

유해화학물질 대기확산 예측을 위한 RAMS 기상모델의
적용 및 평가
- CARIS의 바람장 모델 검증

Application and First Evaluation of the Operational RAMS Model
for the Dispersion Forecast of Hazardous Chemicals
- Validation of the Operational Wind Field Generation System in CARIS

김철희* · 나진균 · 박철진 · 박진호 · 임차순
윤 이 · 김민섭 · 박춘화 · 김용준¹⁾
국립환경연구원, 화학물질안전관리센터, ¹⁾라이다텍 연구소
(2003년 2월 10일 접수, 2003년 9월 23일 채택)

C.-H. Kim*, J.-G. Na, C.-J. Park, J.-H. Park, C.-S. Im,
E. Yoon, M.-S. Kim, C.-H. Park and Y.-J. Kim
National Institute of Environmental Research, ¹⁾Lidartech
(Received 10 February 2003, accepted 23 September 2003)

Abstract

The statistical indexes such as RMSE (Root Mean Square Error), Mean Bias error, and IOA (Index of agreement) are used to evaluate 3 Dimensional wind and temperature fields predicted by operational meteorological model RAMS (Regional Atmospheric Meteorological System) implemented in CARIS (Chemical Accident Response Information System) for the dispersion forecast of hazardous chemicals in case of the chemical accidents in Korea. The operational atmospheric model, RAMS in CARIS are designed to use GDAPS, GTS, and AWS meteorological data obtained from KMA (Korean Meteorological Administration) for the generation of 3-dimensional initial meteorological fields.

The predicted meteorological variables such as wind speed, wind direction, temperature, and precipitation amount, during 19~23, August 2002, are extracted at the nearest grid point to the meteorological monitoring sites, and validated against the observations located over the Korean peninsula.

The results show that Mean bias and Root Mean Square Error are 0.9 (m/s), 1.85 (m/s) for wind speed at 10 m above the ground, respectively, and 1.45 (°C), 2.82 (°C) for surface temperature. Of particular interest is the distribution of forecasting error predicted by RAMS with respect to the altitude; relatively smaller error is found in the near-surface atmosphere for wind and temperature fields, while it grows larger as the altitude increases.

Overall, some of the overpredictions in comparisons with the observations are detected for wind and temperature fields, whereas relatively small errors are found in the near-surface atmosphere. This discrepancies are partly

* Corresponding author
Tel : +82-(0)32-560-7142, E-mail: chkim5256@hanmail.net

attributed to the oversimplified spacing of soil, soil contents and initial temperature fields, suggesting some improvement could probably be gained if the sub-grid scale nature of moisture and temperature fields was taken into account.

However, IOA values for the wind field (0.62) as well as temperature field (0.78) is greater than the 'good' value criteria (>0.5) implied by other studies. The good value of IOA along with relatively small wind field error in the near surface atmosphere implies that, on the basis of current meteorological data for initial fields, RAMS has good potentials to be used as a operational meteorological model in predicting the urban or local scale 3-dimensional wind fields for the dispersion forecast in association with hazardous chemical releases in Korea.

Key words : Evaluation of meteorological model, Statistical index, RAMS (Regional Atmospheric Meteorological System), CARIS (Chemical Accident Response Information System)

1. 서 론

다양한 형태의 화학물질은 우리의 일상 생활 또는 산업 활동에 있어 필수 불가결한 것임에는 틀림이 없으나 그 중 일부는 독성이 강하여 대기 중에 노출 될 경우 인체 및 생태계에 치명적일 뿐만 아니라 환경 내의 여러 매체간을 이동하므로 특별한 감시 및 관리가 요구되는 유해물질이다. 국내에서도 최근 화학공업의 발달로 유해화학물질 사고사태는 계속 급증하고 있어(산업자원부, 2001) 보다 체계적인 대응 및 감시 시스템이 요구된다.

유해화학물질은 일반 기체상 오염물질에 비해 사고 발생시 특정 공간에 존속하는 시간스케일이 상대적으로 더 작기 때문에(Koutsenko and Ross, 1998; AIChE/CCPS, 1994) 그 효율적 대응을 위해서는 실시간 개념의 피해 확산 예측 및 대응 체계가 요구되는 경우가 많다. 따라서 일단 유해화학물질이 대기 중으로 노출되면 지형 조건 뿐만 아니라 그 때의 기상 상황이 매우 중요하게 작용하는데 특히 풍향, 풍속은 시간에 따라 수시로 변하게 되므로 실시간 대기 확산 예측은 결국 3차원 바람장을 어떻게 도출하느냐와 필연적으로 연결된다. 이러한 측면에서 현재 국립환경연구원에서 화학공단을 대상으로 운영하는 화학물질사고대응정보시스템(CARIS : Chemical Accident Response Information System, 국립환경연구원, 2002)은 유해화학물질로 인해 환경 오염사고가 발생할 경우 그 피해 확산 예측을 통해 실시간 대응 정보를 제공하기 위한 시스템으로서 3 차원 기상 및 대기 확산 모델이 그 핵심이다. 그러나 CARIS는

주로 도시 규모 이하의 상세 바람장 생성 뿐만 아니라 실시간 생성이라는 부담을 가지고 있어 향후에도 많은 투자와 연구가 필요한 분야이다.

바람장 도출은 일반적으로 진단적(diagnostic) 방법이 실제 대기에 근접한 결과를 얻을 수 있으나 과거의 관측된 자료를 이용한다는 측면에서 실시간 개념으로는 부적합한 경우가 많아 기상모델을 이용한 예측적(prognostic) 방법이 더 합리적일 수 있다. 그러나 예측적 방법 또한 대기의 운동 역학 방정식에 근거하므로 모델이 모의하는 대기와 실제 대기가 구조적으로 달라 실제 관측 대기와의 오차가 항상 문제시되므로 신뢰도 개선을 위한 지속적인 연구가 요구된다.

예측 모델에 의해 생산되는 3차원 바람장은 실제 대기와 비교해 볼 때 크게 두 가지 종류의 오차로 구분할 수 있다. 첫째는 모델의 대기의 역학적 강제력(dynamical force)의 한계에 의한 구조적 오차(systematic error)이며, 두번째는 초기조건이 갖는 작은 오차가 모델의 비선형성이나 불안정성에 의해 자라나는 오차이다. 이 중 구조적 오차는 모델 대기의 평균적인 상태와 실제 대기와의 차이를 좁히는 것인데 이는 모델의 물리적, 역학적 구성이 실제 대기와 다르기 때문에 필연적으로 발생한 것으로서 어느 수치 모델에서든지 존재하게 된다(Boer, 1993; Wallace and Woessner, 1981). 따라서 구조적 오차를 줄인다는 것은 모델의 역학적, 혹은 물리적 과정을 개선하여 모델 대기를 실제 대기에 근접시키는 것으로 이는 모델 내에서 대기 중에 포함된 저주파 변동에 따라 달라질 수 있고 또 구조적 오차의 단순한 보정은 또 다른 오차의 원인이 될 수 있다고 보고되고 있다

(O'Lenic and Livezey, 1988). 기존 연구에서는 예측 이후에 구조적 오차를 보정함으로써 유의한 오차의 감소가 확인되었다(Johanson and Saha, 1989; Tracton *et al.*, 1989).

반면 부적절한 초기조건에 의해 나타나는 오차에 대한 연구는 주로 동일한 두 모델을 이용하여 초기 조건을 각각 다르게 주고 그 결과를 비교 분석한 연구가 많다. 예컨대 모델의 초기조건에 작은 섭동들을 임의로 분포하게 한 결과와 섭동을 없앤 후의 결과를 비교하면 시간에 따라 두 모델 결과의 차이가 현저하게 늘어나는 것이 확인되었다(Shukla, 1981). 여기서 두 모델의 서로 다른 결과는 순전히 모델의 초기조건에 의해 만들어진 것이므로 초기장이 갖는 작은 오차가 모델의 비선형성이나 불안정성에 의해 그 오차가 크게 증가한다는 증거가 된다. 이상의 연구결과들을 종합하면 결국 모델의 신뢰도 개선을 위해서는 구조적 오차를 줄이는 것보다는 선정된 모델에 최적의 초기조건을 제공함으로써 그 예측 성능을 높이는 것이 더 효율적일 수 있음을 반증한다.

따라서 본 연구는 유해화학물질 대기확산 예측을 위해 상시 운영되는 CARIS의 예측 바람장 모델의 신뢰도에 대한 연구로서 모델의 초기 자료에 역점을 두어 예측 바람장의 개선 방향을 논하고자 한다. 먼저 화학 공단을 중심으로 현업으로 운영되는 CARIS를 간략히 소개하고 그 예측 바람장 모델로 운영되고 있는 기상 모델인 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System, Pielke *et al.*, 1992)의 초기장 구축에 이용되는 기초 자료를 기술하고 이것으로부터 예보된 바람장을 실제 관측된 대기에 견주어 그 신뢰도를 통계적으로 살펴보고자 한다. 이러한 일차적 검증 결과는 모델의 신뢰도 개선을 위한 후속 연구에 중요한 지표가 될 것이며 초기 자료의 품질개선 방향이 자연스럽게 제시될 수 있을 것이다.

