

NCAR 재해석 자료를 이용한 극한풍속 예측

An Estimation of Extreme Wind Speeds Using NCAR Reanalysis Data

김 병 민* 김 현 기* 권 순 열* 유 능 수** 백 인 수***
Kim, Byung-Min Kim, Hyun-Gi Kwon, Soon-Yeol Yoo, Neung-Soo Paek, In-Su

Abstract

Two extreme wind speed prediction models, the EWM(Extreme wind speed model) in IEC61400-1 and the Gumbel method were compared in this study. The two models were used to predict extreme wind speeds of six different sites in Korea and the results were compared with long term wind data. The NCAR reanalysis data were used for inputs to two models. Various periods of input wind data were tried from 1 year to 50 years and the results were compared with the 50 year maximum wind speed of NCAR wind data. It was found that the EWM model underpredicted the extreme wind speed more than 5 % for two sites. Predictions from Gumbel method overpredicted the extreme wind speed or underpredicted it less than 5 % for all cases when the period of the input data is longer than 10 years. The period of the input wind data less than 3 years resulted in large prediction errors for Gumbel method. Predictions from the EWM model were not, however, much affected by the period of the input wind data.

키워드 : 극한풍속, NCAR재해석자료, Gumbel분포

Keywords : *Extreme Wind Speed, NCAR Reanalysis Data, Gumbel Distribution, IEC 61400-1 EWM (Extreme Wind Speed Model)*

1. 서론

화석연료의 사용과 자원의 유한성으로 인해 최근 들어 대체에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 화석연료를 사용하는 과정에서 다량의 이산화탄소가 배출되기 때문에 세계 각국은 지구 온난화를 일으키는 이산화탄소의 배출을 효율적으로 감소시킬 수 있는 에너지 개발 및 보급에 박차를 가하고 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위한 신재

생 에너지기술로서 풍력발전 기술은 높은 효율과 내구성으로 세계적으로 각광받고 있다[1].

환경변화에 대한 국제적 관심, 유가상승 등의 요인과 더불어 인해 자원에너지의 대부분을 수입하는 우리나라의 경우 대체에너지에 대한 연구가 가장 필요한 상황이다. 또한 우리나라의 경우도, 과도한 온실가스 배출로 인해 국제기후변화협약에 따라 온실가스 감축의무를 지게 될 전망이기 때문에 친환경 에너지의 사용이 더욱 증가되고 있다 [2]. 이에 따라 국내에서 풍력발전에 대한 관심이 커지고 있으며 현재 풍력발전단지 건설을 위한 많은 연구가 진행되고 있다[3]-[5].

이렇게 풍력발전단지를 건설하는데 있어 중요한 요소 중 하나는 풍력발전기의 구조적 안정성을 확

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과
** 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 교수
*** 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 교수, 공학박사, 교신저자

보하는 것이다. 우리나라는 하계에 주기적으로 태풍이 부는 바람특성을 가지고 있다. 따라서 풍력발전기의 안정성을 확보하기 위해서는 풍력발전기가 설치될 지점의 극한 풍속을 예측하는 것이 필요하다.

하지만 이는 지역과 계절에 따라 매년 달라지는 바람 특성을 가지고 있기 때문에 이런 다양한 바람특성을 예측하기는 매우 힘든 편이다.

정확한 극한풍속의 예측을 위해 국가바람지도 자료나 기상관측자료 또는 태풍 자료를 사용한 연구들이 수행되어 왔다[6]~[8]. 이런 연구들은 대부분 5년 이하의 비교적 짧은 기간의 데이터를 사용하거나 태풍이라는 바람특성만을 고려해서 해석을 수행하였다. 따라서 예측된 극한풍속을 장기간동안 측정된 실제 풍속과 비교하여 검증하는 연구는 이루어지지 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 장기간에 대해 이용가능한 NCAR 재해석 자료를 이용하여 IEC 61400-1의 Extreme Wind speed Model (EWM)과 Gumbel분포 (Gumbel Distribution)를 적용하여 극한풍속을 예측해보고자 한다.

