

METRI AGCM의 복사 모수화 개선에 따른 겨울철 기후모의의 특징적 변화

임한철* · 변영화 · 박수희 · 권원태

국립기상연구소 기후연구과

(2008년 12월 26일 접수; 2009년 4월 3일 승인)

Changes in the Characteristics of Wintertime Climatology Simulation for METRI AGCM Using the Improved Radiation Parameterization

Han-Cheol Lim*, Young-Hwa Byun, Suhee Park, and Won-Tae Kwon

Climate Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research / Korea Meteorological Administration

(Manuscript received 12 December 2008; in final form 3 April 2009)

Abstract

This study investigates characteristics of wintertime simulation conducted by METRI AGCM utilizing new radiation parameterization scheme. New radiation scheme is based on the method of Chou *et al.*, and is utilized in the METRI AGCM recently. In order to analyze characteristics of seasonal simulation in boreal winter, hindcast dataset from 1979 to 2005 is produced in two experiments - control run (CTRL) and new model's run (RADI). Also, changes in performance skill and predictability due to implementation of new radiation scheme are examined. In the wintertime simulation, the RADI experiment tends to reduce warm bias in the upper troposphere probably due to intensification of longwave radiative cooling over the whole troposphere. The radiative cooling effect is related to weakening of longitudinal temperature gradient, leading to weaker tropospheric jet in the upper troposphere. In addition, changes in vertical thermodynamic structure have an influence on reduction of tropical precipitation. Moreover, the RADI case is less sensitive to variation of tropical sea surface temperature than the CTRL case, even though the RADI case simulates the mean climate pattern well. It implies that the RADI run does not have significant improvement in seasonal prediction point of view.

Key words: METRI AGCM, 3-month prediction, radiation processes

1. 서론

국립기상연구소는 1990년대부터 계절규모 장기에
측에 큰 관심을 가져왔으며 기후예측 성능을 향상시키
기 위한 기반 연구들을 수행해 왔다. 2000년대 초에는
역학모델(METRI AGCM)에 의한 앙상블 계절예측시
스템을 구축, 계절예측자료를 생산하기 시작하였다.

특히 2006년에는 기상청의 3개월 예보제 시행을 앞두
고 3개월 예측자료 생산을 위한 예측시스템으로 확장
되면서 최근까지 매월 향후 3개월 간의 예측자료를 생
산하고 있다 (기상연구소, 2006).

3개월 예측시스템의 근간인 METRI AGCM은 2000년
초에 연세대학교의 대기대순환 모델(YONU AGCM
ST15)을 기초로 국립기상연구소 기후예측모델로서 구축
된 이후, 최근 매월 3개월 예측자료 생산시스템으로 운
용되면서 METRI AGCM은 국립기상연구소의 준현업
시스템이 되었다. 이 과정에서 METRI AGCM의 물리
과정뿐만 아니라 역학과정까지 끊임없이 개선시켜 준
현업 모델로써 안정화 도모를 하였으며 한편으로는 계
절예측성을 분석하고 기후모의 성능개선과 평가를 위
한 노력을 지속적으로 수행하였다. 지금까지 모델의

*Corresponding Author: Han-Cheol Lim, Climate Research
Laboratory, National Institute of Meteorological Research/
KMA 45 Gisangchung-gil, Dongjak-gu, Seoul 156-720,
Republic of Korea
Phone: +82-2-6712-0312, fax: +82-2-834-5922
E-mail: hclim99@metri.re.kr

안정적 운영과 관련된 복사 모수화 방안 중 지표 알베도와 구름 광학 깊이의 수정, 델타-에딩턴 2-stream 방법과 관련된 선형 방정식에 대한 새로운 해법의 도입, 지표-수문과정의 부분적 수정, 상층 바람의 과대 모의를 해결하기 위한 조절 계수 도입 등의 모델 개선노력이 수행되었다.

이와 같은 모델의 안정적 운영과 더불어 예측 성능에 대한 분석 및 평가도 꾸준히 이루어져 왔는데, 정일용 등(2003)은 METRI AGCM의 근간인 YONU AGCM의 수평 고해상도($2^{\circ} \times 2^{\circ}$) 민감도 실험을 수행하여 모델의 기후모의 특성을 분석하여 고해상도 모델일수록 열대지방 강수량 개선이 뚜렷함을 보였다. 이 후 역학 및 복사 모수화 과정이 개선된 YONU AGCM ST15과 지면/식생 모델인 BATS를 접합한 기후모의 실험에서는 중위도 북태평양 고기압을 약하게 모의하는 등 몇 가지 계통적 오차가 있음을 보였다 (정일용 등, 2006). 최근에 국립기상연구소 3개월 예측시스템에 METRI AGCM을 사용하면서 METRI AGCM의 계절별 기후모의 성능을 평가하였는데 (변영화 등, 2007), 1979년부터 2005년까지 27년 기간 동안의 SMIP/ HFP(Seasonal Model Intercomparison Project/ Historical Forecast Project) 방식으로 예측을 수행한 결과, METRI AGCM이 계절별 평균 기온값의 일반적 특징을 대부분 잘 모의하는 것으로 나타났다. 그러나 아직 METRI AGCM은 열대 ITCZ를 남북방향으로 너무 넓게 모의하고 북반구 중위도($30^{\circ}N \sim 60^{\circ}N$)의 강수를 너무 과소 모의할 뿐만 아니라 전체적으로 열대지역 대기 하층에서의 고온 편차가 심한 특징을 보였다. 특히 METRI AGCM은 계절에 따라 엘니뇨-남방진동(ENSO)과 연관된 경년변동의 특징을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

최근 국립기상연구소는 관련된 일련의 연구에서 지적된 METRI AGCM의 계통적 오차를 줄이고 기후모의 성능을 향상시키고자 METRI AGCM의 주요 취약점 중의 하나인 복사과정에 선진 복사모델 적용을 시도하였다 (기상연구소, 2005). 정일용 등(2003)에 의하면, METRI AGCM이 가지는 열대지역의 매우 큰 고온 편차는 해들리 순환을 약하게 모의하기 때문에 발생하는 열대지역과 중위도 사이 열수송의 문제인 것으로 파악되었으며, 최진영 등(2006)의 연구는 복사 모수화 방안의 개선으로 해들리 순환과 관련한 기온모의 및 동서 평균 바람장의 개선에 상당한 영향을 주는 것으로 분석되었다.

본 연구는 개선된 복사모수화 방안이 METRI AGCM

의 기후모의에 어떤 영향을 주는지 먼저 살펴보고, 개선된 복사모수화 방안이 장착된 METRI AGCM의 겨울철 평균 기후모의를 평가하고 계절 예측성 향상 정도를 분석 및 평가하고자 하였다. 그래서 개선된 복사모수화 방안이 적용된 METRI AGCM을 사용하여 1979년부터 2005년까지 27년간의 겨울철 과거기후재현(hindcast) 자료를 생산하였으며 그 결과를 기존 모델과 비교실험을 통하여 새롭게 적용된 복사모수화 방안의 영향을 분석하였으며 관측값과 비교로부터 겨울철 기후 평균값 모의 성능을 분석하였다. 또한, 기존 모델 및 개선된 모델의 경년변동성 모의 능력 및 겨울철 예측성에 대한 평가를 실시하였다.

2. METRI AGCM의 개선

2.1 복사과정의 개선

METRI AGCM은 미국 일리노이대학교 전구모델의 물리과정과 일본 기상연구소 전구모델의 역학과정을 기반으로 한 위경도 $5^{\circ} \times 4^{\circ}$, 연직 17층, σ -좌표계의 전구 대기순환 모델이다. 역학과정에서 수평차분은 Arakawa C방안(Arakawa and Lamb, 1977)을, 연직차분은 Tokioka C방안(Tokioka *et al.*, 1984)을 사용하고 있다. 또, 지표수문분과정은 'bucket model'(Ghan *et al.*, 1982)이 적용되었고, 복사과정은 두-흐름(Two-stream)/델타-에딩턴(delta-Eddington) 근사 방법으로 계산되었다(Oh, 1989).

앞서 지적하였듯이 METRI AGCM이 가지는 계통적 오차의 가장 두드러진 특징은 열대지역을 중심으로 한 큰 고온 편차이며 이의 개선을 위해 기존의 복사과정 모듈을 새로운 복사모델로 대체하였다. 본 연구에서 사용된 복사과정 모수화 방안은 미항공우주국 고다드센터(NASA/GSFC)에서 개발된 장파복사 및 단파복사과정을 모두 포함하고 있다. 새로 적용된 장파 복사 모수화 방안의 가장 큰 개선점은 기존의 복사과정이 3개의 주요 기체에 대한 흡수를 고려한 4개 스펙트럼 밴드를 가지고 있었던 반면, 개선된 장파복사과정은 미공군 지구물리실험실(Air Force Geophysical Laboratory)의 HITRAN 자료(Rothman *et al.* 1998)를 기반으로 하여 주요기체 뿐만 아니라 미량 기체 (N_2O , CH_4 , CFC's), 구름, 에어로솔의 흡수를 포함한 10개 적외 스펙트럼 밴드로 세분화되었다는 것이다 (Chou *et al.*, 2001). 그 외, 지표 온도에 미치는 식생효과를 반영하였으며, 각 기층에서 기온 예단을 보다 정확하고 빠르

계 계산하기 위하여 특정 스펙트럼 밴드에서 복사에너지에 따른 유효온도를 산정하는 τ dB 방법 대신 Chou and Lee (2005)이 사용한 각 기체의 장파 흡수 파장대에 대한 기층의 기온을 예단하는 Bdt 방법을 채택하였다. 또 개선된 복사 모수화 방안을 보다 정확하고 빠르게 계산하기 위하여 투과함수로 k-분포(k-distribution) 방법 또는 테이블 순람(table look-up) 방법을 사용하였다. 구름과 에어로솔의 광학두께는 단일산란 알베도(single-scattering albedo)와 비대칭 인자(asymmetric factor) 스케일링으로 산란효과를 고려하였으며, 이때 광학두께는 구름의 수액, 얼음 함량 그리고 에어로솔의 입자크기의 함수로 모수화함으로써 복사 속(flux) 계산에 정확도를 높였다.

개선된 단파복사 모수화 방안은 Chou and Suarez (1999)의 이론을 기초로 하여 기존의 복사 물리과정인 3개의 스펙트럼 밴드를 사용하였던 것에서 11개 스펙트럼 밴드로 확장된 것이다. 이 때 단파 밴드는 0.175 μm 에서 10 μm 까지의 거의 전 영역을 포괄하며, 수증기, O₃, O₂, CO₂, 뿐만 아니라 구름, 에어로솔의 흡수와 구름, 에어로솔, 분자에 의한 산란 그리고 지표와의 상호작용까지 고려되었다. 또한 구름의 중첩에 대해서는 최대-확률 근사가 쓰였으며, 식생과 지면 반사 및 투과와 상호작용과 미량 기체의 흡수까지 모두 고려함으로써 지표면 부근 대기가열의 정확도를 향상시켰다. Table 1은 기존의 METRI AGCM 복사과정과 새롭게 채택된 복사 모수화 방안의 단파, 장파에 따른 스펙트럼 구분, 흡수기체, 투과 모수화 방법을 비교 정리한 것이다.

