

한반도 복잡 해안지역의 바람장 모의 개선

김 유 근·배 주 현·정 주 희·권 지 혜·서 장 원·김 용 상*
부산대학교 대기과학과, *기상연구소 해양기상지진연구실, **기상청 정보화담당관실
(2006년 1월 6일 접수; 2006년 5월 10일 채택)

Improvement in the Simulation of Wind Fields Over the Complex Coastal Area, Korea

Yoo-Keun Kim, Joo-Hyun Bae, Ju-Hee Jeong, Ji-Hye Kweon,
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 6 January, 2006; accepted 10 May, 2006)

We focused on improvement in simulation of wind fields for the complex coastal area. Local Analysis and Prediction System(LAPS) was used as a data assimilation method to improve initial conditions. Case studies of different LAPS inputs were performed to compare improvement of wind fields. Five cases have been employed : I) non data assimilation, II) all available data, III) AWS, buoy, QuikSCAT, IV) AWS, buoy, wind profiler, V) AWS, buoy, AMEDAS.

Data assimilation can supplement insufficiency of the mesoscale model which does not represent detailed terrain effect and small scale atmospheric flow fields. Result assimilated all available data showed a good agreement to the observations rather than other cases and estimated well the local meteorological characteristics including sea breeze and up-slope winds. Result using wind profiler data was the next best thing. This implies that data assimilation with many high-resolution sounding data could contribute to the improvements of good initial condition in the complex coastal area.

As a result, these indicated that effective data assimilation process and application of the selective LAPS inputs played an important role in simulating wind fields accurately in a complex area.

Key Words : Complex coastal area, Improvement, Wind fields, LAPS, Data assimilation

1. 서 론

해안지역에서의 기상학적 조건은 과거부터 많은 관심의 대상이었으며, 특히 해상의 바람장은 대기오염물질의 확산과 해운뿐만 아니라 풍력 포텐셜 활용 등과 같은 다양한 목적을 위하여도 중요하다^{1,2)}. 그러나 관측치의 부족으로 인한 검증의 어려움이 수반되는 해상의 경우는 바람장 연구가 미미한 상태이다. 비록 해상의 기상상태를 감시할 수 있는 부이기가 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. 하지만 지금까지 기상위성이나 레이더 자료의 이용은 그 영상자료만을 분석하는 초기 단계에 있었으며 최근 들어서는 그 원시자료를 수치예보에 이용하는 연구가 진행되고 있다³⁾. 그러나 중위도에서 위성 자료의 수치예보 결과에 대한 영향은 없거나 오히려 예보 결과를 나쁘게 만들었다⁴⁾. Mo *et al.*⁵⁾도 2개월 동안의 여름철 위성 분석자료를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우를 비교한 결과 북반구 중위도에서 위성자료의 영향은 없는 것으로 잠정적으로 결론을 내렸다. 더

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

육이 고해상도의 중규모 모델에서는 관측 오차가 상대적으로 큰 위성 자료를 삽입하여 모델 결과에 오차를 더 가져올 수도 있다⁶⁾. 그러므로 고해상도의 위성 자료는 수치예보의 정확도를 개선시킬 잠재력은 가지고 있으나, 이를 적절히 동화하는 기술 없이는 상대적으로 종관 관측 자료가 풍부한 북반구에서는 좋은 효과를 보기 어렵다⁷⁾.

박세영 등⁸⁾은 3차원 변분자료동화기법을 이용하여 QuikSCAT의 해상풍 자료가 효과적으로 동화됨과 3차원 자료동화를 통해 변화된 초기장으로 인한 예보장 또한 많은 영향을 받을 수 있음을 제시한 바 있다. 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 왔다⁹⁾. LAPS는 예보자들이 종합적으로 대기상태를 이해하도록 다양한 관측 기기로부터 생산되는 방대한 양의 관측 자료를 분석하는 시스템으로서 지상과 상층 기상자료의 분석을 수행하며 실시간 예보를 위한 다양한 변수들을 생산해 낸다. 이 시스템은 90년대 초 국지 악기상이 빈번히 발생하는 콜로라도 지역의 실시간 예보에 많은 기여를 했다¹⁰⁾. 최근에는 분석자료의 주관적인 이용 이외에도 LAPS로부터 산출된 분석자료를 국지규모 수치모델의 초기자료로 제공하려는 연구가 진행되고 있다. 수치모델의 정확성은 보다 정확한 초기조건에 의해 좌우되며, 신뢰성이 떨어지는 관측치의 사용이나 모델내의 물리적 모수화방식의 부적절한 적용은

실제 대기 상태를 모사하는데 많은 어려움이 있다. 그래서 짧은 계산시간 내에 어려움을 가지는 관측 자료의 조절이 수반된 초기값의 구성이 무엇보다도 중요하리라 판단된다. 이에 활용할 수 있는 모든 관측자료를 동화시킬 수 있는 동화기술은 초기치의 질을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 자료동화시스템인 LAPS를 사용하여 종관자료와 비종관 관측자료인 GTS, AWS, 부이, 윈드프로파일러(wind profiler), 위성(GOES09, QuikSCAT)으로부터 얻어진 자료들을 동화시켜 이를 MM5의 초기장으로 사용함으로써 복잡한 해안 지역에서 바람장의 정확도를 향상시킬 수 있는 최적의 방안을 모색하고자 하였다. 이를 위해 해상풍 예측에 유효성이 떨어지는 자료의 선별을 위하여 LAPS에 입력되는 관측값들을 5개의 CASE로 분류하여 민감도 실험을 수행하였다. 이와 같은 민감도 분석을 통해 해상풍 예측에 기여하지 않는 불확실한 자료를 제거함으로써 예측에 소비되는 시간을 줄일 수 있기 때문에 보다 빠른 시간 내에 정확한 바람을 예측할 수 있는 방안을 찾을 수 있을 것으로 사료된다.

2. LAPS 개요 및 적용방법

LAPS는 해당 지역에서 수집 가능한 모든 기상관측 자료를 사용함으로써 고해상도의 재분석 자료를 생산해 내며, 이때 각종 기상관측자료가 LAPS를 이용하여 초기 추정치에 동화되며, 그 간략한 흐름도는 Fig. 1과 같다. LAPS는 크게 초기 자료 수집 모

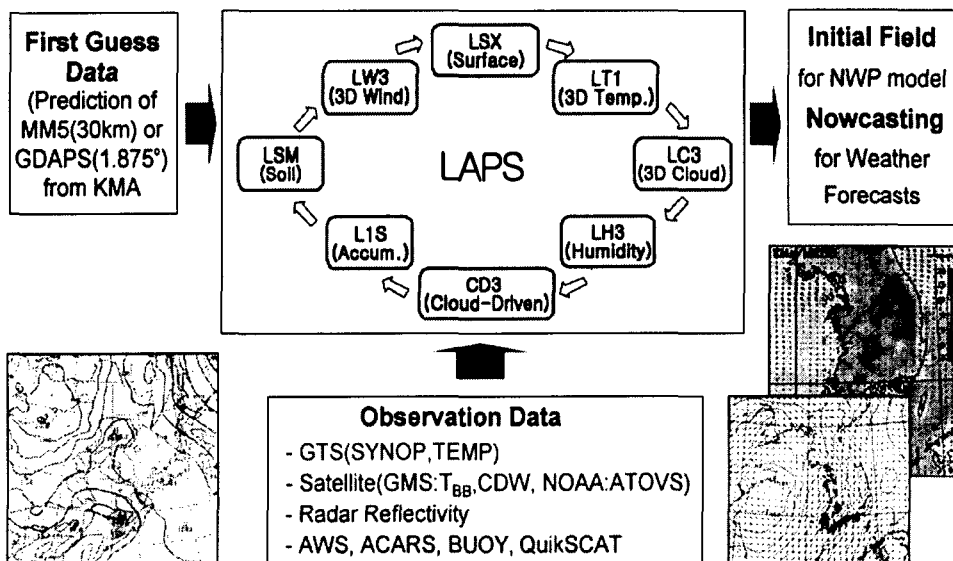


Fig. 1. Schematic diagram of LAPS process.