2. 화학물질사고대응정보시스템 (CARIS) 그리고 RAMS

2.1 화학물질사고대응정보시스템 (CARIS)

CARIS는 유해화학물질로 인한 환경 오염사고가 발생할 경우 그 피해 확산 예측 및 대응 전략을 세우기 위한 시스템으로 현재 주요 화학공단을 대상으로

Table 1. Meteorological data used for the generation of 3-dimensional initial meteorological fields for operational RAMS model in CARIS.

Meteorological data	Characteristics
GDAPS (Global Data Analysis and Prediction System)	Global Circulation Model output 55 km (or 110 km) grid spacing global data 10 days forecasting data 1 hour time interval data
GTS (Global Telecommunication System)	153 Observations over the Eastern Asian Area including 102 surface observation over the Korea Data : SNOP, TEMP, SHIP, BUOY, SEA UPP Surface measurement : 1 hour time interval data Upper atmosphere : 3 hour time interval data
AWS (Automatic Weather Station)	1 hour (or 1 minute) interval data Wind speed/direction, temperature, precipitation 680 stations over the Korea

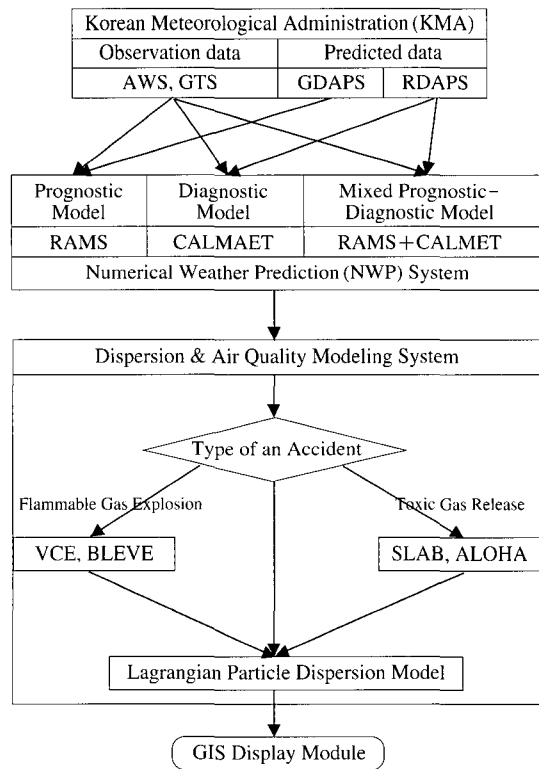


Fig. 1. Sketch of numerical weather prediction and air quality modeling system in Chemical Accident Response Information System(CARIS).

실시간 운영되고 있으며 3차원 기상정보 생성 및 대기 확산 모델이 그 핵심이다(국립환경연구원, 2002).

CARIS는 화학공단 DB시스템, 대응정보 시스템, 기상 및 대기 확산 모델링 시스템, GIS 표출시스템으로 구성되며 이 중 기상정보생성은 표 1에 제시된 바와 같이 기상청으로부터 환경부로 전송되는 전구 예측시스템(GDAPS: Global Data Analysis and Prediction System) 자료, 지역 예측시스템(RDAPS: Regional Data Analysis and Prediction System) 자료, GTS(Global Telecommunication Station) 자료, AWS(Automatic Weather Station) 자료 그리고 지상 및 상층 기상관측자료를 실시간으로 수집, 상세 바람장 모델의 초기장으로 사용한다.

기상 모델의 운영은 모델의 종류 및 활용 방법에 따라 4 가지로 구축되었는데 RAMS를 이용한 예측 방식, CALMET(Scire *et al.*, 1990)을 이용한 진단 방식, 그리고 두 방식을 혼합한 혼합 방식이 구축되어 있으며 상시에는 RAMS를 이용한 예측방식으로 운영하고 있다. 특히 화학 공단을 주 권역으로 하는 영역에서는 1 km×1 km 이하의 분해능을 가진 3차원 상세 예측 기상장을 Cluster 환경에서 하루 두 번(매번 3시간 이내에 모델 수행 완료됨) 생산하여 24시간 예보가 완료된다. 생산된 기상자료는 대기 확산 모델의 기초 자료로 사용되는데 CARIS의 대기확산 모델은 일반 대기질 모델과는 달리 화학물질 사고 형태에 따라 고유하게 적용할 수 있는 화재모델, 폭발 모델, 독성증기확산모델 등이 다양하게 운영되며 최종 대기질 모델 결과는 바람장과 함께 GIS 위에 표출되어 사고 현장의 일차 대응의 기초자료로 사용된다(그림 1).

2.2 RAMS의 국내 활용 현황

CARIS의 실시간 기상 모델로서 구축된 RAMS의 기원은 남부 Florida 지역에 적용했던 해륙풍 모델(Pielke, 1974)로서 이후 콜로라도 주립대에서 추가 개발하여 도시 규모 이하부터 대규모의 대기 순환까지 사용될 수 있도록 개발되었다(Pielke *et al.*, 1992).

국내에서도 그 활용도가 점점 증가하고 있는데 주로 해안가를 중심으로 해륙풍을 연구하여 대기 오염 물질의 거동을 연구하는 사례가 많으며 상시 운영보다는 특정 사례에 대한 분석적 연구가 활발하였다(김과 오, 2000; 오와 김, 2000; Lee *et al.*, 1998). 따라

서 그 초기조건을 단순화하여 사용한 후 시간에 따라 대기의 지배 방정식으로부터 지형 및 해양-대기의 지형 및 지표 특성의 차이로 생기는 산곡풍 혹은 해륙풍의 효과를 연구하였다. 이 경우 지표의 비열차이로 유도되는 열적 강제력(thermal forcing)과 지형 효과가 중요하므로 비록 상대적으로 규모가 큰 격자 체계로부터 오는 중관규모 강제력(synoptic forcing)을 더 작은 격자 체계에 효과적으로 전달하기 위한 동지 격자(nested grid)를 채택하고 있더라도 이를 효과적으로 사용하지 못한 경우가 많았다. 예를 들어 해륙풍의 영향이 적은 내륙 지방의 경우 중관 규모 강제력이 상대적으로 더 중요해지므로 이를 무리없이 적용할 수 있도록 시간에 따른 중관규모 강제력의 변화량을 경계조건을 통해 계속적으로 제공하는 것을 요구한다.

따라서 시간에 따른 중관규모 강제력을 효과적으로 적용하기 위해서는 현 운영 모델의 규모보다 큰 모델의 자료 혹은 전구 모델의 예측결과로부터 넘겨받아 이를 입력 자료로 사용하는 것이 바람직한데 김 등(2003)은 오존 고농도 사례 모의를 위해 MM5 모델링을 NCEP(National Centers for Environmental System)에서 제공하는 6시간 전 지구 재분석 자료(GDAS: Global Data Assimilation System)를 사용한 것이 그 예이다. 이 때 상시 운영 혹은 장기간의 기상장 예보를 위한 기상 모델 운영에는 규모가 큰 예보 모델의 결과를 기초 자료로 활용하는 것은 모델의 신뢰도에 중요하게 작용하게 된다.

2.3 RAMS의 격자계 및 초기 입력자료

현재 CARIS의 상시 운영 모델인 RAMS는 한반도를 중심으로 3개의 동지 격자계를 포함하고 있다. 즉 동아시아를 영역으로 하는 수평격자간격 48 km의 성금격자 영역(100×100), 남·북한과 주변 해안을 포함하는 수평 격자간격 12 km의 제1 동지격자 영역(100×100), 남한을 대상으로 격자 3 km 간격의 제2 동지격자 영역(80×80), 그리고 수평 격자 1 km의 화학 공단이 집중된 4개 권역(수도권, 대산권, 여천-광양권, 부산-울산권)의 상세 제3 동지격자 영역(50×50)으로 이루어져 있다(그림 2). 각 모델의 연직 층수는 25개 층으로 동일하며 동지격자끼리의 상호 작용은 상대적으로 더 상세한 동지 격자의 모델 자료를 위해 그 다음으로 덜 상세한 성금 동지 격자

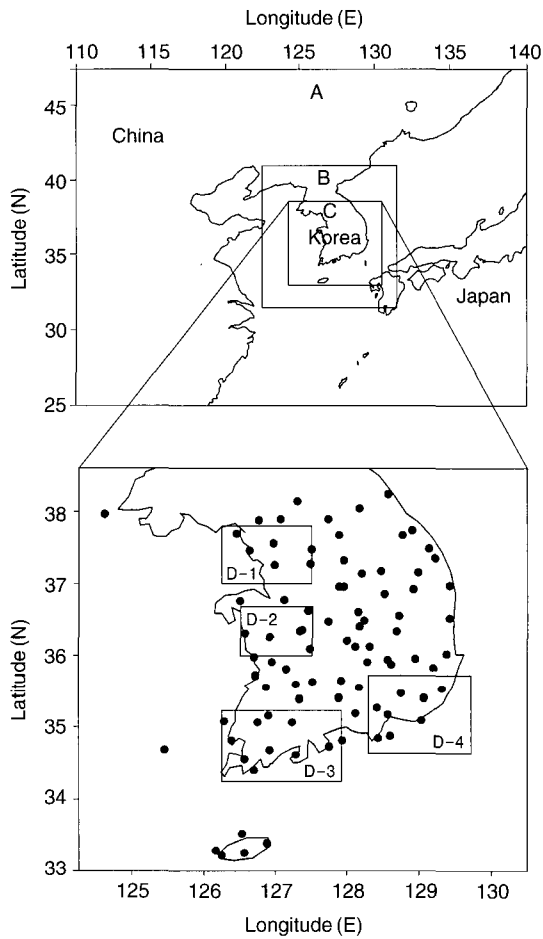


Fig. 2. Domain of the three nested grids in the operational meteorological model (RAMS). A: Coarse grid (30 km grid spacing), B: nest-1 (10 km grid spacing), C: nest-2 (3 km grid spacing), and D: nest-3 (1 km grid spacing). Solid circles denote meteorological monitoring stations operated by the Korea Meteorological Administration (KMA).