2.2 실험 설계

기존의 METRI AGCM과 개선된 복사 모수화 방안을 사용한 METRI AGCM 모델의 기후 모의 성능을 비교하기 위하여, 본 연구에서는 1979년부터 2005년까지의 27년간 겨울철 평균장 모의를 각각 수행하였다. 지난 겨울철에 대한 예측은 SMIP II (Seasonal Model Intercomparison Project) 타입의 기후 모의로서 본 연구에서는 현재 국립기상연구소의 3개월 예측시스템의 자료 생산 방식과 동일한 형태의 HFP(Historical Forecast Project) 방식으로 수행된 것이다. 즉, 예측 수행 시기 동안 해수면 온도 편차가 크게 변하지 않는다고 가정하고, 예측 시작 시기의 해수면 온도 편차를 모델 예측 기간 동안 동일하게 지속시키는 편차 지속법을 적용한 것으로서 하부 경계조건으로서 해수면온도는 예측 시

작 월로부터 약 2개월 전의 월평균 해수면온도 분포의 편차를 사용하였다(Reynolds *et al.*, 2002).

모델의 초기 조건으로는 NCEP/DOE 재분석 자료(Kanamitsu *et al.*, 2002)가 사용되었으며, 본 연구에서는 매 예측마다 10개의 앙상블 실험이 수행되었다. 모델 앙상블은 약 1달의 선행 시간을 가지고 매년 10월 27일~31일 사이의 12시간 간격의 초기 조건을 사용하는 시간 지연법으로 구성되어 당해 12월부터 다음해 2월 말까지의 적분결과를 분석하였다.

기존 모델 및 개선된 복사과정이 적용된 모델실험은 CTRL(기존 모델) 및 RADl(개선된 모델)로 지칭하였으며, 이 실험의 결과들은 서로 비교하거나 또는 관측값과 비교하였다. 기후모의 특징 분석 및 예측 성능의 평가를 위해서 관측 자료는 대기 순환장의 경우 적분기간과 동일한 기간의 NCEP/DOE 재분석 자료(이하 RA2로 지칭)를 사용하였으며, 강수량은 월평균 CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation) 자료를 사용하였다(Xie and Arkin, 1997). 그리고 자료를 비교분석할 때 METRI AGCM의 산출자료는 장기에 측시스템 표준 예측과 검증의 국제표준 수평 해상도(2.5°x2.5°)에 맞게 내삽하여 RA2 및 CMAP과 비교 분석 하였다.

3. 겨울철 평균 기후 모의의 비교

3.1 연직 기온 분포의 변화

METRI AGCM의 개선을 위하여 장착된 복사 모수화 방안의 장파복사는 일반적으로 대류권에서 대기 냉각율을 증가시키는 역할을 하는 것으로 밝혀졌으며 정확도 또한 고해상도 스펙트럼 모델인 선모델(line-by-line model) 결과와 비교해도 뒤짐이 없는 것으로 알려져 있다(Chou *et al.*, 2001). 개선된 복사 모수화 방안은 일반적으로 지구 대기 열평형을 변화시켜 대류권의 기온하강을 초래하는 경향이 있어서 METRI AGCM 대기꼭대기에서의 순 복사에너지의 변화를 먼저 살펴 보았다. Fig. 1은 두 실험에서 계산된 대기 꼭대기에서의 순 복사에너지를 동서로 평균한 위도별 분포를 나타낸 것으로 순 복사에너지가 양의 부호(+)일 때는 대기로 들어오는 에너지가 더 많음을 의미하고 음의 부호(-)일 때는 대기 꼭대기에서 우주 밖으로 나가는 복사에너지 양이 더 많음을 의미한다. CTRL과 RADl 모두, 북반구 겨울철 열대지방과 남반구 중위도지방에서

Table 1. Comparison of radiation parameterizations utilized in the models of the CTRL and RADI experiments.

Long wave					Short wave				
Band		Spectral	Absorber	Transmittance parameterization	Band		Spectral	Absorber	
New	Old	Range (cm ⁻¹)			New	Old	Range (μm)		
1	(1)	0~340	H ₂ O line	K, T	1	(1)	0.174~0.225	O ₃ , Rayleigh	UV & VIS
2	(2)	340~540	H ₂ O line	K, T	2	(1)	0.225~0.245	O ₃ , Rayleigh	
3a	(3)	540~620	H ₂ O line,	K, T	3	(1)	0.245~0.260	O ₃ , Rayleigh	
3b	(3)	620~720	H ₂ O continuum,	C, C					
3c	(3)	720~800	CO ₂	K, T					
4	(2)	800~980	H ₂ O line,	K, K	4	(1)	0.280~0.295	O ₃ , Rayleigh	
			H ₂ O continuum,	C, C					
			CO ₂ , F11, F12, F22	K, K					
5	(2)	980~1100	H ₂ O line, CO ₂ , F11	K, K	5	(1)	0.295~0.310	O ₃ , Rayleigh	
			H ₂ O continuum	C, C					
			O ₃	T, T					
6	(2)	1100~1215	H ₂ O line,	K, K	6	(1)	0.310~0.320	O ₃ , Rayleigh	
			H ₂ O continuum,	C, C					
			N ₂ O, CH ₄ , F12, F22	K, K					
7	(4)	1215~1380	H ₂ O line, N ₂ O, CH ₄	K, K	7	(1)	0.320~0.400	O ₃ , Rayleigh	
			H ₂ O continuum,	C, C					
8	(1)	1380~1900	H ₂ O line	K, T	8	(2)	0.400~0.700	O ₃ , H ₂ O, Rayleigh	
9	(2)	1900~3000	H ₂ O line	K, K					
10*	-	540~620	H ₂ O line, CO ₂ , N ₂ O,	K, K					
			H ₂ O continuum	C, C					
					NIR				
					Total spectrum				
					O ₂ , CO ₂				

K : k-distribution method with linear pressure scaling

T : Table look-up with temperature and pressure scaling

C : One-parameter scaling for water vapor continuum absorption

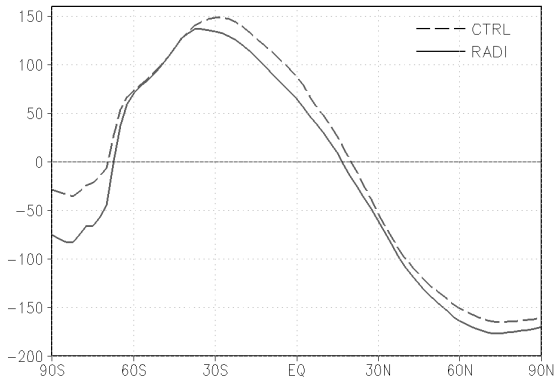


Fig. 1. Zonally-averaged net radiation flux ($W m^{-2}$) at the top of the atmosphere in the wintertime obtained from CTRL and RADI experiments.

순 복사에너지가 양의 값을 가지며 이것은 대기 꼭대기에서 들어오는 복사에너지 양이 더 많음을 보여주고 있다. 반면, 북반구 중·고위도와 남반구 고위도지방에서는 지구에서 우주 밖으로 나가는 복사에너지 양이 더 크다. 일반적으로 관측된 기후평균 순 복사에너지는 저위도 지방에서 양의 부호, 고위도지방에서 음의 부호를 가지는 특징이 있는데 CTRL와 RADI 모두 이런 특징

을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 하지만, 새로운 복사 과정이 적용된 RADI 실험은 거의 대부분 위도에서 대기 꼭대기의 순 복사에너지 양이 CTRL 실험보다 작음을 알 수 있는데, 이는 열대지방에서 대기로 들어오는 복사에너지는 감소하고 중·고위도 지방에서 대기권 밖으로 나가는 복사에너지는 더 많아졌음을 의미한다. 결국, 개선된 복사 모수화 방안은 대기 꼭대기에서 순 복사 에너지를 더 많이 내보내고 더 적게 들어오기 때문에 전체적으로 지구 대기를 냉각시킨다고 할 수 있다.

좀 더 상세한 겨울철 전지구 복사에너지 수지를 살펴보기 위하여 Fig. 2에서는 지표와 대기꼭대기에서 장파와 단파로 나누어서 입·출입 복사에너지 수지를 살펴보았다. Fig. 2a는 CTRL 실험에 대해서는 대기꼭대기에서 단파의 순 복사에너지는 $+206.9(W/m^2)$, 장파의 순 복사에너지는 $-211.5(W/m^2)$ 로 전체 대기꼭대기에서 순 복사에너지(NR_{TOA})는 $-4.6(W/m^2)$ 인 것으로 나타났다. 반면 지표에서 단파 순 복사에너지는 $+143.0(W/m^2)$, 장파에 의한 순 복사에너지는 $-43.4(W/m^2)$ 로 지표에서 전체 순 복사에너지(NR_{SFL})는 $+99.6(W/m^2)$ 것으로 밝혀졌다. 그래서 겨울철 대기 꼭대기에서 우주 밖으로 나가는 순 복사에너지량은 $-4.6(W/m^2)$ 이며

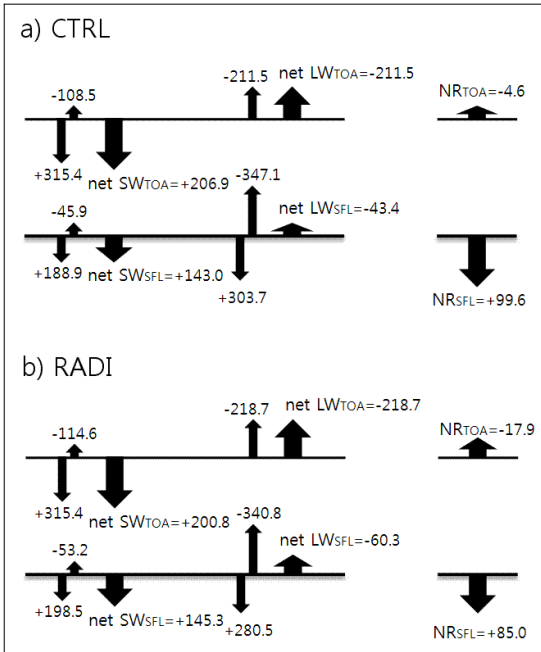


Fig. 2. Radiation budgets ($W m^{-2}$) of short-wave radiation (SW), long-wave radiation (LW), and total net-radiation (NR) at the top of the atmosphere (TOA) and the Earth's surface (SFL).

지표로 들어가는 순 복사에너지량은 $+99.6(W/m^2)$ 으로 나타났다.

RADI 실험에서 대기꼭대기 단파의 순 복사에너지는 $+200.8(W/m^2)$ 이며 장파의 순 복사에너지는 $-218.7(W/m^2)$ 로 전체 대기꼭대기에서 순 복사에너지(NR_{TOA})가 $-17.9(W/m^2)$ 이었다 (Fig. 2b). 지표에서는 단파 순 복사에너지는 $+145.3(W/m^2)$ 이었으며, 장파 순 복사에너지는 $-60.3(W/m^2)$ 로 지표에서 전체 순 복사에너지(NR_{SFL})는 $+85.0(W/m^2)$ 였다. 그러므로 겨울철 대기 꼭대기에서 밖으로 나가는 순 복사에너지량은 $-17.9(W/m^2)$ 이고 대기에서 지표로 들어가는 순 복사에너지량은 $+85.0(W/m^2)$ 이 된다.

