

한반도 풍력자원 평가를 위한 초기 공간해상도와 위성자료 동화의 관계 분석

Analysis of the Relation between Spatial Resolution of Initial Data and Satellite Data Assimilation for the Evaluation of Wind Resources in the Korean Peninsula

이순환* · 이화운¹⁾ · 김동혁¹⁾ · 김현구²⁾

부산대학교 BK21 연안환경시스템 사업단,

¹⁾부산대학교 지구환경시스템학부, ²⁾한국에너지기술연구원

(2007년 5월 17일 접수, 2007년 9월 5일 채택)

Soon-Hwan Lee*, Hwa-Woon Lee¹⁾, Dong-Hyuk Kim¹⁾ and Hyeon-Gu Kim²⁾

BK21 Coastal Environment System School, Pusan National University

¹⁾*Department of Earth Environmental System, Pusan National University,*

²⁾*Korea Institute of Energy Research*

(Received 17 May 2007, accepted 5 September 2007)

Abstract

Several numerical experiments were carried out to clarify the influence of satellite data assimilation with various spatial resolution on mesoscale meteorological wind and temperature field. Satellite data used in this study is QuikSCAT launched on ADEOS II. QuikSCAT data is reasonable and faithful sea wind data, which have been verified through many observational studies. And numerical model in the study is MM5 developed by NCAR.

Difference of wind pattern with and without satellite data assimilation appeared clearly, especially wind speed dramatically reduced on East Sea, when satellite data assimilation worked. And sea breeze is stronger in numerical experiments with RDAPS and satellite data assimilation than that with CDAS and data assimilation. This caused the lower estimated surface temperature in CDAS used cases. Therefore the influence of satellite data assimilation acts differently according to initial data quality. And it is necessary to make attention careful to handle the initial data for numerical simulations.

Key words : Satellite assimilation, Numerical model, Initial data, RDAPS-CDAS, Wind resources

1. 서 론

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)51-583-2651, E-mail : withshlee@pusan.ac.kr

너지에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 신·재생 에너지 중 풍력발전은 기술진척도가 가장 빠르기 때문에 현재 가장 경제성이 우수하다는 화력발전이 필적할 만하다(김현구와 최재우, 2002). 미국을 비롯한 많은 지역에서도 풍력 에너지 평가를 위하여 실증연구를 실시하고 있다(Christmann, 2007; Parsons *et al.*, 2004). 우리나라의 경우, 산업자원부에서 '제2차 신·재생에너지 기술개발 및 이용보급 기본계획'을 수립하고 2020년에는 전체발전량의 9.4%를 풍력발전을 통하여 확보한다는 계획을 세웠다. 한반도의 경우 대기 대순환적인 측면에서 경압성이 우수한 중위도 지방에 위치하고 삼면이 바다로 둘러싸여 있기 때문에 상대적으로 풍력자원이 우수한 것으로 나타난다.

이러한 풍력에너지 확보를 위한 기초자료로써 한반도주변의 정확한 풍력자원 해석이 중요하다. 풍력자원 해석을 위한 기법으로 관측자료의 통계처리를 바탕으로 한 기법과 물리방정식을 수치해석화적인 방법으로 풀어서 상세 풍력자원을 분석하는 기법으로 나눌 수 있다. 초기 바람지도 작성을 위해서는 기상관측자료의 보간법을 이용한 통계적인 방법이 이용되었으나(김건훈 등, 2003), 현재 계산기의 발달과 수치해석 기법의 발달에 의하여 수치모형을 이용한 바람장 분석법이 이용되기도 한다. 김현구 등(2005)은 인공위성자료와 저해상도 전구기상자료를 결합하여 한반도 주변의 바람자원을 조사하였다. 그러나 이러한 바람자원 평가는 전체적인 분포 특성을 제시할 수는 있으나 저해상도의 기상자료를 바탕으로 제작되어 상세 풍력자원의 분포를 표현하기에는 부족하다. 그러므로 수치모형을 이용한 기상예보에 의한 기법의 적용이 요구된다.

수치 기상예보에 있어서 바람장 예보는 대기의 역학적인 균형을 평가한다는 면에서 매우 중요하며, 이러한 바람장 예보의 정확도는 기상학적인 측면 뿐 아니라 오염물질의 이동 등과 관련한 대기환경적인 측면에서도 매우 중요하다. 특히 삼면이 바다로 둘러싸인 한반도의 경우 해상의 기상자료를 획득하는 것이 매우 중요하다. 그러나 이러한 중요성에도 불구하고 육상과는 달리 매우 제한적인 범위에서 측정된다. 그러나 최근 위성관측에 의한 원격탐사기술의 발달로 해상관측범위가 증가되고 자료의 정확도 역시 향상되었다. Lee *et al.* (2007a)은 한반도 주변의 풍력에너지를 평가하기 위하여 위성자료 동화기술을 이용

하여 한반도 주변의 해상풍을 평가하였다. 이를 통해서 위성자료 동화의 효율성을 제시하였으며, Lee *et al.* (2005)은 중규모 수치모형을 이용하여 일본의 Tsugaru 해역의 표면 해류 예측에 해상풍의 영향이 매우 크다는 것을 보였다. 그리고 해상 표면 해류 예측에 위성자료를 포함한 다양한 형태의 관측이 필요함을 제시하였다. 저해상도 재해석 바람장 자료인 미국 환경예보국(National Center for Environment Prediction: NCEP)과 유럽중기 기상예보센터(European Center for Medium Range Weather Forecasting: ECMWF)의 자료를 이용하여 한반도 주변의 해상풍을 평가하는 연구도 실시되었다(이동규, 1998; 강인식 등, 1994; 나정렬 등, 1992). 이러한 위성자료의 동화는 기상 예측정확도 향상에 도움이 된다.

그러나 이러한 연구 등에 최대 위·경도 1.25도 이상의 저해상도 자료를 초기조건을 위성자료동화를 통해 0.5도 정도 해상도의 동화효율성을 제시한 사례뿐이다. 현재 계산 기술의 발달에 의하여 다양한 해상도의 초기수치자료의 확보가 가능해졌고, 확보 가능한 초기자료의 해상도는 전산 및 기상관측기술의 발달에 따라 높아지고 있다. 그러므로 서로 다른 공간해상도의 초기조건과 위성자료 동화의 관계를 평가하여야 한다. 본 연구는 한반도 주변의 해상 풍력에너지의 정량적 평가를 위한 기초연구로, 위성자료 동화가 중규모 바람자원 예측에 미치는 영향을 분석하고, 해상도가 다른 기상수치예보 초기자료를 이용하여 위성 자료동화가 바람자원 예측정확도에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 자 료

2.1 관측 자료

본 연구는 중규모 기상현상에 미치는 자료동화의 정확도 평가가 목적이기 때문에 중규모 기상현상이 발달하기 쉬운 고기압이 지배적인 상태를 사례일로 선정하였다. 대상일은 대기가 상대적으로 안정한 2003년 5월 18일과 19일로 하였다. 그림 1은 대상일 18 UTC의 500 hPa과 지상 기상장을 나타낸 것이다. 중국대륙에서 강력한 고기압이 존재하여 한반도는 매우 맑은 날씨가 나타나고 있으며 500 hPa 바람장에서 한반도 상공에 수렴이 발생하여 고기압이 지

