

적운 발달에 관한 수치 시뮬레이션

이화운 · 김유근 · 전병일

부산대학교 대기과학과
(1992년 12월 15일 접수)

A Numerical Simulation on the Development of Cloud

Hwa-Woon Lee, Yoo-Keun Kim and Byung-II Jeon

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea
(Manuscript received 15 December 1992)

Abstract

Development of cumulus is studied by numerically integrating the equation of motion, equations of conservation for water vapor mixing ratio, and the thermodynamic energy equation.

We use the terrain-following coordinate system called z^* -coordinate system, in which we can easily treat any calculation domain with terrain configuration such as mountains.

The model domain of calculation is restricted vertically to 4.8km and horizontally to 100 km, has a bell-type mountain in the central part.

Four cases are considered, one in a neutral environment, second in a slightly stable environment, third in a environment decreasing water content with low value of initial water vapor mixing ratio, the fourth in a case with higher vapor gradient.

The more the atmosphere is unstable, the more cumulus develops easily and the more water vapors is abundant, the more cumulus develops easily too.

More detailed cloud microphysics parameterizations and wet deposition must be considered to use in air pollutants prediction model.

KEY WORDS : cumulus, cloud water, stability, mixing ratio

1. 서 론

대기 오염에 대한 관심이 날로 증가하고 있는 가운데, 대기 보전을 위해 여러 분야에서 대기 오염 물질이 대기 환경에 어떠한 영향을 미치는가를 측정과 시뮬레이션을 통해 비교 조사하고 예측하는 것이 필요하게 되었다.

대기 오염 농도를 정확하게 예측하기 위해서는, 대기 오염 물질의 이류, 확산에 큰 영향을 미치는 확산장을 예측하고 지형과 지표면의 영향 및 인공

열의 영향을 표현할 수 있는 기상 예측 모델이 필요하다. 또한 대기 오염 물질이 대기로부터 지면으로 침적하는 양에 영향을 미치는 구름 물리 과정을 표현할 수 있는 기상 예측 모델도 필요하다.

대기중의 대류 현상을 취급한 수치 모델에 관한 연구는 정지 대기중에 고립된 건조 온난 상승 기류의 연구로부터 시작되어, 곧이어 가열된 지표면에서의 구름의 발달에 관한 연구로 발전되었다. Ogura와 Phillips(1962)는 scale 해석을 하여 대기중의 대류 현상을 기초 방정식으로 표현하였고,

Ogura(1963)는 그 방정식을 응용하여 조건부 불안정의 대기 즉 포화 상태의 상승 기류는 불안정, 불포화 공기의 하강 기류는 안정이라는 조건으로 잠열의 방출에 의해 일어나는 축대칭의 순환 대류의 발달에 대해서 연구하였다. Orville(1965)는 Ogura(1963)의 기초 방정식에 수증기의 영향을 포함시켜 산의 상공에서의 적운의 형성에 관한 시뮬레이션을 행하였으나, 와도 방정식을 이용하였으므로 실제의 대기 오염 현상과 연관시키는데 어려움이 있다.

본 연구에서는 지표면의 영향을 잘 표현하는 중규모의 기상 예측 모델에 수분량 수지식을 첨가함으로써, 바람과 온도뿐만 아니라 지표면 가열에 의한 수분의 증발에 의해 일어나는 적운 형성을 수치 예측하는 것을 목적으로 하였다.

2. 적운형성의 수치모델

본 연구에서의 적운 형성 수치 모델은 중규모의 기상 예측 모델에 구름 물리 과정을 포함시켜 적운의 형성을 수치적으로 예측하는 것으로, Fig. 1과 같이 강우로 되어서 계외로 수분을 잃어버리지 않는 경우를 가정하고 있다.

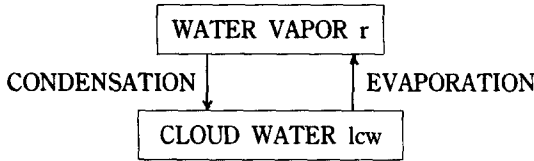


Fig. 1. Block diagram of microphysics processes.

