

고층기상관측자료를 이용한 바람장 개선 효과 연구

정 주 희 · 권 지 혜* · 김 유 근
부산대학교 지구환경시스템학부
*국립기상연구소 지구환경시스템연구팀
(2007년 2월 6일 접수; 2007년 8월 30일 채택)

The Effects of Data Assimilation on Simulated Wind Fields Using Upper-Air Observations

Ju-Hee Jeong, Ji-Hye Kwun* and Yoo-Keun Kim

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

*Global Environment System Research Lab., National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

(Manuscript received 6 February, 2007; accepted 30 August, 2007)

We focused on effects on data assimilation of simulated wind fields by using upper-air observations (wind profiler and sonde data). Local Analysis Prediction System (LAPS), a type of data assimilation system, was used for wind field modeling. Five cases of simulation experiments for sensitivity analysis were performed : which are EXP0) non data assimilation, EXP1) surface data, EXP2) surface data and sonde data, EXP3) surface data and wind profiler data, EXP4) surface data, sonde data and wind profiler data. These were compared with observation data.

The result showed that the effects of data assimilation with wind profiler data were found to be greater than sonde data. The delicate wind fields in complex coastal area were simulated well in EXP3. EXP3 and EXP4 using wind profiler data with vertically high resolution represented well sophisticated differences of wind speed compared with EXP1 and EXP2, this is because the effects of wind profiler data assimilation were sensitively adjusted to first guess field than those of sonde observations.

Key Words : Wind fields, LAPS, Data assimilation, Upper-air observations, Wind profiler, Sonde

1. 서 론

최근 전산기술이 발달함에 따라 수치모델의 예측 능력이 많이 향상되었으나, 아직까지는 수치모의 정확도에 있어 많은 문제가 존재하고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 고해상도 관측자료의 확보와 물리과정의 정확한 재현이 필요한데¹⁾, 그 중 공간적으로 불규칙하게 분포하고 있는 다양한 관측자료로부터 규칙적인 격자 자료를 생산하는 방법인 객관분석을 통한 초기장의 개선은 수치모델링의 정확도를 향상시키는데 있어 매우 중요한 역할을 한다²⁾. 이에 앞서, 질 좋은 관측자료의 확보가 무엇보다 중요한데 아직은 관측자료의 수집과 검증

에 많은 어려움이 따르고 있는 실정이다. 이를 위해 관측자료간 규모의 문제, 비종관 관측자료의 이용, 격자점으로서의 내삽, 관측자료 선별 등 여러 측기로부터 생산되는 관측자료를 단시간예보에 활용하기 위해 관측자료들을 종합, 분석하여 예보자들이 판단하기 용이하게 현재의 기상상태를 가시화 할 수 있고, 동시에 자료를 수치예보 초기자료로 이용할 수 있게 하는 정확하고 효과적인 전처리 과정인 기상자료 분석 및 동화 시스템의 개발이 필요하게 되었다³⁾. LAPS(Local Analysis and Prediction System)는 예보자들이 종합적으로 대기상태를 이해하도록 다양한 관측기로부터 생산되는 방대한 양의 관측자료를 분석하는 국지기상분석 및 예측시스템으로서 미국 NOAA/FSL에서 개발하였으며 중규모 모델의 초기 입력자료 개선에 효과적인 체계로 알려져 있다⁴⁻⁶⁾. 이 시스템은 90년대 초 국지 악기상이 빈번히 발생하는 콜로라도 지역의 실시간 예보에

Corresponding Author : Yoo-Keun Kim, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-510-2282
E-mail: kimyk@pusan.ac.kr

많은 기여를 했고⁷⁾, 최근에는 분석자료의 주관적인 이용 이외에도 LAPS로부터 산출된 분석자료를 국지규모 수치모델의 초기자료로 제공하려는 연구가 진행되고 있다.

앞서 설명과 같이, 실시간 관측자료를 이용한 수치 모델링의 초기자료 개선은 매우 중요한 부분을 차지한다. 특히, 정확한 대기상태를 이해하고 표현하기 위해서는 지상뿐 아니라 상층의 기상상태까지 파악해야하고, 이를 위해서는 공간분해능과 시간분해능의 두 가지 측면을 모두 만족하는 질 좋은 고층 기상관측자료가 초기자료 개선에 이용되어야 한다. 현재 선진국에서는 고층기상을 관측하기 위한 원격탐사 장비로서 높은 시간분해능과 정확도를 가진 윈드프로파일러 자료의 활용도가 크게 증가하고 있다. 일본에서는 현재 총 25지점의 윈드프로파일러 관측을 통해 수평 100 ~ 150 km 간격의 상층바람 관측망을 구축하고 있으며, 이는 10 km 격자 간격의 중규모 수치모델에 초기값으로 활용되어 예보의 정확도를 향상시키고 있다. 최근, 우리나라에서도 집중 관측을 통해 얻어진 고층기상관측자료를 이용한 예측 및 분석 연구가 활발히 진행되고 있다. 박옥란 등⁸⁾은 해남 윈드프로파일러와 오토존데 자료를 이용한 관측시스템 분석 연구에서 여름철 특별 관측 기간 동안의 윈드프로파일러에서 관측된 바람 자료가 존데에서 관측되는 다른 기상요소보다 민감하게 영향을 끼침을 시사한 바 있으나 대부분의 연구가 악기상과 관련된 강수 사례 분석에만 치우치는 경향을 띠고 있다.

따라서 본 연구에서는 대표적인 한반도 고층기상 관측자료인 윈드프로파일러와 존데 자료를 이용하여 LAPS 자료동화시스템을 통해 개선된 초기장이 지형효과를 반영한 보다 개선되고 정확한 바람장 형성에 기여하는 영향을 분석하고자 하였으며, 관측 자료별 다양한 실험설계를 통해 고층기상관측자료인 윈드프로파일러 자료와 존데 자료 각각의 자료동화 효과를 비교·분석해보고자 하였다. 이는 최근 들어 활용도가 크게 증가하고 있고 관측지점도 늘어가고 있는 고층기상관측자료의 자료동화 효과를 이해함으로써 향후 상황에 따라 적절하게 고층기상 관측자료를 활용하는데 큰 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 연구방법

2.1. 사례일 및 모델개요

연구 사례일은 한반도 악기상 집중 관측 사업(KEOP) 기간 중의 한 사례일(2004년 6월 22일 ~ 6월 26일)을 선정하였다. Fig. 1은 2004년 6월 24일