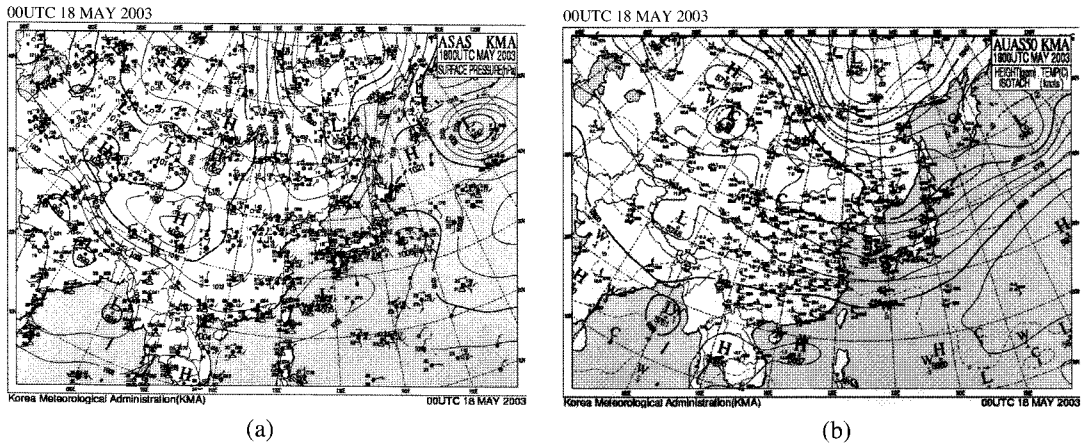


Fig. 1. Surface and 500 hPa synoptic chart provided by the Korea Meteorological Administration at 00UTC, 18 May 2003.

배적임을 알 수 있다. 그리고 거대 고기압은 다음날인 19일 3가지 고기압 군으로 분리되고, 그 중 하나가 한반도를 향하여 동진을 한다. 그러므로 한반도는 실험 기간 중에 맑은 날씨가 지속되었다.

본 연구는 해양상의 위성자료 동화의 영향을 정량적으로 평가하는 것이다. 위성자료의 일반적인 특성은 관측지의 접근용이성에 상관없이 단시간에 광범위한 지역을 관측할 수 있다는 것이다. 위성관측은 기상관측상 접근이 어려운 해양상의 관측적인 측면에서 매우 중요하다. 특히 바람자원 예측을 위한 기상 수치연구에서는 지상 기상 요소의 초기조건이 매우 중요한데 일반적으로 육상의 지상 기상 관측 밀도는 매우 높은 반면 해상의 관측 밀도는 매우 낮다. 그러므로 이러한 해상 관측 자료를 확보할 수 있는 유용한 방법의 하나가 위성에 의한 원격탐사이다. 특히 우리나라는 편서풍 지대로써 한반도의 풍상측에서 해가 존재하며, 동계의 경우 북동풍이 발달하면 중관풍은 동해상을 통과하여 한반도로 불어온다. 그러므로 이러한 풍상측 해양상의 기상 자료 확보는 바람장 수치연구의 예측 정확도 향상에 매우 중요하다. 그러나 위성자료의 시간 분해능의 경우 매우 작다는 한계가 존재한다. 즉 위성은 규칙적인 항로를 따라 이동하지만 같은 지역을 1일 2회 정도 통과한다. 그러므로 연속적이며 높은 시간 분해능을 기대할 수 없다는 단점이 있다. 그리고 위성센서의 관측 폭이 정해져 있기 때문에 일부지역에서 결측이 나타날 수도 있다. 그러나 이러한 한계에도 불구하고 해양관측

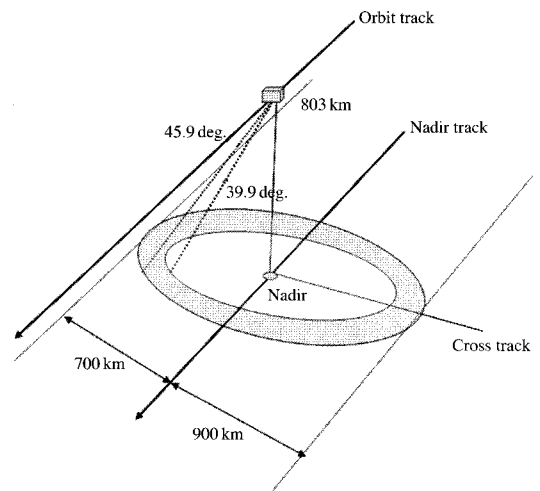


Fig. 2. A schematic drawing of the measurement geometry of QuikSCAT. As indicated in the figure, the far swath is from 700 to 900 km, with a 400-km-wide nadir.

자료가 거의 없는 상태에서 위성에 의한 관측자료는 해양상의 관측도구로서 매우 유용하다고 판단된다.

기상수치실험의 자료동화를 위하여 사용된 위성자료는 QuikSCAT (Quick SCATrometer) 이다. 이 자료는 미국항공우주국 (National Aeronautic and Space Administration)이 발사한 다목적위성인 ADEOS-II에 탑재한 해상풍 관측 센서의 동적관측자료 (active detection)이다. 위성에서 전자파를 해상으로 보내서

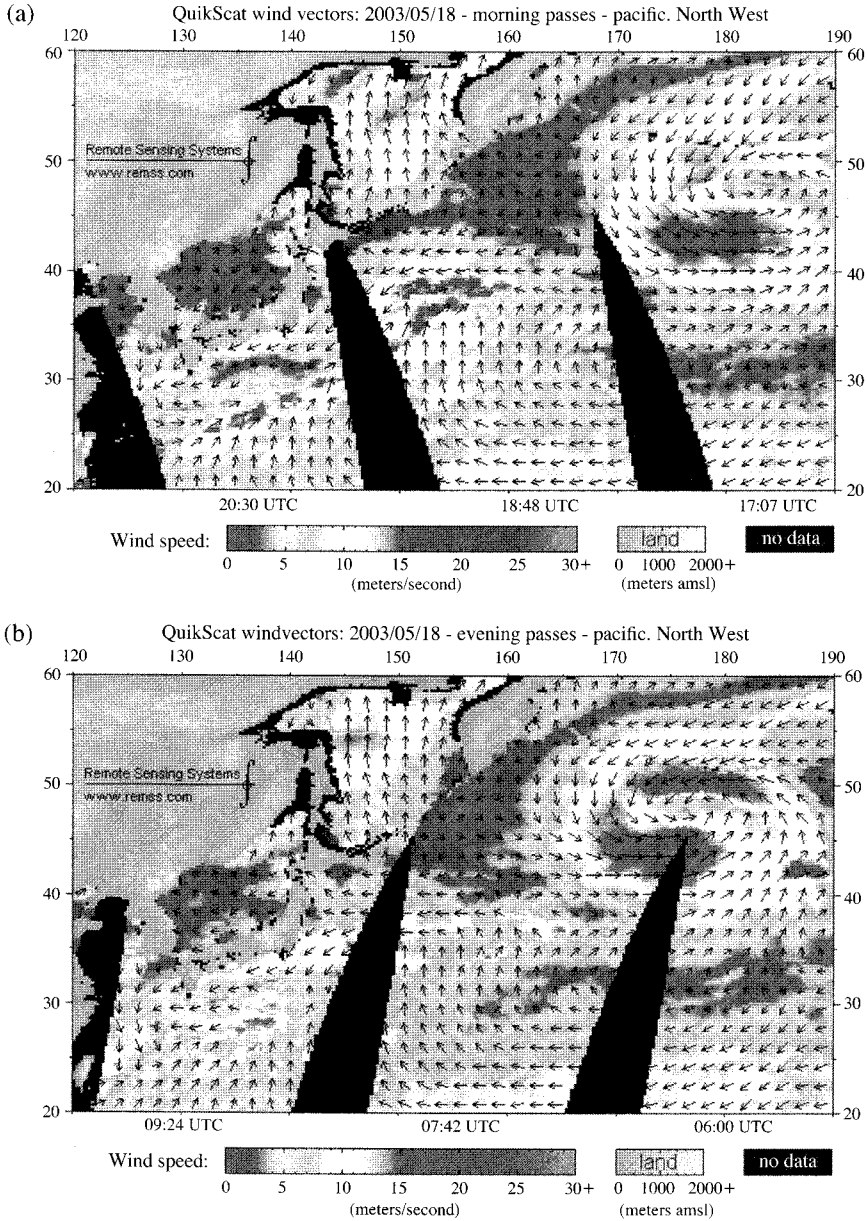


Fig. 3. Sea-wind vectors detected by the QuikSCAT sensor during the morning and evening passes on 18 May 2003. QuikSCAT sea-wind data are classified into 23 regions. The shading in figures indicates the wind intensity. The black areas show an absence of observation data due to satellite passes.