이를 위해, NCAR 재해석자료를 다양한 기간으로 나누어 극한풍속을 예측하고, 그 결과를 50년동안 측정된 NCAR 재해석 자료의 최대풍속과 비교 분석하여 예측오차를 알아보았다. 또한 형상계수에 따라 적합한 극한풍속 방법을 제시하였다.

2. NCAR 재해석 자료

본 연구에서 극한풍속의 예측을 위해 사용되어진 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 재해석 자료는 미 국립 기상연구소에서 기록되며 약 200km에서 250km의 이격거리를 두고 세계 전역에 걸쳐 존재한다. 이중 우리나라 지역에 적용 가능한 NCAR 데이터는 총 6곳이며 각각의 위치는 그림 1에 제시되었다.



그림 1. The Information of NCAR Data

극한풍속을 예측하기 위해 사용된 NCAR 데이터는 지면/해수면으로부터 42m 높이에서 기록된 데이터를 사용하였으며 6시간의 간격을 갖는 풍속 자료이다.

본 연구를 수행하기 위해 NCAR 데이터를 각각 1년, 3년, 5년, 10년, 20년, 30년, 40년, 50년으로 나누어 계산을 수행하였고, 이를 1961년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지 총 50년 동안의 NCAR 데이터와 비교하였다. 해석에 사용된 데이터의 기간과 Weibull parameter는 표 1과 표 2에 제시되었다.

표 1. Case description

Case	Period
1	2010.1.1 ~ 2010.12.31 (1 year)
2	2008.1.1 ~ 2010.12.31 (3 year)
3	2006.1.1 ~ 2010.12.31 (5 year)
4	2001.1.1. ~ 2010.12.31 (10 year)
5	1991.1.1 ~ 2010.12.31 (20 year)
6	1981.1.1 ~ 2010.12.31 (30 year)
7	1971.1.1 ~ 2010.12.31 (40 year)
8	1961.1.1 ~ 2010.12.31 (50 year)

표 2. Weibull parameter of each data

Case	NCAR1		NCAR2		NCAR3	
	C [m/s]	k	C [m/s]	k	C [m/s]	k
1	5.93	1.95	4.69	1.72	7.04	1.77
2	5.77	1.95	4.64	1.76	6.80	1.79
3	5.77	1.93	4.74	1.74	6.80	1.78
4	5.78	1.92	4.82	1.76	6.99	1.81
5	5.68	1.92	4.75	1.76	6.90	1.82
6	5.70	1.91	4.73	1.74	6.80	1.80
7	5.79	1.88	4.83	1.70	6.84	1.80
8	5.86	1.89	4.92	1.70	6.90	1.81
Case	NCAR4		NCAR5		NCAR 6	
	C [m/s]	k	C [m/s]	k	C [m/s]	k
1	6.85	1.88	5.60	1.99	6.35	1.78
2	6.68	1.92	5.47	1.97	6.08	1.78
3	6.57	1.89	5.48	1.91	6.10	1.78
4	6.55	1.86	5.51	1.87	6.13	1.76

5	6.64	1.87	5.56	1.83	6.03	1.73
6	6.75	1.89	5.61	1.82	5.95	1.71
7	6.88	1.88	5.78	1.80	6.04	1.72
8	7.00	1.91	5.90	1.80	6.12	1.73

3. 극한풍속 예측 방법

NCAR 데이터를 이용하여 극한풍속을 예측하기 위해 Gumbel 분포 방법과 IEC 61400-1에서 제시된 Extreme Wind Speed Model 을 적용하여 비교하였다.

3.1 Gumbel Distribution

극치분포 중 하나로써 극한풍속을 예측하는데 가장 적합한 것으로 알려진 Gumbel 분포는 아래와 같은 확률분포로 나타낸다[9]~[11].

$$F(V) = \exp[-e^{-(V-\alpha)/\beta}] \quad (1)$$

여기서, $F(V)$ 는 극한값의 확률밀도함수, V 는 극한값, α 는 location parameter 그리고 β 는 scale parameter이다. 위의 식에서 분포형의 특성값인 α , β 는 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있으며 각 기간에 따라 나누어진 표본개수를 사용하였다.

$$\alpha = \mu - 0.45\sigma \quad (2)$$

$$\beta = 0.78\sigma \quad (3)$$

여기서 μ 는 표본집단의 평균값, σ 는 표본집단의 표준편차 이다.