들과 분석 모듈로 나누어지는데, 분석 과정에는 지상 분석 과정과 3차원 바람, 온도, 습도, 구름, 강수, 토양 분석과정 등으로 구성되며, 관측자료의 특성을 고려한 자료 분석 및 동화 기법을 포함하고 있다. LAPS의 각 단계별 분석 과정은 다음 단계 혹은 이전 단계의 분석 과정과 상호 관련성을 가지며 또한 이전 시간의 분석 자료와의 연속성을 유지하며 수행되도록 설계되었다^{11,12}. 좌표계는 수평 2~20 km의 해상도로 람버트 공형(Lambert conformal) 및 극평사(Polar stereo graphic) 도법이 가능하며, 연직 좌표계는 등압면 좌표계로 25 hPa까지 분석가능하다. 따라서 meso-β에서 meso-γ에 이르는 국지 규모 기상 현상까지 분석해 낼 수 있다¹³.

현재 LAPS의 입력 자료로 이용되고 있는 기상 관측 자료의 종류로는 한반도 영역에서는 지상관측, 고층관측, 기상레이더, 해양 부이, AWS, Aircraft Communications Addressing and Reporting System(ACARS) 등이 있고, 분석 영역 전체에 대하여 지상 및 고층 관측자료, 해양 부이, GMS 위성자료, QuikSCAT, 구름 이동 바람(CDW : Cloud Drift Wind) 등이 있다. 이 가운데 GMS 위성 자료는 분석 영역을 대부분 포함하며 구름이 없는 지역에서 고해상도의 휘도온도 자료를 제공한다. LAPS 분석과정에 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 스플라인(cubic spline)방법이, 외부의 경계에서는 Barnes의 객관 분석법이 적용된다¹⁴. 다음으로 변분법을 이용하여 기압과 바람장을 구속 조건으로 운동방정식을 만족시키도록 한다¹⁵. 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 분석된다¹⁶. 맑은 대기의 경우 위성 휘도 온도의 수평 경도는 큐빅 스플라인의 한 구속 조건으로 이용되어 지상 온도에 일치시킴으로써 지상 온도 분석 과정에 포함된다¹⁷. 또한 토양 수분은 수치예보 모델의 하층 경계 조건의 초기화에 매우 중요한 요소로써, LAPS는 Groves¹⁸의 간단한 1차원 토양 수분 모델을 LAPS 지상 및 강수 분석 과정과 결합하여 이용하고 있다. 그 외 바람장분석, 습윤 분석, 온도장 분석, 구름장 분석 과정에 대한 자세한 설명 및 흐름도는 김용상

등¹⁹을 참고하기 바란다.

3. 자료 및 분석 방법

본 연구의 대상지역은 불규칙하고 복잡한 지형 및 섬들로 인한 지역적 특성이 기상과 해양현상에 있어 중요한 역할을 하고 있다. 봄철 서해안 및 중국으로부터 발생하는 저기압의 영향이 이 지역 기상현상에 지배적 역할을 하고, 여름철 남해안에서 올라오는 태풍은 연안지역에 많은 강수와 바람, 해일로 인한 피해를 발생시킨다. 이처럼 한반도 남동해안은 지리적 위치 및 지형적 특성으로 인해 연안 지역 및 해양 기상장에 큰 영향을 주게 된다. Fig. 2는 본 연구영역으로 실험 결과의 검증에 위한 4개의 관측지점을 표시해두었다. 지형분포와 기상관측소 위치를 나타내었고, 서쪽으로 갈수록 복잡한 해안선을 비롯하여 많은 섬들이 있다. 연안으로는 복잡한 리아스식 해안이 위치하고 있고, 연안도시 내에는 높고 낮은 산악을 형성하고 있으며 경사는 높지 않게 해안으로 완만하게 이어지는 형태를 지니고 있다.

이 지역의 해상풍 특성과 지형에 의한 효과를 살펴보기위해서, 종관장의 영향이 약하고 국지순환이 잘 보이는 풍속이 약한 맑은 날을 선정하였다. 이

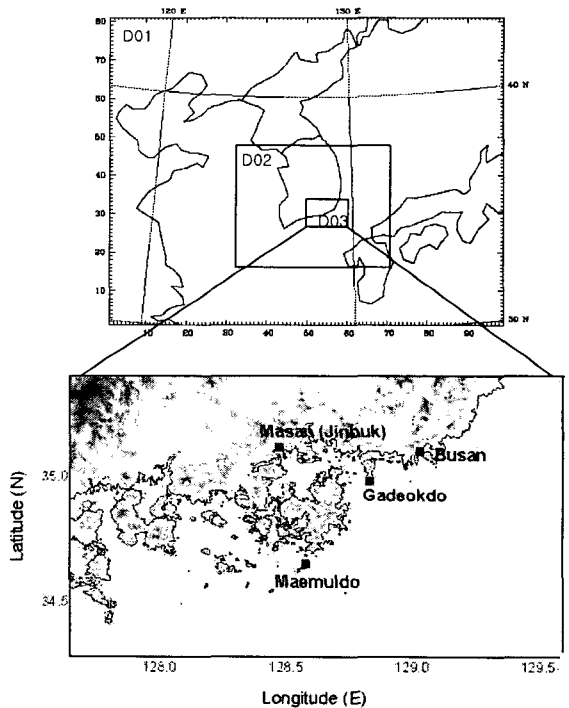


Fig. 2. Nested model domains used in this study. (locations of AWS monitoring meteorological sites)

기간 동안(2004. 8. 25. 0900 LST-2004. 8. 27. 0900 LST)은 부산대학교 대기오염기상연구실에서 바이살라 레디존데를 통한 연직관측이 마산시 진북면 신촌리에서 이루어졌으며, 이것은 연직관측치와의 검증에 위해 유용한 사례이다. 본 사례일은 우리나라 동쪽에 고기압이 위치하고 전선을 동반한 저기압은 이미 북동쪽으로 이동하고 있는 맑은 여름날로써, 여름에 흔히 발생하는 태풍이나, 장마전선의 영향이 없는 날이다(Fig. 3).

MM5는 미국의 기상연구소(National Center for Atmospheric Research)와 펜실베니아 주립대학이 공동 개발한 모델이며, 비정수 상태에 사용가능하고²⁰⁾ 분석 자료와 관측자료의 4차원 자료동화를 지원한다²¹⁾. 본 연구에 사용된 MM5(3.6 version)의 특성은 Table 1과 같다. 수치실험에 사용된 모형의 초기 및 경계자료는 6시간 간격의 기상청 제공 분석자료인 GDAPS(Global Data Analysis and Prediction System) 55 km(약 0.5 °)를 사용하였다. 연구에서

쓰인 기압과 기온, 풍향 및 풍속은 최하층 sigma level값으로 0.999(지상고도 약 10m)로 주었으며, 초기 입력값과의 균형을 맞추기 위해서 24시간 spin-up 시간을 두었다.

