다.

3. 한국형 풍력발전 예보모형

풍력발전예보에 대한 국내의 문헌조사와 해외사례 검토를 토대로 기상예보 및 기상통계 분야 전문가로 구성된 자문단의 기술자문을 거쳐 구상한 한국형 풍력발전량 예보모형의 구성은 그림 1과 같다.

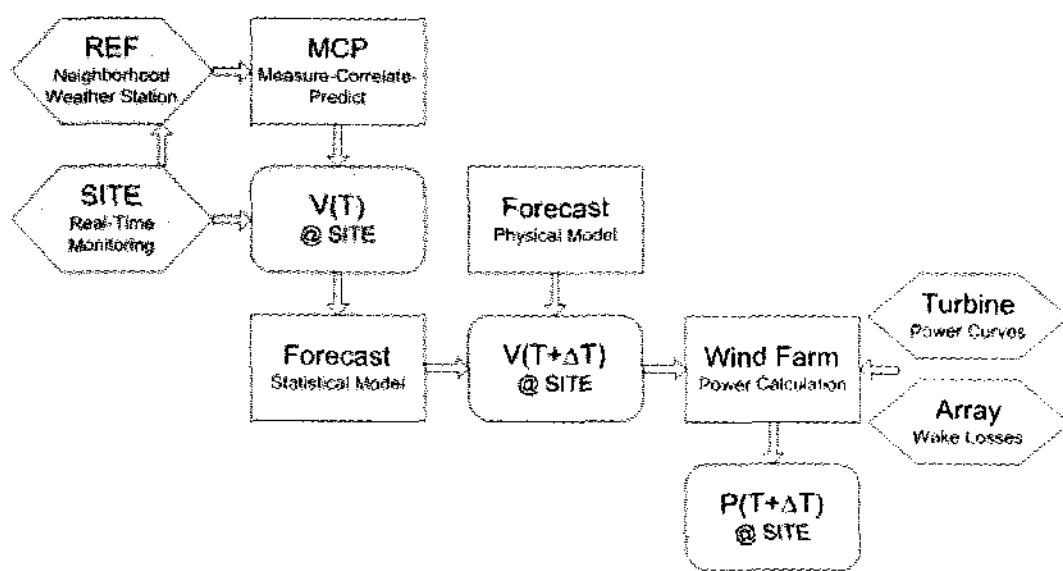


그림 1. 한국형 풍력발전 예보모형의 구성도

한국형 풍력발전량 예보모형의 구상을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

실시간 원격 모니터링에 의하여 풍력발전단지(SITE)에서 현재시각 T일때의 풍속인 V(T)와 현재 풍력발전량 P(T)의 정보가 예보시스템에 입력된다. 한편 통계모형의 운영을 위해서는 일반적으로 장기간의 학습자료가 필요하지만, 국내 풍력발전단지의 경우 가동경력이 짧은 관계로 인근 기상관측소(REF)의 장기간 관측자료를 차용하여 통계모형의 입력자료로 활용할 수 밖에 없다. 또는 풍황자료에 결측이 발생하거나 오작동 등에 의한 체계적인 오차가 포함되는 경우에도 인근 기상관측소

의 관측자료를 이용하여 현장 측정자료를 보정할 필요성이 발생하며, 이러한 경우 측정-상관-예측(MCP; Measure-Correlate-Predict) 방법을 사용한다.

통계모형에 의해 풍력단지에서의 일정시간(dT) 이후의 미래풍속 V(T+dT)를 예측하게 되면 풍력발전단지의 레이아웃(layout)을 적용하여 최종적으로 풍력발전량 P(T+dT)를 예측하게 된다. 이때 풍력발전단지를 구성하는 풍력발전터빈의 기종별 출력곡선(power curve)과 풍력발전터빈 배열에 따른 개별 풍력발전터빈에 작용하는 풍속과 후류손실(wake loss) 등을 계산하기 위한 모듈이 별도로 적용된다.

