

동북아 장거리 수송 과정에서 적운 모수화 및 미세물리과정이 오존 모사농도에 미치는 영향 연구

A Study on the Effect of Cumulus Parameterization and Microphysics on Ozone Simulations during Long-range Transport Process over Northeast Asia

강 정 언 · 김 철 희*

부산대학교 대기환경과학과

(2012년 11월 19일 접수, 2013년 1월 8일 수정, 2013년 3월 8일 채택)

Jeong-Eon Kang and Cheol-Hee Kim*

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University

(Received 19 November 2012, revised 8 January 2013, accepted 8 March 2013)

Abstract

This study has been carried out to analyze the sensitivity of ozone concentrations by employing different options of cumulus parameterization schemes (CPSs) and microphysics schemes in MM5 models. These sensitivity tests were applied to long-range transport case of higher ozone over Northeast Asia. Employed CPS schemes are Betts-Miller (BM), Grell (GR), Kain-Fritsch2 (KF2), Anthes-Kuo (AK), None scheme (grid scale physics only), and four microphysics used here are Simple ice, Reisner1, Reisner2, Schultz scheme in MM5. We chose two cases of high ozone long range transport case by employing both concentrations ozone level and backward trajectory model.

The results showed that modeled ozone concentrations indicated about 10% differences among CPSs. Of the all options, GR and KF2 (for CPS), and Resner-1 and Resner-2 (for microphysics) showed relatively good and stable variations against ensemble mean values. For both CPS and microphysics schemes, the difference of precipitation arising from different parameterization schemes was significant by itself, but the resultant ozone variations showed only marginal. But the cloud fraction differences arising from different parameterization schemes showed better correlation with ozone variations than precipitation differences, indicating that the photochemical ozone generation variations is more dominant by cloud fraction than wet removal process for high and long-ranged transported ozone cases over Northeast Asia.

Key words : Cumulus parameterization, Microphysics, Long-range transport, MM5

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)51-510-3687, E-mail : chkim2@pusan.ac.kr

1. 서 론

대기오염 수치모델의 연구는 여러 불확실성 요인과 오차 원인을 줄여야 하는데, 그 중 모델에서 산출되는 기상 요소의 불확실성 또한 많은 연구가 필요하다. 수치 모델은 기상 현상을 모의하는 데 있어 크게 두 가지 본질적인 문제를 내재하고 있다. 첫째는 초기조건에 의한 불확실성이며 둘째는 유한한 시간 및 공간 간격에 의해 발생하는 수치 모델 자체의 불확실성이다(Wang *et al.*, 2006). 이 중 초기조건 문제는 기술의 발달, 위성, 레이더와 같은 측정 시스템의 발달로 양질의 데이터를 수집 및 자료 동화하는 기법 등의 연구를 통해 점차 개선되고 있다(Warner *et al.*, 1997). 그러나 수치 모델 자체의 불확실성, 특히 구름 역학과 연관된 모수화 과정에서 나타나는 오차들을 줄여 나가는 연구는 기상 예보 뿐만 아니라 대기오염 모의에 있어서도 개선의 여지가 매우 많으며, 이는 조건에 따라 적절한 물리 모수화 방안들을 최적화하여 사용함으로써 개선될 수 있다(Wang *et al.*, 2006; Dudhia, 2005).

기상모델에서 기상장 및 여러 관련 변수를 생산하기 위하여 필수적으로 선정해야 할 옵션은 여러 가지가 있다. 이 중 물리 모수화 방안 옵션이 대표적인데, 특히 적은 모수화(cumulus parameterization), 미세물리과정(microphysics process), 복사과정(radiation process), 대기경계층과정(planetary boundary layer process)을 포함하며, 해당 모수화 과정 간에 상호작용을 잘 고려하여야 양질의 기상장을 생산할 수 있다. 이 중 강수 및 구름 분포에 직접적인 영향을 주는 과정은 적은 모수화 및 미세물리과정으로 구름 효과(cloud effect), 대류성 강수(convective precipitation), 비대류성 강수(non-convective precipitation)를 포함에 있어 주된 역할을 담당한다(Dudhia, 2005; Arakawa, 2004).

적은 모수화 과정은 작은 아격자 규모의 잠재적인 구름과 강수 등의 물리 과정을 표현하기 위해 격자 규모의 독립 변수 및 종속 변수들과 연관시켜 완성하는 과정으로 적은 모수화 방안(cumulus parameterization scheme; CPS)은 종결 가정(closure assumption)에 의해 크게 수증기 수렴 기법(moisture convergence scheme), 습윤 대류 조절 기법(moist convective adjust-

ment scheme), 질량속 기법(mass flux scheme)으로 구분되며 각각 다른 대류 발생 조건을 가진다(Dudhia, 2005). 일반적인 기상 모의 과정에서 적은 모수화를 적용하였을 경우 격자규모의 포화가 없을 때에도 아격자 규모의 대류효과가 고려되므로 강수의 지연이나 국지적 불안정이 유발되지 않으며, 구름과 주위 환경 사이에서 일어나는 상호작용의 자세한 면들을 잘 표현할 수 있는 긍정적인 효과를 기대할 수 있다. 미세물리과정은 수분의 응결과정, 강수 입자로의 성장, 낙하하는 우적의 증발을 모수화하여 수치 모델에서 분해할 수 있는 범위 안에서 구름의 특성을 격자 규모로 직접 모의한다. 이 과정을 통해 모델이 분해할 수 있는 범위 내 대류규모에서 광범위한 분광(spectrum) 사이의 상호작용을 허용하고, 부적절한 모수화 과정에 의한 임의성의 개입을 방지할 수 있다.

중규모 기상모델인 MM5(the fifth-generation NCAR/Penn state mesoscale model)와 WRF(the new weather research and forecasting model)에서도 수 십년 동안 CPS와 미세물리방안에 대해 많은 연구와 개선이 진행되어 왔다(Arakawa, 2004; Stoelinga and Coauthors, 2003). 그러나 모수화 방안에 따라 모의된 강수 및 기온은 상당한 차이를 보이며 해당 사례의 종관적 특성 및 대류계 특성에도 크게 의존하므로 아직 모든 경우에 대해 특정 방안이 일괄적으로 사용되지 않는다(Gochis *et al.*, 2002; Giorgi and Shields, 1999; Wang and Seaman, 1997; Cotton and Anthes, 1990). Queen *et al.* (2008)은 강수와 침적량 모의에 있어 계절과 지역에 따라 각기 다른 미세물리방안을 적용했을 때 개선된 결과가 나타남을 제시하였으며, Odury *et al.* (2007)은 열, 수분, 또는 운동량의 재분배에 의해 적은대류가 대기 순환에 영향을 주어 다른 CPS가 적용된 대기 간에 큰 차이가 나타날 수 있음을 보였고, 이러한 적은 모수화 및 물리 과정에 대한 기상 요소 민감도 분석은 국내에서도 Seol and Hong (2006) 및 Lee and Lee (2011) 등 많은 연구자에 의해 진행되어 왔다.

반면 적은 모수화 및 물리 과정에 따른 대기오염물질의 민감도 연구는 매우 희박하다. Kim *et al.* (2011)은 다른 CPS를 적용하여 모의된 강수에 의해 오염물질의 습성 침적량에 변동이 있음을 확인한 바 있으나 국내외적으로 대기오염물질과 관련된 민감도 연구는 의외로 매우 적다. 그러나 강수, 구름, 기온 같은 기상

요소들은 오염물질이 발생, 수송, 소멸하는 과정에서 큰 역할을 담당하므로 대기오염물질의 분포를 예측함에 있어 CPS와 미세물리과정의 선택은 매우 중요하다. 또한 기상요소에 의해 지속적인 영향을 받는 다양한 오염물질의 장거리 수송(long-range transport) 과정에서 모수화 방안에 의한 영향은 작지 않을 것으로 판단된다. 이 중 오존은 광화학 반응에 의해 생성이 조절되어 구름 효과를 확인할 수 있을 뿐만 아니라 강수에 의한 습성침적 효과도 기대할 수 있으므로, 장거리 수송 과정에서 적은 모수화 및 미세물리과정의 차이에 의한 민감도 분석을 통해 그 영향을 잘 이해할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 동북아시아 지역의 장거리 수송 사례에 대해 MM5-CMAQ (community multiscale air quality) 모델링을 수행하여 적은 모수화 효과 및 미세물리과정에 의한 고농도 오존의 민감도를 파악하였다.

