

대기예보모형과 진단모형 결합을 통한 복잡지형 바람장 해석능력 평가

이화운 · 김동혁 · 이순환* · 김민정 · 박순영 · 김현구**

부산대학교 지구환경시스템학부,

*부산대학교 환경문제연구소, **한국에너지기술연구원

(2009년 7월 14일 접수; 2009년 8월 10일 수정; 2009년 10월 23일 채택)

Skillful Wind Field Simulation over Complex Terrain using Coupling System of Atmospheric Prognostic and Diagnostic Models

Hwa Woon Lee, Dong Hyeok Kim, Soon Hwan Lee*, Min Jung Kim,
Soon Young Park and Hyun Goo Kim**

Division of Earth Environment System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**Institute of Environmental studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

***Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea*

(Manuscript received 14 July, 2009; revised 10 August, 2009; accepted 23 October, 2009)

Abstract

A system coupled the prognostic WRF mesoscale model and CALMET diagnostic model has been employed for predicting high-resolution wind field over complex coastal area. WRF has three nested grids down to 1km during two days from 24 August 2007 to 26 August 2007. CALMET simulation is performed using both initial meteorological field from WRF coarsest results and surface boundary condition that is Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 90m topography and Environmental Geographic Information System (EGIS) 30m landuse during same periods above. Four Automatic Weather System (AWS) and a Sonic Detection And Ranging (SODAR) are used to verify modeled wind fields. Horizontal wind fields in CM_100m is not only more complex but better simulated than WRF_1km results at Backwoon and Geumho in which there are shown stagnation, blocking effects and orographically driven winds. Being increased in horizontal grid spacing, CM_100m is well matched with vertically wind profile compared SODAR. This also mentions the importance of high-resolution surface boundary conditions when horizontal grid spacing is increased to produce detailed wind fields over complex terrain features.

Key Words : High-resolution wind field, WRF, CALMET, Gwangyang

1. 서론

급격한 인구의 증가와 도시의 발달은 지구온난화 등 다양한 형태로 지구 대기 환경에 심각한 영향을 끼친다. 이러한 대기 환경의 변화는 다량의 에너지 소비

와 밀접하게 관계하는데, 한정된 석유 자원의 대량 소비는 에너지 자원의 고갈과 더불어 이를 대체하는 자원의 확보의 필요성을 증대시킨다. 현재 대체에너지로서 신재생에너지의 기술개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 풍력에너지는 태양광에너지와 더불어 높은 기술 축척도와 경제성을 바탕으로 기술발달의 속도가 매우 빠르게 나타나고 있다. 이러한 급속한 풍력발전 산업의 성장에 따라 유망한 풍력발전 후보지 선정과 최적의 풍력발전 시스템 설계를 위해 상세 바람장 생성을 통한 풍력자원의 정확한 평가가 요구되어진다.

현재까지 풍력자원 평가방법은 저해상도의 바람지도로부터 1차적으로 풍력자원이 우수한 지역을 선정하고 현장 관측을 통해 상세 풍력자원 분석을 실시하여 왔지만 이는 많은 비용과 시간을 필요로 하며 정확한 관측지점 선정의 어려움이 있다. 또한 기존 기상관측망을 통한 풍력자원 평가 방법은 관측지점의 이격거리가 매우 커 대표성이 떨어지며 객관분석시 지형 및 지표면의 효과가 반영되지 못해 복잡지형이나 지표의 물리적 성질이 매우 상이한 연안지역에서 활용이 어렵다¹⁾.

저해상도 바람지도의 경우 잠재적인 풍력자원량 산정을 통한 개괄적 유망후보지 정보를 제공할 수 있으나, 실제적인 풍력발전 단지의 건설을 위해서는 보다 상세한 고해상도의 바람지도의 구축과 풍력자원 특성 분석이 요구된다. 특히 한반도는 복잡한 해안선과 굴곡이 심한 지형으로 이루어져 국지풍계의 발달이 매우 복잡하다²⁾. 또한 대도시들이 해안에 인접하여 연안지역의 열적환경 변화를 초래하고 대단위 간척사업과 낮은 구릉성 산지지역의 평탄화 사업 등은 대기 흐름의 열적/역학적 변화를 초래하는 요인으로 작용한다³⁾. Rao 등⁴⁾은 3차원 대기역학모형인 Advanced Regional Prediction System (ARPS)를 이용해 플로리다반도의 복잡한 국지순환계를 해석하였다. 그리고 지형이 복잡한 지역의 중규모 기상장을 해석하기 위해서는 1 km 이하의 상세격자규모가 필요하다고 제시하였다. 즉 국지적 풍력자원 특성을 분석하고 에너지 자원량을 산출하기 위해서는 종관규모 대기운동을 고려한 중규모 수치모형 뿐 아니라 영역내 지형과 지표구조물에 의한 바람의 역학적 변화와 지표 거칠기

및 물리적 특성에 의한 경계층내의 3차원 바람장 모사를 신속, 정확히 처리할 진단모형의 도입이 필요하다. 최근에는 정확한 대기오염물질의 이동모사에 활용할 상세한 바람장 생성을 위하여 중규모 기상예측 모형인 Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)와 국지기상 진단 모형인 California Meteorological (CALMET)을 결합하여 대기경계층 하부의 상세바람장 모사능력을 향상 하였으며 풍력자원평가 분야에서 MMS/ CALMET 결합시스템을 통한 대표적 복잡지형인 홍콩을 대상으로 직접 적용된 바 있다^{5,6)}.

고해상도의 대기유동장 모사를 위해서는 무엇보다 지표경계자료 상세화 및 초기 기상입력자료 정확도가 매우 중요하며⁷⁾, 중규모 기상모형을 이용한 지표 및 지형의 상세자료가 국지순환장의 개선에 크게 기여함은 많은 선행 연구를 통해 밝혀진 바 있다^{8,9)}. 이 등¹⁰⁾도 풍력자원 평가에 있어서 초기자료의 공간해상도가 중요한 요인으로 작용함을 지적하였다. 즉 고해상도(1 km 이하) 바람장 생성을 위한 진단모형의 경우 초기장 생성시 비균질하게 분포한 수평 및 연직 관측에 의존하여왔으며 상세 지표경계조건의 입력을 통한 지형 지물에 의한 역학적인 흐름의 변화와 지표특성에 의한 미시규모 흐름의 특성을 모사하는 것이 중요하나 이러한 시도는 이루어지지 못하였다.