이때, 재현기간 T년에 발생 가능한 재현기대 풍속 $V(T)$ 는 아래 식과 같이 나타낸다.

$$V(T) = -\beta \cdot \ln\left[\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right] + \alpha \quad (4)$$

본 연구에서는 월 최대풍속을 이용하였기 때문에 T년에 대한 재현기간을 12T로 나타내어 극한풍속을 예측하였다.

3.2 IEC 61400-1 Extreme Wind Speed Model

국제 인증규격인 IEC61400-1에서는 극한풍속을 예측하고 풍력발전기의 등급을 결정하기 위해 Extreme Wind Speed Model (EWM)을 사용한다 [12].

EWM을 계산하기 위해 기준풍속(reference wind speed, V_{ref})를 사용하고 이때 V_{ref} 는 (5)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ref} = 5 V_{ave} \quad (5)$$

여기서, V_{ave} 는 풍력발전기 허브(Hub)높이에서의 평균풍속(m/s)이다.

그리고 V_{ref} 를 이용하여 z 높이에서 50년 주기를 갖는 극한풍속 V_{50} 은 (6)식과 같이 주어진다.

$$V_{50}(z) = V_{ref} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{0.11} \quad (6)$$

여기서, z_{hub} 는 풍력발전기 허브 높이이다.

EWM은 일반적으로 풍력발전기 허브높이에서의 극한풍속을 예측하지만 본 연구에서는 극한풍속을 예측하여 NCAR 재해석 데이터와 비교할 것이기 때문에 z 와 z_{hub} 의 높이를 NCAR 재해석 데이터의 높이(42m)와 동일하게 놓고 계산을 수행하였다. 또한 V_{ave} 도 발전기 허브높이의 평균풍속이 아닌 NCAR 재해석 데이터의 높이에서의 평균풍속을 사용하였다.

4. NCAR 재해석자료 적용타당성

본 논문에서는 예측된 극한풍속과 실측된 최대풍속을 서로 비교하여 예측오차의 추이를 알아보는 것이 목적이기 때문에 6시간 간격으로 측정된 데이터를 사용하였다. 하지만 극한풍속을 예측하기 위해서는 10분 평균된 풍속데이터를 사용하는 것이 일반적이다.

따라서 NCAR 재해석자료를 이용한 극한풍속 예측의 적용타당성을 알아보기 위해 6시간 간격의 데이터를 이용하여 예측된 극한풍속과 10분 평균 데이터를 이용하여 예측된 극한풍속을 비교하였다. NCAR 데이터의 적용타당성을 알아보기 위해 사용된 데이터는 40m 높이의 기상측측위에서 3년간 측정된 데이터이다. 실측데이터에 대한 세부사항은 표 3과 같다.

표 3. Description of met. mast data

	Data
Measured period	2008.5.1~2011.4.30. (3 years)
Mean wind speed [m/s]	3.80
Scale factor [m/s]	4.37
Shape factor	1.59

3년동안 측정된 10분 평균 풍속 데이터에서 6시간마다 한 번씩 풍속데이터를 추출하여 6시간 간

격의 풍속데이터를 제작하였다. 그리고 각각의 데이터를 1년, 2년, 3년으로 나누어 극한풍속 계산을 수행하였다. 그 결과는 표 4에 제시되었다.

표 4. Prediction errors with data interval

Period [year]	Data Interval	Gumbel Distribution		IEC 61400-1 EWM	
		V_{50} [m/s]	Error [%]	V_{50} [m/s]	Error [%]
1	10 min	22.84	7.75	18.10	0.28
	6 hours	21.07		18.05	
2	10 min	23.44	7.94	18.65	0.27
	6 hours	21.58		18.60	
3	10 min	22.99	8.94	19.00	0.26
	6 hours	20.94		18.95	

표에서 볼 수 있듯이 실측된 10분 평균풍속 데이터를 이용하여 계산한 극한풍속과 6시간 간격을 갖는 데이터를 이용하여 계산한 극한풍속을 비교한 결과 10% 미만의 오차를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 데이터의 기간과 해석방법에 따라 극한풍속을 예측하여 예측오차의 추이를 알아보기 위해 6시간 간격인 NCAR 데이터를 이용하여 극한풍속을 예측하는 것은 적합하다고 판단된다.