2.1. 기초 방정식

Z^* 좌표계에 의한 적운 형성 수치 모델의 기초 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -u \frac{\partial u}{\partial x} - w^* \frac{\partial u}{\partial z^*} + fv - Cp\theta \frac{\partial \pi}{\partial x} \\ & + g \frac{z^* - s}{\partial x} \left(\frac{\partial z_G}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \left(\frac{s}{s - z_G} \right)^2 \\ & \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(m)} \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -u \frac{\partial v}{\partial x} - w^* \frac{\partial v}{\partial z^*} - f(u - U_g) + \frac{\partial}{\partial x} \\ & \left(K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \left(\frac{s}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(m)} \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial t} = & -u \frac{\partial \phi}{\partial x} - w^* \frac{\partial \phi}{\partial z^*} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \\ & + \left(\frac{s}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(q)} \frac{\partial \phi}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} = & -u \frac{\partial q}{\partial x} - w^* \frac{\partial q}{\partial z^*} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial q}{\partial x} \right) \\ & + \left(\frac{s}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(q)} \frac{\partial q}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$C_p \theta \frac{\partial \pi}{\partial z^*} + g \frac{s - z_G}{\sigma} \varphi \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial z^*} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{s - z_G} \left(u \frac{\partial z_G}{\partial x} \right) \right] = 0 \quad (6)$$

여기서,

$$w^* = w \frac{s}{s - z_G} = \frac{z^* - s}{s - z_G} \left(U \frac{\partial z_G}{\partial z} \right) \quad (7)$$

$$\Pi = \left(\frac{P}{P_0} \right)^{R/C_p} \quad (8)$$

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{R/C_p} \quad (9)$$

$$q = r + l_{cw} \quad (10)$$

$$f = 2\Omega \sin \Phi \quad (11)$$

여기서 u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 속도 성분, w^* 는 z^* 좌표계에 의한 연직 방향의 속도 성분, t 는 시간, θ 는 온도, q 는 비습, T 는 기온, R 은 건조 공기의 기체 상수, c_p 는 정압비열, p 는 기압, P_0 는 기준 고도의 기압, f 는 Coriolis parameter, Ω 는 지구자전 각속도, Φ 는 위도, g 는 중력가속도, K_H 는 수평 방향 확산 계수, $K_V^{(m)}, K_V^{(q)}, K_V^{(u)}$ 는 각각 운동량, 열, 비습의 연직 방향의 확산 계수, z_G 는 지형의 고도, s 는 계산

영역 상면의 고도, r 은 수분의 혼합비, l_{cw} 는 cloud water의 혼합비이다.

2.2. 계산 영역 및 차분 방법

계산 영역은 x 방향으로 100Km, z 방향으로 4800 m으로 하였으며, 격자 간격은 $\Delta x=5\text{km}$, $\Delta z=100\text{m}$ 으로 하였다. 단, 최하층의 Δz 는 2등분($\Delta z_1=30\text{m}$, $\Delta z_2=70\text{m}$)하였다.

또 계산 영역 중앙에 높이 1000m의 종상의 산이 있다고 가정하여

$$z_G = HmB^2 / ((x - x_M)^2 + B^2) \quad (12)$$

으로 하였다. 여기서 Hm 은 산의 높이, B 는 산의 반경(7.5km), x_M 은 산정의 x 좌표(50km)이다.

차분 방법은 Mahrer와 Pielke(1975)의 방법에 따라서, 이류항은 풍상 차분, 확산항은 변형 Dufort-Frankel법 그리고 시간에 대해서는 전진 차분법을 사용하였다.

2.3. 경계 조건 및 초기 조건

(1) 지면 경계 조건

$$u = v = w^* = 0 \quad (13)$$

$$\theta' = \overline{\theta'(0)} + (k + k_2 z) \sin \frac{\pi(\tau - 8)}{12} \quad (14)$$

여기서, θ' : 온위 편차, $\theta' = \theta - \theta$

θ : 기준 온위

k, k_2 : 산정에서는 3°C, 평지에서 7°C의 온도 진폭을 나타내기 위한 상수

$\overline{\theta'(0)}$: 지면에서의 θ' 의 초기치 (=0[K])