의 예보된 변수를 경계조건으로 사용하는 일방 상호 작용(one-way interaction) 방법을 적용하고 있다. 각 모델에 사용된 지형 자료는 상세 격자 영역의 자료인 1 km 간격의 지형 자료와 토지이용도 자료를 가공하여 사용하였다.

모델의 수행을 위한 적절한 초기 입력 자료의 사용은 일차적으로는 모델의 역학에 적응하는 시간을 줄일 뿐만 아니라 예측 결과의 성능을 높이게 된다. 현재 기상청으로부터 수신하여 RAMS의 초기조건에

사용되는 기초 자료는 GDAPS, GTS, 그리고 AWS 자료인데(표 1) 특히 GTS는 해양에서의 자료가 부족하다는 약점이 있으나 전체 동아시아 영역에 대해 약 150여개(한반도의 약 50여개의 지상관측소 자료 포함)의 지상 기상 관측 자료와 약 30여개의 상층 자료를 포함하고 있다. 또 GDAPS 자료를 생산하는 기상청의 전구 모델은 연속적인 대기 정보를 반영시켜 전 지구 규모로 초기 자료를 처리하는 4차원 자료 동화 과정을 통해 생성된 자료로서(조, 1994) 이 과정에는 종관 관측(지상, 존테) 및 비 종관 관측자료(위성, 항공기, 선박, 부이, 및 특별 관측 등)도 이용된다.

CARIS에서는 이를 기상청으로부터 실시간으로 수집, 종합하여 RAMS에 너징(nudging)을 위한 역학적 초기화 과정을 거치게 되는데 이 때 GDAPS, GTS, AWS로부터 초기 자료를 구성하고 GDAPS로부터 측면경계 및 꼭대기조건을 넘겨받아 4차원 자료동화방법(4DDA: Four-Dimensional Data Assimilation technique)으로 RAMS 역학을 제어하게 된다. 4DDA는 동화 영역에서 RAMS 예보 결과와 관측자료 등 외부에서 제공하는 자료와의 차이를 모델의 강제력에 더하여 모델을 제어하는 기술로서 다음과 같이 표현된다(ATMET, 2002).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{(\Phi_{obs} - \Phi_m)}{\tau}$$

여기서 Φ 는 예측 기상 변수를, 그리고 Φ_{obs} 와 Φ_m 는 각각 관측자료와 모델 자료를 나타내며, τ 는 너징을 통해 RAMS의 역학을 제어하는 시간스케일(현 3.6×10^3 sec 사용)을 나타낸다. 따라서 측면 및 꼭대기 근처의 시간스케일인 τ_{lat} 와 τ_{top} 는 측면 $x_1 \leq x \leq x_B$ 및 꼭대기 $z_1 \leq z \leq z_T$ 범위에서, $\tau_{lat} = \tau[(x-x_1)^2/(x_B-x_1)^2]$, $\tau_{top} = \tau[(z-z_1)^2/(z_T-z_1)^2]$ 로 자료동화에 기여하게 된다. 여기서 x_B , z_T 는 모델의 측면 및 꼭대기를 말하며 x_1 와 z_1 는 각각 내부의 자료동화 시간 스케일이 무한대가 되는 범위(현재 측면 및 꼭대기에서 5번째)를 나타낸다. 반면 초기조건에 활용되는 관측 자료는 $\partial \Phi / \partial t = \epsilon(x, y, z) \cdot (\Phi_{obs} - \Phi_m) / \tau$ 로 나타내는데 이 때 가중함수 ϵ 는 관측된 지점에 가까울수록 그 함수값은 커지게 된다(ATMET, 2002). 결국 현 CARIS의 예측 모델인 RAMS의 초기 추정장을 위해 개개의 관측 자료가 초기장 이후의 상태만을 결정하기 위해 사용되고 있다. 한편 RDAPS에서는 자료의 연속성과 활용도

를 높이기 위해 어느 시간에서의 관측 자료가 전후 시간의 분석장에 모두 영향을 주는 4차원 변분 자료동화방법(4DVAR; Four dimensional variational method, Talagrand and Courier, 1987)을 적용하고 있다.

3. CARIS의 예측 바람장 검증

3.1 사례

상시 생성되는 예측 바람장은 그 1차 신뢰도 분석을 위해 강수와 운량이 모두 관측된 기간인 약 1주일간(2002년 8월 19일~23일간) 모든 기상 변수가 출력되었다. 이 기간의 종관 기상 특징은 19일 오전까지 태풍 판폰(2002년 13호)이 멀리 일본 도쿄 남쪽 해상에서 느리게 북동진하는 가운데 태풍의 간접 영향으로 남동해상에서는 바람이 상대적으로 강하게 불었으나(그림 3) 한반도 상공 850 hPa 지균풍속은 3~5 m/s(평균 4.1 m/s)로서 여름철 종관규모 강제력이 크지 않는 사례로 분류될 수 있다. 강수는 그림 3에서 보듯이 22일부터 북서쪽에서 다가오는 기압골의 영향으로 남고북저형의 여름철 기압 패턴을 이루었고 중서부 지방부터 전국적으로 강수가 발생하여 사례 기간 강수 예측검증도 수행하였다.

3.2 자료 및 방법

바람장의 검증은 격자 1 km 간격의 화학공단 영역(상세 격자 이외의 영역에서는 남한 격자 3 km 영역)의 예측값에서 관측소에 가까운 격자점의 자료를 선택하여 이를 독립 변수로, 그리고 관측지점 자료를 종속 변수로 설정하였다. 관측 자료는 서울을 포함한 한반도 76개 지점의 지상 관측소 및 6개 지점 고층 관측 자료가 이용되었다. 분석된 기상 변수로는 지상, 850 hPa 및 500 hPa에서의 풍속 및 풍속의 동서 성분(u)과 남북성분(v), 온도 그리고 강수량이다. 신뢰도의 상대적인 비교 분석을 위하여 RDAPS의 동일 사례 기간의 예측 오차를 참고하였으며 CARIS에서 RAMS는 하루 두 번 자료가 업데이트 되므로 12시간 전에 예보된 자료와 함께 24시간 전의 예보된 자료도 신뢰도 분석에 참고하였다.

모델의 결과를 검증할 때 일반적으로 평균 제공근오차(Root Mean Square Error; RMSE), 평균 편차(Mean Bias), 일치도 지수(Index of Agreement, IOA),

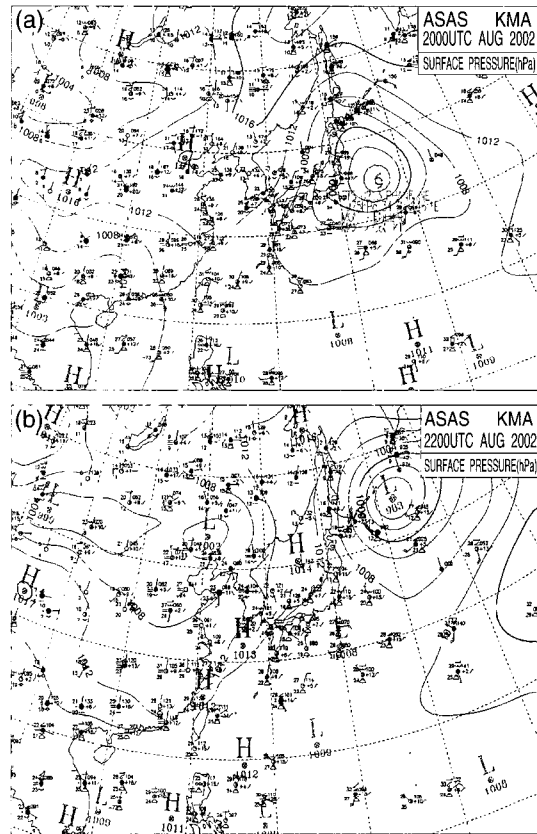


Fig. 3 Surface weather charts at (a) 00 UTC August 20, (b) 00 UTC August 22 2002.