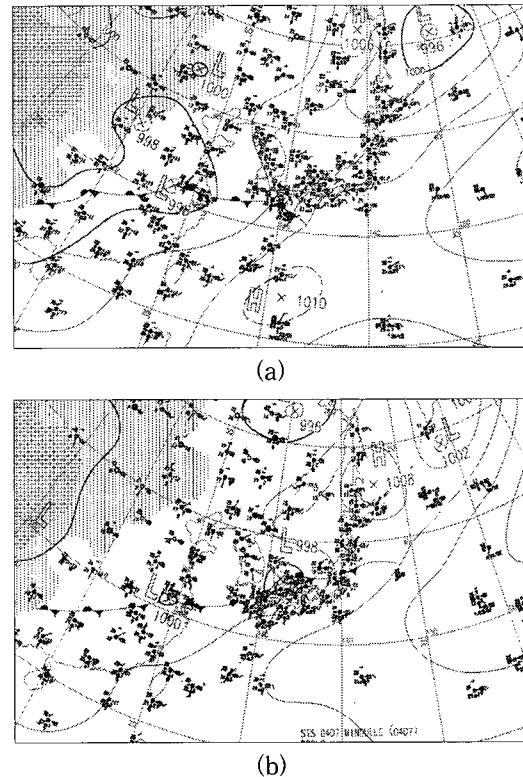


Fig. 1. Synoptic weather maps at surface level at (a) 1200 LST on 24 and 1200 LST on 25 June, 2004.

1200 LST와 25일 1200 LST의 지상일기도이다. 6월 25일 1200 LST 경에 한반도는 최대강수량 18 mm를 보이면서, 적은 양의 강수를 동반한 폐색전선의 영향권 아래에 있었으며 전선의 이동에 따라 풍향이 남서에서 북동으로 변하며 80%가 넘는 상대습도와 많은 운량을 보이고 있다.

본 연구에서는 PSU/NCAR에서 개발한 MM5 중규모 기상 모델과 LAPS 자료동화 시스템이 사용되었다. 연구도메인은 위도 35.7°N과 경도 126.0°E를 중심으로 Fig. 2에 나타난 것과 같이 3개의 등지격자를 가지고 있으며, 모형설계 및 물리적 특성은 Table 1에 제시하였다. 수치실험에 사용된 초기 및 경계 자료는 6시간 간격의 기상청 제공 분석 자료인 GDAPS(Global Data Analysis and Prediction System) 55 km(0.5°)를 사용하고 해수면 온도는 NOAA/SST(National Oceanic and Atmospheric Administration/Sea Surface Temperature) 자료를 사용하였다.

Fig. 3은 LAPS의 흐름을 간략하게 도식화 한 것이다. LAPS는 본격적인 분석에 들어가기 전에 지상 관측자료에 대한 기후, 연속성, 표준편차 등을 검사

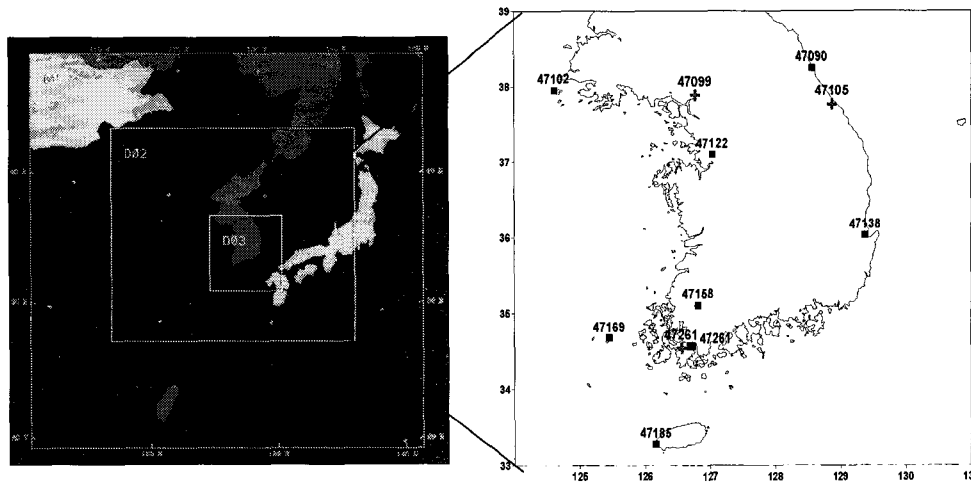


Fig. 2. Nested model domains with 54 km (D01), 18 km (D02), 6 km (D03) and the location of sonde(■) and wind profiler(+) observation stations.

Table 1. Nested model configuration

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
PBL scheme		MRF	
Cumulus scheme		Kain-Fritsch II	
EXPLICIT Moisture scheme		Mix Phase	
Radiation scheme		Cloud-radiation	
Vertical grid		23 layer	
Horizontal resolution	54 km	18 km	6 km
Time Period		120 hour	

과 바람장을 구속조건으로 운동방정식을 만족시키도록 한다⁹⁾. 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 분석 된다¹⁰⁾. 맑은 대기의 경우 위성 휘도 온도의 수평 경도는 큐빅 스피라인의 한 구속 조건으로 이용되어 지상 온도에 일치시킴으로써 지상 온도 분석 과정에 포함된다¹¹⁾. 토양 수분은 수치예보 모델의 하층 경계 조건의 초기화에 매우 중요한 요소이다. LAPS는 Groves¹²⁾의 간단한 1차원 토양 수분 모델을 LAPS 지상 및 강수 분석 과정과 결합하여 사용하고 있다.

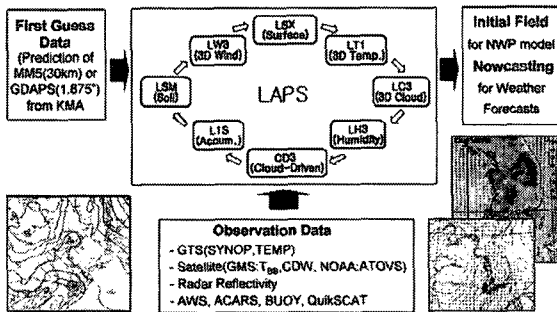


Fig. 3. Schematic diagram of LAPS process.

하는 품질검사 과정이 수행된다. 관측자료는 내삽된 분석 자료와 비교하여 다시 한 번 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 기압

2.2. 자료 및 실험 설계

자료동화에 이용되어진 기본적인 입력 자료는 지상관측자료인 GTS, AWS, AMEDAS, GOES 위성 자료, QuikSCAT 해상풍 위성자료로 자료에 대한 설명은 Table 2에 제시하였다. 고층기상관측자료의 자료동화 영향을 보기 위하여 한반도 악기상 집중 관측 사업(KEOP) 기간 동안 관측된 속초, 백령도, 오산, 포항, 광주, 흑산도, 고산, 해남의 8지점 존데 자료와 남원, 고흥 자료가 사용되었고 문산, 강릉, 해남의 3지점 윈드프로파일러 자료가 사용되었다. 존데와 윈드프로파일러 자료의 상세한 정보는 Table 3과 Table 4에 요약되었고, 관측지점의 위치는 Fig. 2에 제시되었다.