π : 원주율

τ : 시각

$$r = \overline{r(0)} + A \sin \frac{\pi(\tau - 8)}{6} \quad (15)$$

여기서, $\overline{r(0)}$: 지면에서의 r 의 초기치

A : 수증기의 진폭 parameter

(2) 상면 경계 조건

$$u = v = w^* = 0 \quad (16)$$

$$\psi = \text{const}(\psi = \theta', \prod, q, \phi') \quad (17)$$

(3) 측면 경계 조건

유입측(inflow)에서

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \phi'}{\partial x} = \frac{\partial \phi'}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

$$w^* = 0 \quad (19)$$

으로 하고,

유출측(outflow)에서는 u 에 대해서 Klemp와 Wilhelmson(1978)의 Radiation condition을 이용하였고, v, ϕ', q 에 대해서는 내측의 2점으로 부터 외삽하고, w^* 는 0로 하였다.

(4) 초기 조건

$$u = v = w^* = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \text{const}(\psi = \theta, r) \quad (21)$$

$$l_{cw} = 0, \quad q = r \quad (22)$$

$$\phi' = \frac{\theta'}{\theta} + \frac{Lr}{C_p T_{00}} \quad (23)$$

L : 응결 잠열, T_{00} : 기준 온도

2.4. 대기의 포화와 불포화의 판정 방법

엔트로피 ϕ' 는 대기가 포화된 경우와 불포화의 경우로 각각 나누어 나타낼 수 있다.

$$\phi' = \frac{\theta'_{uns}}{\theta} + \frac{Lq}{C_p T_{00}} \quad (\text{불포화 공기}) \quad (24)$$

$$= \frac{\theta'_s}{\theta} + \frac{Lq}{C_p T_{00}} \quad (\text{포화 공기}) \quad (25)$$

여기서, r_s : 포화 수증기 혼합비

θ'_{uns} : 불포화 온위 편차

θ'_s : 포화 온위 편차

포화 수증기 혼합비 r_s 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_s = 0.622 \frac{e_s}{P - e_s} \quad (26)$$

여기서, e_s 는 포화 수증기압으로

$$e_s = 6.1078 \exp \left[\frac{17.2693882(T - 273.16)}{T - 35.86} \right] \quad (27)$$

이다.

우선 식 (3)로부터 구한 ϕ' 와 식 (4)로부터 구한 q 를 식 (24)에 대입해서 불포화 온위 편차를 아래와 같이 θ'_{uns} 를 구할 수 있다.

$$\theta'_{uns} = \theta \left(\phi - \frac{Lq}{c_p T_{00}} \right) \quad (28)$$

그리고 이 θ'_{uns} 를 식(24)에 적용해서 $r_s(\theta'_{uns})$ 를 구하고 이 $r_s(\theta'_{uns})$ 을 식(25)의 r_s 에 대입해서 식(29)와 같이 포화 온위 편차 θ'_s 를 구한다.

$$\theta'_s = \theta \left(\phi' - \frac{Lr_s(\theta'_{uns})}{c_p T_{00}} \right) \quad (29)$$

이와 같이 하여 구한 θ'_{uns} 와 θ'_s 를 비교해서 대기의 포화와 불포화를 판정한다.

(1) $\theta'_{uns} \geq \theta'_s$ 의 경우

공기는 불포화상태이고 온위 편차, 운수의 혼합비, 수증기 혼합비는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \theta' &= \theta'_{uns} \\ l_{cw} &= 0 \\ r &= q \end{aligned} \quad (30)$$

(2) $\theta'_{uns} < \theta'_s$ 의 경우

공기는 포화상태로 운수가 발생하며 이 때의 온위 편차, 운수의 혼합비, 수증기 혼합비는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta' &= \theta'_s \\ l_{cw} &= q - r_s(\theta'_s) \\ r &= r_s(\theta'_s) \end{aligned} \quad (31)$$

3. 적운 형성의 수치 시뮬레이션

계산 시간은 8시에 시작하여 다음날 8시까지로 24시간 계산을 행하였으며, 계산 간격은 60초로

하였다. 계산 조건은 Table 1에 나타낸 것과 같이 4가지 경우로 나누었다. Case 1은 중립 대기로 표현하였고, Case 1에 비해 Case 2는 초기 온위 감률이 큰 경우, Case 3은 지표면에서의 수증기 초기값이 작은 경우, Case 4는 수증기 초기 감률이 큰 경우이다.