결국, 대기 꼭대기의 복사에너지는 RADI실험에서 $-13.3(W/m^2)$ 더 많은 복사에너지를 우주밖으로 더 내보내는 것으로 나타났지만 겨울철 지표에서는 RADI 실험이 CTRL 실험보다 $14.6(W/m^2)$ 더 많은 복사에너지가 대기로부터 들어오는 것 (즉, $-14.6 W/m^2$)으로 나왔다.

이러한 겨울철 복사에너지수지의 특징 변화와 연직 기온과의 관계를 살펴보기 위하여 Fig. 3에서는 RADI에서 CTRL을 뺀 연직기온과 동서바람의 차이를 보였다. 대류권 중·상층에 RADI 실험에서 많은 냉각이 발

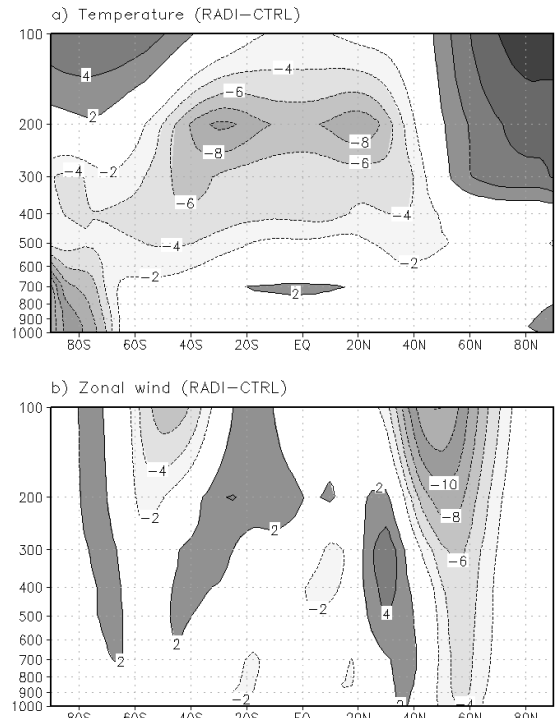


Fig. 3. Latitude-height cross-sections of differences in zonally-averaged (a) temperatures and (b) zonal winds. The contour intervals are $2^{\circ}K$ and 2% , respectively.

생하는 반면, 지표에서는 약하지만 CTRL보다 조금 더 더워진 것으로 나타났다. 기온의 이러한 특징은 앞에서 살펴본 RADI 실험에 채택된 복사모수화 방안의 순 복사에너지 변화와 일치하는 것으로 보인다. 하지만, 양극지방에는 예외적으로 전구 평균과 반대 시그널이 뚜렷이 나타났다. Fig. 3b는 동서 평균한 연직 수평바람장의 RADI에 CTRL을 뺀 차이를 보여주고 있다. 가장 뚜렷한 특징은 Fig. 3a에서 연직기온의 남북 향 경도차가 큰 지역의 동서바람이 차이가 크음을 확인할 수 있었다. 이처럼 새로 개선된 복사 모수화 방안이 대기 꼭대기에서 밖으로 나가는 순 복사에너지를 증가시켜 METRI AGCM의 열대와 중위도 대기 중·상층의 기온을 하강시킨다. 결과적으로 RADI의 북반구 중위도 상층제트가 CTRL 보다 남쪽으로 약간 편향된 특징을 보인다(Fig. 3b). 이러한 특징은 다음에 설명할 Fig. 6b와 Fig. 6c 비교에서도 나타난다. 먼저 우리나라 부근 제트코어가 CTRL에서는 우리나라 남부지방까지 포함하고 있지만(Fig. 6b) RADI에서는 제트코어가 더 남쪽인 우리나라 제주도에 걸쳐져 있는 있으며(Fig. 6c),

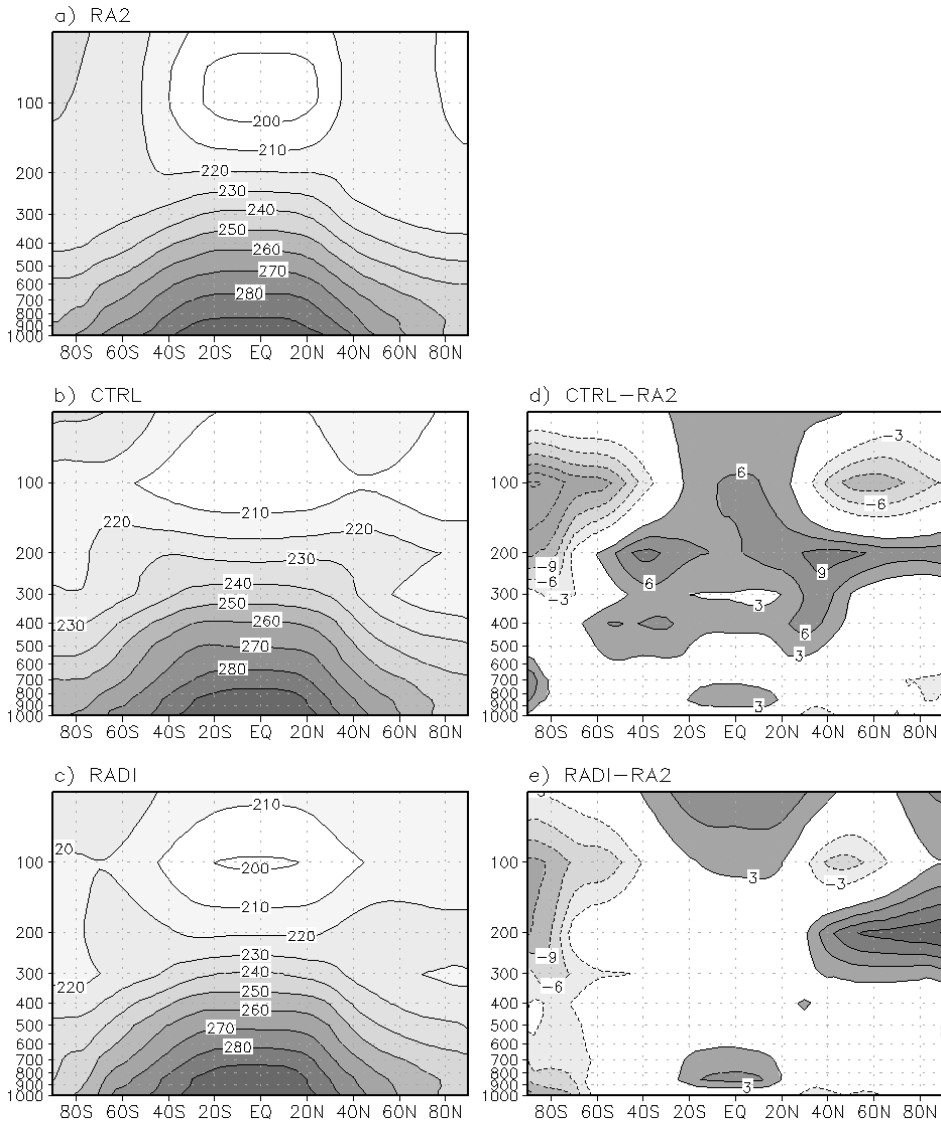


Fig. 4. Vertical cross-section of the wintertime zonal mean temperature (K) obtained from observation and each experiment. Zonal mean temperature is averaged for the hindcast period from 1979 to 2005. Left panels indicate (a) observation (RA2), (b) CTRL, and (c) RAD1 cases, and contour interval is 10 K. Right panels shows differences from observation for (d) CTRL and (e) RAD1 runs, respectively. Contour interval is 3 K starting from ± 3 K. In the panels, dark shade denotes positive values greater than +3 K and light shade are negative values less than -3 K. Zero line is omitted.

수평바람이 30 m/s 이상인 지역 또한 CTRL보다 RAD1에서 캄차카반도 훨씬 아래쪽 지역을 지나가는 특징으로부터 알 수 있다. 한편, 새로운 복사 모수화 방안은 지표부근에서는 지표로 들어가는 순 복사에너지를 감소시켜 대기하층에서 기온이 상승되는 특징을 보였다.

이 두 실험의 겨울철 평균 기후모의성능을 비교하기 위하여 Fig. 4에서는 겨울철 관측 평균장과 연직 기

온분포의 차이를 구하였다. CTRL 실험과 RAD1 실험은 모두 RA2와 유사한 분포를 보이며 대체로 대류권 겨울철 기온의 연직 분포를 비교적 잘 모의하고 있다 (Figs. 4a, 4b, 4c). 그러나 대류권 상부로 올라가면서 METRI AGCM은 기온의 편차가 심해지는 경향을 보인다. 기존 모델 실험인 CTRL은 열대 지방과 중위도 중·상층 대류권 대부분에서 큰 고온 편차가 존재하

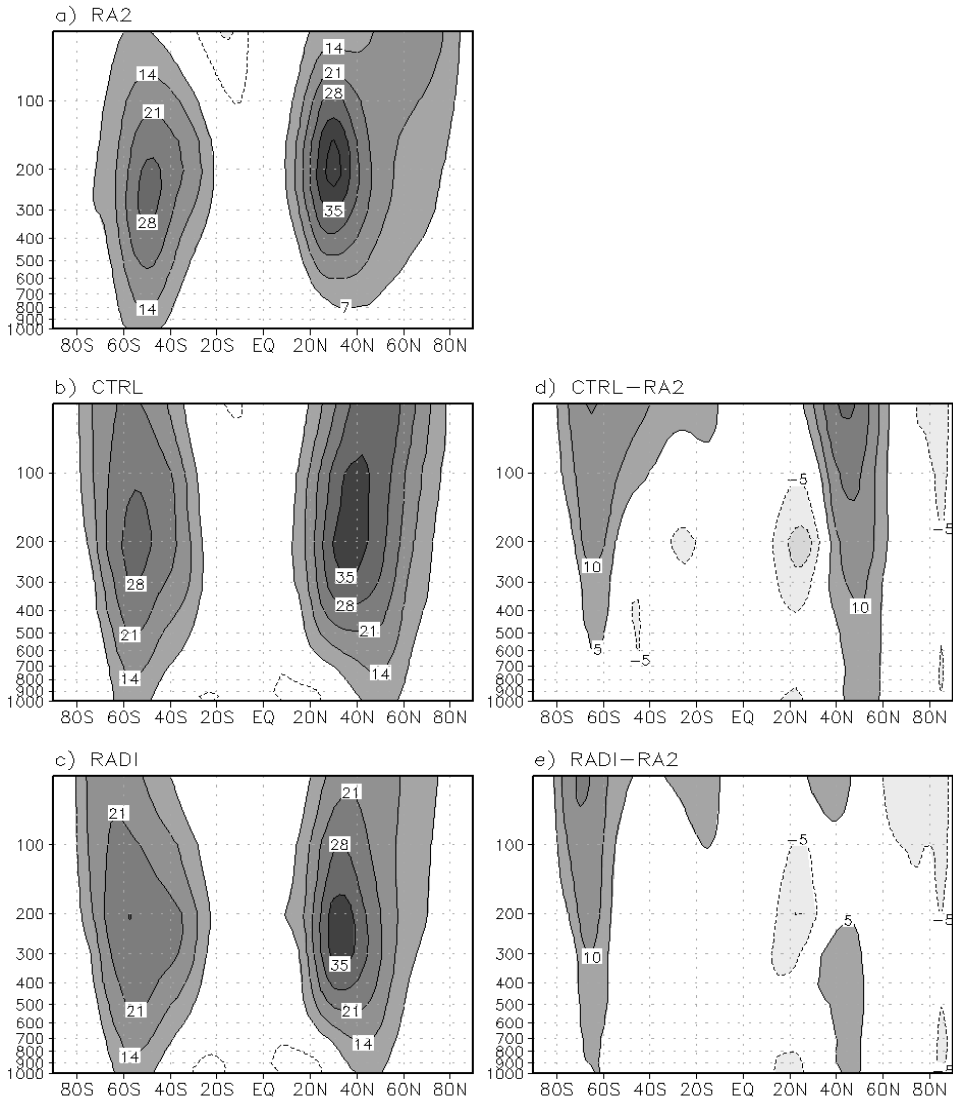


Fig. 5. Same as in Fig. 4, except for zonal wind (m sec^{-1}) with contour interval of 7 m sec^{-1} in the left panels, and of 5 m sec^{-1} interval in the right panels.