존데와 윈드프로파일러 자료를 이용하여 LAPS 자료동화시스템을 통해 개선된 초기장이 보다 정확한 바람장 형성에 기여하는 영향과 자료동화 효과

Table 2. Input data for surface observation used LAPS

Data	Numbers of Data	Obs. period	Variables	Remark
GTS (SYNOP, SHIP, BUOY)	GTS: 200 Station: 30	6 hourly (3 hourly)	Surface variables (Cloud type and amount)	Used in every 3 hourly
Satellite (GOES)	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
QuikSCAT	At sea	Approximately 4 times a day	Sea Surface Wind	Polar orbit satellite

Table 3. The information for wind profiler sites

Site	Location (lat, long)	Observing frequency
47099 Munsan	37.89°N, 126.77°E	1 hr
47105 Gangneung	37.77°N, 128.87°E	1 hr
47261 Haenam	34.54°N, 126.56°E	1 hr

Table 4. The information for sonde sites

Site	Location (lat, long)	Observing frequency
47090 Sokcho	38.25°N, 128.56°E	12 hr
47102 Baengnyeongdo	37.96°N, 124.61°E	12 hr
47122 Osan	37.10°N, 127.03°E	6 hr
47138 Pohang	36.03°N, 129.38°E	12 hr
47158 Gwangju	35.11°N, 126.81°E	6 hr
47169 Heuksando	34.68°N, 125.45°E	6 hr
47185 Gosan	33.28°N, 126.16°E	6 hr
47261 Haenam	34.55°N, 126.57°E	3 hr

Table 5. A summary of numerical experiments

CASE	LAPS input (GTS, AWS, AMEDAS, QSCAT, GOES etc.)	Sonde	Wind profiler
EXP 0	×	×	×
EXP 1	○	×	×
EXP 2	○	○	×
EXP 3	○	×	○
EXP 4	○	○	○

를 분석하기 위하여 Table 5와 같은 다양한 실험설계에 의해 실험을 수행하였다. 먼저 관측 자료의 동화 없이 구성된 초기장을 이용한 실험이 EXP0이고 지상관측자료인 GTS, AWS, AMEDAS, GOES 위성자료, QuikSCAT 해상풍 위성자료 등을 이용하여

초기장을 형성하여 실험한 경우가 EXP1이며, 존재 자료에 의한 자료동화 효과를 살펴보기 위하여 EXP1의 실험에 존재 자료를 추가한 경우가 EXP2이다. 마찬가지로 윈드프로파일러 자료의 자료동화 효과를 살펴보기 위해, EXP1에 윈드프로파일러 자료를 추가하여 초기장을 형성한 경우가 EXP3이며, 마지막으로 존재와 윈드프로파일러를 포함하여 모든 지상과 상층관측자료들을 이용하여 초기장을 형성한 경우가 EXP4로 명명하여 실험을 수행하였다.

3. 수평바람장 개선 효과 분석

선정된 악기상 집중 관측 사례일 동안을 수치 실험한 결과를 중심으로 지상 수평바람장의 관측자료별 자료동화 효과를 살펴보았다. Fig. 4는 2004년 6월 24일 1500 LST의 수평바람장 분포이다. EXP0는 전체적으로 약한 바람분포를 보이나, 서해상과 울산만 부근의 다소 강한 남서풍과 남동풍이 특징적이며 낮 시간 동안 연안지역의 해풍 유입을 잘 모의하고 있다. EXP1은 EXP0에 비해 지상과 남해상에서의 풍속이 다소 강화된 것을 확인할 수 있다. EXP2는 EXP1과 유사한 수평분포를 보이는데, 이것은 존재 자료의 경우는 대기경계층 이하에서 관측되는 자료가 적으므로 단지 8개 지점의 값이 더 수용된 경우라고 할지라도 본 수치실험에 크게 기여하지 못한 것으로 사료된다. 존재 자료는 지표에서 대기경계층까지 약 600 ~ 650 m 간격으로 자료가 존재하고, 상층으로 갈수록 1500 ~ 2000 m 간격으로 보통 8 ~ 20개의 자료가 존재하였다. 특히 지표 바람장에 큰 영향을 미치는 대기경계층 내 자료의 수는 2 ~ 3개 정도의 값만 존재하였다. EXP3는 전체적으로 강화된 지상에서의 풍속을 보이고 있으며 동해 영일만 부근의 풍속을 아주 강하게 모의하고 있다. EXP3가 EXP2보다 자료동화 효과가 더 크게 나타났는데, 이는 EXP3에 이용된 윈드프로파일러

