

WRF, MM5, RSM 모형에서 모의한 2004년 7월 11-18일의 동아시아 몬순의 비교

함수련 · 박선주 · 방철한 · 정병주 · 홍성유*

연세대학교 대기과학과

(2005년 5월 19일 접수; 2005년 6월 9일 승인)

Intercomparison of the East-Asian Summer Monsoon on 11-18 July 2004, simulated by WRF, MM5, and RSM models

Su-Ryun Ham, Seon-Joo Park, Cheol-Han Bang,

Byoung-Joo Jung and Song-You Hong*

Department of Atmospheric Sciences, Global Environment Laboratory, Yonsei University

(Manuscript received 19 May 2005; in final form 9 June 2005)

Abstract

This study compares the summer monsoon circulations during a heavy rainfall period over the Korean peninsula from 11 to 18 July 2004, simulated by three widely used regional models; WRF, MM5, and RSM. An identical model setup is carried out for all the experiments, except for the physical option differences in the RSM. The three models with a nominal resolution of about 50 km over Korea are nested by NCEP-DOE reanalysis data. Another RSM experiment with the same cumulus parameterization scheme as in the WRF and MM5 is designed to investigate the importance of the representation of subgrid-scale parameterized convection in reproducing monsoonal circulations in East Asia. All three models are found to be capable of reproducing the general distribution of monsoonal precipitation, extending northeastward from south China across the Korean peninsula, to northern Japan. The results from the WRF and MM5 are similar in terms of accumulated precipitation, but a slightly better performance in the WRF than in the MM5. The RSM improves the bias for precipitation as compared to those from the WRF and MM5, but the pattern correlation is degraded due to overestimation of precipitation in northern China. In the comparison of simulated synoptic scale features, the RSM is found to reproduce the large-scale features well compared to the results from the MM5 and WRF. On the other hand, the simulated precipitation from the RSM with the convection scheme used in the MM5 and WRF is closer to that from the WRF and MM5 simulations, indicating the significant dependency of simulated precipitation in East Asia on the cumulus parameterization scheme.

Key words: WRF, MM5, RSM, East Asian Monsoon, Heavy rainfall

1. 서론

지금까지 한반도 여름 집중 호우에 대한 수치 모형의 모의 능력 비교, 평가는 주로 WRF (Weather Research and Forecasting model, Klemp *et al.*, 2000), PSU/

NCAR (Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research) MM5 (Fifth-generation Mesoscale Model) (Grell *et al.*, 1994) 같은 중규모 모형을 이용하여 이루어져 왔다. 예를 들면, 강수 모의 능력을 비교한 연구로서, 최준태 등(2001)은 2001년 7월 3~4일의 장마기간 동안의 한반도 집중호우에 대하여 WRF와 MM5를 통해 호우 예측 성능 비교를 보였으며 MM5가 예측하지 못한 밴드 형태의 중규모 대류 시스템을 WRF가 예측할 수 있음을 보였다. 김옥연 등(2002)은 1998년 7월 31일~8월 1일, 8월 12일~8월

*Corresponding Author: Song-You Hong, Dept. of Atmospheric Sciences, College of Science, Yonsei University, Seoul 120-749, South Korea.

Phone : +82-2-2123-2679, Fax : +82-2-365-5163

E-mail: shong@yonsei.ac.kr

13일의 집중호우를 WRF와 MM5의 모의 능력의 비교를 통해 전체적인 강수 밴드 형성은 MM5에서 보다 WRF에 의해 뚜렷이 나타남을 보였다. 박세영 등 (2002)은 2002년 8월 한 달간에 대해 WRF와 MM5 모형의 수치 실험을 수행하여 8월 6-9일의 결과를 변수 별로 비교해, WRF 모형이 MM5 모형보다 다소 좋은 모의 능력을 보이지만 강수량에 있어서는 WRF 모형이 MM5 모형보다 과대 강수를 나타냄을 보였다.

이 연구에서는 한반도 집중호우 및 동아시아 몬순의 수치 모의에 널리 사용되어 온 세 개의 지역모형을 이용하여 여름철 장마기간 중 집중호우의 모의 능력을 비교하고자 한다. 선택한 세가지 모형은 중규모 수치 연구에 가장 널리 사용되어 온 MM5, MM5의 단점을 보완하여 최근에 새롭게 개발된 중규모 모형인 WRF, 지역모형으로서는 특이하게 분광형 역학체계를 지닌 NCEP/RSM (National Centers for Environmental Prediction/Regional Spectral Model) (Juang *et al.*, 1997) 이다. 지난 연구에서 이들 세 모형은 한반도 집중호우 및 중규모 현상을 잘 모의하는 능력을 보였으나, 동일한 실험 설계 안에서 직접적 비교는 없었다. 이 연구에서는 동일 설계의 세 모형을 사용하여 2004년 7월 11일에서 7월 18일까지 일주일 동안의 장마 전선과 관련된 강수 모의 결과를 비교하여 세 중규모 수치 모형의 강수와 종관상태의 모의 능력을 평가한다. 2절에서는 사례기간 동안의 장마와 관련된 강수와 종관상태, 3절에서는 모형 및 실험설계, 4절에서는 실험결과의 비교, 5절에서는 결론을 제시한다.