2. 연구 방법, 모델 및 사례

본 연구에서는 기본적으로 기상모델인 중규모 기상 모델과 지역규모 대기질 모델을 이용하여, 각 적은 모수화 및 미세물리과정의 옵션에 따른 고농도 오존의 차이를 분석하는 것을 목표로 한다. 특히 여기서는 장거리 이동과 연관된 고농도 사례들을 대상으로 하므로 장거리 이동 과정에서 옵션의 차이에 의해서 유발되는 운량의 변화, 이로 인한 광화학 과정의 변화, 습성 침적과정 등이 한반도 고농도 오존에 얼마나 영향을 미치는 지를 살펴보았다. 따라서 강한 적은 대류 및 집중 호우가 형성되어 대부분의 오염물질들이 습성 침적되어 대기 중 오존 농도가 매우 낮아진 경우의 사례 연구는 오염물질의 농도 자체가 높지 않아 본 연구 대상에서 제외된다.

2.1 적은 모수화 방안 및 미세물리방안

적은 모수화 방안은 크게 종결 가정에 따라 습윤 대류 조절 기법, 수증기 수렴 기법, 질량속 기법으로 구분되며 이를 표 1에 요약하였다. BM (Betts and Miller)은 습윤 대류 조절 기법으로 상대습도가 100% 이상이며 기온감률이 습윤 단열 감률을 초과하는 조건을 만족할 경우 대류를 잘 모의한다. 그러나 명시적 하강기류(explicit downdraft)를 고려하지 않아 강

Table 1. Descriptions of five CPSs used in this study (Dudhia, 2005).

Scheme	Grid size	Characteristic
BM	> 30 km	Moisture convective adjustment scheme
GR	10 ~ 30 km	Mass flux scheme, single cloud version of AS
KF2	20 ~ 30 km	Mass flux scheme, adds shallow convection
AK	> 30 km	Moisture convergence scheme, much convective rainfall
None	< 10 km	No cumulus scheme

Table 2. Moist characteristics of four microphysics schemes used in this study.

Scheme	Ice microphysics	Supercooled liquid	Riming process
Simple ice	Yes	No	No
Reisner1	Yes	Yes	No
Reisner2	Yes	Yes	Yes
Schultz	Yes	Yes	Yes

한 대류를 표현함에 있어서는 적합하지 않은 단점이 있다(Betts and Miller, 1986). AK (Anthes and Kuo)는 수증기 수렴 기법을 적용하여 이류에 의해 격자 기둥(grid column)안으로 유입되는 수증기의 총합을 계산하여 대류 여부 및 강수 강도를 결정한다(Anthes, 1977). 또한 대규모 모델에 보다 최적화 되어 있으며, 보편적으로 대류성 강수의 비율이 높게 나타나는 경향이 있다. GR (Grell)은 준 평형상태(quasi-equilibrium state)하에서 구름 내 상향 수송, 하향 수송 및 compensation motion에 의해 열과 에너지의 연직 분포를 결정함으로써 격자 내 단일 구름(single cloud)을 모의하며, 대류성 강수와 비대류성 강수를 유사한 비율로 모의하는 것으로 알려져 있다(Grell *et al.*, 1994). KF2(new Kain and Fritch)는 공기괴의 대류 가용 잠재에너지(convective available potential energy; CAPE)에 기반한 종결 가정을 사용하여 넓은 범위에 걸친 대류 상황에서 합리적인 강수를 모의하며 비강수 대류운에 의한 영향을 함께 고려한다(Kang and Hong, 2008). 이외에도 CPS는 각자 다른 크기의 격자 규모에서 최적화된 특징을 보인다(표 1).

미세물리방안은 표 2에 요약하였으며, 대기 내에서 상호작용하는 수분변수에 따라 구분된다. Simple ice 방안은 과냉각 수적(supercooled water)을 고려하지

않아 대기 중의 물을 수증기, 구름물/빙정, 비/눈으로 분류하며, 빙결고도 이하에서는 눈에 의한 수분량이 즉시 강수로 전환된다. Reisner-1은 과냉각 수적 상태를 첨가하고 빙결고도 이하에서 느린 용해 (slow melting)를 포함하여 수분의 상변화를 사실적으로 구현할 수 있다. Reisner-2는 Reisner-1에 사라진 과정, 얼음의 수농도 예측 방정식을 추가하여 보다 상세하게 수분을 표현하나 복잡한 계산 과정으로 인해 다른 방안보다 많은 모델링 시간이 소요되는 단점이 있다 (Seol and Hong, 2006). Schultz 방안은 Reisner-2와 거의 동일한 수분변수들을 고려하나 상대적으로 간략한 모수화 및 연산 과정을 사용한다. 따라서 타 방안에 비해 적은 적분 시간을 필요로 하며 실시간 예보에 유용한 특성을 가진다 (Schultz, 1995).

2.2 모델 개요

본 연구에서 기상 입력 자료의 생성을 위하여 기상 모델은 MM5 version 3.7을 사용하였다. 조작변인인 CPS는 BM (Betts and Miller, 1986), GR (Grell *et al.*, 1994), KF2 (Kain, 2004), AK (Anthes, 1977; Kuo, 1974) 및 적운 모수화를 사용하지 않은 경우 (None)를 선정하여 비교하였다. 미세물리방안은 Simple ice (Dudhia, 1989), Reisner1 (Reisner *et al.*, 1993), Reisner2 (Reisner *et al.*, 1998), Schultz (Schultz, 1995)을 선정하였다.

연구에 앞서 CPS에 변화를 두었을 경우 미세물리방안은 Simple ice을 사용하였고 미세물리방안에 변화를 두었을 경우 CPS는 GR로 고정하여 모델링을 수행하였다. 기상장의 초기 자료는 NCEP FNL (final operational global analysis data)를 이용하였으며 100 × 70 (60 km × 60 km) 격자를 사용하였다. 해당 모델의 연직층은 지형을 따르는 시그마 좌표계로써 최상단이 50 hpa인 23번째까지의 층으로 정의하였다. 모델 내 물리 옵션 중 PBL은 MRF PBL physics를 사용하였고, cloud 복사과정과 multi-soil model을 적용하여 통제변인으로 두었다.

MM5에서 구성한 기상장을 입력 자료로 사용하여 대기질 모사를 할 모델은 CMAQ version 4.6을 사용하였다. CMAQ의 옵션은 통제변인으로 CB-IV/Aero3 mechanism과 ACM-cloud model이 사용되었으며 모델 수행을 위한 배출량 자료는 INTEX-B (Zhang *et al.*, 2009) 자료를 사용하였다.

2.3 사례선정 및 도메인 구분

본 연구는 동북아 지역에서 장거리 이동과 연관되어 고농도가 발생한 사례에 대한 연구로서, 고농도 오존이 나타났던 사례를 선정하기 위해 2006년부터 2007년까지 대기오염측정망에 기록된 서울, 인천, 수원 지역의 시간별 오존 농도를 이용하였다. 각 지역의 8시

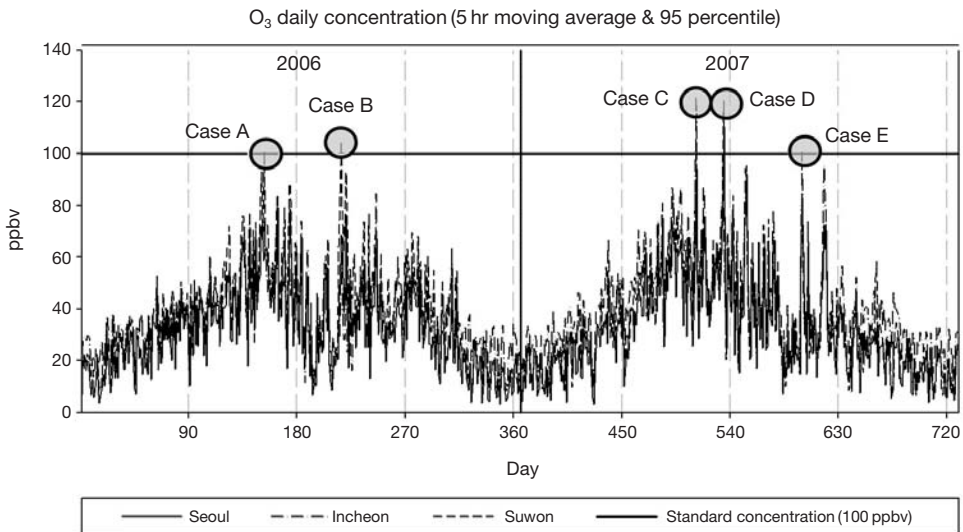


Fig. 1. Time variations of 95 percentile for 8 hr moving averaged O₃ concentration in Seoul, Incheon, Suwon from 2006 to 2007.