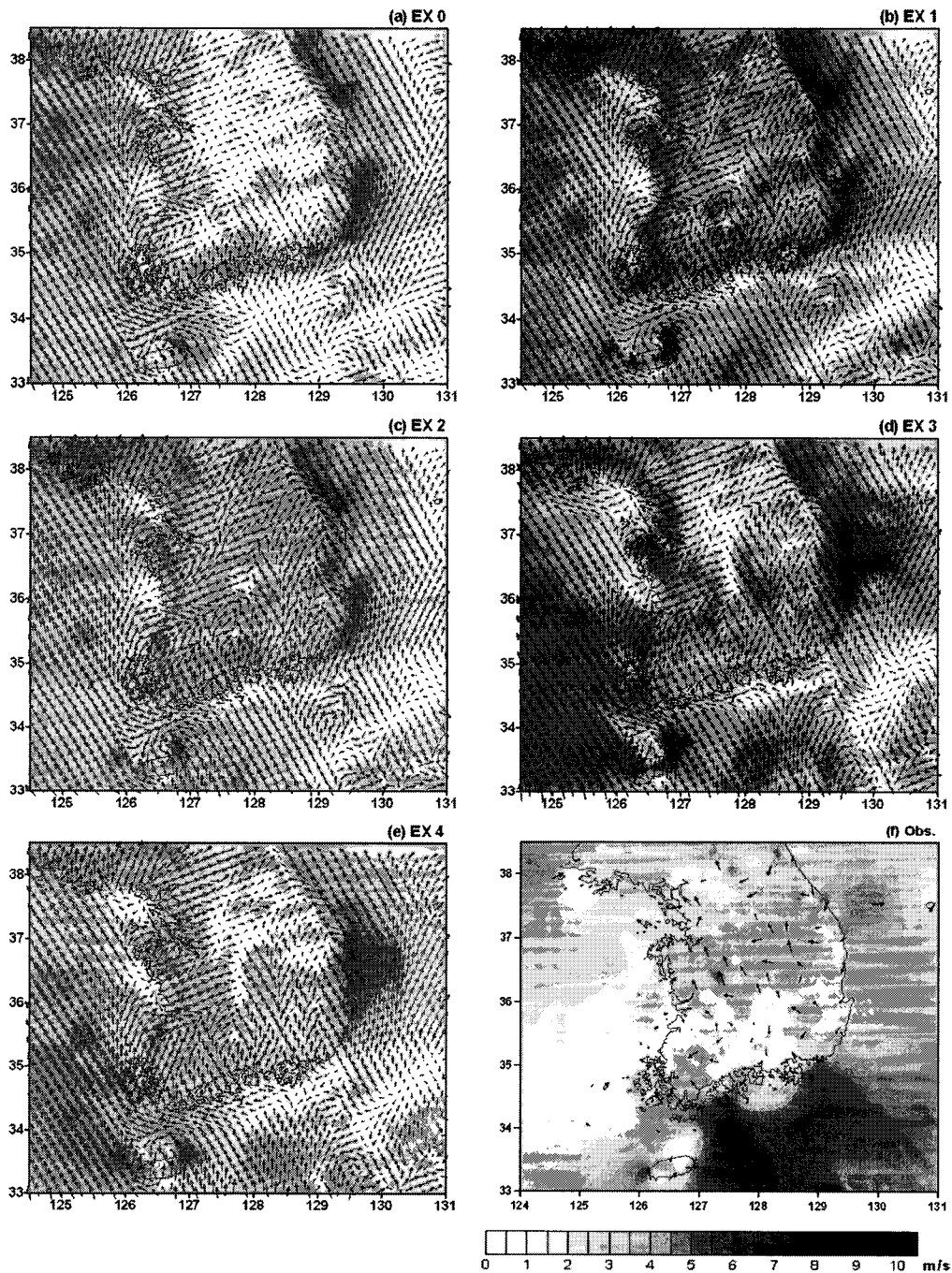


Fig. 4. Simulated wind field of (a)EXP0, (b)EXP1, (c)EXP2, (d)EXP3 and (e)EXP4 at 1500 LST on 24 June, 2004. Shaded contours indicates wind speed ranging from 0 to 10 m s^{-1} .

자료가 EXP2에 이용된 존재 자료보다 연속적으로 조밀하게 관측되는 자료 특성 때문으로 사료된다. 윈드프로파일러 자료는 상층에서는 시간대마다 존재하는 연속층에 다소 차이를 보였지만, 지표에서 약 3000 m 까지는 모든 시간대의 자료가 약 100 m

간격으로 조밀하게 존재하였다. 자료동화에 이용된 윈드프로파일러 자료 수는 50개 내외였으며, 대기경계층 내 존재하는 자료의 수도 10 ~ 15개로 존재 자료보다 연속적으로 조밀하게 들어갔다. EXP4는 EXP3와 전체적으로 유사한 분포이나 남동해상에서

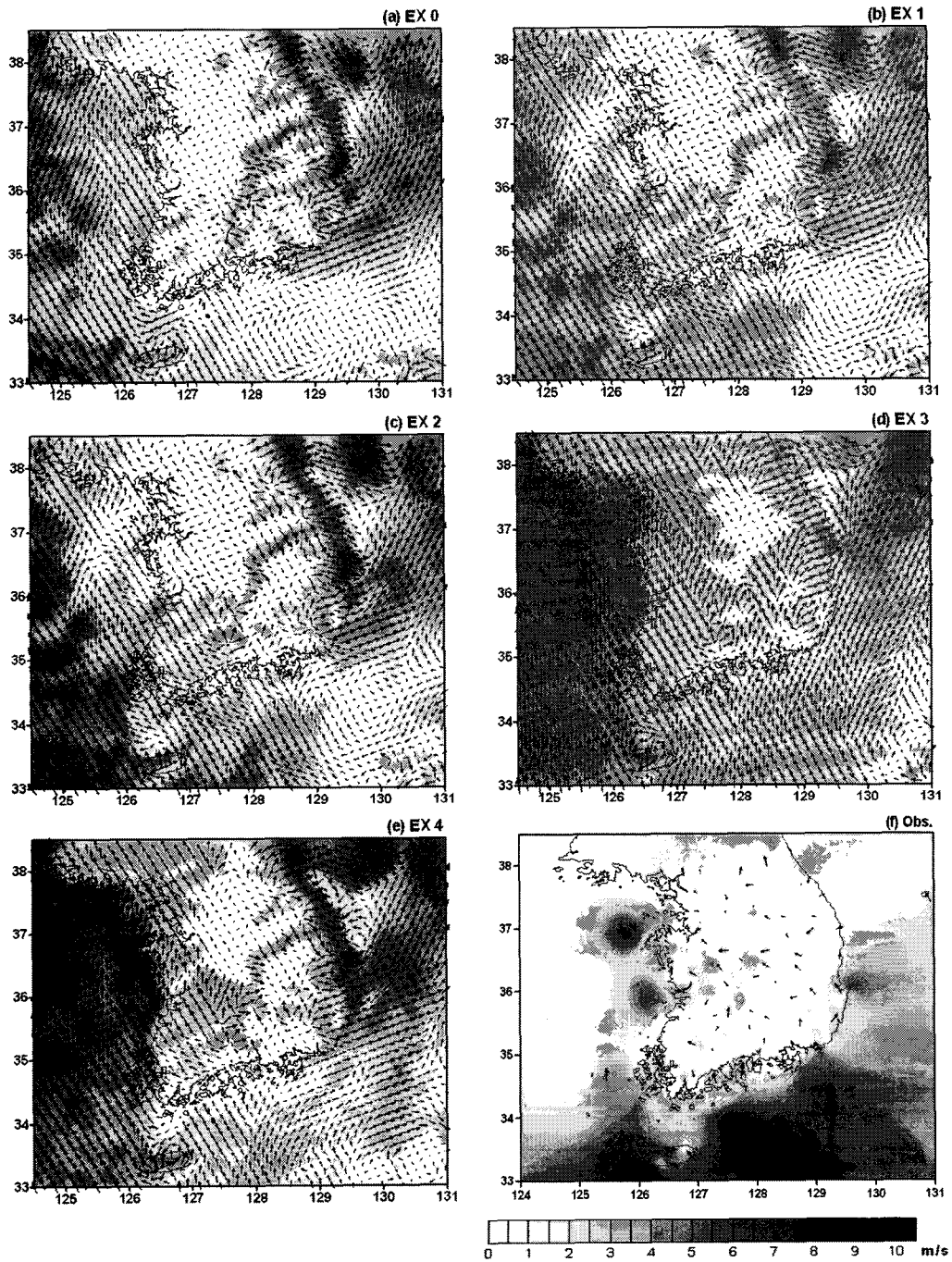


Fig. 5. Simulated wind field of (a)EXP0, (b)EXP1, (c)EXP2, (d)EXP3 and (e)EXP4 at 0300 LST on 25 June, 2004. Shaded contours indicates wind speed ranging from 0 to 10 m s^{-1} .