파고에 의해 반사되는 파를 측정하여 해상표면 가까운 곳의 바람성분을 추출하게 된다. 관측은 해상의 거칠기가 해상표면의 바람세기에 비례한다는 실험적 사실에 근거하여 표면의 파도에 의하여 반사되어 도

달하는 파장을 측정하여 해상바람강도를 추정하는 것이다. 그림 2는 QuikSCAT의 측정 궤적을 나타낸 것이다. 미국항공우주국에서 최초로 설계된 해상풍 측정 위성센서로 두 개의 Ku 밴드 빔으로 이루어져

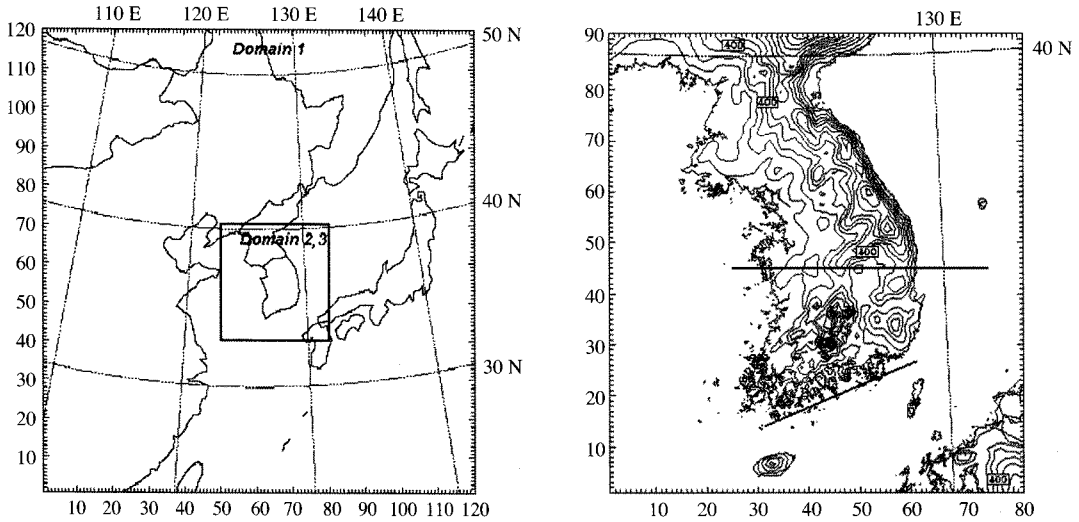


Fig. 4. Locations of model domains and the topography of the fine domain used in this study. Lines in right panel are used in the vertical analysis of potential temperature and wind. Contour intervals of topography are 200 m, and the units on the X- and Y-axes are grid numbers.

있으며, 효과 경로폭은 1,600 km 이고, 한 곳에서 290 초간 관측한다. 센서의 공간해상도는 고분해능의 경우 12.5 km이다. 그리고 24시간 동안 지구의 90%를 관측할 수 있다.

그림 3은 대상일인 2003년 5월 18일 QuikSCAT에 의해 관측된 한반도 주변의 해상풍을 나타낸 것이다. ADEOS-II는 극궤도 위성이기 때문에 QuikSCAT은 일반적으로 위도가 증가하면서 한번 관측을 하고, 위도가 감소하면서 다시 한 번 관측한다. 그래서 동일한 지점을 하루에 총 두 번 관측을 한다. 그림 3의 (a)는 위도가 증가하면서 관측한 Ascending Scene이며, 그림 3의 (b)는 위도가 감소하면서 관측한 Descending Scene이다. 상승경로(Ascending pass)상에서 측정된 바람장을 보면 북서태평양상에서 고기압성 흐름을 나타내고 있으며 바람이 다소 강하다. 그러나 한반도 주변 해상의 경우, 동해에서는 풍속이 약 3 m/s 이하로 나타나고 남해는 동해보다는 높으나 전체적으로 약한 바람이 분다. 이는 그림 1에서 설명한 바와 같이 중국대륙 동쪽에 위치한 고기압의 영향으로 한반도의 풍속이 약하게 나타난 것이다. 하강경로(Descending pass)에서 풍속을 보면, 전시간대 북서태평양상의 고기압은 강화되고 있고, 일본 남쪽해상의 경우 반대로 풍속이 약화되는 경향을 나타낸다. 한반

도 주변의 풍속은 전해상에서 약간의 상승이 나타난다. 그러나 전체적으로 5 m/s 이하로 그리 강한 바람은 아니다. 그리고 그림 3의 검게 나타난 부분은 위성궤도에 의하여 관측이 되지 않는 부분을 의미한다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 실제 대상일의 경우 서해 일부의 관측 누락이 있음을 알 수 있다.

2.2 수치모형

본 연구에 사용된 수치모형은 MM5(The 5th generation of Mesoscale Model)이다. 이 모형은 현재 한국 기상청에서 현업모형으로 사용하고 있는 모형으로 많은 선행연구에 의하여 안정성과 신뢰성을 확보하였다(Lee *et al.*, 2007a, b; 이순환 등, 2006a; 이순환과 박광순, 2006b; Zhang and Zheng, 2004; Dudhia *et al.*, 2000). MM5는 비정역학 기압준거좌표계를 사용하고 있으며, 다중 등지계산 능력, 비정역학, 4차원 동화시스템, 즉 다양한 외부자료 이용, 여러 가지 계산기에의 적용성 및 다양한 물리과정 옵션 등의 특징을 가지고 있다.

수치계산에는 총 3개의 등지격자(nested grid)를 이용한다(그림 4). 동아시아 전체를 대상으로 하는 첫 번째 등지영역은 수평 120×120이고 격자간격은 27 km이며, 두 번째 영역은 수평 90×82이며 간격은 각

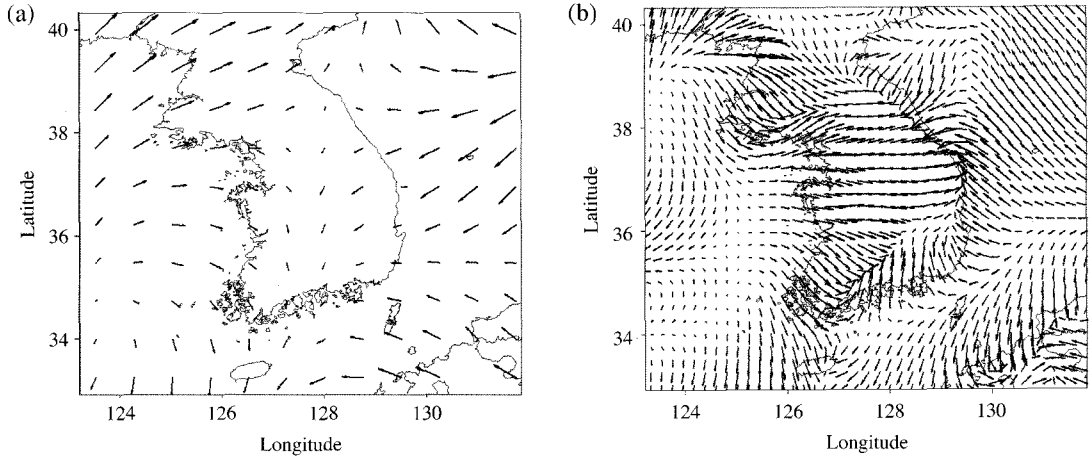


Fig. 5. Wind vectors of (a) CDAS and (b) RDPAS on 1500LST 18 May 2003.