본 연구의 해상풍 자료 동화에 사용된 LAPS의 입력요소는 Table 2와 같다. 민감도 분석을 위하여 Table 3과 같이 해상풍 예측에 기여가 클 것으로 사료되는 관측값들을 중심으로 5가지 CASE를 선정하였다. 자료동화 없이 MM5를 수행한 경우가 CASE 0이고 모든 관측 자료(GTS, AWS, 부이, 윈드프로파일, AMEDAS, QuikSCAT, GOES)를 자료동화한 경우가 CASE 1, 부이, AWS와 QuikSCAT만을 동화한 경우가 CASE 2, 부이, AWS, 윈드프로파일러 자료를 이용한 경우가 CASE 3, 부이, AWS, AMEDAS에 의한 경우는 CASE 4로 선정하여, 결과를 비교함으로써 각 관측값 간의 해상풍에 대한 민감도를 비교해 보았다. 여기서 관측값과의 비교를 위해, AWS의 매물도, 가덕도, 부산, 마산의 관측값

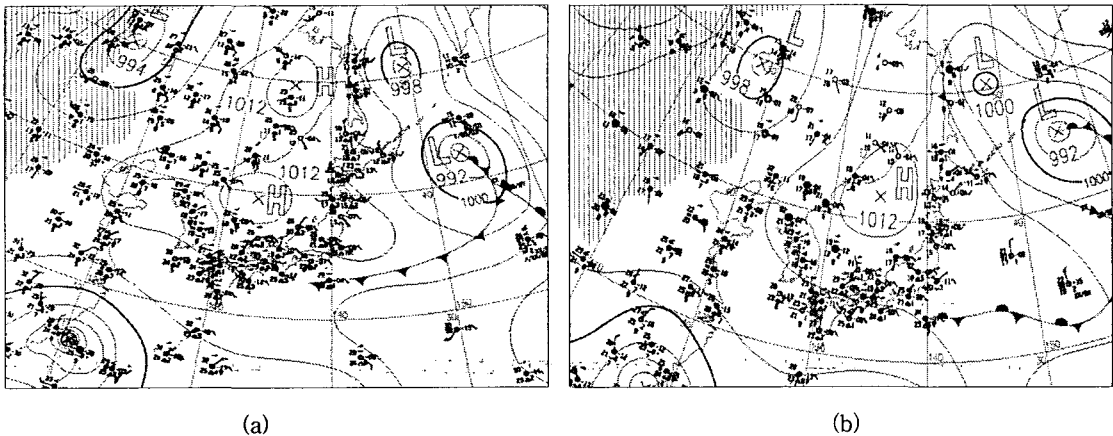


Fig. 3. Synoptic weather map at surface level at (a) 0300 LST on 26 and (b) 1500 LST on 26 August, 2004.

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	

한반도 복잡 해안지역의 바람장 모의 개선

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, Td	Used in every 6 hourly at Osan
Satellite (GOES:TBB, 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(Japan Meteorological Agency) 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

Table 3. The list of observation data set of LAPS for MM5 initial input

CASE	Input Observation data
CASE 0	Non-LAPS MM5
CASE 1	GTS, AWS, Buoy, Wind Profiler, AMEDAS, QuikSCAT, GOES
CASE 2	Buoy, AWS, QuikSCAT
CASE 3	Buoy, AWS, Wind Profiler
CASE 4	Buoy, AWS, AMEDAS

은 빼고 자료 동화를 했으며, 각 결과를 이 관측지점의 값과 비교하였다.

4. 결 과

4.1. 공간 분석

한반도 남동해안에서의 총 5개 CASE 수평 지상 바람장을 비교해 보았다. Fig. 4는 8월 26일 0900 LST의 수평바람장으로써 해풍은 해안선을 따라 아직 발달하지 않았고 내륙에서의 바람은 비교적 약하게 보이고 있다. 풍향과 풍속 모두 그 분포 경향이 비슷하나 기압장과 해상에서의 풍속분포에서는 약간의 차이를 나타내었다. 풍향의 경우 모든 CASE가 비슷한 분포를 나타내고 있으나 다른 CASE들이 북풍을 모의하고 있는데 비해 CASE 1의 경우가 부산 앞바다의 강한 북동풍을 모의하고 있다. 풍속의 경우 금남 지역 일대를 중심으로 관측자료를 동화한 경우들이 자료동화 없이 모의한 CASE 0보다 약하게 나타나고 있으며 특히 모든 자료를 동화한

CASE 1인 경우가 내륙과 도메인 서쪽영역에서의 약한 바람을 잘 보여준다는 것이 특징적이다. 일본 열도 연안 해상풍의 경우는 CASE 1과 CASE 3, CASE 4의 경우가 풍속이 높게 나타나고 있으며, 이는 일본관측 자료인 윈드프로파일러와 AMEDAS 자료의 영향으로 그 수치가 크게 나타나는 것으로 사료된다. 현 해상풍 예측의 경우 MM5가 해상에서의 풍속을 과소평가하는 경향이 있는 것을 감안할 때 CASE 1과 CASE 3, CASE 4가 해상에서의 강한 풍속을 보다 잘 모의하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 같은 날 오후 1500 LST의 수평바람장으로 0900 LST 보다 바람장 모의에 대한 자료동화 효과가 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 해풍이 발달하고 강한 풍속의 바람이 내륙으로 유입하고 있으며 특히 CASE 1인 경우는 복잡한 연안지역에서의 해풍과 곡풍의 바람구조를 보다 상세히 나타내고 있으며, 남동해안의 한려해상국립공원 일대와 송진만과 진해만 내에서는 옆에 둘러싼 지