Table 3. Observed O₃ concentrations for five selected cases. (95 percentile concentration, unit: ppbv)

	Case A (06. 6. 2)	Case B (06. 8. 5)	Case C (07. 5. 27)	Case D (07. 6. 19)	Case E (07. 8. 23)
Seoul	73.8	68.4	94.2	110.6	83.2
Incheon	57.6	65.6	121.6	75.0	101.0
Suwon	100.6	105.5	104.2	120.4	78.6

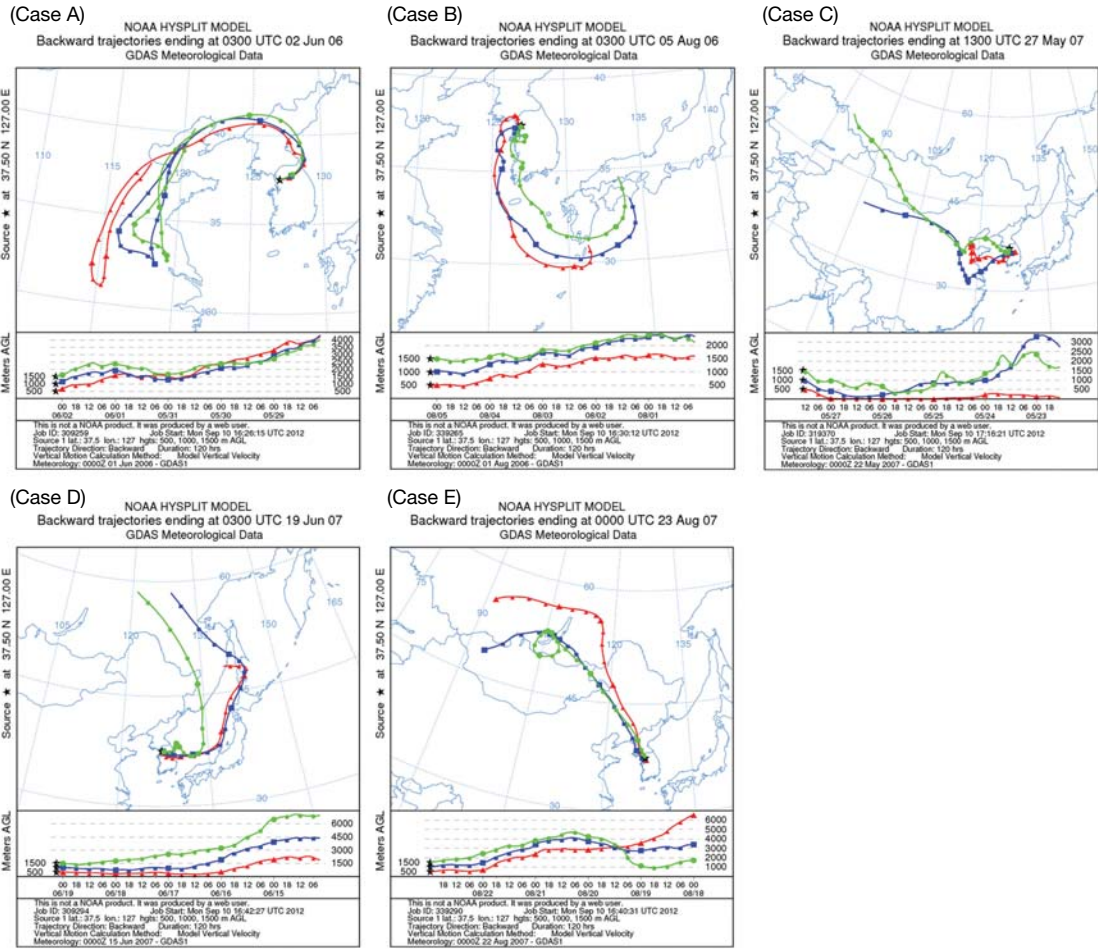


Fig. 2. Examples of HYSPLIT backward trajectories for high ozone concentration cases. Case A and C were chosen in this study as long-range transport cases.

간 이동 평균(moving averaging) 농도 중 매일 95퍼센타일(percentile)에 해당하는 값을 시계열로 분석하였고 기준 농도를 100 ppbv로 하여 한 지역이라도 기준 이상의 농도를 보였던 5가지 사례일(case A~E)을 선정하였다(그림 1과 표 3). 해당 사례에 대해

HYSPLIT (hybrid single particle lagrangian integrated trajectory) 모델을 이용한 역궤적 분석을 수행하여(그림 2) 중국으로부터 장거리 수송이 우세하였던 case A(본 연구에서 O₃ case2로 선정)와 case C(본 연구에서 O₃ case1로 선정)를 본 연구의 기준으로 최종

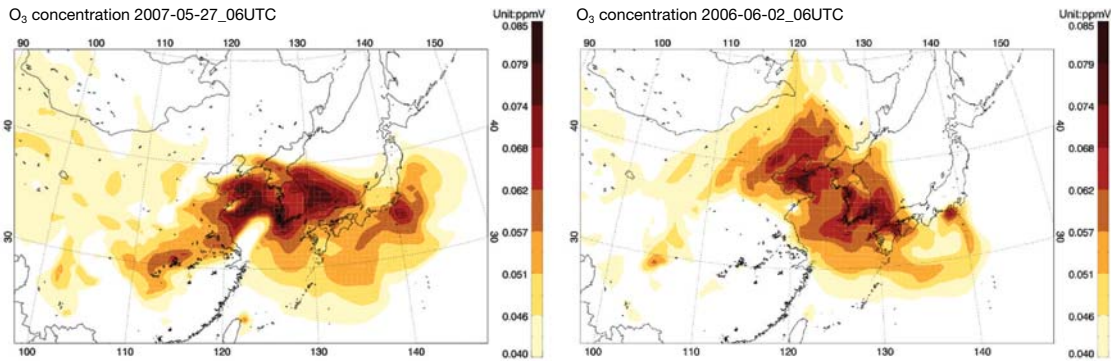


Fig. 3. Spatial distribution of ozone simulated by MM5-CMAQ on 27 May 07 (O₃ case 1, left), (b) 2 June 06 (O₃ case 2, right) using the BM and Simple ice scheme.

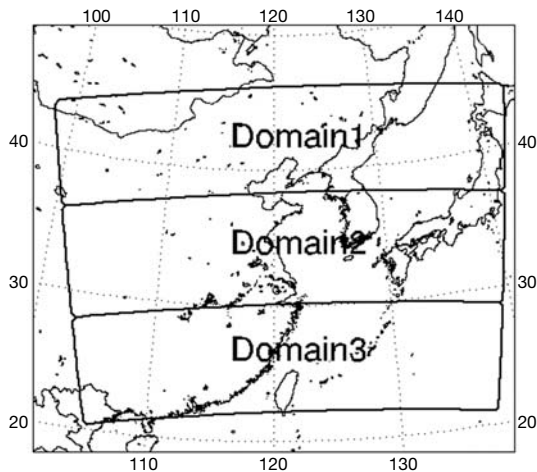


Fig. 4. Domain subdivision for spatial analysis.