2. 종관상태

2004년 여름 한반도는 태풍과 장마로 인해 강수량이 많았다. 7월 장마 기간 동안에는 홍천 436.5, 춘천 319.5, 서울 298.5, 대전 296.5, 강릉 240.0, 청주 235.5 mm 등 많은 비가 내렸으며, 7월 14일 전남 진도에서는 시간당 115.5 mm가 내려 시간당 최고 강수량 2위를 기록하였다 (기상청 보도자료, 2005).

7월 3일부터 6일까지의 강수는 태풍 ‘민들레’의 영향으로, 7월 11일부터 18일까지는 전형적인 장마 전선의 영향으로 한반도 전역에 많은 강수가 있었다 (Fig. 1). Fig. 2는 KMA (Korea Meteorological Administration) 관측 자료와 GPCP (Global Precipitation Climatology Project) (Huffman *et al.*, 1997) 관측 자료를 이용하여 그린 그림이다. 7월 11일부터 일주일 누적 강수량은

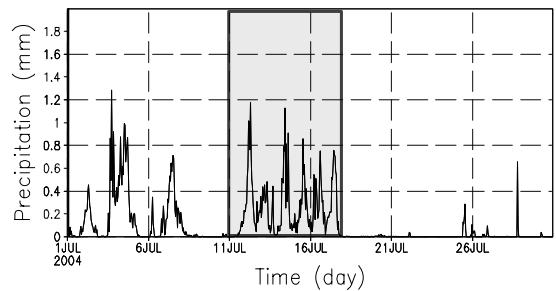


Fig. 1. The daily evolution of observed precipitation (mm) averaged over the Korean peninsula in July 2004, obtained from KMA surface observation network.

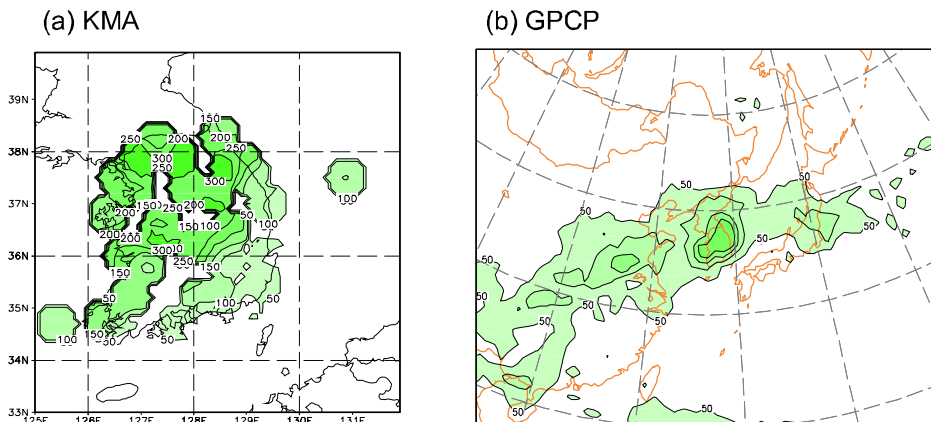


Fig. 2. Accumulated precipitation (mm) during 00 UTC 11 - 00 UTC 18 July, (a) obtained from KMA surface observation network, and (b) the corresponding GPCP observation. Contour intervals of precipitation are 50 mm. Values greater than 50 mm are shaded and contoured.

중부 지방을 중심으로 300 mm 이상의 강수를 기록하였다 (Fig. 2a). 11일에는 한반도 전역을 포함한 북동 방향의 강수대가 중부 지방을 중심으로 최고 150 mm 이상의 강수를 내렸으며, 장마전선이 일주일 동안 한반도를 중심으로 남북 진동을 하면서 많은 비를 내렸다. 이 기간 강수대는 화남 지역에서 한반도, 일본 북부 지역으로 남서에서 북동 방향으로 나타나 전형적인 장마 전선의 활성화와 관련된 집중 호우임을 알 수 있다 (Fig. 2b).

Fig. 3은 NCEP/DOE(Department of Energy) 재분석 자료 (Kanamitsu *et al.*, 2002) (RA2)를 이용하여 2004년 7월 11일 00 UTC부터 7월 18일 00 UTC까지 평균한 종관장에 대한 그림이다. 해면 기압을 보면 (Fig. 3a) 화남지방에서 한반도를 지나 일본 북부까지 저압부가 위치하며, 그 남동쪽에는 북태평양 고기압이 뚫고 지역에는 대륙성 고기압이 위치하여 전형적인 장마시기의 기압배치를 보인다. 대류권 하층에서는 (Fig. 3b), 북태평양 고기압의 서쪽경계를 따르는 남서기류

가 온난 습윤한 공기를 집중호우 지역인 한반도 방향으로 이루시켜 대류불안정이 강화되는 것을 알 수 있다. 500 hPa 면에서는 (Fig. 3c), 강수역의 북서쪽 상공인 한반도 북부에서 화중 지방까지 고도곡이 깊게 발달하고 경압성이 강하여 집중호우를 유발시키기 유리한 역학적 환경을 형성한다. 대류권 상층에서는 (Fig. 3d) 강수역의 북서쪽에 고도곡이 깊게 발달해 있으며, 한반도 및 화중 지방은 상층제트 입구의 남쪽에 위치한다. 이러한 상하층 제트의 분포와 대류권 중층의 경압성은 한반도 집중호우와 관련한 전형적인 종관상태인 것으로 분석되었다 (Lee *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 1999).

