

## 중규모수치일기예보모형에서 복사물리과정의 보조변수화에 대한 연구

리성남, 황룡호

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《선진과학기술을 받아들이기 위한 사업을 적극적으로 벌려야 하겠습니다.》(《김정일선집》  
증보판 제15권 499페이지)

본문에서는 세계적으로 널리 리용되고있는 수치일기예보모형인 WRF(Weather Research  
and Forecasting)에 들어있는 대기물리과정의 보조변수화도식들가운데서 복사물리과정의 보  
조변수화도식의 하나인 빠른복사수송(RRTM)도식에 대한 연구를 진행하고 이것을 현업중규  
모수치일기예보모형과 결합하여 진행한 수치실험에 대하여 서술하였다.

### 1. WRF모형에 들어있는 복사물리과정의 보조변수화도식들

WRF모형에는 대기물리과정(미시물리, 적운대류, 접지층, 지표면과정, 행성경계층, 대기  
복사 등)들에 대한 보조변수화도식들이 들어있다.[1] 이가운데서 복사물리과정의 보조변수  
화도식들은 표 1과 같다.

표 1. 복사물리과정의 보조변수화도식들

복사도식들	과장	탐측통로	고려특성량들
RRTM	장파	16	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , 수증기
GFDL LW	장파	14	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , 수증기
CAM3 LW	장파	2	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , 수증기
GFDL SW	단파	12	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , 수증기
MM5 SW	단파	1	수증기
Goddard	단파	11	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , 수증기
CAM3 SW	단파	19	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , 수증기

#### ① RRTM

이 도식은 1997년에 개발되어 비정력학중규모모형인 MM5에 도입되었으며  $k$ (흡수결수)  
—상관법을 리용한 스펙트르대역도식이다. 이 도식에서는 수증기와 오존, 탄산가스 그리고  
기타 다른 흡수기체들에 의한 장파복사수송과정을 구름의 광학적두께를 고려하여 정확히 묘  
사하고있다.

빠른복사수송모형은 복사수송계산을  $k$ 에 철저히 의존하면서도 계산을 빨리 할수 있는  
효과적인 방법으로서 선별(Line-by-Line)모형으로부터  $k$ 값들을 얻는다.

RRTM과 Line-by-Line모형사이의 관계를 그림 1에 제시하였다.

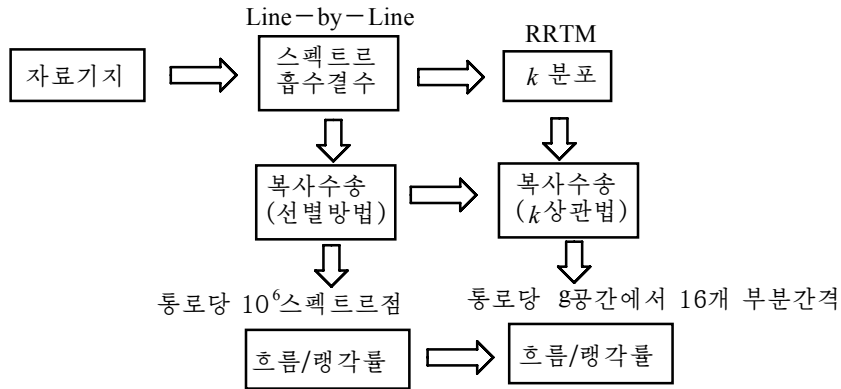


그림 1. RRTM과 Line-by-Line모형사이의 관계

## ② GFDL LW

이 장파도식은 1975년과 1991년에 개발된 간단화된 교환법에 기초하는 도식으로서 탄산가스, 수증기, 오존과 관련된 스펙트르대역우에서의 장파복사과정을 계산한다. 여기에는 탄산가스와 수증기연속체에 대해서는 투과결수들과 수증기-탄산가스겹침효과들이 포함된다. 이 도식은  $\eta$  모형을 비교연산하는데 이용된다.

## ③ CAM3 LW

이 도식은 기후예측을 위한 공용대기모형(《CAM 3.0》)에서 리용한 스펙트르대역도식으로서 여러가지 흡수기체들과 구름특성량들을 고려한다.

## ④ GFDL SW

이 도식은 대기중의 수증기, 오존, 탄산가스효과들에 의한 단파복사과정을 묘사하고있다. 단파복사계산은 시간간격에 따르는 낮동안의 평균태양천정각의 코시누스를 리용하여 진행한다.

## ⑤ MM5 SW

이 단파복사도식은 1989년에 개발되어 MM5모형으로부터 나왔다. 이 도식에서는 맑은 대기에서의 산란과 수증기흡수 그리고 구름반사도와 흡수를 고려하여 태양복사를 위로부터 아래로 간단히 적분한다. 이 도식에서는 지표면태양복사흐름에서 지형구배와 음영효과들을 고려하여 선택한다.