선정하였다. 이렇게 선정된 사례일을 기준으로 전 10일부터 후 3일까지 14일을 하나의 사례로 정의하여 모델링을 수행하고, 최초 3일을 spin-up time으로 하여 총 11일에 대해 분석을 진행하였다. 분석에 앞서 MM5-CMAQ을 이용한 오존 농도 모사를 평가하기 위해 일차적으로 BM, Simple ice 방안을 적용하여 모의해본 결과, 대기오염측정망에 의해 고농도 오존 농도가 관측되었던 시기에 모델 또한 한반도에 나타난 고농도 오존을 잘 모의하였음을 확인하였다(그림 3). 또한 지역에 따른 각 모수화 방안의 영향을 정량적으로 비교하기 위해 모델링을 수행한 동북아시아 지역을 3등분하여(그림 4) 각 도메인의 강수량 및 배출

량 차이 등을 구분하여 해석하였다. 각 도메인은 강수밴드에 의한 영향을 고려하기 위해 동서방향으로 넓게 구성되어 있으며, 모두 같은 격자수를 가진다. 이에 따라 화남지방을 포함하는 Domain-1은 낮은 강수량과 배출량을, 그리고 Domain-2는 Domain-1에 비해 다소 많은 강수와 중국 공업지대의 영향으로 인해 세 도메인 중 가장 많은 배출량을 가진다. Domain-3는 저위도 및 해양 비중이 높은 지리 특성상 가장 많은 강수를 모의하나 Domain-2보다 다소 작은 배출량을 가진다. 이와 같이 각 도메인이 강수와 배출량에 의한 특징을 가짐으로서 도메인마다 적은 모수화 및 미세물리과정에 의한 민감도는 다르게 나타날 것으로 사료된다.

3. 연구 결과

3.1 적운 모수화 효과

Liang *et al.* (2007)은 CPS를 앙상블(ensemble)하여 모델링을 수행한 경우 단일 CPS를 적용한 결과에 비해 개선된 결과가 나타남을 제시하였다. 따라서 본 연구는 선정된 사례(11일)에 모의된 11일 평균 오존 농도에 대해 특정 CPS를 적용한 오존 농도와 각 CPS별 사례를 앙상블 평균한 농도와의 차이를 공간 분포로 나타내어 분석하였다(그림 5). 오존 농도 차이는 사례에 따라 국지적으로 최대 6 ppbv 정도로 나타났으며 지역적으로는 해안 지역 및 태평양에 그 차이가 집중되어 나타났다. 또한 오존 시계열 경향을

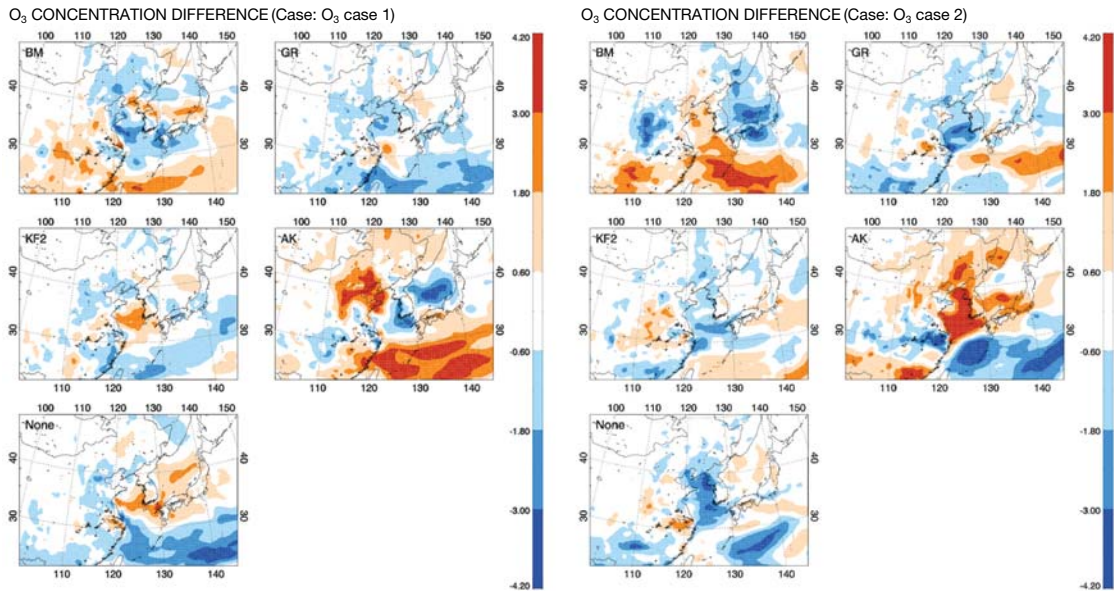


Fig. 5. Horizontal distributions of difference of O₃ concentrations (ppbv) arising from employing different CPSs for two chosen cases. Red means higher, and blue represents lower concentration.

분석한 결과 다른 도메인에 비해 Domain-3에서 CPS별로 모의된 오존 농도의 차이가 매우 큰 것을 알 수 있다(그림 6). 이러한 지역적 차이는 한국, 중국 및 일본의 주 오염배출원이 해안가에 주로 위치하여, 상하이를 비롯한 남중국에서 배출된 많은 대기 오염물질이 연관되어 나타난 것으로 판단된다. 또한 아격자 규모의 적은 및 강수 과정에 관여하는 적은 모수화 과정의 메커니즘 상, 해양에서 다량의 수분 공급으로 인한 강수 및 구름 생성 과정이 상대적으로 더 활발하므로 해안 지역 및 태평양에서 적은 모수화 효과가 크게 작용한 것으로 사료된다. CPS는 대부분의 사례에서 GR, KF2가 앙상블 평균과의 차이가 크지 않은 반면에, BM과 AK를 사용한 경우가 평균과의 차이를 많이 보였고 지역에 따른 편차도 크게 나타났다. 결국 MM5에서의 적은 모수화 과정은 아격자 규모의 적은 대류 강도에 영향을 줌으로써 대류성 강수의 차이를 확인해 볼 수 있었는데, 본 연구에서는 CPS 중 BM, AK 방안이 대기오염 농도의 비율을 높게 모의하여, 적은 모수화의 차이에 따른 오존의 생성 및 소멸과정이 상대적으로 더 다르게 모의될 수 있음을 알 수 있다.

운량은 오존 광화학 생성에 있어 대기로 입사되는 일사량을 조절함으로써 오존 생성 과정에 관여하며, 강수는 이미 생성된 오존을 대기 중에서 외부로 침적시키는 습성침적효과에 의해 오존의 소멸 농도를 조절한다. 이러한 차이를 보다 더 심도있게 살펴보기 위하여, CPS 별 모의되는 기상요소인 운량과 강수를 더 자세히 분석하였다. 그림 7과 그림 8에 운량과 강수의 방안별 모의된 공간분포 결과를 나타내었다. 그 결과 운량은 특정 지역에 국한되지 않고 전 영역에서 방안별 운량의 차이가 모의(그림 7)된 반면 강수량은 저위도 지역에 국한하여 CPS간 차이를 뚜렷이 보였다(그림 8). 강수량의 경우 모의된 강수 밴드 위치가 동일하지 않아 공간적으로 방안별 차이가 크게 나타났으며 운량에 비해 상대적으로 지역적 변동 폭이 매우 큰 것이 특징이었다. 이러한 강수 분포의 차이에도 불구하고 오존 농도의 수평 분포는 거의 동일하게 나타났으며(그림 5), CPS에 따른 차이가 가장 크게 모의되었던 Domain-3의 오존 배경농도는 가장 낮은 것으로 나타났다(표 4). 따라서 배경농도가 높은 조건에서 습성침적의 효율이 높음을 감안할 때, 습성침적에 의한 오존 농도 감소 효과의 차이는