며, 남북반구 고위도 대류권 상층에서는 저온 편차가 나타난다. 그러나 CTRL 실험의 200 hPa 주변 열대 대류권 중상부 양의 기온 편차가 개선된 복사모수화 방안을 장착한 RAD1 실험에서는 크게 완화되었다. 이처럼 열대 연직방향으로 CTRL의 고온 편차가 많이 완화된 원인은 앞에서 지적한 바와 같이 개선된 복사모수화 방안이 대기 꼭대기에서 순 복사에너지 방출이 커서 나타나는 현상으로 해석된다. RAD1 실험의 겨울철 연직기온 분포의 또 다른 특징은 북반구 중·고위도 지방 대기 상층의 고온 편차가 CTRL 보다 오히려 커

지는 것인데, Fig. 3의 북반구 중·고위도에서도 뚜렷이 나타나는 RAD1에서 새로운 오차의 증가는 개선된 복사모수화 방안이 장착된 METRI AGCM의 북반구 대기 상층에서 남북방향 기온경도가 더욱 약화됨을 의미하며 결국, RAD1의 중위도 대류권 상층 동서 바람장 약화를 암시하기도 한다.

3.2 바람장의 변화

겨울철 대표적인 대기 평균장의 특징 중 하나는 북

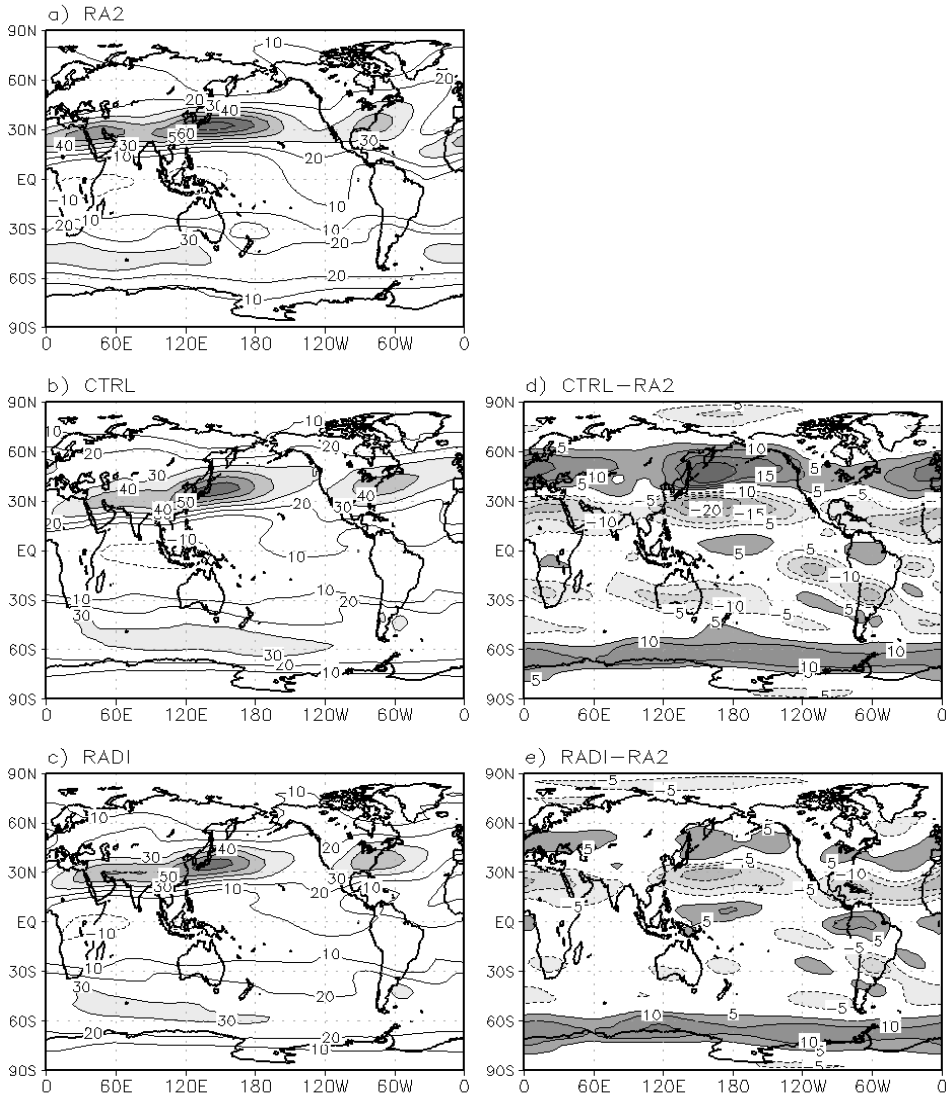


Fig. 6. Horizontal distribution of 200 hPa u-wind (m sec^{-1}) obtained from observation and each experiment. U-wind is averaged for the hindcast period from 1979 to 2005. Left panels indicate (a) observation (RA2), (b) CTRL, and (c) RADI cases, and contour interval is 10 m sec^{-1} . Right panels show differences from observation for (d) CTRL and (e) RADI runs, respectively. Contour interval is 5 m sec^{-1} starting from $\pm 5 \text{ m sec}^{-1}$. In the right panels, dark shade denotes positive values greater than $+5 \text{ m sec}^{-1}$ and light shade are negative values less than -5 m sec^{-1} . Zero line is omitted.

반구 중위도 상층제트의 강화이며, 특히 겨울철 동아시아 상층제트의 강화는 동아시아 겨울철 기후 변동에 매우 중요한 역할을 한다 (Lau and Lau, 1984; 임규호, 1994). Fig. 5a의 RA2에서는 남·북반구 중위도 상층제트가 뚜렷한데 겨울철이라 북반구 상층제트가 더욱 강하게 발달된 특징을 보인다. CTRL 실험(Fig. 5b)과 RADI 실험(Fig. 5c) 모두 RA2와 같은 계절적 특징을 잘 모의하고 있지만, 두 실험 모두 북반구 상층제트 강

도를 실제보다 약하게 모의하는 METRI AGCM의 계통적 오차를 보인다. 또한 겨울철 북반구 상층제트 중심 위치가 크게 북쪽으로 편향되어 나타나는 CTRL의 오차가 RADI에서 상당히 개선되었음을 Fig. 5d와 Fig. 5e의 비교를 통해서 알 수 있다. 이와 같이 RADI 실험에서 북반구 상층제트가 남북방향으로 그 위치가 많이 개선되어 RA2와 비교적 유사하게 겨울철 북반구 상층제트를 모의하지만 상층제트의 중심핵의 높이가

RA2보다 다소 낮아지는 경향을 찾을 수 있다. 이와 같은 RADI 실험에서 나타나는 대류권 상층의 바람장 변화는 앞서 이야기한 바와 같이 복사모수화 과정의 개선으로 인한 대기 연직 기온분포 변화와 서로 밀접한 관계를 가지고 있다.

상층 바람장의 약화와 관련하여 전구 수평변화를 살펴보기 위하여 200 hPa 동서 바람장의 수평 분포를 분석하였다 (Fig. 6). CTRL, RADI 두 실험 모두 아시아 대륙 동안의 중위도 상층제트를 비교적 잘 모의하고 있으며, 북아메리카대륙 동안에 나타나는 중위도 제트도 RA2와 유사한 분포를 보인다. 그러나 RA2와 비교할 때, CTRL 실험의 경우 북반구 중위도 상층 제트가 북쪽으로 많이 편향되게 모의하기 때문에 일본 북부 및 오호츠크해 부근 북반구 중위도(30°N~60°N)에서 양의 오차를 크게 보이며, 그 남쪽에는 음의 오차가 나타난다 (Fig. 6d). 마찬가지로 북아메리카대륙 동안의 상층제트도 다소 북쪽으로 편향되고 유럽까지 길게 확장되어 모의하기 때문에 북아메리카대륙 동안 및 유럽 지역에서 큰 양의 오차를 보인다. 이와 반대로 RADI 실험의 겨울철 북반구 상층제트 모의는 CTRL에 비교하여 제트 중심부의 위치 오차는 많이 개선된 경향을 보이지만 그 강도는 RA2와 비교해서 약간 약화된 특징을 보인다 (Figs. 6c, 6e).

Fig. 7에서는 RA2, CTRL, RADI 850 hPa 겨울철 평균 바람장과 그 차이를 보여주고 있다. CTRL의 850 hPa 바람장은 북반구 중위도 태평양에 하층제트 중심을 보이고 있으며 상층 제트분포와 마찬가지로 북으로 편향된 위치오차 뿐만 아니라 하층 동서바람의 강도에도 큰 오차를 보이고 있다 (Figs. 7b, 7d). 하지만 RADI에서는 북반구 중위도의 하층의 CTRL에 나타난 동서바람 오차들이 많이 개선된 특징을 Fig. 7c와 Fig. 7e에서 보여주고 있다. CTRL과 RADI 두 실험 모두 북반구 중위도 하층 제트를 관측과 비교하여 비교적 북쪽으로 편향된 모의를 보이고 있지만 RADI 실험의 결과는 CTRL에 나타나는 북반구 중위도의 큰 오차를 많이 완화시켰다. 그래서 개선된 복사모수화 방안은 겨울철 북반구 중위도 태평양에서 편서풍대의 동서바람 오차 크기를 많이 줄인 것으로 보인다 (Figs. 7d, 7e).

3.3 강수량 분포

겨울철 평균 강수량 분포를 살펴보기 위하여 Fig. 8에서는 CMAP, CTRL, RADI의 평균 강수량과 상호간

의 차이를 나타내었다. 일반적으로 겨울철 평균 강수량은 Fig. 8a와 같이 적도태평양 남쪽에 강한 SPCZ (South Pacific Convergence Zone)의 발달과 중앙 아프리카대륙과 열대 인도양까지 이르는 열대강수대의 남하의 특징을 보인다. 그러나 Fig. 8의 CTRL과 RADI 실험은 기존 분석 결과에서 나타난 METRI AGCM의 특징적 오차 중의 하나인 열대 강수대를 남북으로 넓게 모의하는 문제를 그대로 보이고 있다 (변영화 등, 2007). CTRL에 CMAP을 뺀 Fig. 8d를 보면 북반구 열대 지역인 위도 10°N 부근에서 강수를 과대 모의하고 있는 특징을 보인다. 상대적으로 남반구 SPCZ지역과 열대인도양 적도남쪽에서는 과소 모의하는 경향을 보인다. CTRL 실험에서 북반구 열대 지역 강수의 과대모의는 앞에서 지적한 METRI AGCM이 열대수렴 강수대를 남북방향으로 너무 넓게 모의해서 나타나는 오차로 보인다. 이런 METRI AGCM의 계통적 오차는 적도 중·동태평양에서 열대수렴대가 적도를 중심으로 두 개로 분리되는 double ITCZ problem와는 다소 차이가 있는 것으로 판단된다.