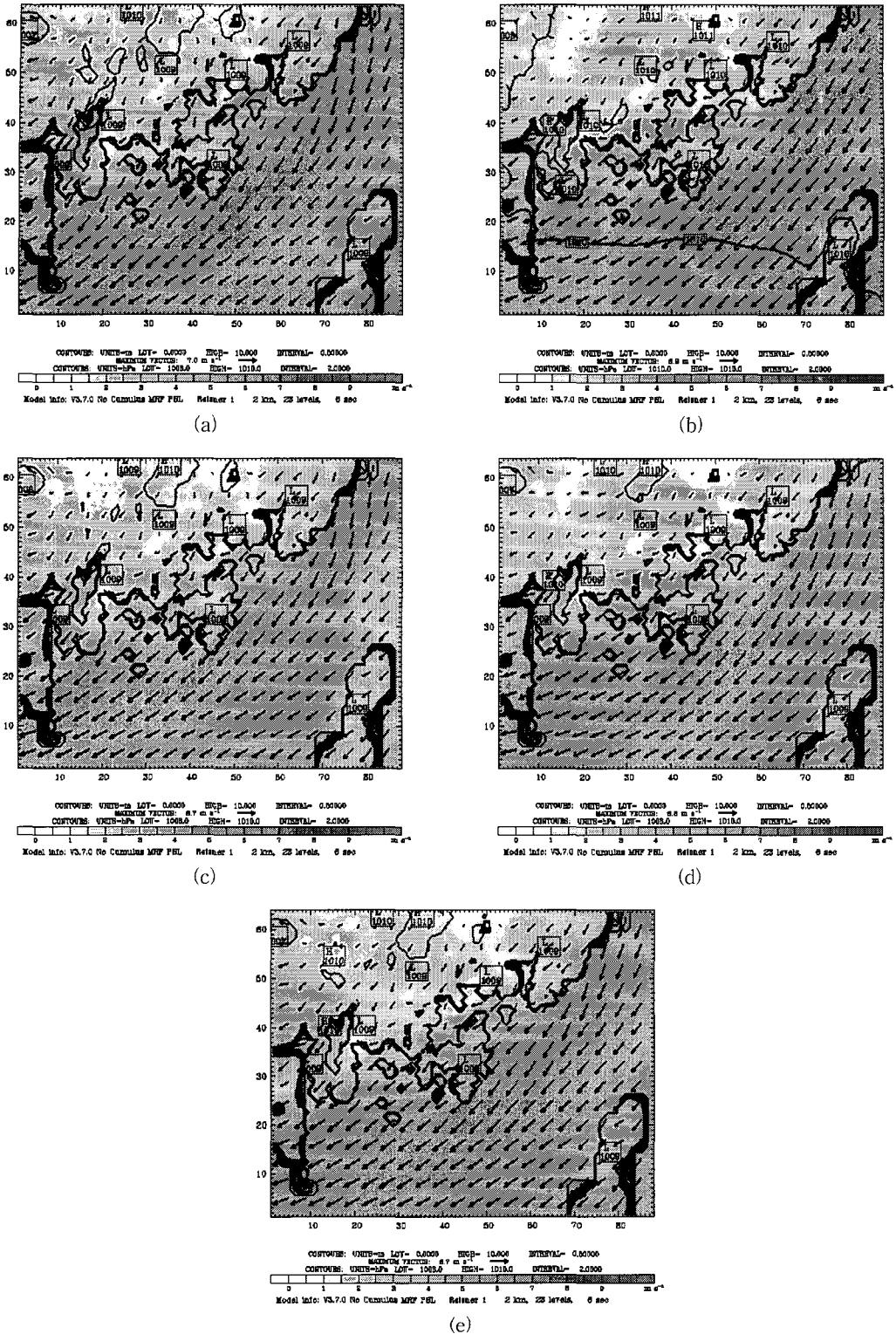


Fig. 4. Simulated wind field of (a)CASE 0, (b)CASE 1, (c)CASE 2, (d)CASE 3, and (e)CASE 4 at 0900 LST on 26 August, respectively. Shaded contours indicates wind speed ranging from 0 to 10 m s^{-1} .

한반도 복잡 해안지역의 바람장 모의 개선

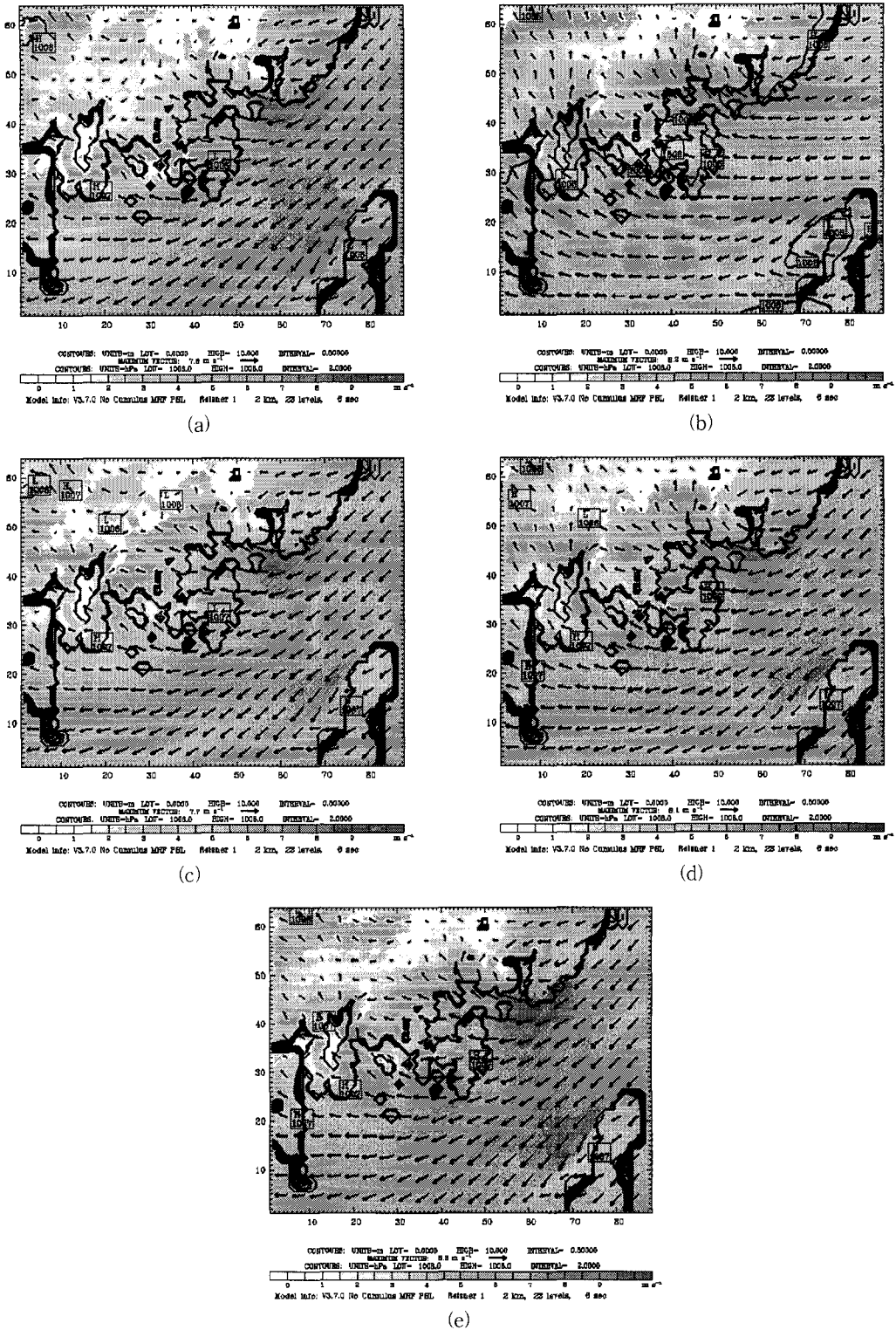
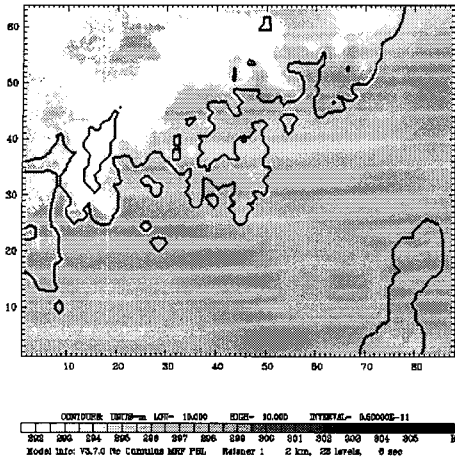
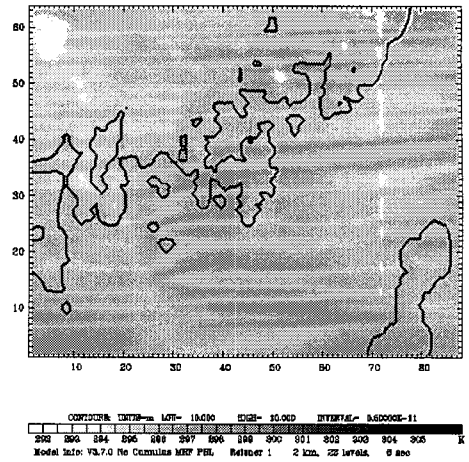


