



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

복잡지형 풍력단지에서의
WAsP 및 CFD 모델 예측성능 평가

제주대학교 대학원

풍력공학부 풍력기계시스템전공

주 범 철

2015년 6월

복잡지형 풍력단지에서의 WAsP 및 CFD 모델 예측성능 평가

指導教授 高 炅 男

朱 範 哲

이 論文을 風力工學部 碩士學位 論文으로 提出함

2015 年 6 月

朱範哲의 風力工學部 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

김방석



委 員

고영남



委 員

최길원



濟州大學校 大學院

2015 年 6 月

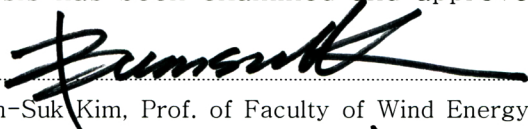
Assessment of Estimates of WASP and CFD Models in a Complex Terrain Wind Farms

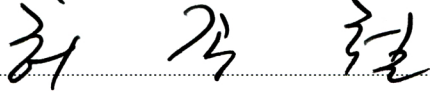
Beomcheol Ju
(Supervised by professor Kyung-Nam Ko)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Engineering

2015. 6.

This thesis has been examined and approved.


.....
Thesis director, Bum-Suk Kim, Prof. of Faculty of Wind Energy Engineering


.....
Thesis director, Jong-Chul Huh, Prof. of Mechanical Engineering


.....
Thesis director, Kyung-Nam Ko, Prof. of Faculty of Wind Energy Engineering

.....
Date

Major of Wind Power Mechanical System Engineering
Faculty of Wind Energy Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

Table of Contents

List of Figures	iii
List of Tables	v
Abstract	vi
I. 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	4
II. 풍력발전단지 설계용 S/W	5
2.1 WAsP	5
2.2 WindPRo	5
2.3 Meteodyn WT	6
2.4 풍력단지 설계용 S/W의 후류모델	7
2.4.1 후류 영향	7
2.4.2 후류의 분류	8
2.4.3 후류모델	9
2.4.3.1 Modified Park Model(PARK)	9
2.4.3.2 The Eddy Viscosity Model(EVM)	11
III. 분석 대상	13
3.1 분석 지역	13
3.1.1 성산 풍력발전단지	13
3.1.1.1 측정 데이터	16
3.1.2 가시리 풍력발전단지	18
3.1.2.1 측정 데이터	19
3.1.3 해석 모델 및 경계조건	20

IV. 분석결과	22
4.1 성산, 가시리 풍력발전단지에서의 지형변화지수	22
4.2 성산지역 AEP 결과	23
4.2.1 성산지역 풍황분석	23
4.2.2 성산지역 AEP 관련 검증	25
4.2.2.1 해석도메인에 따른 후류모델 별 AEP 상대오차	25
4.2.2.2 후류모델에 따른 풍력발전기 별 AEP 비교	28
4.2.2.3 CF 비교	30
4.3 후류검증	32
4.3.1 후류영향을 비교를 위한 자유풍속 측정 방위 구간	32
4.3.2 Meteodyn WT를 이용한 후류영향 분석	33
V. 결 론	38
참고문헌	39

List of Figures

Fig. 1	Total installed wind capacity in the world	1
Fig. 2	Megatrend of wind power generation technology	2
Fig. 3	Wake effect	7
Fig. 4	Wake type behind a wind turbine	8
Fig. 5	A wake flow model behind a wind turbine by N.O. Jensen	9
Fig. 6	Overlap model of the wake	10
Fig. 7	Eddy Viscosity model	11
Fig. 8	Layout of wind turbines on Seongsan wind farm	13
Fig. 9	Altitude using WindPRO	15
Fig. 10	Altitude using Meteodyn WT	15
Fig. 11	Met mast position away from Seongsan wind farm	16
Fig. 12	SCADA system	17
Fig. 13	Layout of wind turbines on Gasiri wind farm	18
Fig. 14	Met mast of Gasiri wind farm	19
Fig. 15	Domains for predicting power production	20
Fig. 16	Mesh for 5km \times 5km domain size	21
Fig. 17	RIX analysis	22
Fig. 18	Weibull wind speed distribution at the position of the met mast	23
Fig. 19	Wind rose at the position of the met mast	24
Fig. 20	AEP Production by WindPRO	25
Fig. 21	AEP Production by Meteodyn WT	25
Fig. 22	Relative error in AEP with various domain sizes when EV model was applied to AEP prediction	26
Fig. 23	Relative error in AEP with various domain sizes when Jensen model was applied to AEP prediction	27
Fig. 24	The accuracy of AEP prediction for No.1 to No. 5 wind turbines (Domain size: 10km \times 10km)	29

Fig. 25	The accuracy of AEP prediction for No.6 to No. 10 wind turbines (Domain size:10km × 10km)	29
Fig. 26	Prevailing wind direction on Seongsan wind farm	30
Fig. 27	Comparison of actual and predicted capacity factors of all wind turbines (Jensen model used, domain size: 10 km × 10 km)	31
Fig. 28	Measurement sector of the outside mast	32
Fig. 29	Comparison of wake length at Jensen model and EV model	33
Fig. 30	Wake effect at Jensen model (Sector: 180°~210°, domain size: 3.8km × 3.8km)	34
Fig. 31	Wake effect at Jensen model (Sector: 220°~250°, domain size: 3.8km × 3.8km)	34
Fig. 32	Wake effect at EV model (Sector: 180°~210°, domain size: 3.8km × 3.8km)	35
Fig. 33	Wake effect at EV model (Sector: 220°~250°, domain size: 3.8km × 3.8km)	35
Fig. 34	Comparison of actual and predicted wind speed with wind sector ...	36

List of Tables

Table 1 Specification of wind turbines on Seongsan wind farm	14
Table 2 Wind sensors, measurement period and height	16
Table 3 SCADA data of Seongsan wind farm	17
Table 4 Specification of wind turbines of Gasiri wind farm	18
Table 5 Met mast properties of Gasiri	19
Table 6 Parameters used in Meteodyn WT	21
Table 7 Wake effect with wind sector	37

Abstract

In order to evaluate predictions from wind farm design software, the power production predictions made using a linear model, Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP), and the computational fluid dynamics (CFD) model, Meteodyn WT, were compared with the real power production data from Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) system for Seongsan wind farm on Jeju Island. The five different wind farm sizes ranging from 5 km X 5 km to 20 km X 20 km were selected for running the two software to clarify which wind farm size is the best for obtaining more accurate power production predictions. WindPRO software was used for WAsP prediction in this work, since it uses WAsP module for estimating power production.

A met mast was installed at the outside of Gasiri wind farm of Jeju Island for measuring free wind speed, and another met mast was put up at the inside for measuring wind speed deficit due to the multiple wake behind wind turbines. Applying the two famous wake models, Jensen Model and Eddy Viscosity (EV) Model of Meteodyn WT to the wind farm, wind speeds were estimated at the met masts points. Then the predicted wind speeds were compared with real wind speeds at the two met masts for evaluating the two wake models.

As a result, the CFD models, Meteodyn WT, predicted power production more accurately than the linear models, WAsP, for all the five domain sizes studied. Jensen Model performed better than EV Model in analyzing the wake effect at WindPRO software, while there were little difference between the two wake models for the performance at Meteodyn WT. Based on measured wind speeds, wind speed deficit of maximum of 42.46% was found due to the multiple wake behind wind turbines.

I. 서 론

1.1 연구배경

전 세계에 설치된 풍력발전의 총용량은 370GW로 세계 전력수요의 5%를 풍력설비가 담당하고 있으며, Fig. 1과 같이 설치용량은 계속 증가 중인 추세이다.[1] 우리나라는 에너지 자원이 절대적으로 부족하여 에너지 소비량의 96.4% 수입에 의존하고 있으며,[2] ‘제 4차 신재생에너지 기본계획’에 따라 신재생에너지 비중을 2035년까지 11%로 설정하되, 풍력에 대한 비중을 2.2%에서 18.2%로 확대할 예정이다.[3]

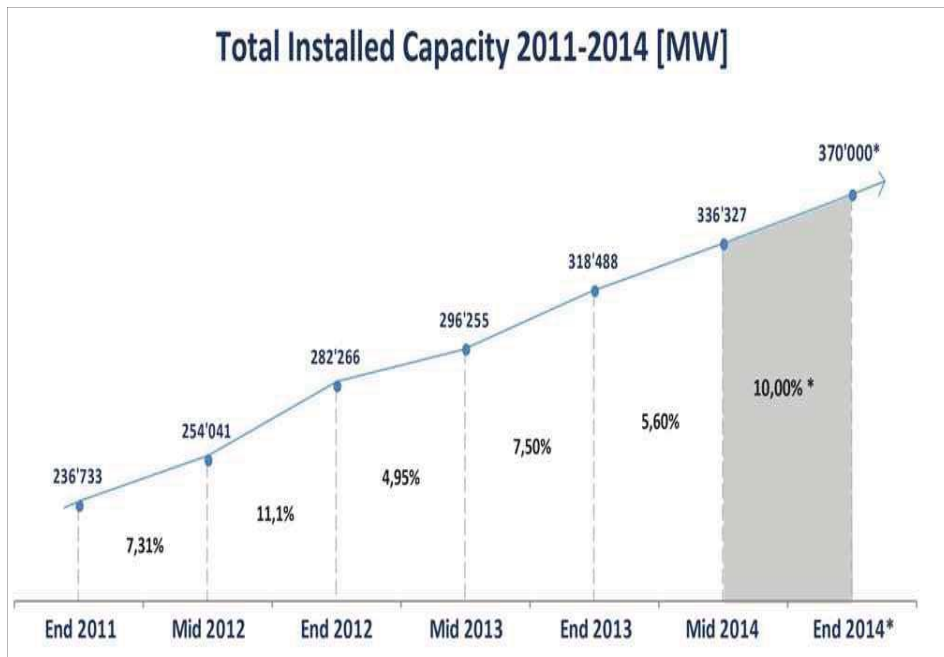


Fig. 1 Total installed wind capacity in the world[1]

또한 이용률과 신뢰성 향상을 위하여 지속적으로 Fig. 2와 같이 풍력발전기가 대형화되고 있으며, 이에 따라 해상풍력 관련 기술과 풍력시장이 급격히 성장하고 있다.[4] 시스템의 대용량화를 통해 상업용 풍력발전기의 정격출력이 최대 6~8MW급에 도달하였고, 현재 10~12MW급의 풍력발전기가 개발 중에 있다. 풍력발전기가 대형화됨에 따라 허브높이가 높아질 뿐만 아니라, 블레이드 직경 또한 커짐에 따라 블레이드 후방에 발생하는 후류의 영향(Wake effects)도 증가하기 때문에 반드시 후류 영향을 고려하여 풍력발전기를 배치해야 한다.

특히 제주도과 같이 좁은 지역에 풍력발전기가 밀집 배치되어 있는 경우, 후류 영향을 고려한 연간에너지생산량(Annual energy production, AEP) 산출이 필요하다.

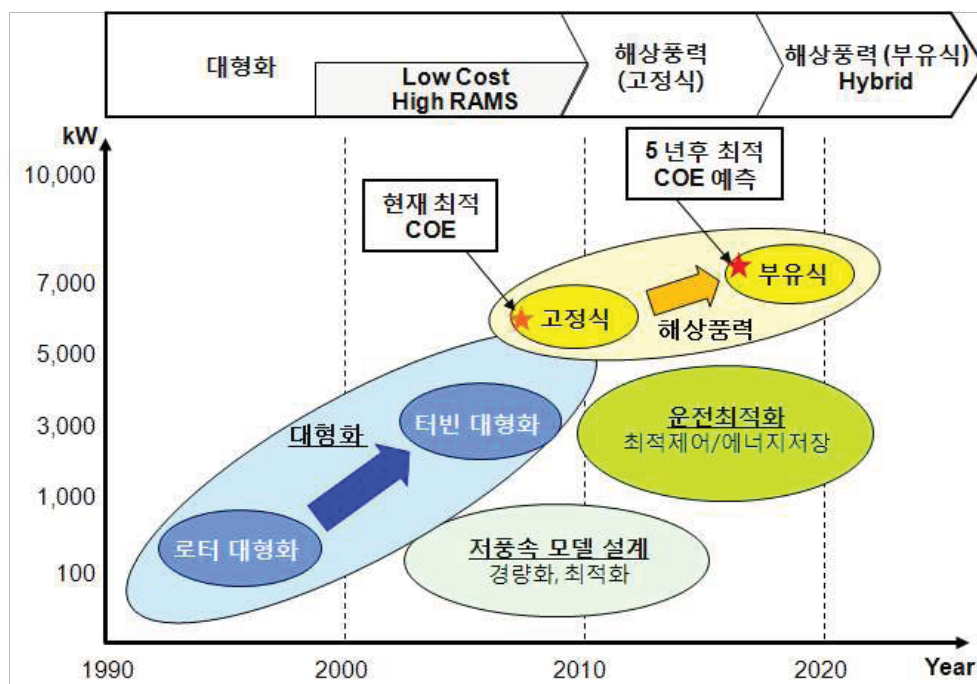


Fig. 2 Megatrend of wind power generation technology[4]

풍력발전단지 설계를 위해 사용되는 소프트웨어로는 WAsP, WindPRO, WindFarmer, Meteodyn WT, WINDSIM 등이 있다.[5] 이와 같은 소프트웨어들을 통해 풍력발전단지가 건설될 지역의 연간풍력발전량, 난류강도(Turbulence Intensity), 연간 평균풍속(Annual average wind speed), 설비이용률(Capacity Factor, CF) 등의 분석이 가능하다.