9 km, 세 번째 영역은 210×200이며 간격은 3 km로 설정하였다. 두 번째 등지와 세 번째 등지의 영역은 비슷하게 설정하였고 그 영역은 한반도 남쪽부분을 대상으로 하였다. 이것은 급격한 고해상도 등지격자화는 경계부근에서 불안정한 파동을 형성할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위하여 두 번째 등지와 세 번째 등지의 범위가 비슷하게 설정되었다. 연직 격자는 세 등지격자 모두 33개의 층으로 이루어져 있으며, 지표면에 가까울수록 플럭스의 변화가 크기 때문에 격자간격을 조밀하게 설정하였다.

복사과정은 구름의 유무에 의하여 복사량을 결정하는 Cloud-radiation 방안을 사용하였다. 적은 대류는 격자에서 분리되지 않는 강수 발생을 모수화하는 과정으로 격자 간격이 작아지면 수치적으로 구름 강수를 해석할 수 있기 때문에 적운모수화의 방법이 달라진다. 그러므로 경계조건으로 사용되는 RDAPS와 CDAS와 직접적으로 접하고 있는 제1 등지의 적은 대류는 RDAPS와 CDAS의 모수화 방안과 통일성을 유지하기 위하여 Kain-Fritsch 방안을 적용하였다. 이는 CAPE이론에 기초한 적운대류 방안이다. 그리고 제2, 3 등지에서는 중규모의 공간격자에 적절하다고 판단되는 Arakawa 방안을 개량한 Grell 방안을 적용하였다. 대기경계층은 모수화 방법 통일성을 유지하기 위하여 세 등지 모두 MRF (Medium Range Forecast model) 방안을 적용하고 경계층내 물리량의 상층이동을 용이하게 하기위하여 천층 대류과정을

적용하였다. 그리고 본 연구에서 주로 세 번째 등지 격자 결과를 이용하여 분석을 실시하였다.

2.3 수치실험 설계

초기조건과 자료동화유무에 따라 다양한 수치실험을 실시하였다. 시간 분해능과 공간 분해능이 다른 두 가지 초기조건이 고해상도 위성자료 동화 효율에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 연구에 사용된 초기조건은 해상도가 서로 다른 격자형 수치자료인 CDAS (Climate Data Assimilation System)와 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System)를 사용하였다. CDAS는 미국 환경 예보국에서 제공하는 전지구의 재해석 자료이다. 전구수치모형 Eta를 기준으로 전세계 관측 자료를 결합하여 균형화된 열과 운동량 분포를 하는 자료로 현재 해상도는 110 km이며, 시간간격은 6시간 간격으로 생산되고 있다. 반면 RDAPS는 한국기상청에서 제공하는 수치자료로 본 연구에서 사용된 모형인 MM5를 바탕으로 제작된 것으로 공간해상도는 30 km이며, 시간해상도는 3 시간이다. 이러한 CDAS와 RDAPS는 수치계산의 초기치와 경계치로 사용되기 때문에 수치계산이 이루어지는 동안 지속적으로 사용된다. 따라서 CDAS와 RDAPS는 동화를 위한 자료가 아니라 수치계산의 경계치를 의미한다. 반면 QuikSCAT는 한반도에서 하루 2회 관측되기 때문에 해당시간이 되었을 때만 동화를 실시한다. 그러므로 QuikSCAT는 특정시간에

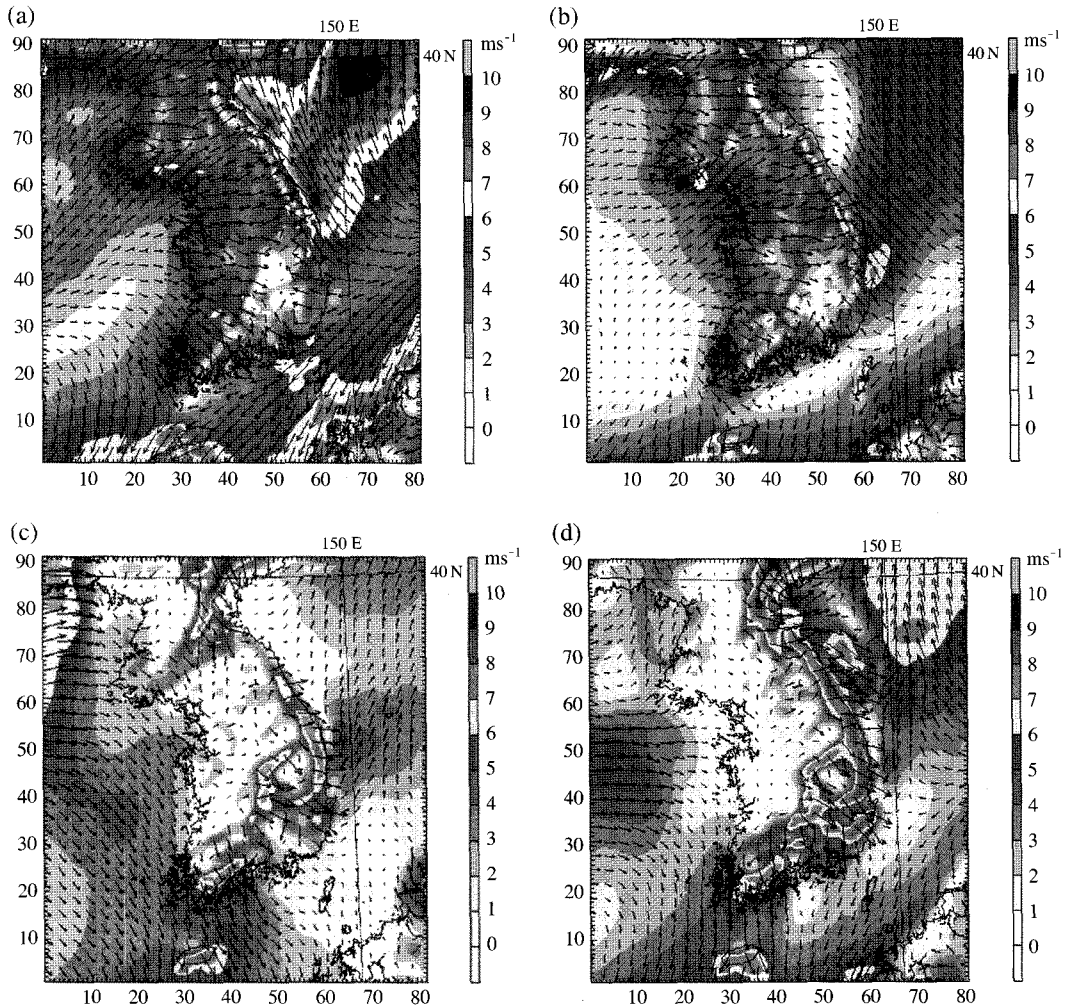


Fig. 6. Simulated wind vectors with CDAS_no and CDAS_yes at 1500LST (a, b) and 0600LST (c, d) on 18 May 2003. Shading depicts wind speed.