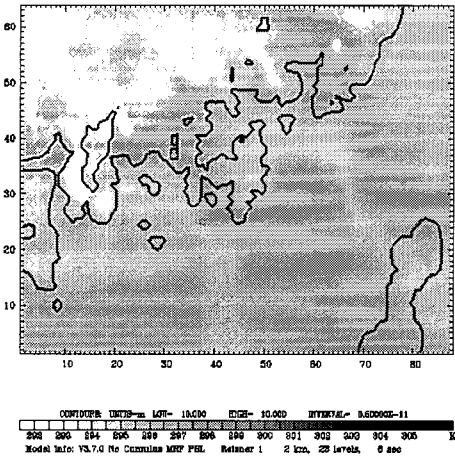
Fig. 5. Simulated wind field of (a)CASE 0, (b)CASE 1, (c)CASE 2, (d)CASE 3, and (e)CASE 4 at 1500 LST on 26 August, respectively. Shaded contours indicates wind speed ranging from 0 to $10 m s^{-1}$.



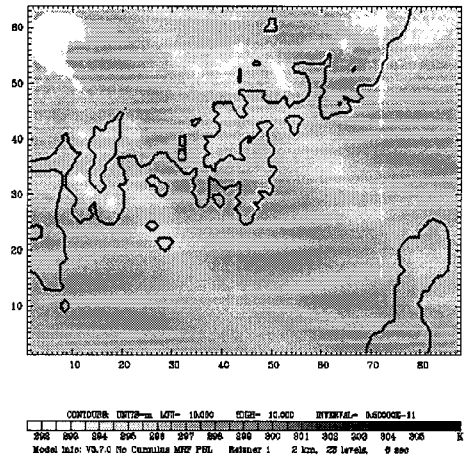
(a)



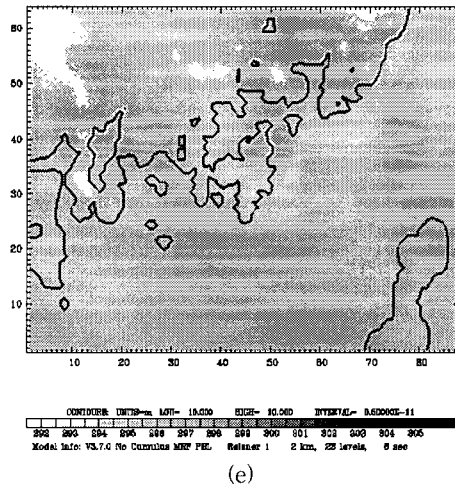
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 6. Simulated horizontal temperature field of (a)CASE 0, (b)CASE 1, (c)CASE 2, (d)CASE 3, and (e)CASE 4 at 0900 LST on 26 August, respectively. Shaded contours indicates horizontal temperature ($^{\circ}$ K) ranging from 292 to 304.

한반도 복잡 해안지역의 바람장 모의 개선

형의 효과에 의해 해풍이 합세되고 이로 인해 강한 풍속을 보이는 현상을 정확히 잘 모의하고 있다. 그러나 근해의 지형이 복잡한 지역에서는 모든 CASE들이 풍속과 풍향에서 조금씩 다른 값을 보여주고 있으며, 이는 각 관측값의 동화에 따른 민감성을 반영하는 부분이다. 해상에서 바람장의 경우, 자료동화를 하지 않은 CASE 0은 대체적으로 북동풍을 나타내고 있지만 모든 자료를 동화한 CASE 1은 전체적으로 동풍을 보이고 있으며, 나머지 CASE 중에서 윈드프로파일러 자료를 동화한 CASE 3이 CASE 1과 해상에서의 비교적 유사한 분포를 보이고 있다.

두 시간대 모두, 모든 관측자료를 동화한 CASE 1의 결과가 다른 CASE에 비해 해상풍과 연안의 지형효과를 반영한 바람형태를 잘 모의한 이유는 위성자료인 GOES의 회도온도를 통해서 해수면온도값

을 입력하여 수치모델의 초기치를 구성하였기 때문으로 사료된다. 따라서 해상풍을 정확히 모의하기 위해서는 보다 많은 해수면온도관측치의 이용이 필수적이나, 매일 매시간의 해수면 온도 자료를 이용하는 것이 어려운 현실을 감안할 때, 상기의 분석을 통해 고층 기상관측자료인 윈드프로파일러 자료의 사용 역시 해상풍의 자료동화 효과를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

기상요소 중 바람이 가장 예측하기 힘든 factor이며, 특히 관측값에 의한 오차가 크게 발생하는 요소이다. 이에 온도장 분포를 비교해 봄으로써(Fig. 6), 자료동화 전과 후, 관측값들에 따른 민감도를 분석하였다. 8월 26일 0900 LST의 수평온도장을 살펴보면 역시 CASE별 분포 경향이 많이 달랐으며, 해안과 내륙지역에서 자료동화하지 않은 CASE 0에서의