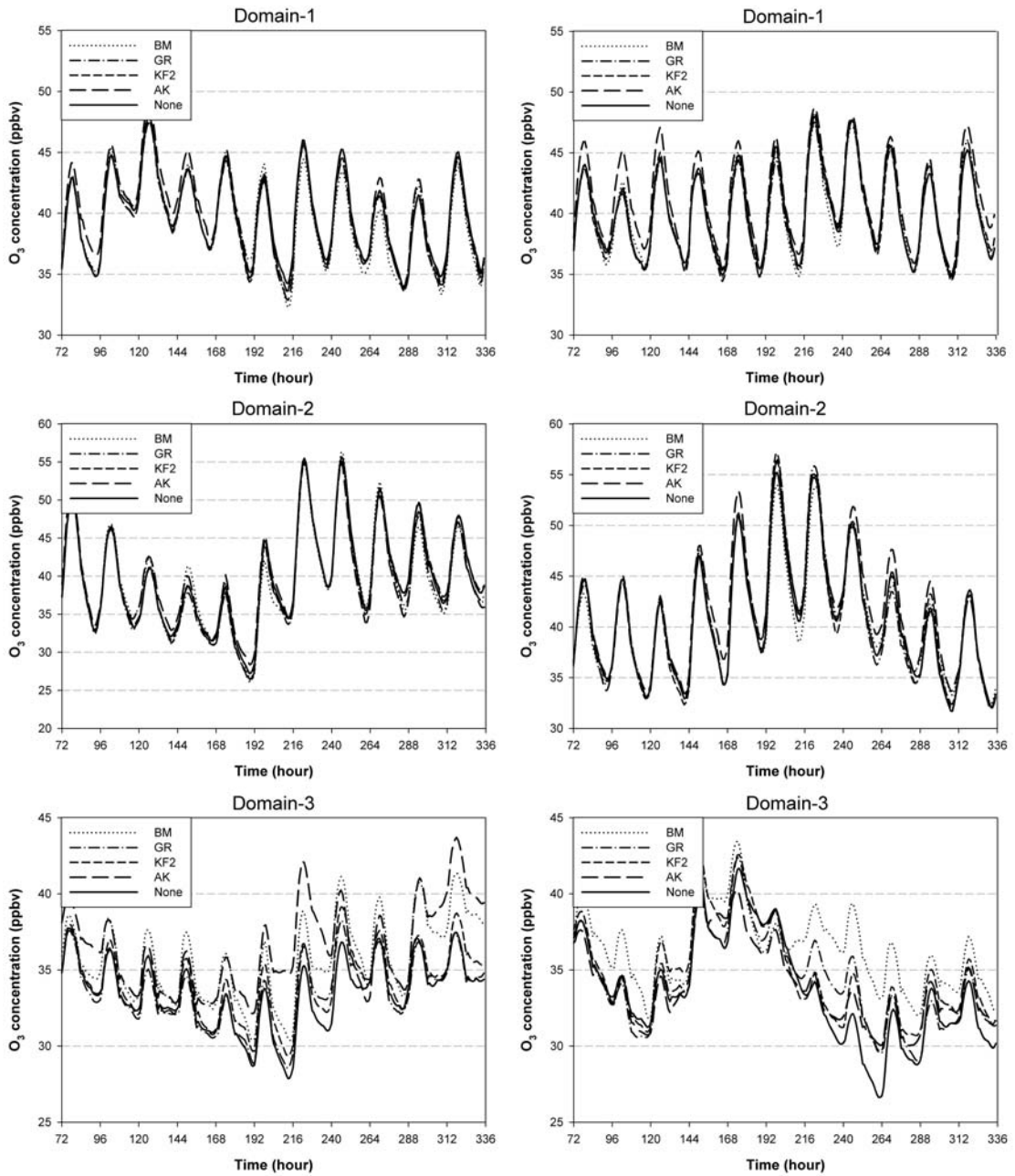


Fig. 6. Time series of domain averaged O₃ concentration arising from employing different CPSs for O₃ case1 (left), O₃ case2 (right).

크지 않은 것으로 여겨진다. 반면 운량에 의한 오존 생성 조절은 강수의 습성침적 효과에 비해 오히려 상대적으로 높게 나타나(그림 7) 고농도 오존의 조

절 능력이 운량의 차이에 의한 광화학 생성의 차이로 귀결되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Tao *et al.* (2008)의 연구결과인 적은 모수화 방안에 따른 구

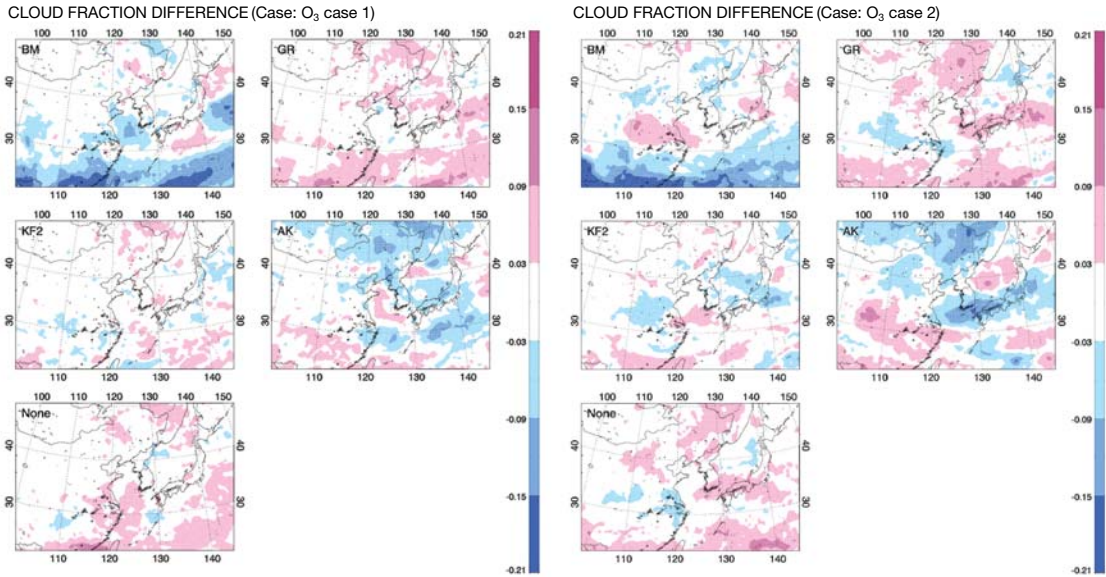


Fig. 7. Horizontal distributions of difference of cloud fractions arising from employing different CPSs for two chosen cases. Pink means higher fraction.

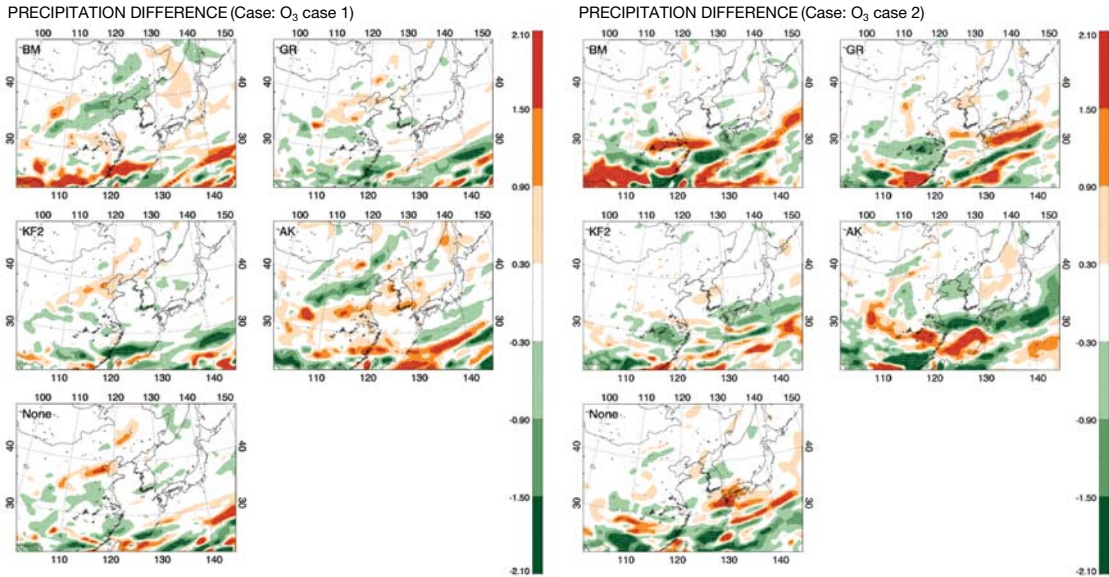


Fig. 8. Horizontal distributions of difference of precipitation (mm/6 hr) arising from employing different CPSs for two chosen cases. Red means higher precipitation.

