

대기 모형에서의 벌크형 미세구름물리 모수화 방안

임교선*

경북대학교 지구시스템과학부 천문대기학과

(접수일: 2019년 3월 13일, 수정일: 2019년 4월 12일, 게재확정일: 2019년 5월 4일)

Bulk-Type Cloud Microphysics Parameterization in Atmospheric Models

Kyo-Sun Sunny Lim*

Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, School of Earth System Sciences,
Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Manuscript received 13 March 2019; revised 12 April 2019; accepted 4 May 2019)

Abstract This paper reviews various bulk-type cloud microphysics parameterizations (BCMPs). BCMP, predicting the moments of size distribution of hydrometeors, parameterizes the grid-resolved cloud and precipitation processes in atmospheric models. The generalized gamma distribution is mainly applied to represent the hydrometeors size distribution in BCMPs. BCMP can be divided in three different methods such as single-moment, double-moment, and triple-moment approaches depending on the number of prognostic variables. Single-moment approach only predicts the hydrometeors mixing ratio. Double-moment approach predicts not only the hydrometeors mixing ratio but also the hydrometeors number concentration. Triple-moment approach predicts the dispersion parameter of hydrometeors size distribution through the prognostic reflectivity, together with the number concentrations and mixing ratios of hydrometeors. Triple-moment approach is the most time expensive method because it has the most number of prognostic variables. However, this approach can allow more flexibility in representing hydrometeors size distribution relative to single-moment and double-moment approaches. At the early stage of the development of BCMPs, warm rain processes were only included. Ice-phase categories such as cloud ice, snow, graupel, and hail were included in BCMPs with prescribed properties for densities and sedimentation velocities of ice-phase hydrometeors since 1980s. Recently, to avoid fixed properties for ice-phase hydrometeors and ad-hoc category conversion, the new approach was proposed in which rimed ice and deposition ice mixing ratios are predicted with total ice number concentration and volume.

Key words: Bulk type, cloud microphysics, grid-resolved process, hydrometeors, size distribution

1. 서론

대기 모형은 크게 역학 과정과 물리 과정 모수화 방안으로 구성된다. 역학 과정은 격자에서 분해되는

대기 상태 변수(3차원 바람 성분, 기압, 기온, 밀도, 수분)들을 3차원 운동량 방정식, 연속 방정식(질량 보존 법칙), 이상기체 상태 방정식, 열역학 방정식(에너지 보존 법칙), 수분 보존 방정식의 지배 방정식 계를 통해 명시적으로 계산하는 과정으로, 7개의 변수를 7개의 방정식으로 구성하여 닫힌 연립 방정식 계로 계산한다. 물리 과정 모수화 방안은 격자에서 분해되지 않는 아격자 규모의 대기 물리 과정을 격자상의 변수를 이용해 모수화 하여 계산하고, 그 효과를 격자상의 변수로 되돌려주는 방안으로, 역학 과정의 격자체

*Corresponding Author: Kyo-Sun Sunny Lim, Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, School of Earth System Sciences, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea.
Phone: +82-53-950-7135, Fax: +82-53-950-6359
E-mail: kyosunlim@knu.ac.kr

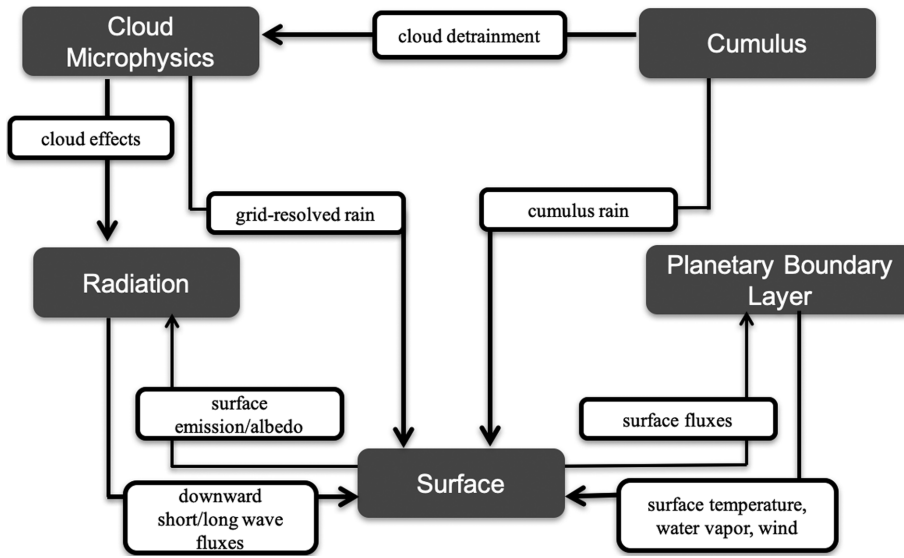


Fig. 1. Basic physical parameterizations considered in atmospheric models and direct interaction among them.

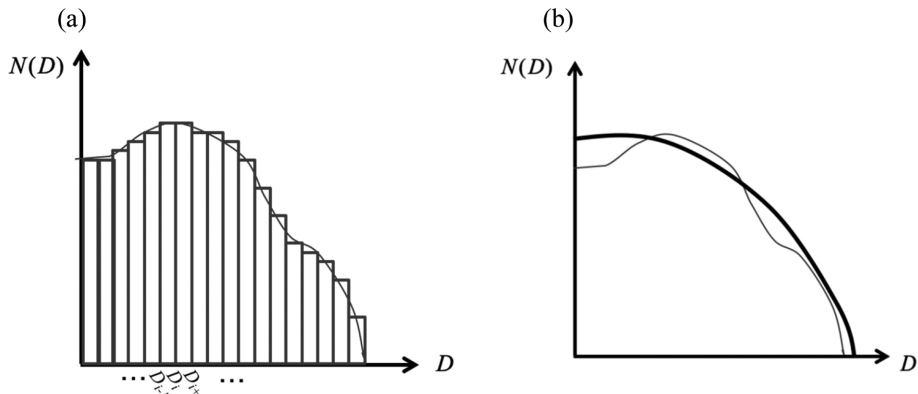


Fig. 2. Representation of the size distribution of hydrometeors with respect to the diameter of hydrometeors in the (a) bin-type and (b) bulk-type cloud microphysics parameterizations. Thin grey lines represent the idealized distribution of observations and thick black lines represent the idealized distribution applied in models.

계에서 다루어지지 않은 강제력 항들 및 과정 들을 고려한다. Figure 1은 대기 모형에서 고려되는 기본적인 물리 과정 모수화 방안 및 각 모수화 방안 사이의 상호작용을 나타낸다. 대기 모형의 지면 물리 과정은 지면 모수화, 지구 및 태양 복사 과정은 복사 모수화, 그리고 행성 경계층 내의 물리 과정은 행성 경계층 모수화에 의해 강제력으로 표현된다.

대기 모형에서 구름 및 강수 과정은 미세구름물리 모수화 및 적운 모수화에 의해 표현된다. 설정된 대기 모형의 수평 격자가 대기 중에서 형성된 임의의 구름의 수평 크기보다 큰 경우, 구름 및 구름으로부터 동반되는 강수 과정은 아격자 규모의 과정으로 여겨지

며 이러한 구름 및 강수 과정은 적운 모수화 방안에 의해 모수화 된다. 반면, 설정된 대기 모형의 수평 격자가 대기 중에서 형성된 임의의 구름 수평 크기보다 작은 경우, 모델 격자 내의 상대습도는 100%가 되고, 이 때 구름 및 구름으로부터 동반되는 강수 과정은 격자 분해 과정으로 여겨지며 이러한 구름 및 강수 과정은 미세구름물리 모수화 방안에 의해 모수화 된다.

미세구름물리 모수화 방안은 대기 수상의 크기 분포를 표현하는 방안에 따라 빈 유형(bin type)과 벌크 유형(bulk type)으로 나뉜다. Figure 2는 빈 유형의 미세구름물리 모수화 방안(Fig. 2a)과 벌크 유형의 미세구름물리 모수화 방안(Fig. 2b)에서 대기 수상의 크기

분포를 어떻게 표현하는지 나타낸다. 빈 유형의 미세구름물리 모수화 방안(Ogura and Takahashi, 1973; Soong, 1974; Kogan, 1991; Khain et al., 2000)은 대기 수상의 크기를 유한개의 범주로 나누어 대기 수상 입자의 미세구름물리 과정을 계산하여 각 크기 범주의 수 농도를 직접 예단한다. 따라서 빈 유형의 방안은 인위적으로 크기에 따라 구름 방울과 빗방울을 나누지 않아도 되며, 발생하는 미세구름물리 과정에 의해 대기 수상의 크기 분포가 자유롭게 변화한다. 반면, 벌크 유형의 미세구름물리 모수화 방안(Lin et al., 1983; Reisner et al., 1998; Lim and Hong, 2010)은 구름 방울, 빗방울, 얼음, 눈송이, 싸락눈, 그리고 우박과 같은 대기 수상의 크기 분포를 함수를 이용하여 표현한다. 예를 들어 벌크 유형의 미세구름물리 모수화 방안에서는 Fig. 2b와 같이 회색 선으로 표현된 이상화된 관측 대기 수상의 크기 분포를 검은색 실선과 같은 함수를 도입하여 간단하게 표현한다. 빈 유형의 미세구름물리 모수화 방안은 구름 성장, 발달 그리고 소멸 시 대기 수상의 크기 분포의 변화 연구 및 개별적 미세구름물리 과정 연구에 널리 사용된다. 벌크 유형의 미세구름물리 모수화 방안은 빈 유형의 모수화 방안보다 훨씬 효율적인 계산 시간을 갖는다는 장점이 있어 대부분의 기상/기후 예측 모형에서 많이 사용된다. Khain et al. (2015)의 연구는 빈 유형과 벌크 유형의 미세구름물리 모수화 방안의 상세한 차이점을 기술하였다.