의 풍속이 다소 약하게 모의된 것을 확인할 수 있다. 이상의 모의된 결과들을 관측값과 비교해보면, 윈드프로파일러 자료를 이용한 EXP3과 EXP4가 인천 앞바다인 서해상의 남서풍을 관측값과 유사하게 모의하였고, 남해상에서의 강한 남풍의 유입 또한

잘 모의하였다. 그러나 동해상의 경우, 모의된 모든 결과들이 풍향을 다르게 모의하였으나, EXP3과 EXP4가 울진 부근 해상에서의 다소 강한 풍속을 잘 모의하였다.

Fig. 5는 6월 25일 0300 LST의 지상 수평바람장

분포이다. EXP0은 지상과 남해상에서는 약한 풍속 분포를 보이나, 동해안과 동해상의 다소 강한 북서풍과 남서풍이 특징적이며 서해상에서도 강한 풍속을 보이고 있다. EXP1은 전라남도 지역의 풍속을 EXP0보다 강하게 모의하였으며, 동해안에서의 풍속과 해상에서의 풍속을 전체적으로 강화시켰다. EXP2의 경우는 Fig. 4와 마찬가지로 존재자료의 자료동화 효과가 크게 나타나지 않고 EXP1과 유사한 분포를 나타내었다. EXP3은 서해상에서의 풍속을 아주 강하게 모의하는 특성을 보였으며, EXP0, EXP1, EXP2에서 모의했던 한반도 남서해안의 남동풍을 남풍으로 모의하였다. 전체적으로 약한 풍속을 나타내었던 지상의 바람장을 중부 내륙지역을 제외하고 모두 강하게 모의하였으며, 한반도 남동해안의 약하고 복잡한 바람분포를 강한 남풍계열의 바람으

로 나타내었다. EXP4는 EXP3과 바람장의 전체적인 공간분포는 유사하나 풍속을 다소 약하게 모의하는 특성을 나타내었다. 이상의 모의된 결과들을 관측값과 비교해보면, EXP3가 관측값에서 보이는 것과 같이 서해상에서의 강한 풍속과 한반도 남서해상의 남풍 유입을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

관측 자료별 자료동화 효과를 보다 상세하게 분석하기 위해서 각각의 실험설계에 따라 모의된 풍속 차이의 공간분포를 Fig. 6과 Fig. 7에 제시하였다. EXP1과 EXP0의 차이는 지상관측자료의 자료동화 효과를 보기 위한 것이고, EXP2와 EXP1의 차이는 존재 자료의 자료동화 효과, EXP3와 EXP1의 차이는 윈드프로파일러 자료의 자료동화 효과를 보기 위한 것이다. EXP4와 EXP1의 차이는 존재와 윈드프로파일러 자료를 같이 이용했을 경우의 자료동화

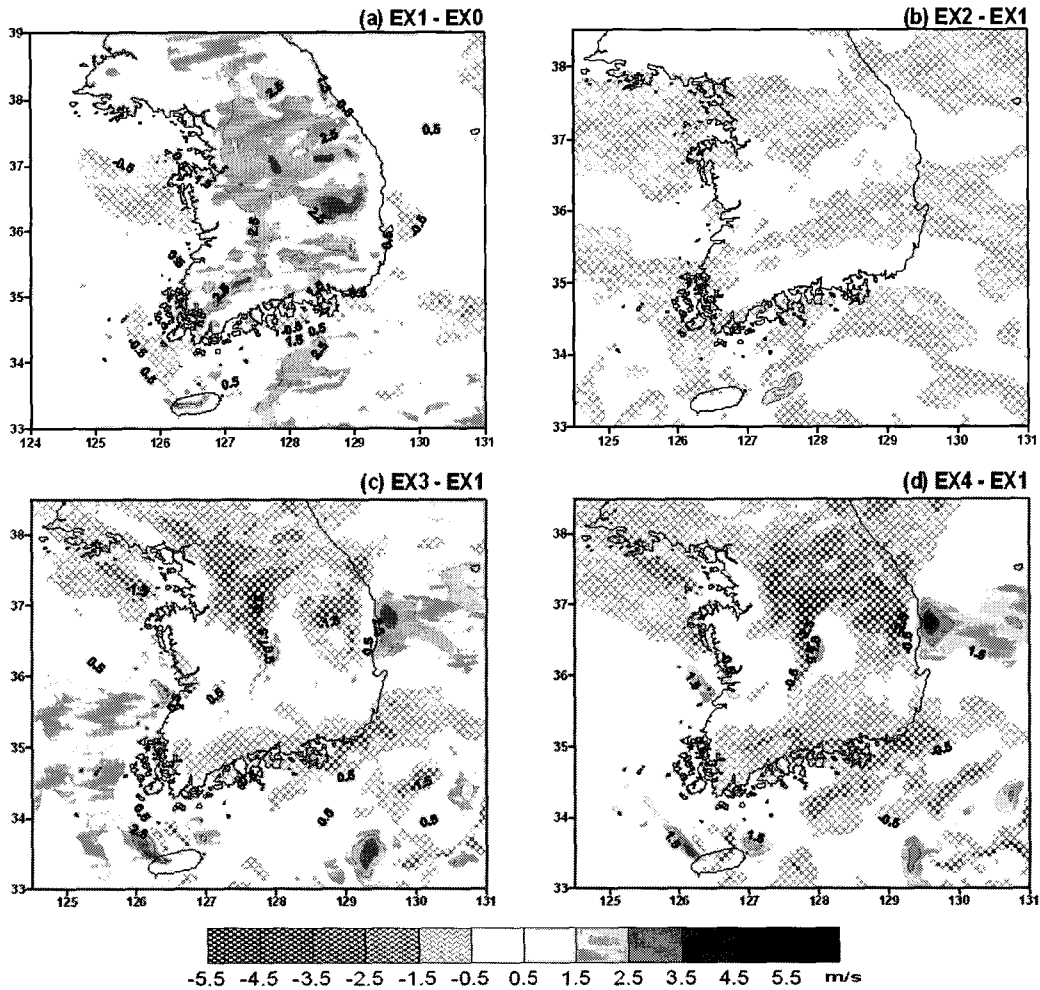


Fig. 6. Differences of wind speed of (a)EXP1-EXP0, (b)EXP2-EXP1, (c)EXP3-EXP1, and (d)EXP4-EXP1 in domain3 at 1500 LST on 24 June, 2004. Shaded contours indicates wind speed ranging from -5.5 to 5.5 m s⁻¹.