현 단계에서 물리모형으로는 기상청 수치기후예보에 의한 3시간 선행예보를 참조하되 향후 풍력발전 예측용으로 특화된 고정밀도 물리모형을 적용하여 상세화하여야 할 것이다. 통계모형은 현재 다중회귀모형, 신경망회로모형, 자기회귀평균이동모형 등 다양한 통계모형을 적용하고 이들 간의 체계적인 오차분석으로 조건별 최적통계모형을 선정하는 과정을 거치게 된다6).

본 연구에서는 한국형 풍력발전량 단기간 예보모형의 초기모형을 개발하고 이를 현장에서 검증함과 동시에 학습경험을 축적하기 위하여 제주도 월령단지를 현장적용 대상으로 선정하였다. 본 연구에서 채택한 제주도 월령단지 풍력발전량 예보모형의 개발전략은 다음과 같다.

(1) 선행연구를 통하여 제주도 월령단지에 구축된 실시간 원격모니터링 정보를 이용하여 풍력발전량 예보결과를 인터넷 웹페이지를 통하여 실시간으로 정보를 제공한다.

(2) 월령단지 현장의 기상관측 경력이 짧기 때문에 인근 기상관측소의 장기간 관측자료를 이용하는 측정-상관-예측법을 적용한다.

5) 손전태, 기상 및 환경자료 분석을 위한 통계적 기법, 한국기상학회지, 34권 3호, pp. 497-504, 1998.

6) 문승의, 김백조, 박태욱, 시계열 모형을 활용한 풍속의 수치모의와 예보, 한국기상학회지, 34권 1호, 1998.