본 논문의 2장에서는 벌크 유형 미세구름물리 모수화 방안의 일반적인 모수화 방법에 대해 기술하였다. 모수화 방법의 설명은 Weather Research and Forecasting (WRF)모델에 탑재되어 있는 WRF Double-Moment 6-class (WDM6) 방안과 WRF Single-Moment 6-class (WSM6) 방안을 예로 들어 기술하였다. 3장에서는 현존하는 벌크 유형 미세구름물리 모수화 방안의 개발 이력 및 문제점, 그리고 대안에 대해 논의 하였다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 요약 및 결론을 제시 하였다.

2. 모수화 방법

2.1 벌크형 미세구름물리 모수화 방안에서 대기 수상의 특성

2.1.1 대기 수상의 크기 분포와 모멘트

벌크 유형의 미세구름물리 모수화 방안에서 대기 수상의 크기 분포는 일반적으로 식 (1)과 같은 일반화된 감마 분포 함수를 이용하여 표현된다.

$$N_x(D) [m^{-4}] = N_{Tx} \frac{\alpha_x}{\Gamma(\nu_x)} \lambda_x^{\alpha_x \nu_x} D^{\alpha_x \nu_x - 1} \exp[-(\lambda_x D)^{\alpha_x}]$$

$$= N_{0x} D^{\alpha_x \nu_x - 1} \exp[-(\lambda_x D)^{\alpha_x}] \quad (1)$$

여기에서 $N_x(D)$ 는 특정 대기 수상 x 의 지름인 D 에 해당하는 대기 수상의 수 농도이며, N_{Tx} 는 특정 대기 수상의 전체 수 농도, α_x 과 ν_x 는 분산의 정도를 나타내는 매개변수, λ_x 는 크기 분포의 기울기를 나타내는 매개변수, 그리고 Γ 는 감마 함수를 나타낸다. N_{0x} 는 크기 분포의 y 축 절편을 나타낸다. 이러한 대기 수상의 크기 분포를 이용하여 모멘트를 구할 수 있다. 예를 들어, 특정 대기 수상의 크기 분포의 p 번째 모멘트, $M_x(p)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} M_x(p) &= \int_0^\infty D^p N_x(D) dD \\ &= \int_0^\infty D^p N_{Tx} \frac{\alpha_x}{\Gamma(\nu_x)} \lambda_x^{\alpha_x \nu_x} D^{\alpha_x \nu_x - 1} \exp[-(\lambda_x D)^{\alpha_x}] dD \\ &= \frac{N_{Tx} \Gamma(\nu_x + p/\alpha_x)}{\lambda_x^p \Gamma(\nu_x)} \end{aligned} \quad (2)$$

t 가 임의의 양의 실수일 때, 감마 함수인 Γ 는 다음의 특성이 있다.

$$\Gamma(t) = \int_0^\infty D^{t-1} \exp(-D) dD \quad (3)$$

구름 방울을 제외한 대기 수상의 크기 분포의 경우, 식 (1)로 표현된 분포에서 α_x 를 1로 간주할 수 있으며(Milbrandt and Yau, 2005a), 크기 분포는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} N_x(D_x) [m^{-4}] &= N_{Tx} \frac{1}{\Gamma(\nu_x)} \lambda_x^{\nu_x} D_x^{\nu_x - 1} \exp(-\lambda_x D_x) \\ &= N_{0x} D_x^{\nu_x - 1} \exp(-\lambda_x D_x) \end{aligned} \quad (4)$$

한편, 구름 방울의 크기 분포는 α_x 를 3, 그리고 ν_x 를 1로 간주할 수 있다(Cohard and Pinty, 2000).

2.1.2 대기 수상의 밀도, 질량, 그리고 연직 침강 속도

미세구름물리 모수화 방안에서 특정 대기 수상의 밀도는 상수 값으로 규정되거나 격자 변수로 진단되며, 동일한 고체 형태의 대기 수상 범주에 대해 서로 다른 모수화 방안은 다른 값을 처방하기도 한다. 예를 들어, WDM6 방안의 경우(Lim and Hong, 2010) 액체형 대기 수상의 밀도는 1000 kg m^{-3} , 눈송이와 싸락눈의 밀도는 각각 100 kg m^{-3} 와 500 kg m^{-3} 으로 처방된다. Morrison 방안(Morrison et al., 2005)의 경우 싸락눈의 밀도는 400 kg m^{-3} 으로 처방된다. 우박을 포함하는 미세구름물리 모수화 방안의 경우(Milbrandt and Yau, 2005b; Bae et al., 2019), 그 밀도가 900 kg m^{-3} 혹은 912 kg m^{-3} 의 값으로 처방된다. 얼음의 밀도는 500 kg m^{-3} (Milbrandt and Yau, 2005b), 혹은

890 kg m⁻³ (Thompson et al., 2008), 혹은 얼음의 수 농도에 비례하는 값(Lim and Hong, 2010)으로 처방된다. 연직 침강 속도는 대기 수상 x 에 대해, $V_x(D_x) = a_x D_x^{b_x} (\rho_0/\rho)^{1/2}$ 로 규정된다. a_x 및 b_x 는 상수로써 대기 수상마다 다른 값을 취하며, 대기 수상의 밀도와 마찬가지로 다른 미세구름물리 모수화 방안에서 그 값이 다를 수 있다. ρ_a 와 ρ_0 는 각각 공기의 밀도와 지표면에서의 공기의 밀도를 나타낸다. 미세구름물리 모수화 방안에서 작은 크기의 구름 방울은 연직 침강 속도가 없다고 가정하며, 얼음의 경우 연직 침강 속도를 고려하는 방안과 그렇지 않은 방안이 모두 존재한다.

한편, 특정 대기 수상의 크기에 따른 입자 질량, $m_x(D_x)$ 은 다음과 같이 표현된다. $m_x(D_x) = c_x D_x^{d_x}$ 여기에서 c_x 와 d_x 는 대기 수상마다 다른 값을 가지는 상수이다. 구형으로 간주되는 대기 수상의 경우(빗방울, 찌라눈, 우박), c_x 와 d_x 는 각각 $\frac{\pi}{6}\rho_x$ 와 3이다. $\rho_a q_x = \int_{D_x=D_1}^{D_x=D_2} m_x(D_x) N_x(D_x) dD_x$ 의 관계식 및 (2)와 (3) 식을 이용하면 λ_x 는 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_x [\text{m}^{-1}] = \left[\frac{c_x N_{Tx} \Gamma(v_x + d_x/\alpha_x)}{\rho_a q_x \Gamma(v_x)} \right]^{1/d_x} \quad (5)$$

여기에서 q_x 는 특정 대기 수상의 혼합비를 나타낸다.

2.2 벌크형 미세구름물리 모수화 방안의 예단 변수

2.2.1 단일 모멘트, 이중 모멘트, 삼중 모멘트 모수화 방안의 예단 변수

단일 모멘트 방안의 벌크형 미세구름물리 모수화 방안은 각 대기 수상의 q_x 만을 예단하는 방안이다. 따라서 대기 수상의 크기 분포를 나타내는 (4)의 식에서 N_{0x} 와 v_x 는 상수 값으로 가정된다. 이중 모멘트 방안의 벌크형 미세구름물리 모수화 방안은 v_x 를 상수 값으로 가정하며, q_x 와 함께 N_{Tx} 를 예단하는 방안이다. 따라서, 이중 모멘트 방안은 단일 모멘트 방안의 모수화 방안보다 유연한 대기 수상의 크기 분포를 표현할 수 있다. 삼중 모멘트 방안은 q_x 와 N_{Tx} 뿐만 아니라 분산의 정도를 나타내는 매개변수인 v_x 까지 예단하는 방안이다. 삼중 모멘트 방안은 세 방안 중 예단 변수가 가장 많기 때문에 미세구름물리 과정의 계산 시간이 가장 오래 걸리지만 세 방안 중 대기 수상의 크기 분포를 가장 유연하게 표현할 수 있다. q_x , N_{Tx} , v_x 예단을 위한 방정식을 다음 절에서 살펴보겠다.