5. 극한풍속 예측결과

5.1 Gumbel 분포 해석결과

각 데이터를 기간별로 정리하고 Gumbel 분포를 이용하여 50년의 재현주기를 갖는 극한풍속을 예측하였다. 또한 예측된 극한풍속을 50년 동안 측정된 NCAR 데이터 중 가장 높은 풍속과 비교하여 예측오차를 계산하였다. 자세한 결과는 표 4에 제시되었고 각각의 예측오차는 그림 2에 나타났다.

표 5와 그림 2에서 볼 수 있듯이 Gumbel 분포를 이용하여 극한풍속을 예측한 결과 1년의 데이터를 사용하였을 때 가장 큰 예측오차가 발생했다. 하지만 5년의 데이터를 사용하였을 경우 예측오차가 낮아지는 것을 볼 수 있다.

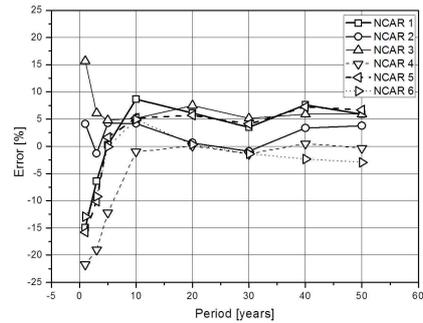


그림 2. Prediction error of Gumbel method

5.2 IEC61400-1 Extreme Wind Speed Model 해석결과

IEC61400-1 EWM 또한 각 데이터를 기간별로 정리하여 50년의 재현주기를 갖는 극한풍속을 예측하고 오차를 계산하였다. 자세한 결과는 표 6에 제시되었고 각각의 예측오차는 그림 3에 나타났다.

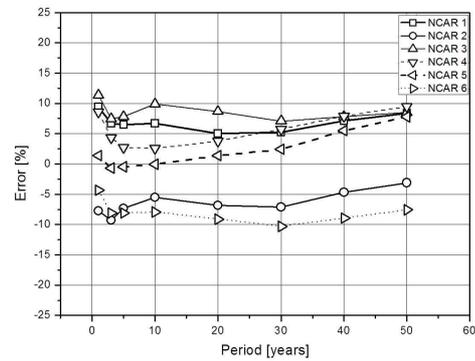


그림 3. Prediction error of IEC61400-1 EWM

표와 그림에서 볼 수 있듯이 EWM을 사용하여 극한풍속을 예측했을 경우 1년의 짧은 데이터를 사용하더라도 예측오차는 크게 발생하지 않았다. 하지만 그 이상의 장기간의 데이터를 사용하더라도 오차가 줄어들지 않는 경향을 보였다. 또한 NCAR 2와 NCAR 4의 경우 극한풍속을 저예측하는 결과를 보이는데 극한풍속을 저예측 할 경우 풍력발전기의 등급을 낮게 선택하는 오류를 범할 수 있기 때문에 풍력발전기의 안정성을 확보하는데 있어 문제점을 초래할 수 있다[13].