상관 계수 등이 많이 사용되는데(Pielke, 1984; Fox, 1981; Willmott, 1981) 본 연구에서도 풍향, 풍속, 온도에 대해 RMSE, Mean Bias, IOA를 적용하였으며 그 정의는 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (P_i - O_i)^2}$$

$$Mean\ Bias = \frac{1}{N} \sum (P_i - O_i)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (P_i - \bar{P}_i + O_i - \bar{O}_i)^2}$$

이 때 P_i 및 O_i 는 각각 모델값과 관측값을 나타내며 \bar{P}_i 와 \bar{O}_i 는 각각 P_i 와 O_i 의 평균

($\bar{P}_i = \frac{1}{N} \sum P_i$ 및 $\bar{O}_i = \frac{1}{N} \sum O_i$)을 가리킨다.

한편 단속 변수인 강수량, 강설량 등은 단속 변수의 양 뿐만 아니라 그 유무의 정확도를 검증할 수 있도록 다음과 같이 예보 신뢰도 지표를 사용하였다 (기상청, 1998).

$$\begin{aligned} \text{ACC (Forecast Accuracy)} &= (Z+H)/(Z+M+F+H) \\ \text{BIAS (Bias Score)} &= (F+H)/(M+H) \\ \text{POD (Probability Detection)} &= H/(F+H) \\ \text{FAR (False Alarm Ratio)} &= F/(F+H) \\ \text{CSI (Critical Success Index)} &= H/(F+M+H) \end{aligned}$$

이 때 Z, M, F, H는 시간 및 공간상에서 짝을 이룬 예측값 및 관측값에 따라 다음과 같이 정의된다.

Z (Zero) = 관측값과 모델값이 다 강수가 존재하지 않는 경우의 수
 M (Miss) = 관측값은 존재하나 모델값이 존재하지 않는 경우의 수
 F (Fail) = 모델값은 존재하나 관측값이 존재하지 않는 경우의 수
 H (Hits) = 관측값과 모델값이 다 존재하는 경우의 수

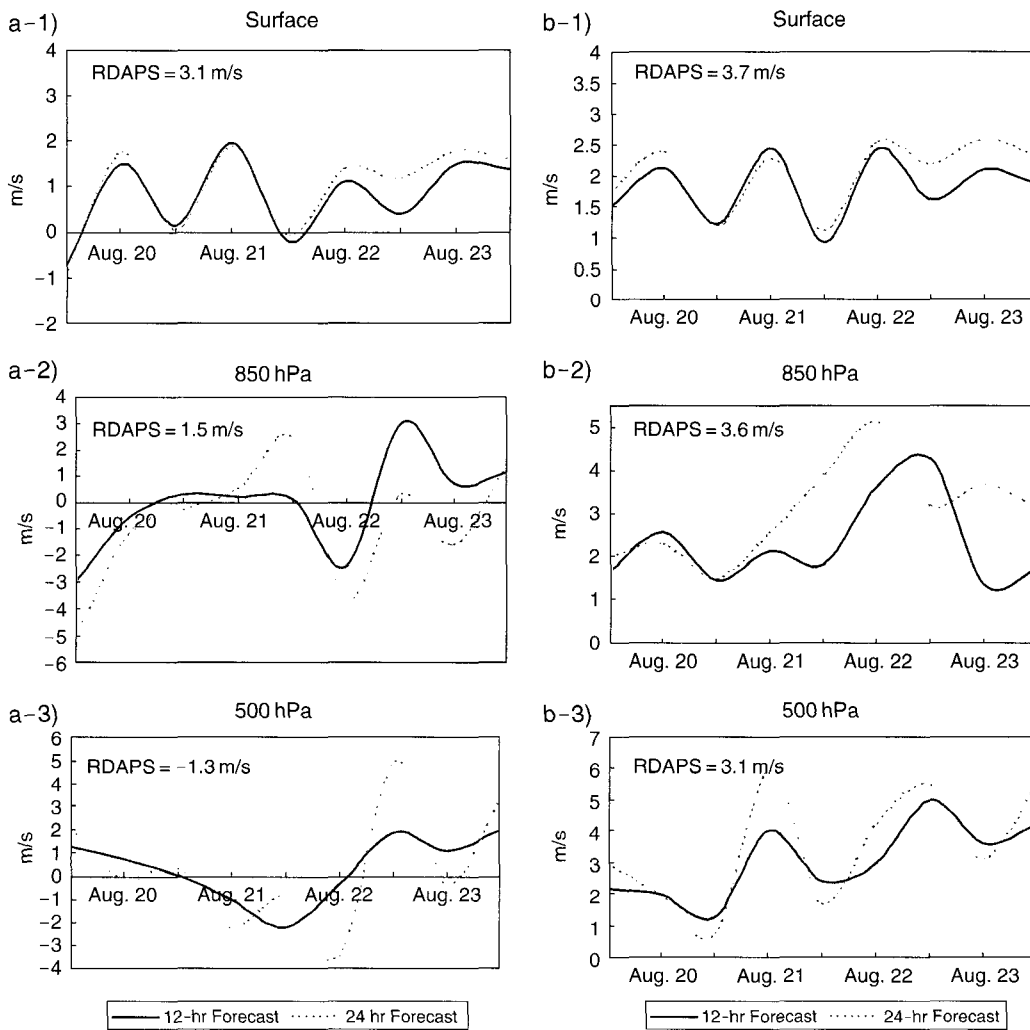


Fig. 4. Time series of model performance for wind speed averaged over the Korean peninsula. a) Mean Bias error, and b) Root Mean Square Error (RMSE) at 10 m above the ground level, 850 hPa, and 500 hPa level, respectively, during 19 ~ 23, August 2002.

수이다.

따라서 FAR은 0에 가까울수록 그리고 ACC, BIAS, POD, CSI는 1에 가까울수록 단속변수의 예측 성능은 좋아지게 된다.

3.3 결과 및 토의

지상 (10 m), 850 hPa, 500 hPa 고도에서의 풍속의 12시간 및 24시간 예보값에 대한 Mean Bias와 RMSE를 그림 4에 나타내었다. 그 결과 RAMS와

RDAPS의 상·하층간의 오차 분포가 매우 특징적으로 나타났다. 즉 지상에서의 Mean Bias는 약 1.5 m/s 내외로서 RDAPS (평균 약 3.1 m/s)에 비해 약 1/2 정도였고 또한 연직으로 비슷한 오차를 보인 반면 (그림 2a) RDAPS는 상층으로 갈수록 오차가 줄어들었다. 그 결과 상대적으로 RAMS는 RDAPS에 비해 지상에서는 작은 오차가, 그리고 상층으로 갈수록 큰 오차가 나타났다. RMSE도 이와 비슷한 연직 경향을 보이는데 RAMS는 지상에서는 적게, 그리고 상층으로

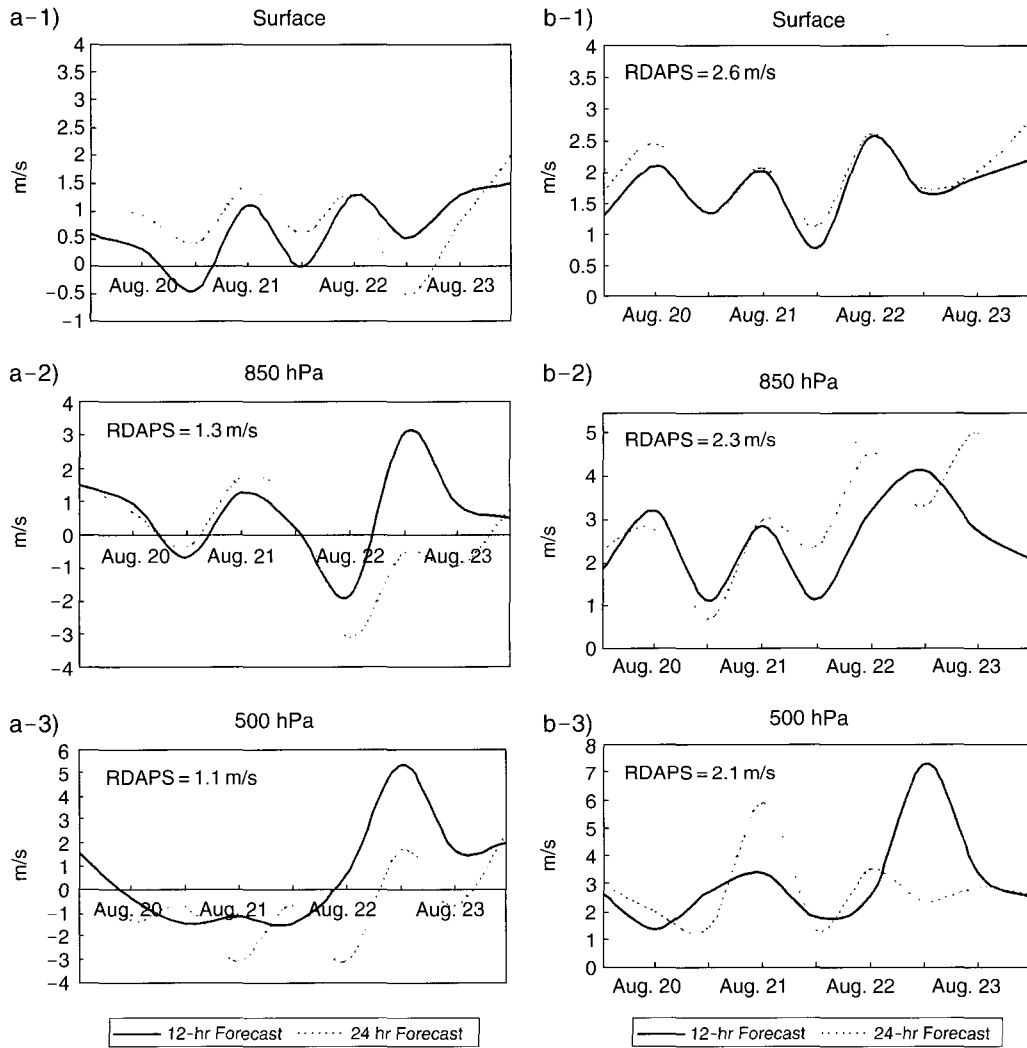


Fig. 5. Time series of model performance for east-west (u) component of wind speed averaged over the Korean peninsula. a) Mean Bias error, and b) Root Mean Square Error (RMSE) at 10 m above the ground level, at 850 hPa, and at 500 hPa level, respectively, during 19~23, August 2002.