한편, RADI 실험의 겨울철 평균 강수량은 CTRL와 비교해 열대 서태평양 강수량이 크게 약화되었으며, 동시에 CTRL에 나타난 10°N 부근 열대태평양 강수의 과대 모의로 나타나는 강수량 오차가 RADI에서 많이 감소했음을 알 수 있다 (Figs. 8c, 8e). 그 외 남아프리카대륙에서도 과대모의 했던 CTRL의 겨울철 평균 강수량 오차가 RADI에서 많이 개선된 것으로 나타났다. 그러나 새로운 복사모수화 방안이 채택된 RADI 또한 METRI AGCM의 계통적 오차는 여전히 내포하고 있을 뿐만 아니라 열대 인도양과 남아프리카 대륙에서도 CMAP자료와 비교한 오차는 여전히 큰 것으로 평가 되었다.

4. 겨울철 경년변동 모의 특징

기후모델을 활용한 계절예측의 보편적 평가방법은 기후모델의 평균 계절변동 모의를 평가하는 것과 매년 계절예측에서 경년변동성 모의 정도를 평가하는 것이다. 특히, 기존의 연구들은 열대지방의 대표적인 해수면 경년변동인 엘니뇨와 라니냐에 대한 대기 및 해양의 반응을 조사하였으며 중위도 몬순기후와의 원격상관에 관한 많은 논의를 해왔다 (Zhang *et al.* 1996; Wang *et al.* 2000; Wu *et al.* 2003). 이 연구에서도 기후모델의 경년변동 예측성 평가를 위하여 1979년부터

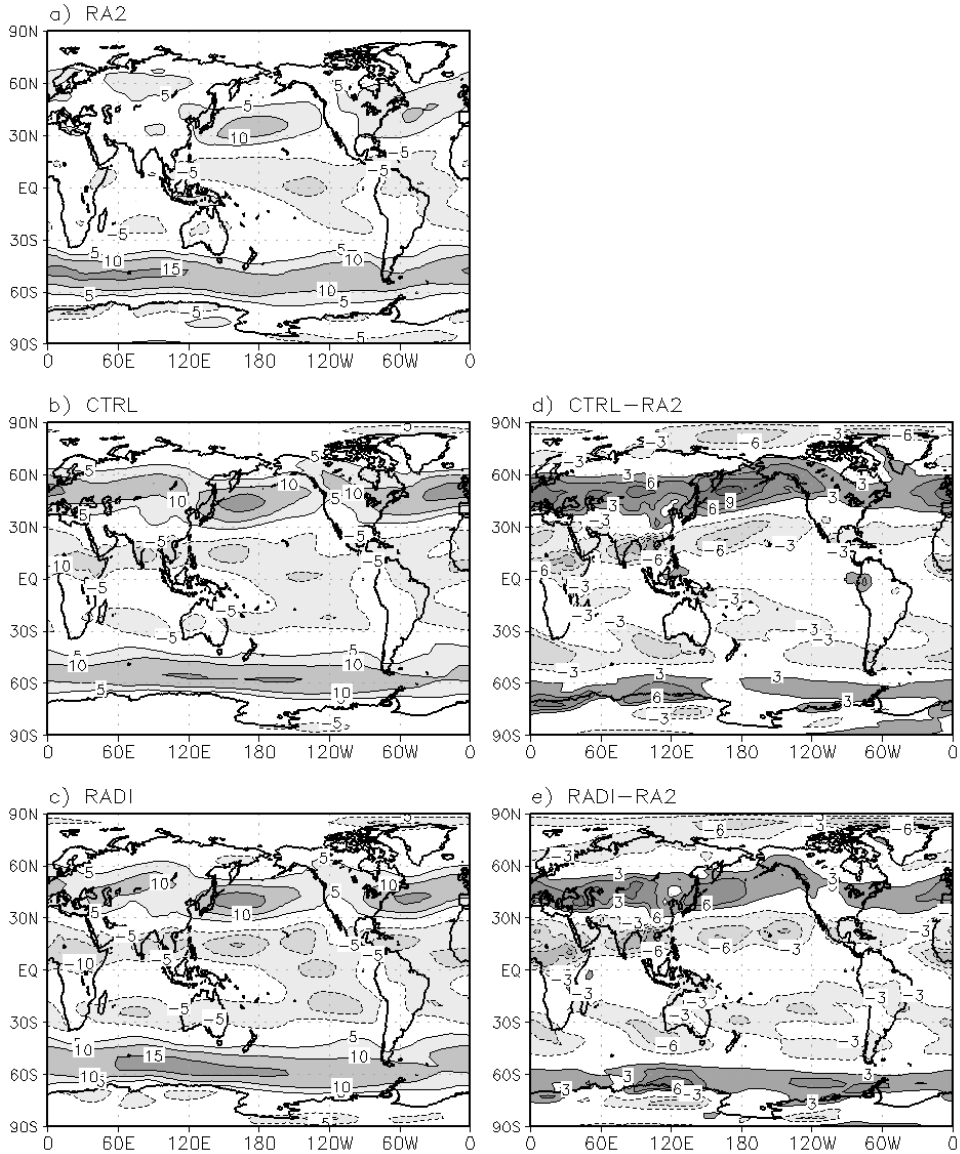


Fig. 7. Same as in Fig. 6, except for 850 hPa u-wind with contour interval of 5 m sec^{-1} in the left panels, and of 3 m sec^{-1} interval in the right panels.

2005년 사이 엘니뇨해와 라니냐해 겨울을 분류하고 CTRL 실험과 RADI 실험을 서로 비교함으로써 새롭게 적용된 복사모수화 방안이 전지구 모델안에서 해수 온도의 경년변동에 따라 대기 경년변동 성분을 얼마나 잘 모의하는지 서로 비교해보았다.

엘니뇨와 라니냐를 구별하기 위하여 NINO3 지역($5^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}$, $150^{\circ}\text{W} \sim 90^{\circ}\text{W}$)의 엘니뇨지수 및 남방진동(ENSO)지수를 일반적으로 사용하는데 두 지수는 서로 반대부호를 가지고 음의 상관관계를 나타낸다. 본

연구에서는 엘니뇨 지수를 사용하여 1979년부터 2005년 겨울철 NINO3 지역 해수면온도가 가장 큰 1982/83, 1991/92, 1997/98년의 3개 연도를 엘니뇨 해로 선정하였으며, 가장 작은 1984/85, 1988/89, 1998/99, 1999/2000 4개 해를 라니냐해로 분류하였다. 이렇게 선택된 각 3개 엘니뇨 해와 4개 라니냐 해의 겨울철(12월, 1월, 2월)에 대한 대기 평균장 합성도와 CTRL과 RADI의 겨울철 hindcast 결과와 서로 비교함으로써 대기 경년변동 모의 성능을 평가하였다.

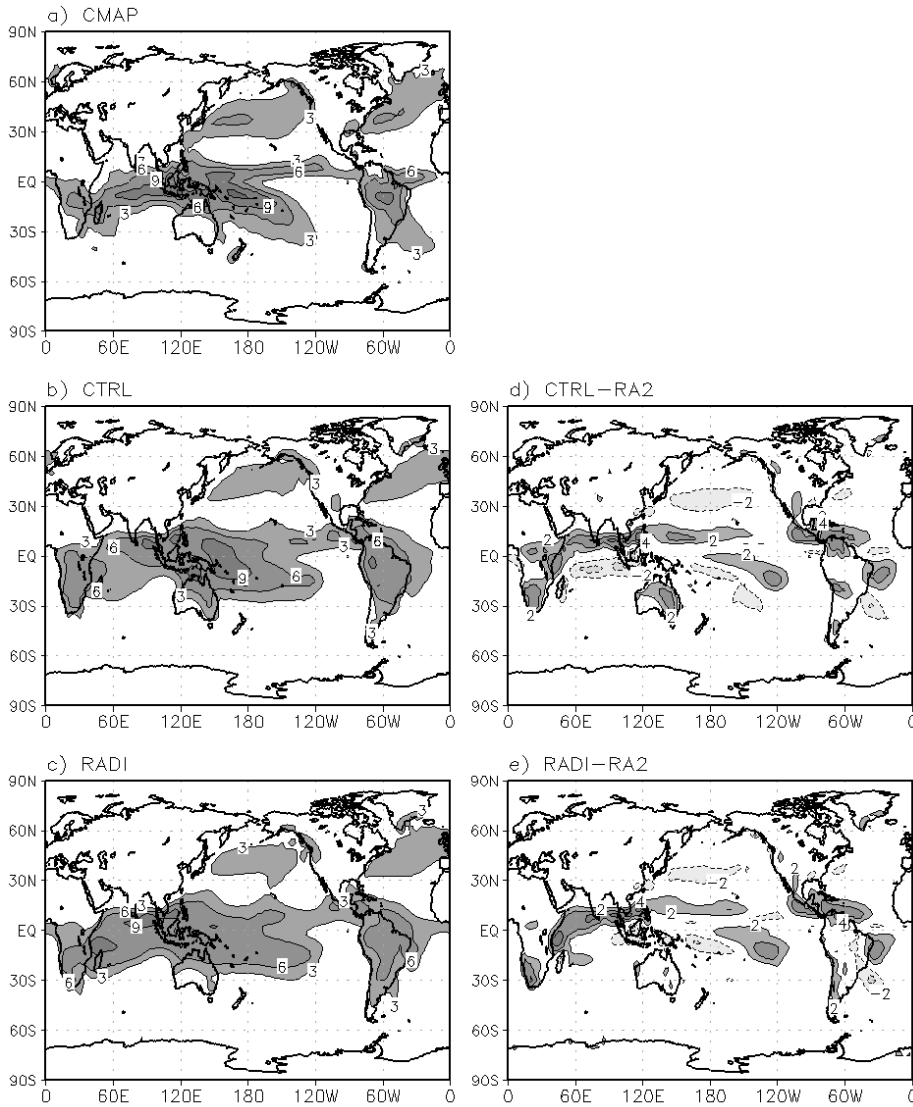


Fig. 8. Same as in Fig. 6, but for precipitation(mm day^{-1}) with contour interval of 3 mm day^{-1} in the left panels, and of 2 mm day^{-1} in the right panels.