본 연구는 3차원 대기 예보 모형과 고해상도 진단 모형의 결합 시스템을 구축하고, 결합 시스템에서 제공되는 3차원 상세 바람장을 기존 3차원 예보 모형에서 제시된 바람장과 비교하여 고해상도 예보/진단 결합모형의 예측 정확성과 풍력자원 진단에의 활용가능성을 평가하고자한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 중규모 대기예보모형(WRF)

먼저 중규모 영역의 바람장 예측을 위해 The Weather Research and Forecasting (WRF) 모델을 사용하였다. WRF는 대표적인 3차원 차세대 기상모델로써 수행 영역내의 수평 기상 뿐만 아니라 수직 기상도 직접 추정이 가능하여 풍력자원 평가시 고려되어야 하는 허브높이에서의 풍속을 직접 추정할 수 있다.

본 연구에서는 WRF를 이용하여 Fig. 1에서와 같이 광양만 지역의 기상장을 생성하고자하며 각 영역은 27 km, 9 km, 3 km, 1 km 수평해상도로 75×62, 82×82, 97×97 52×52 격자수로 구성하였다. 총 35개의 연직층을 갖도록 하였고 모델의 최하층은 지표로부터 30m($\sigma=0.995$)이다. 모델의 초기 입력자료는 110 km 수평 해상도의 NCEP FNL을 사용하였다. 중규모 대기경계층 모사에 적합한 Yonsei University PBL Scheme을 사용하였으며 지표와 하층 대기사이 열교환을 모사를 위해 Noah LSM 토양모델을 적용하였다. 복사과정 모수화 방안으로 RRTM Longwave와 Dudhia Shortwave를 적용하였으며 WSM5 구름물리 모수화 방안과 Kain-Fritsch 미세물리 방안을 채택하였다. 지표경계조건인 지형 및 토지이용도 자료는 United State Geological Survey (USGS) 수치지형고도 자료를 사용하였다. 2007년 8월 23일 0900 LST 부터 총 72시간 모델을 수행하여 매시간 기상자료를 생산하였다.

2.2. 국지규모 대기진단모형(CALMET)

CALMET은 지상 및 연직 관측자료를 이용하여 계산영역내의 상세 바람장을 생성하고 육상과 해상에 대한 대기경계층 구조를 파악하는 대기진단모형이다. 바람장 생성과정은 두 단계로 나누어진다(Fig. 2).

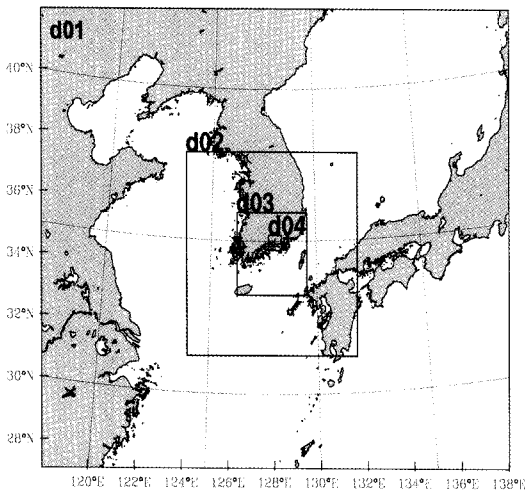


Fig. 1. Map depicting of horizontal domain from WRF_1km.

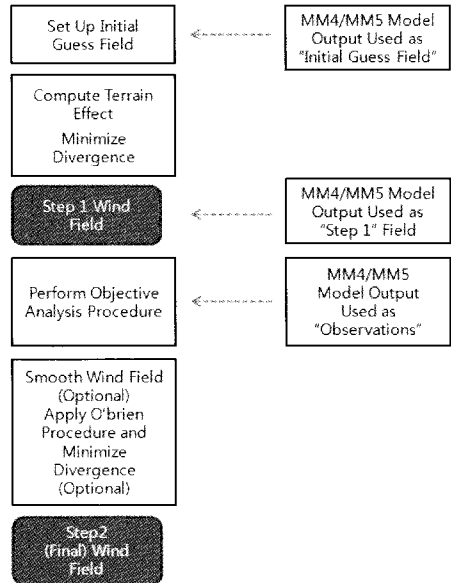


Fig. 2. Flow diagram of the diagnostic wind model in CALMET.

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 WRF, MM5, RAMS와 같은 중규모 대기예측모형으로 해륙풍, 산곡풍등의 비정역학적인 중규모 흐름 결과를 각 단계별로 수평과 연직적으로 입력할 수 있는 큰 장점이 있다. 본 연구에서는 고해상도 바람장 생성을 위해 WRF중 1 km 해상도의 (이하 WRF_1km) 각 층별 수평 연직 바람장 및 기온, 강수량, 습도, 기압 자료를 입력받아 초기치로 사용하여 최종적인 100 m 해상도의 CALMET (이하 CM_100m) 3차원 바람장을 생성하였다.

또한 CALMET은 해상과 육상의 분리된 대기경계층 모듈을 가지고 있다. 즉 육상의 경우 Holtslag와 van Ulden¹¹⁾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, 강수량자료를 입력자료로 객관분석 시 사용되며 상층자

료로부터 풍속, 풍향, 기온, 기압, 고도 요소를 1일 2회 입력하여 연직변위를 계산한다. 또한 CALMET은 지형 고도 자료와 지표특성 자료를 입력받게된다. 지표특성 자료의 물리적 성질로는 거칠기 길이, 반사도, Bowen ratio, 토양 열속, 인공 열속과 앞면적 지수가 있다.

수평격자는 400×400로 구성하고 지형을 따르는 연직좌표로 총14개(10, 30, 60, 120, 230, 450, 800, 1250, 1750 and 2650 m)의 연직층을 구성하였다. 모델링 기간은 WRF_1 km의 결과에서 2007년 8월 24일 0100 (LST)부터 2007년 8월 26일 0000 (LST)이다.