2.2.2 대기 수상의 질량 예단

대기 모형의 지배 방정식 중 수분 보존 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \rho_a q_v}{\partial t} [\text{kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}] = -\nabla \cdot (\rho_a \vec{v} q_v) + \rho_a (E - C) \quad (6)$$

여기에서 q_v 는 수증기의 혼합비, \vec{v} 는 속도, t 는 시간, 그리고 E 와 C 는 각각 증발량과 응결량을 나타낸다. 레이놀즈 평균법을 이용하여 속도 장과 혼합비(질량)의 장을 격자 규모 장과 아격자 규모 장의 합으로 나타내면 지배방정식은 아래의 형태로 나타낼 수 있다 (Stull, 1988).

$$\frac{\partial \rho_a \bar{q}_v}{\partial t} [\text{kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}] = -\frac{\partial \rho_a \bar{u} \bar{q}_v}{\partial x} - \frac{\partial \rho_a \bar{v} \bar{q}_v}{\partial y} - \frac{\partial \rho_a \bar{w} \bar{q}_v}{\partial z} - \frac{\partial \rho_a \bar{u}' q_v'}{\partial x} - \frac{\partial \rho_a \bar{v}' q_v'}{\partial y} - \frac{\partial \rho_a \bar{w}' q_v'}{\partial z} + \rho_a (E - C) \quad (7)$$

여기에서 \bar{q}_v 는 수증기의 격자 규모장, q_v' 는 아격자 규모장을 나타낸다. 위 식에서 등호를 중심으로 오른쪽 첫번째 항부터 세번째 항은 격자 규모의 이류를 나타내며, 네번째 항부터 여섯번째 항은 난류에 의한 수분 수송을 나타낸다. $\rho_a (E - C)$ 항은 미세구름물리 과정에 의한 수증기의 증가/감소를 나타낸다.

각 대기 수상에 대한 질량의 예단은 (8)의 방정식은 통해 이루어진다.

$$\frac{\partial \bar{q}_x}{\partial t} [\text{kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}] = -\frac{1}{\rho_a} \nabla \cdot (\rho_a \vec{v} \bar{q}_x) + \text{TURB}(q_x) + \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a \bar{q}_x V_{q_x}) + S_{q_x} \quad (8)$$

(8) 식의 첫번째 항은 특정 대기 수상의 격자 규모 이류, 두번째 항은 난류에 의한 수분 수송, 세번째 항은 연직 침강, 그리고 네번째 항은 미세구름물리 과정에 의한 대기 수상 질량의 증가 및 감소를 나타낸다.

식 (8)의 마지막 항인 S_{q_x} 를 나타내는 여러 미세구름물리 과정을 Fig. 3a에 도식화 하였다. 이는 WDM6의 미세구름물리 모수화 방안을 예로 든 것으로, 대기 수상 중 빗방울(Rain)의 혼합비(q_R)를 증가시키는 미세구름물리 과정에는 Praut(구름 방울의 자동변환 과정), Pracw(구름 방울의 부착 과정), 그리고 Pgm1t(찌라눈의 녹음 과정)등이 있으며, 빗방울의 질량을 감소시키는 미세구름물리 과정에는 Pgf1z(빗방울에서 찌라눈으로의 얼음 과정), Psacr(눈송이에 의한 빗방울의 부착 과정), 그리고 Prev1t(빗방울의 증발 과정) 등이 있다. 즉, S_{q_R} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{q_R} = \text{Praut} + \text{Pracw} = \text{Paacw} + \text{Paacw} + \text{pgm1t} + \text{pgeml} + \text{psm1t} + \text{psem1} - \text{Prev1t} - \text{Pgf1z} - \text{Piacr} - \text{Psacr} - \text{Pgacr} - \text{Prev1t}$$

각 항에 대한 설명은 Lim and Hong (2010) 논문을

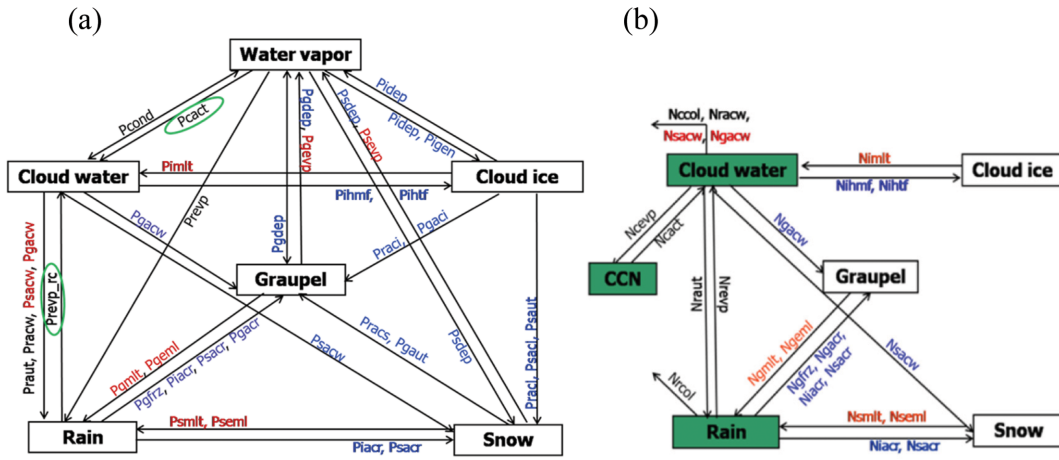


Fig. 3. The example of source/sink terms for the prediction of (a) mass and (b) number concentration of hydrometeors in WDM6 scheme, adopted from Fig. 1 in Lim and Hong (2010). The red (blue)-color terms are activated when the temperature is above (below) 0°C. The black-color terms are activated regardless of the temperature regime. The terms in the green circle in Fig. 3a (hydrometeors in the green box in Fig. 3b) are added terms (additionally predicted variables) in WDM6, compared to WSM6 scheme.

참고할 수 있다.

미세구름물리 과정 중에 하나인 P_{sacr} 을 모수화 하는 방법에 대해 자세히 살펴 보도록 하겠다. 특정 D_S 의 지름을 갖는 눈송이가 특정 D_R 의 지름을 갖는 빗방울과 충돌하여 병합되는 미세구름물리 과정을 가정 하자. 이 때, 눈송이가 빗방울을 쏘고 지나가는 단위 시간 동안 부피는 $\pi \left(\frac{D_S + D_R}{2} \right)^2 |V_S(D_S) - V_R(D_R)|$ 이다.

여기에서 $V_S(D_S)$ 와 $V_R(D_R)$ 은 각각 눈송이와 빗방울의 크기에 따른 연직 침강 속도를 의미한다. 시간당 특정 눈송이가 휩쓸고 지나갈 수 있는 모든 빗방울을 고려하면, 충돌/병합 과정에 의한 특정 눈송이의 질량 변화는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 E_{SR} 은 병합 효율, ρ_w 은 빗방울의 밀도를 나타낸다.

$$\frac{dM(D_S)}{dt} [\text{kg s}^{-1}] = \int_0^\infty \pi \left(\frac{D_S + D_R}{2} \right)^2 |V_S(D_S) - V_R(D_R)| E_{SR} \frac{\pi \rho_w D_R^3}{6} N_R(D_R) dD_R \quad (9)$$

빗방울과 눈송이의 크기 분포를 단일 모멘트 방안 인 WSM6 (Hong and Lim, 2006)에서 적용된 분포로 가정하고, 가능한 눈송이의 크기 분포에 대해 식 (9)의 질량 변화를 적분하면 다음과 같다.

$$\int_0^\infty \frac{dM(D_S)}{dt} N_S(D_S) dD_S [\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}]$$

$$\begin{aligned} &= \int_0^\infty \int_0^\infty \pi \left(\frac{D_S + D_R}{2} \right)^2 |V_S(D_S) - V_R(D_R)| \\ &E_{SR} \frac{\pi \rho_w D_R^3}{6} N_{0S} \exp\{- (\lambda_S D_S)\} \\ &\times N_{0R} \exp\{- (\lambda_R D_R)\} dD_S dD_R \\ &= \frac{\pi^2}{24} |V_S - V_R| \rho_w E_{SR} N_{0S} N_{0R} \\ &\int_0^\infty \int_0^\infty (D_S + D_R)^2 D_R^3 \exp\{- (\lambda_S D_S)\} \\ &\times \exp\{- (\lambda_R D_R)\} dD_S dD_R \\ &= \frac{\pi^2}{24} |V_S - V_R| \rho_w E_{SR} N_{0S} N_{0R} \\ &\left(\frac{\Gamma(4)\Gamma(3)}{\lambda_R^4 \lambda_S^3} + 2 \frac{\Gamma(5)\Gamma(2)}{\lambda_R^5 \lambda_S^2} + \frac{\Gamma(6)\Gamma(1)}{\lambda_R^6 \lambda_S^1} \right) \\ &= \pi^2 \rho_w E_{SR} N_{0S} N_{0R} |V_S - V_R| \\ &\left(\frac{0.5}{\lambda_R^4 \lambda_S^3} + \frac{2}{\lambda_R^5 \lambda_S^2} + \frac{5}{\lambda_R^6 \lambda_S^1} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