우리나라에서는 WAsP과 WindPRO 두 소프트웨어만을 사용하여 연간 풍력발전량 및 풍속 예측에 관한 연구가 진행되어 왔다.[6~8]

최근에는 두 가지 이상의 풍력발전단지 설계 소프트웨어를 사용한 연간 풍력발전량 및 풍속 예측에 관한 비교/검증 연구가 진행되고 있다.[9][10] 하지만 소프트웨어를 통해 예측된 풍력발전량과 실제 생산된 풍력발전량을 비교하여 소프트웨어의 성능을 검증한 연구는 거의 없었다.[11~13]

오늘날 풍력발전단지 설계 시에 일반적으로 사용되는 WAsP 소프트웨어는 선형이론을 모델을 기반으로 해석하기 때문에 풍력발전단지 설계시 복잡지형에서의 언덕효과, 유동박리현상 등을 고려한 정확한 해석이 어렵다.[14] 이와 같은 지형분석에 대한 문제점을 해결하기 위하여 3차원 전산유동해석을 기반으로 하는 소프트웨어가 사용되고 있다.

1.2 연구목적

본 연구는 WAsP 소프트웨어의 RIX 모듈을 사용하여 연구대상 지역의 지형 복잡도를 평가한 후, 두 풍력발전단지 설계용 소프트웨어(선형이론 모델을 기반으로 하는 WindPRO와 3차원 전산유동해석을 기반으로 하는 Meteodyn WT)를 이용하여, 해석 도메인별로 예측된 연간 풍력발전량과 SCADA 시스템으로부터 취득한 풍력발전량의 비교를 통해 어느 정도 오차가 발생하는지 알아보고자 한다.

또한 최적의 해석도메인을 제시하고 Meteodyn WT를 이용하여 복잡지형에 위치한 풍력발전단지 내의 중첩 후류영향에 대하여 분석 및 검증을 하고자 한다.

II 장에서는 연구에 사용된 풍력발전단지 설계용 소프트웨어 및 후류모델에 대해 설명한다.

III 장에서는 두 풍력발전단지 및 연구에 사용된 기상탑 데이터에 대해 분석한다.

IV 장에서는 SCADA 시스템의 AEP를 참값으로 하여, 두 소프트웨어에서 예측된 AEP를 비교/분석하고, 또한 풍력발전단지 내의 2개의 기상탑 데이터 풍속을 참값으로 Meteodyn WT에서 예측된 풍속을 비교/분석한다.

II. 풍력발전단지 설계용 S/W

2.1 WAsP

WAsP(Wind Atlas Analysis and Application Program)은 덴마크의 RISOE 연구소에서 개발된 소프트웨어로, 풍력 데이터 분석, 풍력자원지도 작성 등에 사용되며, 풍력발전단지의 유동분석을 위해 Jackson과 Hunt의 선형 모델이 적용되었다. WAsP 소프트웨어는 기상탑이 설치된 위치에서 실측된 풍력 데이터를 통계적인 방법을 통해 일반화된 풍력 데이터로 변환하여, 설치 예정 지역 및 타당성 평가가 필요한 지점의 풍황을 예측한다. WAsP의 Wind Atlas 분석 방법은 실측된 풍력 데이터에서 주변 장애물, 지면 거칠기, 지형의 영향을 제거하여 Generalized regional wind climatology를 예측하는 분석 방법이다. 실측 풍력 데이터로 예측한 Generalized regional wind climatology로부터 Wind Atlas 절차의 역순으로 새로운 지점의 주변 장애물, 지면 거칠기, 지형의 영향을 대해 해석한다.[15]

2.2 WindPRO

WindPRO는 덴마크의 EMD사에서 개발하여 전 세계적으로 널리 쓰이며, WAsP 솔버를 기반으로 한다. WindPRO는 사용자가 직접 해석될 풍력발전단지의 지형데이터, 지면 거칠기 및 주변 장애물을 입력하여 풍력 자원분석, 풍력발전기 자동 배치, 풍력발전기 출력 및 효율을 계산할 수 있다. WindPRO를 이용하여 풍력발전단지의 풍속, 풍향을 예측하기 위해 평탄한 지형에서 쓰이는 ATLAS라는 자체 풍황 예측방법을 사용하기도 하지만, 일반적으로 WAsP을 이용하여 계산한다. 이 외에도 소음, 그림자 영향, 경제성 분석 등 여러 가지 예측이 가능하다. [16]

2.3 Meteodyn WT

Meteodyn WT은 2003년에 Didier Delaunay에 의해 프랑스에서 개발되어 현재 전 세계적으로 사용되고 있으며, 바람유동을 정상류 및 비압축성으로 가정하고, RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식과 1-방정식(One equation) 난류점성 모델을 사용한다. Yamada와 Arritt가 제시한 모델을 통해 대기안정도를 고려하여 초기 난류길이 척도를 계산할 수 있다. 경계층 조건에서는 Ekman function에 의해 평균 풍속의 수직 프로파일을 로그법칙을 이용하여 해석하며, 지반조건으로는 Monin-Obukhov 이론을 이용하여 평균 풍속과 실제 지형 거칠기를 고려할 수 있도록 하였다.[17] 이 소프트웨어는 바람장(Wind fields)에서의 전산해석을 1차 수행한 후 풍력발전기와 기상데이터를 입력 하고, 2차 전산해석을 하게 된다. 1차 바람장 분석에서 계산 되어져 있는 공간에 풍력발전기를 배치 후 재해석 한다. 1차 바람장 분석 후 생성되는 해석 결과는 가속인자(Speed up factor), 난류강도, 편차 각(Deviation angle), 유입각(Inflow angle) 등이며, 풍력발전기와 기상데이터를 입력하여 2차 전산해석 후 생성되는 해석 결과는 평균 풍속, 와이블 분포의 척도계수(Scale factor) 및 형상계수(Shape factor), 유입각, 풍력 에너지밀도, 난류강도, 윈드시어 지수(Wind shear exponent), 극치 평균풍속(Extreme mean wind speed) 등 다양한 바람특성 값을 구할 수 있다.

2.4 풍력단지 설계용 S/W의 후류모델

2.4.1 후류 영향

후류의 정의는 바람이 상류에 설치된 풍력발전기를 지나면서 배후에 발생하는 유동 흐름을 의미한다. Fig. 3은 실제 풍력발전단지에서 풍력발전기 후방에 발생하는 후류영향을 시각적으로 보여준다.[18] 후류는 로터 블레이드의 회전 방향과는 반대방향으로 회전하는 특성을 가지고 있으며, 상류에 설치된 풍력발전기로부터 발생하는 후류 영향에 의해 하류에 설치된 풍력발전기의 발전량은 감소하고, 하중은 증가하게 된다.



Fig. 3 Wake effect[18]

2.4.2 후류의 분류

후류는 크게 근접후류, 중간후류, 원거리 후류로 분류된다. 일반적으로 풍력발전기의 로터 블레이드로부터 후방에 로터직경 거리까지 발생하는 후류를 근접후류라고 한다. 근접후류 영역에서는 운동에너지가 감소함에 따라 풍속은 낮아지고, 압력은 높아진다. Schepers는[19] 실제 데이터를 기반으로 한 연구를 통해 후류가 최대로 팽창하는 구간은 로터직경 2.25배라고 하였다. Fig. 4는 풍력발전기 후방에 발생하는 후류영향을 이격거리 별로 나타낸 그림이다.[20]

중간후류와 원거리 후류 영역에서는 풍력발전기의 영향을 받지 않은 주변의 자유 바람과 혼합되면서 풍속은 점진적으로 증가하고, 압력은 감소한다.

IEC 61400-12-1에 의하면 후류 영향은 풍력발전기의 로터직경 20배까지 영향을 미친다.[21] 후류로 인하여 풍력발전단지 내부의 풍속은 감소되고, 난류강도는 증가하게 된다.[22] 일반적으로 해상지역이 육상지역보다 난류강도가 약하며, 고도에 따른 풍속의 변화가 작기 때문에 후류의 길이가 상대적으로 길게 된다.[23]

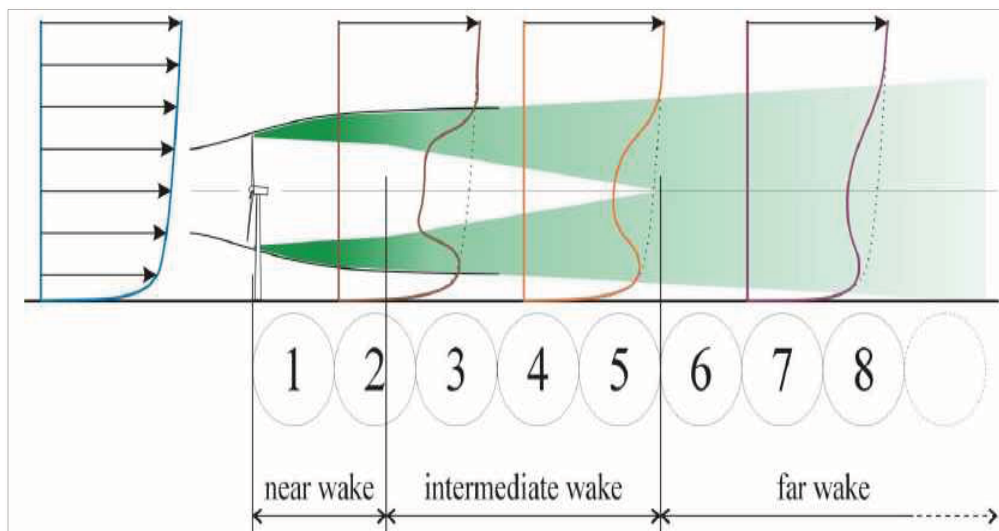


Fig. 4 Wake type behind a wind turbine[19]

2.4.3 후류모델

2.4.3.1 Modified Park Model

Modified Park model은 S. Frandsen에 의해 Park 모델을 개선하여 제안된 후류모델이다. 이 모델은 후류 영역 내에서의 난류강도를 고려하지 않고, 1차원 운동량만을 고려하는 Kinematic model을 이용하여, Fig. 5와 같이 선형적인 후류 영향을 계산하는 방법이다.[24][25]

식(1)을 이용하여 후류 영역에서의 풍속 감소계수를 구할 수 있다.

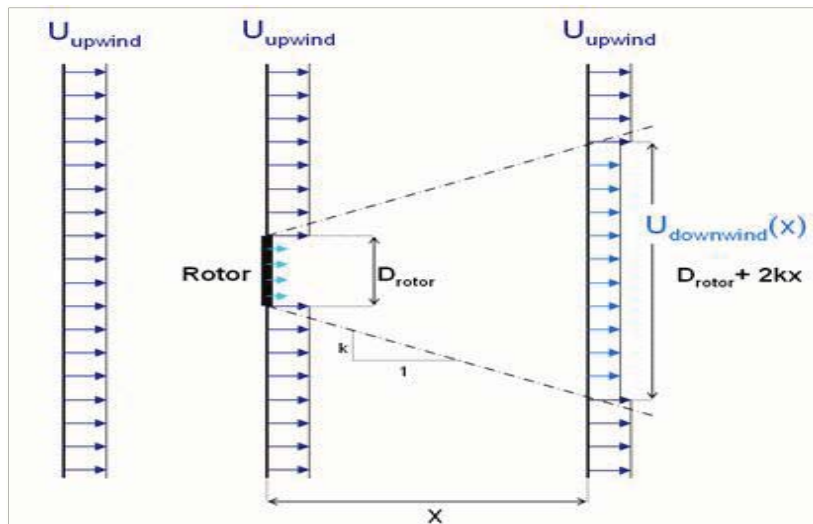


Fig. 5 A wake flow model behind a wind turbine by N.O. Jensen[25]

$$C_{wake} = \frac{U_{downwind}(X)}{U_{upwind}} = 1 - (1 - \sqrt{1 - C_t}) \left(\frac{D_{rotor}}{D_{rotor} + 2kX} \right)^2 \quad (1)$$

여기서,

C_{wake} 는 후류 영역에서의 풍속감소계수

$U_{downwind}(x)$ 는 후류 내에서 풍력발전기로부터 거리x에서의 풍속

U_{upwind} 는 전방에서 불어오는 풍속

C_t 는 풍력발전기의 추력계수

상류에 설치된 풍력발전기로부터 발생하는 후류로 인해 하류에 설치된 풍력발전기가 영향을 받을 경우, 식(2)를 통해 중첩된 면적을 이용하여 중첩후류영향을 구할 수 있다. Fig. 6은 중첩후류영향을 나타낸다.

$$C_{wake} = \frac{U_{downwind}(X_{WT2})}{U_{upwind}} = 1 - (1 - \sqrt{1 - C_t}) \left(\frac{D_{rotor}}{D_{rotor} + 2kX_{WT2}} \right)^2 \left(\frac{A_{Overlap}}{A_{WT2}} \right) \quad (2)$$