## ⑥ Goddard

이 단파복사도식은 1994년에 개발되었으며 11개의 흡수대역들에서 산란과 반사성분들을 고려하여 직달태양복사성분들을 계산한다. 오존은 여러가지 기후학적자료들을 리용하여 계산한다.

## ⑦ CAM3 SW

이 도식은 공용대기모형(《CAM 3.0》)에서 리용한 단파복사도식으로서 여러가지 형태의 아에로졸들과 흡수기체들의 광학적특성들을 반영한다. 이 도식은 예측기간 월평균기후학적자료에 따르는 오존분포자료에 의한 지역기후예측에 매우 적합한 도식이다.

이가운데서 RRTM도식은 비교적 계산속도가 빠르고 수증기, 탄산가스, 오존대역에서 장파복사과정들을 잘 묘사하고있으므로 이 도식을 현업중규모수치일기예보모형과 결합하여 실험을 진행하였다.

## 2. 중규모수치일기예보모형의 기본방정식계와 수치실험

### 1) 중규모수치일기예보모형의 기본방정식

우리 나라에서 현업모형으로 리용하고있는 2h준위반라그랑쥬도식에 기초한 제한구역 수치일기예보모형에서 습윤대기에 대한 기본방정식들을 극립체투영도우의 직각자리표와 수직  $\sigma$  자리표계에서 쓰면 다음과 같다.[2]

$$\frac{d_H U}{dt} + \dot{\sigma} \frac{\partial U}{\partial \sigma} + \frac{\partial \phi}{\partial x} + RT_v \frac{\partial \ln p_s}{\partial x} - lU + \frac{\partial s}{\partial x} \frac{U^2 + V^2}{2} = F_u \quad (1)$$

$$\frac{d_H V}{dt} + \dot{\sigma} \frac{\partial V}{\partial \sigma} + \frac{\partial \phi}{\partial y} + RT_v \frac{\partial \ln p_s}{\partial y} + lV + \frac{\partial s}{\partial y} \frac{U^2 + V^2}{2} = F_v \quad (2)$$

$$\frac{d_H T}{dt} + \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \chi T_v \frac{1}{[1 + (\delta - 1)q]} \left( \frac{d_H \ln p_s}{dt} + \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \right) = \frac{H_T}{c_{p_m}} + F_T \quad (3)$$

$$\frac{d_H q}{dt} + \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} = S_q + F_q \quad (4)$$

$$\frac{d_H \ln p_s}{dt} + D + \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \ln \sigma} = -R_d T_v \quad (6)$$

여기서

$$T_v = \left[ 4 + \left( \frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q \right] T \quad (7)$$

는 가운데이고

$$\frac{d_H}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + S \left( U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial}{\partial y} \right) \quad (8)$$

$$D = S \left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (9)$$

$$U = \frac{u}{m}, \quad V = \frac{v}{m}, \quad S = m^2$$

이다.  $F_u, F_v, F_T, F_q$  들은 확산항,  $H_T$  는 비단열가열률,  $S_q$  는 가습률이다.

모형에서 리용되는 변수와 상수들은 다음과 같다.

$\sigma = \frac{p}{p_s}$  - 수직자리표,  $p$  - 기압,  $p_s$  - 지면기압,  $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} - \sigma$  수직속도,  $u, v$  - 바람의

$x, y$  성분,  $m$  - 지도확대결수,  $T$  - 온도(K),  $l$  - 코리올리파라미터,  $\phi$  - 중력포텐셜,  $\phi_s$  - 지면 중력포텐셜,  $q$  - 비습,  $R$  - 기체상수,  $R_d$  - 건조공기의 기체상수,  $R_v$  - 수증기의 기체상수,

$D$  - 발산,  $\delta = \frac{c_{pd}}{c_{pv}}$ ,  $\chi = \frac{R_d}{c_{pd}}$ ,  $c_{pm} = [1 + (\delta - 1)q]c_{pd}$ ,  $\varepsilon$  - 자리길비중심화결수이다.

## 2) RRTM도식과의 결합에 의한 수치실험

현업 중규모수치일기예보모형에서 복사물리과정을 고려하기 위하여 WRF모형에 들어있는 RRTM도식을 예보모형과 결합하였다.

WRF모형에 들어있는 RRTM복사도식은 장파복사도식으로서 16개의 스펙트르대역에서 탄산가스와 오존, 구름특성량들 그리고 기타 흡수기체들이 복사물리과정에 미치는 영향을 고려하게 되어있다.

수치실험을 위하여 두 모형의 변수들을 일치시키고 이에 기초하여 2013년 8월 1일부터 30일까지 RRTM을 결합하기 전의 모형(1방안)과 결합후의 모형(2방안)에 대한 비교실험을 진행하였다.