특히 상세영역에서 지형에 의한 운동학적 효과, 경사풍, blocking, channeling과 지표성질에 의한 안정도 및 거칠기길이에 의한 연직 전단풍의 효과를 모델내에 선택하고 이를 극대화하기위해 상세 지형 The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 90 m 간격의 지형자료와 Environmental Geographic Information System (EGIS) 30 m 간격의 토지이용도 자료를 사용하였다. WRF_1km와 CM_100m에 사용된 토지이용도 자료를 Fig. 3에 함께 도시하였다. 상세자료를 사용함으로써 복잡한 해안선과 지형의 굴곡에 의한 기류변화를 잘 추정할 것으로 사료된다. 토지이용도의 경우 지면복사 및 반사 알고리즘을 통한 대기혼합고 깊이를 결정하며 거칠기 길이와 관련하여 지표층 및 대기경계층 하부의 연직 바람분포를 결정하는 절대적 변수로 작용하게 된다. Fig. 3b에서 살펴보듯이 수평 해상도 및 입력자료의 고해상도화로 인해 상세한 지표면 조건이 모형에 직접적으로 반영되며 육

지와 해안의 경계가 명확히 구분되어 연안지역의 수평 및 연직바람을 추정하는데 크게 변화를 가져다 줄 것으로 사료된다.

2.3. 기상자료

먼저 본 연구의 대상영역은 한반도 남역에 위치한 광양만 지역으로 복잡한 바람구조와 함께 대단위 오염원 배출이 이루어지는 지역으로 관측 및 모델링을 통한 다양한 연구가 이루어져 온 지역이다^{2,12,13}. 특히 광양만지역은 남으로 여수반도가 존재하고 북으로 1278 m 고도의 백운산이 있으며 서쪽으로는 순천만이 위치하고 동으로는 남해도가 남북으로 길게 자리잡은 비교적 폐쇄형 지역이다(Fig. 4). 즉 한반도를 지배하는 계절별 중관풍과 함께 바다를 접하고 있어 해륙풍 순환계가 앞서 설명한 복잡한 지형에 영향을 받을 것으로 판단되며 해풍 침투시 남해도와 여수반도 사이의 좁은 해협과 북으로 위치한 험준한 산 위지형에 크게 영향을 받을 것으로 판단된다. Fig. 4에 함께 도시된 기상청산하 수평기상 관측지점은 앞서 언급된 복잡한 풍계를 나타낼 수 있는 대표지역으로 본 연구에서 모델링 결과와 함께 분석하고자 하며 광양만내에서 이루어진 수평관측(금호지점)과 연직관측, 즉 Sonic Detection And Ranging (SODAR)관측 또한 분석에 사용하고자 한다. SODAR는 Scintec사의 MFAS 기종으로 대기로부터 후방산란된 음파를 수집하여 도플러 변이를 이용해 풍속, 풍향, 연직속도 값을 측정하게 된다. 정확도는 풍속, 풍향, 연직속도에 대해 각

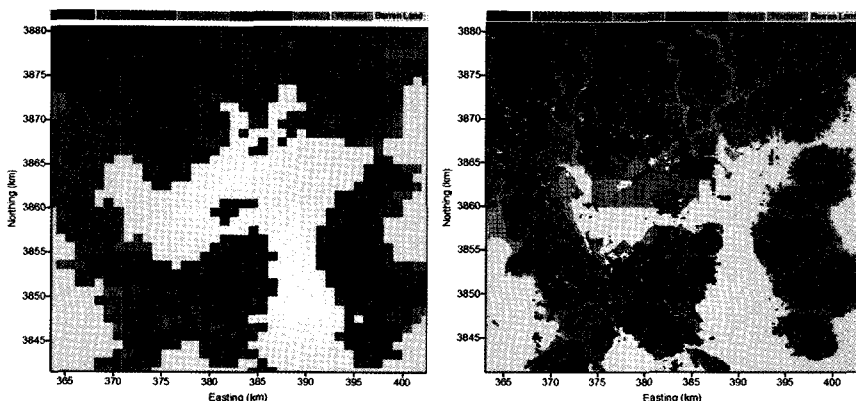


Fig. 3. Land use data in WRF_1km (left) and CM_100m (right).

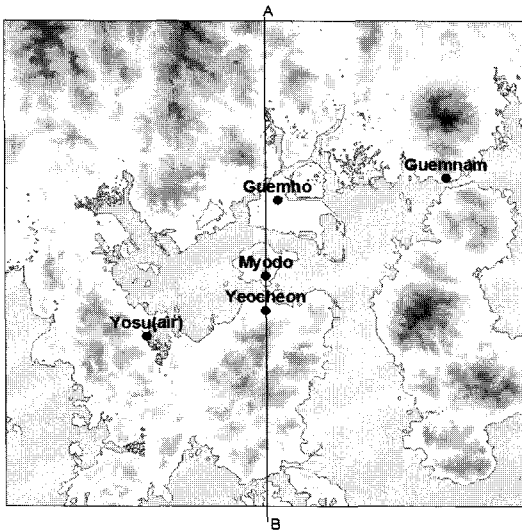


Fig. 4. Topography map of research area including location of Surface meteorological stations (dark circles). A-B line is using to analyze PBL heights.

각 $0.1-0.3 \text{ ms}^{-1}$, $2-3^\circ$ (풍속이 2 ms^{-1} 보다 클 때), $0.03-0.1 \text{ ms}^{-1}$ 이다. 지표로부터 최대 1000 m 고도까지 10 m 간격으로 조밀한 관측이 가능하여 하층대기 바람관측에 매우 유용하며 최초 관측고도는 지표로부터 40 m이다. 본 연구의 사례일인 2007년 8월 24일부터 26일까지 이틀간에 걸쳐 500 m 고도까지 10 m 간격으로 매 30분마다 자료를 획득하였다.

