

## 고해상도 바람지도 구축 시스템에 관한 연구

\*이 화운<sup>1)</sup>, \*\*김 동혁<sup>1)</sup>, 김 민정<sup>1)</sup>, 이 순환<sup>2)</sup>, 박 순영<sup>1)</sup>, 김 현구<sup>3)</sup>

### Study of evaluation wind resource detailed area with complex terrain using combined MM5/CALMET system

\*Hwa-Woon Lee, \*\*Dong-Hyeuk Kim, Min Jung Kim, Soon Hwan Lee, Soon Young Park, Hyun Goo Kim

**Key words** : Wind resource(풍력자원), High-resolution wind map(고해상도 바람지도), MM5, CALMET

**Abstract** : To evaluate high-resolution wind resources for local and coastal area with complex terrain was attempted to combine the prognostic MM5 mesoscale model with CALMET diagnostic modeling this study. Firstly, MM5 was simulated for 1km resolution, nested fine domain, with FDDA using QuikSCAT seawinds data was employed to improve initial meteorological fields. Wind field and other meteorological variables from MM5 with all vertical levels used as initial guess field for CALMET. And 5 surface and 1 radio sonde observation data is performed objective analysis whole domain cells. Initial and boundary condition are given by 3 hourly RDAPS data of KMA in prognostic MM5 simulation. Geophysical data was used high-resolution terrain elevation and land cover(30 seconds) data from USGS with MM5 simulation. On the other hand SRTM 90m resolution and EGIS 30m landuse was adopted for CALMET diagnostic simulation. The simulation was performed on whole year for 2007. Vertical wind field a hour from CALMET and latest results of MM5 simulation was comparison with wind profiler(KEOP-2007 campaign) data at HAENAM site.

#### subscript

KEOP : Korea Enhanced Observing Period

### 1. 서 론

세계는 지금 화석에너지 자원의 고갈과 지구 온난화 문제 극복을 위해 청정하고 무한한 대체 에너지 자원 연구 개발에 박차를 가하고 있다. 이중 풍력은 태양광, 지열, 연료전지 등의 신재생 에너지 중 현재 단계에서 기술성숙도와 경제성이 가장 높고 실현가능성이 매우 큰 대체에너지 자원이다. 이미 미국을 비롯한 많은 지역에서도 풍력 에너지 평가를 위하여 실증연구를 실시하고 있다.<sup>(1)</sup>

풍력발전의 선행과제는 정확한 풍력자원의 평가이다. 대기는 유체의 측면에서 바라볼 때 에너지 평형을 유지하기 위해 항상 순환하지만 이러한 바람은 복잡한 메카니즘으로 시·공간적 분포 특성을 달리하므로 정확한 평가는 매우 어렵다. 한반도의 경우 대기 대순환적인 측면에서 경압성이 우수한 북반구 중위도에 위치하고 삼면이 바다로 둘러싸여 있기 때문에 상대적으로 풍력발전에 우수한 입지조건을 갖추었음에도 불구하고 정량적으로 정확한 풍력자원의 평가는 초기단계에

머무르고 있다.<sup>(2)</sup> 이러한 이유로 정부에서는 2003년 이후 구체적인 계획을 수립하고 풍력자원 평가에 관한 연구사업을 진행하고 있다.

현재까지 풍력자원 평가방법은 저해상도의 바람지도로부터 정성적 분석을 통해 풍력자원이 우수한 지역을 선정하고 현장 관측을 통해 상세 풍력자원 분석을 실시하여 왔지만 이는 많은 비용과 시간을 필요로 하며 정확한 관측지점 선정의 어려움이 있다. T.V. Ramachandra(2003)은 관측자료와 GIS를 활용하여 인도지역의 풍력자원 평가를 실시하였고 Kornelia Radics (2006)은 지상관측자료를 객관분석하여 풍력자원을 예측하였다. Brian W. Raichle(2008)은 TVA/ASU Campaign에 의해 실시된 바람 관측자료를 이용하여 풍력자원 특성을 분석하였으며 J.J. Manwell(2001)은 Buoy와 선박관측자료를 이용하여 연안지역 해상의 풍력자원을 평가하였다. 이러한 기존의 관측망을 통한 풍력자원 평가 방법은 관측지점의 이격거리가 매우 커 대표성이 떨어지며 객관분석시