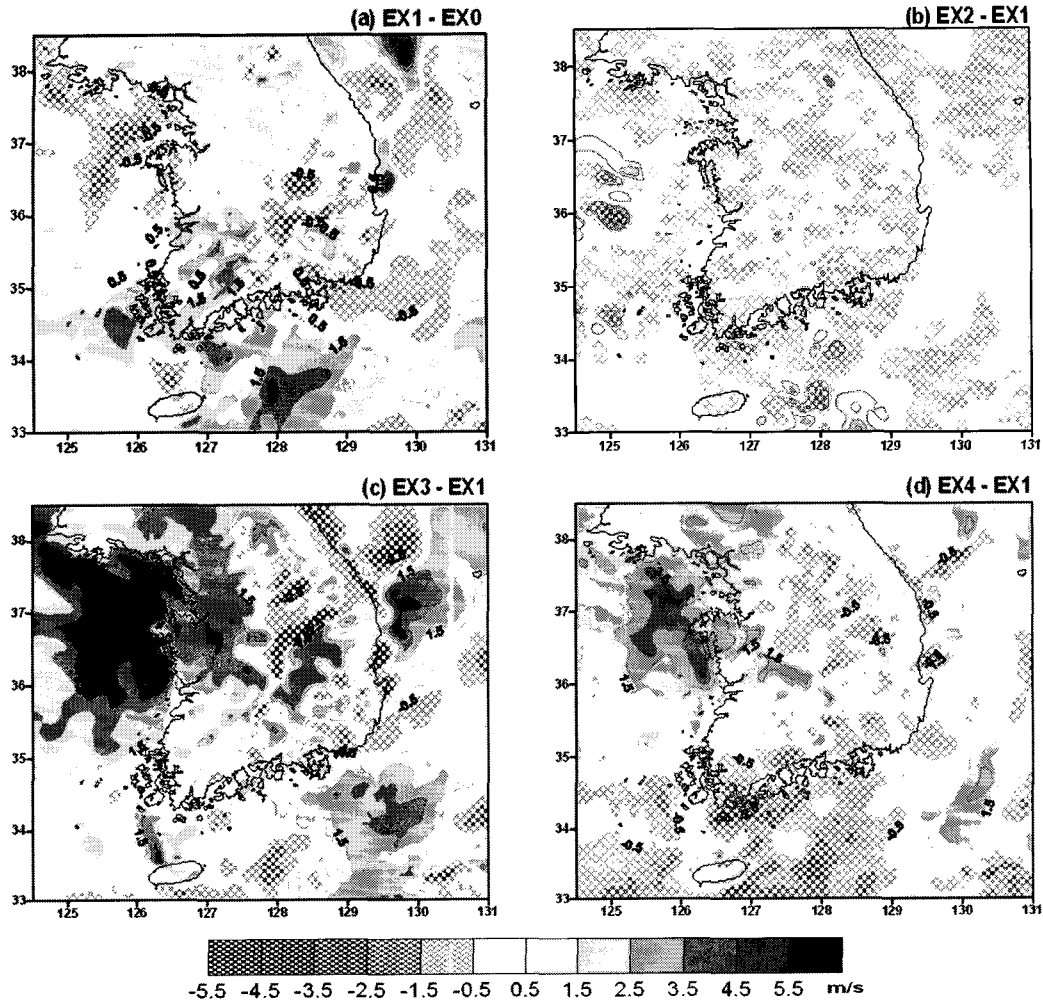


Fig. 7. Differences of wind speed of (a)EXP1-EXP0, (b)EXP2-EXP1, (c)EXP3-EXP1, and (d)EXP4-EXP1 in domain3 at 0300 LST on 25 June, 2004. Shaded contours indicates wind speed ranging from -5.5 to 5.5 m s^{-1} .

효과가 분석되어진다. 여기서 지상관측자료의 자료동화 효과는 고층기상관측자료의 자료동화 효과를 비교·분석하기 위해 base case로 사용되었다. Fig. 6은 6월 24일 1500 LST에 풍속 차이의 공간분포를 나타낸 것이다. 지상관측자료는 낮 시간의 한반도 내륙지역에서의 풍속을 약 2 m s^{-1} 정도 강화시켰으며, 거제 부이의 영향으로 남해상의 풍속이 2.5 m s^{-1} 강화된 것을 제외하고는 대부분 해상에서의 풍속은 조금 약화된 경향을 보였다. 존재 자료는 자료동화에 특징적인 효과를 나타내지 못하였고 전체적으로 풍속을 0.5 m s^{-1} 약화시키는 분포를 나타내었다. 윈드프로파일러 자료는 영덕 부근의 풍속을 2.5 m s^{-1} 강하게 모의하는 특성을 보였으며, 중부 내륙지방의 풍속은 최대 3.5 m s^{-1} 정도 감소시켰다. 그리고 고층기상자료인 존재 자료와 윈드프로파일러

자료를 동시에 자료동화하였을 경우, 한반도 내륙지방의 풍속은 전체적으로 더욱 약하게 모의되었고 남해안 지역의 풍속은 0.5 m s^{-1} 정도 감소되었다.

Fig. 7은 6월 25일 0300 LST에 풍속 차이의 공간분포를 나타낸 것이다. 지상관측자료의 자료동화 효과는 주간에 비해 야간에는 크게 나타나지 않았다. 지상관측자료의 자료동화 효과는 전체적으로 자료동화하지 않은 결과와 비슷하게 나타났으나, 내륙지방의 풍속은 다소 약하게 모의하였고, 남해 일부를 제외한 해상에서의 풍속도 전체적으로 감소시켰다. Fig. 6과 마찬가지로 존재 자료는 자료동화 효과가 크지 않았으며, 전체적으로 1 m s^{-1} 정도 풍속을 약하게 모의하였다. 윈드프로파일러 자료의 효과는 주간보다는 야간에 크게 나타났다. 문산 윈드프로파일러의 자료동화 효과가 크게 나타나 서해상에서의 풍

속을 최대 5 m s^{-1} 이상 강하게 모의하였고, 한반도 서쪽지역에서는 풍속을 다소 강하게, 동해연안에서는 다소 약하게 모의하는 특징을 보였다. 존재자료와 윈드프로파일러 자료를 같이 자료동화하였을 경우는 윈드프로파일러 자료의 효과에 의해 풍속이 강하게 모의되는 지역을 존재 자료가 상쇄시키는 역할을 한 것으로 사료되며, 그 결과 윈드프로파일러 자료만을 자료동화하였을 때 보다 전체적으로 풍속이 약하게 모의되는 특징을 보였다.