동화자료로써 의미를 가진다.

그림 5는 연구에 사용된 2003년 5월 18일 15 LST 및 06 LST의 CDAS와 RDAPS의 바람장을 나타낸 것이다. 두 경우 모두 한반도 전 해안에서 해풍을 모사하고 있으며, 전체적으로 해풍의 분포는 유사하게 나타난다. 그러나 국지적으로 살펴보면 RDAPS의 경우가 바람의 수렴위치와 분포가 세밀하게 표현된다. 그러므로 본 연구에서 해상풍 위성자료동화의 효과와 더불어 공간해상도가 다른 초기조건을 적용한 때 위성자료동화효율을 중규모 기상장의 차이로 분석하

고자 한다.

이를 위하여 본 연구에서는 총 4가지 수치실험을 실시하였다. 그것은 초기조건을 낮은 해상도를 가진 CDAS를 사용하고 QuikSCAT 자료동화를 실시한 경우(case CDAS_yes)와 반대로 초기조건을 해상도가 높은 RDAPS를 사용하고 위성자료동화를 실시한 경우(case RDAPS_yes) 그리고 위성자료동화를 이용하지 않고 단순히 초기자료만 CDAS(case CDAS_no)와 RDAPS(case RDAPS_no)를 사용한 경우로 설정하였다.

3. 결과 분석

3.1 위성 자료동화 영향

QuikSCAT의 위성자료가 중규모 바람장에 미치는 영향을 분석하기 위하여, CDAS를 초기조건으로 위성 자료동화를 한 경우와 하지 않은 경우의 바람장을 비교하였다. 그림 6은 CDAS_no와 CDAS_yes에서 계산된 15 LST(a, b)와 06 LST(c, d)의 지표 10 m 고도의 바람장을 나타낸 것이다. 낮 시간 동안 한반도 전체에서 바람이 나타나며, 특히 중규모 특성인 해풍이 전체 해안 근처에서 뚜렷이 형성된다. 이러한 낮시간 동안의 해풍형성은 자료동화에 상관없이 나타난다. 그러나 해상의 바람은 위성자료 동화 유무에 따라 크게 다르다. 자료동화를 하지 않은 CDAS_no의 경우, 동해 앞바다에서 강한 바람이 형성된다. 그 강도는 10 m/s 이상 나타나며, 남해상에서도 강한 바람이 나타난다. 그러나 CDAS_yes에서 계산된 해양상의 바람은 CDAS_no에서 계산된 바람에 비하여 현저하게 약화되어 있음을 알 수 있다. 남해상의 바람분포에서는 같은 양상을 나타낸다.

즉 해상풍 위성자료동화를 통하여 동해와 남해상의 바람이 약하게 표현된다. 이것은 그림 3에서 설명한 바와 같이 동해상의 약한 강도를 가진 위성자료의 해상풍 동화의 영향이 수치실험 결과에 반영된 것이다. 그러나 서해상의 바람강도 변화는 동해나 남해상의 바람강도 변화보다 작다. 이것은 위성자료의 분포 때문으로 사료된다. QuikSCAT 위성자료는 위성궤도와 회전주기에 따라 결측이 발생하는데, 본 연구에서 사용된 자료는 서해 서북쪽부분에서 결측이 발생하였다. 이러한 결측에 의하여 서해상에서는 충분한 자료동화 효과가 나타나지 않은 것으로 보인다. 해뜨기 직전인 06 LST의 경우, 해상에서의 바람장의 차이는 낮 시간보다는 현저히 줄어든다. 그러나 야간 동해안을 따르는 태백산맥의 줄기를 따라 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. 대기가 안정화되면서 지형에 의한 영향이 증가하기 때문으로 사료된다. 이러한 위성자료동화에 의한 차이는 야간보다는 주간이 크게 나타나는 경향이 있다. 이것은 야간에 대기가 안정화되면서 해양상의 자료동화의 차이가 감소하는 것으로 사료된다.

그림 7은 위성자료동화의 영향을 정량적으로 평가

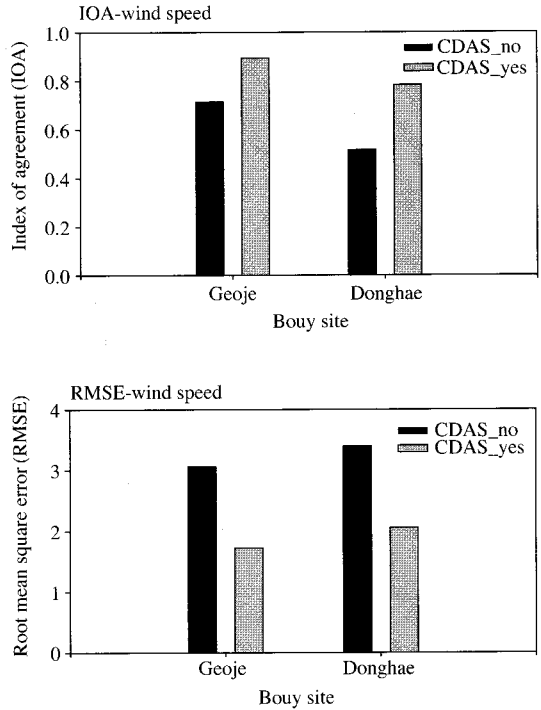


Fig. 7. RMSE and IOA indexes at Geoje and Donghae. Black and gray bars show the values of the indexes with CDAS_no and CDAS_yes, respectively.

하기 위하여 거제와 동해의 부이자료와 수치실험결과를 통계적으로 비교한 것이다. 본 연구에서는 일치도의 통계적인 지표인 RMSE (Root Mean Square Error)와 IOA (Index of Agreement)를 사용하였다. 각각의 통계적인 의미는 아래와 같다.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2}$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O_i| + |O_i - P_i|)}$$

여기서 P_i 와 O_i 는 각각 수치모델 결과값과 관측값을 의미하며, N 은 비교자료의 개수를 의미한다. RMSE의 경우 관측값과 계산값의 표준편차를 나타내며, IOA는 관측값과 계산값이 어느 정도 일치하는 가를 나타내는 것으로, 값이 1에 가까울수록 일치도가 높다는 것을 의미한다.

그림 7은 거제와 동해의 부이 관측치와 계산치를 비교하여 산출한 IOA와 RMSE 값이다. 비교에 사용한 자료는 각각 78개이며, 위성자료동화를 실시한 CDAS_yes에서 동해와 거제의 IOA 값은 각각 0.78과 0.89로 CDAS_no의 0.51과 0.71보다 높게 나타난다. 반면에 RMSE는 위성자료동화를 실시한 경우 동해와 거제의 값이 1.80과 2.15로 실시하지 않은 경우의 값인 3.1과 3.31보다 작게 나타난다. 그러므로 CDAS를 초기치로 이용한 경우, 해상풍 위성 자료동화는 거제와 동해의 부이자료와 비교할 때 각각 27%와 18% 정도 바람장 예측 정확도가 향상되었다. 특히 동해의 경우 자료동화의 영향이 크게 작용하여

예측 정확도 개선효과가 거제에 비하여 크게 나타났다. 그러므로 해상풍 위성자료는 정확도와 효율성면에서 정확한 바람자원을 평가하는데 중요한 자료로 활용될 수 있다고 사료된다.

3.2 위성자료와 초기자료 해상도의 관계

수치실험의 초기자료의 해상도에 따른 위성자료의 동화효과정도를 알아보기 위하여 각 실험에서 계산된 바람장과 온도장을 분석하였다. 먼저 초기자료 해상도에 따른 중규모 기상장의 차이를 분석하기 위하여 자료동화를 실시하지 않은 CDAS_no와 RDAPS_no의 바람장과 온도장을 비교하였다.