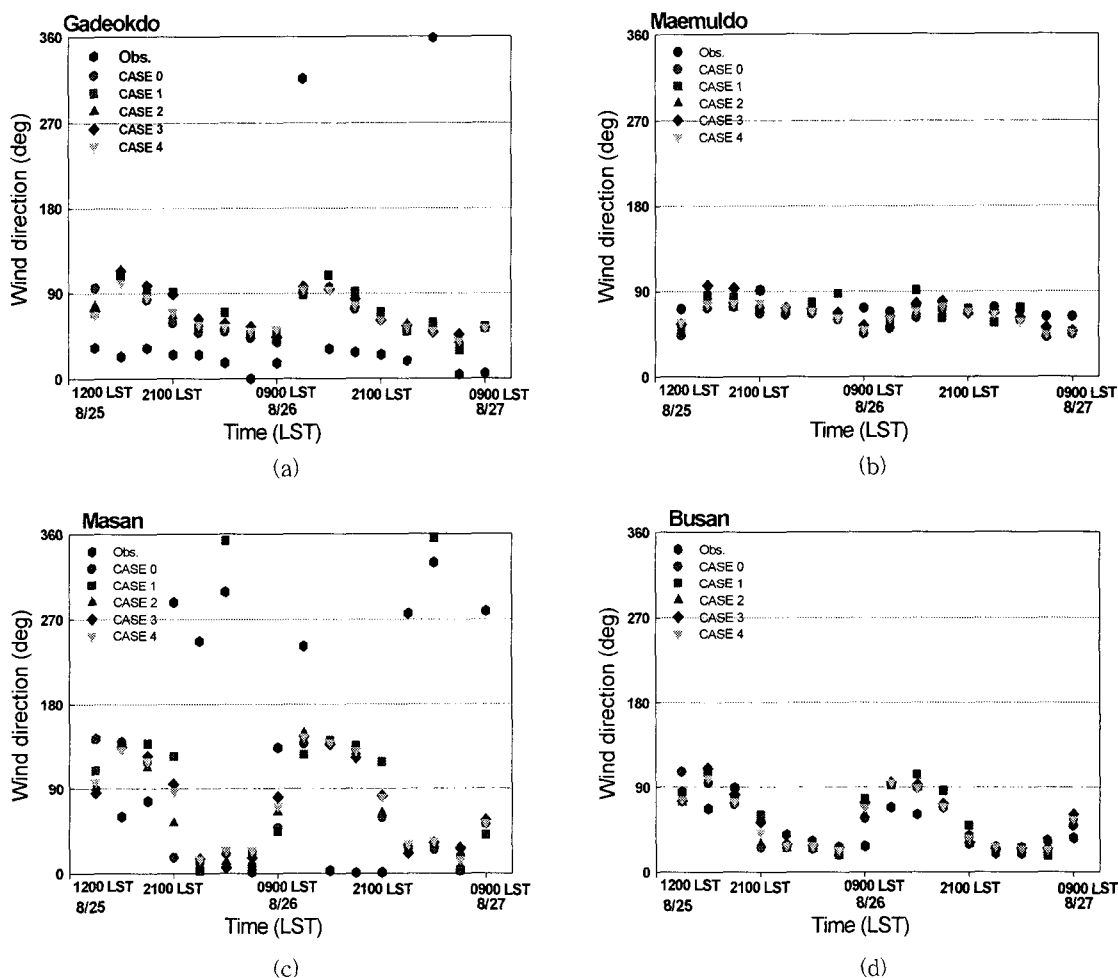


Fig. 7. Time series of observed and simulated wind direction at (a)Gadeokdo, (b)Mamuldo, (c)Masan, and (d)Busan.

온도장은 자료동화를 한 다른 CASE들에 비해 2 °K에서 5 °K 정도로 낮은 온도 분포를 보였다. 이 시간대의 부산지역의 관측값은 297.25 °K의 값을 보여주었고 그 값은 대부분 수치모의 결과와 일치하였지만 자료동화가 되지 않은 CASE 0에선 295.5 °K 정도의 값으로 과소평가 되었다. 전반적으로 CASE 0을 제외한 모든 경우의 수치모의에서 남동해안의 수평온도장을 잘 모의하였고 이는 자료동화의 필요성을 분명히 밝혀주었다. 그리고 모든 자료를 동화한 CASE 1과 CASE 3의 패턴이 유사한 것으로 미루어 보건데 공기의 이동을 모의하는데 윈드프로파일러 자료의 영향 및 효과가 크다고 사료되며, 다음과 같은 과정을 거친 초기치의 개선으로 인해 바람장 및 온도장의 결과가 좋아졌다고 보아진다.

4.2. 관측 자료와의 비교 · 분석
CASE별 풍향과 풍속의 편차를 정확히 구별하기

위해서 관측값과 비교 · 검증하였다. 수치실험의 관측치 자료동화에서 제외된 4개의 지역인 가덕도, 매물도, 마산, 부산의 모델값과 관측값을 시계열 분석해보았다. Fig. 7은 4개 지점의 풍향에 대한 시계열 분석으로 매물도와 부산의 경우는 거의 모든 CASE가 실제 관측풍향을 잘 모의하였다. CASE별 풍향 차이는 크지 않았지만 송진만과 진해만을 둘러싸고 있는 복잡지역인 가덕도와 마산의 경우는 CASE별 오차 범위가 크게 나타났다. 마산의 경우는 모든 관측치를 자료동화한 CASE 1이 8월 26일 0000 LST와 8월 27일 0000 LST에 관측값의 북서풍을 유사하게 모의하며, 몇 시간대의 급격한 풍향 변화를 추정하고 있다.

Fig. 8은 수치실험 기간동안 4개 지점의 풍속에 따른 시계열을 나타낸다. 가덕도는 전체적으로 모의된 풍속이 관측 풍속보다 강한 풍속은 약하게, 약한

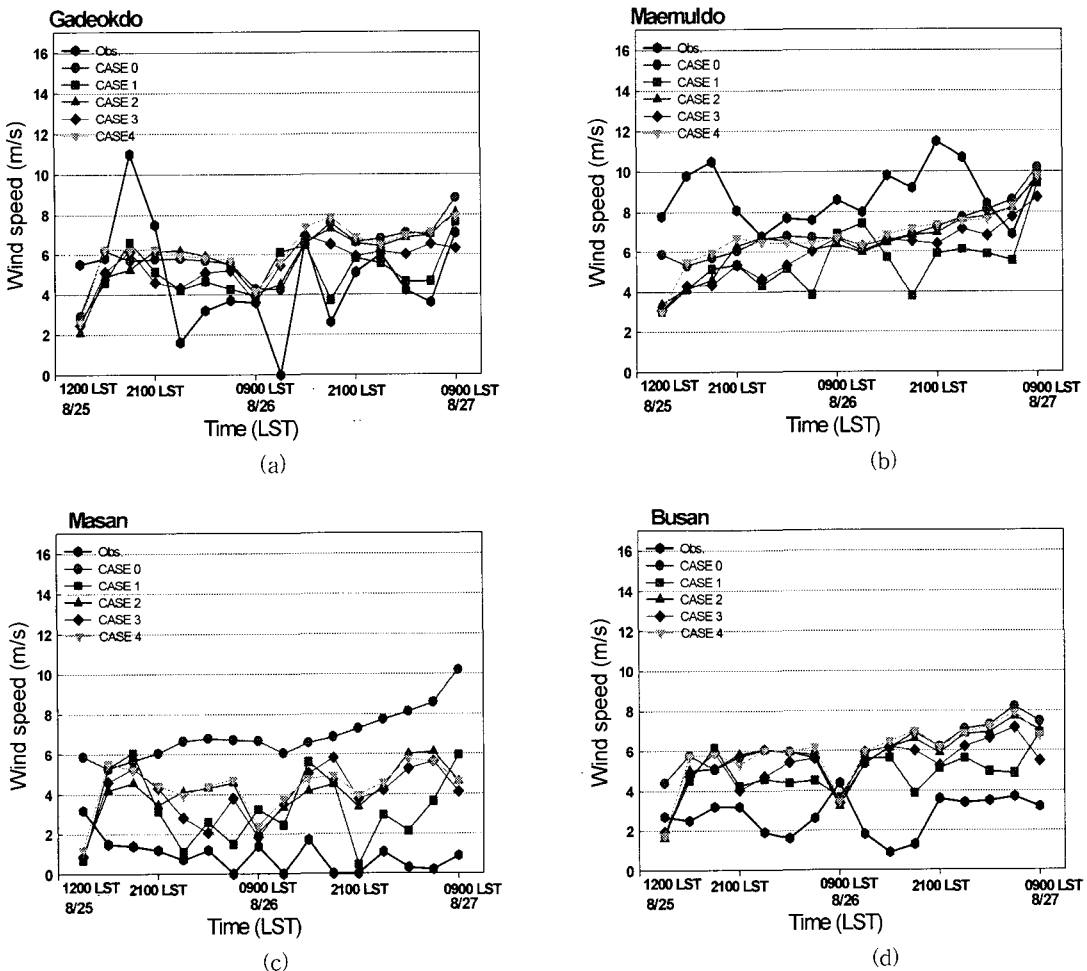


Fig. 8. Time series of observed and simulated wind speed at (a)Gadeokdo, (b)Mamuldo, (c)Masan, and (d)Busan.