2개 방안에 따르는 여러가지 예보량들(바다면기압, 중력포텐셜높이, 지표면온도, 2m온도, 상대습도)에 대한 12, 24, 36h예보마당의 표준오차를 각각 계산하였다.(표 2)

표 2. 2개 방안에 따르는 여러가지 예보량들의 표준오차

예보량	12h		24h		36h	
	1방안	2방안	1방안	2방안	1방안	2방안
$p_{\text{바다면}}/\text{hPa}$	98	102.4	155	155.4	214	200.6
$Z/\text{m}$	1 000	8	9	13	13	17
	925	8	8	12	12	16
	850	8	8	11	12	15
	700	7	8	10	11	15
	500	8	8	11	11	14
	300	13	13	18	19	25
	200	16	15	22	23	29
	100	20	22	23	29	34
	10	96	45	160	59	208
$T/\text{K}$	1 000	1.0	1.1	1.4	1.4	1.7
	925	1.2	1.2	1.5	1.7	2.0
	850	1.0	1.1	1.3	1.5	1.8
	700	0.9	0.9	1.2	1.1	1.3
	500	0.8	0.8	1.0	1.1	1.4
	300	1.0	1.0	1.5	1.5	1.7
	200	1.0	1.1	1.4	1.4	1.8
	100	1.3	0.8	1.8	1.0	2.2
	10	6.5	2.8	9.9	3.2	11.8
$T_{2m}/\text{K}$	2.8	1.5	2.9	1.5	2.8	1.7
RH/%	1 000	12	16.1	16	19.5	18
	925	14	15.0	19	20.0	22
	850	15	15.6	19	19.7	24
	700	15	13.7	17	16.5	22
	500	17	16.8	20	20.3	25

그림 2에서는 2013년 9월 30일 09시마당을 초기마당으로 하였을 때의 두 방안에 따르는 중력포텐셜높이, 온도에 대한 24h예보마당(10월 1일 09시)을 보여준다.

표 2와 그림 2에서 보는바와 같이 지면부터 대류권상층(200hPa)까지의 오차는 두 방안에 대하여 서로 비슷하며 그 이상층(100hPa이상)에서는 2방안이 1방안보다 중력포텐셜높이와 온도에 대하여 2배이상으로 오차를 감소시킨다는것을 알수 있다.

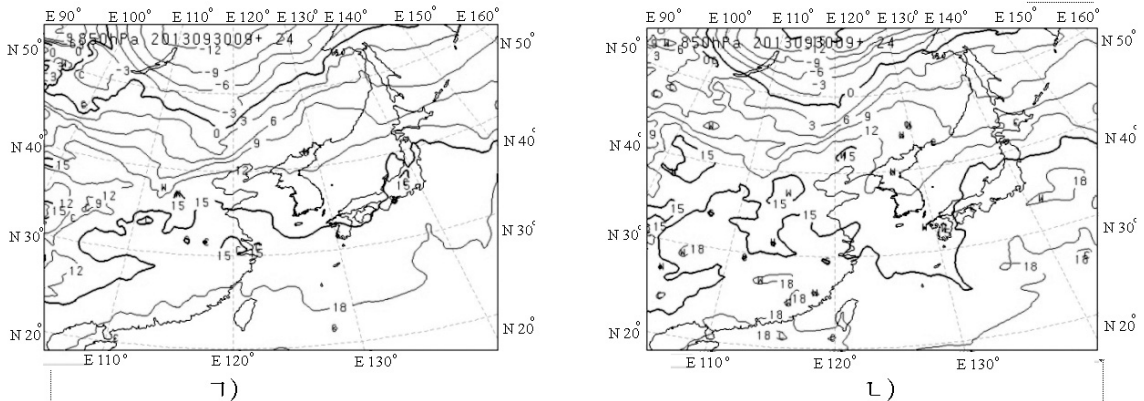


그림 2. 두 방안에 따르는 중력포텐셜높이, 온도에 대한 24h예보마당

ㄱ) 1방안, ㄴ) 2방안

## 맺 는 말

RRTM에 의한 복사도식을 현업중규모수치일기예보모형에 결합하면 100hPa이상층에서 전반적인 수치예보마당오차를 절반이상 감소시킨다는것을 알수 있다. 그 원인은 결합전모형에서 오존자료들을 어떤 하나의 특정한 자료로 리용하는 비교적 단순한 복사도식을 리용하였기때문이라고 볼수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] W. C. Skamarock et al.; A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN-475+STR, 78~80, 2008.
- [2] J. D. Beezley et al.; ARW Version 3 Modeling System User's Guide, Mesoscale & Microscale Meteorology Division, 126~132, 2012.

주체108(2019)년 7월 5일 원고접수

## Study on Parameterization of Radiative Physical Process in the Atmosphere with WRF

*Ri Song Nam, Hwang Ryong Ho*

In this paper, we studied that using RRTM of WRF(Weather Research and Forecasting) model in our operational MNWFM(Mesoscale Numerical Weather Forecasting Model) reduced error.

Key words: WRF, RRTM, mesoscale numerical weather forecasting model, parameterization