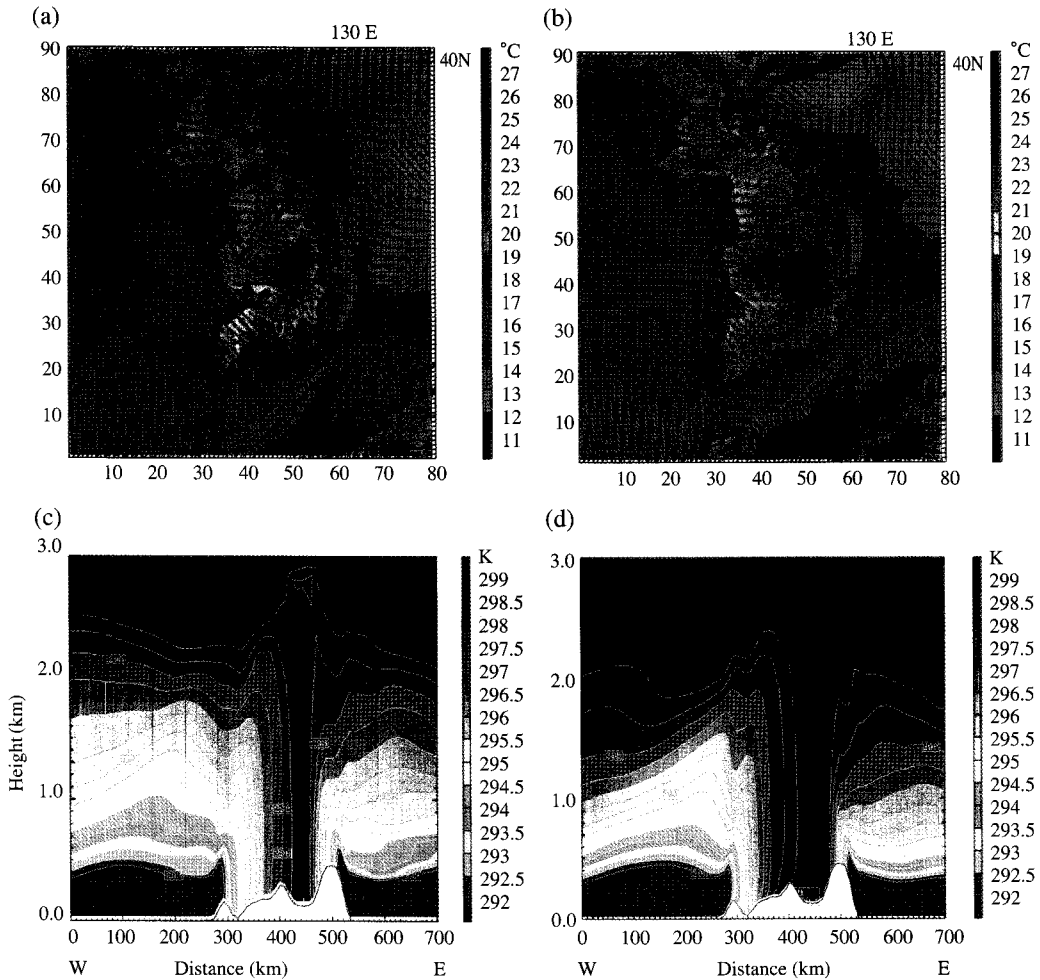


Fig. 8. Simulated results at 1800LST on 18 May 2003. Wind vectors and temperature from (a) CDAS_no and (b) RDAPS_no, and vertical potential temperature from (c) CDAS_no and (d) RDAPS_no.

그림 8은 CDAS_no와 RDAPS_no에 의하여 계산된 18 LST의 바람장과 온도장(a와 b), 그리고 연직온위장(c와 d)를 나타낸 것이다. 바람장은 지상 10 m의 값이며, 연직 온위장은 그림 4에서 나타난 한반도 동서 단면의 값을 나타낸 것이다.

RDAPS_no의 풍속이 CDAS_no의 풍속보다 낮게 나타난다. 이러한 풍속 차이는 동해와 남해상에서 크게 나타나고, 한반도 내륙 특히 중부지방에서도 크게 나타난다. 이러한 풍속의 변화는 지상기온의 변화를 초래한다. 지상기온을 살펴보면 RDAPS_no가 CDAS_no보다 전체적으로 높게 나타나고 있다. 특히 기온 24°C 이상의 지역이 CDAS_no의 경우 대구를 중심으로 한 영남 내륙지방에 한정되어 있으나 RD-

APS_no의 경우 영남 뿐 아니라 서쪽으로 확장한 영역에서 나타난다. 이것은 RDAPS_no의 약한 풍속에 의하여 한반도 서쪽의 찬공기의 이류가 감소하여 내륙의 온도가 높게 나타난 것이다. 이러한 약한 풍속은 초기조건으로 사용한 CDAS와 RDAPS의 공간 해상도의 차이에 기인한 것으로 공간해상도가 높은 RDAPS에서 지표면의 기록이 더욱 복잡한 형태로 표현되고 마찰의 정도가 강하기 때문으로 사료된다.

연직방향의 단면도를 보면 CDAS_no가 RDAPS_no보다 온도는 낮으나 좁은 지역에서 높은 혼합역이 나타난다. 이것은 그림 8의 a)와 b)에 나타난 수렴강도로 설명할 수 있다. 영남 내륙지방의 바람벡터를 보면 CDAS의 강한 동서 수렴이 나타난다. 이러한