Table 1. Conditions of computation for each case

	$\partial\theta'/\partial(z)$ (°C/km)	$-\partial r(z)/\partial z$ (kg/kg/km)	$r(0)$ (kg/kg)
Case 1	3.0	2.0×10^{-3}	11.5×10^{-3}
Case 2	3.3	2.0×10^{-3}	11.5×10^{-3}
Case 3	3.0	2.0×10^{-3}	11.0×10^{-3}
Case 4	3.0	2.3×10^{-3}	11.5×10^{-3}

Fig. 2는 14시부터 22시까지 형성된 적운의 모양(좌측)과 바람장(우측)을 나타내고 있다. 좌측의 그림에서 실선은 적운을 $l_{cw} \geq 0.0001 \text{kg/kg}$ 의 영역을 0.0001kg/kg 간격으로 나타내었다. 강한 상승류가 발달함에 따라 계산 시작 6시간후인 14시경 산정상위에 적운이 나타났다. 적운 중앙 부분은 상승류에 의해 더욱 발달하고 20시경에 최대로 발달된다. 20시이후에는 산정상위의 상승류는 점차 약화되면서 하강류로 바뀐다. 적운은 하강류의 출현에 의해 급속히 소멸하기 시작하여 23시경에 발생지 점으로부터 약 2500m상공에서 완전히 소멸되었다.

3.1. 적운 형성에 미치는 대기 안정도의 영향

Case 2의 경우 14시부터 20시까지의 계산 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 적운은 15시경 발달하기 시작해서 18시경 최대로 발달되었으며 20시경에 소멸하였다. 운수의 혼합비는 최대 0.0006kg/kg 정도이고 0.002kg/kg 이상이 된 Case 1과 비교하면 상당히 구름의 발달이 억제되어 있다. Case 1과 Case 2의 계산 결과에 의하면 초기 온위 감률이 작은 경우 즉 대기가 불안정할수록 적운이 발달하기 쉽다는 것을 나타낸다. 이것은 대기가 불안정할수록 대류가 일어나기 쉽기 때문이다.