3. 실험 설계 및 모형 수행

이 연구에 사용된 세가지 지역 모형은 MM5, WRF, RSM이다. MM5 모형은 비압축성 비정수계 (Non-compressible non-hydrostatic) 모형으로 수평 격자는 Arakawa-B 격자 체계를 사용한다. 연직 격자로는 지

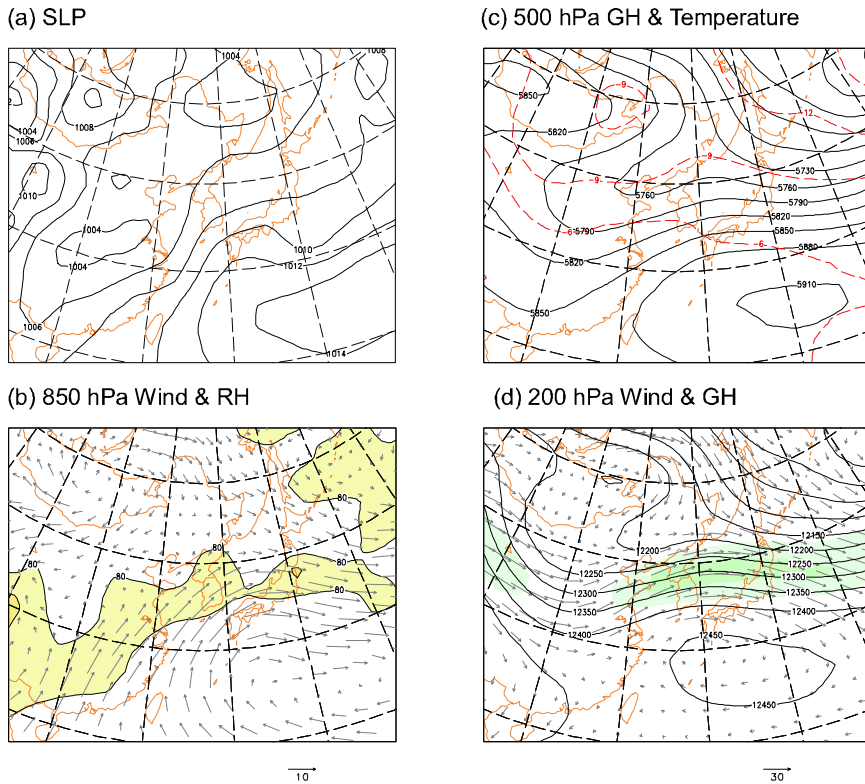


Fig. 3. (a) Sea level pressure (hPa), (b) 850 hPa wind (ms^{-1}) and relative humidity (%), (c) 500 hPa geopotential height (m) and temperature (K), and (d) 200 hPa wind (ms^{-1}) and geopotential height (m) averaged for the integrative period of RA2

형을 따라가는 시그마 좌표계 (σ -coordinate)를 사용한다. 시간 적분방법으로 1차 등넘기 (Leapfrog) 시간 적분 방법을 사용하였으며 이류항에 대해서는 2차 중심 차분법 (2nd order centered differencing)을 이용한다. 수평 확산 방안으로는 경계점에 대해서는 2차, 내부 격자점에 대해서는 4차 확산 방안을 사용한다.

WRF 모형은 완전 압축성 비정수계 (Fully compressible non-hydrostatic) 모형으로 수평 격자는 Arakawa-C 격자 체계를 사용한다. 연직 격자로는 Eulerian 질량 좌표계 (mass-based terrain following coordinate)를 사용한다. 수치계에서는 MM5 모형과 달리 3차 Runge-Kutta split-explicit 시간적분을 사용하며 이류항에 대해서는 6차 중심 차분법을 도입한다. 또한 플럭스 형태의 진단 방정식을 사용하여 질량, 운동량, 엔트로피, 스칼라량을 보존한다.

RSM 모형은 정수계 모형으로 MM5 모형과 WRF 모형같이 연직 격자로는 지형을 따라가는 시그마 좌표계 (σ -coordinate)를 사용한다. 역확과정은 지역 모형으로는 특이한 분광형 격자계를 사용하고, 전구모형 또는 성길 격자계의 결합은 섭동 등지 방법 (perturbation nesting method)으로서 RSM 모형은 작은 규모의 섭동을 예보하고 대규모 장은 전구모형 또는 성길 격자에서 예측된 것을 유지한다. 따라서 RSM 모형은 WRF와 MM5 모형과 다르게 모형 내부의 격자점까지 전구 또는 성길 격자 결과를 사용하여 대규모 종관장의 계통적 오차를 줄일 수 있는 특징이 있어 지역기후 모형으로서 유리한 점이 있다. RSM 모형은 이러한 역학적 특징으로 모형의 적분영역에 따른 모의 결과가 WRF나 MM5에 비하여 민감하지 않은 것으로 분석되었다 (Juang and Hong, 2001). RSM 모형은 또한 동아시아 몬순과 관련된 집중호우를 비교적 잘 모의하는 것으로 제시된 바 있다 (Hong *et al.* 1999).