여기서,

X_{WT2} 는 후방에 위치한 풍력발전기로부터의 거리

A_{WT2} 는 후방에 위치한 풍력발전기의 회전자 면적

A_0 는 전방에 위치한 풍력발전기의 중첩된 면적

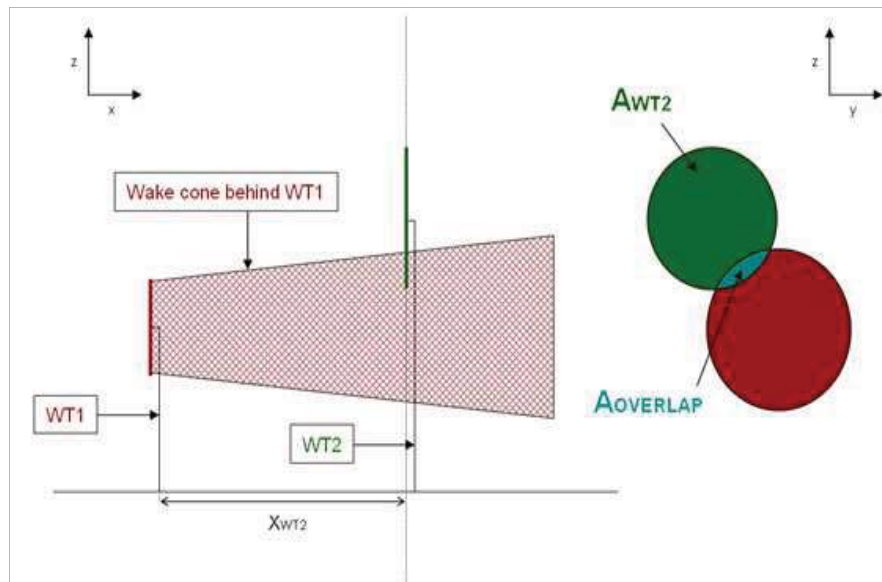


Fig. 6 Overlap model of the wake

2.4.3.2 The Eddy Viscosity Model

Eddy Viscosity(EV) 모델은 Eddy Viscosity와 Navier-Stokes 방정식을 이용하며, Fig. 7과 같이 축대칭 모델로 단순화하여 유동방정식의 해를 구한다. 이 모델은 유동방향의 압력구배를 무시하여, 로터직경 2배 거리 이후의 하류 영역에 적용이 가능하다.[27][28]

식(3)을 통해 초기 경계조건을 계산 후 Crank-Nicolson scheme 기법을 적용하여 수치해석을 수행한다.

$$1 - \frac{U_w}{U_\infty} = D_M \exp\left[-3.56\left(\frac{r}{b}\right)^2\right] \quad (3)$$

여기서,

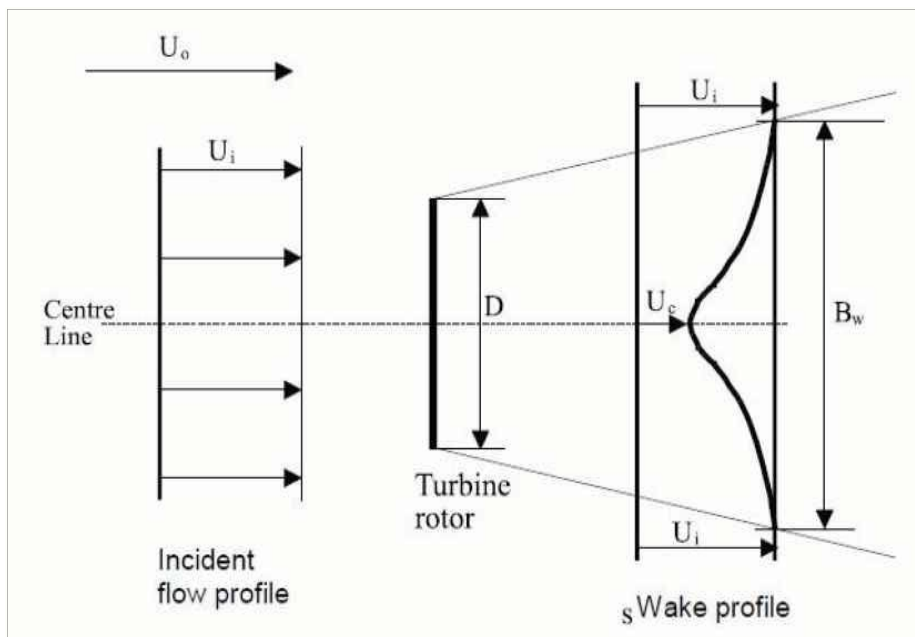


Fig. 7 Eddy Viscosity model[26]

초기 후류 손실은 추력 계수와 난류강도와 관련 있으며, 식(4)과 식(5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$D_w = \frac{3.65C_T}{8D_M(1-0.5)D_M} \quad (4)$$

$$D_M = C_T - 0.05 - (16C_T - 0.5)I/1000 \quad (5)$$

여기서,

D_M 는 센터라인에서의 후류 손실(centerline wake deficit)

C_T 는 추력계수

b 는 후류 폭

I 는 난류강도[%]

Ⅲ. 분석 대상

3.1 분석지역

3.1.1 성산 풍력발전단지

(주)한국남부발전에서 운영하고 있는 성산 풍력발전단지는 제주특별자치도 서귀포시 성산읍 수산리에 위치하며, 지형학적으로는 한라산의 동쪽방향에 위치하고 있으며 오름에 둘러싸여 있다.

성산 풍력발전단지는 성산풍력 1단계와 2단계로 나누어 설치되었으며, 2009년에 Vestas V80 풍력발전기 6기, 2010년에 Vestas V80 풍력발전기 4기가 설치되어, 총 10기의 풍력발전기가 운전되고 있다. Fig. 8에 성산 풍력발전단지의 위치 및 풍력발전기 배치상태를 나타내었다.

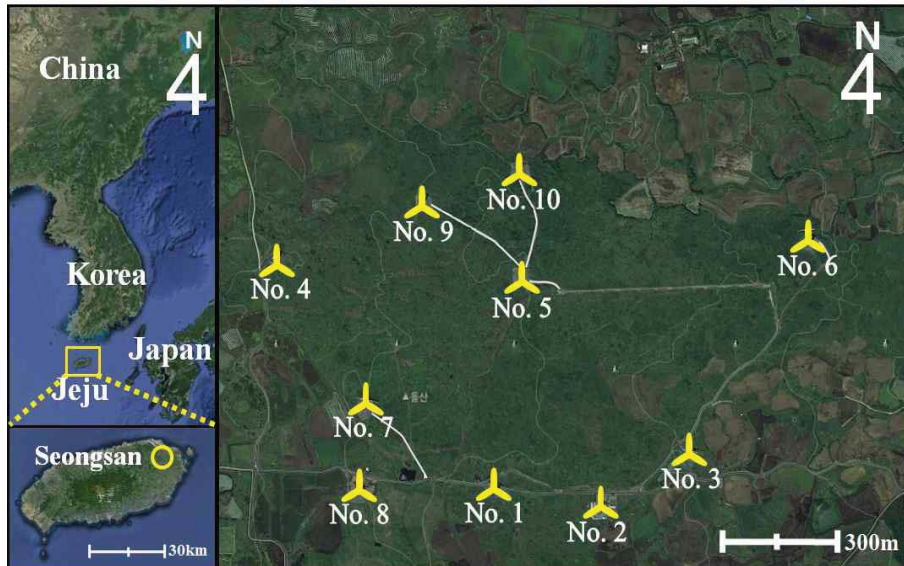


Fig. 8 Layout of wind turbines on Seongsan wind farm

Table 1에 성산 풍력발전단지에서 운전 중인 풍력발전기의 사양을 나타내었다. Vestas V80 풍력발전기의 로터직경은 80m, 허브높이는 78m이며, IEC 61400-1에 따라 Class IA 인증을 받은 제품이다. 이중여자 유도발전기(Double Fed Induction Generator, DFIG)를 사용하여 나셀의 무게를 최소화 하였으며, 피치제어가 가능하다.

Table 1 Specification of wind turbines on Seongsan wind farm

Item	Description
WTG model	Vestas V80
Rated power [kW]	2000
Diameter [m]	80
Hub height [m]	78
Cut-in / Rated / Cut-out wind speed [m/s]	4 / 14 / 25
IEC class	IA

Fig. 9와 Fig. 10에 WindPRO와 Meteodyn WT를 이용한 성산 풍력발전단지 주변지역의 수치 지형데이터를 나타내었다. IEC 61400-12-2에 따라 등고선 간격이 5m인 수치 지형데이터가 사용되었으며, 동일한 수치 지형데이터를 두 소프트웨어 적용하여 해석하였다.[29]

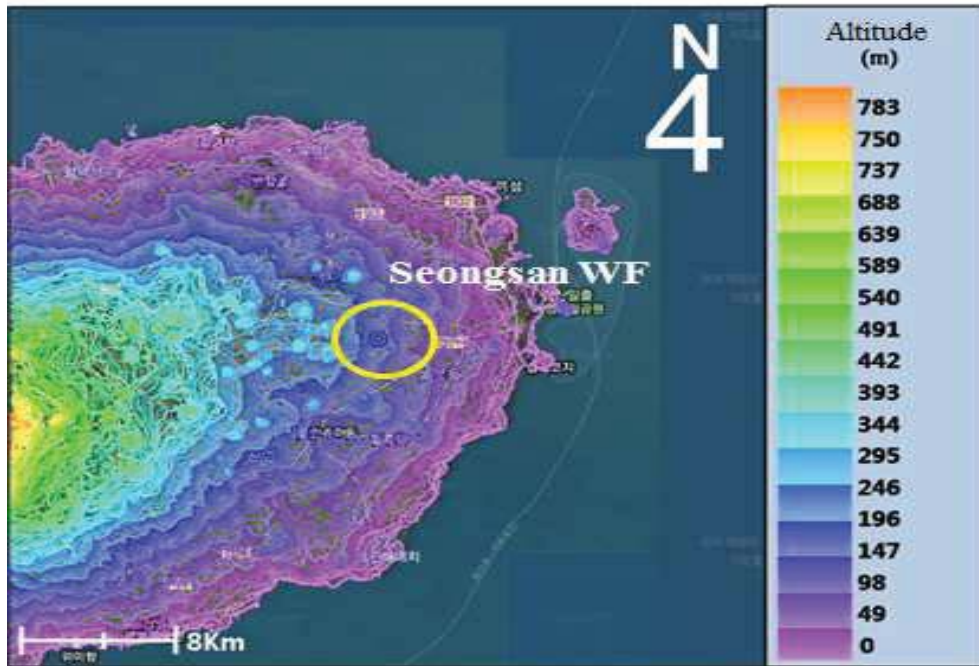


Fig. 9 Altitude using WindPRO

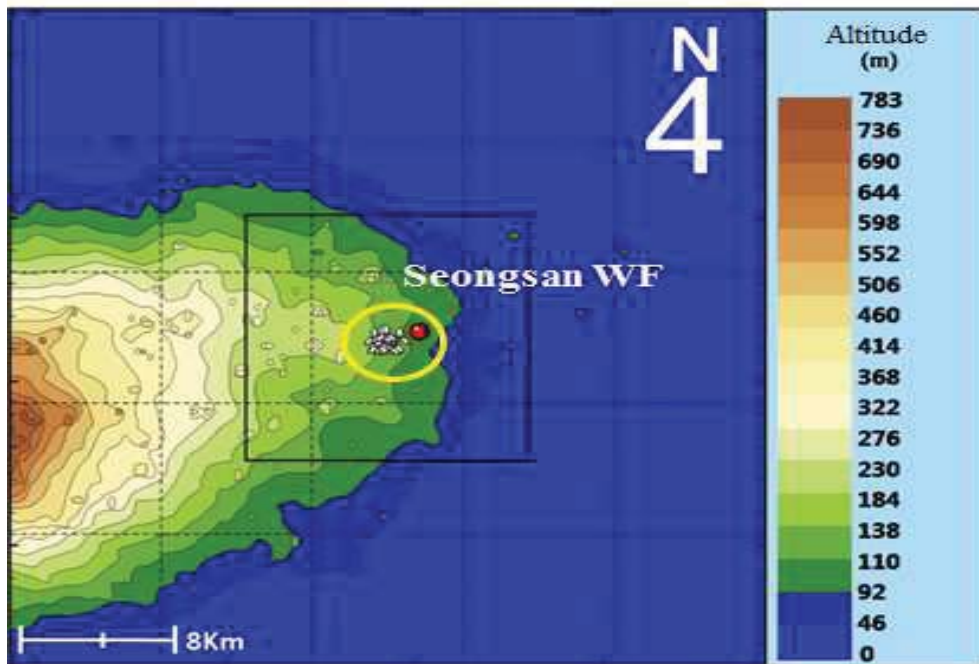


Fig. 10 Altitude using Meteodyn WT

3.1.1.1 측정 데이터

WindPRO와 Meteodyn WT를 이용하여 연간 풍력발전량을 예측하기 위하여 성산 풍력발전단지로부터 최소 1.6km, 최대 2.8km의 거리에 설치된 기상탑으로부터 측정된 데이터가 사용되었다.[30] Fig. 11과 Table 2는 본 연구에 사용된 기상탑 및 센서의 정보이다. 풍속, 풍향 모두 70m 높이의 데이터를 사용하였고, 데이터 분석 기간은 2013년 6월 1일부터 2014년 5월 31일까지로 1년간의 데이터가 사용되었다.