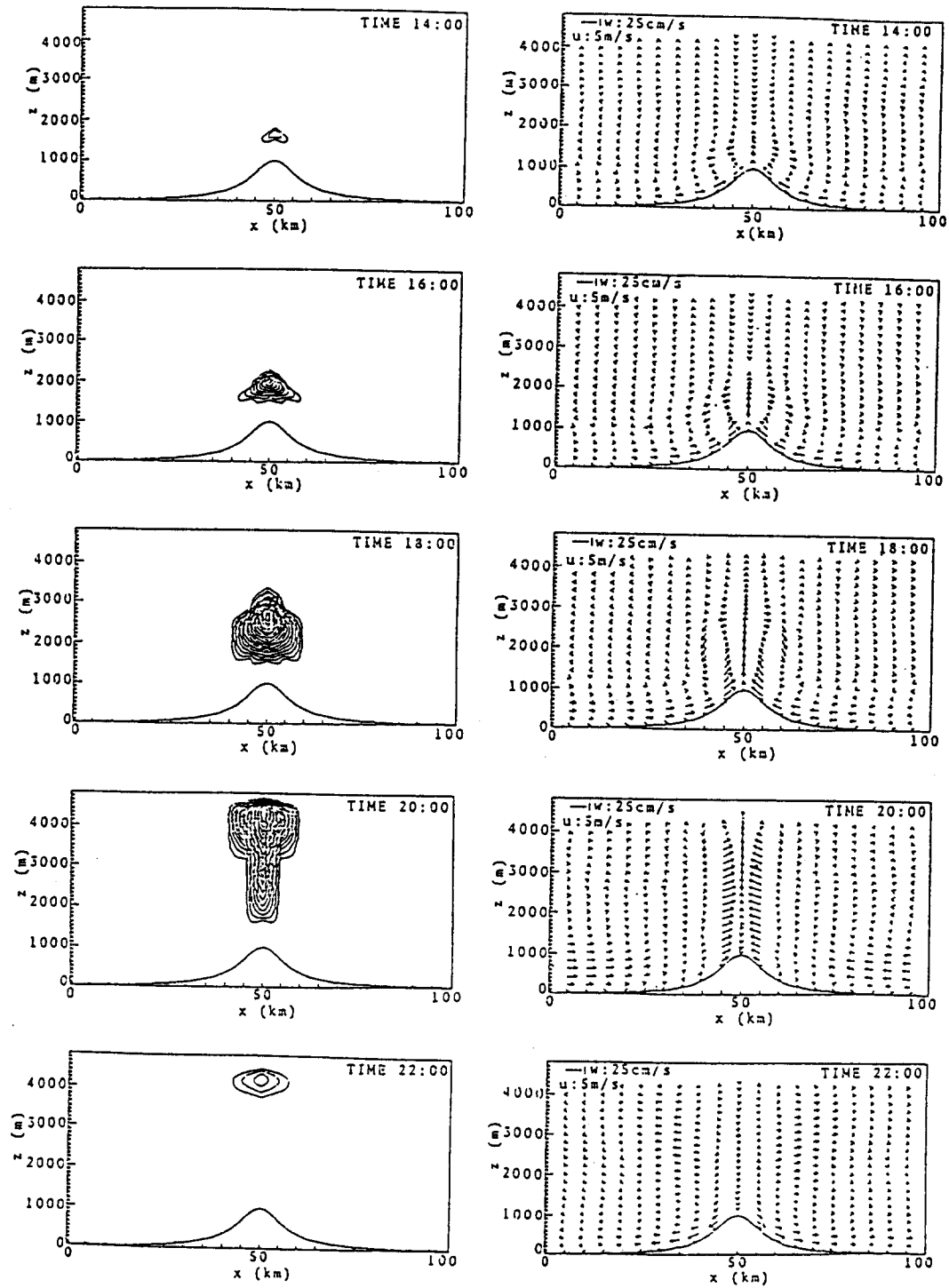


Fig. 2. Cumulus cloud(left) and wind field (right)for case 1.