모형 성능의 객관적인 비교를 위하여 모형 영역 및 실험 설계는 모두 동일하게 구성하였다. 적분 영역은 극좌표계 상에서 한반도를 중심으로 약 50 km 격자 간

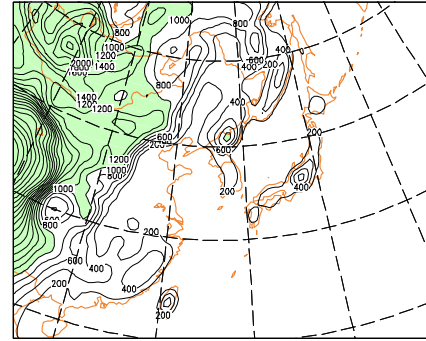


Fig. 4. Regional model domain and orography. Contour intervals of orography are 200m. Values greater than 1000 m are shaded.

격으로, 격자 수는 109 (동서) \times 86 (남북)으로 구성하였다 (Fig. 4). 초기 자료와 경계 자료는 격자 간격 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 인 NCEP/NCAR 재분석 자료 (Kanamitsu *et al.*, 2002)가 사용되었고, 해수면 온도 자료는 OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) version 2 (Reynolds *et al.*, 2002)를 사용하였다. 적분 시간은 2004년 7월 11일 00 UTC부터 7월 18일 00 UTC까지 168시간이다.

세 모형 모두 물리과정을 선택적으로 사용할 수 있다. 이 연구에서는 세 모형의 물리 과정을 가능한 한 비슷하게 설정하였다 (Table 1). WRF 실험과 MM5 실험은 동일한 물리 과정을 사용하였고, RSM 실험에서는 적은 모수화, 구름 물리, 복사 물리 과정이 다른 두 모형과 다르다. WRF 와 MM5 실험의 구름물리 과정 (MPS; MicroPhysics Scheme)은 Simple ice (Dudhia, 1989)이며, 적은모수화 과정(CPS; Convection Parameterization Scheme)은 new Kain-Fritsch (Kain, 2004)이다. 행성 경계층(PBL; Planetary Boundary Layer) 모수화 방법은 YSU (YonSei University) PBL (Hong *et al.*, 2003; Noh *et al.*, 2003) 방안이며, 지면 모수화 과정(Land Surface Model)은 OSU (Oregon State

Table 1. A summary of numerical experiments for three regional models. “—” denotes the same option as that in the WRF experiment.

	MPS	CPS	PBL	LSM	SW_RAD	LW_RAD
WRF	Simple	KF2	YSU	OSU	Dudhia	RRTM
MM5	-	-	-	-	-	-
RSM	WSM0	SAS	-	-	GSFC	GSFC
RSM_KF2	WSM0	-	-	-	GSFC	GSFC

University) 방안 (Chen and Dudhia, 2001)을 사용하였다. 복사 모수화 방안으로는 장파복사(LW_RAD)에 대해서는 RRTM 복사 모수화 방안 (Mlawer *et al.*, 1997)을, 단파복사(SW_RAD)에 대해서는 simple MM5 방안 (Dudhia, 1989)을 사용하였다. 명시적 수분과정의 경우, WRF와 MM5 실험은 Simple-ice 방안 (Dudhia, 1989)을 사용한 반면 RSM 실험은 진단적 격자규모 강수물리 (Hong *et al.*, 1998)를 사용하였다. RSM의 복사과정은 GSFC (Goddard Space Flight Center) 방법으로서 단파 복사는 Chou (1992) 와 Chou and Lee (1996) 방안을 장파복사는 Chou *et al.* (1999) 방안을 사용하였다. 적운 모수화 방법의 경우, WRF와 MM5 실험은 New-Kain-Fritsh (KF2) 방안 (Kain, 2004)을 사용한 반면, RSM 실험은 RSM 모형의 기본 방안인 SAS (Simplified Arakawa-Schubert) scheme (Hong and Pan, 1998)을 사용하였다. 적운 모수화가 강수모의에 민감하므로 이 연구에서는 WRF와 MM5 실험과 동일한 방안인 KF2를 RSM 모형에 장착한 실험 (RSM_KF2 실험)을 설계하였다.

4. 실험 결과

강수 검증에서는 GPCP 강수 데이터를, 종관장 검증에서는 RA2를 모형 격자로 내삽하여 검증하였다. 4.1 절에서는 강수결과를, 4.2 절에서는 종관장을 비교 분석한다.