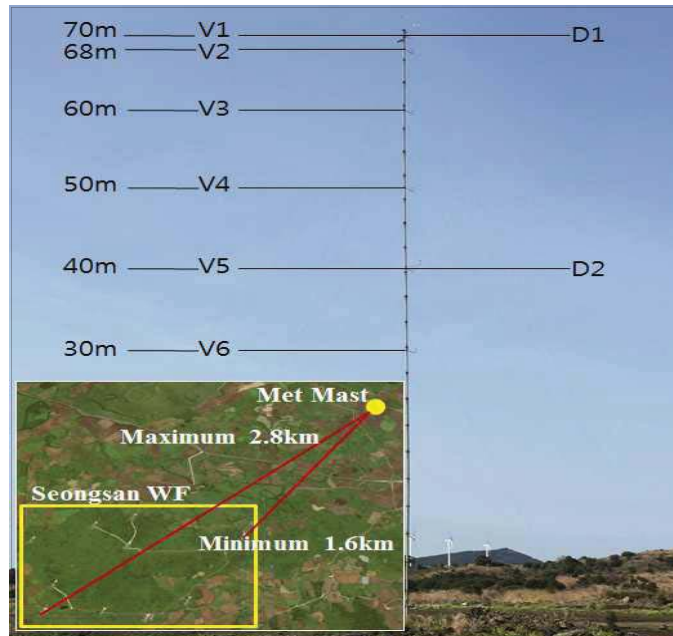


Fig. 11 Met mast position away from Seongsan wind farm

Table 2 Wind sensors, measurement period and height

Item	Description
Anemometer	Ammonit Thies First Class
Wind vane	Ammonit Thies First Class
Measurement period	2013. 6. 1 ~ 2014. 5. 31 (1year)
Measurement Height	70m

Fig. 12와 Table 3에 성산 풍력발전단지에서 사용되는 Vestas SCADA 시스템의 모니터링 화면과 연구를 위해 사용된 SCADA 데이터의 정보를 나타내었다.

소프트웨어를 통해 예측된 연간 풍력발전량의 비교/분석을 위하여, 성산 풍력발전단지의 SCADA 시스템으로부터 실제 연간 풍력발전량과 유지보수 및 정비에 따른 손실 발전량이 보정되어 후류 손실만 고려된 풍력발전량을 취득하였다. SCADA 데이터는 기상탑 데이터와 동일 기간인 2013년 6월 1일부터 2014년 5월 31일까지 1년간의 데이터를 사용하였다.

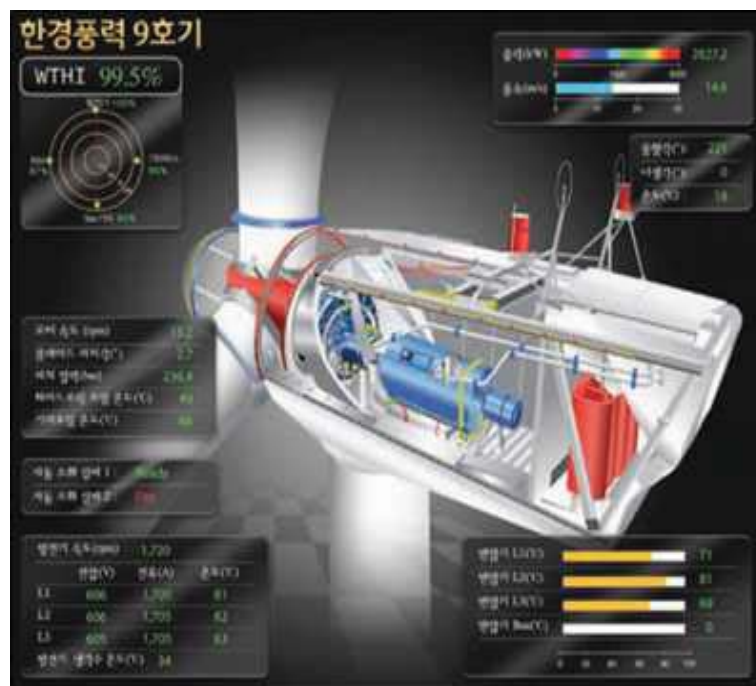


Fig. 12 SCADA system

Table 3 SCADA data of Seongsan wind farm

Item	Description
Power production Alarm data	WTG 1 ~ 10
Measurement period	2013. 6. 1 ~ 2014. 5. 31 (1 year)

3.1.2 가시리 풍력발전단지

가시리 풍력발전단지는 제주에너지공사에 의해 운영되고 있으며, 효성의 풍력발전기 3기(No. 1, 3, 5), 유니슨의 풍력발전기 3기(No. 2, 4, 6), 한진의 풍력발전기 7기(No. 7~13)가 Fig. 13과 같이 배치되어 운전되고 있다. 가시리 풍력발전단지는 제주도 동쪽에 위치하며, 주변에 오름이 산재하여 지형이 복잡하다.

또한 가시리 풍력발전단지에는 후류의 영향을 분석하기 위하여, 풍력발전단지 남서쪽에 자유유동풍속을 측정하기 위한 기상탑과 풍력발전단지 내에 후류측정을 위한 기상탑 2기가 설치되어 있다.

Table 4는 가시리 풍력발전단지에 설치된 풍력발전기 사양을 나타낸다.

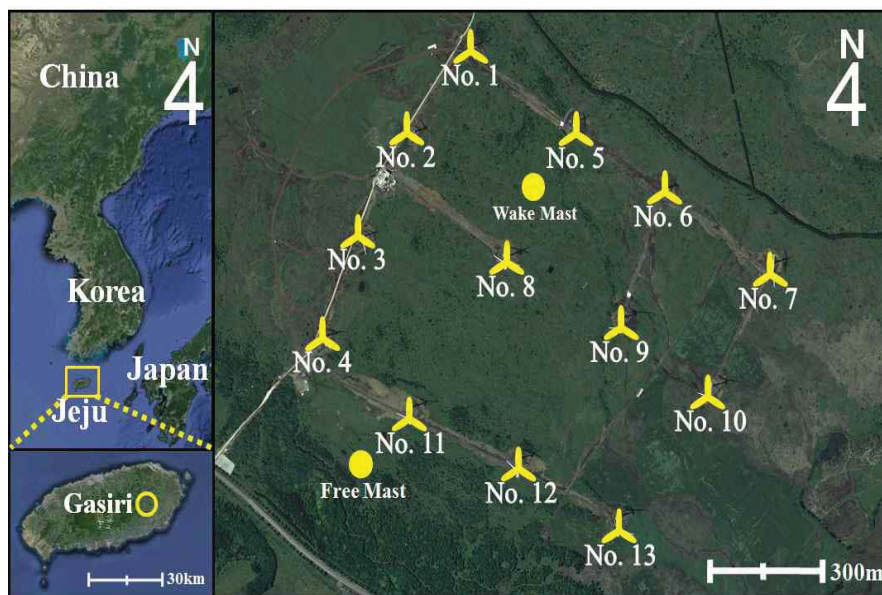


Fig. 13 Layout of wind turbines on Gasiri wind farm

Table 4 Specification of wind turbines of Gasiri wind farm

Manufacturer	Rated power (kW)	Rotor diameter (m)	Hub height (m)	IEC class
Hyosung	750	50	50	IA
Unison	750	50	50	IA
Hanjin	1500	77	70	II A

3.1.2.1 측정 데이터

Fig. 14와 Table 5에 자유풍속 및 후류풍속 측정을 위한 기상탑과 데이터정보를 나타내었다. 70m 높이의 풍속, 풍향 데이터가 사용되었고, 데이터 기간은 2014년 2월 1일부터 2015년 1월 31일까지로 1년간의 데이터가 사용되었다.

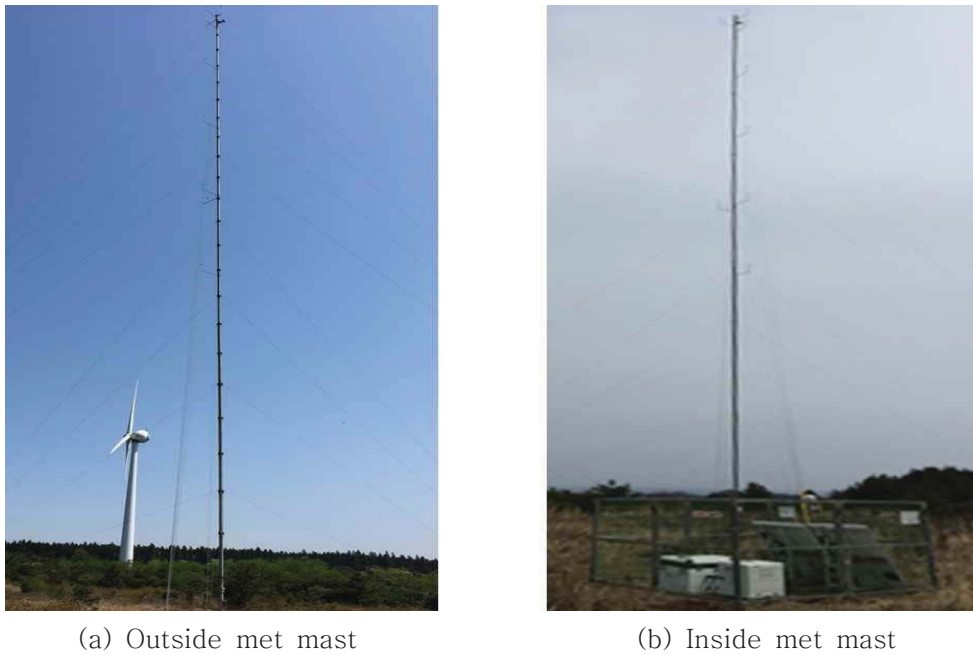


Fig. 14 Met mast of Gasiri wind farm

Table 5 Met mast properties of Gasiri

	Outside met mast	Inside met mast
Height of anemometer (m)	70, 68, 60, 50, 40, 30	70, 68, 60, 50, 40, 30
Height of wind vane (m)	70, 40	67.6, 36.6
Measurement period	2014. 2. 1 ~ 2015. 1. 31	2014. 2. 1 ~ 2015. 1. 31

3.1.3 해석 모델 및 경계조건

WindPRO와 Meteodyn WT를 이용하여 계산영역에 따른 연간 풍력발전량을 예측하기 위해, 성산 풍력발전단지를 중심으로 5km×5km, 7.5km×7.5km, 10km×10km, 15km×15km, 20km×20km의 5가지 도메인 영역을 Fig. 15와 같이 설정하였다.

Meteodyn WT를 이용한 해석을 위해 경계조건을 Table 6과 같이 섹터별로 해석조건을 설정하였다. 성산 풍력발전단지에 대하여 12방위 방향별로 수평 방향 100m, 수직방향 10m, 대기 안정도 2(중립상태)로 설정하여 전산유동해석을 수행하였다. 모든 방향에서의 해석 결과는 100% 수렴하였으며, Fig. 16에 도메인 영역을 5km×5km로 설정했을 때의 Mesh 형태를 대표적으로 나타내었다.

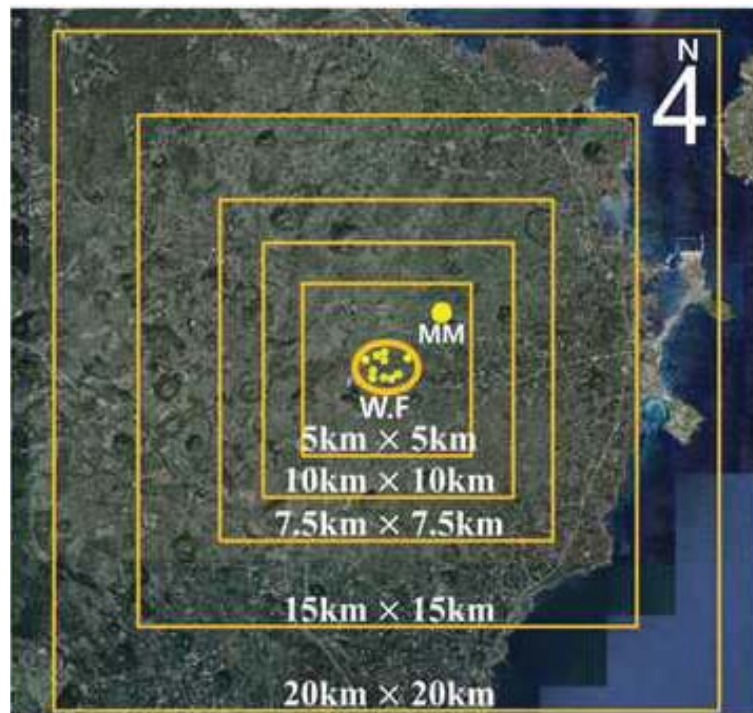


Fig. 15 Domains for predicting power production

Table 6 Parameters used in Meteodyn WT

Properties	Parameters	
Horizontal	100m	
Vertical	10m	
Horizontal expansion Coefficient	1.1	
Vertical expansion Coefficient	1.2	
Verticality parameter	0.7	
Smoothing	1	
Thermal stability class	2(Neutral stability)	
Maximum iteration number	300	
Convergence	100%	
Mesh (points)	5km×5km	627200 (140×140×32)
	7.5km×7.5km	924800 (170×170×32)
	10km×10km	1292832 (201×201×32)
	15km×15km	2213408 (263×263×32)
	20km×20km	3359232 (324×324×32)