3. 결 과

3.1. 수평 바람장

해상도 차이에 따른 오전/오후 수평바람장의 차이를 분석하고자 한다. 먼저 수치모의 결과와 비교분석을 위해 기상청에서 제공하는 지상 자동기상관측(AWS) 분석장 중 광양만 영역을 대상으로 바람벡터 및 풍속분포를 24일과 25일 양일의 오전/오후에 대해 나타내었다(Fig. 5). 그림안의 굵은선은 CM_100m 모

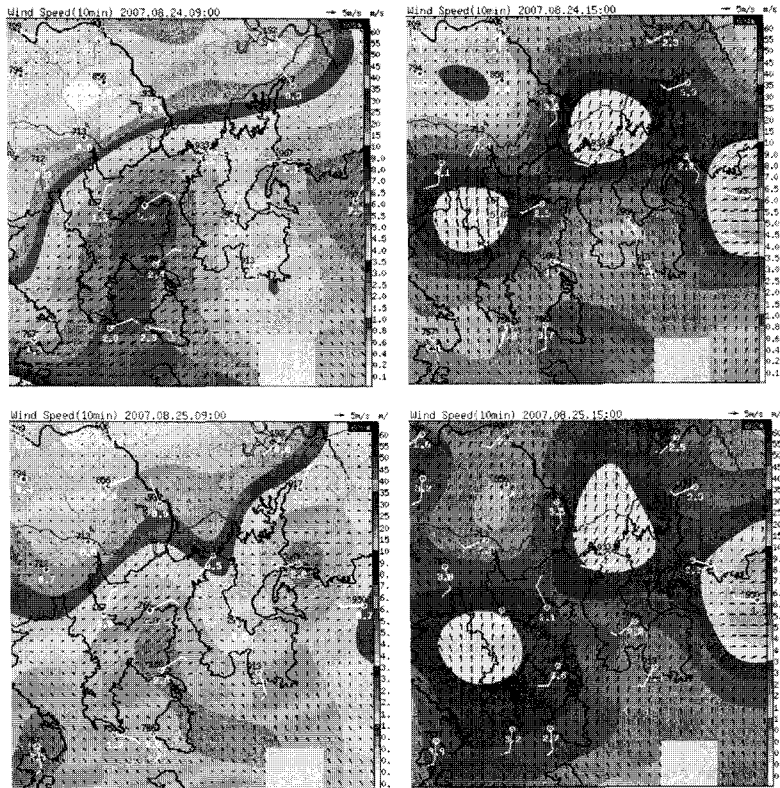


Fig. 5. Horizontal wind distributions interpolated from 20 AWS sites.

델팅 영역에 해당한다. 사례일은 중관 일기도 상에서 북태평양 고기압의 영향을 받아 맑은 가운데 낮동안 기온이 높고 일사에 의한 해륙풍 및 산곡풍의 뚜렷한 일변화 패턴을 보여주는 날이다(나타내지 않음).

오전시간에는 내륙의 안정층 형성에 따라 풍속이 1 ms^{-1} 이하로 매우 약하며 광양만내에서는 북동풍을 나타내고 풍속은 내륙보다 강한 $2\text{-}3.5 \text{ ms}^{-1}$ 를 보인다. 순천만 앞 해상에서는 4 ms^{-1} 의 다소 강한 풍속을 나타낸다. 반면 오후 시간에는 해풍이 최대화되는 시점으로 전반적으로 남풍의 지배하에 풍속은 최대 5 ms^{-1} 를 나타낸다. 남으로부터 해풍이 침투하면서 풍속대는 여수반도를 경계로 동서로 분리된 풍속대가 나타난다. 즉 순천만과 남해지역에서 5 ms^{-1} 풍속을 보이는 반면 광양만내에서는 약풍대를 나타낸다. 반면 분석장 만으로는 좁은 영역의 공간분포를 정확히 파악할

수 없으며 지형효과가 전혀 반영되지 못하므로 수치모의 결과를 통해 보다 상세히 분석할 필요가 있다.

WRF_1km와 CM_100m의 수평바람장 결과를 지상 10m에서 동일 시간대에 대해 분석해보고자 한다(Figs. 6,7). 앞서 AWS 분석장 결과와 같이 WRF_1km와 CM_100m 결과에서 24일 오전의 내륙의 약풍대와 광양만내의 북동풍을 잘 모의하였고, 전반적으로 오전/오후의 해풍과 육풍의 전환을 잘 나타내고 있다. 반면 WRF_1km에서는 광양제철소 지역의 바람이 해상의 바람과 크게 다르지 않지만 CM_100m에서는 바람이 정체하고 좌우로 편향된다. 또한 내륙산지에서 복잡한 풍계를 CM_100m에서 상세하게 표현하고 있으며 오후에는 해풍이 지속적으로 유입되는 모습이 잘 재현되었다. 오전과 마찬가지로 광양만내에서 바람의 정체와, 내륙에 도달한 해풍이 해안선 형태에 의