고층기상관측자료 중에서 지상 수평바람장의 자료동화에 큰 영향을 미치는 자료는 존재 자료보다는 윈드프로파일러 자료인 것으로 나타났다. 이것은 앞선 분석과 마찬가지로 존재의 경우는 대기경계층 이하에서 관측되는 자료가 적으므로 8개 지점의 값이 더 수용된 경우라고 할지라도 본 수치실험에 크게 기여하지 못한 것으로 추측할 수 있으며, 윈드프로파일러 자료의 경우는 관측지점이 단지 3개 지점뿐이었지만 연직적으로 조밀하게 관측되는 자료 특성으로 자료동화하면서 상층뿐 아니라 지상까지 보정해주었기 때문에 사료된다.

4. 연직바람장 개선 효과 분석

관측자료별 다양한 실험설계를 통해 연직바람장 모의에 기여하는 고층기상관측자료인 존재와 윈드프로파일러 자료 각각의 자료동화 효과를 지상관측 자료의 자료동화 효과와 연직 관측값과 비교·분석하였다. 존재의 경우는 대기경계층 이하에서 관측되는 자료가 적으므로 해남의 윈드프로파일러 자료를 이용하여 다양한 실험설계에 의해 모의된 값과 비교하였다.

Fig. 8은 2004년 6월 24일 1500 LST와 6월 25일 0300 LST에 해남에서 관측된 풍속의 연직 분포와 실험설계별 모의된 값을 비교한 것이다. 6월 24일

1500 LST에 관측자료는 지상에서 약 10 m s^{-1} 의 강한 풍속을 나타내고 있으며, 고도가 증가함에 따라 풍속이 증가하여 약 800 m 부근에서 최대 풍속인 15 m s^{-1} 을 보이고 있다. 800 m 이상의 고도에서는 풍속이 점차 감소하며 약 1500 m 고도 부근에서 약 9 m s^{-1} 의 최소 풍속을 보이고 있다. 실험설계별 모의된 값을 분석하면, 자료동화를 하지 않은 EXP0의 경우는 지상에서 약 4 m s^{-1} 내외의 약한 풍속을 나타내고 고도가 증가함에 따라 풍속이 감소하다가 약 1000 m 부근에서 다시 점차 풍속이 증가하는 분포를 보이고 있다. EXP1의 경우는 지상관측자료의 자료동화 효과로 지상의 풍속이 조금 감소하였고, 고도가 증가함에 따라 풍속이 증가하여 약 600 m 부근에서 최대 풍속 7 m s^{-1} 을 보이고 있으며, 그 이상의 고도에서는 5 m s^{-1} 내외의 풍속을 나타내고 있다. EXP2의 경우는 EXP1과 거의 유사한 연직 분포를 보이고 있다. EXP3는 지상에서 5.3 m s^{-1} 의 풍속을 보이고 있어 모의된 값 중에서 풍속이 가장 강하게 나타났으나, 여전히 관측값인 10 m s^{-1} 와는 상당한 차이를 보이고 있다. 고도가 증가함에 따라 풍속이 증가하고, 특정 고도이상에서는 다시 풍속이 감소하는 전체적인 연직분포 패턴은 유사하게 나타났으나, 최대 풍속이 나타나는 고도는 약간의 차이를 보였다. EXP4의 경우는 EXP3와 유사한 연직 분포이나 전체적으로 풍속이 약하게 나타났고, 고도의 증가에 따른 풍속의 변화가 크지 않았다.

Fig. 9는 6월 24일 1500 LST와 6월 25일 0300 LST에 해남에서 관측된 풍향의 연직 분포와 실험설계별 모의된 값을 비교한 것이다. 6월 24일 1500 LST에 해남 윈드프로파일러 자료의 풍향은 지상에서부터 약 1500 m 고도까지 일정한 풍향인 북동풍이 불고 있다. EXP0는 지상에서 상층까지 전체적으로

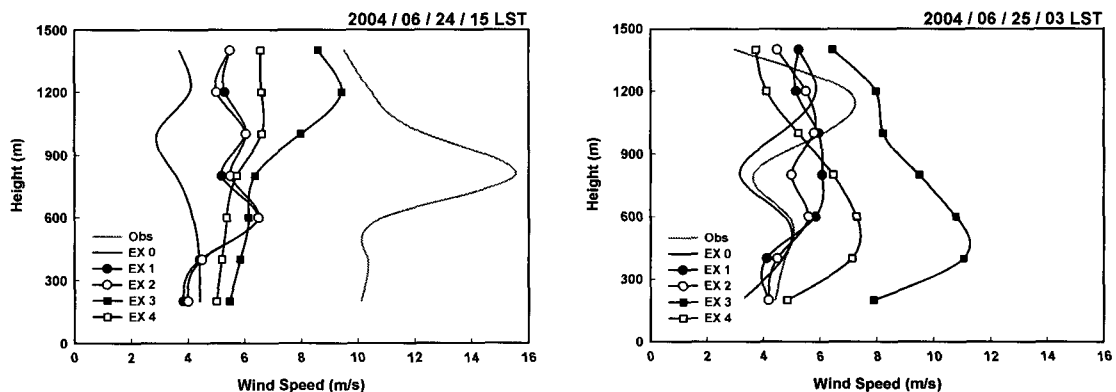


Fig. 8. Comparison of vertical profiles on height of modeled and observed wind speed in Haenam at 1500 LST on 24 and 0300 LST on 25 June, 2004.

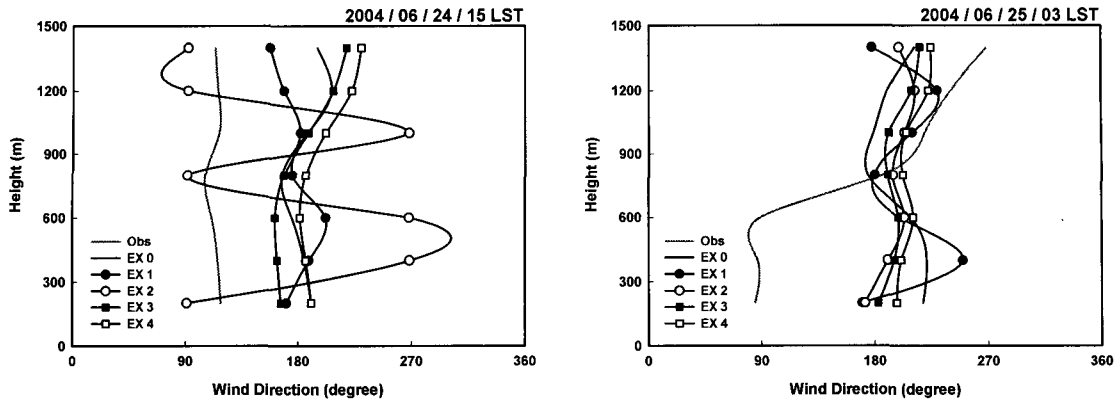


Fig. 9. Comparison of vertical profiles on height of modeled and observed wind direction in Haenam at 1500 LST on 24 and 0300 LST on 25 June, 2004.