표 5. Results of Gumbel distribution method

Site	Period [year]	Monthly Max.WS		α	β	V_{50} [m/s]	Error [%]	Site	Period [year]	Monthly Max.WS		α	β	V_{50} [m/s]	Error [%]
		μ [m/s]	σ [m/s]							μ [m/s]	σ [m/s]				
NCAR 1	1	12.96	1.62	12.23	0.790	20.32	-14.98	NCAR 4	1	14.85	1.58	14.14	0.812	22.02	-21.72
	3	13.00	2.06	12.08	0.622	22.36	-6.44		3	14.57	1.81	13.75	0.708	22.78	-19.02
	5	13.27	2.35	12.21	0.544	23.96	0.25		5	14.73	2.20	13.75	0.584	24.70	-12.19
	10	13.96	2.64	12.77	0.485	25.96	8.62		10	15.11	2.81	13.85	0.457	27.85	-1.00
	20	13.46	2.62	12.28	0.489	25.36	6.11		20	15.19	2.86	13.90	0.449	28.15	0.07
	30	13.48	2.48	12.37	0.518	24.73	3.47		30	15.27	2.75	14.03	0.467	27.73	-1.42
	40	13.77	2.63	12.58	0.487	25.72	7.62		40	15.52	2.81	14.25	0.456	28.27	0.50
	50	13.73	2.55	12.58	0.503	25.31	5.90		50	15.50	2.76	14.26	0.465	28.03	-0.36
	Measured Max.WS during 50years						23.90		Measured Max.WS during 50years						28.13
NCAR 2	1	11.32	2.69	10.10	0.476	23.53	4.12	NCAR 5	1	11.92	1.87	11.08	0.684	20.43	-15.79
	3	11.31	2.42	10.22	0.530	22.30	-1.33		3	12.01	2.16	11.04	0.594	21.81	-10.10
	5	11.77	2.60	10.59	0.493	23.57	4.29		5	12.67	2.64	11.49	0.485	24.66	1.65
	10	12.12	2.52	10.99	0.509	23.54	4.16		10	13.03	2.75	11.79	0.466	25.52	5.19
	20	11.88	2.39	10.80	0.536	22.74	0.62		20	13.49	2.68	12.29	0.479	25.64	5.69
	30	11.98	2.29	10.95	0.559	22.39	-0.93		30	13.63	2.56	12.47	0.500	25.25	4.08
	40	12.31	2.43	11.22	0.527	23.36	3.36		40	13.96	2.66	12.76	0.482	26.02	7.25
	50	12.37	2.44	11.28	0.526	23.45	3.76		50	14.06	2.60	12.89	0.492	25.88	6.68
	Measured Max.WS during 50years						22.60		Measured Max.WS during 50years						24.26
NCAR 3	1	15.95	3.67	14.30	0.349	32.61	15.64	NCAR 6	1	14.93	2.36	13.87	0.544	25.62	-12.95
	3	15.61	3.15	14.19	0.406	29.92	6.10		3	14.40	2.71	13.18	0.473	26.72	-9.21
	5	16.07	2.97	14.74	0.432	29.56	4.82		5	14.86	3.21	13.42	0.400	29.41	-0.07
	10	16.07	2.99	14.73	0.429	29.64	5.11		10	15.39	3.41	13.86	0.376	30.88	4.93
	20	16.18	3.12	14.77	0.412	30.32	7.52		20	15.35	3.12	13.95	0.411	29.52	0.31
	30	16.07	2.99	14.73	0.429	29.65	5.14		30	15.19	3.05	13.82	0.421	29.02	-1.39
	40	16.17	3.02	14.81	0.425	29.87	5.92		40	15.24	2.98	13.90	0.431	28.74	-2.34
	50	16.18	3.02	14.82	0.425	29.86	5.89		50	15.26	2.93	13.94	0.438	28.56	-2.96
	Measured Max.WS during 50years						28.20		Measured Max.WS during 50years						29.43