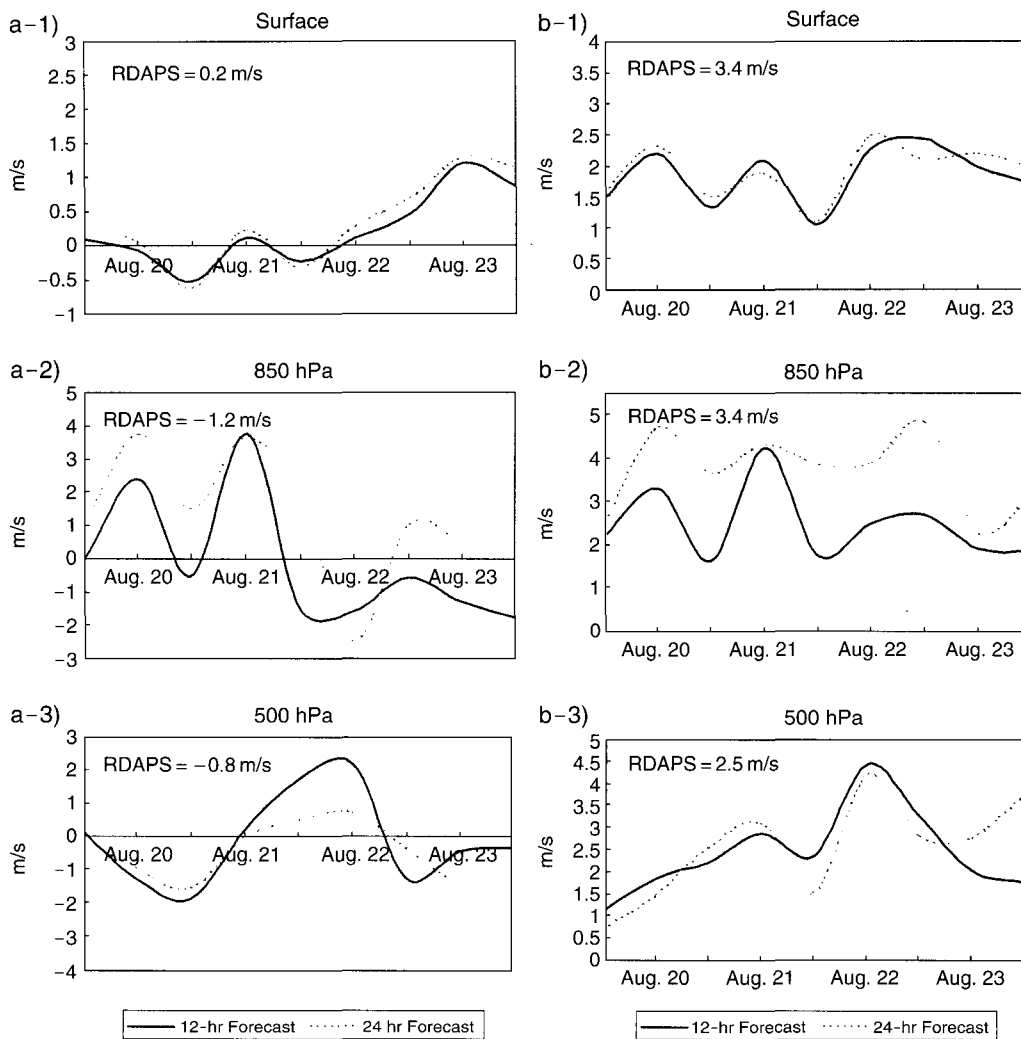


Fig. 6. Time series of model performance for south-north (v) component of wind speed averaged over the Korean peninsula. a) Mean Bias error, and b) Root Mean Square Error (RMSE) at 10 m above the ground level, 850 hPa, and 500 hPa level, respectively, during 19~23, August 2002.

로 갈수록 오차가 크게 나타난 반면 RDAPS는 연직으로 거의 비슷한 오차 분포를 보여 지상에서는 RAMS가, 그리고 상층에서는 RDAPS가 더 안정된 예측 성능을 보였다.

성분별 풍속의 오차를 그림 5와 그림 6에 제시하였는데 고도에 따른 연직변화 경향은 풍속의 패턴과 유사하였다. 즉 풍속의 동서성분(u)의 Mean Bias는 고도에 따라 증가한 반면 RDAPS는 약 1.2 m/s 내외로서 연직으로 비슷하게 나타나 결국 상대적으로는

지상에는 작게, 그리고 상층으로 갈수록 크게 나타나는 경향을 보였다(그림 5a). RMSE도 그 크기만 다를 뿐 비슷한 경향을 보여 지상에서는 RAMS(≈ 1.5 m/s)가 RDAPS(≈ 2.5 m/s)보다 적게, 850 hPa 고도에서는 비슷하게, 그리고 500 hPa 고도에서는 RDAPS보다 크게 나타났다(그림 5b). 풍속의 남북성분(v) 또한 비슷한 경향을 보여(그림 6) RAMS의 RMSE가 RDAPS에 비해 상대적으로 적게, 상층에서는 비슷하거나 크게 나타났다(그림 6b).

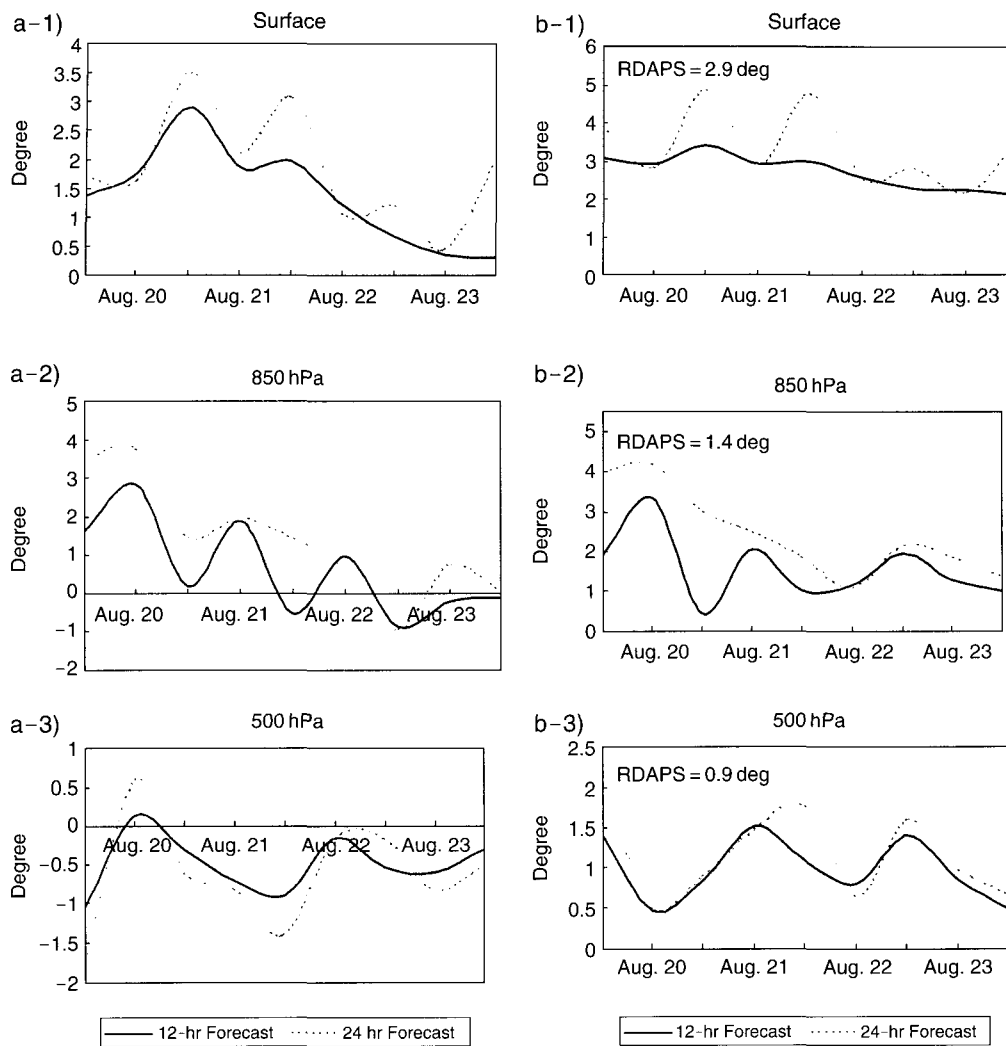


Fig. 7. Time series of model performance for temperature averaged over the Korean peninsula. a) Mean Bias error, and b) Root Mean Square Error (RMSE) at 10 m above the ground level, 850 hPa, and 500 hPa level, respectively, during 19~23, August 2002.