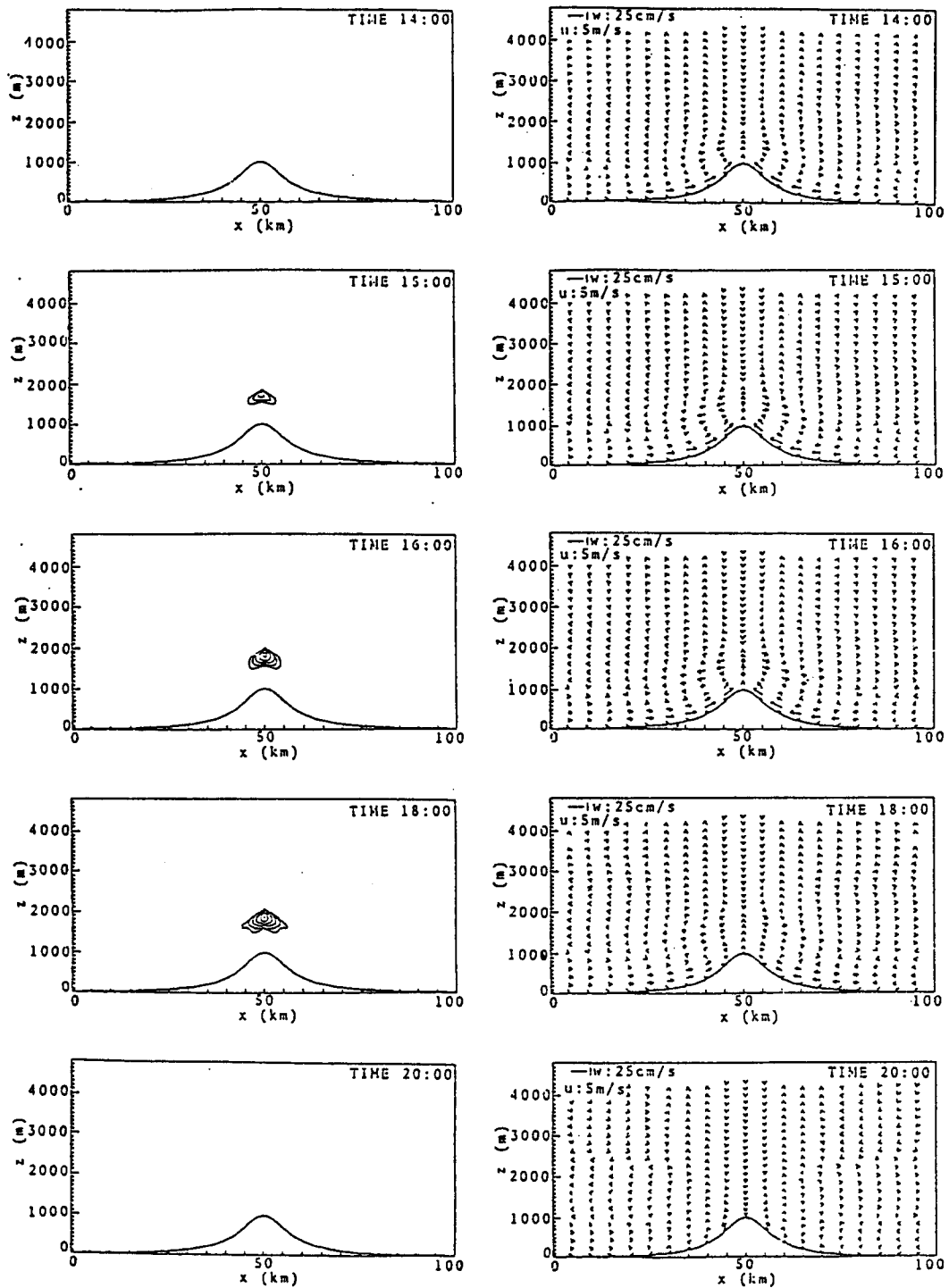


Fig. 3. Same as Fig. 2, but for case 2.