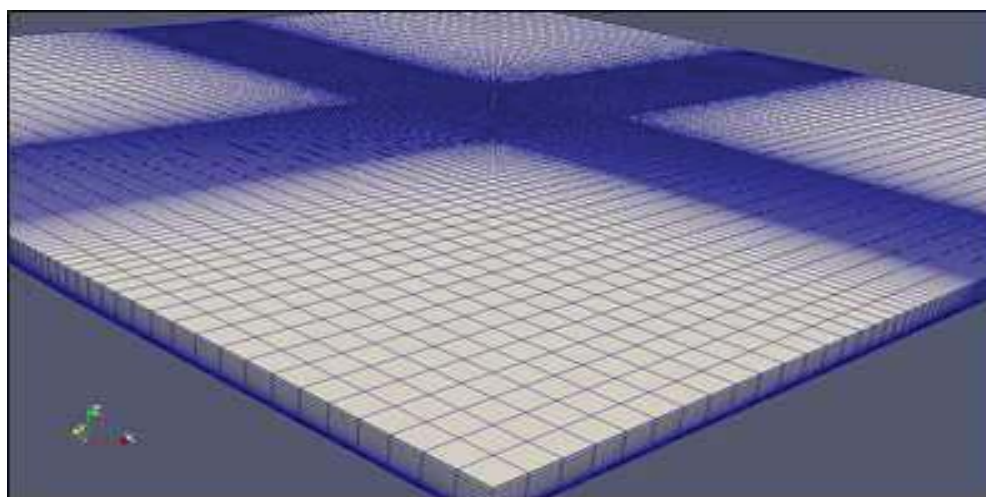


Fig. 16 Mesh for 5km×5km domain size

IV. 분석결과

4.1 성산, 가시리 풍력발전단지에서의 지형복잡지수

풍력자원특성(난류강도 및 윈드시어 등)에 따라 풍력발전기의 성능이 달라진다.[31] 이에 따라 풍력자원에 영향을 주는 지형복잡도에 대해 WAsP에서는 RIX(Ruggedness Index)를 사용하여 해당지역의 복잡도를 평가한다.[32]

RIX의 정의는 지형경사가 30% 보다 큰 지표면과 그 이하인 지표면의 비이다.[33] 일반적으로 해당 사이트로부터 3.5km의 반경 내에서의 지표면 경사도를 분석하게 된다. RIX 값이 0%이면 평탄지형, 10% 이내면 복잡지형, 10~50% 이상이면 산악지형을 의미한다.[34]

WAsP Map Editor를 사용하여 성산과 가시리 풍력발전단지의 RIX를 분석한 결과를 Fig. 17에 나타내었다. 계산 반경은 각 풍력발전단지 중심으로부터 3.5km, 경사도는 30%(16.7°), 방위영역은 5° 간격으로 해석하였다. 해석 결과, 성산 풍력발전단지는 2.1%, 가시리 풍력발전단지는 6.3%의 RIX 값을 보였다. 이는 성산 풍력발전단지 보다 가시리 풍력발전단지가 지형영향으로 인한 풍력자원에 변동이 크다는 것을 의미한다.

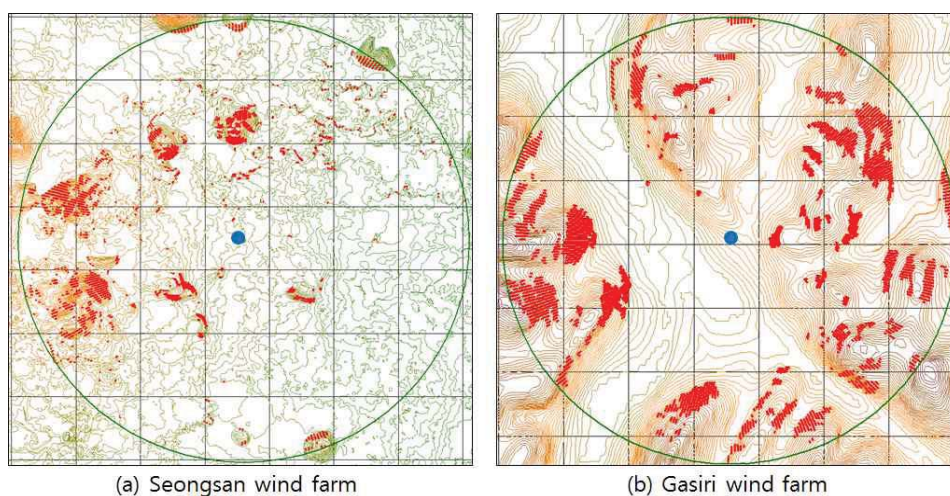


Fig. 17 RIX analysis

4.2 성산지역 AEP 결과

이 절에서는 성산 풍력발전단지로부터 북동쪽에 최소 1.6km, 최대 2.8km의 거리에 설치되어 있는 기상탑 데이터를 사용하여, WindPRO와 Meteodyn WT를 통해 계산된 AEP 시뮬레이션 값을 산출하고 실측 연간발전량과 비교/분석한다.

4.2.1 성산지역 풍향분석

70m 높이의 풍속 데이터를 이용한 와이블 분포 분석 결과를 Fig. 18에 나타내었다. 분석 결과, 평균풍속은 6.78m/s, 척도계수 c 값과 형상계수 k 값은 각각 7.65m/s와 2.10으로 분석되었다.

Fig. 19에 70m 높이의 풍향 데이터를 이용하여 분석한 바람장미를 나타내며 주 풍향은 북서풍으로 나타났다.

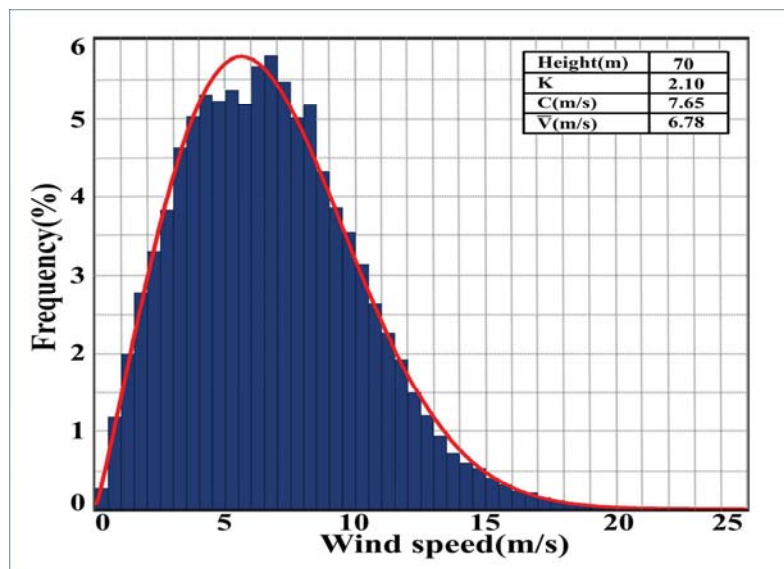


Fig. 18 Weibull wind speed distribution at the position of the met mast

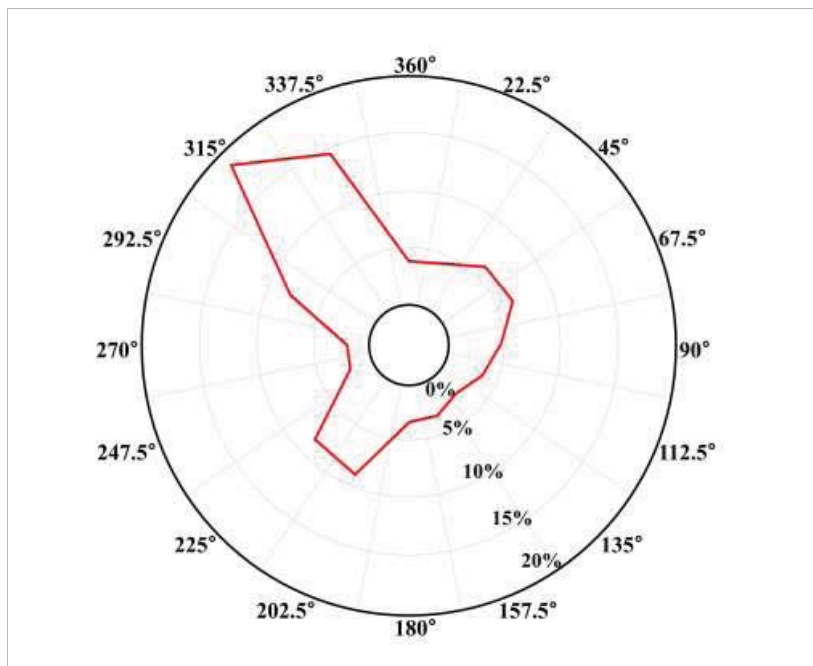


Fig. 19 Wind rose at the position of the met mast

4.2.2 성산지역 AEP 관련 검증

4.2.2.1 해석 도메인에 따른 후류모델 별 AEP 상대오차

Fig. 20과 Fig. 21에 10km×10km의 해석 도메인 면적에 대하여 WindPRO와 Meteodyn WT를 이용하여 연간 풍력발전량을 분석한 결과를 나타내었다. Meteodyn WT를 이용하여 분석된 결과는 4,111~8,179 MWh/year 범위로 해석되었고, WindPRO는 Meteodyn WT의 결과보다 높은 4,400~10,000 MWh/year 범위의 해석결과를 나타내었다. 즉, WindPRO가 Meteodyn WT보다 다소 높은 연간발전량을 예측함을 확인하였다.

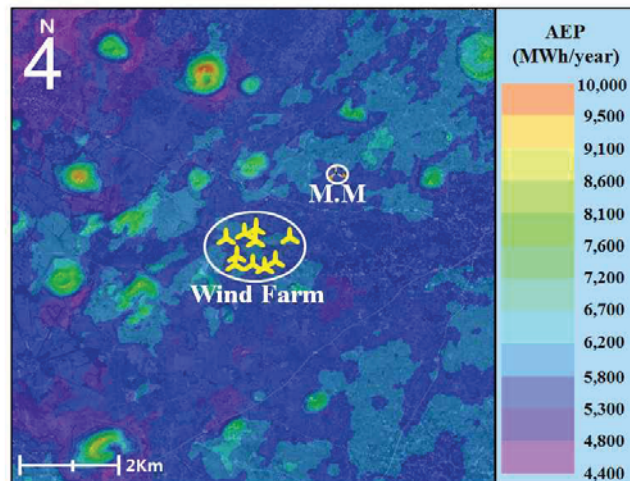


Fig. 20 AEP Production by WindPRO

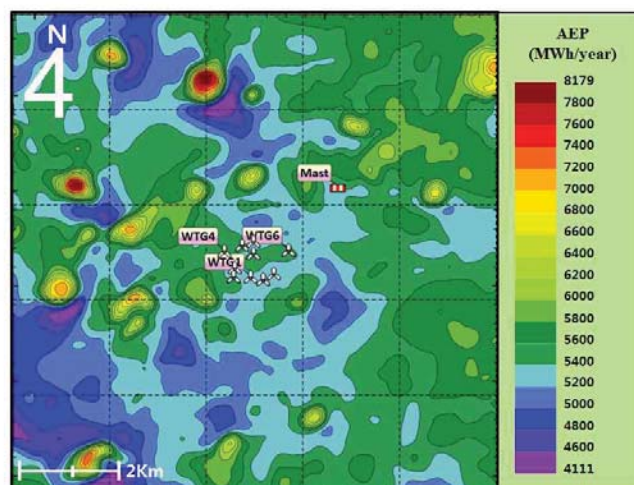


Fig. 21 AEP Production by Meteodyn WT

대표적인 후류모델인 Jensen 모델과 EV 모델을 적용하여 해석도메인 별 풍력 발전단지의 연간 풍력발전량을 WindPRO와 Meteodyn WT를 통해 예측하고, 실제 연간 풍력발전량을 참값으로 하여 예측된 값과의 상대오차를 구하였다.

Fig. 22에 두 소프트웨어를 이용하여, EV 모델을 적용하였을 때의 연간 풍력 발전량에 대한 상대오차를 분석한 결과를 나타내었다. Meteodyn WT은 2.54~3.18%의 상대오차를 보였고, WindPRO는 7.17~11.53%의 상대오차를 보였다. Meteodyn WT는 해석도메인에 관계없이 3.2% 내의 상대오차를 보인 반면, WindPRO는 5km×5km의 해석도메인에서 10% 이상의 상대오차를 보였다. EV 모델을 이용한 풍력발전단지의 연간 풍력발전량 예측 시, Meteodyn WT가 WindPRO보다 나은 예측 성능을 보임을 확인하였다.

