

복잡 해안지역 해상풍 모의의 정확도 개선—II: LAPS를 사용한 자료동화

배 주 현·김 유 근·정 주 회·권 지 혜·서 장 원·김 용 상*
부산대학교 대기과학과, *기상연구소 해양기상지진연구실, **기상청 정보화담당관실
(2005년 5월 31일 접수; 2006년 6월 23일 채택)

Improvements in the Simulation of Sea Surface Wind Over the Complex Coastal Area —II: Data Assimilation Using LAPS

Joo-Hyun Bae, Yoo-Keun Kim, Ju-Hee Jeong, Ji-Hye Kwon,
Jang-Won Seo* and Yong-Sang Kim**

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*Marine Meteorology & Earthquake Research Laboratory, Meteorological Research Institute, Seoul 156-720, Korea

**Information Management Division, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea

(Manuscript received 31 May, 2005; accepted 23 June, 2006)

We focus on the improvement of accuracy of sea surface wind over complex coastal area during the warm season. Local Analysis Prediction System (LAPS) was used to improve the initial values in Mesoscale Meteorological model (MM5). During the clear summer days with weak wind speed, sea surface wind simulated with LAPS was compared with the case without LAPS.

The results of modeling with LAPS has a good agreement mesoscale circulation such as mountain and valley winds on land and in case of modeling without LAPS, wind speed overestimated over the sea in the daytime. And the results of simulation with LAPS indicated similar wind speed values to observational data over the sea under influence of data assimilation using BUOY, QuikSCAT, and AMEDAS. The present study suggests that MM5 modelling with LAPS showed more improved results than that of without LAPS to simulate sea surface wind over the complex coastal area.

Key Words : Sea surface wind, Complex coastal area, MM5, LAPS, Data assimilation

1. 서 론

중규모 기상 모형을 이용한 수치 예보에서 예보의 정확도를 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나는 얼마나 정확한 초기장을 생산하느냐 하는 것이다. 초기장 생산의 핵심 과정은 공간적으로 불규칙하게 분포하고 있는 관측 자료로부터 규칙적인 격자 자료를 생산하는 객관분석이라 하겠다¹⁾.

하지만 객관분석에 앞서, 관측자료의 확보가 중요한데, 아직은 관측자료의 수집과 검증에 많은 어

려움이 따르고 있다. 관측자료의 공간적 해상도 및 정확도가 실시간 기상분석에 있어서 중요한 역할을 한다고 알려져 있으며²⁾, 현재 구축되어 있는 기상관측소 및 고층관측소 관측망 만으로는 1-3시간의 실시간 예보를 수행하는데 있어서 충분치 않으며 이에 기상청에서는 약 450여개소의 자동기상관측시스템(AWS: Automatic Weather Station)을 운영 중이다. 이로써 육지에서의 관측망은 어느 정도 실시간 예보를 위한 여건이 구비 되었지만 우리나라는 3면이 바다로 둘러싸여 있어 해상에서의 정확한 기상분석에는 어려움이 있다. 특히 우리나라에서 발생하는 대부분의 기상현상이 관측망이 부족한 해양(서, 남해)으로부터 접근하므로 정확한 기상상태 분석이 매우 중요하다³⁾.

Corresponding Author : Joo-hyun Bae, Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-583-2652
E-mail: baegop@pusan.ac.kr

해상의 기상상태를 감시할 수 있는 관측 장비로는 부이가 있지만 그 숫자(기상청 운영 4개소)나 분포가(연근해에 집중) 해상의 기상상태를 파악하기에는 역부족이다. 이에 최근 기상위성과 기상레이더 등 원격탐사 측기를 이용하여 해상의 기상상태를 분석하려는 노력이 진행 중이다. 그러나 지금까지 기상위성이나 레이더 자료의 이용은 그 영상자료만을 분석하는 초기 단계에 있었으며 최근 들어 그 원시자료를 수치예보에 이용하는 연구가 진행되고 있다⁴⁾.

그러나 중위도에서 위성 자료의 수치예보 결과에 대한 영향은 없거나 오히려 예보 결과를 나쁘게 만들었다⁵⁾. Mo *et al.*도 2개월 동안의 여름철 분석 위성자료를 사용한 경우와 사용하지 않은 결과를 비교한 결과 북반구 중위도에서 위성자료의 영향은 없는 것으로 잠정적으로 결론을 내렸다⁶⁾. 더욱이 고해상도의 중규모 모델에서는 관측 오차가 상대적으로 큰 위성 자료를 삽입하여 모델 결과에 오차를 더 가져올 수도 있다^{7,8)}. 그러므로 고해상도의 위성 자료는 수치예보의 정확도를 개선시킬 잠재력을 가지고 있으나, 이를 적절히 동화하는 기술 없이는 상대적으로 중관 관측 자료가 풍부한 북반구에서는 큰 영향을 보기 어렵다^{9,10)}. 최근에 박세영 외에 의해 3차원 변분자료동화기법을 이용하여 QuikSCAT의 해상풍 자료가 효과적으로 동화됨과 3차원 자료동화를 통해 변화된 초기장으로서 인한 예보장 또한 많은 영향을 받을 수 있음을 제시한 바 있다¹¹⁾.

앞에서 언급한 바와 같이, 수치 모델링에 있어서 모델 초기 자료의 개선은 매우 중요한 부분을 차지한다. 수치예보의 초기자료 구성에 있어서 실시간 관측자료의 이용은 매우 중요하다. 여기에는 관측자료간 규모의 문제, 비중관 관측자료의 이용, 격자점으로서의 내삽, 관측 자료 선별 등의 전처리 과정의 개발이 필요하다. 이처럼 여러 측기로부터 생산되는 관측 자료를 단시간예보에 활용하기 위해서는 관측자료들을 종합, 분석하여 예보자들이 판단하기 용이하게 현재의 기상상태를 가시화 할 수 있고 동시에 이 자료를 수치예보 초기자료로 이용할 수 있게 하는 기상자료 분석 및 동화 시스템의 개발이 필수적이다^{12,13)}.

기상연구소에서는 1997년 이래로 미국 예보시스템연구소(FSL, Forecast Systems Laboratory)와 협력하여 국지규모 기상 자료 처리 및 분석 시스템(LAPS, Local Analysis and Prediction System)을 개발하여 왔다^{14,15)}. LAPS는 예보자들이 종합적으로 대기상태를 이해하도록 다양한 관측 기기로부터 생산되는 방대한 양의 관측 자료를 분석하는 시

스템으로서 FSL에서 1980년대 말부터 개발에 착수하였다. LAPS는 지상과 상층 기상자료의 분석을 수행하며 실시간 예보를 위한 다양한 변수들을 생산해 낸다. 이 시스템은 90년대 초 국지 약기상이 빈번히 발생하는 콜로라도 지역의 실시간 예보에 많은 기여를 했다¹⁶⁾. 최근에는 분석자료의 주관적인 이용 이외에도 LAPS로부터 산출된 분석자료를 국지규모 수치모델의 초기자료로 제공하려는 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 복잡한 해안 지역에서의 해상풍 모델의 정확도 향상을 위한 연구로서 두 개의 세부 주제로 연구가 수행되었다. 기초 연구인 첫 번째 논문에서는 현업 예보용으로 사용 중인 중규모 모델(MM5)을 통한 한반도 주변 해역의 해상풍 예측의 적합성 검토를 해 봄으로써, 현 해상풍 예측이 복잡연안지역의 실제 바람장을 정확히 모의하고 있지 못함을 확인하였으며 이를 토대로 두 번째인 본 논문에서는 현업 예보용으로 사용 중인 중규모 기상 모델(Penn State University(PSU)/National Center for Atmospheric Research (NCAR) Mesoscale Model, MM5)을 사용하여 관측자료 동화에 의한 초기치 개선을 수반함으로써 해상풍 예측의 정확도를 높일 수 있는 방안을 구축하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 LAPS를 이용하여, 위성자료와 GTS, AWS 등의 관측자료의 자료동화를 통해 초기·경계치 값의 개선으로 보다 향상된 복잡한 해안과 해상에서의 바람장을 산출하고자 한다. 이에 2장에서는 본 연구에 사용된 LAPS의 개요 및 적용방법에 대해서 간략히 설명하였으며, 3장에선 본 연구에 사용된 자료 및 연구 분석 방법을 기술하였고, 마지막 4장에선 자료동화시스템을 이용한 초기치 개선에 따른 해상풍 예측에서의 우수성을 검증해 보이고자 하였다.