- 
- 1) 부산대학교 대기환경과학과  
E-mail : heakee@pusan.ac.kr  
Tel : (051)583-2651 Fax : (051)517-1217
  - 2) 부산대학교 BK21 연안환경시스템사업단
  - 3) 한국에너지기술연구원

지형 및 지표면의 효과가 반영되지 못하므로 오차가 복잡지형이나 지표의 물리적 성질이 매우 상이한 연안지역에서 활용이 어렵다.(김현구 등, 2005)

1990년 이후로 유럽에서는 컴퓨터 성능의 발달과 함께 중규모 수치모형을 이용한 풍력자원 연구가 활발히 진행되었다. 중규모 수치모형의 경우 수km이하의 격자해상도로 구성하여 중규모 운동과 지형 및 지표특성을 반영한 국지적인 바람장 모사가 가능하여 중·저 해상도의 바람지도 작성 후 풍력발전 유망 후보지 선정 및 풍력자원 특성 분석을 실시하였다. 김현구 등(2006)은 9km격자 해상도로 장기간 수치바람모의를 통해 한반도 저해상도 바람지도를 구축하고 육·해상에 대하여 전반적인 풍력자원량을 추정하였다. 그 결과 산악지역과 남서해안 및 남동해안 일대에서 풍황이 우수하며 한반도가 풍력발전에 적합하다고 제시하였다.

저해상도의 바람지도의 경우 잠재적인 풍력자원량과 유망후보지 정보를 대략적으로 제공할 수 있으나 실제적인 풍력발전 단지의 건설을 위해서는 보다 상세한 고해상도의 바람지도의 구축과 풍력자원 특성 분석이 필요하다. 특히 한반도는 복잡한 해안선을 이루고 굴곡이 심한 지형으로 이루어져 국지풍계의 발달이 매우 복잡하다. 또한 대도시들이 해안에 인접하여 연안지역의 열적 환경 변화를 초래하고 대단위 간척사업과 낮은 구릉성 산지지역의 평탄화 사업 등은 대기흐름의 역학적 변화를 초래하는 요인으로 작용한다. 즉 국지적 풍력자원 특성을 분석하고 에너지 자원량을 산출하기 위해서는 중규모 대기운동을 고려한 중규모 수치모형과 상세영역에서의 지형과 지표구조물에 의한 바람의 역학적 변화와 지표 거칠기 및 물리적 특성에 의한 경계층내의 3차원 바람장 모사를 신속, 정확히 처리할 진단모형의 도입이 필요하다. 1990 후반 KAMM-WASP 방법이 Risoe에 의해 개발되었으며 풍력자원평가에 널리 사용되었고 TrueWind Solutions에서는 MASS와 WindMap을 결합한 MesoMap 시스템을 이용하여 미국 전역 및 주영역의 풍력자원평가를 실시하였다. 두 시스템의 원리는 중규모 수치모형의 결과를 입력자료로 하여 질량보존을 근간으로 한 나비-아스토크 방정식으로부터 해를 찾는 방법으로 비정역학 중규모 흐름을 해석하였다. 그러나 WASP 및 WindMap의 경우 여전히 복잡지형에서 응용이 어려우며 지표특성이 반영되지 못하므로 대기와 해양, 육지와 해양간의 급격한 대기흐름의 변화를 모사하지 못하는 단점이 있다. Anantharaman Chandrasekar et al. (2003)은 정확한 대기오염물질의 이동모사를 위한 상세한 바람장 생성을 위하여 중규모 기상예측 모형인 Penn State/NCAR Mesoscale Model(MM5)와 국지기 진단 기상장 모형인 California Meteorological(CALMET)을 결합하여 대기경계층 하층의 상세바람장 모사능력을 향상하였다.