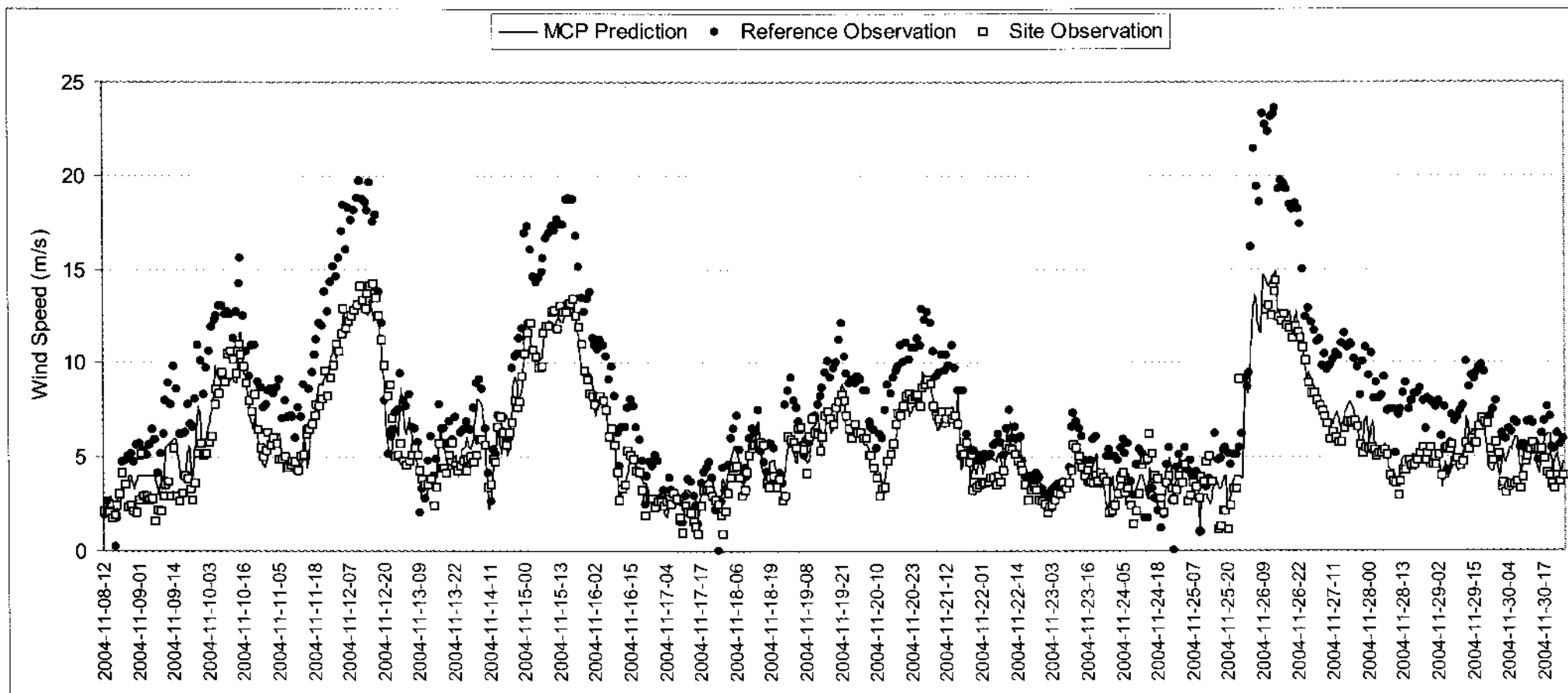


그림 2. 측정-상관-예측에 의해 보정된 월령단지의 풍속

(3) 풍력발전단지의 복합적인 교란요인, 즉, 배열효과를 배제하여 통계모형 자체의 검증이 가능한 단일 풍력발전기가 설치된 제주도 월령단지에서 출발하여 점차적으로 실제적인 풍력단지의 상황을 적용시켜 나간다.

4. 제주도 월령단지 적용사례

4.1 제주도 월령단지 개요

한국에너지연구원의 제주도 월령단지는 풍력발전기 성능평가 및 실증연구를 위하여 제주도 북제주군 한림읍 월령리(33°22'54"N, 126°13'2"E)의 해안평지에 조성되었으며 현재 100kW 풍력발전기가 설치되어 있다. 그런데 단지 내에 설치된 30m 높이의 기상측정탑에서 확보된 기상자료는 약 9개월(2004년 9월 1일부터 2005년 6월 3일까지)의 단기간이며 낙뢰에 의한 결측값도 포함되어 있어 통계모형의 학습에 충분한 기간이 되지 못한다. 이에 본 연구에서는 인근의 기상청 고산 기상관측소의 장기간 기상자료(1999년 1월 1일부터 2005년 5월 18일시까지)를 이용하여 풍속 예보모형을 구축하고 월령단지와 고산 기상관측소 간의 기상학적 상관성을 고려하여 구축된 예보모형을 월령단지에 이식하는 순서로 모델을 개발하였다. 한

편 고산 기상관측소에서의 풍속 예보모형을 구축함에 있어 총 자료의 70%는 모형구축(training)에, 30%는 모형검증(test)에 사용하였으며 최종적인 모형평가(validation)는 모형을 이식한 후 월령단지의 기상자료를 적용하여 수행하였다.

4.2 측정-상관-예측법의 적용

측정-상관-예측(Measure-Correlate-Predict) 방법은 두 지점간의 기상자료를 통계적 상관분석법으로 보정함으로써 장기간 풍속변화를 예측하기 위하여 개발된 방법으로, 본 연구에서는 선행연구의 검토결과를 참조하여 정확도가 우수한 것으로 입증된 행렬방법을 적용하였다⁷⁾.

그림 2는 측정-상관-예측법에 의하여 제주고층 기상자료로부터 재구축된 월령단지에서의 풍속의 시간변화를 도시한 그래프로, 측정-상관-예측법에 의한 보정풍속이 월령단지에서 실측된 풍속변동을 매우 정확하게 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 참고로 제주고층 풍속과 월령단지 풍속의 상관도는 0.82이었으나 측정-상관-예측법을 적용함으로써 상관도를 0.92로 향상할 수 있었다.