Fig. 9는 엘니뇨 해의 전구 평균 강수량과 라니냐 해의 평균 강수량의 차이를 각각 CMAP, CTRL, RAD1에서 보인 것이다. CMAP 결과인 Fig. 9a는 해수면온도가 높은 동태평양 지역의 강수량은 증가하고 반대로 서태평양에는 강수량이 줄어드는 엘니뇨의 특징을 뚜렷이 나타내고 있다. CTRL과 RAD1 두 실험에서도 이러한 관측 강수량의 특징을 보이고 있으나, 전반적으로 METRI AGCM이 겨울철 평균 강수량 모의에 나타나는 특징인 넓은 열대 강수대 분포의 특징을 ENSO 시기에도 나타나는 것으로 보인다. 하지만 열대 동태

평양과 열대 서태평양사이 시이소 진동하는, 서로 다른 부호를 가지는 강수아노말리에 나타나는 엘니뇨 특징을 CTRL 뿐만 아니라 RAD1에서도 잘 모의하고 있음을 알 수 있다. 개선된 복사모수화 방안이 채택된 RAD1 실험은 CTRL에 비해 열대 태평양지역에서 강수량 아노말리의 동서 편차를 더욱 작게 모의하는 특징을 보이고 있다. 이는 복사모수화 방안이 ENSO의 강수 경변동성을 더욱 약하게 모의하는 역할을 한 것으로 판단된다 (Fig. 9c).

엘니뇨와 라니냐 해수면온도 변동에 따라 CTRL과

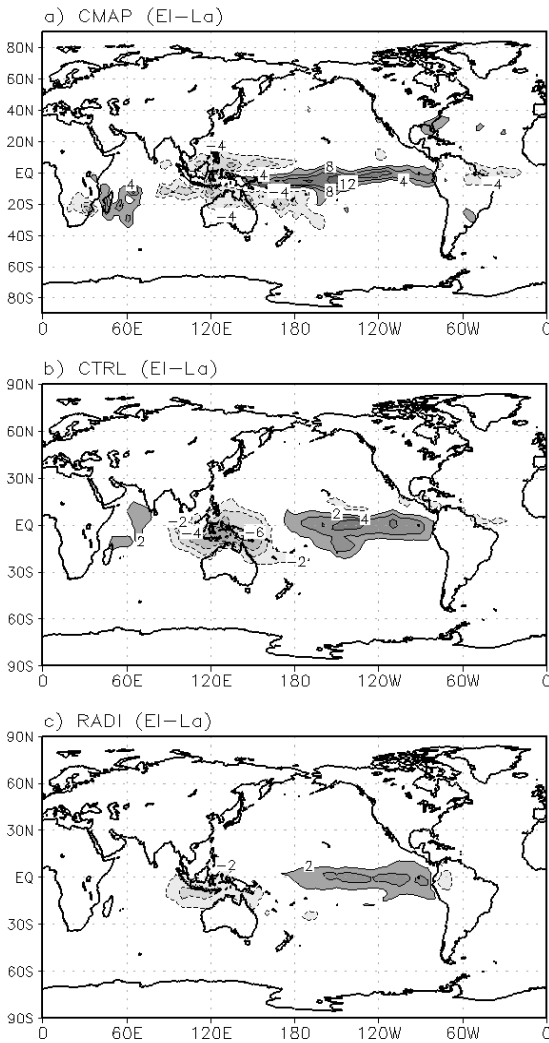


Fig. 9. Precipitation difference (mm day^{-1}) between El Niño and La Niña composite years. El Niño winters are boreal winters of 1982/1983, 1991/1992, 1997/1998, and La Niña winters are boreal winters of 1984/1985, 1988/1989, 1998/1999, 1999/2000. Contour interval is 2 mm day^{-1} . Dark/light shade denotes positive/negative value greater/less than $+2 \text{ mm day}^{-1}/-2 \text{ mm day}^{-1}$. Zero line is omitted.

RADI의 강수량 모의 민감도를 살펴보기 위하여 겨울철 열대수렴대가 남하하는 특징을 고려하여 위도 $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{S}$ 에서 평균된 CTRL과 RADI의 열대 강수량을 Fig. 10에서 보여주고 있다. 엘니뇨시기 CTRL과 RADI의 열대강수량은 Fig. 10a에 나타냈으며 라니냐 시기 열대 강수량은 Fig. 10b에 나타내었다. 비록 CTRL 실험의 경우 엘니뇨 해보다는 라니냐 해의 강수량 모의에서 더 큰 강수량 동서 편차를 보이고 있지만 전반

적으로 엘니뇨 시기 동태평양 강수량이 증가하고 라니냐 시기 서태평양 강수량이 더 많은 일반적인 ENSO 경년변동에 대한 강수량의 특징을 잘 모의하고 있는 것으로 나타났다. 한편, RADI 실험 또한 다소 약하기는 하지만, 엘니뇨와 라니냐에 대한 강수 경년변동 특징을 대체로 잘 보이고 있으나 동태평양과 서태평양 사이의 강수 동서편차는 CTRL보다 크지 않음을 알 수 있다. 이는 두 실험 모두 같은 조건의 해수면 온도가 처방되었기 때문에 RADI의 복사모수화 방안의 영향으로 해수면 온도의 경년변동에 대한 반응이 CTRL보다 덜 민감해진 것으로 판단된다.

강수량 변동뿐만 아니라 모델이 모의하는 대기 변동성을 파악하기 위하여 엘니뇨해와 라니냐 해 사이의 500 hPa 고도장 차이를 분석하였다 (Fig. 11). 열대 엘니뇨현상은 북반구 북아메리카대륙 겨울철 날씨에 지배적인 영향을 주는데 이를 PNA(Pacific/North America)라고 한다. 그래서 Fig. 11에서는 RA2와 CTRL과 RADI의 대기 경년변동인 PNA 모의 정도를 비교해보았다. CTRL 실험의 경우는 적도 동태평양과 북아메리카대륙 서안에서 관측에 비해 다소 높은 양의 편차를 보이고는 있지만 비교적 관측값인 RA2와 유사한 PNA 패턴을 보이며 열대 해수면 온도의 경년변동에 따른 북반구 중·고위도 PNA 패턴을 잘 모의한다고 할 수 있다. 그러나 RADI 실험에서는 북반구 동태평양과 북아메리카 대륙위로 PNA 패턴이 아주 약하게 모의되고 있으며, 각 고도 편차의 중심 위치가 서쪽으로 약간씩 편향되어 있음을 확인할 수 있다. 새롭게 적용된 복사모수화 방안을 쓴 RADI에서 열대 해수면 온도 경년변동에 대한 중·고위도 겨울철 대기 반응이 CTRL에 비교하여 매우 약하게 나타났다.

복사모수화 방안이 개선된 RADI 실험은 초기치를 달리한 1979년부터 2005년까지 27년간 10개 앙상블 겨울철 hindcasts한 결과이므로 이에 따른 신호대잡음비 (signal-to-noise) 분석을 해보았다 (Fig. 12). 대기 초기치를 달리한 앙상블 적분에서 각해 앙상블평균과 앙상블평균의 27년간 평균한 기후값 사이의 분산 (variance)을 signal이라고 하고 10개 앙상블 값과 각해의 앙상블평균사이 27년간 평균 분산을 noise라고 하는데 이들 두 값의 비인 signal-to-noise 분석은 해수면온도 강제에 대한 예측모델의 대기반응 민감도 정보를 얻을 수 있다. signal은 매년 겨울 예측적분에 들어간 해수면온도 아노말리 강제력에 대한 AGCM의 반응이며 noise는 일정한 해수면온도 아노말리 강제력에

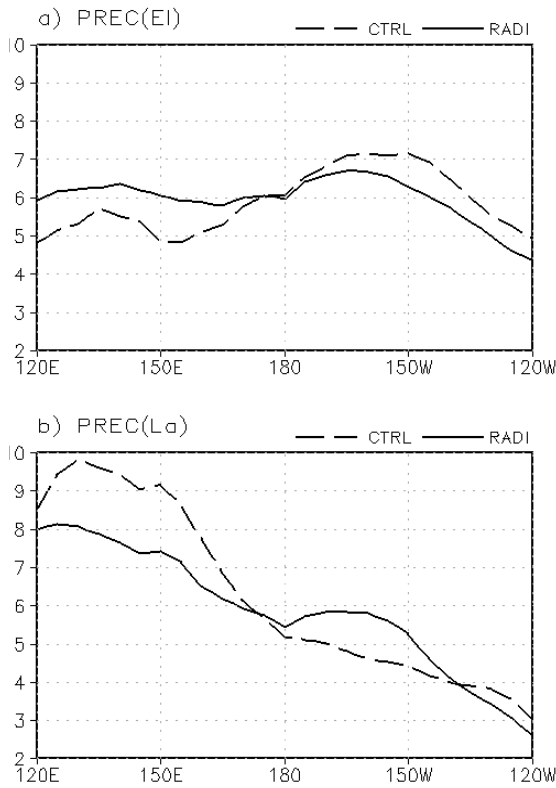


Fig. 10. Longitudinal distribution of precipitation (mm day^{-1}) averaged over the tropics ($20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{S}$) in (a) El Niño years and (b) La Niña years. Solid line indicates RADI experiment and dashed line indicates CTRL experiment.

대한 대기 초기값을 달리함으로 만들어지는 반응이라고 할 수 있습니다. Fig. 12는 (a)~(c) 강수량과 (d)~(f) 500 hPa 고도장에 대한 signal, noise, signal/noise를 각각 보여주고 있다.

해수면온도 아노말리 강제력에 대한 겨울철 강수량의 반응은 주로 열대 동태평양과 서태평양에서 뚜렷한 signal을 보이고 있는데, 주로 ENSO 강제에 대한 대기 강수량이 민감한 것으로 나타났다 (Fig. 12a). 반면 노이즈는 $30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 사이 열대지방에서 주로 나타나는 하나 그 값이 대부분 1이하로 작은 편이다. RADI의 겨울철 강수량의 평균 신호대잡음비는 열대 태평양에서 아주 크게 나오며, 이 지역을 예측 시그널이라고 할 수 있는 해수면온도 아노말리의 강제에 민감한 지역으로 볼 수 있다. 500 hPa 고도장의 신호대잡음비 분석 또한 열대지방에서 해수면온도 아노말리 강제력에 민감한 것으로 나타났으며 특히 열대 동태평양과 서태평양에서 더욱 크다 (Fig. 12f). 하지만, 변영화 외

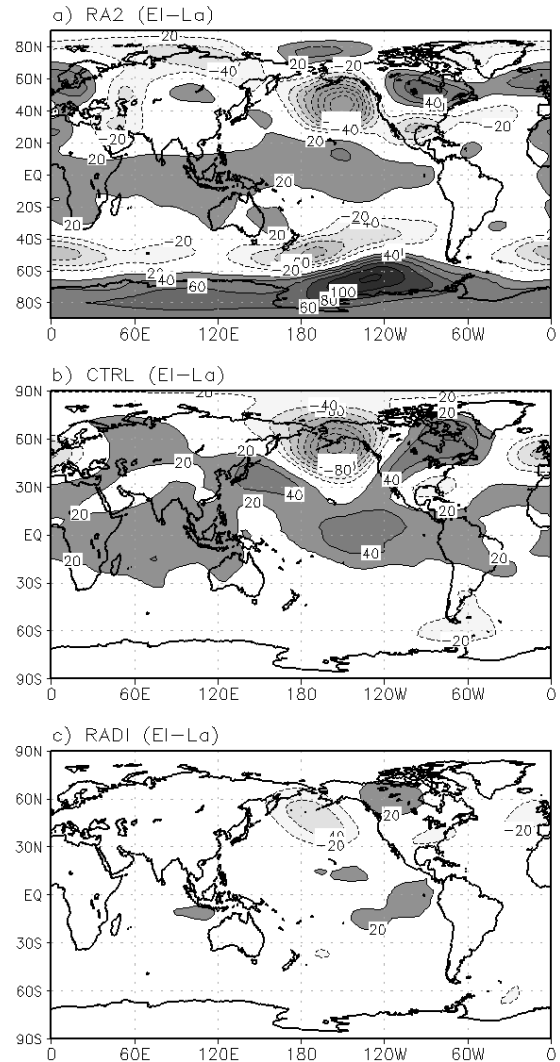


Fig. 11. Same as in Fig. 9, except for 500 hPa geopotential height (m) with contour interval of 20 m.