이상의 RAMS 예보값의 고도에 따른 오차의 경향은 모델의 역학 및 초기장에 사용된 자료의 특성으로부터 해석할 수 있다. RAMS는 국지 규모 특성 자료인 지형, 토지이용도 등의 하층 자료가 국지규모 분해능(현재 1 km 간격)에 초점을 두어 일사량이 많은 맑은날의 경우 지형 및 지표면 특성에 의한 강제력이 모델의 하층 바람을 지배하게 된다. 반면 상층으로 갈수록 하층에서의 지형 및 미기상학적 강제력의 영향이 적어지면서 RDAPS와 동일한 종관 규모

의 영향권에 놓여지게 되는데 실제 RDAPS에서는 상층 대기의 흐름을 유발할 수 있는 적절한 종관 규모 강제력이 RAMS보다 다양한 상층 관측자료로부터 구성되므로(기상청, 1998) 상대적으로 높은 신뢰도를 보인 것으로 판단된다.

온도장의 고도별 예측 오차는 그림 5에 제시된 것과 같이 지상에서는 RMSE 및 Mean Bias가 RDAPS에 비해 약 2~3배 크게 나타났고 상층으로 갈수록 그 오차는 줄어드는 경향을 보였으나 여전히 RDAPS

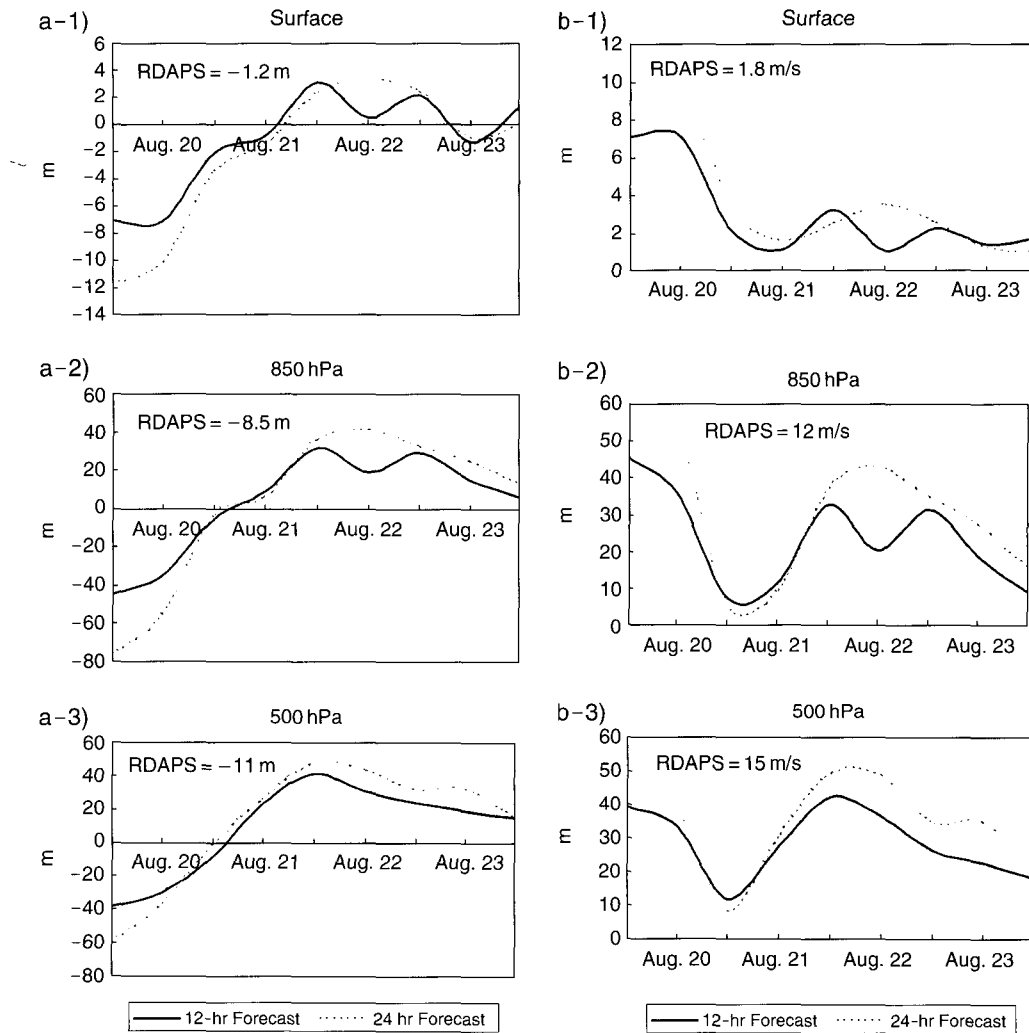


Fig. 8. Time series of model performance for geopotential height averaged over the Korean peninsula. a) Mean Bias error, and b) Root Mean Square Error (RMSE) at 10 m above the ground level, 850 hPa, and 500 hPa level, respectively, during 19~23, August 2002.

보다는 훨씬 큰 오차를 보였다. 기압(그림 6)도 온도장과 비슷한 경향을 보여 Mean Bias, RMSE 모두 예측 성능이 RDAPS에 비해 뒤떨어지는 것으로 나타났다. 이것은 RAMS 및 RDAPS 모두 초기 온도장 구성을 위해 GDAPS로부터 동일한 자료를 넘겨받아 사용하고 있으나 일부 경계 자료의 추출 방법이 달라 오차의 한 요인으로 작용할 수 있다. 예를 들어 SST (Sea Surface Temperature)는 RDAPS에서는 실시간 위성 자료로부터 SST를 추정하는 것과 비교하

여 CARIS의 RAMS에서는 기후학적인 평균 자료가 사용되므로 황해 SST의 경우 중규모 저기압계에서 한반도에 영향을 줄 수 있는 하나의 열원으로 작용한다는 점에서 오차의 한 요인이 될 수 있다.

한편 강수의 유무에 대한 예보의 성능을 결정하는 ACC (RAMS = 0.63, RDAPS = 0.79)와 CSI (RAMS = 0.49, RDAPS = 0.55)는 12시간 예측 성능에 있어 RDAPS보다 모두 뒤져 있으며 강수량의 척도를 나타내는 평가 지수에서도 POD를 제외하고는 모두

RAMS가 RDAPS보다 예측 오차가 크게 나타났다(그림 7). 일반적으로 강수 과정은 중규모 기상 현상으로서 중규모 대류계의 모의는 모델의 물리과정이나 분해능보다는 모델의 초기조건 및 구름의 초기생성에 따라 구름의 진화에 민감하게 작용하게 되는데 초기화 과정에서 위성자료를 활용한 4DVAR 방법이 4DDA보다 연직 대류계가 발달하기에 더 나은 환경을 구축하였음을 밝힌 바 있어(이미션, 1999) 강수 예보의 차이는 위성자료 활용여부, 초기화과정 등 여러 요인이 복합적으로 기여한 것으로 보인다.

마지막으로 그림 8에 지상에서 사례기간 전체 평균 오차를 제시하였다. 지상의 Mean Bias는 풍속의 오차가 매우 적게 (≤ 1 m/s) 나타났으며 RMSE는 1.85 m/s의 오차를 보였다. 성분별로는 풍속의 남북 성분(v)의 Mean Bias가 동서성분(u)에 비해 적게 나타났으나 RMSE는 오히려 동서성분(u)보다 크게 나타나 풍속보다는 풍향의 예보 성능이 상대적으로 떨어지는 것으로 해석된다.

그러나 그림으로 제시하지는 않았지만 사례기간의 지상에서의 평균 풍속은 모델 대기(평균: 2.31 m/s, 표준편차: 1.40 m/s)가 관측 대기(평균: 1.35 m/s, 표준편차: 1.41 m/s)보다 약 1.5배 크게 예측하였다. 이것은 현재의 지표특성 자료 중 일부(토양, 토양수분 등)는 한반도 전체 평균값이 모델 전 영역에 균일하게 사용되므로 RAMS의 상세 격자(1 km 혹은 3 km 간격)에 맞게 분해능을 높인다면 하층 바람장의 신뢰도를 일부 개선할 수 있을 것으로 보인다.