풍속은 강하게 나타나는 경향을 보였으나, CASE 1이 관측 풍속의 시계열 분포 패턴을 가장 유사하게 모의하였으며, 관측값 역시 다른 CASE보다 가장 근접하였다. 매물도는 모의된 풍속이 관측 풍속보다 전체적으로 약하게 나타났으나, 마산의 경우는 모의된 풍속이 관측 풍속보다 모든 CASE에서 강하였으며 CASE 1의 경우가 가장 근소한 차이를 나타내면서 일반적으로 풍속이 상승하고 하강하는 추세를 가장 잘 모의하였다. 풍속 값에서는 다소 차이를 보였지만 모든 관측치를 자료동화한 CASE 1이 실제 관측치의 시계열의 급격한 변화값을 잘 따르고 있었다. 또한 매물도의 경우는 지리적으로 복잡한 위치에 있는 섬으로 모델링이 지형에 따른 바람장의 영향을 잘 고려하지 못해 모든 CASE 경우가 다 실제 관측값의 추세를 추정하지 못하고 있었다.

지상바람에 영향을 주는 큰 요소이기도 한 연직 바람 구조를 제대로 예측한다면 그 수치실험 결과

의 우수성을 검증해 보일 것이다. 이에 부산대학교 대기오염기상연구실에서 관측한 진북 연직 관측자료와의 비교·검증이 이루어졌으며, Fig. 9에서 8월 26일의 1200 LST, 1500 LST, 2100 LST의 연직 풍속값을 도식화하였다. 여기서 모든 CASE의 연직 분포가 관측치와는 다소 다른 패턴을 보였고, 이는 앞의 수평 분석에서보다도 모의 결과의 정확도가 현저히 떨어지는 결과를 나타내었다. 그러나 그 중에서도 CASE 1이 모의된 값중에서 경계층 아래의 약한 풍속과 경계층 위에서의 강한 풍속을 근접하게 모의하였다고 볼 수 있으나, 관측값과는 상당한 차이를 보이고 있어 고도에 따른 풍속의 연직분포의 정확한 모의를 위해서는 고해상도의 상층 관측자료가 더 필요하다고 판단된다. 8월 26일 2100 LST에서 2000 m 이하의 연직 풍속 분포가 다른 CASE들에 비해 CASE 1이 관측치와 가장 근사한 분포를 보였다. 역시 그 다음으론 윈드프로파일러

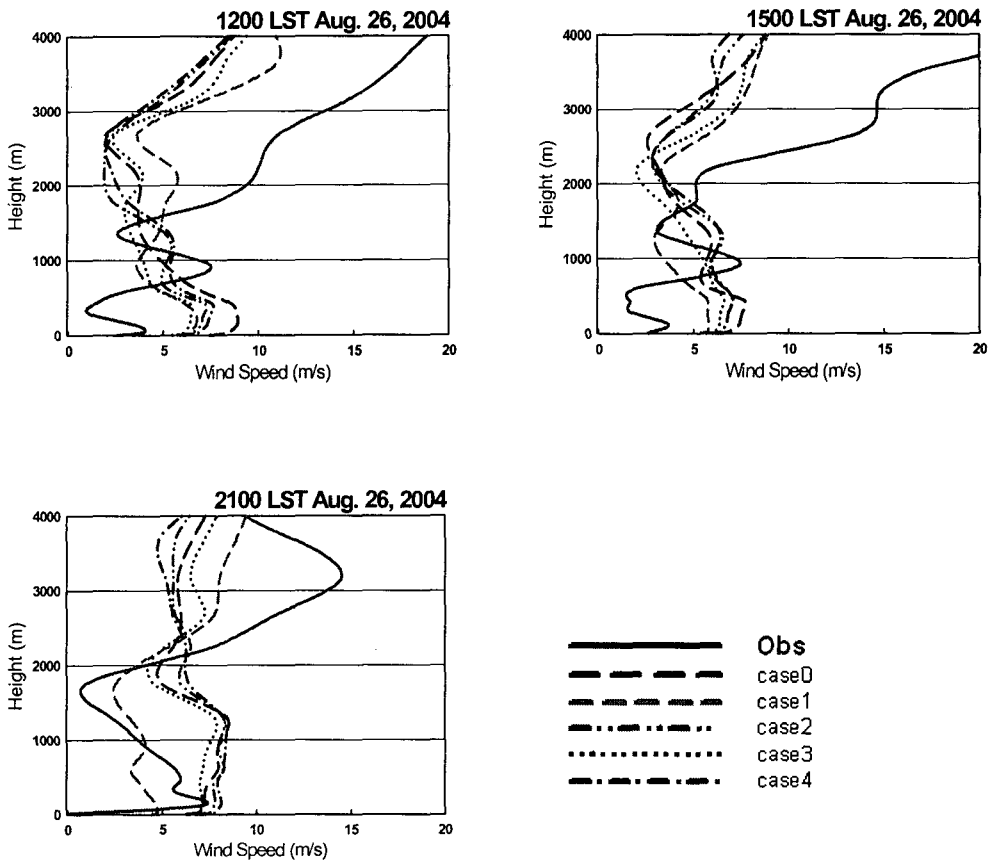


Fig. 9. Comparison between modeled and observed wind speed profile from Radiosonde observation at 0900 LST, 1500 LST, and 2100 LST on 26 August, 2004 in Jinbuk, Masan.

Table 4. Statistics of BIAS and RMSE for observed and simulated wind speed at 4 sites(Gadeokdo, Mamuldo, Masan, Busan)

Data Number	BIAS					RMSE				
	CASE 0	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 0	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
64	-2.169	-0.303	-1.188	-0.88	-1.496	4.11	2.94	3.3	3.17	3.35

자료를 이용한 CASE 3이 1000 m 이상에서 연직 변화 경향이 유사하게 나타났지만, 관측값과 상당한 차이를 보였다. 이는 자료동화에 이용된 대부분의 자료들이 이상자료였으며, 연직관측자료인 윈드프로파일러 자료의 경우 일본 기상청에서 관측된 윈드프로파일 측정치를 사용하였기에 보다 좋은 초기치를 구성하지 못한 것으로 추정된다. 만약 한반도에서 관측된 연직 자료들을 많이 동화해서 초기치를 구성한다면 복잡 해안지역에서의 바람 예측의 정확도가 크게 상승될 수 있으리라 기대된다. 또한 초기치의 개선만으로는 바람의 예측율을 상승시키기란 상당히 어려울 수 있다는 결과로 인해, 다양한 물리식을 보유하고 있는 WRF 등의 다른 모형의 비교검증을 통해 모형의 물리적 방안 연구도 동반되어야 할 것이다.

풍속 모의 결과를 정량적으로 검증하기 위하여 4개 지점에 대해 통계분석을 하였다. 이 관측 값과 모델 결과 사이의 BIAS(mean error), RMSE(Root Mean Square Error)를 검증에 사용하였다. BIAS는 관측자료가 평균값으로부터 벗어난 정도이며, RMSE는 통계학에서 표준편차의 의미, 즉 예상한 값과 실제 관측 결과가 평균적으로 얼마만큼 떨어졌는가를 나타낸다. 검증에 사용되는 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 나타낸다.