(2007) 논문의 Fig. 10f에 보여준 CTRL의 signal-to-noise와 비교할 때 RADI의 열대해양에서 민감도는 CTRL 실험보다 작음을 알 수 있다.

5. 겨울철 예측 성능의 평가

앞서 절에서는 METRI AGCM을 사용한 두 실험에서의 평균 기후 모의 및 해수면 온도 변동에 대한 두 실험 간 차이를 살펴보았다. 여기서는 실제 계절예측 활용 여부에 관한 지침으로 CTRL 및 RADI 실험에서의 북반구 겨울철 모의에 대한 성능 비교를 수행하고자

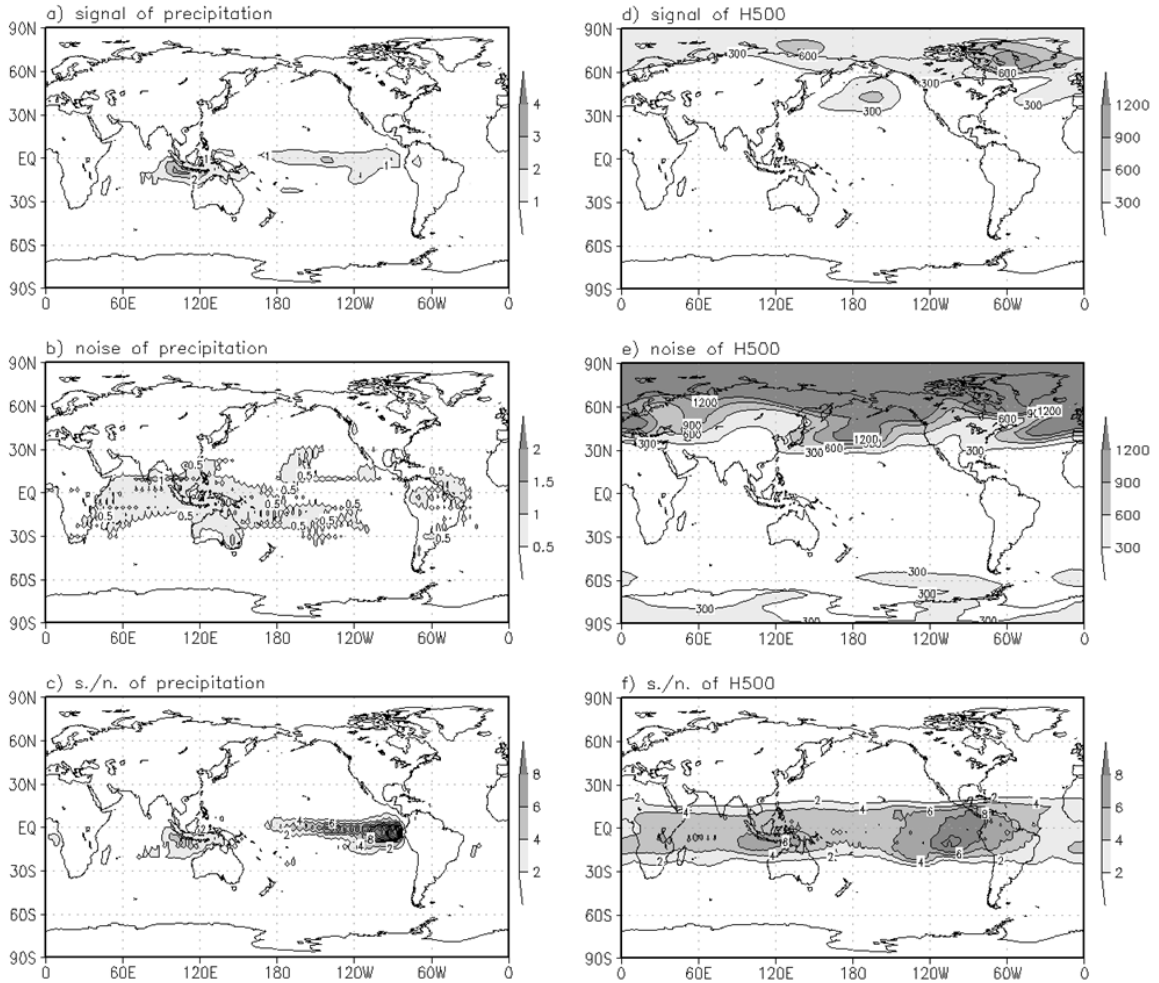


Fig. 12. Distribution of signal variance, noise variance, and signal-to-noise ratio of (a)–(c) precipitation, (d)–(f) 500 hPa geopotential height for RADI case.

하였다. 이를 위해 본 절에서는 두 모델 실험에 대해 북반구 평균 오차(Bias) 및 평균 제곱근 오차(RMSE), 편차 상관계수(Anomaly correlation coefficient)를 구하여 북반구의 계절 예측 성능을 비교하였다.

Fig. 13은 CTRL과 RADI 실험으로부터의 1979년부터 2005년 동안 각 변수에 대해 평균된 북반구 평균 오차 및 평균 제곱근 오차의 분산도를 나타내고 있다. 대체적으로 평균적인 기후 모의는 CTRL에 비해 RADI 실험이 비교적 관측에 더 가까운 것으로 판단된다. 즉, 강수량의 경우를 제외하고는(Fig. 12c) 북반구 850 hPa 기온과 500 hPa 고도, 상층 바람장은 평균 오차와 평균 제곱근 오차 모두 RADI 실험이 CTRL에 비해 개선되는 경향을 보였다. 특히 500 hPa 고도나 200

hPa 동서바람장과 같은 대류권 중상층의 값들은 하층의 대기 변수들에 비해 오차의 개선 정도가 비교적 뚜렷하게 나타난다. 그러나 대기 하층으로 갈수록 오차의 개선 정도는 그다지 뚜렷하지 않으며 특히 강수량 예측과 같이 여러 복잡한 물리과정이 연계되어 있는 경우에는 오히려 오차가 다소 증가하는 경향을 보였다. 따라서 계절예측에서 중요한 예측 요소인 하층 기온과 강수량의 개선을 위해서는 지표 과정 등 추가적인 물리과정에 대한 고려가 필요할 것으로 보인다.

마찬가지로 Fig. 14는 CTRL과 RADI의 각 변수에 대한 연도별 RA2 또는 CMAP과 편차상관계수를 보여주고 있다. 전반적으로 CTRL과 RADI 두 실험 간 편차상관계수는 큰 차이는 보이지 않으며 850 hPa 기

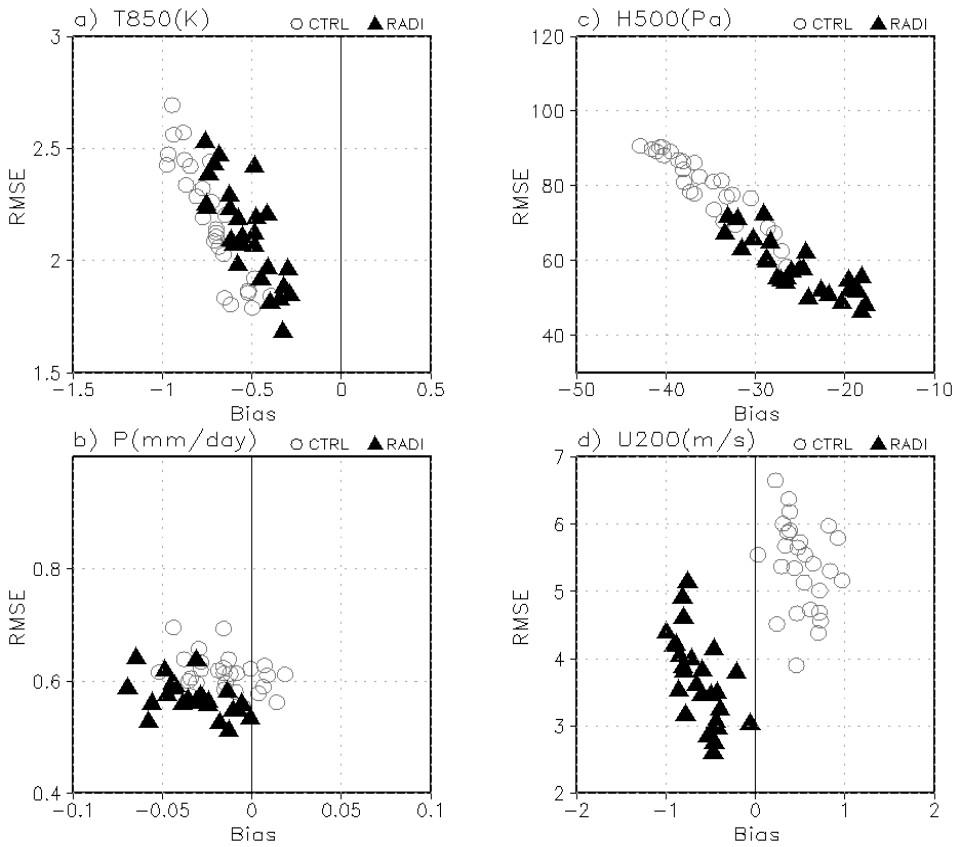


Fig. 13. Scatter diagram between bias and RMSE of the CTRL and RAD cases over the northern hemisphere (20°N~90°N). In the each panel, X-axis and Y-axis indicates bias and RMSE respectively. Open circle denotes the CTRL case and closed triangle indicates the RAD case. Each panel denotes (a) 850 hPa temperature, (b) precipitation, (c) 500 hPa geopotential height, and (d) 200 hPa zonal wind.

온, 강수량, 500 hPa 고도상의 편차상관계수의 부호까지 유사한 경향을 보이는 반면, 200 hPa 동서 바람장 모의에 있어서 두 실험간 큰차이가 있음을 서로 상이한 부호의 편차상관계수를 통해서 확인할 수 있었다. 결과적으로 편차상관계수를 통해서는 RAD 실험이 CTRL에 비해 계절 평균기후장의 분포를 예측하는데 있어서 크게 개선점을 찾지 못하였는데, 그 이유는 장기에측시스템의 북반구 겨울철 계절예측 향상을 위해서는 복사 물리과정의 개선뿐만 아니라, 예측 모델의 불안전성과 함께 처방되어지는 SST 강제 불완전성 등이 모델의 예측성에 크게 기여하기 때문인 것으로 판단된다.