로 남풍이 불고, EXP1의 경우는 지상관측자료에 의한 풍향의 자료동화효과는 크게 나타나지 않아 EXP0와 유사한 연직 분포를 보였다. EXP2는 동풍과 서풍의 급격한 풍향변화를 나타내고 있어 관측값과 상당한 차이를 보였으며, EXP3은 지상에서 상층으로 올라가면서 남풍에서 남서풍으로의 풍향전환을 나타내고 있다. EXP4는 존데자료의 영향으로 EXP3보다 풍향이 더 서쪽으로 전환된 모습이다. 6월 25일 0300 LST에 관측 풍향은 지상에서 약 600 m 고도까지는 일정한 동풍을 보이고, 그 이상의 고도에서는 점차적으로 동풍에서 서풍으로의 풍향전환을 나타내고 있다. EXP0은 지상에서 남서풍을 나타내고 있고 약 800 m 고도에서 남풍으로 전환되었다가 그 이상의 고도에서는 다시 남서풍으로 풍향이 바뀌고 있다. 모의된 결과인 EXP1부터 EXP4까지 대체적으로 유사한 연직 풍향분포로서, 지상에서의 풍향은 관측값과 다소 차이를 보이나 상층에서는 유사한 남서풍을 모의하고 있다. 야간에는 연직바람장 모의에 대한 관측자료별 자료동화 효과가 낮 시간보다 작게 나타나는 것으로 추측되며, 풍속보다는 풍향의 자료동화 효과가 더 작았다고 판단된다.

다양한 실험설계에 따라 모의된 연직 풍속과 풍향을 관측값과 비교해본 결과, 윈드프로파일러 자료를 자료동화한 결과가 그나마 관측치의 연직 추세를 잘 설명하고 있었다. 하지만 대체로 모든 결과가 관측값을 과소평가하면서 그다지 일치된 값을 모의해 내지 못하고 있어, 보다 정확한 바람장 산출을 위해서는 한반도 내 많은 지점에서의 고해상도 연직분해능을 정확한 고층기상자료의 관측과 그 자료의 확보가 필요하리라 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 한반도 고층기상관측자료인 존데

와 윈드프로파일러 자료를 이용하여 LAPS 자료동화시스템을 통해 개선된 초기장이 정확한 바람장 형성에 기여하는 영향을 분석하였으며, 관측 자료별 다양한 실험설계를 통해 존데와 윈드프로파일러 자료 각각의 자료동화 효과를 비교·분석하였다. 사례일은 기상청에서 관리되고 있는 KEOP 관측 기간 중의 장마전선을 동반하고 있었던 사례일(2004년 6월 22일 ~ 6월 26일)을 선정하여, 고해상도 관측자료를 이용한 최상의 초기장 개선을 이루고자 하였다.

고층기상관측자료 중에서 지상 수평바람장의 모의에 큰 영향을 미치는 자료는 존데 자료보다 윈드프로파일러 자료인 것으로 나타났다. 이것은 존데의 경우는 대기경계층 이하에서 관측되는 자료가 2 ~ 3개 정도로 자료 수가 적었기 때문에 윈드프로파일러 자료보다 많은 8지점의 관측값을 이용했음에도 본 수치실험에 크게 기여하지 못한 것으로 추측할 수 있다. 윈드프로파일러 자료의 경우는 관측지점이 3지점뿐이었지만 약 100 m 간격으로 연직적으로 조밀하게 관측되는 자료 특성으로 자료동화하면서 상층뿐 아니라 지상의 자료까지 보정해주었기 때문에 자료동화 효과가 크게 나타난 것으로 사료된다. 윈드프로파일러 자료는 해상에서 약하게 모의되었던 값들을 더 강하게 보정하는 역할을 하였으며, 육지 내에서의 전체적인 강한 바람을 부분적으로 약하게 모의함으로써 지형에 의한 상세한 바람장 산출에 보다 효과적으로 작용함을 알 수 있었다. 연직 바람장 개선 효과의 경우도 윈드프로파일러 자료를 동화한 결과가 그나마 관측치의 연직 추세를 잘 설명하고 있었으나, 대체로 모든 결과가 관측값을 과소평가하면서 그다지 일치된 값을 모의해 내지 못하고 있었다.

이상의 분석에서, 한반도내 지형효과를 고려한 보다 정확한 바람장 산출을 위해서는 많은 지점에서

의 정확하고 조밀한 고층기상자료의 관측과 그 자료의 확보가 요구되어지는 것으로 판단되며, 본 연구에서는 단지 3개 지점의 윈드프로파일러 자료만을 활용하였지만 앞으로 보다 많은 지점에서의 윈드프로파일러 관측과 그 자료가 활용된다면 대기유동장의 정확한 예측에 있어서 크게 기여할 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- 1) Stauffer D. R., Seaman N. L., 1994, Multiscale four-dimensional data assimilation, *J. Appl. Meteor.*, 33, 416-434.
- 2) 황동익, 2001, 복잡한 지역에서의 초기장 도출에 관한 연구, 석사학위논문, 대기과학과, 연세대학교, 서울.
- 3) 김용상, 박옥란, 황승언, 2002, 기상연구소의 국지규모 기상 분석 및 예측 시스템 (KLAPS)의 실시간 운영, *한국기상학회지*, 38(1), 1-10.
- 4) 과학기술처, 1997, 기상자료 종합분석 시스템 개발(Ⅲ), 293pp.
- 5) 과학기술처, 2000, 한반도 국지기상 자료동화 기법 개발, 89pp.
- 6) 김용상, 오재호, 차주완, 서애숙, 1999, 국지규모 기상 분석 시스템 (LAPS)의 한반도 적용 및 시험, *기상연구논문집*, 52-62.
- 7) 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.
- 8) 박옥란, 김용상, 조천호, 2005, 해남 윈드프로파일러와 오토존데 자료를 이용한 관측시스템 연구, *한국기상학회지*, 41(1), 57-71.
- 9) Lewis J. M., 1971, Variational subsynoptic analysis with applications to severe local storms, *Mon. Wea. Rev.*, 99, 786-795.
- 10) Richard E., Mascart P., Nickerson E., 1989, The role of surface friction in downslope windstorms, *J. Appli. Meteo.*, 28, 241-251.
- 11) 김용상, 오재호, 2000, 위성휘도온도 자료를 이용한 지상온도 분석장의 개선, *The Journal of KOREA Analysis Society*, 2(4), 455-463.
- 12) Groves J. R., 1989, A practical soil moisture profile model, *Water Resources Bulletin*, 25, 875-880.