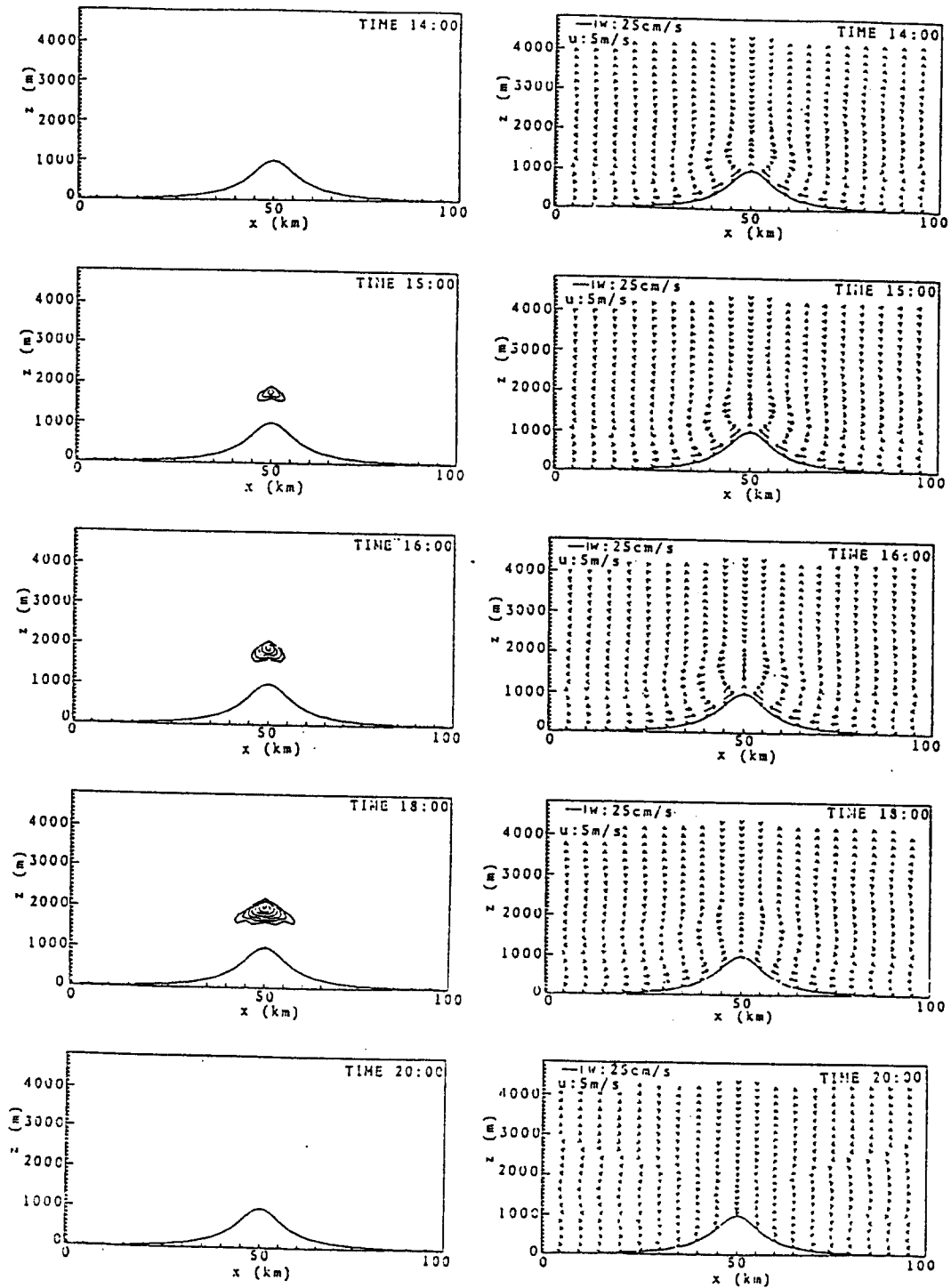


Fig. 4. Same as Fig. 2, but for case 3.