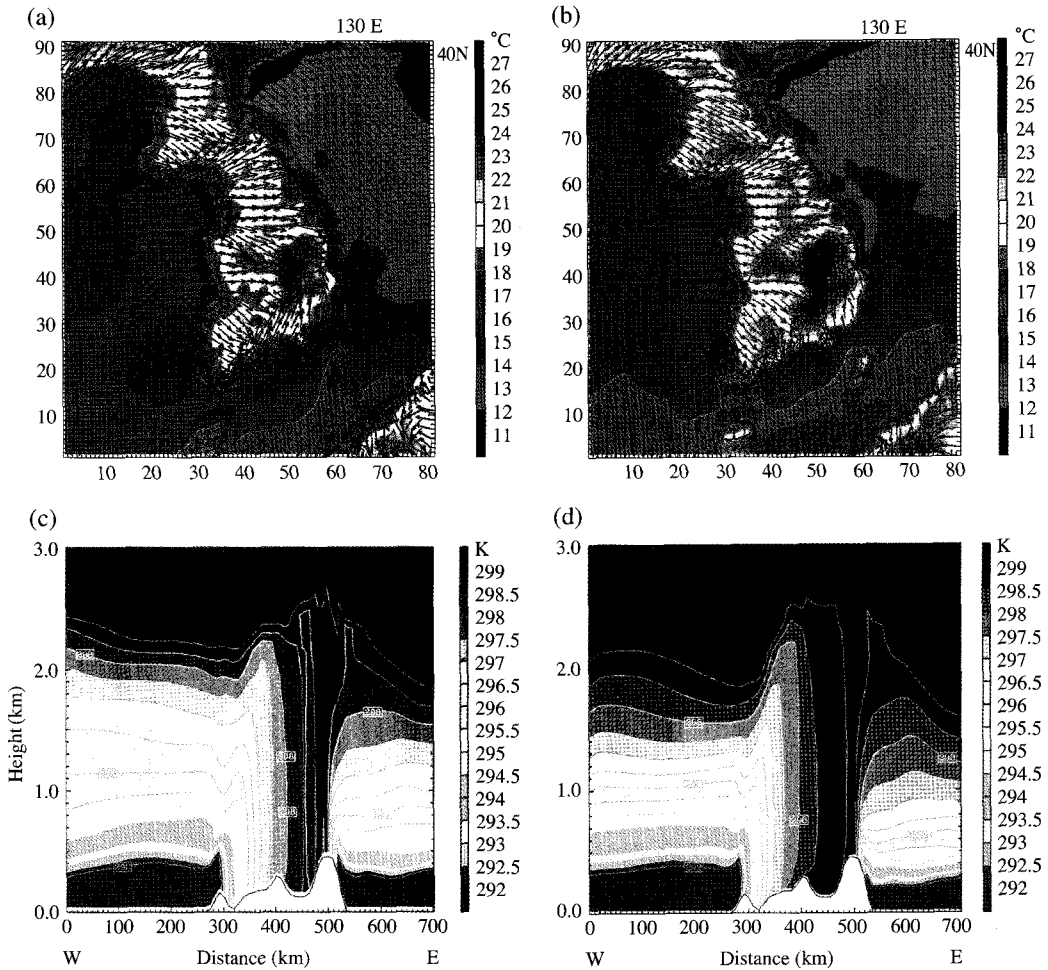


Fig. 9. Same as Fig. 8 except for CDAS_yes (left panels) and RDAPS_yes (right panels).

강한 수렴은 좁은 지역에서 공기의 상승을 유도한다. 이러한 상승에 의하여 좁고 높은 혼합역이 나타난다.

그림 8에서 살펴본 바와 같이 초기조건의 공간해상도는 한반도내의 중규모 기상장 변화에 큰 영향을 미치는데, 이러한 결과를 바탕으로 초기조건이 다른 경우 해상풍의 자료동화를 통한 중규모 기상장의 변화를 살펴보았다. 그림 9는 2003년 5월 19일 18 LST의 바람장과 지표면 온도 그리고 연직 온도 단면을 나타낸 것이다. 그림 8과 비교하여 해양상의 풍속 감소가 두드러지게 나타난다. 풍속의 감소는 초기 조건의 공간해상도에 상관없이 나타난다. 이것은 그림 6에서 살펴본 바와 같이 QuikSCAT 해상풍 자료 동화의 결과이다. 그러나 아직 CDAS_yes의 서해상의 바람이 RDAPS_yes보다는 크다. 그러나 자료동화를 하지 않은 경우 CDAS_no의 풍속이 RDAPS_no보다 높게 나타났던 대한해협 부근의 풍속은 반대로 RDAPS_yes가 강하게 재현된다. 이것은 동일한 위성 자료동화를 사용하였다 하더라도 초기자료의 해상도에 따라 달라질 수 있음을 의미한다. 내륙의 경우에도 그림 8에서 보였던 한반도 남서부지역에서의 강한 수렴은 보이지 않는다. 이것은 그림 8에서 서해와 동해에서의 강한 바람이 자료동화에 의해서 약화됨에 따라 수렴역이 사라진 것으로 사료된다.

연직단면도를 나타낸 그림 9의 (c)와 (d)를 보면, 그림 8에서 CDAS_no에서 좁고 높은 혼합 역영역이 나타났으나, 자료동화 후에는 반대로 혼합층의 고도가 RDAPS_yes가 높게 나타난다. 이것은 자료동화를 통하여 한반도 주변의 바람강도가 약화됨에 따라 지표면의 열적인 효과가 더욱 뚜렷이 나타난 것으로 볼 수 있다. 즉 자료동화 전에는 강한 서풍과 동풍이 수렴하여 좁고 높게 나타났으나 이러한 수렴을 일으키는 역학적인 요인이 감소함으로 지표면의 열플럭스의 상향이동에 의한 연직구조가 뚜렷이 나타난 것으로 볼 수 있다. 그러나 아직 서풍의 성분이 강하게 작용하기 때문에 지표면상의 온도 폭은 CDAS_yes에서 높게 나타난다. 그러므로 자료동화의 영향이 모형의 초기조건에 따라 다르게 적용될 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 얻어진 위성자료동화와 부이자료의 비교를 통하여 초기조건의 공간해상도의 위성자료 동화효율성을 평가하였다. 그림 10은 각 수치실험 결과와 부이에서 관측한 풍속의 일변화를 나타낸 것이

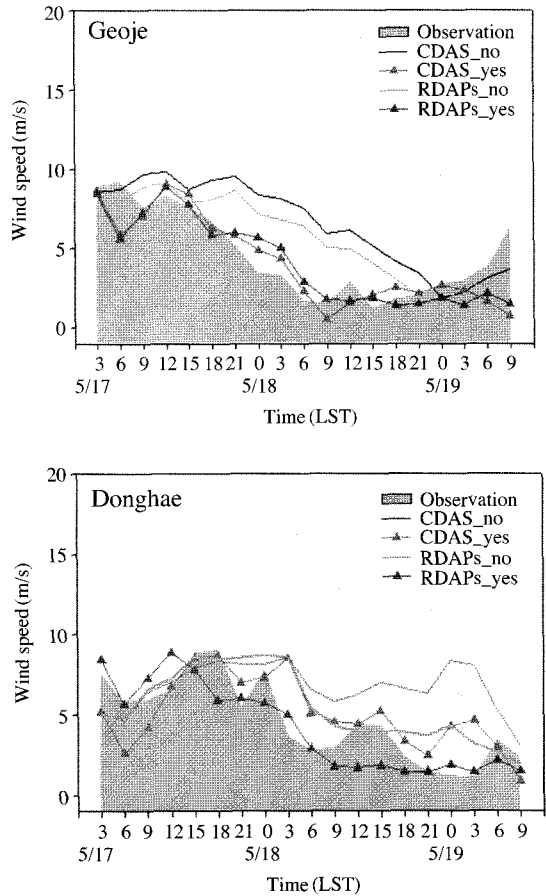


Fig. 10. Time variation of wind speed calculated by each 4 cases. Shading indicate observation.

다. 그림 10의 (a) 거제도와 (b) 동해의 관측자료를 나타낸 것이다. 관측과 비교할 때 자료동화의 효과는 초기자료에 관계없이 크게 나타난다. 거제의 경우 CDAS_yes와 RDAPS_yes의 차이가 작지만 CDAS_yes가 관측에 가깝다.

반면 동해의 경우 CDAS_yes의 정확도 개선이 크게 나타난다. 그러므로 위성자료동화에 의한 RDAPS와 CDAS의 개선효과 차이는 작으나, 전체적으로 CDAS에서 QuikSCAT의 자료동화의 정확도가 나은 것으로 보인다. 특히 낮 시간대에 크게 개선되는 경향이 있다. 이것은 바람장의 특성면에서 살펴볼 수 있다. 바람의 경우 평균장(mean flow)과 분산장(perturbation flow)로 나뉘는데 일반적으로 지형이 복잡하거나 열적인 불균일이 발생하면 난류 성분이 증가

한다. 이러한 측면에서 CDAS의 경우 공간 해상도가 작기 때문에 지형에 의한 기계적 난류 발생의 가능성이 작아진다. 바람의 역학적인 안정성은 평균장을 어떻게 유지하는가에 달려있는데 공간 해상도가 낮은 CDAS가 평균장을 잘 표현할 수 있다. 그러므로 RDASP 보다는 CDAS의 바람자료와 QuikSCAT의 해상풍 자료의 동화가 잘 맞는 즉 균형 잡힌 형태라고 볼 수 있다. 그러므로 해양상에서는 역학적인 평균장을 따르는 바람장이 중요시되기 때문에 QuikSCAT의 자료동화의 균형에 따라 정확도 향상이 우수한 것으로 볼 수 있다. 그러나 해상풍 위성 자료동화에 따른 한반도 남동해안의 바람장 예측정확도가 CDAS와 RDAPS에서 각각 22%와 15% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 즉 초기조건에 상관없이 두 경우 모두 위성자료 동화를 통한 해안 바람장 예측 정확도는 향상된다. 그러므로 위성자료의 동화효과는 비록 약간의 차이가 나타나지만 연안지역의 바람장 예측 정확도를 높이는데 기여할 것으로 판단된다.