름 효과가 광화학 반응을 조절함으로써 오존 농도를 결정하는 주 요소로 작용한다는 사실과 일치하였다. 그림 9는 각 CPS별 모의된 시간(총 264시간)의

오존 농도의 퍼센타일의 분포를 각 사례별로 나타낸 그림이다. 표시된 Box plot은 중위값 (median), 평균값 (mean), 95, 90, 75, 25, 10, 5퍼센타일 값을 각각 포함

Table 4. Domain averaged O₃ concentrations for each CPS.

(unit: ppbv)

		BM	GR	KF2	AK	None
O ₃ case1	Domain-1	39.3	39.4	39.5	40.0	39.7
	Domain-2	39.6	39.3	39.7	39.9	39.9
	Domain-3	35.8	33.6	34.2	36.5	33.5
O ₃ case2	Domain-1	40.0	40.1	40.0	41.2	40.1
	Domain-2	40.7	40.8	40.9	41.7	40.8
	Domain-3	36.4	34.4	34.8	34.0	33.7

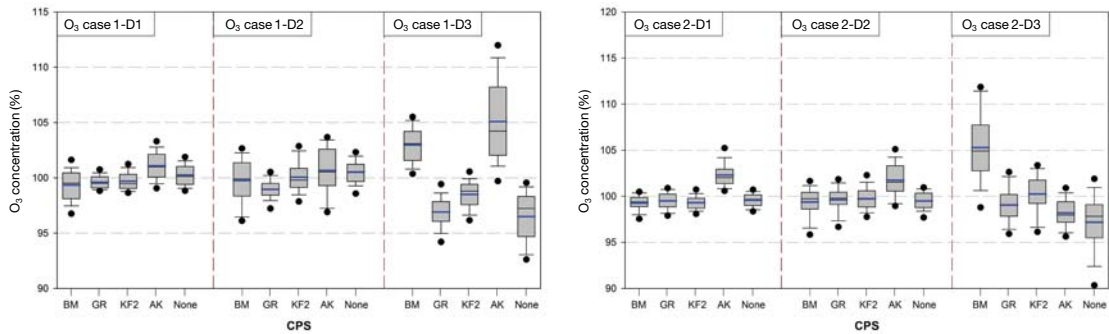


Fig. 9. Box plot of O₃ concentrations in accordance with different CPSs over each of the three subdivided domains.

하며, 분석 수행 기간(264시간) 동안 CPS에 의해 매 시간 모의된 오존 농도와 매 시간 평균 오존 농도의 편차를 영역별로 나타낸 것이다. 이를 통해 방안 별 오존 농도 퍼센타일 값들의 상대적 차이를 살펴 볼 수 있다. 그 결과 강수와 오염물질 배출량이 적은 Domain-1의 경우 모든 방안의 예상될 평균 농도와 각 방안의 농도가 5% 이내의 적은 편차를 가지며, Domain-2에서는 10% 정도의 차이를 보였다. 그러나 Domain-3에서는 CPS를 사용하지 않고 격자규모만을 모의하는 옵션을 택한 경우(그림에서 'None'로 표기) 두 사례 모두 상대적으로 낮은 오존 농도를 보인 반면, BM은 매우 높은 농도를 모의하였다. 이것은 결국 BM의 경우 운량이 적어 광화학 반응에 의한 오존의 생성 효과가 큰 것에 기인한다(그림 5 및 그림 6). 한편 AK의 경우 사례에 따라 Domain-3 지역의 오존 농도가 크게 두드러지게 모의되어 타 CPS와 큰 차이를 보였으며, 특히 BM과 AK를 적용한 경우 퍼센타일 편차도 큰 것으로 나타났다. 이는 앞서 공간분포 결과에서 기술한 것처럼 GR과 KF2 방안이 타 CPS에 비해 크게 운량, 강수뿐만 아니라 오존

농도 또한 전체 평균에 비추어 변동성이 적고 안정하게 모의되었고, 반면 BM, AK 방안이 타 CPS에 비해 크게 운량, 강수 및 오존 농도를 크게 모의한 것을 알 수 있다.

그림 10은 전 도메인에서의 모든 오존 사례에 대해 CPS 별 오존 농도 및 기상요소의 분포와 그 상관관계를 나타낸 그림이다. 해당 그래프에서는 모든 CPS 농도평균값을 해당 농도에 대하여 표준화한 후, 각 방안별 운량과 강수의 차이를 퍼센트(%)로 표현하여 오존 농도와 상관관계를 파악하였다. 각 도메인 별 계산된 결과값 뿐만 아니라, 회귀선과 상관계수 또한 도메인 평균 결과값으로부터 계산하여 나타내었다. 그림 10에서 알 수 있듯이 운량-오존농도 차이(그림의 왼쪽)는 두 변수 간 상관계수가 -0.85에 근접하여 강한 음(-)의 상관관계를 보였다. 특히 CPS 중에서 GR과 KF는 평균과 거의 근접한 반면에 AK와 BM은 운량과 오존 농도 모두 타 CPS에 비해 두드러진 차이가 나타났고, 특히 차이가 컸던 지역은 대부분 Domain-3이었음을 확인하였다. 오존-강수의 차이 분포(그림의 오른쪽)에서는 0.60의 상관계수로

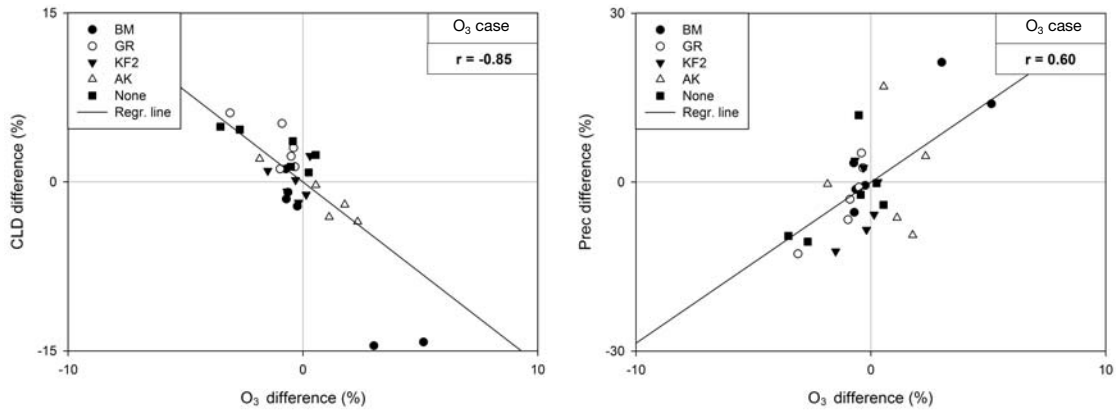


Fig. 10. Scatter diagram of subdivided-domain averaged O₃ concentration differences (%) against the deviations of cloud fractions (left), and precipitation (right) for all of CPSs.