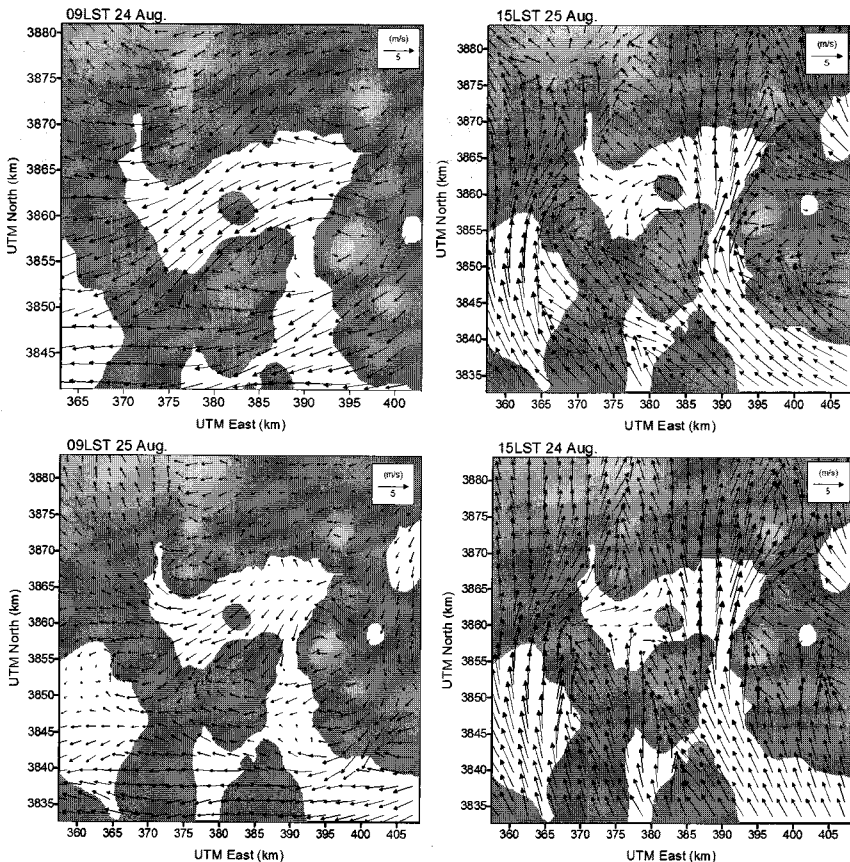


Fig. 6. Horizontal wind distributions simulated of WRF_1km above 10 m from surface.

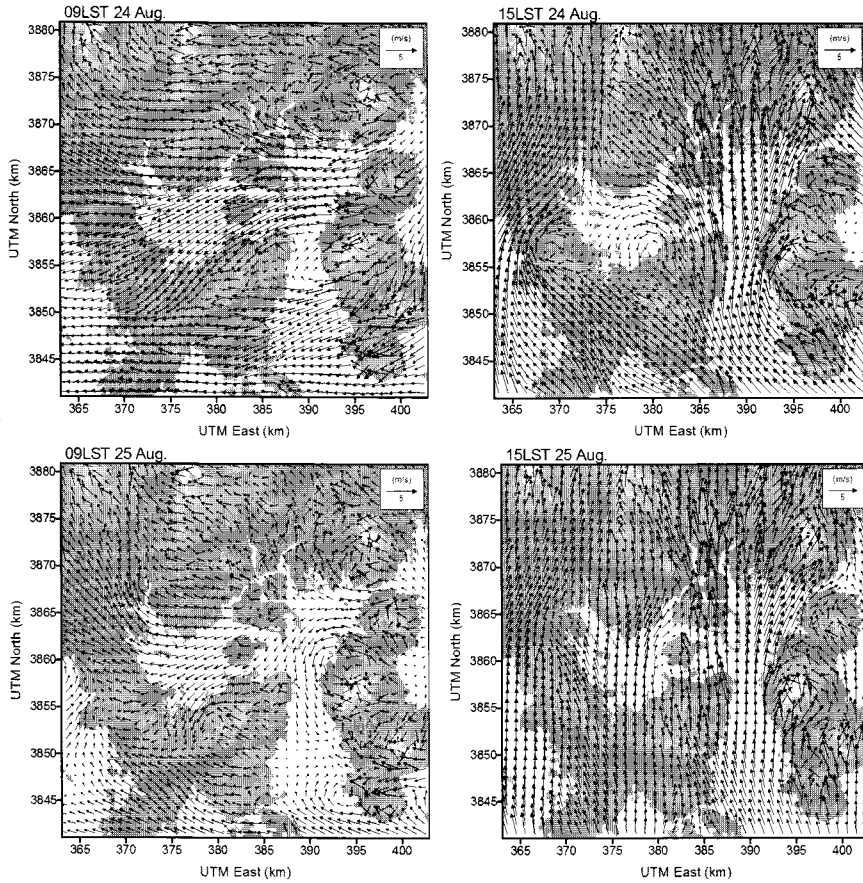


Fig. 7. Horizontal wind distributions simulated of CM_100m above 10 m from surface.

한 굴곡과 지형이 반영된 복잡한 양상으로 변화함이 CM_100m에서 잘 모의되고 있다. 즉 WRF_1km에서 표현되지 못한 지형조건, 즉 광양제철소와 산지지형의 급해진 경사도 및 복잡한 해안선이 CM_100m에서는 직접적으로 표현됨으로써 대기의 역학적 흐름의 변화가 잘 표현되었다. 김 등¹⁴⁾은 연안지역의 풍력자원 평가를 위한 수치바람모의의 검증에서 수평격자 해상도의 증가가 내해 및 복잡연안지역의 풍력자원평가 정확도 향상을 가져다 줄 것을 시사한 바 있다. 25일의 경우 전날의 주·야간의 풍계와 크게 다르지 않음을 알 수 있으며, WRF_1km에서 전반적인 풍계를 잘 모의하고 있으나 CM_100m에서는 격자 상세화로 인해 백운산 주변의 복잡한 풍계와 광양만 매립지의 정체된 풍향을 잘 모의하고 있다.

주목할 점은 해풍 침투시 AWS 자료의 금남지점과

수평관측 지점인 금호동의 각기 다른 풍계이다. 즉 금호지점은 여수반도 북쪽에 위치하며 해풍침투 시 구릉성 산지의 배후에 위치하고 광양만 매립지 위에서 관측되는 반면에 금남지점은 해풍침투 시 남해와 여수반도 사이의 해협을 통과한 바람의 직접적인 영향을 받는 지점으로 풍속의 증가가 기대된다. 또한 금호동 지상관측 지점은 매립지 위에 위치한다. 이에 복잡지형에 의한 가속효과와 정체효과에 대해 상세영역 모델링의 해석능력을 살펴보고자 두 지점에서의 이틀간의 바람벡터의 시계열을 Fig. 8에 나타내었다. 참고로 모델의 경우 물리적 연속성에의해 낮은 풍속에서도 풍향의 의미를 부여할 수 있지만 기상관측의 경우 기계적 요인에 의해 예외적일 수 있어 Mass 등¹⁵⁾의 연구에서는 풍속이 2.5 ms^{-1} 보다 클 때 유의하고 특히 풍향의 분석은 복잡지형에서 모델링의 수행능력을

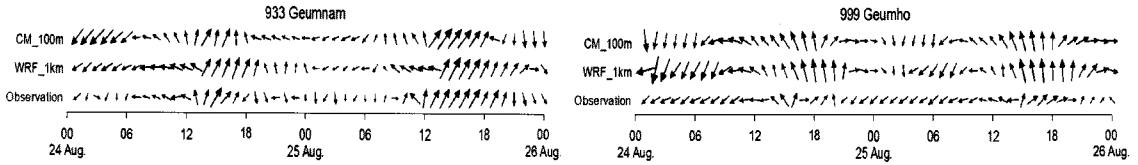


Fig. 8. Temporal variations of wind vector at Geumnam and Geumho.