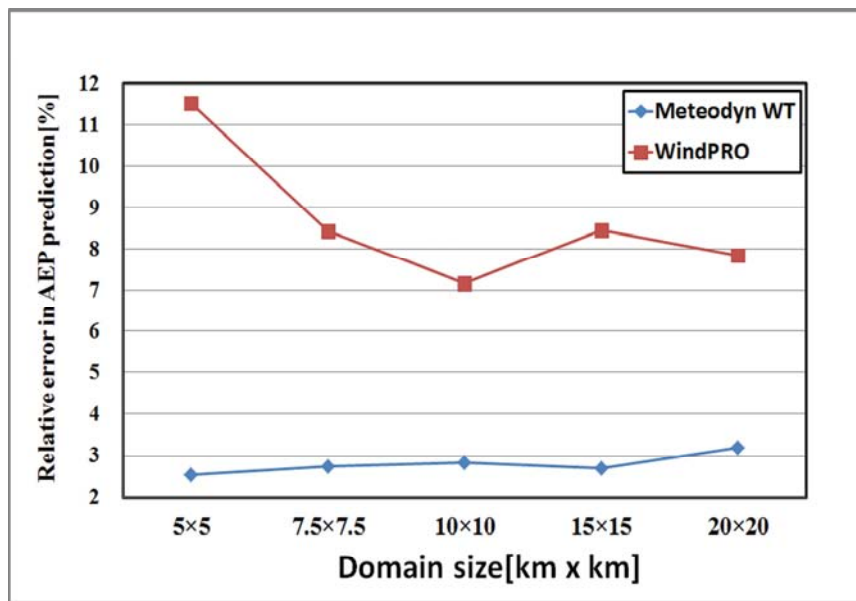


Fig. 22 Relative error in AEP with various domain sizes when EV model was applied to AEP prediction

Fig. 23에 두 소프트웨어를 이용하여, Jensen 모델을 적용하였을 때의 연간 풍력 발전량에 대한 상대오차를 분석한 결과를 나타내었다. Meteodyn WT은 2.86~3.51%의 상대오차를 보였고, WindPRO는 3.78~6.78%의 상대오차를 보였다.

두 소프트웨어를 이용하여 후류모델별로 산출한 결과를 비교/분석한 결과, Meteodyn WT는 후류모델에 관계없이 3.5% 이내의 상대오차를 보였다. 반면에 WindPRO의 경우, EV 모델보다 Jensen 모델이 평균 4%의 높은 예측 성능을 보였다.

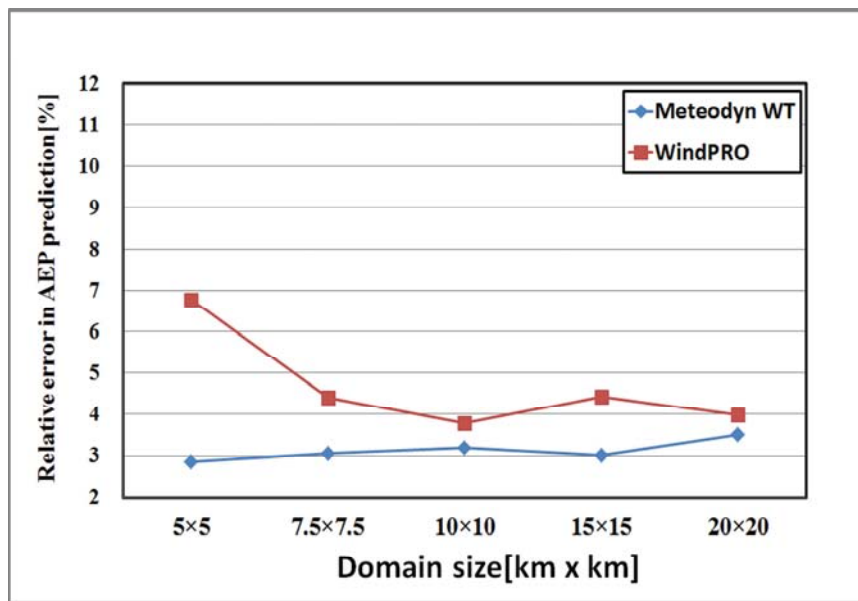


Fig. 23 Relative error in AEP with various domain sizes when Jensen model was applied to AEP prediction

4.2.2.2 후류모델에 따른 풍력발전기 별 AEP 비교

앞서 5가지의 해석도메인에 대하여 연간 풍력발전량에 대한 연구를 수행한 결과, 10km×10km 해석 도메인에서의 결과가 가장 실측값에 근접하였다. 이에 따라, 10km×10km 해석 도메인을 적용하여 성산 풍력발전단지의 10기의 풍력발전기에 대하여 두 후류모델을 적용하고 예측 연간 풍력발전량을 산출한 후, 실측값을 참값으로 하여 상대오차를 구하였다. Fig. 24에 성산 풍력발전단지의 1~5번 풍력발전기에 대한 상대오차 결과를 나타내었고, Fig. 25에 6~10번 풍력발전기에 대한 상대오차 결과를 나타내었다.

Meteodyn WT는 후류모델에 관계없이 각 풍력발전량에 적용하여 산출한 연간 풍력발전량에 대하여 상대오차는 Jensen 모델을 적용 시 1.36~4.83%, EV 모델 적용 시 0.34~4.53%를 나타내었다. 또한 WindPRO를 이용하여 두 후류모델을 각 풍력발전기에 적용하여 산출한 연간 풍력발전량에 대한 상대오차는 Jensen 모델 적용 시 0.56~10.27%, EV 모델 적용시 2.56~18.19%를 나타내었다.

Meteodyn WT의 결과가 두 후류모델 모두의 경우에서 각 풍력발전기에 대한 상대오차가 4.9% 이내에 결과를 보인 반면, WindPRO의 결과는 5번 풍력발전기가 Jensen 모델 적용 시 최대 10%, EV 모델 적용 시 최대 18%의 높은 상대오차를 보였다. 이와 같이 상대오차가 높게 나타난 이유는 기상탑이 주풍향에 방향에 설치된 9번 풍력발전기와 로터직경 3.6배(290m)의 근접한 거리에 위치하여 후류의 영향을 직접적으로 받았기 때문이라고 생각된다.

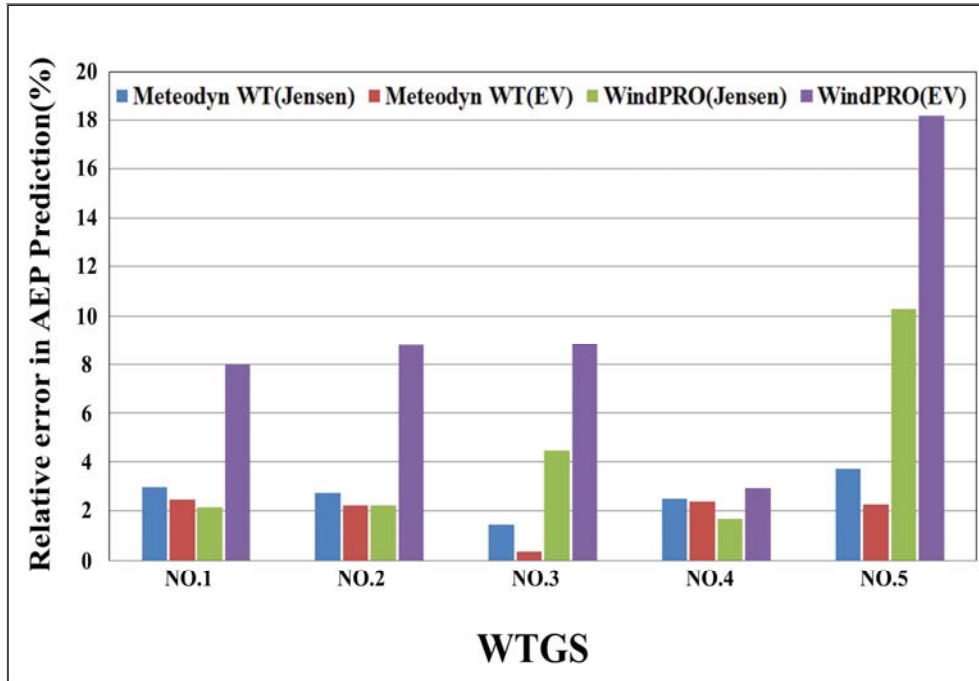


Fig. 24 The accuracy of AEP prediction for No. 1 to No. 5 wind turbines (Domain size: 10km×10km)

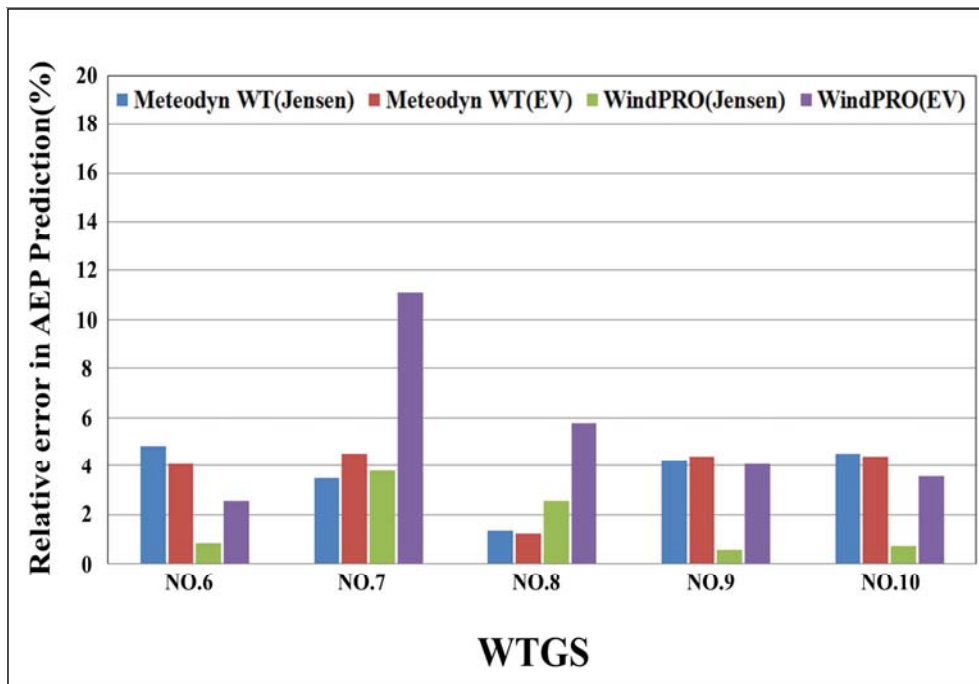


Fig. 25 The accuracy of AEP prediction for No.6 to No. 10 wind turbines (Domain size:10km×10km)

4.2.2.3 CF 비교

Fig. 26은 성산 풍력발전단지의 풍력발전기 배치상태와 기상탑으로부터 측정된 풍향 데이터를 이용하여 분석한 주풍향을 나타낸다. 주풍향을 직접적으로 받는 4, 6, 9, 10번 풍력발전기는 Meteodyn WT를 이용하여 분석한 결과값보다 WindPRO를 이용하여 분석한 연간풍력발전량 결과값이 실측값과 더 근접한 값을 보였다. 반면에 주풍향을 직접적으로 받는 풍력발전기의 후방에 설치된 5, 7, 8번 풍력발전기의 경우, Meteodyn WT를 이용하여 분석한 결과값이 WindPRO를 이용하여 분석한 결과값보다 실측값에 근접한 결과를 보였다.

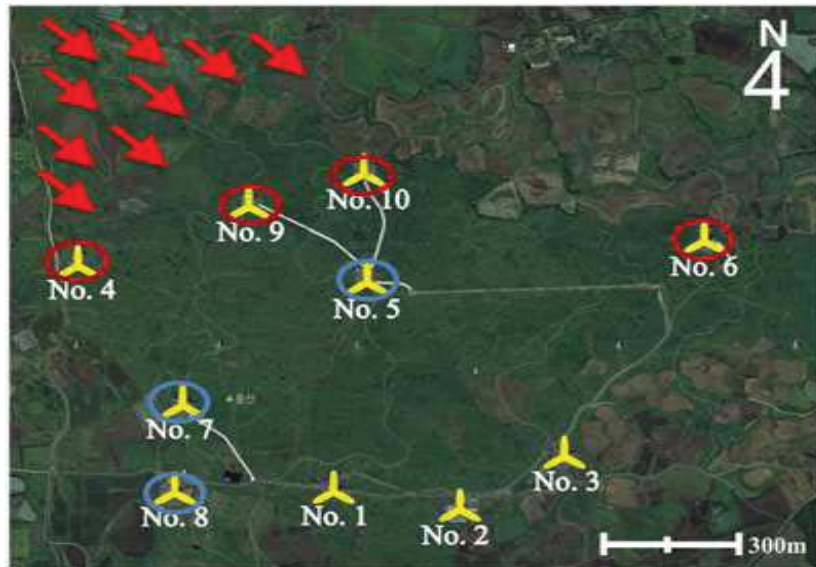


Fig. 26 Prevailing wind direction on Seongsan wind farm

두 소프트웨어에 10km×10km 해석도메인을 적용하여 산출한 연간 풍력발전량 시뮬레이션 결과와 실제 연간 풍력발전량으로부터 식(6)을 통해 각각의 설비이용률(Capacity factor, CF)을 계산하였다.

$$CF [\%] = \frac{AEP}{8760 \times Rated\ power} \times 100 \quad (6)$$

Fig. 27에 각 풍력발전기의 Meteodyn WT, WindPRO를 이용하여 산출한 CF와 실제 연간 풍력발전량으로부터 산출한 CF를 함께 나타내었다. 시뮬레이션 값과 실측값을 비교한 결과, WindPRO가 실측값보다 과대 예측하는 경향을 보인 반면, Meteodyn WT는 과소 예측하는 경향을 보였다. 4, 6, 9, 10번 풍력발전기가 5, 7번 풍력발전기에 비해 후류의 영향을 덜 받기 때문에 CF값이 나올 것이라 생각된다.