반면 고해상도의 대기유동장 모사를 위해서는 무엇보다 경계자료 및 입력자료의 상세화가 매우 중요하다. 중규모 기상모형을 이용한 다양한 연구들이 있었다. H.W. Lee(2008)은 지표 및 지형의 상세자료가 대기 순환장에 중요한 요소임을 언급하였으며 Lee, S.-H.(2001)은 지표특성과 지형에 의한 국지순환장의 변화를 살펴보았다. 반

면 고해상도(1km~100m) 바람장 생성을 위한 진단 모형의 경우 지형지물에 의한 역학적인 흐름의 변화와 지표특성에 의한 미시규모 흐름의 특성을 모사하는 것이 중요하나 이러한 시도는 이루어지지 못하였다. 현재 컴퓨터 시뮬레이션 능력의 발달과 함께 상세한 경계자료 또한 획득이 가능하므로 본 연구에서는 중규모 수치예측모형(MM5)와 국지규모 진단모형(CALMET)의 결합 시스템을 구축하고 검증하며 나아가 상세영역의 정확한 3차원 바람장 구현을 통해 풍력자원을 평가하고자 한다.

## 2. 기상모형

### 2.1 중규모 기상예측모형(MM5)

본 연구에서는 중규모 영역의 바람장 예측을 위해 Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research Fifth-Generation Mesoscale Model(MM5) version 3.6.6을 사용하였다. MM5는 대상 지역의 기상 조건을 시·공간적으로 상세히 분석 하기 위한 대표적인 중규모 3차원 기상모델이다. MM5 V3 중규모 기상모델은 sigma 좌표계로 쓰여진 비정수(non-hydrostatic) 방정식계를 사용하며, Arakawa B 격자망으로 구성되어 있다. Multiple Nesting 기법을 통해 성긴 격자의 넓은 분석 영역에서의 3차원 자료값을 수km 격자크기의 상세영역에서의 값을 계산하여 소규모 기상현상 추정이 가능하다. MM5는 대표적인 3차원 기상모델이므로 수평 영역내의 수평 기상 뿐만 아니라 수직 기상도 추정이 가능하다. 따라서 풍력자원 평가시 고려되어야 하는 적정높이에서의 풍속을 직접 추정할 수 있다.

본 연구에서는 한반도 전역의 수치바람모의를 위해 Fig. 1에서와 같이 모델의 등지격자 도메인을 각각 27km, 9km, 3km, 1km 분해능의 4개 영역으로 나누었다. Table 1에 선택된 물리옵션 및 전반적인 모델 구성을 요약하였다. 모델의 초기 및 경계 입력자료는 기상청에서 제공하는 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System)를 사용하였다. 총 33개의 연직층을 갖도록 하였고 모델의 최하층은 지표로부터 30m( $\sigma=0.995$ )이다. 중규모 대기경계층 모사에 적합한 Eta. PBL Scheme을 사용하였으며 지표와 하층 대기사이 열교환을 모사를 위해 Five-Layer Soil Model을 적용하였다. 지표경계조건인 지형 및 식생자료는 도메인 1, 도메인 2에서 10min.(18.5km), 도메인 3, 도메인 4에서는 30sec.(0.925km) 해상도의 USGS(U.S. Geological Survey)자료를 입력하였다.

본 연구에서는 해상에서 모형의 바람장 모사능력을 향상시키기 위하여 NASA의 Quick Scattermeter(QuikSCAT) 바람자료를 자료동화하였다. 해상의 경우 관측자료의 밀도 및 신뢰성이 상당히 떨어지며 특히 거칠기길이, 즉 파고에 대한 정보가 없기 때문에 불확실성이 매우 크다. 따라서 위성자료로부터 관측된 해상풍자료를 활용하는 것은 매우 중요하다. QuikSCAT 해상풍 자료는 위성에서 관측된 원시 자료로부터 전 지구를 대상으로 25km의 공간해상도로 격자화하여 하루 2회(ascending passes, decending passes) 해수

면으로부터 10m고도의 자료로 변환하여 제공된다. Fig. 2는 위성에서 관측된 한반도 주변지역의 해상 바람장이며 본 연구의 도메인 3에 해당한다.