판단하는데 매우 유용하다 하였기에 본 연구의 분석 시 참고적으로 활용하고자 한다. 24일 금남지점의 오전 6시부터 12시까지 풍향을 살펴보면 남동풍 및 동풍이 $2\text{--}3\text{ ms}^{-1}$ 나타났다. 이는 해상에서 불어오는 동풍 및 남동풍의 바람이 풍상측에 존재하는 남해섬에 의해 약화된 것이며 CM_100m에서는 이를 잘 모의하고 있으나 WRF_1km에서는 다소 과대예측하고 있다. 이후 주간의 해풍을 WRF_1km와 CM_100m에서 잘 모의하고 있으나 25일 야간에 WRF_1km에서 육풍으로 풍향의 전환이 4시간 정도 지연된 23시 이후에 모의된다. 금남지점은 관측과 모델에서 해풍순환이 잘 표현되어 야간에는 약한 북동풍이, 주간에는 해풍의 절대적 영향을 받은 남풍 및 남서풍 바람이 다소 강하게 나타난 반면에 금호동 지점은 다소 복잡한 풍계를 나타낸다. 금호동 지점에서는 24일 새벽부터 북동풍이 14시까지 지속되며 15시에 남풍으로 전환된다. 야간에는 북서풍을 보이다가 25일 새벽녘부터 북동풍으로 전환된다. 야간에 출현하는 북서풍은 지리산으로

부터 출현하는 하강류의 영향으로 판단된다. 최대해풍 침투시간인 15시에 WRF_1km에서는 남풍을 나타내나 CM_100m에서는 관측치와 부합하는 북동풍을 나타낸다. 즉 여수반도에 의한 대기정체를 CM_100m에서 잘 표현하였다. 즉 수평격자의 크기가 1 km (WRF_1km)에서 100 m (CM_100m)로 상세화되면서 지형골곡에 의한 대기정체(blocking), 골과 골 사이의 가속된 바람(channeling), 고지대에서의 풍속증가가 잘 표현되었다.

Fig. 4에 나타낸 AWS 6개 관측지점(광양, 여수, 백운산, 여천공단, 금호, 금남)을 대상으로 WRF/CALMET 결합방법에 따른 수평풍속 모사능력을 정량적으로 판별하기 위하여 통계치를 구하였다(Table 1). 관측평균풍속은 2.14이고 WRF_1km와 CM_100m의 평균풍속은 각각 2.44와 2.05으로 WRF_1km는 과대예측하는 경향이 나타났고 CM_100m는 다소 과소예측하였다. 그러나 WRF_1km와 CM_100m의 MB가 0.30과 -0.09이며 ME가 1.16과 1.04로 NMB

Table 1. Statistical results for the 4 meteorological surface stations

Description	Variables	Statistic definition*	WRF_1km	CM_100m
Mean model	\bar{M}	$(1/N) \sum_1^N C_m$	2.44	2.05
Mean Bias	MB	$(1/N) \sum_1^N (C_m - C_o)$	0.30	-0.09
Normalized Mean Bias	NMB(%)	$(1/N) \sum_1^N (C_m - C_o) / \bar{O} \times 100\%$	22.67	-5.3
Mean Error	ME	$(1/N) \sum_1^N C_m - C_o $	1.16	1.04
Normalized Mean Error	NME(%)	$(1/N) \sum_1^N C_m - C_o / \bar{O} \times 100\%$	57.86	49.93
Root Mean Square Error	RMSE	$\sqrt{(1/N) \sum_1^N (C_m - C_o)^2}$	1.44	1.29

*m=modelled, o=observed.

가 20% 정도, NME가 10% 정도의 오차감소를 나타내었다. 즉 WRF/CALMET 결합시스템이 복잡해안 지역인 광양만 지역의 수평바람장 모사함에 WRF만을 사용할 경우보다 수평 풍속을 모의함에 개선된 결과를 나타내었다.

3.2. 연직 풍속변화

앞서 살펴보았듯이 격자 상세화는 지형의 굴곡 및 경사도의 변화를 민감하게 표현하여 지상수평바람 분포의 변화를 야기하였다. 이는 지역별 열 수지 및 운동량의 이류를 야기하여 연직적인 풍속의 분포에 영향을 미치게 된다¹⁶⁾. 즉 대기오염 측면에서 오염물질의 축적 및 확산에 지대한 영향을 미치게 되며 본 연구의 궁극적 목표인 풍력발전 허브높이(지상 50-100 m)에서의 바람특성을 결정짓게 되므로 면밀히 살펴보아야 할 것이다. SODAR 관측이 이루어진 금호지점에서 24, 25일 양일간의 모델과 관측의 연직 바람장을 제시하였다(Fig. 9). 제시된 그림에서 연직 상한을 0.5 km로 제한하였으며 WRF_1km와 CM_100m에서는 각각 6개 층의 고도값이 사용되었다. 참고로 SODAR의 경우 지상으로부터 40 m에서부터 관측이 이루어졌으며 24일 낮시간에는 오전 10시부터 17시까지 14시를 제외하고 결측이다.