4.1 강수

강수 모의는 모형의 결과 비교에서 매우 중요하다. 또한 일반적으로 지역 모형에서 정확한 모의는 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 1주일 동안의 누적 강수 모의 결과를 Fig. 5에, 이에 대한 통계검증 결과는 Table 2에 제시하였다. 전반적으로 모든 실험 결과가 전형적인 장마 전선과 관련된 강수대를 잘 모의하였다. WRF와 MM5 실험은 동일한 물리과정을 사용함으로 흡사한 형태를 보인다. RA2 자료와 모델의 결과 값의 차이를 전체 적분 시간과 영역에 대해 평균한 편차와 전체 적분 시간과 영역에 대해 평균한 유형 상관

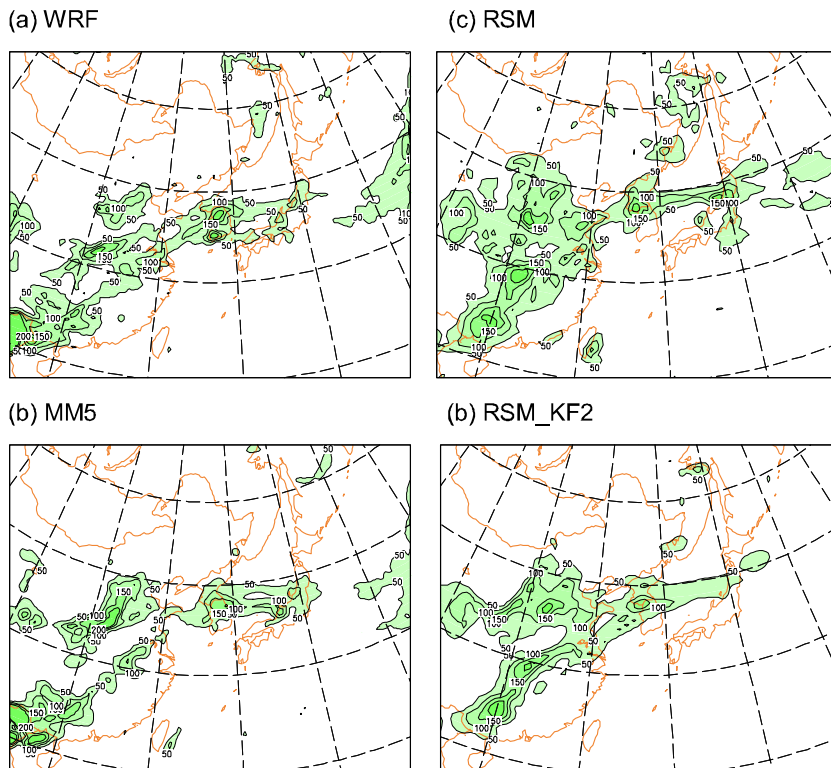


Fig. 5. Comparison of simulated precipitation (mm) during 00 UTC 11 - 00 UTC 18 July 2004.

Table 2. Statistics of the bias (Bias) and pattern correlation (PC) of simulated precipitation averaged over the whole domain. The best scores are highlighted by bold values.

	Bias	PC
WRF	-0.87	0.50
MM5	-1.23	0.44
RSM	0.11	0.42
RSM_KF2	-1.16	0.46

도 (Pattern correlation) 분석에서 두 실험 모두 관측과 비교하여 강수량을 적게 모의하는 반면, WRF 실험이 MM5 실험보다 강수량을 약간 많게 모의하여 편차를 증가시킨다. WRF 실험은 MM5 실험에 비하여 화북 지방의 강수는 적게, 화중지방의 강수는 많게 모의하여 관측과 유사한 형태를 보인다. RSM 실험은 편차에서 관측과 접근하나 중국대륙의 강수대를 다소 넓게 모의하고, MM5 실험과 마찬가지로 화북지방의 강수가 과다하게 모의되어 WRF 실험보다 상관도는 떨어진 다. 반면에 적은 모수화 방안을 KF2로 대체한 RSM_KF2 실험에서는 모의된 강수대의 형태가 WRF와 MM5 실험에서 모의된 것과 유사해짐을 알 수 있다. 또한 강수량도 현저히 적게 모의되어 편차값도 두 모형의 결과에 근접한다.

Fig. 5와 Table 2에서 알 수 있듯이, 전반적으로 WRF 실험이 장마전선과 관련된 강수를 가장 우수하게 모의하였다. 한반도 강수량 또한 남부 지방 강수까지 잘 모사한 WRF 실험이 가장 우수함을 알 수 있다. RSM의 적은 모수화 방안을 KF2로 대체한 실험이 WRF와 MM5 실험의 강수대와 근접하는 것으로 미루어 볼 때, 모형 성능에 있어서 적은 모수화 방안의 중요성을 알 수 있다.