위의 계산과정에서 눈송이와 빗방울의 크기에 따른 연직 침강 속도의 차이는 무시 가능하다는 가정이 포함되었다. 최종적으로 P_{sacr} 은 단위 보정을 위해 식 (10)의 양변을 공기의 밀도로 나누어 주면 된다.

$$\left. \frac{dq}{dt} \right|_{P_{sacr}} [\text{kg kg}^{-1} \text{s}^{-1}] = \pi^2 E_{SR} N_{0S} N_{0R} \left(\frac{\rho_w}{\rho_a} \right)$$

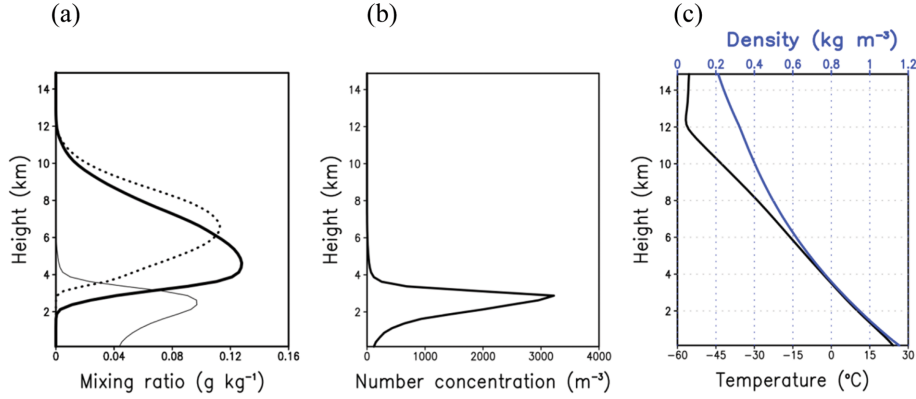


Fig. 4. Vertical profiles of (a) rain (q_R), snow (q_S), and graupel (q_G) mixing ratios, (b) rain number concentration, and (c) temperature (black line) and density (blue line), which have been utilized as input variables for the offline test. Solid, dotted, and thick solid lines in (a) indicate q_R , q_S , and q_G respectively.

$$|V_S - V_R| \left(\frac{0.5}{\lambda_R^4 \lambda_S^3} + \frac{2}{\lambda_R^5 \lambda_S^2} + \frac{5}{\lambda_R^6 \lambda_S^1} \right) \quad (11)$$

액체상의 대기 수상인 빗방울과 구름 방울에 대해서만 이중 모멘트 방안을 취하는 WDM6 방안의 경우, 빗방울의 크기 분포를 $N_{TR} \lambda_R^2 D_R \exp\{-(\lambda_R D_R)\}$ 로 간주하며 눈송이의 크기 분포는 WSM6의 분포와 동일하다. (10)의 유도과정에서 빗방울의 크기 분포를 WDM6의 그것으로 대체하면, WDM6 방안에서 $Psacr$ 은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty \frac{dM(D_S)}{dt} N_S(D_S) dD_S \quad [\text{kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}] \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty \pi \left(\frac{D_S + D_R}{2} \right)^2 |V_S(D_S) - V_R(D_R)| \\ & \quad E_{SR} \frac{\pi \rho_w D_R^3}{6} N_{0S} \exp\{-(\lambda_S D_S)\} \\ & \quad \times N_{TR} \lambda_R^2 D_R \exp\{-(\lambda_R D_R)\} dD_S dD_R \\ &= \frac{\pi^2}{24} |V_S - V_R| \rho_w E_{SR} N_{0S} N_{TR} \lambda_R^2 \\ & \quad \int_0^\infty \int_0^\infty (D_S + D_R)^2 D_R^4 \exp\{-(\lambda_S D_S)\} \\ & \quad \times \exp\{-(\lambda_R D_R)\} dD_S dD_R \\ &= \frac{\pi^2}{24} |V_S - V_R| \rho_w E_{SR} N_{0S} N_{TR} \lambda_R^2 \\ & \quad \left(\frac{\Gamma(5)\Gamma(3)}{\lambda_R^5 \lambda_S^3} + 2 \frac{\Gamma(6)\Gamma(2)}{\lambda_R^6 \lambda_S^2} + \frac{\Gamma(7)\Gamma(1)}{\lambda_R^7 \lambda_S^1} \right) \\ &= \pi^2 \rho_w E_{SR} N_{0S} N_{TR} |V_S - V_R| \\ & \quad \left(\frac{2}{\lambda_R^3 \lambda_S^3} + \frac{10}{\lambda_R^4 \lambda_S^2} + \frac{30}{\lambda_R^5 \lambda_S^1} \right) \quad (12) \end{aligned}$$

식 (12)의 양변을 단위 보정을 위해 공기의 밀도로 나누어 주면 WDM6 방안에서 $Psacr$ 은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \left. \frac{dq}{dt} \right|_{Psacr} \quad [\text{kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}] &= \pi^2 E_{SR} N_{0S} N_{TR} \left(\frac{\rho_w}{\rho_a} \right) \\ |V_S - V_R| & \left(\frac{2}{\lambda_R^3 \lambda_S^3} + \frac{10}{\lambda_R^4 \lambda_S^2} + \frac{30}{\lambda_R^5 \lambda_S^1} \right) \quad (13) \end{aligned}$$

동일한 미세구름물리 과정인 $Psacr$ 을 모수화하는 과정에 있어 단일 모멘트 방안과 이중 모멘트 방안은 다르게 정의된 대기 수상의 크기 분포를 모수화 과정에 사용한다. (13) 식에서 보여지는 바와 같이 이중 모멘트 방안의 $Psacr$ 을 모수화하기 위해서는 빗방울의 총 수 농도인 N_{TR} 의 값이 예단 되어야 한다.

위에서 유도된 WDM6 및 WSM6 방안의 $Psacr$ 생성률을 정량적으로 비교하였다. $Psacr$ 생성률 계산을 위한 입력 자료는 이상화된 이차원 스콜선 실험의 결과값을 사용하였다. 고체 및 액체형의 다양한 대기 수상이 존재 가능한 스콜선은 많은 관측 자료의 연구로 특징적인 구조 및 열역학적 특성이 파악되어 있어 미세구름물리 모수화 방안의 성능 평가에 많이 사용되는 기상 현상이다. WRF 모델 버전 4.0 (Skamarock et al., 2008)을 이용하여 Lim and Hong (2010)과 동일한 이차원 스콜선 실험을 수행하였다. 이때 미세구름물리 모수화 옵션은 WDM6 방안을 사용하였다. 적분 시작 시각부터 6시간 동안 스콜선 실험 모의를 통해 계산된 대기 수상의 혼합비 및 수 농도, 밀도, 그리고 온도의 수평 방향 평균된 연직 분포를 초기 입력 값으로 하여 WDM6 및 WSM6 방안에서의 $Psacr$ 생성률을 계산하였다. Figure 4는 $Psacr$ 생성률 계산 시 필요한 입력 자료의 연직 분포를 나타낸다. 싸락

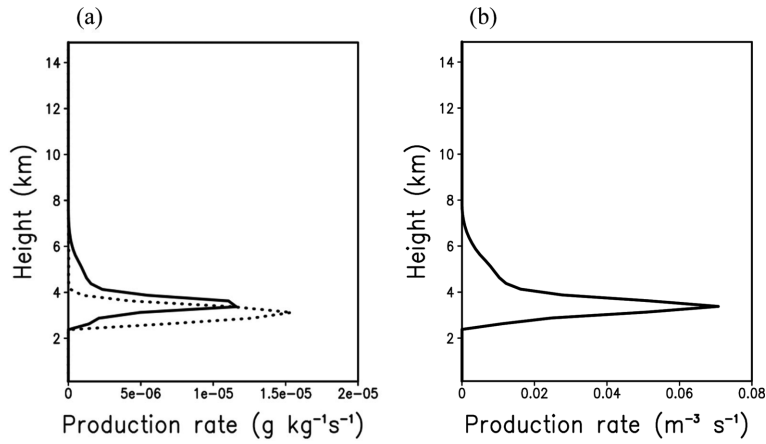


Fig. 5. Vertical profiles of production rate, (a) Psacr and (b) Nsacr. Solid lines indicate the production rate for WDM6 and dotted line for WSM6.

눈의 혼합비(q_G)는 눈송이의 혼합비(q_S)보다 하층에 집중되어 있으며, 그 최대값이 약 0.129 g kg^{-1} 으로 q_S 보다 큰 값을 보였다(Fig. 4a). 빗방울의 경우, 혼합비(q_R)와 수 농도(N_{TR})는 2~3 km 고도 사이에서 최대값을 보였다(Figs. 4a, b). WDM6와 WSM6 방안은 질량 가중된 눈송이의 침강 속도, V_S 를 계산 시 눈송이와 싹눈의 질량 가중된 침강 속도를 사용하기 때문에, q_S 외에 q_G 의 값이 필요하다.