매시간 간격의 모델결과를 이용하여 최하층에서의 바람장에 대해 분석하고자 하며 이를 토대로 기상관측자료와 일변화 추이를 비교분석해 보았다. 거제도 부이지점에서 풍속과 풍향에 대한 관측값과 모델값의 일변화를 비교해 보았다. 풍속의 경우 자료동화를 실시하지 않은 경우 17일 야간 및 18일 새벽시간대에 10m/s이상의 다소 강한 풍속을 모사하였고 이는 관측값과 5m/s 이상의 차이를 나타내었다. 반면 QuikSCAT 해상풍 자료를 보완해줌으로써 같은 시간대에 풍속이 저하되었고 이는 관측값과 잘 일치하였다.

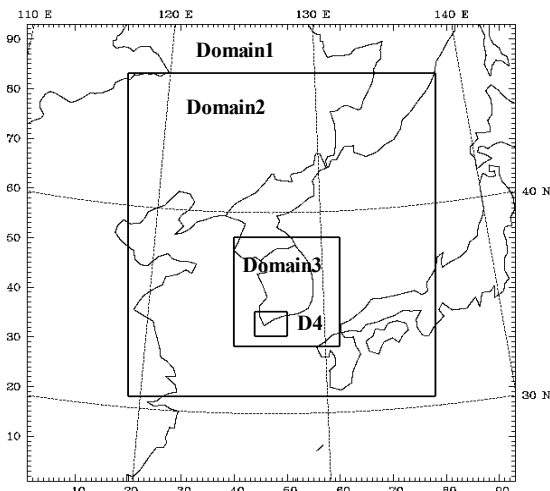


Fig. 1. Map depicting of horizontal domain

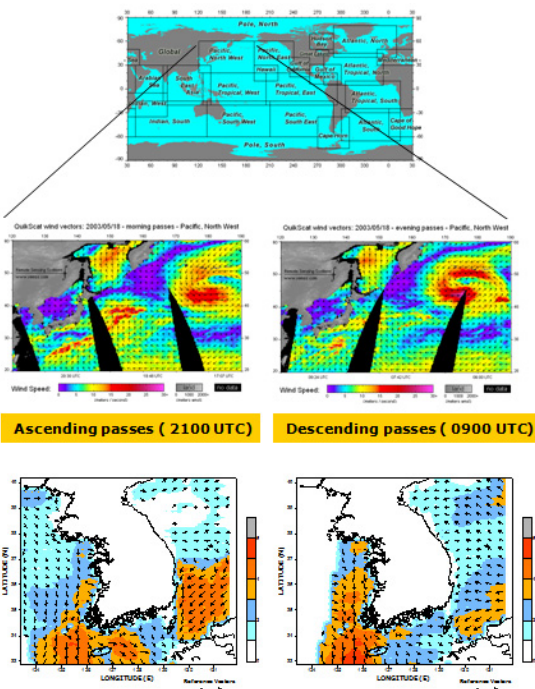


Fig. 2. Ocean surface wind by QuikSCAT around the Korean peninsula

## 2.2 국지규모 대기 진단 모형(CALMET)

CALMET은 지상 및 연직 관측자료를 이용하여 계산영역내의 바람장 생성하고 육상과 해상에 대한 대기경계층 구조를 예측하는 대기진단모형이다.

바람장 생성과정은 두단계로 나누어진다.(Dougals and Kessler, 1988) 첫째로 초기자료를 이용하여 지형효과에 의한 운동학적 변화, 산사면 흐름, blocking, channeling에 의한 다양한 바람장 변화가 반영되고 이를 각 격자점으로 거리에 가중치를 둔 객관분석을 실시하여 최종 바람장을 생성한다. 여기에 MM5와 같은 중규모 대기예측모형으로 해륙풍, 산곡풍등의 비정역학적 중규모 흐름 결과를 각 단계별로 수평과 연직적으로 활용될 수 있는 큰 장점이 있다.