4.2 중관장

Fig. 6은 WRF 실험의 결과값에서 RA2의 값의 차이를 나타낸 그림이다. 850hPa에서 만주지방과 연해주 그리고 일본 열도에 습윤역이 나타나며, 중국 대륙과 일본 남동쪽 해상에서는 건조역이 부분적으로 나타난다 (Fig. 6a). WRF 실험은 바람은 대체적으로 약화시키며 한반도 북부에 최고 5 ms^{-1} 정도 약화되었다. 온도는 500 hPa과 200 hPa에서 모두 한반도를 중심으로 북쪽은 최고 1°K 높게 남쪽은 1°K 낮게 모의하여 남북방향의 온도경도를 약화시켰다 (Figs. 6b와 6c). 대류권에서의 기압경도력의 약화와 관련한 200 hPa 면

의 바람도 분석보다 약하게 모의되었다 (Fig. 6d). 이러한 특성은 MM5 실험에서도 비슷한 패턴으로 분석되었으며, 이는 남북방향의 온도경도와 상하층 제트로 인하여 WRF와 MM5 실험의 강수량이 관측보다 적게 모의된 이유일 것이다. RSM 실험의 경우 역시 온도경도의 약화가 모의되는 경향이 있었으나 편차의 크기가 다른 두 모형에 비하여 작았다.

Fig. 7은 상대 습도와 온도의 영역 평균한 오차의 연직 분포이며, Table 3은 중관장의 영역 평균한 통계 검증 자료이다. 전반적으로 RSM 실험이 500hPa의 온도를 제외하고 MM5와 WRF 실험보다 RA2에 근접함을 알 수 있다. WRF와 MM5 두 실험 모두 공통적으로 대류권 하부에서 습윤, 한랭화가 나타나지만 이에 비해 RSM 실험은 이 오차를 줄이는 것이 뚜렷하다. 이와 관련하여 WRF와 MM5 실험은 850 hPa에서 온도와 상대습도의 상관도가 RSM 실험보다 낮게 나타난다. RSM 실험은 500 hPa 면을 중심으로 건조화가, WRF와 MM5 실험은 300 hPa 면을 중심으로 습윤화가 나타나며, 대류권 중층에서 RSM 실험이 상대적으로 약한 온난화가 나타난다. RSM_KF2 실험은 대류권 하층의 온도를 하강시키고 300~600 hPa 면사이의 상대습도를 증가시키는 특징을 보이는 등 WRF와 MM5 실험의 결과와 비슷한 것으로 볼 때, 강수는 물론 중관장도 적은 모수화에 상당한 영향을 받는 것임을 알 수 있다. 한편, 200hPa에서 WRF와 MM5 실험의 온난 건조화에 비해 RSM 실험은 선택된 적은 모수화에 상관없이 RA2와 유사한 결과를 보이는데, 이는 물리과정 이 아닌 RSM의 독특한 역학체계에 기인하는 것이 아닌가 짐작한다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 2004년 7월 11일부터 18일까지 전형적인 장마 전선으로 발생한 강수대를 한반도 집중호우 및 동아시아 몬순의 수치 모의에 널리 사용되어 온 WRF, MM5, RSM을 이용하여 집중호우의 모의 능력을 비교, 평가하였다. 세 모형의 영역 및 실험 설계는 모두 동일하게 구성하였다. 또한, WRF와 MM5 실험의 물리 과정 또한 같게 하였으며, RSM 실험 역시 가능한 한 유사하게 설계하였다. 적분 영역은 극좌표계 상에서 한반도를 중심으로 약 50 km 격자로 하였으며 적분기간은 7월 11일 00 UTC에서 7월 18일 00 UTC까지 168시간이다.