식 (11)과 식 (13)을 통해 계산된 Psacr 생성률이 각각 점선과 실선으로 Fig. 5a에 제시되었다. 점선으로 제시된 단일 모멘트 방안(WSM6)의 생성률이 실선으로 제시된 이중 모멘트 방안(WDM6)의 생성률보다 하층에 집중되어 있고, 생성률의 최대값이 나타나는 지점(약 3~3.5 km 사이)에서 그 값이 더 크음을 알 수 있다. WDM6 방안은 WSM6 방안보다 2.5~3.5 km 고도에서 빗방울을 감소시키는 Psacr의 생성률이 작아 해당 고도에서는 더 많은 빗방울이 존재할 수 있다. 이는 WDM6 방안이 WSM6 방안보다 중하층에서 더 많은 빗방울을 모으한다는 선행 연구(Kim et al., 2013; Liu et al., 2011)와 일치하는 해석이다. 다음 장에서는 빗방울을 포함하는 여타 대기 수상의 수 농도를 예단하는 방법에 대해 알아보겠다.

2.2.3 대기 수상의 수 농도 예단

대기 수상의 수 농도는 (14)의 식을 통하여 예단 된다.

$$\frac{\partial \overline{N_{Tx}}}{\partial t} [\text{m}^{-3} \text{ s}^{-1}] = -\nabla \cdot (\overline{V N_{Tx}}) + \text{TURB}(N_{Tx}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{N_{Tx} V_{N_{Tx}}}) + S_{N_{Tx}} \quad (14)$$

위의 식에서 첫번째 항은 특정 대기 수상 수 농도의

격자 규모 이류, 두번째 항은 난류에 의한 수송, 세번째 항은 연직 침강, 그리고 네번째 항은 미세구름물리 과정에 의한 대기 수상 수 농도의 증가/감소를 나타낸다.

식 (14)의 마지막 항인 $S_{N_{Tx}}$ 를 나타내는 여러 미세구름물리 과정이 Fig. 3b에 제시되어 있다. 이는 WDM6 방안을 예로 든 것이다. 빗방울의 수 농도를 증가시키는 미세구름물리 과정에는 Nraut(구름 방울의 자동 변환 과정), Ngmlt(싹눈의 녹음 과정), 그리고 Nsmlt(눈송이의 녹음 과정) 등이 있으며, 빗방울의 질량을 감소시키는 미세구름물리 과정에는 Ngfrz(빗방울에서 싹눈으로의 얼음 과정), Nsacr(눈송이에 의한 빗방울의 부착 과정), 그리고 Nrevp(빗방울의 증발 과정) 등이 있다. 즉, $S_{N_{Tx}}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{N_{Tx}} = Nraut + Ngmlt + Nsmlt + Ngeml + Nsem1 - Nrcol - Nrevp - Nsacr - Ngacr - Niacr - Ngfrz - Nrevp_{ra}$$

각 항에 대한 설명은 Lim and Hong (2010) 논문을 참고할 수 있다.

미세구름물리 과정 중에 하나인 Nsacr을 모수화 하는 방안에 대해 자세히 살펴 보도록 하겠다. 시간당 특정 D_S 의 지름을 갖는 눈송이가 휩쓸고 지나갈 수 있는 모든 빗방울과 충돌하여 병합되는 미세구름물리 과정의 확률 변화는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\text{Prob}(D_S)}{dt} [\text{s}^{-1}] = \int_0^\infty \pi \left(\frac{D_S + D_R}{2} \right)^2 |V_S(D_S) - V_R(D_R)| E_{SR} N_R(D_R) dD_R \quad (15)$$

빗방울과 눈송이의 크기 분포는 WDM6에서 적용된 크기 분포로 가정하고, 가능한 눈송이의 크기 분포에

대해 적분하면 (16)의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
\frac{dN}{dt} \Big|_{Nsacr} [\text{m}^{-3} \text{s}^{-1}] &= \int_0^\infty \frac{d\text{Prob}(D_S)}{dt} N_S(D_S) dD_S \\
&= \int_0^\infty \int_0^\infty \pi \left(\frac{D_S + D_R}{2} \right)^2 |V_S(D_S) - V_R(D_R)| \\
&\quad E_{SR} N_{0S} \exp\{- (\lambda_S D_S)\} \\
&\quad \times N_{TR} \lambda_R^2 D_R \exp\{- (\lambda_R D_R)\} dD_S dD_R \\
&= \frac{\pi}{4} |V_S - V_R| E_{SR} N_{0S} N_{TR} \lambda_R^2 \\
&\quad \int_0^\infty \int_0^\infty (D_S + D_R)^2 D_R \exp\{- (\lambda_S D_S)\} \\
&\quad \times \exp\{- (\lambda_R D_R)\} dD_S dD_R \\
&= \pi E_{SR} N_{0S} N_{TR} |V_S - V_R| \left(\frac{0.5}{\lambda_S^3} + \frac{1}{\lambda_R \lambda_S^2} + \frac{1.5}{\lambda_R^2 \lambda_S} \right) \quad (16)
\end{aligned}$$

Psacr 생성률 계산시 이용된 입력 자료를 사용하여 계산된 식 (16)의 Nsacr 생성률을 Fig. 5b에 제시하였다. Psacr의 생성률이 최대값이 나타나는 지점(약 3~3.5 km 사이)에서 Nsacr의 생성률 또한 그 값이 크게 나타나며 약 0.071 m⁻³의 값을 나타낸다. Nsacr 모수화는 눈송이가 빗방울과 충돌하여 병합되는 미세구름물리 과정의 확률 변화를 기반으로 하기 때문에 동일 미세구름물리 과정의 질량 변화를 기반으로 계산된 Psacr의 연직 분포와 비슷한 형태의 연직 분포를 나타낸다.

2.2.4 대기 수상의 반사도 예단

삼중 모멘트 방안에서는 v_x 가 예단 되어야 한다. 이론적으로 v_x 의 예단을 위해 대기 수상 크기 분포의 여러 모멘트가 사용될 수 있지만, 관측 가능한 크기 분포의 6번째 모멘트인 반사도(Z_x) 예단을 통한 v_x 의 예단이 일반적인 방법이다. (2) 식을 이용하면 반사도는

$$Z_x = M_x(6) = \frac{N_{Tx} \Gamma(v_x + 6/\alpha_x)}{\lambda_x^6 \Gamma(v_x)}$$

의 질량과 크기의 관계식에서 $d_x = 3$ 이라면(즉, 구형으로 간주되는 대기 수상), 기온기 매개변수는 $\lambda_x^6 = \left[\frac{c_x N_{Tx} \Gamma(v_x + 3)}{\rho_a q_x \Gamma(v_x)} \right]^2$ 로 표현된다. 이 경우, 반사도는 (17)의 식으로 표현된다.

$$Z_x [\text{m}^3] = \frac{G(v_x)(\rho_a q_x)^2}{c_x^2 N_{Tx}} \quad (17)$$

여기에서, $G(v_x) = \frac{(5 + v_x)(4 + v_x)(3 + v_x)}{(2 + v_x)(1 + v_x)(v_x)}$ 이다.

한국기상학회 대기 제29권 2호 (2019)

대기 수상의 질량, 수 농도 예단과 유사하게 대기 수상에 대한 반사도는 (18)의 식을 통해 예단 된다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \bar{Z}_x}{\partial t} [\text{m}^3 \text{s}^{-1}] &= -\nabla \cdot (\bar{v} \bar{Z}_x) + \text{TURB}(Z_x) \\
&\quad + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{Z}_x V_{z_x}) + S_{Z_x} \quad (18)
\end{aligned}$$

첫번째 항은 특정 대기 수상의 격자 규모 이류, 두번째 항은 난류에 의한 수송, 세번째 항은 연직 침강, 그리고 네번째 항은 미세구름물리 과정에 의한 대기 수상 반사도의 증가/감소를 나타낸다.

식 (18)의 마지막 항인 S_{Z_x} 를 나타내는 여러 미세구름물리 과정은 삼중 모멘트 방안인 Milbrand and Yau 모수화 방안(Milbradt and Yau, 2005b)의 식A14-A18을 참고할 수 있다. 2.2.2와 2.2.3 절에서 살펴본 눈송이에 의한 빗방울의 부착 과정이 어떻게 반사도 변화에 기여하는지 살펴보겠다. 해당 미세구름물리 과정에 의한 v_x 의 변화를 무시할 수 있다고 가정하면 (Milbradt and Yau, 2005b), (17) 식의 미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\frac{dZ_x}{dt} \Big|_{Zsacr} [\text{m}^3 \text{s}^{-1}] &= \frac{G(v_x)}{c_x^2} \rho_a^2 \left\{ \frac{2q_x dq_x}{N_{Tx} dt} \Big|_{sacr} - \left(\frac{q_x}{N_{Tx}} \right) \frac{dN_{Tx}}{dt} \Big|_{sacr} \right\} \\
&= \frac{G(v_x)}{c_x^2} \rho_a^2 \left\{ \frac{2q_x P_{sacr}}{N_{Tx}} - \left(\frac{q_x}{N_{Tx}} \right)^2 N_{sacr} \right\} \quad (19)
\end{aligned}$$

즉, 앞의 절에서 구한 Psacr과 Nsacr을 통해 반사도의 시간 변화율을 구할 수 있다.