반면 일치도 지수(IOA)에서는 바람장 및 온도장 모두 0.6 정도로서 Hurley *et al.* (2001)이 기술한 '우수한' 모델의 최저 지표(IOA > 0.5)를 대부분 상회하여 상세 바람장 예측 모델로서의 활용가능성을 확인할 수 있다.

3. 4 지역별 특성

지역별 바람장의 특성을 알아보기 위하여 12시간 예측 자료를 토대로 권역별(그림 2의 D-1권역~D-4권역) 신뢰도 검증을 시도하였다. 시간별 풍속의 RMSE 시계열은 4지역 모두 뚜렷한 일변화를 보였으며 야간보다는 주간에 평균 약 50% 낮게 나타나 일사량이 유입되어 지표 특성에 의한 열적 강제력이 우세한 경우 모델의 예측 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다(그림 10). 반면 강수가 시작된 22일부터

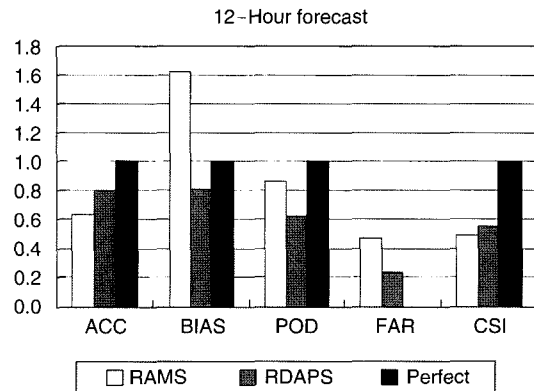


Fig. 9. Statistics for the simulation of the precipitation predicted by RAMS during 19~23, August 2002.

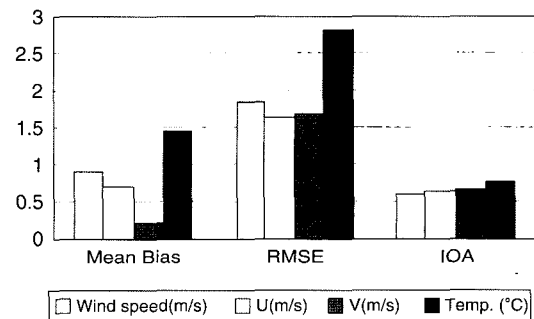


Fig. 10. Statistics averaged over the meteorological monitoring stations in the Korean peninsula for the west-east(u) component of the wind speed; the south-north(v) component of the wind speed; and temperature at 10 m above the ground during 19~23, August 2002.

RMSE의 일변화 경향은 현저히 줄어들었는데 특히 22일 낮시간의 예측 오차는 19~21일(낮시간)에 비해 약 2배 가량 높게 나타났다(그림 10). 이것은 운량이 적어 지표 강제력이 우세한 맑은 날과는 대조적으로 강수가 있을 경우 3차원 바람장은 중규모 강제력에 의해 대부분 결정될 수 밖에 없는데 본 사례의 경우 남서쪽에서 다가오는 기압골의 영향(그림 3)을 완전하게 반영되지 못한 것으로 해석되며 바람 성분별로는 주로 남북성분(v)의 오차가 주요 원인으로 작용하였다(그림 10).

또한 강수가 시작된 22일 이전에도 부산-울산권

Table 2. Averaged statistics at 4 regions for wind speed (m/s), west-east (u), south-north (v) components of wind (m/s) and temperature (°C) during 19 ~ 23 August, 2002.

Region	NUM	AVG_MOD	STD_MOD	AVG_OBS	STD_OBS	CORR	RMSE	IOA	BIAS	RMSE _S	RMSE _U	SKILL _e	SKILL _v	SKILL _R
Wind Speed (m/s)														
Region 1	576	2.35	1.27	1.32	0.93	0.27	1.39	0.47	0.71	0.96	1.02	1.10	1.37	1.65
Region 2	576	2.5	1.54	1.46	1.27	0.28	1.58	0.52	0.72	1.20	1.18	0.92	1.21	1.32
Region 3	768	2.26	1.38	1.67	1.51	0.29	1.34	0.61	0.41	1.07	1.05	0.69	0.91	0.98
Region 4	576	2.29	1.34	1.21	1.39	0.41	1.28	0.64	0.78	1.06	0.95	0.6	0.97	1.02
East-West (u) component of Wind Speed (m/s)														
Region 1	576	1.2	2.15	0.19	1.16	0.45	1.58	0.55	0.72	0.79	1.47	1.27	1.85	1.45
Region 2	576	1.2	1.65	-0.05	1.09	0.46	1.34	0.49	0.86	0.99	1.12	1.02	1.5	1.37
Region 3	768	1.04	1.55	-0.22	1.52	0.43	1.46	0.58	0.87	1.17	1.07	0.71	1.02	1.05
Region 4	576	0.37	1.45	0.01	1.32	0.46	1.08	0.65	0.25	0.58	0.98	0.75	1.1	0.68
South-North (v) component of Wind Speed (m/s)														
Region 1	576	0.14	1.03	0.39	1.04	0.47	0.75	0.67	0.17	0.46	0.70	0.68	1	0.81
Region 2	576	0.14	2.11	0.75	1.41	0.43	1.43	0.57	0.42	0.62	1.47	1.04	1.49	1.12
Region 3	768	0.31	1.85	0.68	1.5	0.43	1.28	0.63	0.26	0.62	1.29	0.85	1.23	0.95
Region 4	576	1.13	1.87	0.35	1.23	0.33	1.39	0.52	0.57	1.76	1.36	1.10	1.52	1.26
Temperature (°C)														
Region 1	576	24.6	1.36	23.09	1.02	0.16	2.17	0.41	1.51	1.32	1.03	1.01	1.33	1.64
Region 2	576	25.23	1.04	23.19	1.13	0.41	2.36	0.46	2.04	1.66	0.73	0.65	0.92	1.61
Region 3	768	25.64	1.65	22.81	1.5	0.47	3.27	0.47	2.83	2.25	1.12	0.75	1.1	1.68
Region 4	576	25.19	1.61	22.88	1.36	0.43	2.81	0.45	2.31	1.85	1.12	0.82	1.18	1.58

* Key : AVG = Arithmetic average, MOD = Model Predictions, STD = Standard Deviation, OBS = Observations, CORR = Pearson Correlation Coefficient (0 = no correlation, 1 = exact correlation), RMSE = Root Mean Square Error, IOA = Index of Agreement (0 = no agreement, 1 = perfect agreement), RMSE_S = Systematic Root Mean Square Error, RMSE_U = Unsystematic Root Mean Square Error, SKILL_e = (RMSE_o)/(STD_o) (< 1 shows skill), SKILL_v = (STD_{MOD})/(STD_{OBS}) (near to 1 shows skill), SKILL_R = (RMSE)/(STD_{OBS}) (< 1 shows skill)

(Region D-4)의 풍속의 RMSE 는 그 일변화 폭이 다른 권역에 비해 훨씬 적게 나타난 것은 지역적인 특성이라기보다는 태풍 판폰의 간접 영향권에 제일

많이 노출되어 있어(그림 3) 일변화가 뚜렷한 지표 강제력의 영향이 상대적으로 더 적었기 때문으로 분석된다. 전반적으로 수도권(Region D-1)의 경우 바람 성분 중 동서성분(u)에 의해 그 일변화가 유도된 반면 부산-울산권에서는 남북성분(v)의 일변화가 우세하게 나타났다.

지역별 통계자료인 표 2에 나타난 결과에 의하면 통계자료에 의하면 4권역 모두 바람의 관측 평균 풍속이 모두 2m/s 이하로서 사례 기간 바람이 약한 날임을 반증하고 있으며 바람 성분별 IOA는 대부분 0.5를 상회하였다. RMSE는 지역별 차이는 있으나 평균 1~2 m/s의 오차를 보였고 특히 풍속의 Unsystematic RMSE와 Systematic RMSE가 지역별 서로 비슷한 절대값을 보였다. 그러나 풍속의 동서성분(u)은 수도권에서 Unsystematic RMSE가 Systematic RMSE보다 약 2배 크게 나타났고 이에 따라 SKILL_u가 1보다 크게 나타난 반면 남북성분(v)은 대산권(Region D-2)에서 Unsystematic RMSE가 Systematic RMSE보다 크게 나타났다(표 2). 이것은 역으로 바람장의 신뢰도를 개선하기 위해서는 수도권에서는 바람의 동서성분(u)을, 그리고 대산권에서는 바람의 남북성분(v)을 개선하는 것이 더 효과적임을 암시한다. 그러나 이상의 결과는 여름철 중관 기압계의 영향이 약한 경우의 한정된 사례이므로 보다 많은 사례 연구를 통해 지역별 특성을 더 상세히 파악할 수 있을 것이다