2. LAPS 개요 및 적용방법

LAPS는 적용시키고자 하는 지역에서 수집 가능한 모든 기상관측 자료를 LAPS의 분석 기법을 이용하여 고해상도의 재분석 자료로 생산해 내며, 이때 각종 기상관측자료가 LAPS를 이용하여 초기 추정치에 동화되며, 그 간략한 흐름도를 Fig. 1에 도식화하였다. LAPS에는 초기 자료 수집 모듈과 분석 모듈로 크게 나누어지는데, 분석 과정에는 지상 분석 과정과 3차원 바람, 온도, 습도, 구름, 강수, 토양 분석과정, 그리고 그로부터 유도되는 각종 자료 분석 과정으로 구성되며, 각각의 분석 과정은 관측자료의 특성을 고려한 자료 분석 및 동화 기법을 포함하고 있다. LAPS의 각 단계별 분석 과정은 다음 단계 혹은 이전 단계의 분석 과정과 상

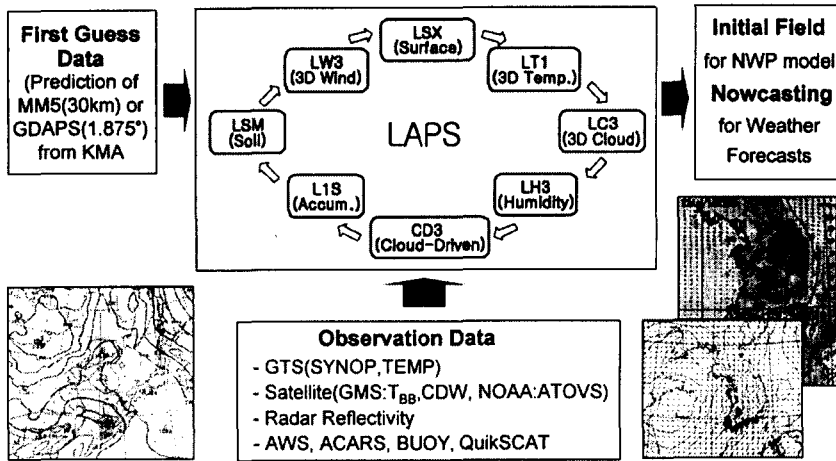


Fig. 1. Schematic diagram of LAPS process.

호 관련성을 가지며 또한 이전 시간의 분석 자료와의 연속성을 유지하며 수행되도록 설계되었다. 최종 분석된 자료는 3차원 그래픽 도구에 의해 현재 대기상태를 나타내는 그림으로 표출되고 3차원 격자점 자료로 변환되어 수치예보 모델의 초기자료로 제공된다¹⁷⁻¹⁹.

현재 LAPS의 좌표계는 수평 2~20 km의 해상도로 람버트 공형(Lambert conformal) 및 극평사(Polar stereo graphic) 등의 도법이 가능하며, 연직 좌표계는 등압면 좌표계로 25 hPa의 해상도까지 분석이 가능하다. 따라서 meso-β에서 meso-γ에 이르는 국지 규모 기상 현상까지 분석해 낼 수 있다. meso-β 이하 규모의 악기상 현상은 단시간 수치예보에 있어서 신속히 예측할 수 있어야 그 피해를 최소한으로 줄일 수 있으므로 LAPS 시스템은 이런 목적에 매우 적합한 시스템으로 생각된다¹³.

수치예보의 초기자료 생산을 위해서 시·공간적인 변동성을 갖는 기상현상의 신호를 실시간으로 초기화시키기 위해서는 종관 시간(매 12시간) 이외에 현재 사용할 수 있는 비종관 관측자료를 이용하여 각각을 수치예보 모델의 격자점에 할당해야 한다. 일반적으로 관측자료의 해상도는 모델 격자 간격보다 넓기 때문에 관측자료를 모델 격자에 맞게 내삽해 주어야 하며 이와 동시에 관측오차를 줄여 주기 위한 완화 과정을 거쳐야 한다. 반면 관측밀도가 아주 높다면 자료 선별 과정을 거쳐 가장 대표적인 관측자료를 결정하여야 한다. 또한 모델 적분에 사용되기 위하여 관측변수를 모델 변수로 전환해 주는 과정 등 자료 전처리과정이 요구된다. LAPS의 초기 입력자료 분석 과정에는 다양한 관측기로부터의 관측자료를 LAPS 격자점으로 내삽하는 루틴이 포함되어 있으며 우리나라 자료를

적용하기 위해서 이들 입력 루틴을 수정해 주어야 한다.

현재 LAPS의 입력 자료로 이용되고 있는 기상 관측 자료의 종류로는 한반도 영역에서는 지상관측, 고층관측, 기상레이더, 해양 부이, AWS, ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) 등의 자료가 이용 가능하고, 분석 영역 전체에 대하여 지상 및 고층 관측자료, 해양 부이, GMS 위성자료, QuikSCAT, 구름 이동 바람(CDW : Cloud Drift Wind) 등이 입력된다. 이 가운데 GMS 위성 자료는 분석 영역을 대부분 포함하며 구름이 없는 지역에서 고해상도의 휘도온도 자료를 제공해 준다. Table 2에 관측자료에 대해 상세히 기술하였다.

LAPS 분석과정이 수행되기 위해서는 먼저 초기 추정치로 18 km 해상도의 MM5 자료가 LAPS 격자점 값으로 내삽되고, 여기에 위에 언급된 각각의 자료들이 첨가되어 동화된다. 고해상도의 위성 및 레이더 자료 등은 분석 해상도와 비교하여 그 픽셀 값을 그대로 이용하거나 이중 선형 내삽법이 이용된다. 나머지 관측자료들은 관측자료의 밀도에 따라 변화하는 가변 영향 반원을 채택하여 Barnes의 객관 분석법에 의해 내삽된다²⁰.

LAPS 분석과정은 지상분석 과정부터 시작되는데 이는 지상분석 자료가 다른 분석 과정의 초기 및 경계자료로써 이용되기 때문이다. 본격적인 분석에 들어가기 전에 지상관측 자료에 대한 기후, 연속성, 표준편차 등을 검사하는 품질 검사과정이 수행된다. 관측자료는 내삽된 분석자료와 비교하여 다시 한번 품질검사 과정을 거치고, 이때 그 차이가 일정 임계치 이상을 초과하는 경우에 관측치는 제거된다. 품질검사를 거친 자료들은 분석 영역의

격자점 값으로 재분석하기 위하여 분석영역의 내부에서는 큐빅 스피라인(cubic spline)방법이, 외부의 경계에서는 Barnes의 객관 분석법이 적용된다.

다음으로 변분법을 이용하여 기압과 바람장을 구속조건으로 운동방정식을 만족시키도록 한다²¹⁾. 풍향의 변화는 시간변화 경향에 의하여 비선형항을 계산하는데 이용되며 마찰항은 지형 고도차를 이용하여 지표 거칠기로부터 계산된다. 온도와 노점온도는 관측자료가 속한 지역의 외삽 오차를 줄이기 위하여 초기추정치와의 연속성을 고려하여 분석된다²²⁾. 맑은 대기의 경우 위성 휘도 온도의 수평 경도는 큐빅 스피라인의 한 구속 조건으로 이용되어 지상 온도에 일치시킴으로써 지상 온도 분석 과정에 포함된다³⁾. 토양 수분은 수치예보 모델의 하층 경계 조건의 초기화에 매우 중요한 요소이다. LAPS는 간단한 Groves의 1차원 토양 수분 모델²³⁾을 LAPS 지상 및 강수 분석 과정과 결합하여 이용하고 있다.