2.2.5 대기 수상의 연직 침강 과정

질량, 수 농도, 그리고 반사도 예단에 필요한 대기 수상의 질량 가중 연직 평균 침강 속도 V_{q_x} , 수 농도 가중 연직 평균 침강 속도 $V_{N_{Tx}}$, 그리고 반사도 가중 연직 평균 침강 속도 V_{Z_x} 는 (20)-(22) 식을 통하여 계산된다.

$$\begin{aligned}
V_{q_x} [\text{m s}^{-1}] &= \frac{\int_0^\infty V_x(D_x) m_x(D_x) N_x(D_x) dD_x}{\int_0^\infty m_x(D_x) N_x(D_x) dD_x} \\
&= \frac{\Gamma(v_x + d_x + b_x) a_x (\rho_a)^{\frac{1}{2}}}{\Gamma(v_x + d_x) \lambda_x^{b_x} \rho_a} \quad (20)
\end{aligned}$$

$$V_{N_{Tx}} [\text{m s}^{-1}] = \frac{\int_0^\infty V_x(D_x) N_x(D_x) dD_x}{\int_0^\infty N_x(D_x) dD_x}$$

Table 1. Various bulk-type cloud microphysics parameterizations and their prognostic variables. The prognostic variables in each parameterization are marked as “o”. v_x , N_{Tx} , and q_x represent the shape parameter, number concentration, and mixing ratio of hydrometeors. The subscripts C, R, I, S, G, and H indicate cloud water, rain, cloud ice, snow, graupel, and hail.

Reference	v_C	N_{TC}	q_C	v_R	N_{TR}	q_R	v_I	N_{TI}	q_I	v_S	N_{TS}	q_S	v_G	N_{TG}	q_G	v_H	N_{TH}	q_H
Kessler, 1969	x	x	o	x	x	o	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Wisner et al., 1972	x	x	o	x	x	o	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o
Lin et al., 1983	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	x	x	x	o
Rutledge and Hobbs, 1983	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	x
Ziegler, 1985	x	o	o	x	o	o	x	x	o	x	x	o	x	x	x	x	o	o
Cotton et al., 1986	x	x	o	x	x	o	x	o	o	x	x	o	x	x	o	x	x	x
Murakami, 1990	x	x	o	x	x	o	x	o	o	x	o	o	x	x	o	x	x	x
Tao and Simpson, 1993	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	x
Ferrier, 1994	x	x	o	x	x	o	x	o	o	x	o	o	x	o	o	x	o	o
Kong and Yau, 1997	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Meyers et al., 1997	x	x	o	x	o	o	x	o	o	x	o	o	x	o	o	x	o	o
Reisner et al., 1998	x	x	o	x	x	o	x	o	o	x	o	o	x	o	o	x	x	x
Cohard and Pinty, 2000	x	o	o	x	o	o	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Morrison et al., 2005	x	x	o	x	o	o	x	o	o	x	o	o	x	o	o	x	x	x
Milbrandt and Yau, 2005b	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Hong and Lim, 2006	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	x
Seifert and Beheng, 2006	x	o	o	x	o	o	x	o	o	x	o	o	x	o	o	x	x	x
Thompson et al., 2008	x	x	o	x	o	o	x	o	o	x	x	o	x	x	o	x	x	x
Lim and Hong, 2010	x	o	o	x	o	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	x
Lang et al., 2014	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o
Bae et al., 2018	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o	x	x	o

$$= \frac{\Gamma(v_x + b_x) a_x (\rho_0)^{\frac{1}{2}}}{\Gamma(v_x) \lambda_x^{b_x} (\rho_a)^{\frac{1}{2}}} \quad (21)$$

$$V_{Z_x} [\text{m s}^{-1}] = \frac{\int_0^\infty V_x(D_x) D_x^6 N_x(D_x) dD_x}{\int_0^\infty D_x^6 N_x(D_x) dD_x}$$

$$= \frac{\Gamma(v_x + 2d_x + b_x) a_x (\rho_0)^{\frac{1}{2}}}{\Gamma(v_x + 2d_x) \lambda_x^{b_x} (\rho_a)^{\frac{1}{2}}} \quad (22)$$

(8), (14), (18) 식의 세번째 항을 나타내는 연직 침강 과정은 위의 (20)-(22) 식을 통해 모수화 된다.

3. 논 의

3.1 벌크형 미세구름물리 모수화 방안의 역사

1960년대 후반 액체상의 대기 수상만을 포함하여 따뜻한 구름의 미세구름물리 과정을 모의한 벌크형 모수화 방안(Kessler, 1969)의 개발을 시작으로 현재 까지 다수의 벌크형 미세구름물리 모수화 방안이 개발되었다. Table 1은 1960년대 후반부터 최근까지 개발된 벌크형 미세구름물리 모수화 방안의 여러 종류와 각 모수화 방안의 예단 변수를 나타낸다. Table 1

의 v_x , N_{Tx} , 그리고 q_x 에서 아래 첨자 X 는 구름 방울(C), 빗방울(R), 얼음(I), 눈송이(S), 싹락눈(G), 그리고 우박(H)을 나타낼 수 있다. Lin et al. (1983)과 Rutledge and Hobbs (1983)의 연구 이후에 차가운 구름 및 혼합형 구름의 미세구름물리 과정을 모의할 수 있도록 얼음, 눈송이, 싹락눈, 우박까지 포함하는 여러 모수화 방안이 개발되었다. 초기의 미세구름물리 모수화 방안은 대기 수상의 혼합비만을 예단하는 방안으로써, Wisner et al. (1972) 과 Rutledge and Hobbs (1983)에 의한 단일 모멘트 형태의 미세구름물리 모수화 방안은 최근 개발되고 있는 많은 모수화 방안의 근간이 되고 있다(Tapiador et al., 2019).

대기 수상의 혼합비와 함께 수 농도를 예단하는 이중 모멘트 방안의 미세구름물리 모수화 방안은 Cotton et al. (1986)의 연구를 시작으로 다수 개발되었다(Table 1). 이중 모멘트 방안의 미세구름물리 모수화 방안 중 일부 방안들은 고체 형태의 대기 수상만을 이중 모멘트 방안으로 예단하고(Ferrier, 1994; Reisner et al., 1998), 다른 일부 방안들은 액체 형태의 대기 수상만을 이중 모멘트 방안으로 예단한다(Cohard and Pinty, 2000; Lim and Hong, 2010). 모든 대기 수상을 이중 모멘트 방안으로 예단하는 방법 또한 존재한다(Seifert and Beheng, 2006). Thompson 모수화 방안(Thompson

et al., 2008)과 Morrison 방안(Morrison et al., 2005)은 에어러솔의 간접 효과를 고찰 할 수 있도록 구름 방울까지 이중 모멘트 방안으로 예단하는 옵션이 존재한다(Thompson and Eidhammer, 2014; Morrison et al., 2009). 한편 Onishi and Takahashi (2012)는 상대적으로 얼음 생성과 관련된 미세구름물리 과정은 불확실성이 크지만 액체상의 형성과 성장은 선행 연구를 통해 많은 이해가 되어 있다는 가정을 바탕으로, 따뜻한 구름의 미세구름물리 과정은 빙 형태의 모수화 방안을 취하여 상세하게 모수화 하고 얼음 생성과 성장에 관한 미세구름물리 과정은 벌크 형태의 모수화 방안을 취하는 혼합적 미세구름물리 모수화 방안을 개발하였다.

단일 모멘트 방안에서는 N_{ox} 가 고정되어 있기 때문에, 대기 수상의 혼합비가 증가함에 따라 진단되는 수 농도 또한 증가하게 된다. 단일 모멘트 방안의 가정으로 유도되는 이러한 대기 수상의 혼합비와 수 농도의 비례관계는 특정 현실에서 발생하는 미세구름물리 과정의 결과와 어긋난다. 예로, 빗방울의 쪼개짐 과정은 빗방울의 혼합비는 변화 시키지 않지만 빗방울 수 농도의 증가를 가져온다(Lim and Hong, 2010). 부착, 확산 성장, 증발과 같은 미세구름물리 과정 또한 수 농도와 혼합비가 독립적으로 변하기 때문에 단일 모멘트 방안처럼 N_{ox} 를 고정하는 것은 바람직하지 않다는 선행연구 결과(Ferrier, 1994; Ferrier et al., 1995; Straka et al., 2005; Seifert, 2008)가 존재한다.