전반적으로 SODAR 관측자료가 없는 지상 40 m 이하 고도에서는 CM_100m의 풍속이 WRF_1km보다 약하다. 이는 앞서 Fig. 8에 제시된 지상풍속 시계열의 결과와 마찬가지로 WRF_1km에서는 바다로 표현된 금호동지점이 CM_100m에서 매립지로 표현되면서 지면 마찰의 효과에 의해 약화된 모습이다. 반면

지상 40 m 이상 고도에서의 풍속은 다소 차이를 나타낸다. 24일 18시 이후 60 m 고도의 풍속을 살펴보면 SODAR 관측에서 주간에 대기불안정에 의한 수평 풍속의 증가는 이후 시간으로 빠른 속도로 안정화가 이루어진다. WRF_1km에서는 19시에 10 ms⁻¹ 정도의 강한 남풍을 계속해서 모의하고 21시 이후 약화되고 있지만 CM_100m에서는 이미 19시부터 다소 약화된 5 ms⁻¹ 정도의 남풍을 모의하고 있고 이는 관측과 유사하다. 이후 야간의 약화된 바람과 25일 06시경의 최대 육풍을 WRF_1km와 CM_100m에서 잘 모의하였고 이후 해풍으로의 전환과정에서 풍속이 다소 약화되었다. 25일 15시를 전후로 해풍이 강하게 금호동 지점으로 유입된다. 14시를 기준으로 이미 5 ms⁻¹ 이상의 남풍이 출현하며 15시에는 최대 10 ms⁻¹의 강한 풍속을 모의하였고 WRF_1km보다는 CM_100m에서 더욱 강화된 풍속이 모의되었고 SODAR 관측과 잘 일치한다. 여기서 주목할 부분은 대기의 연속성에 의해 금호동 지점의 활발한 대기의 흐름은 열플럭스의 이류가 활발함을 의미하며 이는 대기경계층 고도의 발달과 밀접한 관련이 있다.

앞서 Fig. 3에서 보였듯이 본 연구에서는 상세바람장 예측 능력을 극대화하기 위해 격자상세화에 뿐만 아니라 고해상도 지표경계조건을 입력하였다. 지표경계조건 상세화는 경계층 하부의 열적 및 역학적 난류의 변화를 야기하여 연직풍속 분포에 영향을 주게 된다. 즉 대기혼합고의 발달은 난류의 발달이 활발함을 의미하며 수평적인 바람분포에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 먼저 Fig. 4에 도시한 a-b 단면을 따라 25일 15시의 대기 경계층 높이를 나타내었다(Fig.

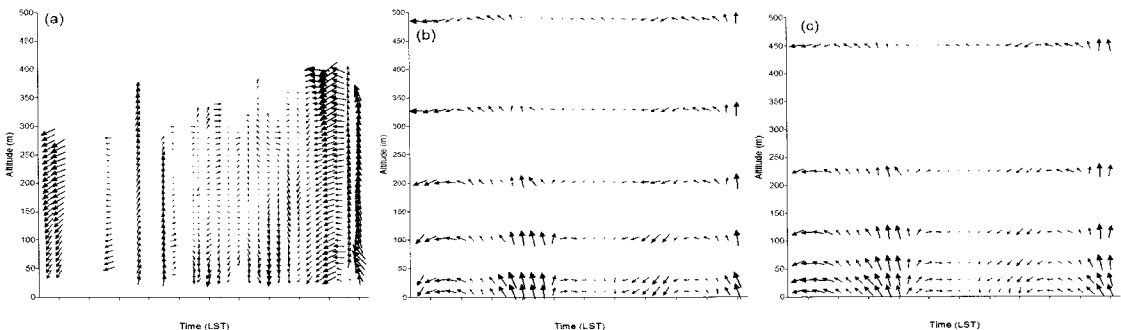


Fig. 9. Comparison of wind vector fields each SODAR (a), WRF_1km (b) and CM_100m (c) up to 500 m.

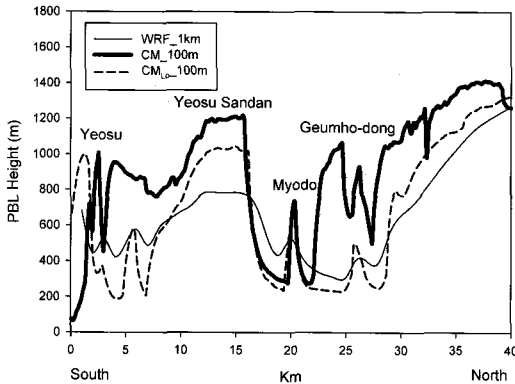


Fig. 10. PBL height variations along A-B line in Fig. 3.

10). 비교분석을 위하여 CM_100m 모델링 시 상세 지형 및 지표조건을 입력하지 않고 USGS30초 자료를 입력한 경우(CM_{Lo}_100m)에 대해 추가 수치모의하고 분석하였다. WRF_1km에 비해 CM_100m에서 남으로부터 전반적으로 대기경계층의 발달이 보다 복잡한 양상을 나타내며 육상에서는 증가하고 해상에서는 감소하는 경향을 나타낸다. 여수지역에서는 도시의 열적조건이 모사됨으로써 경계층 높이가 500 m 이상 증가한다. 금호동지점은 WRF_1km에서는 해상으로 표현되었기 때문에 경계층 높이가 300 m 정도이나 CM_100m에서는 1000 m 정도로 모의되었다. 이는 앞서 Fig. 9에서 25일 15시경의 연직적인 강풍대의 고른분포에 기인한다. 또한 CM_{Lo}_100m에서는 격자 상세화에도 불구하고 지표 경계 입력자료의 낮은 해상도로 인해 경계층 발달이 미약하다. 이는 고해상도(격자크기 500 m 이하) 바람장 수치모의시 상세 지표경계조건의 입력이 반드시 수반되어야함을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 한반도 대표적 복잡 연안지역인 광양만을 대상으로 복잡한 지형과 지표상태, 그리고 정밀한 3차원 초기입력 기상장을 고려한 고해상도 바람장 산출을 위해 WRF/CALMET 시스템을 구축하고 수평 및 연직적인 바람장 모의능력을 평가하였다. 2007년 8월 24일과 25일에 대해 약한 중관상태 하에서 WRF의 경우 1 km 격자해상도로 바람장을 생성하

였으며 CALMET은 WRF결과를 초기장으로 하여 수평격자를 100 m까지 증가시켜 수치모의하였다.