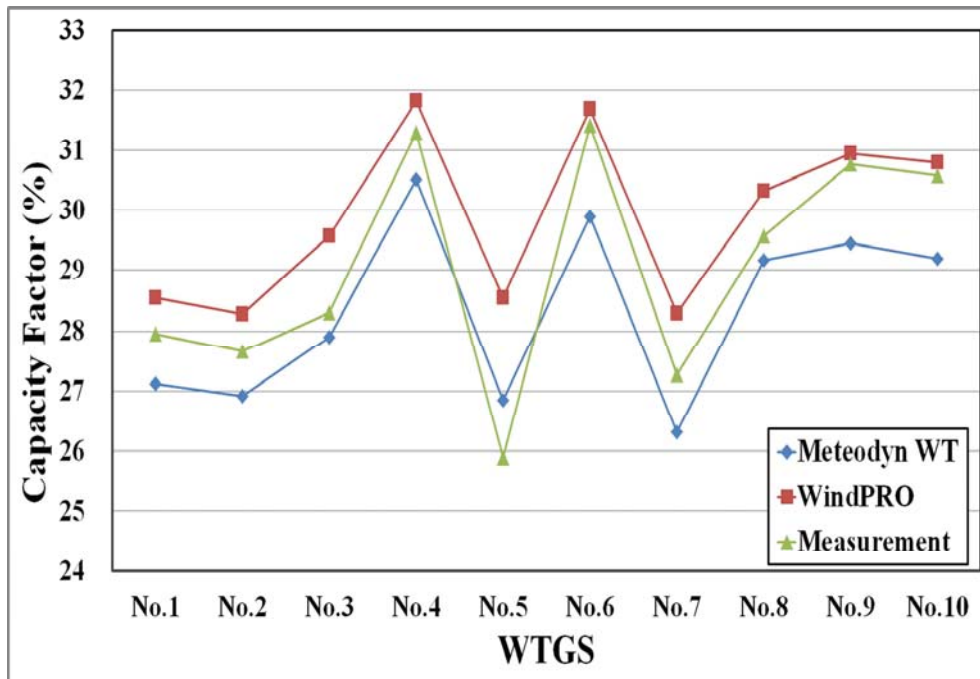


Fig. 27 Comparison of actual and predicted capacity factors of all wind turbines (Jensen model used, domain size: 10 km X 10 km)

4.3 후류 검증

4.3.1 후류영향 비교를 위한 자유풍속 측정 방위 구간

후류의 영향을 보다 정확하게 비교하기 위해서는 자유풍속 데이터를 보정해야 한다. 즉, IEC 61400-12-1 Annex A에 따라 주변에 운전 중인 풍력발전기, 장애물 등으로부터 발생하는 후류영향으로 인해 왜곡된 데이터를 배제하여, 유효 측정방위구간(Measurement sector)을 설정하고, 자유풍속만을 사용하여 후류의 영향을 분석해야 한다. 식(7)을 통해 배제 풍향각의 범위를 결정할 수 있다.

$$\alpha = 1.3 \arctan(2.5D_n/L_n + 0.15) + 10 \quad (7)$$

여기서,

L_n 은 풍력터빈 또는 기상탑 인근에서 운전 중인 풍력터빈의 거리(m)

D_n 은 인근에서 운전 중인 풍력터빈의 로터 길이(m)

위 식을 이용하여 자유풍속 측정을 위한 기상탑의 배제 방위구간(Excluded sector)을 계산하고, 유효 측정방위구간을 계산한 결과, Fig. 28과 같이 123.6°~303.1°의 유효 측정방위구간이 결정되었다.

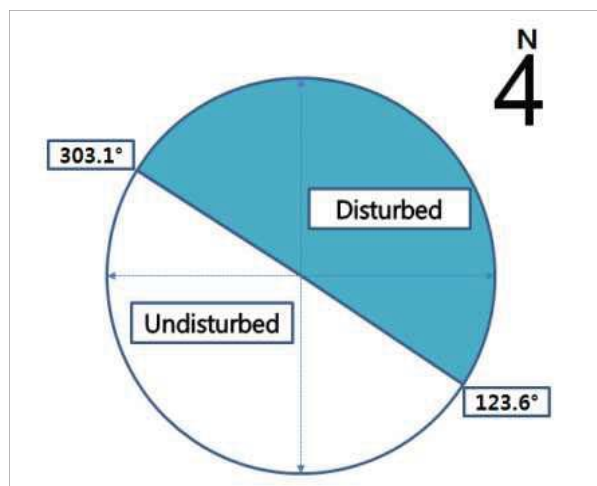


Fig. 28 Measurement sector of the outside mast

4.3.2 Meteodyn WT S/W를 사용한 후류영향 분석

앞서 구한 유효 측정방위구간 내의 데이터를 이용하여 Meteodyn WT를 통해 후류측정 기상탑 지점에서의 풍속을 예측하였다. Fig. 29에 Meteodyn WT를 이용하여 분석한 후류모델별 후류의 영향을 나타내었다. 분석 결과, 풍력발전기 후방에 발생하는 후류가 Jensen 모델 적용시 1,133m, EV 모델 적용시 1,001m까지의 영향을 미치는 결과를 보임에 따라, Jensen 모델이 EV 모델보다 132m 정도 길게 후류영향을 길게 해석함을 확인하였다.

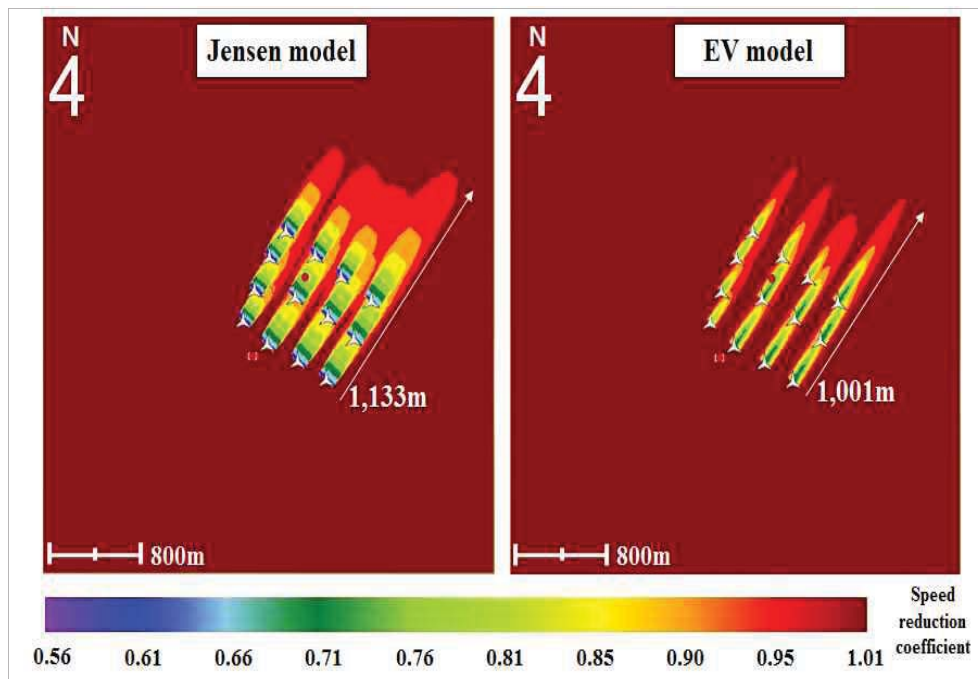


Fig. 29 Comparison of wake length at Jensen model and EV model
(Sector: 220°, domain size: 3.8km×3.8km)

Fig. 30~33은 Meteodyn WT를 이용하여 분석한 180°~250° 구간에서의 후류모델별 후류영향을 가시화한 그림이다. 180°~230° 구간에서는 동일한 허브높이의 풍력발전기에 대한 후류 영향을 확인할 수 있었다. 하지만 240°~250° 구간에서는 풍력발전기의 허브높이가 다르기 때문에 후류의 영향을 정확하게 분석할 수 없어 분석대상에서 제외하였다

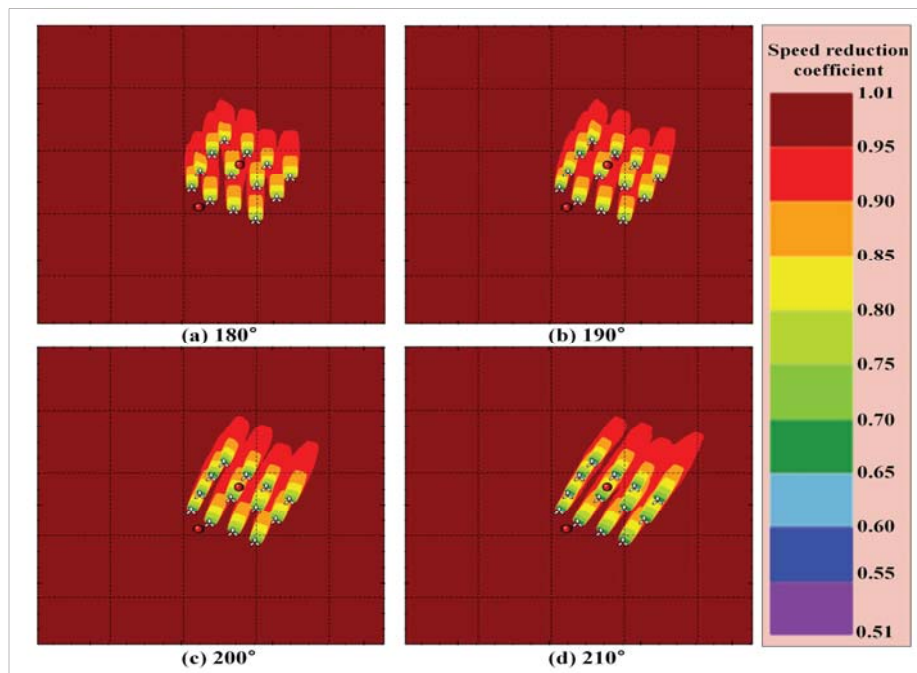


Fig. 30 Wake effect at Jensen model
(Sector: 180°~210°, domain size: 3.8km×3.8km)

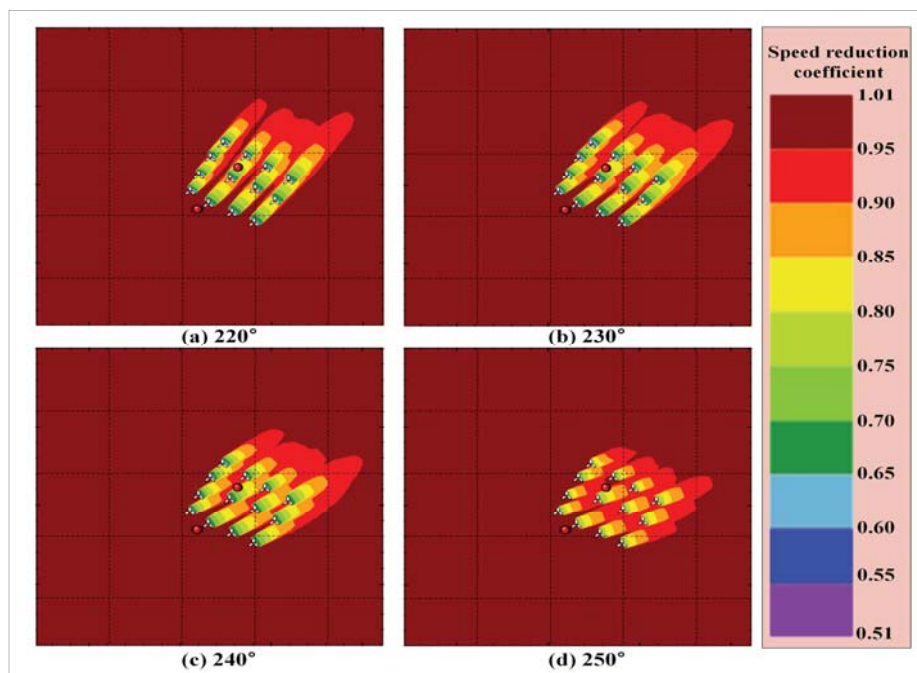


Fig. 31 Wake effect at Jensen model
(Sector: 220°~250°, domain size: 3.8km×3.8km)

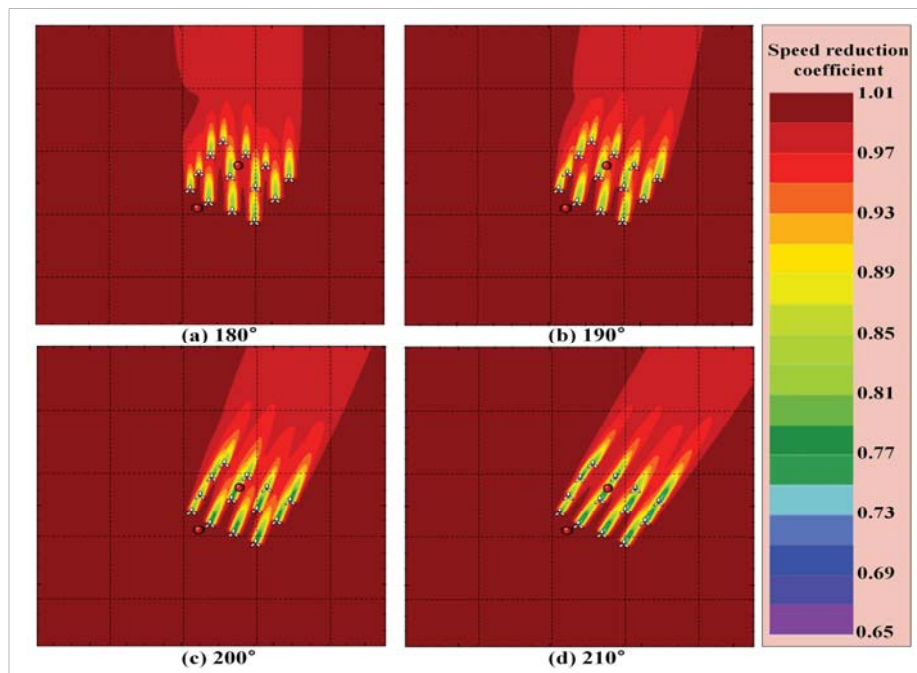


Fig. 32 Wake effect at EV model
 (Sector: 180°~210°, domain size: 3.8km×3.8km)