기본적으로 바람장 분석은 단일 도플러 레이더의 반지름 방향 바람과 레이더 이외의 측기(레디오존데 등)에서 관측된 바람 자료를 결합시키는 2단계 객관 분석법이 이용된다. 먼저 지상관측 바람과 레디오존데 바람 자료를 이용하여 사전 바람 분석장을 만들어 낸다. MM5 모델로부터의 초기 추정 바람장과 관측 자료간의 차이를 구함으로써 관측 변량(residual)이 계산된다. 그 변량이 특정 임계치를 넘는 해당 관측 자료는 분석 대상에서 제외된다. 자료 품질 검사 과정을 거친 변량은 3차원 격자점으로 내외삽되고 ± 50 hPa 범위 내의 연직 격자점으로 내외삽된다. 그 변량은 각 층에서 관측 자료의 밀도에 따라 주어지는 영향 반원에 의해 Barnes 분석법에 의해 분석된다. 그 외 습윤 분석, 온도장 분석, 구름장 분석 과정에 대한 자세한 설명 및 흐름도는 김용상 등과 과학기술부를 참고하기 바란다^{15,24,25)}.

3. 자료 및 분석 방법

본 연구의 대상 지역은 한반도 남동해안으로, 불규칙하고 복잡한 지형 및 섬들로 인한 지역적 특성이 기상과 해양현상에 있어 중요한 역할을 하고 있다. Fig. 2는 본 연구영역으로 지형분포와 실험 결과의 검증에 위한 4개의 관측지점과 1개의 부이 지점을 표시해 두었다.

지리적으로 복잡한 연안지역과 해상에서의 바람 특성이 잘 나타나는 사례일을 선정하기 위하여, 최근 2004년 여름 동안의 연안 AWS 자료와 BUOY 자료를 분석하였고, 이 지역의 해상풍 특성과 지형에 의한 효과를 잘 살펴보기 위해, 평균적으로 4 ms^{-1}

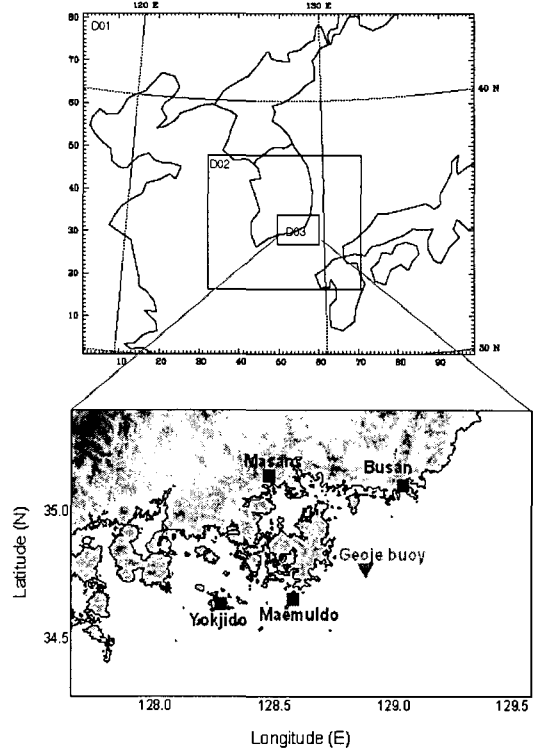


Fig. 2. Nested model domains used in this study (locations of AWS and Buoy monitoring meteorological sites).

이하의 약한 풍속을 가진 맑은 날이며 강수가 없는 여름날의 대표적 사례일(2004. 8. 25 0900 LST - 2004. 8. 27. 0900 LST)을 선정하여, 현장에서 사용되고 있는 MM5을 통해 수치실험을 하였으며, 이 기간 동안은 Fig. 3의 지상일기도에서 살펴보면 우리나라 동쪽에 고기압이 위치하고 전선을 동반한 저기압은 이미 북동쪽으로 이동하고 있는 맑은 여름날임을 알 수 있다.

MM5는 미국의 기상연구소 (National Center for Atmospheric Research)와 펜실베니아 주립대학이 공동 개발한 모델이며, 비정수 상태에 사용가능하고²⁶⁾, 분석 자료와 관측자료의 4차원 자료동화를 지원한다²⁷⁾. 그리고 보다 나은 관측 자료의 적용도 가능하게 설계되어 있으며, 본 연구에서는 3.6 version을 사용하였고 모형 설계 및 물리적 특성은 Table 1과 같다.

수치실험에 사용된 모형의 초기 및 경계자료는 6시간 간격의 기상청 제공 분석자료인 GDAPS (Global Data Analysis and Prediction System) 55km(0.5 °)를 사용하여 실험을 행하였다. 연구에서 쓰인 기압과 기온, 풍향 및 풍속은 최하층 sigma level값으로 0.999 (지상고도 약 10m)로 주었으

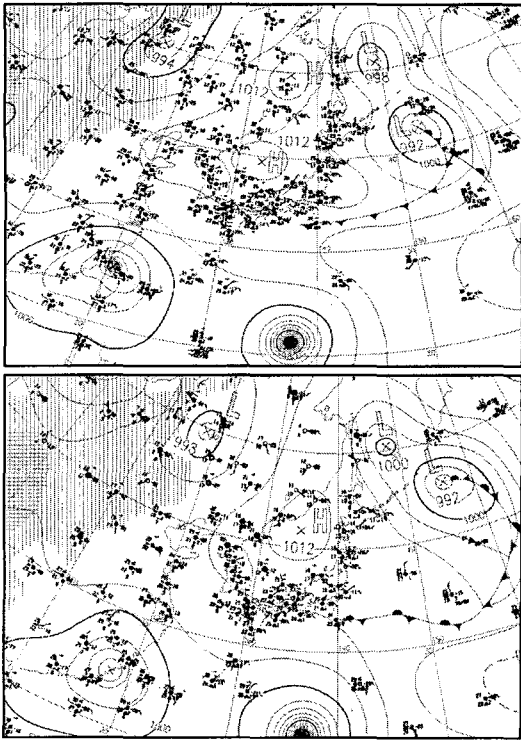


Fig. 3. Synoptic weather map at surface level at (a) 1800 UTC on 25 and (b) 0600 UTC on 26 August, 2004.

며, 초기 입력값의 균형을 맞추기 위해서 24시간 spin-up 시간을 두었다.

수치실험에 따른 결과 비교를 위해, 2004년 8월 25일 0900 LST ~ 8월 27일 0900 LST 까지의 사

Table 1. Nested model configuration

	Domain1	Domain2	Domain3
PBL scheme	MRF		
Cumulus scheme	Kain-Fritsch 2		
Explicit Moisture scheme	Mix Phase		
Radiation scheme	Cloud-radiation		
Vertical grid	23 layer		
Horizontal grid	81×99	91×112	64×88
Horizontal resolution	18 km	6 km	2 km
Time step	54 s	18 s	6 s
Time Period	73 hour		

례일에 관측값의 자료동화 없이 MM5를 적분한 경우와 모든 관측 자료(GTS, AWS, Buoy, Wind Profiler, AMEDAS, QuikSCAT, GOES)를 LAPS에 의해 동화된 초기치를 이용한 MM5 수행결과와 비교 검증해 보았다. 여기서 관측값과의 비교를 위해, 매물도, 가덕도, 부산, 마산의 기상 관측값은 빼고 자료 동화를 했으며, 수치실험 결과를 이 관측 지점의 값과 비교하였다. 그리고 본 연구에서 자료 동화를 위해 사용된 LAPS의 입력자료들에 대한 각각의 자세한 정보는 Table 2에 기술하였다.

4. 결 과

4.1. LAPS 분석바람장

대기 경계층 내의 바람 분포의 경우 하층 대기 내의 대규모 수평 기압 및 온도 경도와 하층 부분에서의 지표면 항력과 운동량 교환을 결정하는 지표

Table 2. Input data for the LAPS analysis

Data	Numbers of Data	Obs. period	Variables	Remark
Surface (GTS: SYNOP, SHIP, BUOY)	GTS: 200 Station: 30	6 hourly (3 hourly)	Surface variables (Cloud type and amount)	Used in every 3 hourly
Upper-air (GTS: TEMP)	GTS: 20 Station: 5	12 hourly (6 hourly)	Wind, T, T _d	Used in every 6 hourly at Osan
Satellite (GOES:T _{BB} , CDW)	Full coverage	3 hourly	Brightness temp., Albedo, Cloud Drift Wind	IR1, IR2, IR3, VIS, CDW
BUOY	5	3 hourly	T, Wind, SLP, RH	
AWS	470	3 hourly	T, Wind, SLP, RH	Only SLP, RH at some AWSs
AMEDAS	2890	3 hourly	T, Wind	JMA data
Wind profiler	25	3 hourly	Wind	JMA data (~400 hPa)
QuikSCAT	At sea	Approximately 4 times a day	Sea Surface Wind	Polar orbit satellite
First guess	MM5(18 km)	3 hourly	3-dim. variables	Forecast

면 거칠기 특성, 바람 시어를 결정하는 PBL (Planetary Boundary Layer) 깊이, 바람과 온도 연직 분포에 함께 영향을 미치는 운동량의 열의 수평 이류 등에 의해 결정된다²⁸⁾. 그래서 기상요소 중 바람이 가장 예측하기 힘든 factor이며, 특히 관측값에 의한 오차가 크게 발생하는 요소이다. 특히, 도서 및 해안지역의 국지기상현상은 중규모의 일기계와 불규칙하고 복잡한 지형 및 섬들로 인한 지역적 특성이 결합되어 더욱 복잡하게 나타난다²⁹⁾.