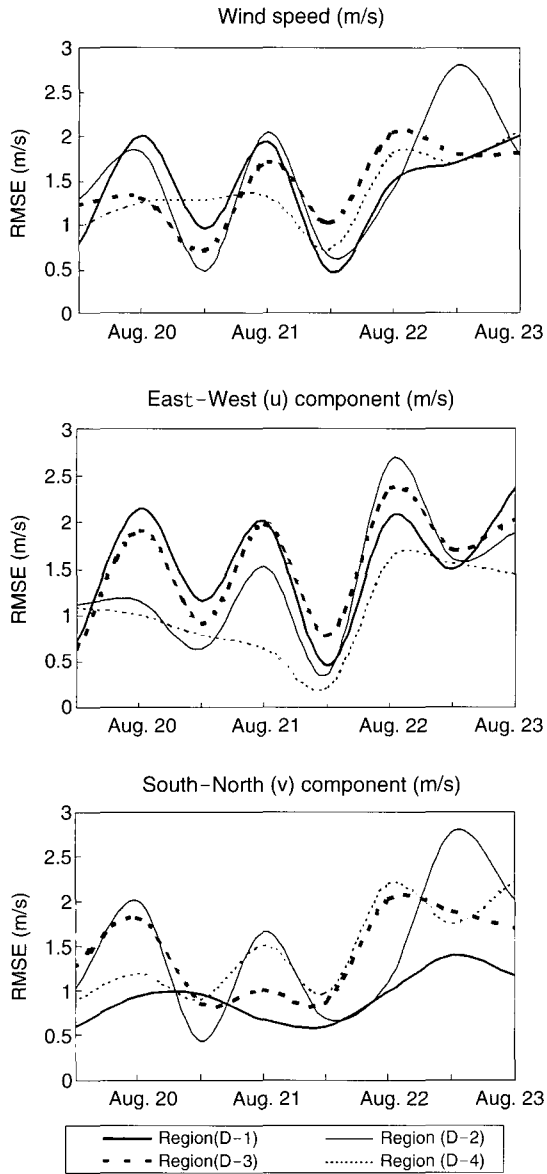


Fig. 11. Time series of Root Mean Square Error (RMSE) averaged over each sub-domain for a) wind speed, b) east-west (u) component of wind speed, and c) south-north (v) component of wind speed at 10 m above the ground during 19~23, August 2002.

4. 요약 및 결론

2002년 8월 19~23일까지의 CARIS의 기상 모델인 RAMS의 예보 결과를 통계적으로 분석하였다. 그 결과 GDAPS, GTS, AWS 자료를 이용하여 초기 기상장을 만들어 사용한 RAMS의 예측 성능은 특히 지상에서 풍속의 Mean Bias가 약 0.9 m/s, RMSE가 약 1.85 m/s로서 RDAPS보다 더 안정된 결과를 얻었다. 이것은 현재 CARIS에 설정된 자료의 분해능 측면에서 보면 RAMS가 RDAPS에 비해 상대적으로 상세한 해상도의 지형, 토지피복도 등의 지표 특성 자료를 통해 하층 바람장의 예측 신뢰도를 높일 수 있었고, 나아가 일부 단순 처리된 지표자료도 향후 상세 분해능에 맞게 구성한다면 하층에서의 예측 신

되도를 더 높일 수 있을 것으로 예상된다.

그러나 상층으로 갈수록 바람장의 오차는 모두 증가하여 RDAPS에 비해 그 예보 성능이 떨어졌는데 이는 지표면 특성에 의한 하층 강제력이 상층으로 갈수록 약해지면서 초기 중관 기상자료의 중요성이 더 크게 작용하였기 때문이었다. 또한 강수나 온도장에서는 고도에 관계없이 그 오차가 상대적으로 크게 나타나 RDAPS에 비해 모두 그 예보 성능이 떨어졌으며 특히 강수 현상의 대다수 비교 평가 지수에서 상대적으로 낮게 나타났다. 따라서 위성 자료 등 다양한 중관규모 기상 입력자료의 활용 여부를 계속 연구하여 상층 바람장 및 온도장의 정확도를 높일 필요가 있을 것으로 사료된다.

결론적으로 CARIS에 구축된 RAMS 기상 모델은 상층에서의 상대적으로 큰 오차, 강수 및 온도장의 상대적으로 낮은 신뢰도 등 상시운영용 국지규모 3차원 기상 모델로서의 개선의 여지는 많은 것으로 나타났다. 그러나 하층 바람장의 상대적으로 안정된 신뢰도, 0.5 이상의 IOA 등을 감안할 때 향후 개선과 보완을 통해 대기환경분야에 활용될 가능성은 매우 높다고 판단된다.

본 연구는 특정 기간의 제한된 사례에 불과하지만 예측 결과를 분석하는 것은 결국 오차를 줄이고자 함이다. 비록 RAMS 모델이 동지 격자계에서 상세한 격자와 대기경계층 역학을 채용한다하더라도 국지 순환과 관련된 바람의 지역규모 수렴 또는 상승 효과와 관련된 중관 규모 강제력이 적절히 모의되지 않는다면 바람직한 신뢰도를 기대할 수 없게 된다. 따라서 계속해서 RAMS의 초기장의 품질을 높이기 위하여 GDAPS, GTS, AWS 뿐만 아니라 GMS 극궤도 위성, NOAA 위성 등의 자료 활용, 레이더 에코 자료 등의 활용 여부를 앞으로도 다양하게 연구해 나갈 예정이다.

참 고 문 헌

국립환경연구원 (2002) 화학물질사고대응 요령 교육. 국립환경연구원 화학물질안전관리센터 유해화학물질사고대응지침서, 68pp.
 기상청 (1998) '97 수치예보 모델 검증 결과 보고서. 기상청 수치예보과 기술보고서 98-3.
 김영성, 오현선 (2000) 여수지역 대기확산의 수치모사-I. 지

형의 영향, 한국 대기환경학회지, 16, 211-223.
 김유근, 오인보, 황미경 (2003) UAM-V를 이용한 부산 지역 고농도 오존 사례 수치모의, 한국 대기환경학회지, 19(1), 1-11.
 산업자원부, 2001, 화학공장의 사고사례 분석.
 김영성, 오현선 (2000) 여수지역 대기확산의 수치모사-I. 지형의 영향, 211-223.
 오현선, 김영성 (2000) 여수지역 대기확산의 수치모사-II. 일사에 의한 일변화, 225-236.
 이미선 (1999) 위성 자료와 약 제약 조건 4DVAR가 호우 모의에 미치는 영향, 박사학위논문. 서울대학교 대기과학과, pp. 268.
 조천호 (1994) 전구모델 (GSM)의 구성과 수행과정, 기상청 수치예보과 기술 노트, 94-3, 72pp.
 AIChE/CCPS. 1994. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVES. New York : AIChE.
 ATMET (2002) RAMS (Regional Atmospheric Meteorological System) Technical description. RAMS Technical Manual at Atmospheric Meteorological and Environmental Technology site (<http://www.atmet.com>).
 Boer, G.J. (1993) Systematic and random error in an extended-range forecasting experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 173-188.
 Fox, D.G. (1981) Judging air quality model performance. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 62, 599-609.
 Johansson, A. and S. Saha (1989) Simulation of systematic error effects and their reduction in a simple model of the atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1658-1675.
 Koutsenko, G. and D.G. Ross (1998) Modeling episodic releases of hazardous chemicals to the atmosphere, 14th International Clean Air & Environment Conference, 423-427.
 Lee, T.-Y., S.-B. Kim, S.-M. Lee, S.-U. Park, D.-S. Kim, and H.-C. Shin (1998) Numerical Simulation of air quality and acid deposition for episodic cases in eastern Asia. *Korean J. Atmos. Sci.*, 1(2), 126-144.
 O'Lenic, E.A. and R.E. Livezey (1989) Relationship between systematic errors in Medium-Range numerical forecasts and some of the principle modes of low-frequency variability of the northern hemisphere 700 mb circulation. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1262-1280.
 Pielke, R.A. (1974) A three-dimensional numerical model of the sea breezes over south Florida. *Mon. Wea. Rev.*, 102, 105-139.

- Pielke, R.A. (1984) Mesoscale meteorological modeling, Academic Press Inc., 612pp
- Pielke, R.A., W.R. Cotton, R.L. Walko, C.J. Tremback, W.A. Lyons, L.D. Grasso, M.E. Nicholls, M.D. Moran, D.A. Wesley, T.J. Lee, and J.H. Copeland (1992) A comprehensive meteorological modeling system - RAMS, Meteorol. Atmos. Phys., 49, 69-91.
- Scire, J., E. Insley, and R. Yamartino (1990) Model formulation and user's guide for the CALMET meteorological model. Report NO. A025-1. Air Resources Board, State of California.
- Shukla, J. (1981) Dynamical predictability of monthly means. J. Atmos. Sci., 38, 2547-2572.
- Talagrand, O. and P. Courtier (1987) Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation. I: Theory. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 113, 1311-1328.
- Traction, M.S., K. Mo, and W. Chen (1989) Dynamical Extended Range Forecasting (DERF) at the National Meteorological Center. Mon. Wea. Rev., 117, 1604-1635.
- Wallace, J.M. and J.K. Woessner (1981) An analysis of forecast error in the NMC hemispheric primitive equation model. Mon. Wea. Rev., 109, 2444-2449.
- Willmott, C.J. (1981) On the validation of models. Phys. Geography, 2, 184-194.