7) 김현구, 포항지역 풍속전단 형태분석과 측정-상관-예측법의 응용, 한국신재생에너지학회지, 1권 2호, pp. 26-33, 2005.

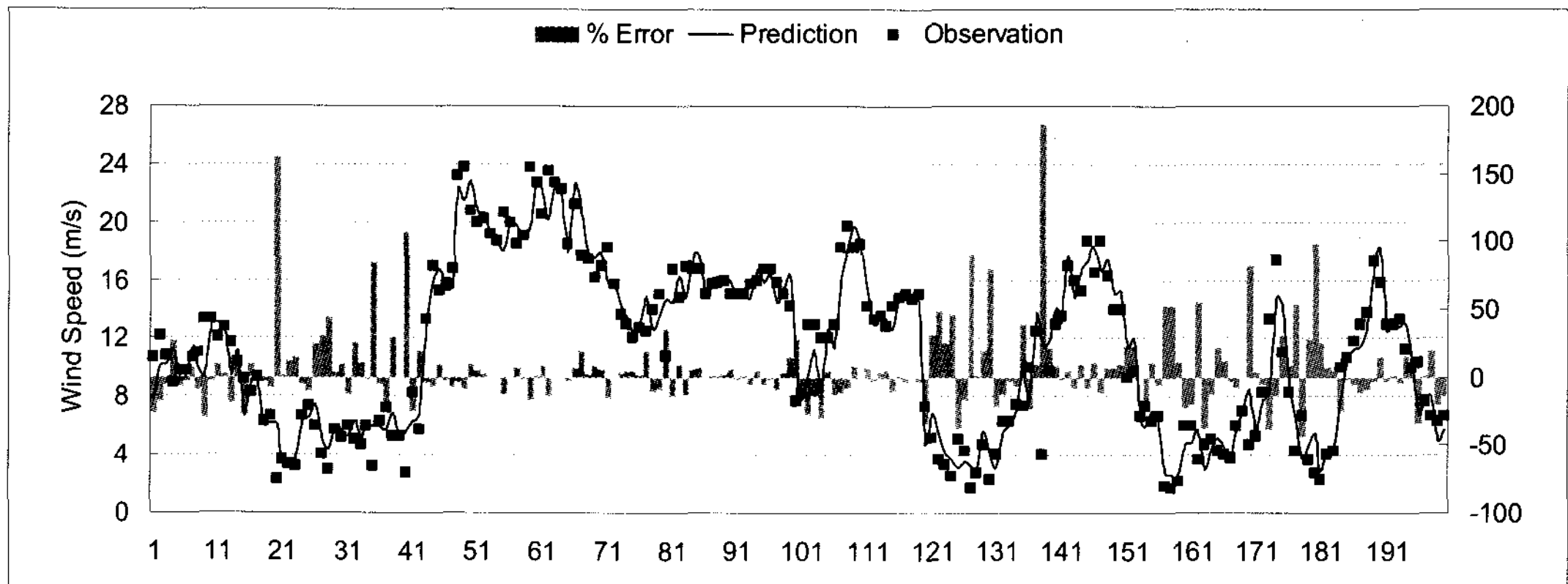


그림 3. 개발된 신경망회로 풍속예보와 제주고층 기상관측소 관측결과와의 비교

4.3 신경망회로모형에 의한 풍속예보

본 연구에서는 최근 풍력발전 예보모형으로 주목 받고 있는 신경망회로(neural network) 모형을 채택하였다^{8) 9)}. 신경망회로 모형은 풍속예보 뿐만 아니라 대기오염도 예보와 같은 기상요소의 예측에서도 신뢰성 높은 결과를 보여주고 있다¹⁰⁾.