LAPS의 분석 전후의 차이를 알아보기 위하여 이러한 분석과정을 걸쳐 생산된 분석 자료 중 한 예를 Fig. 4에 보였다. LAPS를 이용하여, 초기 모델 예보자료인 배경자료에 관측자료를 자료동화한 후 나온 각 격자값인 분석장을 나타낸 그림으로, 각각의 관측값이 객관분석되어 수평바람 분석장으로 만들어 졌다. 이는 LAPS 내의 프로그램에 의해 그래픽으로 다음과 같이 도출어지며, 이외에도 온

도 분석장, 습도 분석장, 구름 분석장, 강수 분석장, 그리고 토양 분석장까지 모두 그래픽으로 자세히 분석해 볼 수가 있다.

여기서는 8월 26일 0900 LST와 1500 LST의 시간대를 분석장으로 나타내었으며 (a)와 (b)는 관측값이 내삽되지 않은 처음 배경모델값으로 그래픽되었고 (c)와 (d)는 두 시간대 모두 많은 관측값의 내삽으로 분석된 수평바람장이다. (a)와 (b)는 관측값이 내삽되지 않은 처음 배경모델값이기에 (c)와 (d)에 비해 단순한 바람장 형태를 이루고 있고 두 시간대 모두 많은 관측값의 내삽으로 인해 (c)와 (d)에선 다양한 풍계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 관측값이 현저히 작은 해상에서도 Quik SCAT과 같은 해상풍 자료 등을 객관분석 함으로써 단순한 패턴을 보이던 해상풍이 관측된 바람과 해수면 온도, 해면기압이 연계되어 다양한 풍계가 연출되고 있음을 볼 수 있다. 처음 0900 LST에는

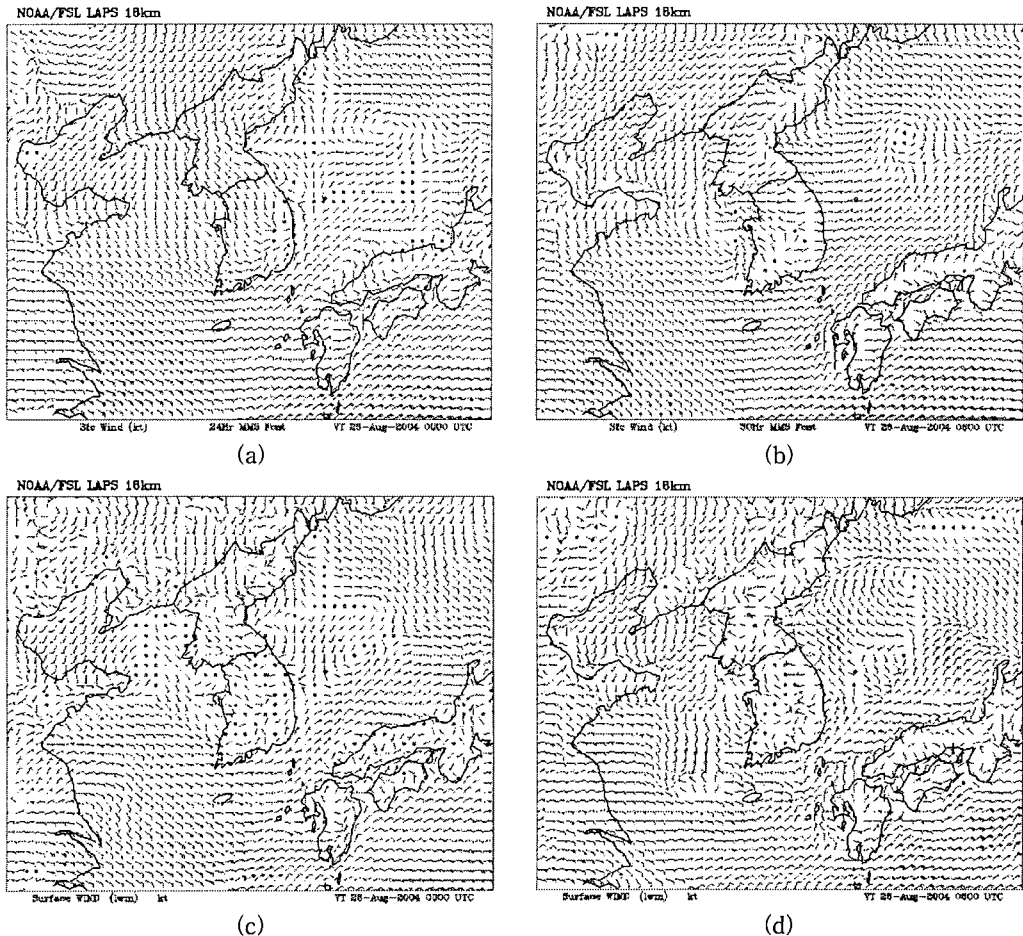


Fig. 4. The analysis fields of horizontal wind vector of first guess used LAPS ((a)0900 LST, (b)1500 LST) and performed data assimilation using LAPS ((c)0900 LST, (d)1500 LST) on 26 August.

LAPS 분석 전후(Fig. 4 (a)와 (c))에서 모두 한반도와 중국 대륙을 중심으로 지형에 따른 풍계 변화가 잘 살펴지고 있지만 특히 LAPS 분석 후의 경우는 태백산맥을 중심으로 AWS 등의 비종관 자료의 동화에 따른 풍계 변화를 뚜렷이 살펴볼 수 있었으며, 해상의 경우는 LAPS 후(Fig. 4 (c))에서 해상에서 고해상도 관측자료의 동화로 인해 서해 연안에서 바람이 수렴하는 현상을 나타내었다. LAPS 후의 오후 1500 LST(Fig. 4 (d))에선 남해 해상과 일본, 한반도 연안 경계로 해풍의 발달로 인해 복잡한 바람장 형태를 보여주었다. 특히 이 시간대에 본 연구의 가장 미세한 도메인인 남동해안을 중심으로 살펴보면, 북동계열의 바람이 지배적인 가운데 한반도를 중심으로 관측된 자료들의 영향에 의해 중관장에서 벗어난 해풍을 가세한 다양한 풍계가 나타남으로써, 본 연구의 수치실험에서 이런 변환된 값들이 두 번의 nesting을 통해 관

측값 자료동화에 따른 우수한 초기치를 제공하리라 사료된다. 또한 각 시간대 바람의 큰 흐름을 LAPS 분석시스템을 이용하여, 쉽고 다양하게 분석이 가능하다는 장점을 보유하고 있으며, 다른 기상요소들 또한 분석이 용이하게 됨으로써 대기유동장의 흐름을 더 빠른 시간내에 분석해 낼 수 있으리라 판단된다.