표 6. Results of IEC61400-1 EWM

Site	Period [year]	Mean Wind Speed [m/s]	V_{50} [m/s]	Error [%]	Site	Period [year]	Mean Wind Speed [m/s]	V_{50} [m/s]	Error [%]
NCAR 1	1	5.23	26.15	9.41	NCAR 4	1	6.11	30.55	8.60
	3	5.10	25.50	6.69		3	5.87	29.35	4.34
	5	5.09	25.45	6.49		5	5.78	28.90	2.74
	10	5.10	25.50	6.69		10	5.77	28.85	2.56
	20	5.02	25.10	5.02		20	5.84	29.20	3.80
	30	5.03	25.15	5.23		30	5.95	29.75	5.76
	40	5.12	25.60	7.11		40	6.07	30.35	7.89
	50	5.18	25.90	8.37		50	6.16	30.80	9.49
	Measured Max.WS during 50years			23.90		Measured Max.WS during 50years			28.13
Site	Period [year]	Mean Wind Speed [m/s]	V_{50} [m/s]	Error [%]	Site	Period [year]	Mean Wind Speed [m/s]	V_{50} [m/s]	Error [%]
NCAR 2	1	4.17	20.85	-7.74	NCAR 5	1	4.92	24.60	1.40
	3	4.10	20.50	-9.29		3	4.82	24.10	-0.66
	5	4.19	20.95	-7.30		5	4.83	24.15	-0.45
	10	4.27	21.35	-5.53		10	4.85	24.25	-0.04
	20	4.21	21.05	-6.86		20	4.92	24.60	1.40
	30	4.20	21.00	-7.08		30	4.97	24.85	2.43
	40	4.31	21.55	-4.65		40	5.12	25.60	5.52
	50	4.38	21.90	-3.10		50	5.23	26.15	7.79
	Measured Max.WS during 50years			22.60		Measured Max.WS during 50years			24.26
Site	Period [year]	Mean Wind Speed [m/s]	V_{50} [m/s]	Error [%]	Site	Period [year]	Mean Wind Speed [m/s]	V_{50} [m/s]	Error [%]
NCAR 3	1	6.28	31.40	11.35	NCAR 6	1	5.63	28.15	-4.35
	3	6.06	30.30	7.45		3	5.41	27.05	-8.09
	5	6.08	30.40	7.80		5	5.41	27.05	-8.09
	10	6.20	31.00	9.93		10	5.42	27.10	-7.92
	20	6.13	30.65	8.69		20	5.35	26.75	-9.11
	30	6.04	30.20	7.09		30	5.28	26.40	-10.30
	40	6.08	30.40	7.80		40	5.36	26.80	-8.94
	50	6.12	30.60	8.51		50	5.44	27.20	-7.58
	Measured Max.WS during 50years			28.20		Measured Max.WS during 50years			29.43

5.3 Gumbel 분포와 EWM 해석결과 비교

Gumbel 분포와 IEC61400-1 EWM을 사용하여 예측된 극한풍속의 오차를 각각 NCAR 데이터별로 비교하였다. 결과는 그림 4에 제시되었다.

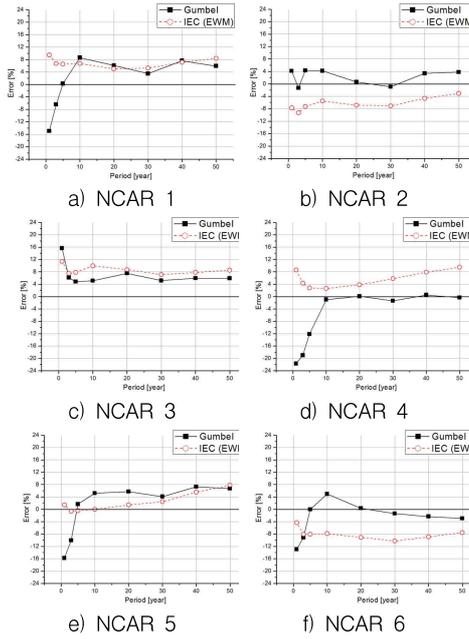


그림 4. Comparison of prediction errors of IEC (EWM) and Gumbel method

그림에서 보면 NCAR 1, NCAR 3, NCAR 5의 경우 IEC61400-1 EWM을 이용하여 계산된 오차와 Gumbel 분포를 이용하여 계산된 오차가 비슷하지만 NCAR 2, NCAR 4, NCAR 6 데이터는 Gumbel 분포를 이용하여 계산된 결과가 IEC 61400-1 EWM을 이용하여 계산된 결과보다 더욱 정확한 것을 알 수 있다. 특히 NCAR 2와 NCAR 6의 경우 EWM을 이용한 극한풍속 예측결과가 Gumbel 분포의 결과에 비해 극한풍속을 저예측하기 때문에 풍력발전기의 안정성 측면에서 Gumbel 분포를 이용하는 것이 더욱 적합하다고 판단된다.