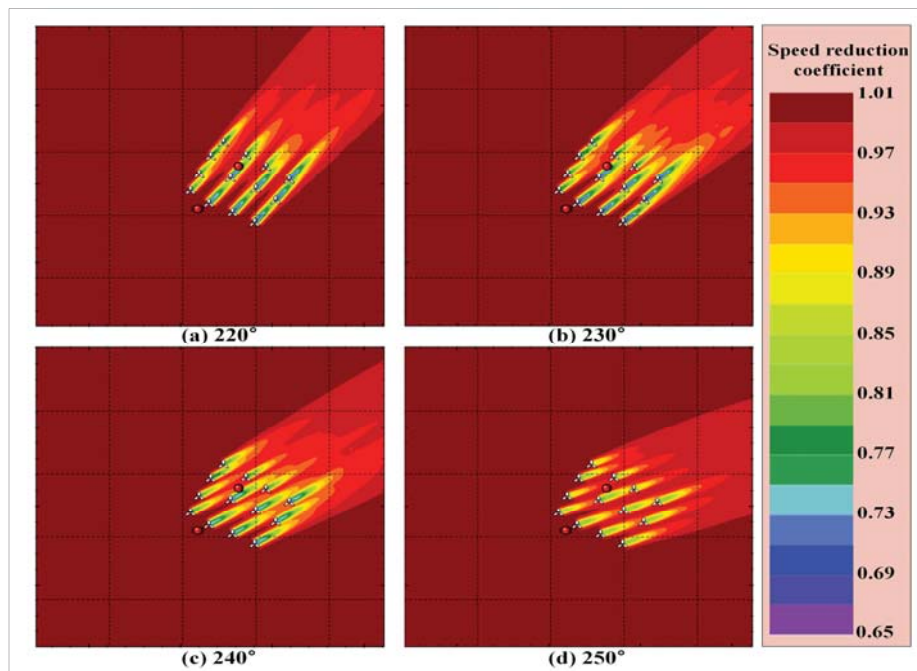


Fig. 33 Wake effect at EV model
 (Sector: 220°~250°, domain size: 3.8km×3.8km)

Fig. 34와 Table 7은 가시리 풍력발전단지의 후류가 발생하는 140°~230° 구간에서의 실측데이터(자유풍속, 후류풍속)와 동일한 허브높이 풍력발전기를 대상으로 Jensen 모델과 EV 모델을 이용하여 분석한 시뮬레이션 결과를 비교/분석한 결과이다.

실측 데이터를 참값으로 하여 각 시뮬레이션 결과와의 상대오차를 구한 결과, Jensen 모델의 경우 평균 12.10%의 상대오차를 보였고, EV 모델의 경우 평균 14.70%의 상대오차를 보임에 따라 Jensen 모델이 EV 모델에 비해 평균 2.6% 높은 정확도를 나타내었다.

자유풍속과 후류풍속을 비교한 결과, 220°~230° 구간에서 풍속이 최대 42.46%의 감소율을 보였다. 또한 Jensen 모델과 EV 모델 모두 220°~230° 구간에서 가장 높은 상대오차를 보였다. 특히 EV 모델의 경우, 최대 53.04%까지의 높은 상대오차를 보였다.

높은 풍속 감소율 및 상대오차가 발생한 이유는 220~230° 구간에서 후류측정을 위한 기상탑이 200m(2.7D)의 인접한 거리에 위치한 8번 풍력발전기의 후류 영향을 직접적으로 받았기 때문이라고 생각된다.

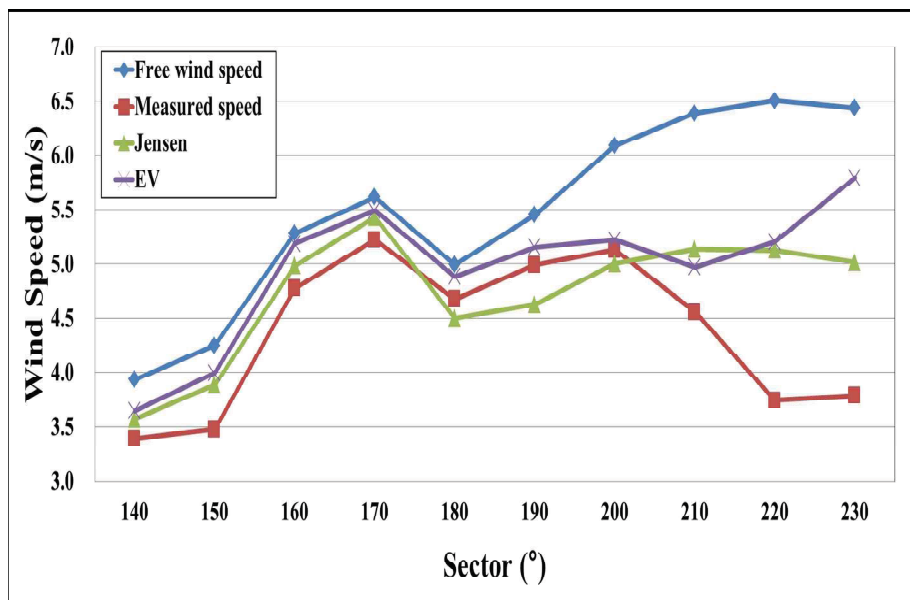


Fig. 34 Comparison of actual and predicted wind speed with wind sector

Table 7 Wake effect with wind sector

Wind sector (°)	Measured data			Predicted data			
	Free wind speed (m/s)	Wind speed at M.M for wake (m/s)	Reduction rate (%)	Wind speed at M.M for wake (Jensen) (m/s)	Relative error (%)	Wind speed at M.M for wake (EVM) (m/s)	Relative error (%)
140	3.94	3.39	13.82	3.57	5.25	3.65	7.57
150	4.25	3.48	18.19	3.89	11.72	4.00	14.90
160	5.28	4.77	9.64	4.98	4.37	5.19	8.68
170	5.62	5.22	7.04	5.43	4.03	5.49	5.21
180	4.99	4.68	6.36	4.50	3.78	4.88	4.45
190	5.46	4.99	8.52	4.63	7.30	5.16	3.31
200	6.09	5.13	15.80	5.00	2.50	5.22	1.78
210	6.39	4.56	28.63	5.14	12.65	4.97	9.01
220	6.51	3.74	42.46	5.13	36.94	5.21	39.02
230	6.44	3.79	41.19	5.02	32.46	5.32	53.04
Avg.	5.5	4.38	19.17	4.73	12.10	4.91	14.70

5. 결 론

본 연구는 성산 풍력발전단지에서 측정된 실제 연간에너지생산량과 WindPRO 및 Meteodyn WT 소프트웨어를 통해 예측된 연간 에너지생산량을 비교/분석하였다. 두 소프트웨어를 사용하여 5가지 해석 도메인에 따른 AEP를 예측하고 각 소프트웨어 별로 보다 정확한 해석 도메인크기를 제시하였다. 또한 가시리 풍력발전단지로부터 Meteodyn WT를 사용하여 두 가지 후류 모델을 적용하고, 예측된 풍속과 실제 기상탑으로부터의 풍속과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 3차원 전산유동해석을 기반으로 하는 Meteodyn WT가 선형이론을 기반으로 하는 WindPRO 보다 예측 AEP가 실측값에 근접하였다
- (2) WindPRO에서 Jensen 모델 적용 시 10km×10km의 도메인으로 해석할 때 가장 실측값에 가까운 AEP 예측 성능을 보였다.
- (3) Meteodyn WT에서 해석도메인 크기 및 후류모델의 변화와 관계없이 예측 AEP와 실측 AEP의 상대오차는 3.52% 미만이었다.
- (4) 가시리 풍력발전단지에서 실측값에 근거하여 중복후류가 일어나는 구간에서 최대 42.46% 풍속 저감율을 보였다.
- (5) Meteodyn WT에서 중복후류해석 결과 Jensen 모델이 EV 모델보다 평균 2.6% 높은 예측율을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] WWEA (World Wind Energy Association), "New Record in Worldwide Wind Installations", 2015.
- [2] Korea Energy Economics Institute, "2012 Year Book of Energy Statistics", 2012.
- [3] Ministry Of Trade, "Industry & Energy, Korea Energy Master Plan outlook & Policies to 2035", 2014
- [4] "강정마을 신·재생에너지 보급을 위한 연구개발 용역사업", 풍력발전 단지개발 타당성 조사 최종보고서, 2014
- [5] Wolfgang Schlez, "EWEA wind resource workshop Session 4: Wakes", 2011
- [6] Moon-seon Jeong, "The Energy Production of Offshore Wind Farm Using WindPRO, Journal of power electronics", 2010
- [7] Yunmi Jeong, "A study on 750kW Wind farm at Taean Costal National Park using WindPRO", Korean Society for New and Renewable Energy, 2010
- [8] Kim, Hyeon-Gi, "Variation of AEP to wind direction variability", Journal of the Korean Solar Energy Society, 2011
- [9] CARLOS DIAZ-ASENSIO MANCEBO, "Comparison Study For Wind Resource Assesment In Complex Domain Using METEODYN And WINDSIM", 2014
- [10] CARLOS DIAZ-ASENSIO MANCEBO, BAhri Uzunoglu, "A Comparison Study For Two Commercial Wind Resource Analysis CFD Software For An EMBANKMENT", EWEA 2014
- [11] Jaekyoon Woo, "Predictions of Wind Speed on Complex Terratin Using WAsP and WindSim", The Korean Society of Mechanical

Engineers, 2010

- [12] Woo, Jae-kyoon, "AEP Prediction of a Wind Farm in Complex Terrain : WinPRO Vs Winsim", Journal of the Korean Solar Energy Society, 2012
- [13] Kim Jin-Han, "Prediction of Annual Energy Production of Wind Farms in Complex Terrain using MERRA Reanalysis Data", Journal of the Korean Solar Energy Society, 2014
- [14] A. Llombart, A. Talayero, A. Mallet, E. Telmo, "Performance analysis of wind resource assessment programs in complex terrain", Proceedings of the 2006 International Conference on Renewable Energy and Power Quality, Palma de Mallorca, 2006
- [15] WindPRO, <http://www.emd.dk/windpro/>
- [16] WAsP, <http://www.wasp.dk/>
- [17] MeteodynWT, <http://meteodyn.com/>
- [18] Website for Aeolus, <http://www.ict-aeolus.eu/index.html>
- [19] J. G. Schepers, "ENDOW:Validation and improvement of ECN's wake model", Technical Report, Energy research Centre of the Netherlands, ECN-C-03-034, 2003.
- [20] Peter Eecen, "Wind farm calculation and optimization with FarmFlow", Dutch Wind Workshops, 2010
- [21] IEC 61400-12-1 Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbine, IEC, 2005.
- [22] F. González Longatt, P. Wall, V. Terzija, "Wake effect in wind farm performance: Steady-state and dynamic behavior", Renewable Energy 39, 2012
- [23] B. Sanderse, "Aerodynamics of Wind Turbine Wakes"
- [24] Katic, I., Højstrup, J., N.O Jensen, "A Simple Model for Cluster Efficiency", European Wind Energy Association Conference and Exhibition, Italy, 1986.

- [25] Douwe J. Renkema, "Validation of wind turbine wake models", Master of Science Thesis, TUDelft, 2007.
- [26] Technical Guidelindes for WInd Turbines, KOREAN REGISTER, 2008
- [27] TAO HAN, "The assessment of dynamic wake effects on loading", Master of Science Thesis, TUDelft, 2011.
- [28] AINSLIE, John F, "Calculating the flow filed in the wake of wind turbines", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 27, 1988, 213-224.
- [29] IEC Wind turbines – Part 12-2: Power performance of electricity producing wind turbines based on nacelle anemometry, IEC.
- [30] Michael C. Brower, "Wind Resource Assessment, John Wiley & Sons", Inc., Hoboken, New Jersey, 2012.
- [31] Andrew Clifton, Paul Flening, Levi Kilcher, Julie K. Lundquist, "Effects of Changing Atmospheric Conditions on Wind Turbine Performance", National Renewable Energy Laboratory, 2012,
- [32] Wood, N, "The onset of separation in neutral turbulent flow over hills", Boundart-Layer Meteorology 76, 1995,
- [33] Pramod Jain, "Wind Energy Engineering", Mc Graw Hil
- [34] WAsP Help Facility and On-line Documentation, <http://www.wasp.dk/>.