그림 3은 신경망회로 예보모형의 구성도를 보여 주고 있는데, 두 시간 전 풍속인 $V(T-2)$, 한 시간 전 풍속인 $V(T-1)$ 두 개의 입력변수를 이용하여 현재시각의 풍속 $V(T)$ 를 목표변수로 산출하기 위하여 하나의 은닉층(hidden layer)으로 구성된 전방향(feed forward) 신경망회로를 구성하였으며, 은닉층 내에서는 로지스틱 함수(logistic function)에 의해 풍속변화의 특성을 유기적으로 판별하여 풍속을 예측하도록 하였다. 그리고 3시간 선행예보의 경우에는 독립변수로 세 시간 전 풍속 $V(T-3)$ 을 추가로 사용하였다. 신경망회로 모형을 이용한 일별, 주별, 월별 풍속예보 연구사례에 의하면¹¹⁾ 신경망회로모형이 자기회귀평균이동모형

보다 예측정확도가 다소 높았지만 전방향 신경망회로 모형과 이보다 복잡한 회귀모형(recurrent) 간에는 큰 차이가 없었음을 보고하고 있다.

한편 신경망회로 모형은 풍속의 계절변동이나 일간 변동특성을 은닉층 내에서 접점을 자동적으로 구성하여 고려한다는 장점이 있는 반면 주기변동을 모형 내부에서 어떠한 수리물리적 방식으로 모형화 하는지를 파악하기가 힘들다는 단점이 있다.

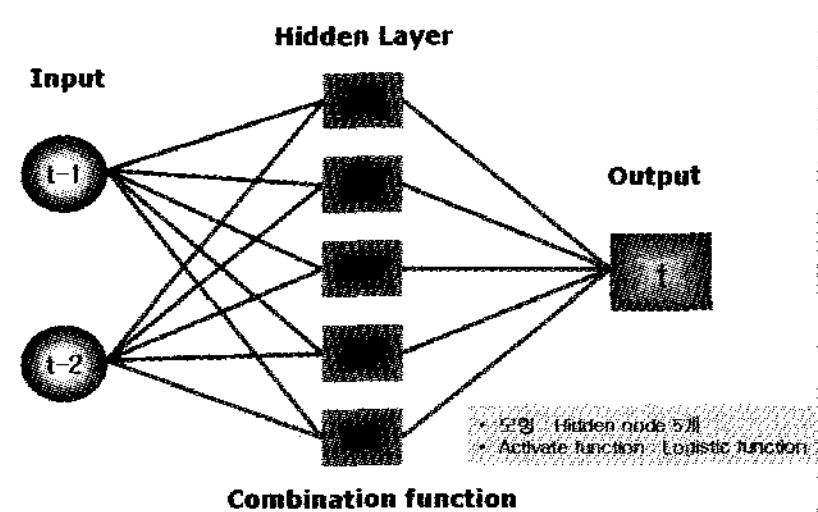


그림 4. 신경망회로 예보모형의 구성도

그림 4는 구축된 신경망회로 예보모형에 의한 제주고층 기상관측소에서의 풍속 예측값과 실제 측정결과와의 시계열 비교를 보여주는 그래프이다. 이 경우는 1시간 선행예보인 관계로 예측과 실측의 상관도는 0.95로 매우 높지만 풍속예보의 시간간격

8) Barbounis, T.G. and Theocharis, J.B., Locally Recurrent Neural Networks for Long-Term Wind Speed and Power Prediction, Neurocomputing, 2005.
 9) Goh, S.L. et al., Complex-Valued Forecasting of Wind Profile, Renewable Energy, 2005.
 10) 이영섭, 김현구, 박종석, 김희경, 변수변환을 통한 포항지역 미세먼지의 통계적 예보모형에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 22권 3호, 2006

11) More, A. and Deo, M.C., Forecasting Wind with Neural Networks, Marine Structures, Vol. 16, pp. 35-49, 2006.