또한 해상과 육상의 두 개의 분리된 대기경계층 모드를 가지고 있다. 즉 육상의 경우 Holtslag and van Ulden(1983)에 의해 제시된 에너지 평형 방법을 이용한다. 이는 매시간 각 격자점의 열속, 지표 마찰속도, Monin-Obukhov length와 연직 대류속도항으로부터 경계층의 높이를 구하게 되며 Pasquill-Gifford 안정도가 계산된다.

지상관측소의 풍속, 기온, 운량, 운고, 기압, 습도, 강수자료를 입력자료로 사용하며 풍속, 풍향, 기온, 기압, 고도 요소를 1일 2회 상층자료로부터 입력하여 연직변위를 계산한다. 또한 CALMET은 지형고도 자료와 지표특성 자료를 입력받게된다. 지표특성 자료의 물리적 성질로는 거칠기 길이, 반사도, Bowen ratio, 토양 열속, 인공 열속과 일면적 지수가 있다.

본 연구에서는 고해상도 바람장 생성을 위해 MM5 1km 해상도의 1년치 각 층별 바람장 자료를 초기치로 하고 계산영역내의 지상관측소 6지점, 연직관측소 1지점 기상관측 자료를 이용하여 각 격자점으로 객관분석하여 최종적인 3차원 바람장을 생성하였다. 가로 세로 100m 간격의 370×280 격자로 구성하고 총14개(10, 30, 60, 120, 230, 450, 800, 1250, 1750 and 2650m)의 지형을 따르는 연직좌표로 연직층을 구성하였다.

특히 상세영역에서 지형에 의한 운동학적 효과, 경사풍, blocking, channeling과 지표성질에 의한 안정도 및 거칠기길이에 의한 연직 전단풍의 효과를 극대화하기위해 상세 지형 The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM 3s) 90m 간격의 지형자료와 Environmental Geographic Information System(EGIS) 30m 간격의 landuse 자료를 사용하였다. Fig. 3과 Fig. 4에 CALMET 계산영역의 하부경계조건인 지형 및 지표면 자료를 도시하였다. 상세자료를 사용함으로써 복잡한 해안선과 지형의 굴곡에 의한 기류변화를 잘 추정할 것으로 사료된다. Landuse의 경우 지면복사 및 반사 알고리즘을 통한 대기혼합과 깊이를 결정하며 거칠기 길이와 관련하여 지표층 및 대기경계층 하부의 연직 바람분포를 결정하는 절대적 변수로 작용하게 된다. Fig.3에서 살펴보듯이 수평 해상도 및 입력자료의 고해상도화로 인해 상세한 지표면 조건이 모형에 직접적으로 반영되며 육지와 해안의 경계가 명확히 구분되며 이는 연안지역의 수평 및 연직바람을 추정하는데 매우 중요한 것으로 사료된다.

Table 1. Description of numerical simulation with MM5.

	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Horizontal Grid	93 × 93	160 × 142	178 × 148	50 × 50
Resolution (km)	27	9	3	1
Vertical Grid	33 Layers (terrain-following coordinate)			
Physical Option	MRF PBL Scheme Grell Cumulus Scheme Mixed Phase Moisture Scheme RRTM Longwave Radiation Scheme Five-Layer Soil Model Surface Scheme			
Run Period	2007. 1. 1 ~ 2008. 1. 1 (1 hour frequency)			