6. 결론

우리나라에 해상에 위치한 6지점의 NCAR 재해석 데이터를 이용하여 극한풍속을 예측하는데 적합하다고 알려진 Gumbel 분포와 국제표준으로서 풍력발전기의 등급을 결정하는데 사용되는 IEC61400-1 Extreme Wind Speed Model에 적용하여 극한풍속을 예측하고 NCAR 데이터의 50년 최대 풍속과 비교하여 적합성을 확인해보았다. 그

결과 3년 이하의 짧은 기간의 데이터를 사용해서 극한풍속을 예측할 경우 IEC61400-1 EWM이 더욱 예측 정확도가 높았지만 5년 이상의 데이터를 사용할 경우는 Gumbel 분포를 사용한 예측이 정확도가 더욱 높았다. 또한 10년 이상의 데이터를 이용할 경우 Gumbel분포를 이용한 방법은 최대 8.6%의 오차를 보였고 IEC 61400-1 EWM을 이용한 방법은 최대 10.3%의 오차를 보였다.

NCAR 2와 NCAR 6을 보면 IEC61400-1 EWM을 사용할 경우 극한풍속을 크게 저예측하는 것을 볼 수 있는데 이는 풍력발전기의 등급을 낮게 결정할 수 있는 요인이 될 수 있기 때문에 풍력발전기의 안정성 확보를 위해서는 문제가 발생할 수 있다고 판단된다.

따라서 Gumbel 분포를 사용하여 극한풍속을 예측하는 것이 풍력발전기의 안정성 확보에 보다 유리하다고 판단되며 5년이나 그이상의 데이터를 이용하는 것이 보다 정확한 예측을 위해 필요하다고 판단된다. 하지만 본 논문에서의 결과는 6시간마다 계산된 재해석 자료를 이용하였기 때문에 실제 10분 평균 풍속을 이용할 경우 결과에 있어서 다소 차이가 발생할 수 있다.

후 기

본 연구는 2011(3차년도)년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20093021020030)

참 고 문 헌

- [1] 장문석, 방형준, “풍력발전기술의 현황과 전망”, *환경과학회지*, 2009.
- [2] 홍금우, 이민희, “기후변화협약이 산업에 미치는 영향 및 대응방안”, *한국비즈니스리뷰*, 2008.
- [3] 우재균, 김현기, 김병민, 백인수, 유능수, “AWS 풍황데이터를 이용한 강원풍력발전단지 연간에너지발전량 예측”, *한국태양에너지학회 논문집*, 2011.4.
- [4] J.K. Woo, B.M. Kim, I.S. Paek, N.S. Yoo and Y.S. Nam, “Investigation on Selecting Optimal Wind Turbines in the Capacity Factor Point of View”, *한국태양에너지학회 논문집*, 2011.10 게재확정.
- [5] 김현기, 김병민, 백인수, 유능수, 김현구, “풍향의 변동성에 따른 연간에너지발전량의 변화”, *한국태양에너지학회 논문집*, 2011.10. 게재확정.
- [6] 이봉희, 김병조, 김동우, 김현구, 하영철, “국

- 가바람지도를 이용한 극한풍속의 추정”, *한국 풍공학회논문집*, 2010.
- [7] 이봉희, 김현구, 하영철, “풍력발전기 풍력등급 설정을 위한 제주도 지역의 재현기대풍속 추정”, *한국풍공학회논문집*, 2011.
 - [8] 권순덕, 이재형, “태풍 시뮬레이션을 통한 서남해안의 극한풍속 예측”, *토목학회논문집*, 2008.
 - [9] E. J. Gumbel, “The return period of flood flows”, *The Annals of Mathematical Statistics*, 1941.
 - [10] E. J. Gumbel, *Statistics of extremes*, 1960.
 - [11] 임형진, 하영철, “풍향별 풍속의 재현기대값 추정에 관한 연구”, *한국풍공학회지*, 1998.
 - [12] “IEC61400-1 Ed.3 Design requirements”, 2005.
 - [13] P.S.Veer, S.Butterfield, “Extreme Load Estimation for Wind Turbines: Issue and Opportunities for Improved Practice”, 2000.