이 증가하면 예측정확도는 상당히 낮아질 것으로 예상된다. 한편 그림 4에서 예측값과 관측값의 오차를 백분율로 나타낸 막대그래프를 같이 도시하였는데, 오차가 크게 발생하는 시점을 살펴보면 주로 풍속증감의 급격한 변곡시점에 해당됨을 알 수 있다. 따라서 예보시점이 멀어지게 되면 될수록 이러한 변곡특성의 추종이 어려워져 예측오차는 증가하게 됨을 예상할 수 있다.

그림 5는 예측과 실측 간의 오차분포를 나타낸 히스토그램으로, $\pm 2\text{m/s}$ 이내의 예측오차가 83%로 대부분을 차지하는 것으로 분석되었다.

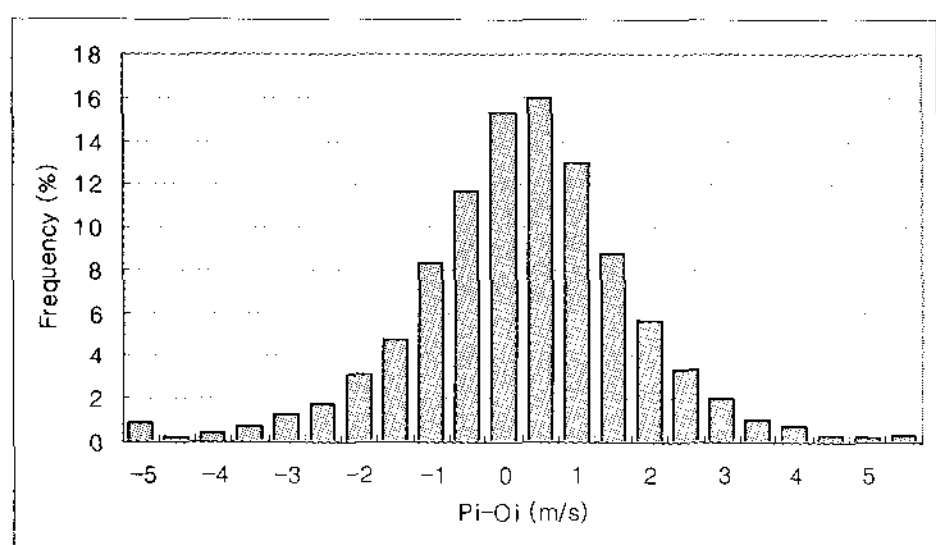
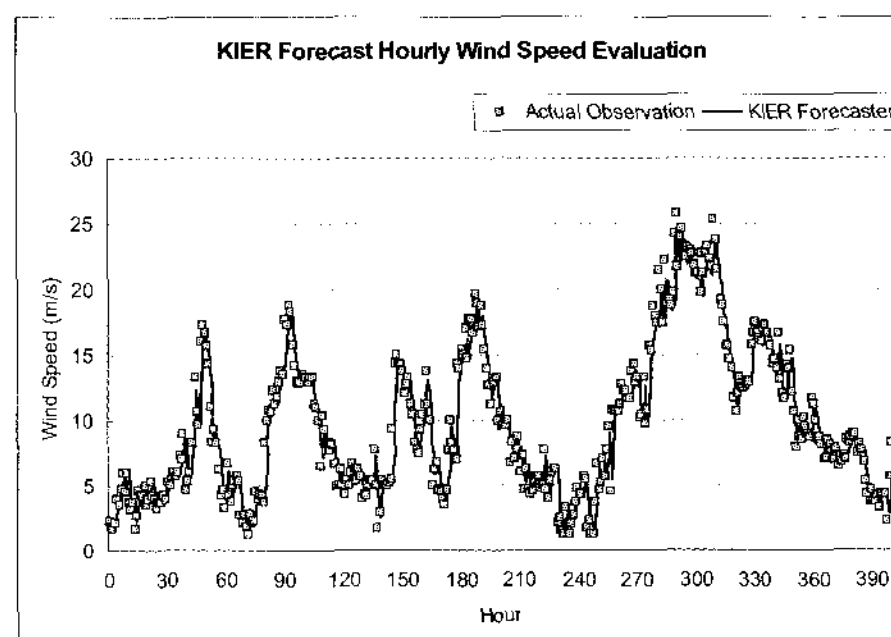