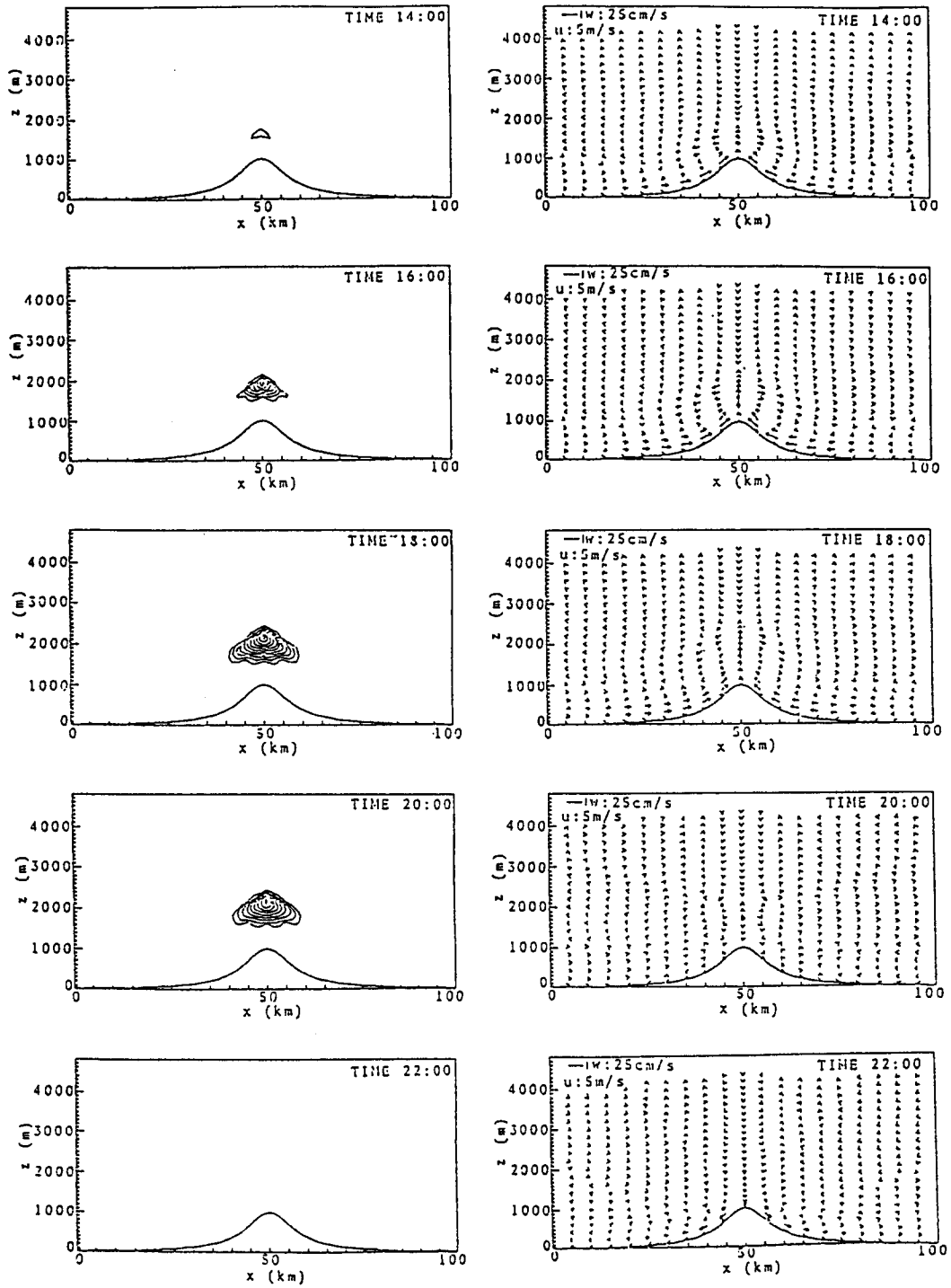


Fig. 5. Same as Fig. 2, but for case 4

3.2. 대기중의 수분량이 적은 형성에 미치는 영향

Fig. 4는 Case 3의 경우로 14시부터 20시까지의 계산 결과를 나타낸 것이다. 적운은 15시경 발달하기 시작해서 18시경 최대로 발달되었고 20시경에 소멸하였다. Case 1과 비교하면 적운이 잘 발달되고 있지 않음을 알 수 있다. 운수의 혼합비도 최대 0.0007kg/kg 정도로 Case 1에 비해 작았다. 적운 발생시의 운저의 고도는 Case 1의 경우 산정상위 약 400m인 것에 비해 Case 3은 산정상의 상공 약 600m로 약간 높게 나타났다.

Fig. 5는 Case 4의 경우로 14시부터 22시까지의 계산결과를 나타낸 것이다. 적운은 14시경 산정상위 500m에서 형성되어 18시경 최대로 발달하였고 이때의 운수 혼합비의 최대치는 0.0011kg/kg 정도이었다. 상공의 수분량이 작기 때문에 Case 1에 비해 적운의 발달이 억제되었으며, 적운은 22시경 소멸하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 중규모의 기상 예측 모델에 구름 물리 과정을 첨가하여 적운 형성 모델을 작성하였다. 작성된 모델을 이용하여 대류에 의한 적운 형성 시뮬레이션을 행하여 온도장, 수증기장이 적운 형성에 미치는 영향에 대해서 검토한 결과, 지표면의 가열에 의해서 대기가 불안정할수록 적운이 발달하기 쉽고, 대기 중의 수분이 많을수록 적운이 잘 발달하였다.

또한 본 연구에서 작성된 모델은 대기 오염 물질 농도 예측에 있어서 대기로부터 지면으로의 침적

량을 정확히 파악하기 위해서 구름의 형성을 표현할 수 있는 기상 예측 모델의 기초 단계이므로 대기 오염 물질 농도 예측 모델에 사용되기 위해서는 더욱더 상세한 운물리 과정의 매개 변수화와 습성 침적 등의 연구가 필요하다고 생각되어 진다.

참고문헌

- Klemp, J. B. and R. B. Wilhelmson, 1978b, Simulation of right and left moving storms produced through storm splitting, *J. Atmos. Sci.*, 35, 1097-1110.
- Mahrer, Y. and R. A. Pielke, 1975, A numerical study of the air flow over mountains using the two-dimensional version of the university of virginia mesoscale model, *J. Atmos. Sci.*, 32, 2144-2155.
- Ogura, Y., and N. A. Phillips, 1962, Scale analysis of deep and shallow convection in the atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 20, 173-179.
- Ogura, Y., 1963, The evolution of a moist convection element in a shallow, conditionally unstable atmosphere. A numerical calculation, *J. Atmos. Sci.*, 20, 407-424.
- Orville, H. D., 1965, A Numerical study of the initiation of cumulus clouds over the mountainous terrain, *J. Atmos. Sci.*, 22, 684-699.
- _____, and F. J. Kopp, 1977, Numerical simulation of the life history of a hailstorm, *J. Atmos. Sci.*, 34, 1956-1618.