격자해상도의 증가에 따른 수평바람의 해석능력을 살펴본 결과, 24일과 25일 이른 아침에 약한 북동풍의 전반적인 대기 흐름을 WRF_1km와 CM_100m에서 잘 나타내었다. 반면에 북동풍 지배하에 백운산을 비롯한 산악지역의 강화된 바람과 광양만 매립지 위의 정체된 바람을 WRF_1km보다 CM_100m에서 더욱 자세하게 모의하였다. 주간에는 해풍의 발달 모습이 모델 전 영역에서 명확하게 나타났으며 광양만을 중심으로 동과 서로 분리되어 침투하는 특이한 양상이었다. 이러한 양상은 금호지점과 금남지점의 일변화 경향에 영향을 주어 WRF_1km보다 CM_100m에서 더욱 정확하게 모의하였다. 전반적인 수평바람분포의 결과가 이 등의¹²⁾ 결과와 유사하나 수평격자 해상도의 증가로 인해 풍속의 정체 및 가속효과로 인한 풍속의 국지적인 증감이 더욱 뚜렷하였다.

수평격자 해상도의 증가로 인한 수평바람의 상세한 모사는 바람의 연직변화에도 변화를 야기할 것으로 판단하였고 특히 연직적인 풍속의 변화는 풍력자원평가에 매우 중요하므로 광양만 매립지 위의 SODAR 관측결과와 모델링 결과를 함께 비교하였다. 광양만 매립지를 기준으로 WRF_1km의 경우 분석지점이 바다로 표현됨으로써 지상에서 다소 강한 풍속을 나타내었지만 CM_100m에서는 정확히 표현됨으로써 지표풍속의 약화와 함께 SODAR 관측과 잘 부합하였다. 즉 연직적인 바람분포의 변화는 수평장의 수렴역과 함께 지표조건에 영향을 크게 받기 때문에 상세지표조건의 입력이 중요함을 시사하며 또한 대기 경계층 발달도 격자해상도에 따라 차이를 나타내었고 향후 풍력자원 평가 및 대기오염 예측에 크게 기여할 것으로 판단된다. 통계적 검증결과, WRF/CALMET 결합시스템이 복잡한안지역인 광양만 지역의 수평바람장 모사함에 WRF만을 사용할 경우보다 오차의 감소를 보였으며 수평 풍속을 모의함에 개선된 결과를 나타내었다.

더불어 본 연구는 단기적인 사례 연구에 국한되므로 보다 장기적인 평가가 이루어져야 할 것이며 연안 복잡지형 뿐만 아니라 고지대의 복잡한 산악구조에 의한 상세 바람장 예측 정확도를 평가하고 연안 풍력

뿐만 아니라 육상 풍력자원 평가 전반에 걸쳐 활용 되어
져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업
인 「한반도 해역 고해상도 풍력자원지도 구축 및 단지
개발 적합성 평가시스템 개발」 일환으로 수행되었습
니다.

참 고 문 헌

- 1) 김현구, 이화운, 정우식, 2005, 한반도 바람지도 구
축에 관한 연구 - I. 원격탐사자료를 이용한 해상풍
력자원 평가, 한국대기환경학회지, 21, 63-72.
- 2) 이화운, 김민정, 김동혁, 김현구, 이순환, 2009, 풍력
자원 평가를 위한 바람자료 동화 특성 평가, 한국대
기환경학회지, 25, 1-14.
- 3) Rao P. A., H. E. Fuelberg and K. K. Droegemeier,
1999, High-resolution modeling of the cape can-
averal area land-water circulations and associated
features, Mon. Weather Rev., 127, 1.
- 4) Lee S. H., D. H. Kim and H. W. Lee, 2008,
Satellite-based assessment of the impact of sea-sur-
face winds on regional atmospheric circulations
over the korean peninsula, Int. J. Remote Sens., 29,
331-354.
- 5) Chandrasekar A., C. R. Philbrick, R. Clark, B.
Doddrige and P. Georgopoulos, 2003, Evaluating
the performance of a computationally efficient
MM5/CALMET system for developing wind field
inputs to air quality models, Atmos. Environ., 37,
3267-3276.
- 6) Yim S. H. L., J. C. H. Fung, A. K. H. Lau and S. C.
Kot, 2007, Developing a high-resolution wind map
for a complex terrain with a coupled MM5/CALMET
system, J. Geophys. Res., 112.
- 7) Davis C. and F. Carr, 2000, Summary of the 1998
workshop on mesoscale model verification, Bull.
Am. Meteorol. Soc., 81, 809.
- 8) Lee S. and F. Kimura, 2001, Comparative studies in
the local circulations induced by land-use and by
topography, Bound. -Layer Meteorol., 101, 157-182.
- 9) Lee H. W., H. Choi, S. Lee, Y. Kim and W. Jung,
2008, The impact of topography and urban building
parameterization on the photochemical ozone con-
centration of seoul, korea, Atmos. Environ., 42,
4232- 4246.
- 10) 이순환, 이화운, 김동혁, 김현구, 2007, 한반도 풍력
자원 평가를 위한 초기 공간해상도와 위성자료 동화
의 관계 분석, 한국대기환경학회지, 23, 653-665.
- 11) Holtslag A. A. M. and A. P. Van Ulden, 1983, A
simple scheme for daytime estimates of the surface
fluxes from routine weather data, J. Appl. Meteorol.,
22, 517-529.
- 12) 이화운, 전원배, 이순환, 최현정, 2008, 복잡 연안지
역의 지표면 자료 상세화에 따른 수치 기상장 분석,
한국대기환경학회지, 24, 649-661.
- 13) 이화운, 박순영, 이순환, 임현호, 2009, 연직관측자
료를 통한 복잡 연안지역의 오존 이류특성, 한국대
기환경학회지, 25, 1, 57-74.
- 14) 김현구, 황효정, 이화운, 김동혁, 김덕진, 2009, 위성
영상 해상풍 추출에 의한 수치바람모의 검증, 한국
환경과학회지, 18(8), 847-855.
- 15) Mass C. F., D. Ovens, K. Westrick and B. A. Colle,
2002, Does increasing horizontal resolution produce
more skillful forecasts? Bull. Am. Meteorol. Soc.,
83, 407-430.
- 16) Kuwagata T., M. Sumioka, N. Masuko and J.
Kondo, 1990, The daytime PBL heating process
over complex terrain in central japan under fair and
calm weather conditions: Part I. meso-scale circula-
tion and the PBL heating rate, J. Meteor. Soc.
Japan, 68, 625-638.