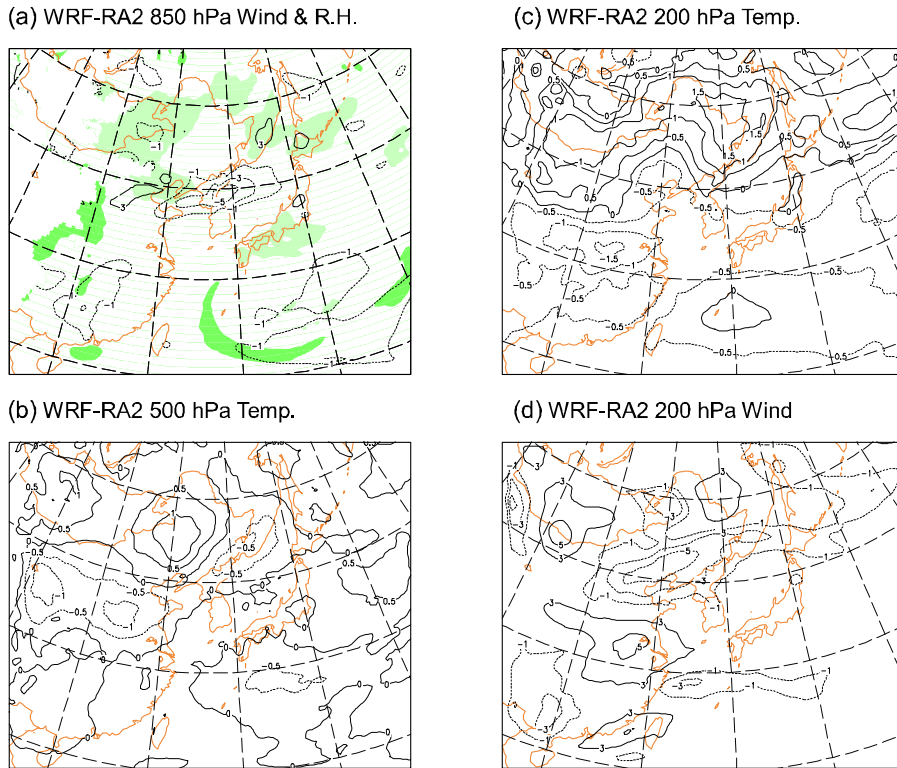


Fig. 6. Corresponding difference (WRF minus RA2) for (a) 850 hPa winds and humidity, (b) 500 hPa temperature, (c) 200 hPa temperature and (d) 200 hPa winds. Light shaded areas in (a) denote that the model overestimates humidity by more than 10%, and dark shaded denote that the model underestimates by less than 10%. Contour intervals are 2 ms^{-1} in (a),(d) and $0.5 \text{ }^\circ\text{K}$ in (b),(c).

Table 3. Statistics of the bias (Bias) and pattern correlation (PC) averaged over the whole domain for 850 hPa relation humidity (RH), temperature (T), for 500 hPa temperature (T), for 200 hPa winds. The best scores are highlighted by bold value.

		Bias	PC
850 hPa RH (%)	WRF	2.31	0.65
	MM5	-0.5	0.69
	RSM	0.35	0.95
	RSM_KF2	-1.72	0.94
850 hPa T (K)	WRF	-0.82	0.88
	MM5	-0.42	0.89
	RSM	-0.43	0.95
	RSM_KF2	-0.29	0.94
500 hPa T (K)	WRF	-0.01	0.93
	MM5	0.11	0.91
	RSM	0.32	0.91
	RSM_KF2	0.31	0.92
200 hPa Winds (ms^{-1})	WRF	-0.489	0.88
	MM5	-0.506	0.88
	RSM	0.576	0.89
	RSM_KF2	0.576	0.89

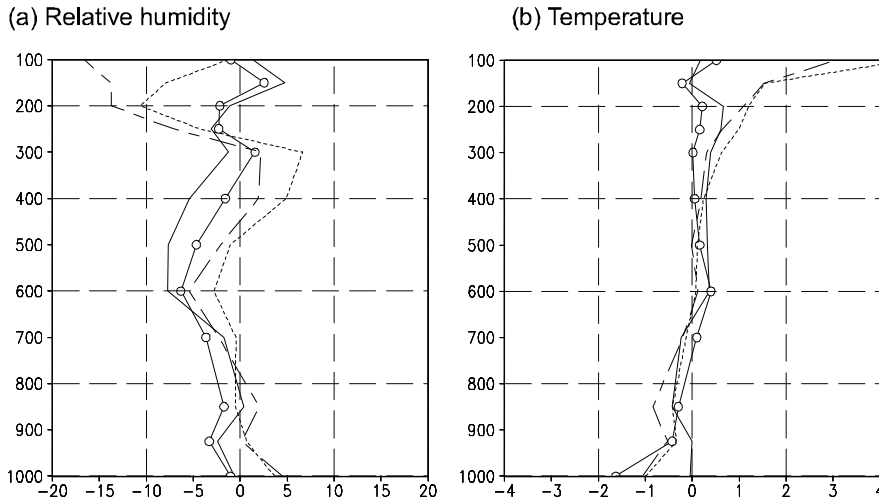


Fig. 7. Bias errors of (a) relative humidity and (b) temperature averaged over the model domain for the integrative period. Solid line for RSM, solid line with open circles for RSM_KF2, dot line for MM5, and dashed line for WRF, respectively.

전반적으로 WRF와 MM5 실험은 강수 결과가 서로 흡사한 형태를 보이나, WRF 모형이 MM5 실험 결과에서 보인 화북지방의 과다 강수를 줄여 관측값과 비슷하게 모의하였다. RSM 실험은 강수량에 있어서는 전반적으로 관측과 유사한 값을 모의하였으나 중국대륙의 강수 영역을 넓게 분포시켜 강수 상관도는 MM5 실험 결과와 흡사하였다. 적운모수화 방안을 WRF와 MM5 모형에서 사용한 방안으로 대치한 RSM 실험에서는 강수 분포가 WRF 실험결과와 유사해진 것에 비추어 볼 때, 동아시아 몬순 모의에서 적운 모수화의 중요성이 재확인되었다. 종관장에서는 WRF 실험은 한반도를 중심으로 북쪽으로는 습윤하게 남쪽으로는 건조하게 모의하였고 바람은 대체적으로 약하게 모의하였으며, 대류권 중·상층의 남북 방향의 온도경도를 약화시켰다. 이러한 특성은 MM5 실험에서도 비슷한 패턴으로 분석되었으며, RSM 실험의 경우 역시 남북 방향의 온도경도의 약화가 모의되는 경향이 있으나 편차의 크기는 다른 두 모형에 비하여 작다. RSM 실험은 WRF와 MM5 실험들에서 공통적으로 나타난 대류권 하층의 습윤, 한랭화를 향상시키는 것이 뚜렷하다.