본 연구에서 분석한 결과, BIAS와 RMSE의 분석에서 모든 관측값이 동화된 수치모의 결과(CASE 1)가 관측치와 유사한 값을 나타내었으며, 특히 관측 자료를 자료동화하지 않은 CASE 0에 비해 다소 좋은 결과를 보였다. 두 번째로는 윈드프로파일러 자료를 사용한 CASE 3이 좋은 결과를 나타내었다. CASE 1은 GOES의 해수면온도자료에 의해 해안지역의 바람장을 잘 모의한 것으로 추정할 수 있으며, CASE 3에 이용된 윈드프로파일러 자료의 이용 역

시 해안지역의 정확한 바람장 모의에 큰 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다. 이 실험결과를 기초한다면 보다 많은 관측값의 동화가 본 연구 영역에서는 효율적으로 예측을 높이는 데 기여한다고 보이며, 만약 계산시간 절약과 관측자료의 수집에 한계를 동반할 시에는 GTS, AWS, 부이, 윈드프로파일의 자료만으로도 바람 예측을 향상에 기여하리라 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 복잡해안지역에서 바람장 모의의 정확도를 향상시킬 수 있는 방안을 연구하기 위해, 자료동화를 통한 초기치 변화에 따른 예측 결과의 민감도 분석을 하였다. 관측값을 이용한 수치모의의 초기치 구성이 예측 결과에 얼마나 민감하게 반응하는지를 검증하기 위해, 한반도 남동해역을 중심으로 자료동화 시스템인 LAPS를 이용하여 GTS, AWS, 부이, 윈드프로파일, AMEDAS, QuikSCAT, GOES를 동화하여 수치실험(CASE 0~CASE 4)을 수행하고, CASE별 바람장 특성을 분석하고 결과의 정확도를 검증하였다.

이러한 분석 결과, 자료동화 되지 않은 경우는 고해상도 관측자료를 동화한 다른 CASE들의 결과보다 관측값과 상당한 차이를 보였으며 이는 중규모 모델에 충분한 자료동화를 통한 초기치 개선이 동반되지 않는다면 소규모 대기유동장과 지형효과가 충분히 반영된 바람장을 나타낼 수는 없다고 판단된다. 결과적으로 효과적인 자료동화과정은 복잡지역에서의 정확한 바람장 예측을 위해서는 필수적이라 할 수 있다. 자료동화를 한 여러 CASE중에서 활용할 수 있는 관측자료를 모두 동화한 결과가 다른 CASE들보다 다소 관측치와 잘 일치하였으며, 해풍과 곡풍 등의 국지 기상학적 특성을 잘 나타내었다. 특히 복잡한 남동해안의 한려해상국립공원 일대와 송진만과 진해만 내에서는 옆에 둘러싼 지형의 효과에 의해 해풍이 합세되고 이로 인해 강한 풍속을 보이는 지형효과를 반영한 현상을 정확히 잘 모의하고 있다. 이는 모든 관측치 중에서 위성자료인 GOES의 휘도온도값에 의해 해수면온도를 초기치 구성에 넣음으로써 해상풍 모의에 우수성을 보인 결과라고 사료된다. 따라서 해상풍을 정확히 모의하기 위해서는 보다 많은 해수면온도관측치의 이용이

필수적이나 매일 매시간의 해수면 온도 자료를 이용하는 것이 어려운 현실을 감안할 때, 최소한의 자료를 이용하여 해상풍 모의의 정확도를 최대한 높이는 것이 중요하다고 하겠다. 본 연구에서는 연직적으로 고해상도의 자료를 포함하고 있는 일본기상청의 윈드프로파일러 자료를 이용한 초기치를 사용한 수치실험이 복잡한 해안지역에서 가장 좋은 자료동화 효과를 나타내었다. 이는 복잡해안 지역에서 정확한 바람장 예측을 위해서는 우수한 초기치 생성시키는 것이 무엇보다도 필요하며, 이 초기치 구성에 필요한 입력자료로는 한반도에서 관측된 윈드프로파일 등의 고해상도 연직자료가 큰 기여를 할 것으로 예상된다. 이는 윈드프로파일 등의 연직자료가 중규모기상장 모델의 각 수직 층의 초기치로써 실제 대기유동장과 유사하게 그 값을 제공하기 때문이다.

본 연구에서는 현재 상용화되어 많이 사용되고 있는 중규모 모델인 M55 모형을 이용하여 복잡한 해안지역의 바람장을 분석하였지만, 정밀한 차분법과 다양한 물리적 방안을 이용할 수 있는 차세대 모형인 WRF의 모형을 이용하거나 보다 소규모 모형을 사용한다면 복잡 연안지역의 바람장 개선을 이룰 수 있다고 본다. 결론적으로 자료동화시스템을 이용한 고해상도 초기치 구성과 동시에 향상된 모형의 적용이 수반된다면 복잡한 해안지역에서의 바람장 예측을 높일 수 있다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) Estoque, M. A., 1961, A Theoretical Investigation of the Sea Breeze, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 19, 244-250.
- 2) Steyn, D. G., 1997, Interactions between the Thermal Internal Boundary Layer and Sea Breezes, in *Proceedings of the EURASAP Workshop on the Determination of the Mixing Height: Current Progress and Problems*, Risø, Denmark, 137-140.
- 3) 김용상, 오재호, 차주완, 서애숙, 1999, 국지규모 기상 분석 시스템(LAPS)의 한반도 적용 및 시험, *기상연구논문집*, 52-62.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Zupanski, D., 1997, A general weak constraint applicable to operational 4DVAR data assimilation systems, *Mon. Wea. Rev.*, 125, 2274-2292.
- 7) 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.
- 8) 박세영, 이태영, 신현철, 주상원, 2004, 전지구 3차원 변분자료동화에 있어 QuicSCAT 해상풍 자료의 효과, *한국기상학회 봄철 학술발표회*, 244-245.
- 9) 과학기술부, 2000, 한반도 국지기상 자료동화 기법 개발, 89pp.
- 10) 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.
- 11) Albers, S. C., 1995, The LAPS wind analysis, *Wea. Forecasting*, 10, 342-352.
- 12) 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.
- 13) 김용상, 최준태, 이용희, 오재호, 2001, 제주 지역에 적합한 중규모 단시간 예측 시스템의 개발, *한국지구과학회지*, 22(3), 186-194.
- 14) Barnes, S. L., 1964, A technique for maximizing details in numerical weather map analysis, *J. Appl. Meteor.*, 3, 369-409.
- 15) Lewis, J. M., 1971, Variational subsynoptic analysis with applications to severe local storms, *Mon. Wea. Rev.*, 99, 786-795.
- 16) Richard, E., P. Mascart and E. Nickerson, 1989, The role of surface friction in downslope wind-

- storms, *J. Appl. Meteo.*, 28, 241-251.
- 17) 김용상, 오재호, 2000, 위성회도온도 자료를 이용한 지상온도 분석장의 개선, *The Journal of KOREA Analysis Society*, 2(4), 455-463.
- 18) Groves, J. R., 1989, A practical soil moisture profile model, *Water Resources Bulletin*, 25, 875-880.
- 19) 김용상, 장태규, 박옥란, 2001, 3차원 구름 분석 알고리즘의 개발 및 응용, *한국자료분석학회지*, 3(1), 97-106.
- 20) 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.
- 21) Stauffer, D. R. and N. L. Seaman, 1994, Multiscale four-dimensional data assimilation, *J. Appl. Meteor.*, 33, 416-434.