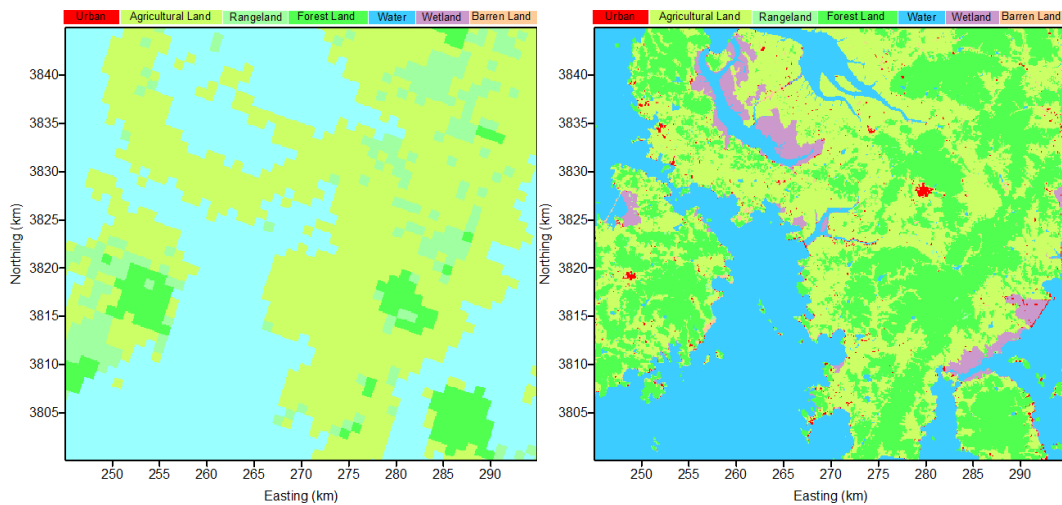


Fig. 3. Landuse data on CALMET domain with 1km(left) and 100m(right) resolution from EGIS(30m) .

### 3. 결 과

먼저 1km 해상도 MM5결과 중 계절 대표일에 대한 수평 바람장 분포에 대해 중관기상 상태와 관련하여 분석해 보았다.

계산영역에서는 전반적으로 중관풍의 영향 아래 북서풍계열의 바람이 나타나며 크고 작은 섬들이 다수 존재하여 풍하측에서는 blocking 현상으로 인한 풍속의 감소가 나타남. 모델결과 북서풍이 탁월함을 잘 추정하였고 풍속 또한 먼바다에서 7m/s 이상이며 남서해안의 연안지역에서 5m/s 이하로 나타남. 북제주에서 풍속이 다소 약화되었다.

남동풍계열의 바람을 MM5가 잘 추정하였고 풍속의 경우 저풍속대와 고풍속대가 불규칙하게 존재하는데 연안지역을 통과하면서 크고 작은 섬들과 복잡한 해안선에 의한 기류변화가 매우 심한 것으로 사료된다.

동풍계열의 바람이 나타남을 전반적으로 잘 모의하였다. 풍속의 경우 SAR영상에서는 먼바다에서 MM5에서 1~2m/s 정도 저평가하였으나 10m/s 이상의 다소 강한 풍속대를 잘 모의였다.

서해 먼바다의 경우 북풍계열의 바람이 부는 가운데 내륙을 통과한 바람은 북동풍으로 편향되어 나타난다. 연안지역의 경우 매우 약한 바람이 불며 남해 먼바다에서는 10m/s 이상의 강한 바람이 존재한다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업인 「한반도 해역 고해상도 풍력자원지도 구축 및 단지개발 적합성 평가시스템 개발」 일환으로 수행되었습니다.

### References

- [1] Christmann, R., 2007, "wind energy in Germany-policy, status and research activity", International Workshop for wind energy, Jeju
- [2] 이순환, 이화운, 김동혁, 김현구, 2007, "한반도 풍력자원평가를 위한 최기 공간해상도와 위성자료 동화의 관계 분석", J. KOSAE Vol.23, No.6, pp.653-665
- [3] 김현구, 이화운, 정우식, 2004, " 한반도 바람지도 구축에 관한 연구 I. 원격탐사자료를 이용한 해상풍력자원 평가", J. KOSAE Vol. 21, No.1, pp.63~72
- [4] Lee, S.-H., D.-H. Kim, and H.-W. Lee, 2007, "Satellite-based Assessment of the Impact of Sea-Surface Winds on Regional Atmospheric Circulations over the Korean Peninsula", International Journal of Remote Sensing, Vol. 29 Issue 2(2008), pp 331-354