4.2. 공간 분석(바람장)

사례 기간동안의 자료동화 없이 GDPAS 초기장으로 MM5 수치모의한 결과에서 얻어진 바람장은 Fig. 5에, GTS, AWS, Buoy, Wind Profiler, AMEDAS, QuikSCAT, GOES의 관측값을 LAPS를 통해 자료동화된 초기장으로 적분한 바람 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 먼저 Fig. 5를 살펴보면, 2004년 8월 25일 1500 LST에는 해상과 연안 근처에 동풍이 탁월하며, 연안과 내륙으로는 남동풍으로 변환된 바람이

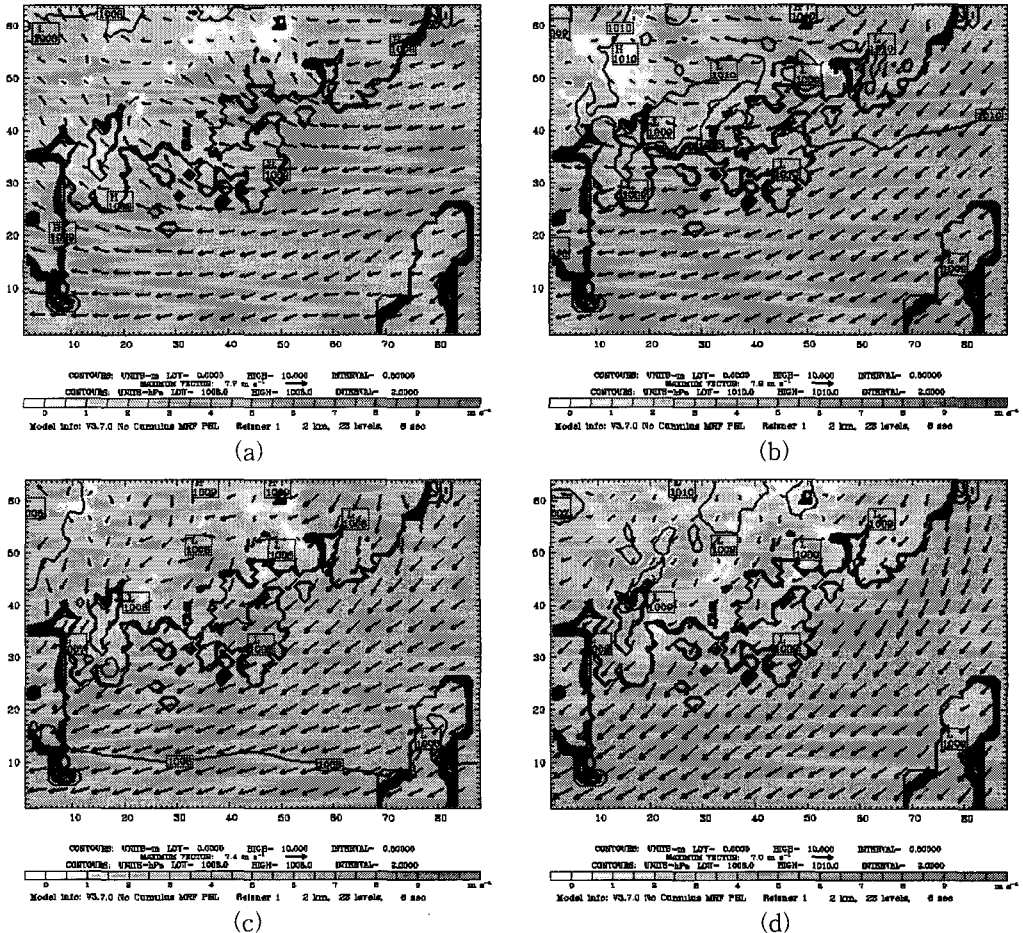


Fig. 5. Simulated wind field without LAPS on (a)1500 LST, (b)2100 LST, (c)0300 LST, and (d)0900 LST, 25-26 August, respectively. Shaded contours indicates wind speed ranging from 0 to 15 $m s^{-1}$.

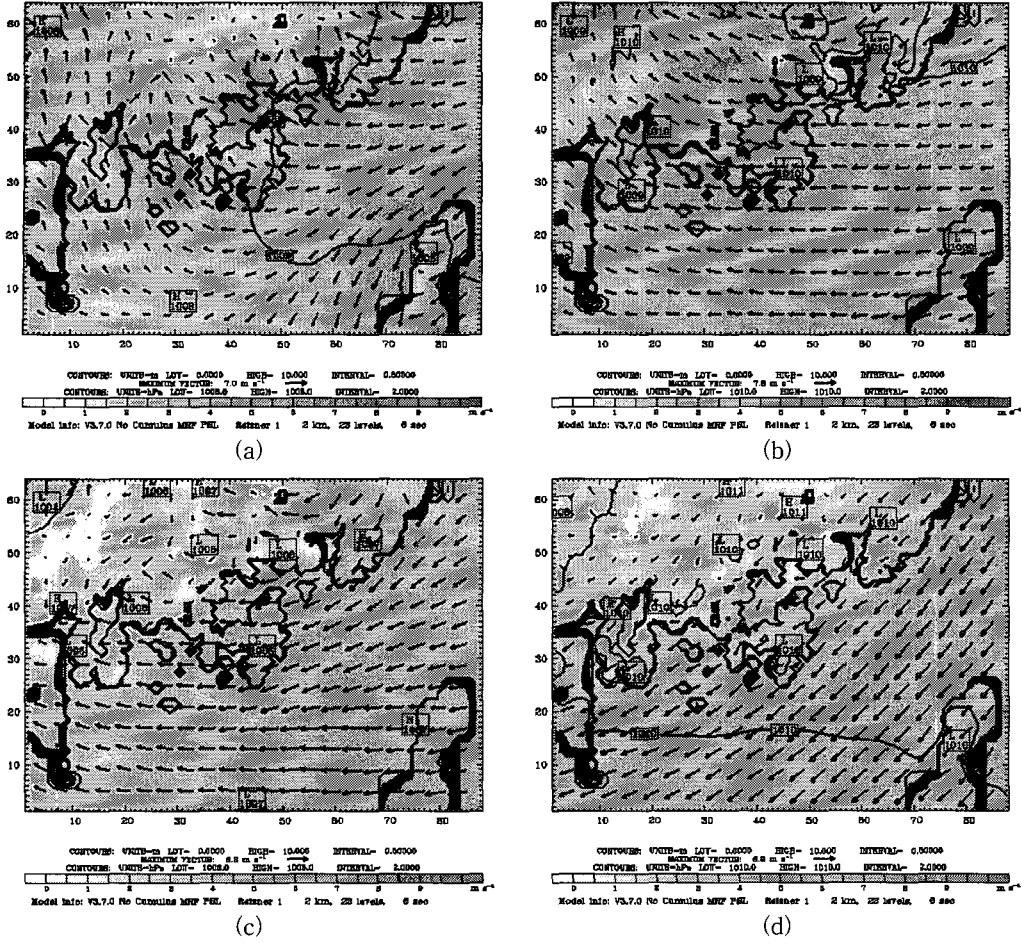


Fig. 6. Simulated wind field with LAPS on (a)1500 LST, (b)2100 LST, (c)0300 LST, and (d)0900 LST, 25-26 August, respectively. Shaded contours indicates wind speed ranging from 0 to 15 $m s^{-1}$.

내륙 깊숙이 파고들고 금남지역에서는 남풍으로 불어 들어가고 있었다. 25일 2100 LST에는 해풍이 약화되어 내륙에선 대기정체의 모습을 볼 수 있다. 이후 26일 0300 LST에선 뚜렷한 육풍이 나타나 주간과 야간의 풍향 전환의 모습을 잘 나타내었다. 26일 0900 LST엔 해상의 바람이 강한 북풍과 북동풍을 나타내며, 육지의 경우도 내륙에서부터 강한 육풍이 불어나오고 있다.

Fig. 6은 LAPS를 이용하여 다수의 관측자료를 저해상도의 초기 추정치에 동화시킴으로써 생산된 고해상도의 재분석 자료를 초기치로 사용한 동화 실험 결과의 수평바람장으로, 시간에 따른 종관장 및 국지적인 영향이 잘 묘사되고 있음을 보여주고 있으며, 복잡한 지형과 해안이 인접해 있는 연안 복잡 지역의 특색이 잘 나타나고 있다. Fig. 5의 저해상도의 초기추정치로 실험한 결과와 비교해서 살펴보면 2004년 8월 25일 1500 LST에선 일본 서

해상의 동쪽 영역이 동풍인 바람이 일본으로 불어 들어가는 해풍으로 보정이 이루어진 것으로 보이며, 육지도와 매물도 영역에선 Fig. 5와 달리, 4 $m s^{-1}$ 이상의 강한 남풍으로 전환되어, 발달된 해풍이 내륙으로 더욱 확장되는 것을 볼 수 있었다. 이는 거제부이 및 연안의 AWS 등에 따른 관측값의 영향에 의한 것으로 사료된다. 25일 2100 LST에선 Fig. 5 (b) 해상의 북동풍이 동풍으로 달리 표현되었으며, 가열된 육지와와의 비열차가 이 시간까지 남아있어, 온도 경도가 커지면서 육지에선 내륙 깊이까지 해풍이 침투하고 있었다. 해상의 경우는 QuikSCAT 등과 같은 위성자료의 영향으로 풍향이 전이되었으며, 풍속도 다소 약하게 보정된 것을 살펴볼 수 있었다. 다음날인 26일 0300 LST엔 삼천포 영역이 Fig. 5 (c) 분포와 다소 다른 차이는 나타내고 있지만 전체적으로는 자료동화 이전과 큰 차이점을 보이지 않았다. 26일 0900 LST에선

LAPS 동화 이전과 차이를 보이지 않으면서 지형의 효과에 의해 돌아들어가고 산간 지역의 강한 기온 경도의 영향으로 산능선을 따라서 강한 바람이 국지적으로 나타나며, 또한 3 m s^{-1} 이하로 바람이 상쇄된 영역도 찾아볼 수 있었다.