종합적으로, WRF, MM5, RSM 모형 중에서 강수 모의에서는 WRF 모형이, 종관장에서는 RSM이 상대적으로 우수하게 모의한 것으로 판명된다. WRF 실험이 MM5 실험보다 향상된 성능을 보인 것은 WRF가

MM5 모형에 비하여 정교한 수치계를 사용하기 때문인 것으로 지적된다 (Skamarock, 2004). 또한 RSM 실험이 WRF 나 MM5 실험보다 종관장을 우수하게 모의한 것은 RSM이 분광형 모형이면서 측면경계에서만 아니라 모형 내부에서도 섭동 동지 (perturbation nesting)에 의하여 대규모 종관장을 잘 유지시키기 때문인 것으로 분석된다 (Juang and Hong, 2001; Takle *et al.* 2000). RSM 모형이 종관장 모의에 우수하면서도 강수 모의는 WRF 모형이 상대적으로 우수한 결과를 보인 이유는 RSM 모형의 물리 과정의 특성에서 찾을 수 있다. 전구 모형인 MRF 모형의 물리 과정을 사용하는 RSM 모형은 중규모 현상에 초점을 둔 WRF 모형에서처럼 중규모 현상을 잘 표현하지 못하는 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 한국 과학재단의 SRC 프로그램인 기후 환경센터와 기상청 R&D 과제인 중기예측 정확도 향상 기술 개발과제에 의해 이루어졌습니다. 훌륭한 지적을 해주신 두 분의 심사위원님들께 감사드립니다.

참고문헌

김옥연, 김태국, 오재호, 2002: 중규모 모형을 이용한 한반도

- 및 동아시아 지역의 강수모의 성능평가. *한국기상학회 2002년 봄 학술발표회, 경북대학교 4월 25일 -26일*, 603-604.
- 박세영, 정성훈, 장동언, 최정희, 2002 : 2002년 8월의 WRF 모형과 MM5 모형의 수치실험 비교검증. *한국기상학회 2002년 가을 학술발표회, 서울대학교 10월 24일 - 25일*, 382-383.
- 최준태, 이선영, 장태규, 2001: A Comparison of WRF and MM5 in East Asia Region. *한국기상학회 2001년 가을 학술발표회, 연세대학교 10월 25일 - 26일*, 488-489.
- Arakawa, A., and W. H. Schubert, 1974 : Interaction of a cumulus ensemble with the large-scale environment. Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-704.
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001 : Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I : Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569-585.
- Chou, M.-D., 1992 : A solar radiation model for use in climate studies. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 762-772.
- _____, and K.-T. Lee, 1996 : Parameterizations for the absorption of solar radiation by water vapor and ozone. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 1203-1208.
- _____, _____, and Tsay S-C, Fu Q, 1999 : Parameterization for cloud longwave scattering for use in atmospheric models, *J. Clim.*, **12**, 159-169.
- Dudia, J., 1989 : Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107.
- Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1994: A Description of the Fifth Generation Pen State/NCAR Mesoscale Model, NCAR Tec Note NCAR/TN-398 +STR, pp 138.
- Hong, S.-Y. and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322-2339.
- _____, _____, 1998: Convective trigger function for a mass flux cumulus parameterization scheme. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2599-2620.
- _____, H.-M. H. Juang, and D.-K. Lee, 1999 : Evaluation of a regional spectral model for the East Asian monsoon case studies for July 1987 and 1988. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 553-572.
- _____, _____, and Q. Zhao, 1998: Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2621-2639.
- _____, J. Dudhia, and Y. Noh, 2003 : A new vertical diffusion package with explicit treatment of the entrainment processes. *International workshop on NWP models for heavy precipitation in Asia and Pacific area*. Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 4-6 February.
- Juang, H.-M. H., S.-Y. Hong and M. Kanamitsu, 1997 : The NCEP regional spectral model : An update, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2125-2143.
- _____, S.-Y. Hong, 2001 : Sensitivity of the NCEP regional spectral model to domain size and nesting strategy. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2904-2922.
- Kain, J.S., 2004 : The Kain-Fritsch Convective Parameterization : An Update. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 170-181.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002 : NCEP-DOE AMIP-2 Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.
- Klemp, J. B., W. C. Skamarock, and J. Dudhia, 2000 : Conservative split-explicit time integration methods for the compressible nonhydrostatic equations. [Available online at <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf-dyn-num.html>.]
- Lee, D.-K., H. R. Kim, and S.-Y. Hong, 1998 : Heavy rainfall over Korea during 1980-1990. *Korean J. Atmos. Sci.*, **1**, 32-50.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997 : Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere : RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102(D14)**, 16663-16682.
- Noh, Y., W. G. chun, S.-Y. Hong, and S. Raasch, 2003 : Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data. *Bound.-Layer Meteor.*, **107**, 401-427.
- Reynolds, R. W., N. A. Rayner, T. M. Smith, D. C. Stokes and W. Wang, 2002: An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J. Climate*, **15**, 1609-1625.
- Skamarock, W. C., 2004 : Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 3019-3032.
- Take, E. S., and Coauthors, 1999 : Projects to intercompare regional climate simulations (PIRCS) : Description and initial results. *J. Geophys. Res.*, **104**, 19443-19461.