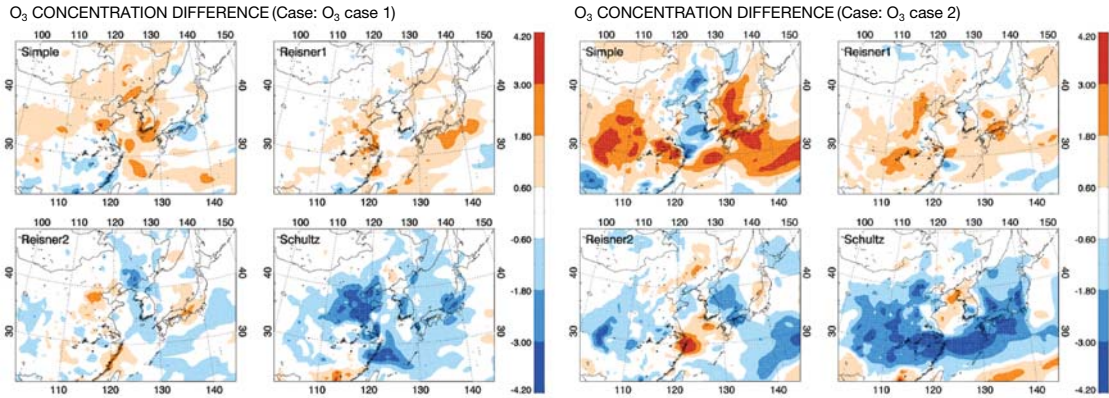


Fig. 11. Horizontal distributions of difference of O₃ concentration arising from selecting different microphysics for the chosen two cases.

나타나 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났으나 그 값은 운량에 비해 상대적으로 적은 것을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 추가로 기온, 혼합비, 대기경계층 높이, 건성침적량에 대해 동일한 분석을 수행하였다. 그 결과 기온은 CPS에 따라 내륙에서 큰 차이가 나타났고 CPS별로 모의된 오존 분포와도 유사하였으나, 해양에서는 차이가 매우 미약하여 태평양에서 큰 차이를 보인 오존의 분포를 일괄적으로 설명하지 못하였다. 또한 혼합비, 대기경계층 높이, 건성침적량의 분포는 오존 분포와 상이하여 다른 단일 요소는 운량만큼 지배적인 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다(그림으로 제시하지 않음).

3.2 미세물리과정 효과 분석

그림 11은 CPS와 같은 방법으로 모든 미세물리방안의 이상블 평균값에 대한 각 미세물리방안별 오존 농도 편차를 공간적으로 나타내었다. 주로 화남지방 및 태평양에서 분포를 보였던 CPS의 경우와는 달리 중국 내륙부터 일본까지 넓은 범위에 걸쳐 오존의 차이가 모의되었고, 미세물리방안에 따른 오존 시계열 경향(그림 14) 또한 저위도 지역인 Domain-3는 물론 Domain-1 및 Domain-2에서도 방안별로 차이가 나타난 것을 확인할 수 있다. 미세물리방안별로는 모든 사례에 대해 Simple ice 방안이 양의 편차를 모의한 반면 Schultz 방안은 매우 강한 음의 값을 모의하

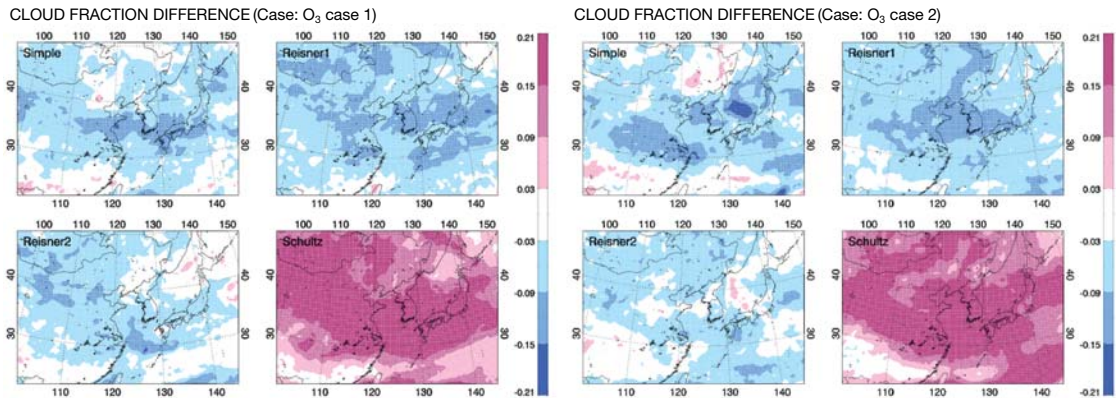


Fig. 12. Horizontal distributions of difference of cloud fraction arising from selecting different microphysics for the chosen two cases.

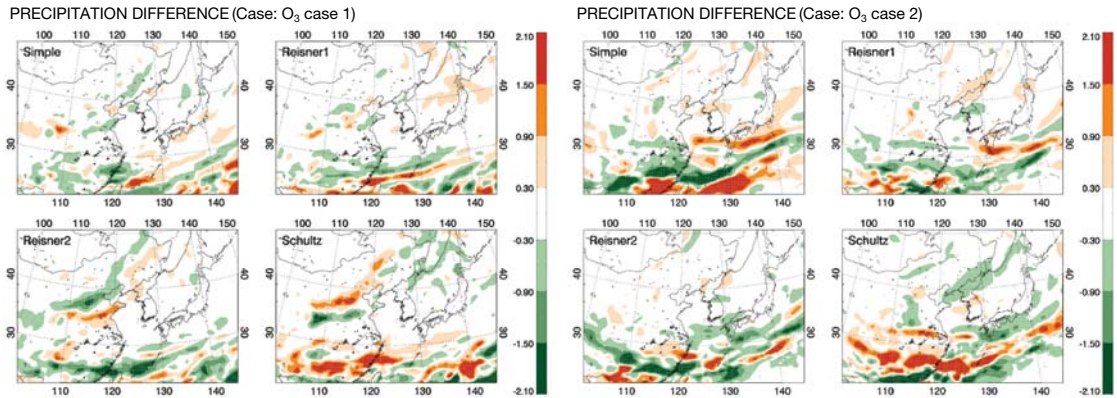


Fig. 13. Horizontal distributions of difference of precipitation (mm/6 hr) arising from selecting different microphysics for the chosen two cases.

었다. 반면 Reisner-1과 Reisner-2는 전 영역에서 상대적으로 매우 안정한 경향을 보였다. 오존의 공간분포(그림 11)와 운량(그림 12) 및 강수 공간분포(그림 13)를 비교해 보더라도 Reisner-1과 Reisner-2 방안은 이러한 안정한 경향을 확인할 수 있으며, 모든 방안에서 운량과 오존 농도는 음의 상관관계를 공간적으로 잘 확인할 수 있다. 특히 Schultz 방안이 거의 전 지역에 걸쳐 매우 높은 운량을 모의함에 따라 오존 농도 또한 매우 낮게 모의된 것이 주목할 만하였다.

공간적으로 볼 때 모든 미세물리방안이 화남지방에서 운량을 유사하게 모의하여 해당 지역에서 차이가 컸던 CPS와 다른 양상을 보였다. 반면 방안별 강

수 차이는 CPS와 유사하게 저위도 지역에 주로 분포하였으며 그 크기는 CPS에 따른 차이와 비슷하거나 오히려 소폭 작게 나타났다. 운량에 비해 강수가 미세물리방안에 따른 차이가 작고 그 분포가 오존 분포와 상이한 점을 고려할 때, 앞선 CPS 민감도 실험의 결과와 동일하게 상대적으로 운량에 의한 오존 생성 조절 효과가 매우 강하여 강수에 의한 습성침적 효과는 미미한 것으로 판단된다. 또한 Domain-3은 오존 배경농도가 낮아(표 5) 습성침적의 효율이 낮음에도 불구하고 미세물리방안별로 모의된 오존 농도 차이는 큰 것으로 보아(그림 11), 강수에 의한 오존 제거 효과는 작은 것을 알 수 있다. 이는 앞에서도 제