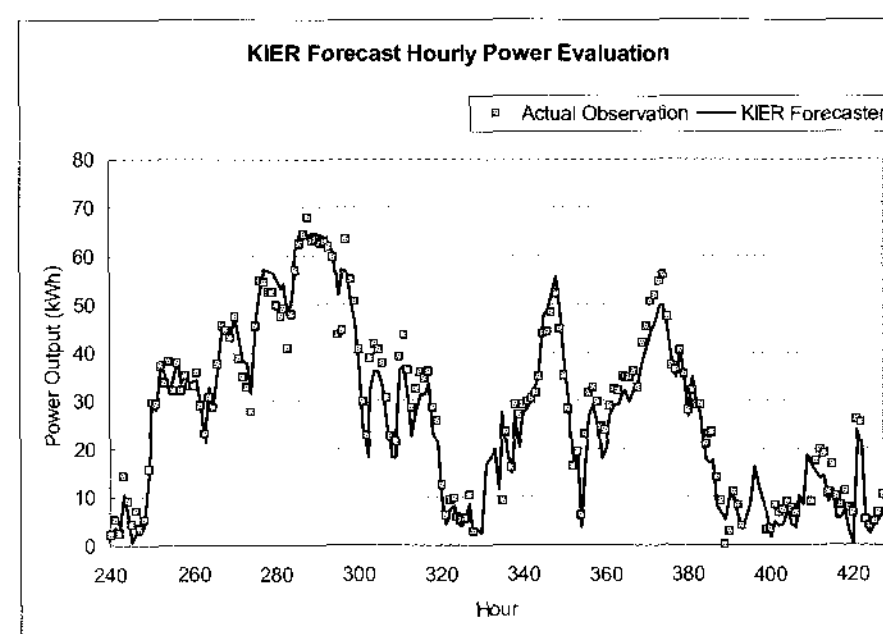
그림 5. 예측오차의 구간별 빈도분포도

마지막 단계로 제주고층 기상자료에 대하여 구축된 풍속 예보모형을 월령으로 이식하여 월령단지의 풍속 예보모형을 구축하게 된다. 이때 앞서 수행된 MCP 결과 중 풍속의 상관계수만을 이용하여 예보모형을 이식하였다.

그림 6 (a)는 월령단지에서의 평가용 기상자료에 대한 예보모형의 적합결과로 이 경우에도 풍속 예보값과 관측값의 상관도는 1시간 선행예보의 경우 0.96, 3시간 선행예보의 경우 0.88로 매우 높게 나타났는데, 이는 제주고층 지점의 기상대표성이 확실하기 때문에 이식된 예보모형의 예보정확도가 그대로 유지되는 것으로 판단된다. 그림 6 (b)는 풍속 예보결과로부터 예측한 100kW 풍력발전기의 발전량과 실제 발전기록을 비교한 것으로, 예보 결과는 80% 신뢰구간에서 MAE(Mean Absolute Error) 15% 이내로 우수한 것으로 평가되었다.