또한 단일 모멘트 방안은 다른 크기의 대기 수상 입자에 대해 질량 가중된 하나의 평균 침강 속도를 갖기 때문에 대기 수상의 크기 분류 현상을 모의해 낼 수 없다. 대기 수상의 크기 분류 현상이란 큰 크기를 갖는 입자의 침강 속도가 빨라 큰 입자의 대기 수상이 대기 하층에서 많이 존재하는 현상이다. 이러한 효과는 대기 수상에 대해 질량 가중 평균 속도와 함께 수 농도 가중 평균 속도가 대기 수상의 연직 침강을 결정하는 이중 모멘트 방안을 사용할 때에만 모의될 수 있다(Dawson et al., 2014). 하지만 이중 모멘트 방안에서 대기 수상의 크기 분류 현상이 과도하게 모의되면 충격파가 발생하는 단점이 존재하기도 한다(Wacker and Seifert, 2001; Mansell, 2010; Milbrandt and McTaggart-Cowan, 2010).

Ferrier et al. (1995)과 Morrison et al. (2009)은 이상화된 스콜선 모의에서 N_{ox} 를 유연하게 하는 이중 모멘트 방안의 미세구름물리 과정이 단일 모멘트 방안보다 스콜선의 열역학적 특성을 잘 모의한다는 결론을 얻었다. 또한 Mansell (2008)은 초대형 세포 모의에서 이중 모멘트 방안이 단일 모멘트 방안에 비해 초대형 세포 전방 측면의 반사도와 찬공기 풀 구조를 잘 모의함을 보였다. Igel et al. (2015)은 이상화된 초

대형 세포 모의와 복사 대류 평형 모의에서 이중 모멘트 방안이 단일 모멘트 방안보다 모의 성능이 우수함을 보인다 있다.

삼중 모멘트 형태의 미세구름물리 모수화 방안은 단일 모멘트 혹은 이중 모멘트 방안의 모수화 방안에 비해 많이 개발되어 있지 않다. 삼중 모멘트 방안은 대기 수상 크기 분포의 분산의 정도를 나타내는 매개 변수를 대기 수상의 수 농도 및 혼합비와 함께 예단함으로써 대기 수상 크기 분포에 더 많은 유연성을 부여한다. 1999년 미국 오클라호마에서 발생한 초대형 세포 스톱 사례에 대해 삼중 모멘트 모수화 방안이 단일 모멘트 방안에 비해 관측된 열 역학적 조건과 초대형 세포의 반사도 구조, 그리고 찬공기 풀을 더 현실적으로 모의한다는 결과가 Dawson et al. (2010)의 연구에서 밝혀진 바 있다. Dawson et al. (2010)은 삼중 모멘트 모수화 방안이 단일 모멘트 방안에 비해 해당 초대형 세포 스톱을 모의함에 있어 전체 컴퓨팅 계산 시간이 약 75% 증가한다고 밝혔다.

3.2 벌크형 미세구름물리 모수화 방안의 문제점과 대안

지금까지 살펴본 벌크형 미세구름물리 모수화 방안은 고체 형태의 대기 수상(얼음, 눈송이, 싹락눈, 우박)의 밀도와 연직 침강 속도가 미리 규정된다. 만약 대기중에 눈송이와 싹락눈 사이의 밀도를 갖고, 연직 침강 속도 또한 눈송이 보다는 크고 싹락눈보다는 작은 대기 수상이 존재한다면 그에 해당하는 범주를 벌크 유형의 미세구름물리 모수화 방안에서는 다룰 수 없게 된다. Dudhia et al. (2008)은 이러한 문제점을 해결하기 위해 눈송이와 싹락눈 사이의 혼합적인 대기 수상이 가능하도록 눈송이와 싹락눈의 질량 가중된 침강 속도를 침강 과정 및 부착 과정에 처방하였다.

최근에는 고체 형태의 대기 수상을 밀도 및 침강 속도 등에 의해 그 특성을 미리 규정하지 않고, 고체 형태의 대기 수상 특성을 예단하는 새로운 미세구름물리 모수화 방안이 제안되었다(Morrison and Milbrandt, 2015; Morrison et al., 2015; Milbrandt and Morrison, 2016). 제안된 방안에서 액체상의 대기 수상인 구름 방울과 빗방울은 혼합비와 수 농도를 예단하는 이중 모멘트 방안을 취한다. 고체 형태의 대기 수상은 한 개 범주의 대기 수상으로 취급하고 이에 대해서는 승화된 고체 형의 혼합비, 부착된 고체 형의 혼합비, 전체 고체 형의 수 농도, 그리고 부착된 고체 형의 부피와 같은 총 4개의 변수를 예단한다. 따라서 본 방안은 고체 형태의 대기 수상에 대해 이중 모멘트 방안을 취하는 모수화 방안보다 계산 시간이 단축된다. 만약 고체 형태의 대기 수상을 두개의 범주로 증가시키면 총 8개의 예단 변수가 필요하게 되어 계산 시간

이 증가하게 된다.

벌크형 미세구름물리 모수화 방안에서 액체 형태의 대기 수상은 일반적으로 두개의 범주(구름방울과 빗방울)로 나뉜다. 구름 방울은 연직 침강을 고려하지 않고 불포화 상태의 환경에서 즉시 증발하는 것으로 간주된다. 빗방울은 주로 구름방울과의 혹은 빗방울 간의 충돌 및 병합 과정으로 성장하고 질량에 의존하는 연직 침강 속도를 갖는다. 벌크형 방안에서 구름 방울 및 빗방울의 범주는 인위적으로 크기에 따라 분류되기 때문에, 서로 다른 크기 분포를 갖는다. 이를 보완하기 위하여 특정 미세구름물리 과정을 빈 유형처럼 모방하여 계산하는 벌크 형태의 미세구름물리 과정이 개발되었다(Saleeby and Cotton, 2004). Saleeby and Cotton (2004)이 제안한 미세구름물리 모수화 방안에서 구름 응결핵의 활성화 과정, 충돌 및 병합 과정, 그리고 대기 수상의 침강 과정은 빈 형태 모수화 방안을 통해 계산된 값을 기록한 참조표를 이용하여 계산된다. Feingold (1999) 등은 해양성 증적운 모의 사례에 대해 이같은 빈 형태 모수화 방안을 표방한 벌크형 미세구름물리 방안을 사용하였을 때 사례 모의 결과가 향상됨을 보였다.

4. 요약 및 결론

대기모형에서 격자 분해 가능한 구름 및 강수 과정은 미세구름물리 모수화 방안에 의해 모수화 된다. 미세구름물리 모수화 방안은 대기 수상의 크기 분포를 표현하는 방안에 따라 빈 유형과 벌크 유형으로 나뉘게 되는데, 일반화된 감마 유형의 함수를 이용하여 대기 수상의 크기 분포를 표현하는 벌크 유형이 효율적인 계산 시간을 갖는다는 장점이 있어 기상/기후 예측 모형에서 널리 사용된다. 이러한 벌크 유형의 미세구름물리 모수화 방안은 대기 수상의 크기 분포의 3번째 모멘트인 혼합비만을 예단하는 단일 모멘트 방안, 혼합비와 함께 크기 분포의 0번째 모멘트인 수 농도를 예단하는 이중 모멘트 방안, 그리고 혼합비, 수 농도와 함께 크기 분포의 6번째 모멘트인 반사도 예단을 통해 수 농도 분포의 분산 정도를 예단하는 삼중 모멘트 방안으로 나뉠 수 있다. 삼중 모멘트 형태의 미세구름물리 모수화 방안은 단일 모멘트 혹은 이중 모멘트 방안의 모수화 방안에 비해 대기 수상 수 농도 분포에 더 많은 유연성을 부여하지만, 예단 변수가 증가함에 따라 계산 시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

대기 수상의 혼합비, 수 농도, 반사도는 대기 수상의 격자 규모 이류, 난류에 의한 수송, 연직 침강, 그리고 미세구름물리 과정에 의한 대기 수상 혼합비, 수 농도, 반사도의 증가/감소를 통해 예단 된다. 대기 모

형의 미세구름물리 모수화 과정은 연직 침강, 그리고 미세구름물리 과정에 의한 대기 수상 혼합비, 수 농도, 반사도의 증가/감소를 모수화 한다. 이러한 벌크 유형 미세구름물리 모수화 방안은 고체 형태의 대기 수상(얼음, 눈송이, 싹락눈, 우박)의 밀도와 연직 침강 속도가 미리 규정되어 미세구름물리 과정이 계산된다. 이로 인해 발생하는 문제점을 해결하기 위해, 눈송이와 싹락눈의 질량 가중된 침강 속도를 침강과정 및 부착과정에 처방하는 방안 혹은 고체 형태의 대기 수상 특성을 예단하는 새로운 미세구름물리 모수화 방안이 제안되고 있다. 또한 벌크형 미세구름물리 모수화 방안에서 크기에 의해 인위적으로 구름방울과 빗방울이 구분되는 문제점을 해결하기 위하여 빈 방안과 벌크 방안의 혼합적인 미세구름물리 모수화 방안 혹은 빈 방안의 특정 미세구름물리 과정을 참조표를 이용하여 표방하는 미세구름물리 모수화 방안 등이 개발되고 있다.

감사의 글

논문 검토를 통해 귀중한 의견을 주신 두 분의 심사위원님께 감사 드립니다. 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2019R1C1C1008482).