6. 결론

국립기상연구소는 기상청 계절예측 지원을 목적으

로 운영되고 있는 3개월 예측시스템인 METRI AGCM의 성능개선 사업의 일환으로서 최근 미국 NASA/GSFC 복사모수화 과정을 METRI AGCM에 적용하였다. 복사모수화 방안이 개선된 METRI AGCM과 3개월 예측시스템의 METRI AGCM으로 1979년부터 2005년까지 27년간의 겨울철 과거기후재현(hindcast) 자료를 생산하고 이를 각각 RAD 실험, CTRL 실험이라고 하고 서로 비교하여 개선된 복사모수화 방안이 전지구 순환모델에서 어떤 효과를 나타내는지 살펴보았다. 또한 관측장과 비교하여 겨울철 기후평균값 모의 성능과 경년변동 모의능력을 살펴보았으며 RAD의 변수별 겨울철 예측성 향상정도를 CTRL과 비교하여 평가하였다.

개선된 복사모수화 방안은 METRI AGCM의 대기 꼭대기에서 지구밖으로 나가는 지구장파복사를 증가시켜 대기 열대중위도 대류권 중-상층의 기온 하강의

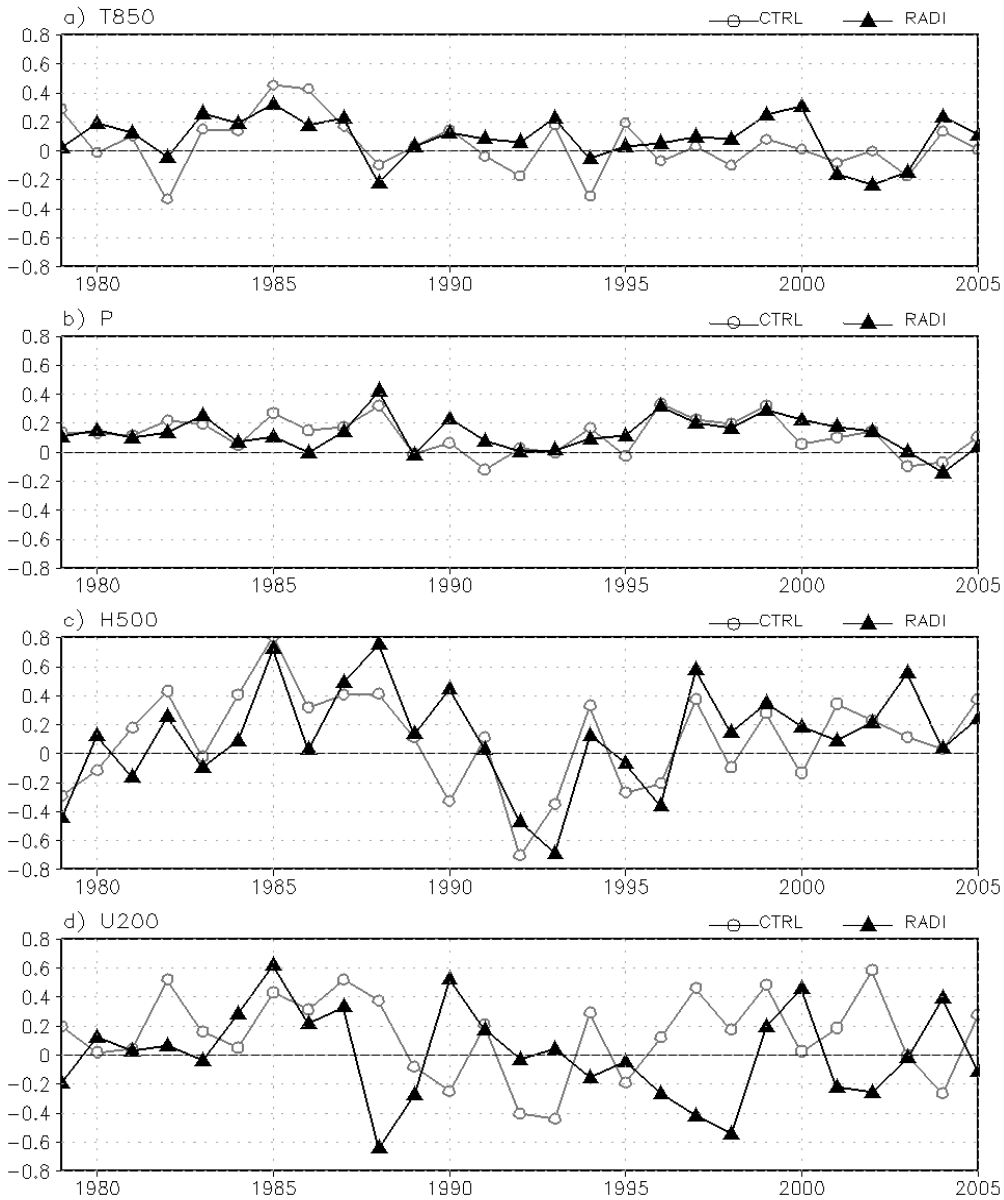


Fig. 14. Annual variation of anomaly correlation coefficient over the northern hemisphere (20°N – 90°N) of each experiment for (a) 850 hPa temperature, (b) precipitation, (c) 500 hPa geopotential height, and (d) 200 hPa zonal wind. In each panel, open circle denotes the CTRL case and closed triangle indicates the RAD1 case.

원인이 되었다. 이는 새로운 복사모수화 방안이 특히 장파영역에서의 대기 냉각율을 증가시키는 경향이 있다고 지적한 Chou *et al.*(2001)의 결과와도 일치한다. 결국 새로운 복사모수화 방법은 대류권 내부의 기온 변화는 초래하고 북반구 중위도 겨울철 상층제트를 변화시키는 등 겨울철 평균 기후장 모의에 변화를 초래하였다. 가장 중요한 변화는 북반구 상층제트의 위치를

실제 관측과 유사하게 모의하는 등 기준실험인 CTRL 실험에서 나타난 오차가 많이 개선되는 등 비교적 관측된 평균 기후값을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 하지만 여전히 북반구 상층제트의 강도는 약하고, 열대 수렴대에 나타나는 강수를 남북으로 너무 넓게 모의하는 등의 문제가 해결되지 않았다. 또한 RAD1의 복사 모수화 과정은 ENSO 경년변동 모의를 비교적 잘하고

있으나 CTRL보다 그 강도가 크게 감소하여 경년변동 성분을 상당히 약하게 모의하는 결과를 보였다. 북반구 겨울철 계절예측성의 평가에서는 기온의 RMS와 BIAS는 많이 향상되었으나 북반구 겨울철 강수량은 METRI보다 개선된 효과를 찾을 수 없었다.

지금까지 국립기상연구소 3개월 예측시스템의 성능 개선을 위한 노력으로 새로운 복사모수화 과정을 삽입하고 겨울철 기후모의 성능의 향상과 예측성을 평가해 보았다. 하지만 METRI AGCM 자체의 낮은 해상도에서 비롯되는 불완전성과 처방하는 해수면온도 아노말리의 불확실성 등으로 복사모수화 과정의 개선만으로 기후모의의 예측성을 크게 향상시키지 못하였다. 하지만 북반구 겨울철 상층제트 및 대기 연직 기온에서 어느 정도 오차 개선되는 등 METRI AGCM에 나타나는 개선된 복사모수화 방안의 효과를 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상연구소 주요사업 “동아시아 기후예측시스템 연구” 과제에 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

기상연구소, 2005: 슈퍼양상블 계절예측시스템 연구(II). *기상연구소*, MR050C05, 342pp.

_____, 2006: 동아시아 계절예측시스템 연구(III). *기상연구소*, MR000C06, 296pp.

변영화, 송지혜, 박수희, 임한철, 2007: 기상연구소 3개월 예측시스템의 예측성 평가. *대기지*, **17**, 27-44.

임규호, 1994: 동아시아 겨울철 상층 동서류와 하층 기온 변동의 연관성. *한국기상학회지*, **30**, 65-72.

정일웅, 조민수, 임은순, 김정우, 2003: YONU AGCM에서 수평 해상도에 대한 현 기후 모사의 민감도. *한국기상학회지*, **39**, 221-237.

_____, 김형진, 신호정, 최진영, 김문현, 김정우, 2006: YONU AGCM의 개발 현황. *한국기상학회 봄 학술대회 논문집*, 90-91.

최진영, 정일웅, 변영화, 박수희, 2006: 기상연구소 계절 예측시스템의 복사모수화 개선 연구. *한국기상학회 가을 학술대회 논문집*, 40-41.

Arakawa, A., and V. R. Lamb, 1977: Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics*, **17**, Academic Press, New York, 173-265.

Chou, M.-D., and K.-T. Lee, 2005: A parameterization of the effective layer emission for infrared radiation calculations.

J. Atmos. Sci., **62**, 531-541.

_____, and M. J. Suarez, 1999: A solar radiation parameterization for atmospheric studies. *NASA Tech. Memo*, **15**, 40 pp.

_____, and M. J. Suarez, X.-Z. Liang, and M. M. H. Yan, 2001: A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. *NASA Tech. Memo*, **19**, 55pp.

Ghan, S. J., J. W. Lingaas, M. E. Schlesinger, R. L. Mobley, and W. L. Gates, 1982: A documentation of the OSU two-level atmospheric general circulation model. *Report No. 35*, Climatic Research Institute, Oregon State University, Corvallis, OR, 395 pp.

Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.

Lau, N.-C., and K.-M. Lau, 1984: The structure and energetics of midlatitude disturbances accompanying cold-air outbreaks over East Asia. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 1309-1327.

Oh, J.-H., 1989: Physically-based general circulation model parameterization of clouds and their radiative interaction. *Ph.D. dissertation*, Department of Atmospheric Sciences, Oregon State University, Corvallis, OR, 315pp.

Reynolds, R. W., N. A. Rayner, T. M. Smith, D.C. Stokes, and W. Wang, 2002: An improves In Situ and satellite SST analysis for climate. *J. Climate*, **15**, 1609-1625.

Rothman, L. S., C. P. Rinsland, A. Goldman, S. T. Massie, D. P. Edwards, J.-M. Flaud, A. Perrin, C. Camy-Peyret, V. Dana, J.-Y. Mandin, J. Schroeder, A. McCann, R. R. Gamache, R. B. Wattson, K. Yoshino, K. Chance, K. Jucks, L. R. Brown, V. Nemtchinov, and P. Varanasi, 1998: The HITRAN Molecular Spectroscopic Database and HAWKS (HITRAN Atmospheric Workstation): 1996 Edition. *J. Quant. Spectrosc. and Rad. Transfer*, **60**, 665-710.

Tokioka, T., K. Yamazaki, I. Yagai, and A. Kitoh, 1984: A description of the Meteorological Research Institute atmospheric general circulation model (MRI GCM-I). *MRI Tech. Report NO. 13*, Meteorological Research Institute, Ibaraki-ken, Japan, 249pp.

Wang, B., R. Wu, and X. Fu, 2000: Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J. Climate*, **13**, 1517-1536.

Wu R., Z.-Z. Hu, and B. P. Kirtman, 2003: Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia. *J. Climate*, **16**, 3742-3758.

Xie, P., and P. A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2539-2558.

Zhang, R.-H., A. Sumi, and M. Kimoto, 1996: Impact of El Nino on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the 86/87 and 91/92 events. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 49-62.