(a) 시계열 풍속의 비교



(b) 시계열 발전량의 비교

그림 6. 월령단지로 이식된 신경망회로 예보값과 월령단지에서의 측정값 비교

5. 결 론

본 연구에서는 향후 육·해상 풍력발전단지에 적용될 풍력발전 예보모형의 개발을 위해 해외의 선례를 종합적으로 분석하고 국내의 특수성을 고려하여 한국형 예보모형을 구상하였으며, 모형개발의 첫 단계로 제주도 월령단지에 대한 풍속 예보모형을 구축하고 관측자료를 이용하여 검증하였다. 이하 본 연구결과를 요약·정리하면,

- (1) 제주도 월령단지 풍속 예보모형을 구축함에 있어서 측정-상관-예측(MCP)을 이용하여 인근 고산 기상관측소의 5년 6개월간의 풍속자료를 통계모형 구축에 적용할 수 있도록 변환하는 방법을 도입하여 짧은 기상관측 자료만 확보가능한 풍력발전단지의 한계

성을 해결할 수 있었다.

- (2) 풍속 예보모형을 구축함에 있어 1개의 은닉층을 갖는 전방향(feed forward) 신경망회로를 채택하였고 독립변수로 1~3시간 이전 풍속을 사용하여 1~3시간 이후 풍속을 예보하도록 모형을 구축하였다.
- (3) 70%의 기상자료로 예보모형을 구축하고 나머지 30%의 검증한 결과, 1시간 및 3시간 선행예보의 경우 예보풍속과 관측풍속의 상관계수는 각각 0.96과 0.88로 우수한 적합성을 보였다.
- (4) 제주도 월령단지의 100kW 풍력발전기 운영에 본 예보모형을 적용한 결과, 80% 신뢰구간에 MAE 15% 이내의 우수한 예보 정확도를 나타내는 것으로 확인되었다.

본 연구에 의해 개발된 신경망회로 예보모형에 의한 1시간 및 3시간 선행예보는 매우 정확한 정확도를 보였으므로, 이를 기본으로 기상청 국지 기상예보를 반영하여 정확도를 향상시킴과 동시에 예보시점도 3~6시간에서 일간, 주간, 월간으로 확장시켜 나가고자 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 연구비 지원으로 수행되었으며(과제명: 해상풍력 실증연구단지 조성, 과제번호: 2005-N-WD11-P-01-0-000) 개발된 풍력발전 예보모형은 특허출원 되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김현구, 포항지역 풍속전단 형태분석과 측정-상관-예측법의 응용, 한국신재생에너지학회지, 1권 2호, 2005.
2. 문승의, 김백조, 박태욱, 시계열 모형을 활용한 풍속의 수치모의와 예보, 한국기상학회지, 34권 1호, 1998.

3. 손건태, 기상 및 환경자료 분석을 위한 통계적 기법, 한국기상학회지, 34권 3호, 1998.
4. 이영섭, 김현구, 박종석, 김희경, 변수변환을 통한 미세먼지(PM10)의 통계적 예보모형에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 22권 3호, 2006.
5. Barbounis, T.G. and Theocharis, J.B., Locally Recurrent Neural Networks for Long-Term Wind Speed and Power Prediction, Neurocomputing, 2005.
6. Goh, S.L. et al., Complex-Valued Forecasting of Wind Profile, Renewable Energy, 2005.
7. Kariniotakis, G., et al., The ANEMOS Project: Next Generation Forecasting of Wind Power, Proceeding of DEWEC 2004, Germany, 2004.
8. More, A. and Deo, M.C., Forecasting Wind with Neural Networks, Marine Structures, Vol. 16, 2003.
9. Parsons, B., Milligan, M., Zavadil, B., Brooks, D., Kirby, B., Dragoon, K., Caldwell, J., Grid Impacts of Wind Power: A Summary of Recent Studies in the United States. Wind Energy. Vol. 7, No. 2, pp. 87-108, 2004.
10. Smith, J.C., DeMeo, E.A., Parsons, B., Milligan, M., Wind Power Impacts on Electric Power System Operating Costs: Summary and Perspective on Work to Date, National Renewable Energy Laboratory, USA, NREL/CP-500-35946, 2004.
11. Soens, J., Impact of Wind Energy in a Future Power Grid, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, Ph.D. Dissertation, 2005.