4. 결 론

해상풍력자원 평가를 위해서는 연안지역의 해상풍을 정확히 예측 평가하는 것이 필수적이다. 초기기상자료의 해상도에 따른 위성자료동화가 중규모기상장 모의의 정확도 향상에 미치는 영향을 보기 위하여 수치실험을 실시하였다. 수치실험에 이용된 위성자료는 매우 높은 정확도로 해상풍의 분포를 측정하는 QuikSCAT를 사용하였다. 그리고 수치모형은 많은 사례연구를 통하여 검증된 중규모 역학 모형인 MM5를 적용하였다.

초기기상자료로 사용된 CDAS와 RDAPS는 각각 해상도에서 차이가 나타난다. 그러므로 이러한 해상도의 차이로 인하여 전체적인 바람장 분포는 유사하나 국지적으로 바람의 강도와 방향의 차이가 나타난다. 국지적인 분포 특성에서 RDAPS가 강한 바람을 모사하는 경향이 있다. 이것은 지형에 의한 강제력이 높은 해상도에서 강화되기 때문이다. 실험은 초기조건과 위성자료동화유무에 따라 4가지로 실시되었다.

위성자료동화의 효율성면에서 CDAS의 위성자료동화유무에 따라 해상과 해안선 부근의 바람강도의 변화가 크게 나타났다. CDAS를 초기치로 이용한 경

우, 해상풍 위성 자료동화는 거제와 동해의 부이자료와 비교할 때 각각 27%와 18%정도 바람장 예측 정확도가 향상되었다. 자료동화에 의하여 동해상의 바람강도가 작아졌으며, 이것은 실제 관측자료와 비교할 때 잘 일치한다. 그리고 주간과 비교할 때 야간의 경우, 동해안을 따르는 태백산맥의 줄기를 따라 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. 대기가 안정화되면서 지형에 의한 영향이 증가하기 때문에 사료된다. 그러나 자료동화의 영향은 야간보다는 주간이 강하게 나타나는 경향이 있다. 그리고 서해의 경우 동화정도가 약하다. 그 이유는 위성자료의 결측으로 인한 효과의 감소에 의한 것이다. 이러한 동해상의 동풍 감소에 의하여 서풍성향의 해풍이 한반도 내륙으로 강하게 유입된다. 그러므로 자료동화의 효과는 해안지역 뿐 아니라 내륙의 중규모 기류장의 변화에도 영향을 미친다.

그리고 RDAPS의 해상풍 위성 자료동화는 거제와 동해의 부이자료와 비교할 때 각각 18%와 12%로 CDAS 보다는 정확도 향상정도가 떨어진 것으로 나타났다. 그러나 향상정도의 차이는 있지만, CDAS와 RDAPS의 해상풍 위성 자료동화는 각각 평균 22%와 15%정도 풍속 예측 정확도가 향상되어 자료동화의 효율성이 확인되었다. 동해상의 바람을 보면 CDAS_yes의 바람강도가 RDAPS_yes 보다 약하게 모사한다. 반면 서해와 남해의 경우 마찬가지로 RDAPS_yes가 강하게 재현하고 있다. 이것은 동일한 위성자료동화를 사용하였다 하더라도 초기자료의 해상도에 따라 달라질 수 있음을 알 수 있다. 해안지역의 경우 CDAS에서 위성동화에 의한 예측향상효과가 높게 나타난다. 이것은 역학적으로 안정한 CDAS에서 높은 동화효율을 기대할 수 있으나, 지형강제력이 복잡하게 작용하는 곳에서는 고해상도의 초기조건인 RDAPS가 동화효율면에서 높게 나타나는 경향이 있다. 그러므로 위성자료 동화에 따른 정확도 향상면에서 지역적으로 작지만 미약한 차이를 나타낸다. 이에 위성자료 동화의 강도를 조절할 수 있다면 기상예측 정확도는 향상되리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 신재생에너지기술개발사업

의 지원으로 이루어 졌습니다.

참 고 문 헌

- 강인식, 김맹기, 심태보(1994) 한반도주위 해양에서의 해면 열수지와 응력의 계절변화, 한국해양학회지, 29(4), 325-339.
- 김현구, 최재우(2002) 풍력에너지 이용 및 개발현황, RIST 연구논문, 16(4), 479-485.
- 김진훈, 이동현, 주영철, 유승덕, 허종철, 변수환(2003) 국내 풍력자원 측정 및 결과 분석, 한국 풍력 및 전직 워크샵, 한국 풍력 기술 연구회, 72-80.
- 김현구, 이화운, 정우식(2005) 한반도 바람지도 구축에 관한 연구: I. 원격탐사자료를 이용한 해상풍력 자원 평가, 한국대기환경학회지, 21(1), 63-72.
- 나정열, 서장원, 한상규(1992) 한국근해의 월평균 해상풍, 한국해양학회지, 27(1), 1-10.
- 이동규(1998) NSCAT에 의한 한국근해의 해상풍, 한국원격탐사학회지, 14(1), 37-52.
- 이순환, 박근영, 류찬수(2006a) 레이더 자료동화에 따른 기상장 모의 민감도에 관한 수치연구, 한국환경과학회지, 15(1), 9-19.
- 이순환, 박광순(2006b) 해수면 온도변화에 따른 제주도 후면 흐름구조 변화에 관한 수치연구, 한국지구과학회지, 27(1), 61-72.
- Christmann, R. (2007) Wind energy in Germany-policy, status and research activity, International Workshop for wind energy, Jeju.
- Dudhia, J., D. Gill, Y.-R. Guo, K. Manning, W. Wang, and V. Collin (2000) PSU/NCAR mesoscale modeling system tutorial class note and user's guide, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, NCAR, 5-12.
- Lee, S.-H., D.-H. Kim, and H.-W. Lee (2007a) Satellite-based Assessment of the Impact of Sea-Surface Winds on Regional Atmospheric Circulations over the Korean Peninsula, International Journal of Remote Sensing (now print).
- Lee, S.-H., Y.-K. Kim, H.-S. Kim, and H.-W. Lee (2007b) Influence of dense surface meteorological data assimilation on the prediction accuracy of ozone pollution in the southeastern coastal area of the Korean Peninsula, Atmospheric Environment, 41(21), 4451-4465.
- Lee, S.-H., M. Chino, T. Kobayashi, and C.-S. Ryu (2005) Ocean model coupling with atmospheric model for prediction of radioactivity contaminant dispersion in emergency, Journal of Nuclear Science and Technology, 42, 1-13.
- Parsons, B., M. Milligan, B. Zavadil, D. Brooks, B. Kirby, K. Dragoon, and J. Caldwell (2004) Grid impacts of wind power: A summary of recent studies in the United states, Wind Energy, 7(2), 87-108.
- Zhang, D.-L. and W.-Z. Zheng (2004) Diurnal cycles of surface winds and temperatures as simulated by five boundary layer parameterization, Journal of Applied Meteorology, 43, 157-169.