전반적으로 육지에선 AWS 등의 자료 동화에 의해 산풍과 곡풍의 국지 순환이 잘 묘사되었으며 다소 강하게 모의된 풍환경을 보정해 주는 효과를 보임을 살펴 볼 수 있었다. 또한 해상의 경우도 Buoy, QuikSCAT과 AMEDAS 자료 등의 동화에 따른 영향으로 다소 보정된 풍향과 풍속을 보임을 살펴볼 수 있었다.

Fig. 7은 LAPS분석 전후의 차이를 알아보기 위해, 8월26일 0600 LST와 1500 LST 시간대의 풍속 차이값을 수평분포로 나타내어 보았다. 0600 LST의

분포가 1500 LST 보다 자료동화한 값과의 차이가 컸으며, LAPS 전과의 풍속 차가 본 연구 영역의 남서해상에선 4 m s^{-1} 까지 나는 것으로 계산되었다. 즉, LAPS전의 풍속이 LAPS를 통한 고해상도 초기치를 이용한 결과보다 풍속을 다소 과대평가하고 있음을 알 수 있으며, 1500 LST는 0600 LST 보다는 그 차이가 적게 날뿐만 아니라, 오히려 LAPS 후의 값이 LAPS 전의 약한 풍속을 강하게 보정해주는 역할을 하였다.

4.3. 관측 자료와의 비교·분석

수치 실험 결과, 시간에 따른 풍계의 분포는 유사하게 나타났으며, 낮시간 동안 해풍의 발달과 국지순환을 자료동화한 경우가 지형의 특성을 잘 묘사하는 것으로 나타났다. 하지만 성긴 도메인에서 관측값과 수치모의 결과가 잘 맞지 않다고 한다면, 그 값이 2번을 걸쳐 nesting하면서 초기값과 경계값을 제공함으로써 커다란 오차를 얻을 수 있으리라 판단되어, 먼저 첫 번째 도메인인 18 km 격자 도메인에 위치한 해상풍 자료인 QuikSCAT 위성 자료와 각 시간대의 계산 결과와의 통계분석이 이루어졌다. 이 관측 값과 모델 결과 사이의 BIAS (mean error), RMSE(Root Mean Square Error)의 통계적 요소가 검증에 사용되었으며, BIAS는 관측 자료가 평균값으로부터 벗어난 정도이며, RMSE는 통계학에서 표준편차의 의미, 즉 예상한 값과 실제 관측 결과가 평균적으로 얼마만큼 떨어졌는가를 나타낸다. 검증에 사용되는 위 통계 요소들의 식은 다음과 같다.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_{com} - Y_{obs}) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_{com} - Y_{obs})^2} \quad (2)$$

상기식에서 N은 검증 자료의 개수이며, Y_{com} , Y_{obs} 는 모델값과 관측값을 나타내며, 가장 성긴 격자 도메인에서 관측된 QuickSCAT 자료 들 중, 본 연구 도메인의 격자값과 일치한 값들만 선별하여, 통계분석을 하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 8월 25일 2100 LST와 8월 27일 0300 LST에만 RMSE와 BIAS가 모두 LAPS이후의 결과가 더 관측값과 가까운 것으로 나왔으며, 이 결과로는 분명하게 LAPS를 통한 자료동화에 의해서 초기치를 개선시켰다고 볼 수는 없었지만, 자료 동화된 자료는 각 시간대마다 1,000 개가 넘는 데 반해, 비교한 지점만을 중심으로 통계분석을 한 점에 대한 한계를 가지며, 통계에 사용하지 않은 많은 값들이

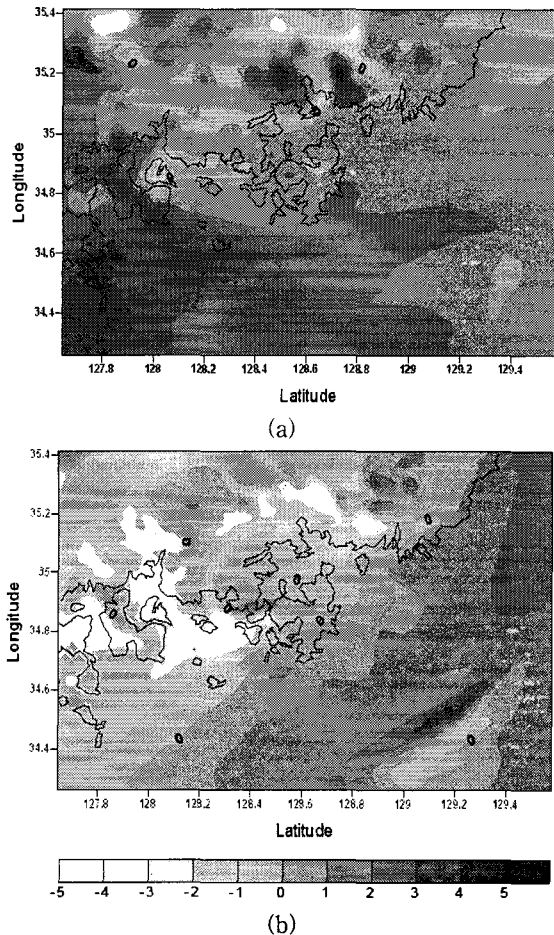


Fig. 7. Difference map for horizontal wind speed between simulated without LAPS and with LAPS on (a)0600 LST and (b)1500 LST 26 August, respectively. Shaded contours indicates wind speed difference ranging from -5 to 5 m s^{-1} .

Table 3. Statistics of RMSE and BIAS for wind speed of QuikSCAT data

Data(TIME)	Data number	RMSE		BIAS		
		without LAPS	with LAPS	without LAPS	with LAPS	
QuikSCAT data	8/25 1800 LST	363	1.88	1.86	-0.9	-0.96
	8/25 2100 LST	73	1.6	1.54	0.54	-0.25
	8/26 0300 LST	350	1.37	2.03	-0.38	-0.61
	8/26 0600 LST	384	1.76	2.32	-0.19	0.07
	8/26 1800 LST	402	1.7	2.28	-0.19	-0.25
	8/27 0300 LST	197	2.03	1.25	-0.96	-0.26
	8/27 0600 LST	651	1.81	2.8	-0.12	-0.56

LAPS의 객관분석을 통해, 효율적으로 동화됨으로써 해상뿐만 아니라, 육지에 까지 영향을 주어, 전 영역의 수치결과에 큰 영향을 주리라 판단된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 자료동화시 제외시켰던 지점인 가덕도, 매물도, 마산, 부산의 풍향, 풍속값의 시계열분포를 나타내었다. 먼저 Fig. 8의 풍향 분포를 살펴보면, 매물도와 부산의 경우는 특정 시간대

에 LAPS를 통한 초기치 개선에 의해, 그 값이 관측값과 거의 동일한 값을 보이는 시간대가 있음을 알 수 있으며, 가덕도와 마산의 경우는 LAPS 전·후 모두 관측값에서 큰 편차로 벗어나지는 않지만 정확하게 그 값을 계산해내지는 못하고 있었다. Fig. 9의 풍속 분포에서는 가덕도, 마산, 부산 지점에서 LAPS 이후의 수치모의 결과가 관측값의 시