REFERENCES

Bae, S. Y., S.-Y. Hong, and W.-K. Tao, 2019: Development of a single-moment cloud microphysics scheme with prognostic hail for the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 233-245, doi:10.1007/s13143-018-0066-3.

Cohard, J.-M., and J.-P. Pinty, 2000: A comprehensive two-moment warm microphysical bulk scheme. I: Description and tests. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 1815-1842.

Cotton, W. R., G. J. Tripoli, R. M. Rauber, and E. A. Mulvihill, 1986: Numerical simulation of the effects of varying ice crystal nucleation rates and aggregation processes on orographic snowfall. *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 1658-1680.

Dawson, D. T. II, M. Xue, J. A. Milbrandt, and M. K. Yau, 2010: Comparison of evaporation and cold pool development between single-moment and multimoment bulk microphysics schemes in idealized simulations of tornadic thunderstorms. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1152-1171, doi:10.1175/2009MWR2956.1.

_____, E. R. Mansell, Y. Jung, L. J. Wicker, M. R. Kumjian, and M. Xue, 2014: Low-level Z_{DR} signatures in

- supercell forward flanks: the role of size sorting and melting of hail. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 276-299, doi:10.1175/JAS-D-13-0118.1.
- Dudhia, J., S.-Y. Hong, and K.-S. Lim, 2008: A new method for representing mixed-phase particle fall speeds in bulk microphysics parameterizations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86A**, 33-44.
- Feingold, G., W. R. Cotton, S. M. Kreidenweis, and J. T. Davis, 1999: The impact of giant cloud condensation nuclei on drizzle formation in stratocumulus: Implications for cloud radiative properties. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 4100-4117.
- Ferrier, B. S., 1994: A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I: Description. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 249-280.
- _____, W.-K. Tao, and J. Simpson, 1995: A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part II: Simulations of convective storms in different large-scale environments and comparisons with other bulk parameterizations. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1001-1033.
- Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129-151.
- Igel, A. L., M. R. Igel, and S. C. van den Heever, 2015: Make it a double? Sobering results from simulations using single-moment microphysics schemes. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 910-925, doi:10.1175/JAS-D-14-0107.1.
- Khain, A. P., M. Ovtchinnikov, M. Pinsky, A. Pokrovsky, and H. Krugliak, 2000: Notes on the state-of-the-art numerical modeling of cloud microphysics. *Atmos. Res.*, **55**, 159-224.
- _____, and Coauthors, 2015: Representation of microphysical processes in cloud-resolving models: Spectral (bin) microphysics versus bulk parameterization. *Rev. Geophys.*, **53**, 247-322, doi:10.1002/2014RG000468.
- Kogan, Y. L., 1991: The simulation of a convective cloud in a 3-D model with explicit microphysics. Part I: Model description and sensitivity experiments. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1160-1189.
- Kong, F., and M. K. Yau, 1997: An explicit approach to microphysics in MC2. *Atmos.-Ocean*, **33**, 257-291.
- Kessler, E., 1969: *On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations*. Meteorological Monographs volume 10. Amer. Meteor. Soc., 84 pp.
- Kim, J.-H., D.-B. Shin, and C. Kummerow, 2013: Impacts of a priori databases using six WRF microphysics schemes on passive microwave rainfall retrievals. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **30**, 2367-2381, doi:10.1175/JTECH-D-12-00261.1.
- Lang, S.-E., W.-K. Tao, J.-D. Chern, D. Wu, X. Li, 2014: Benefits of a fourth ice class in the simulated radar reflectivities of convective systems using a bulk microphysics scheme. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 3583-3612, doi:10.1175/JAS-D-13-0330.1.
- Lim, K.-S. S., and S.-Y. Hong, 2010: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1587-1612.
- Lin, Y.-L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **22**, 1065-1092.
- Liu, C., K. Ikeda, G. Thompson, R. M. Rasmussen, and J. Dudhia, 2011: High-resolution simulations of winter-time precipitation in the Colorado Headwaters region: Sensitivity to physics parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 3533-3553, doi:10.1175/MWR-D-11-00009.1.
- Mansell, E. R., 2008: EnKF analysis and forecast predictability of a tornadic supercell storm. *Preprints, 24th Conf. on Severe Local Storms*, Savannah, GA, Amer. Meteor. Soc., 5.2 [Available online at https://ams.confex.com/ams/24SLS/techprogram/paper_142059.htm].
- _____, 2010: On sedimentation and advection in multi-moment bulk microphysics. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3084-3094, doi:10.1175/2010JAS3341.1.
- Meyers, M. P., R. L. Walko, J. Y. Harrington, and W. R. Cotton, 1997: New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme. *Atmos. Res.*, **45**, 3-39.
- Milbrandt, J. A., and M. K. Yau, 2005a: A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I: Analysis of the role of the spectral shape parameter. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3051-3064.
- _____, and _____, 2005b: A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: A proposed three-moment closure and scheme description. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3065-3081.
- _____, and R. McTaggart-Cowan, 2010: Sedimentation-induced errors in bulk microphysics schemes. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3931-3948, doi:10.1175/2010JAS3541.1.
- _____, and H. Morrison, 2016: Parameterization of cloud microphysics based on the prediction of bulk ice particle properties. Part III: Introduction of multiple free categories. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 975-995, doi:10.1175/JAS-D-15-0204.1.
- Morrison, H., and J. A. Milbrandt, 2015: Parameterization of cloud microphysics based on the prediction of bulk

- ice particle properties. Part I: Scheme description and idealized tests. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 287-311, doi:10.1175/JAS-D-14-0065.1.
- _____, J. A. Curry, and V. I. Khvorostyanov, 2005: A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models. Part I: Description. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1665-1677.
- _____, G. Thompson, and V. Tatarskii, 2009: Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 991-1007.
- _____, J. A. Milbrandt, G. H. Bryan, K. Ikeda, S. A. Tesendorf, and G. Thompson, 2015: Parameterization of cloud microphysics based on the prediction of bulk ice particle properties. Part II: Case study comparisons with observations and other schemes. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 312-339, doi:10.1175/JAS-D-14-0066.1.
- Murakami, M., 1990: Numerical modeling of dynamical and microphysical evolution of an isolated convective cloud. *J. Meteor. Soc. Japan*, **68**, 107-128.
- Ogura, Y., and T. Takahashi, 1973: The development of warm rain in a cumulus model. *J. Atmos. Sci.*, **30**, 262-277.
- Onishi, R., and K. Takahashi, 2012: A warm-bin-cold-bulk hybrid cloud microphysical model. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 1474-1497, doi:10.1175/JAS-D-11-0166.1.
- Reisner, J., R. M. Rasmussen, and R. T. Bruintjes, 1998: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **124**, 1071-1107.
- Rutledge, S. A., and P. V. Hobbs, 1983: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. VIII: A model for the "seeder feeder" process in warm-frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1185-1206.
- Saleeby, S. M., and W. R. Cotton, 2004: A large-droplet mode and prognostic number concentration of cloud droplets in the Colorado State University Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). Part I: Module descriptions and supercell test simulations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **43**, 182-195.
- Seifert, A., 2008: On the parameterization of evaporation of raindrops as simulated by a one-dimensional rain-shaft model. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 3608-3619.
- _____, and K. D. Beheng, 2006: A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds. Part 1: Model description. *Meteor. Atmos. Phys.*, **92**, 45-66.
- Skamarock, W. C., and Coauthors, 2008: *A description of the advanced research WRF version 3*. NCAR Tech. Note NCAR/TN-4751STR, 113 pp.
- Soong, S.-T., 1974: Numerical simulation of warm rain development in an axisymmetric cloud model. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1262-1285.
- Straka, J. M., M. S. Gilmore, K. M. Kanak, and E. N. Rasmussen, 2005: A comparison of the conservation of number concentration for the continuous collection and vapor diffusion growth equations using one- and two-moment schemes. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 1844-1849.
- Stull, R. B., 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Springer Netherlands, 670 pp.
- Tao, W.-K., and J. Simpson, 1993: Goddard cumulus ensemble model. Part I: Model description. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, **4**, 35-72.
- Tapiador, F. J., J.-L. Sanchez, and E. Garcia-Ortega, 2019: Empirical values and assumptions in the microphysics of numerical models, *Atmos. Res.*, **215**, 214-238, doi:10.1016/j.atmosres.2018.09.010.
- Thompson, G., and T. Eidhammer, 2014: A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 3636-3658, doi:10.1175/JAS-D-13-0305.1.
- _____, P. R. Field, R. M. Rasmussen, and W. D. Hall, 2008: Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 5095-5115.
- Wacker, U., and A. Seifert, 2001: Evolution of rain water profiles resulting from pure sedimentation: Spectral vs. parameterized description. *Atmos. Res.*, **58**, 19-39.
- Wisner, C., H. D. Orville, and C. Myers, 1972: A numerical model of a hail-bearing cloud. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1160-1181.
- Ziegler, C. L., 1985: Retrieval of thermal and microphysical variables in observed convective storms. Part I: Model development and preliminary testing. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1487-1509.