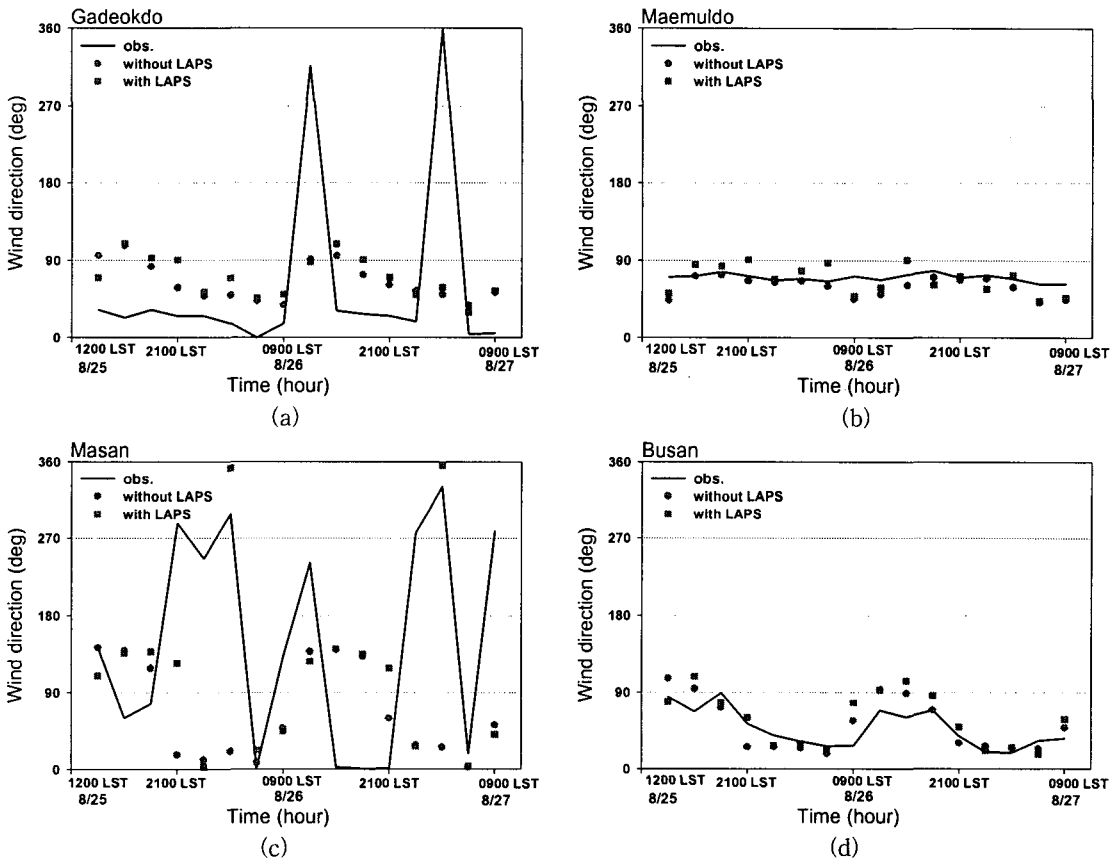


Fig. 8. Time series of observed and simulated wind direction at (a)Gadeokdo, (b)Mamuldo, (c)Masan, and (d)Busan.

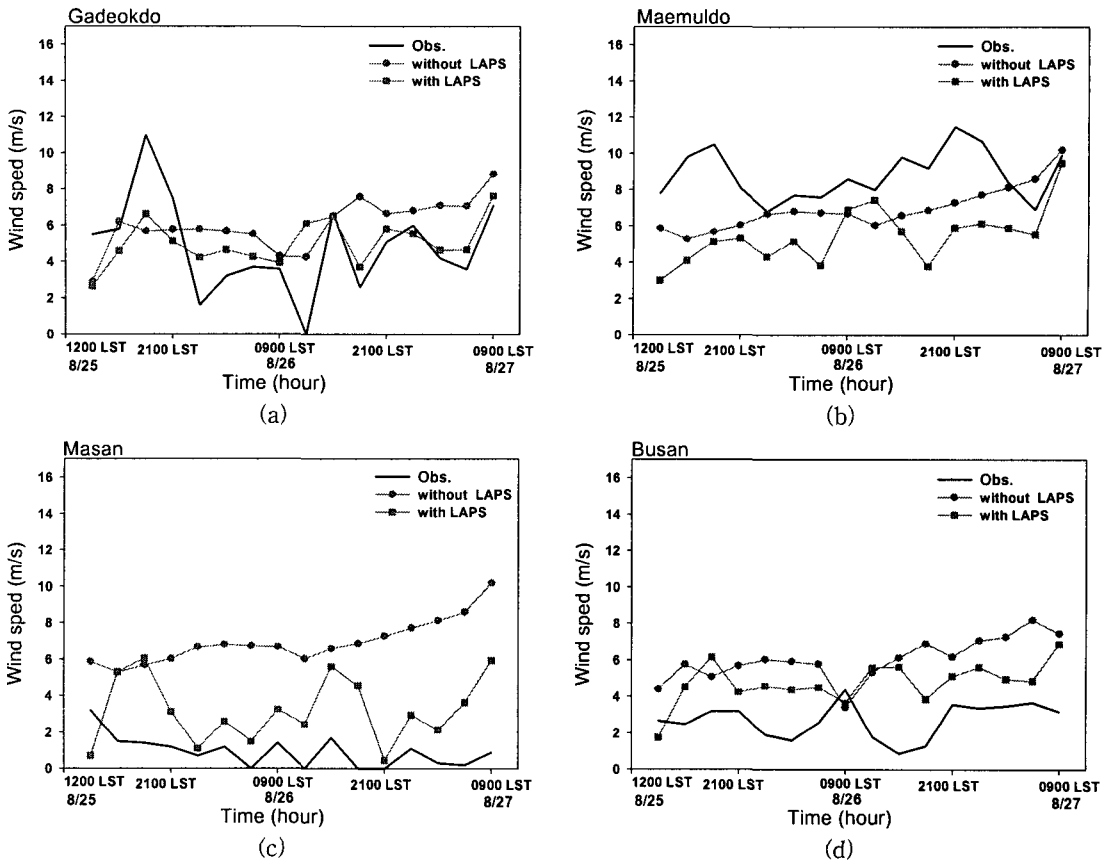


Fig. 9. Time series of observed and simulated wind speed at (a)Gadeokdo, (b)Mamuldo, (c)Masan, and (d)Busan.

계열 변화 패턴과 유사하게 보이고 있으며, 특정 시간대에는 그 수치도 거의 동일한 값을 보이고 있었다. 하지만 매물도의 경우는 LAPS 전·후 모두 관측값의 변화 추세를 정확히 표현하지 못하고 있음으로 인해, LAPS 내에서 자료질 조절이 수행되고는 있지만 각 관측값이 해상풍 예측에 양의 값의 초기치를 구성할 수 있을지, 내지는 도리어 음의 값을 더함으로써 그 정도를 감하게 될 수 있으므로 이에 따른 검증이 필요하리라 사료되어진다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 복잡한 해안 지역에서의 해상풍 모의의 정확도 향상을 위해 두 개의 세부 주제로 연구가 수행되었다. 기초 연구인 첫 번째 논문에서는 현업 예보용으로 사용 중인 중규모 모델(MM5)을 통한 한반도 주변 해역의 해상풍 예측의 적합성 검토를 해 봄으로써, 현 해상풍 예측이 낮 시간 동안 해풍의 발달과 국지 순환을 잘 모의하는 것으로 나타났지만 실제 관측값과의 비교 연구에서는 지형 효과에 의한 복잡 연안지역의 상세 바람장을 정확

히 모의해 내지 못하고 있음을 밝혔다. 이를 토대로 두 번째인 본 논문에서는 현업 예보용으로 사용 중인 중규모 기상 모델 (Penn State University (PSU) /National Center for Atmospheric Research (NCAR) Mesoscale Model, MM5)을 사용하여 관측자료 동화에 의한 초기치 개선을 수반함으로써 해상풍 예측의 정확도를 높일 수 있는 방안을 구축하고자 하였다. 현재 중규모 기상 모형의 개발과 연구 진행 정도는 상당한 위치에 있으며, 위성 자료를 포함한 다양한 관측자료를 이용하여, 고해상도 초기치 구성을 하고 이를 위한 객관분석 및 자료동화 시스템 개발과 연구 또한 그 수준급이라 할 수 있다. 하지만 복잡한 해안지역에서의 해상풍 모의의 경우, 실제 관측된 해수면 온도값과 풍향, 풍속값 등의 정보로 초기치를 구성하지 못함으로써 수치예보 결과에서 특히 큰 오차를 가져오고 있었다.

이에 본 연구에서는 관측값을 이용한 수치모의의 초기치 구성이 예측 결과에 얼마나 민감하게 반응하는지를 검증해 보기위해, 한반도 남동해역을 중심으로 FSL에서 개발한 LAPS를 이용하여 GTS,

AWS, Buoy, Wind Profiler, AMEDAS, Quik SCAT, GOES의 관측자료를 LAPS 분석장을 통해 기상 요소들을 지상과 상층으로 다양하게 분석해 볼 수 있었으며, 각 관측 자료들을 동화시킴으로써 우수한 초기치와 경계치를 구성함으로써 그 결과를 동화에 사용하지 않은 지점의 관측값과 비교 검증해 보았다. 4 m s^{-1} 이하의 약한 풍속을 가진 맑은 날이며 강수가 없는 여름날의 대표 사례일(2004년 8월 25일 0900 LST ~ 8월 27일 0900 LST)을 선정하여, 현업에서 사용되고 있는 MM5모형을 통해 수치실험을 해보았다.

LAPS를 이용한 고해상도 초기치에 의한 수치결과, 육지에선 AWS 등의 자료 동화에 의해 산풍과 곡풍의 국지 순환이 잘 묘사되었으며 오전 시간대에 다소 강하게 모의된 풍환경을 보정해 주는 효과를 보여주었고 해상의 경우도 Buoy, QuikSCAT과 AMEDAS 자료 등의 동화에 따른 영향으로 부분적으로 보정된 풍향과 풍속을 보임을 살펴볼 수 있었다.

LAPS로 인해, 다수의 관측자료를 이용하여 고해상도 초기치를 구성할 수 있을 뿐만 아니라, 이를 통한 수치모의 결과 또한, 육지와 연안 그리고 해상 모두 그 우수성을 감지해 볼 수 있었다. 하지만 단순히 모든 관측자료들의 동화를 통해서만 그 결과 개선에 한계를 보이고 있으며, 특히 해상풍의 경우도 많은 개선이 따르지 않음을 통해, 관측치들의 민감도 분석을 수행하여 해상풍을 중심으로 그 예측률을 높일 수 있는 방안 연구가 동반되어야 한다고 본다. 그리고 차후, MM5 모형이 가지는 물리적 스킴의 한계점을 극복하기 위하여, 차세대 모형인 WRF 모형의 사용뿐만 아니라, LAPS를 통한 고해상도 초기치를 구성함과 동시에 WRF에서 가장 해상풍 예측에 우수성을 보이는 물리적 스킴을 사용함으로써 최상의 해상풍 예측 시스템을 구축해 보려고 한다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기상지진연구개발사업 “해양기상변화 탐지기술평가” 과제의 일환으로 수행된 것입니다.

참고 문헌

- 1) 황동익, 2001, 복잡한 지역에서의 초기장 도출에 관한 연구, 연세대학교 석사학위 논문, 45pp.
- 2) McGinley, J., S. Albers and A. Starnus, 1992, Local data assimilation and analysis for nowcasting, *Adv. Space. Res.*, 7, 179-188.
- 3) 김용상, 오재호, 2000, 위성회도온도 자료를 이용한 지상온도 분석장의 개선, *The Journal of KOREA Analysis Society*, 2(4), 455-463.
- 4) 김용상, 오재호, 차주완, 서애숙, 1999, 국지규모 기상 분석 시스템(LAPS)의 한반도 적용 및 시험, *기상연구논문집*, 52-62.
- 5) Andersson, E., J. Pailleux, J. N. Thepaut, J. R. Eyre, A. P. McNally, G. A. Kelly and P. Courtier, 1994, Use of cloud-clear radiances in three/four-dimension variational data assimilation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 120, 627-653.
- 6) Mo, K. C., X. L. Wang, R. Kistler, M. Kanamitsu and E. Kalnay, 1995, Impact of satellite data on the CDAS-reanalysis system, *Mon. Wea. Rev.*, 123, 124-139.
- 7) Parrish, D. F. and J. C. Derber, 1992, The national meteorological center's spectral statistical-interpolation analysis system, *Mon. Wea. Rev.*, 120, 1747-1763.
- 8) Zupanski, D., 1997, A general weak constraint applicable to operational 4DVAR data assimilation systems, *Mon. Wea. Rev.*, 125, 2274-2292.
- 9) Leslie, L. M., J. F. Marshall, R. P. Morison, C. Spinoso, R. J. Purser, N. Pescod and R. Seecamp, 1998, Improved hurricane track forecasting from the continuous assimilation of high quality satellite wind data, *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1248-1257.
- 10) Marshall, J. F., L. M. Leslie and C. Spinoso, 1997, The generation and assimilation of cloud-drift winds in numerical weather prediction, *J. Meteor. Soc. Japan*, 75, 383-393.
- 11) 박세영, 이태영, 신현철, 주상원, 2004, 전지구 3차원 변분자료동화에 있어 QuikSCAT 해상풍 자료의 효과, *한국기상학회 봄철 학술발표회*, 244-245.
- 12) McGinley, J., S. Albers and P. Starnus, 1992, Local data assimilation and analysis for nowcasting, *Adv. Space Res.*, 12, 179-188.
- 13) 김용상, 박옥란, 황승연, 2002, 기상연구소의 국지규모 기상 분석 및 예측 시스템(KLAPS)의 실시간 운영, *한국기상학회지*, 38(1), 1-10.
- 14) 과학기술처, 1997, 기상자료 종합분석 시스템 개발(III), 293pp.
- 15) 과학기술부, 2000, 한반도 국지기상 자료동화

- 기법 개발, 89pp.
- 16) McGinley, J. A., 1995, Opportunities for high resolution data analysis, prediction, and product dissemination within the local weather office, Preprints. 14th Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Dallas. TX, Amer. Meteor. Soc., 478-485.
 - 17) Albers, S. C., J. A. McGinley, D. L. Birkenheour and J. R. Smart, 1996, The Local Analysis and Prediction System: Analysis of clouds, precipitation, and temperature, *Wea. Forecasting*, 11, 273-287.
 - 18) Albers, S. C., 1995, The LAPS wind analysis *Wea. Forecasting*, 10, 342-352.
 - 19) McGinley, J., S. Albers and P. Stamus, 1991, Validation of a composite convective index as defined by a real time local analysis system, *Wea. Forecasting*, 6, 337-356.
 - 20) Barnes, S. L., 1964, A technique for maximizing details in numerical weather map analysis, *J. Appli. Meteor.*, 3, 369-409.
 - 21) Lewis, J. M., 1971, Variational subsynoptic analysis with applications to severe local storms, *Mon. Wea. Rev.*, 99, 786-795.
 - 22) Richard, E., P. Mascart and E. Nickerson, 1989, The role of surface friction in down-slope windstorms, *J. Appli. Meteor.*, 28, 241-251.
 - 23) Groves, J. R., 1989, A practical soil moisture profile model, *Water Resources Bulletin*, 25, 875-880.
 - 24) 김용상, 장태규, 박옥란, 2001, 3차원 구름 분석 알고리즘의 개발 및 응용, *한국자료분석학회지*, 3(1), 97-106.
 - 25) 김용상, 최준태, 이용희, 오재호, 2001, 제주 지역에 적합한 중규모 단시간 예측 시스템의 개발, *한국지구과학회지*, 22(3), 186-194.
 - 26) Dudhia, J., 1993, A nonhydrostatic version of the penn state/NCAR mesoscale model : validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1493-1513.
 - 27) Stauffer, D. R. and N. L. Seaman, 1994, Multiscale four-dimensional data assimilation, *J. Appl. Meteor.*, 33, 416-434.
 - 28) 윤일희, 2000, *미기상학개론*, 시그마프레스, 71pp.
 - 29) 이화운, 김유근, 정우식, 2000, 복잡한 연안지역에서 해풍시작시 지형의 영향에 대한 수치모의, *한국기상학회지*, 36, 561-572.