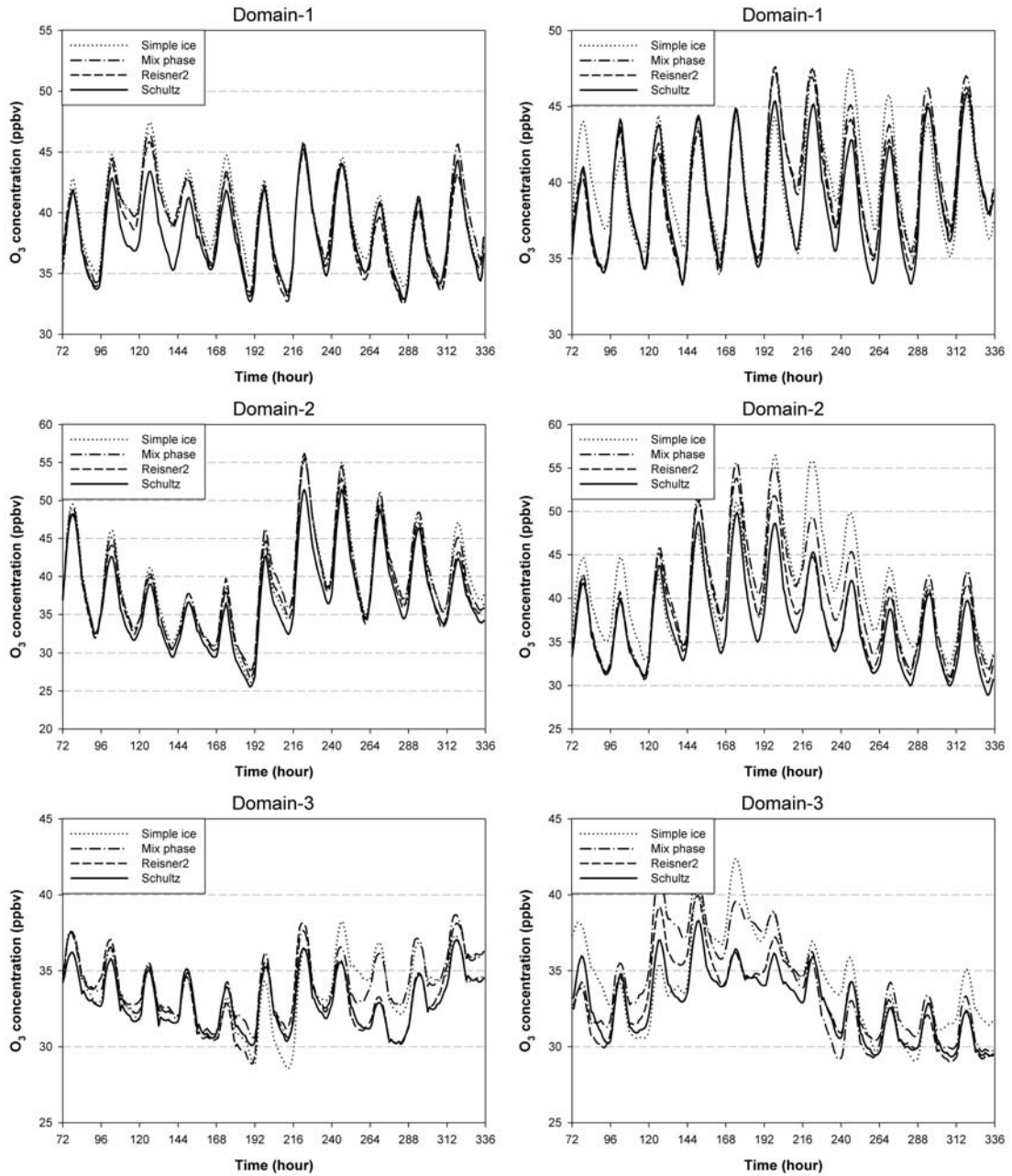


Fig. 14. Time series of domain averaged O₃ concentration arising from employing different microphysics schemes for O₃ case 1 (left), O₃ case 2 (right).

시하였듯 오존에 지속적인 영향을 주기 어려운 강수의 특성과 더불어 다량의 강수 조건에서 고농도 오존이 나타나기 어렵기 때문인 것으로 사료된다.

그림 15는 미세물리방안 간 정량적인 비교를 위해 각 방안별 앙상블 도메인 평균 오존 농도를 Box plot의 형태로 표현한 것으로, 분석 수행 기간(264시간)

Table 5. Domain averaged O₃ concentrations for each microphysics scheme. (unit: ppbv)

		Simple	Mix	Reisner2	Schultz
O ₃ case1	Domain-1	39.4	39.0	38.6	38.1
	Domain-2	39.3	39.3	38.6	37.3
	Domain-3	33.6	34.0	33.4	33.0
O ₃ case2	Domain-1	40.1	39.9	39.6	39.1
	Domain-2	40.8	40.1	38.6	37.1
	Domain-3	34.4	34.1	33.2	32.8

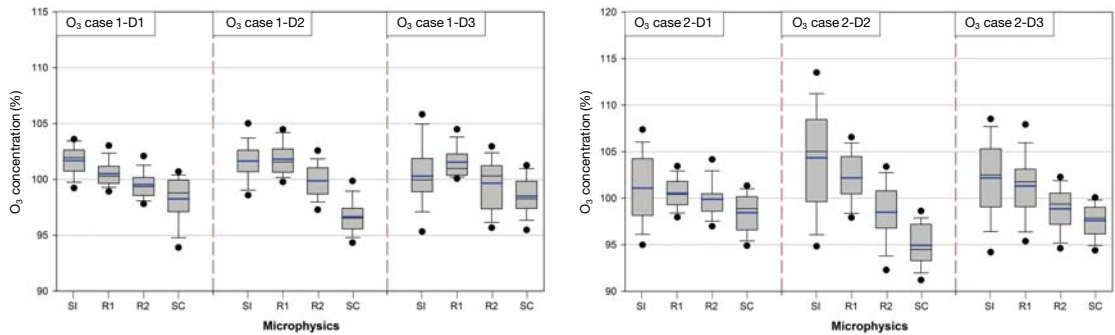


Fig. 15. Box plot of O₃ concentrations in accordance with different microphysics over each of the three subdivided domains.

동안 미세물리방안에 의해 모의된 시간평균 오존 농도와 시간별 앙상블 평균 오존 농도의 편차를 나타낸다. 역시 CPS와 동일한 분석 방법으로 앙상블 평균 농도를 100%로 잡고 표준화함으로써 기상요소에 의한 영향을 집중적으로 살펴보았다. 그 결과 Domain-3에서 집중적인 차이를 보였던 CPS와는 달리 미세물리방안 간 비교에서는 각 도메인에서 대체로 유사한 차이를 보였다. 방안별로 세부적으로 비교해 보면, Simple ice 방안을 적용한 경우 전체적으로 오존 농도가 높고 그 고농도 범위도 공간적으로 넓게 분포함으로써 다른 미세물리방안에 비해 시간에 따른 변동성이 크게 나타났다. 이와 정 반대로 Schultz 방안은 모든 사례에서 매우 낮은 농도를 모의했을 뿐만 아니라 95퍼센타일 값이 앙상블 평균 100% 이하로 나타나 모델링이 수행된 다른 미세물리방안보다 매 시간 낮은 농도를 모의하였음을 확인하였다.

미세물리방안에 의해 영향을 받은 오존과 강수 및 운량의 상관관계를 분석하기 위해 CPS 민감도 실험과 동일한 상관분석을 진행하였다(그림 16). 해당 그래프는 특정 미세물리방안을 적용하였을 때의 값과

미세물리방안 앙상블 평균과의 차이를 시간 및 도메인별 공간 평균을 취한 뒤 이를 백분율로 환산하여 분포도로 나타내었으며, 이로부터 회귀선 및 상관계수를 계산하였다. 그 결과 오존-운량 간 분포도(그림의 왼쪽)에서 상관계수는 -0.78 로 CPS에 따른 오존-운량과의 상관계수(-0.85)보다는 작으나 뚜렷한 음의 상관관계를 보였다. 특히 Schultz 방안은 모든 사례의 도메인에서 평균보다 10~40% 가량 많은 운량을 모의하였고 오존은 -5% 내외의 농도 차이를 모의하여 다른 미세물리방안 및 CPS에 비해 상관관계가 가장 뚜렷하였다. 또한 본 실험에서 Schultz를 미세물리방안으로 선정하고, 모든 CPS를 적용해 본 결과(그림으로 제시하지는 않음), Schultz를 미세물리방안으로 선정한 경우 어떠한 CPS를 선택하던 운량이 오존에 미치는 영향은 제일 크게 나타났다. 반면 오존-강수와의 차이 분포도(그림의 오른쪽)에서는 상관계수가 0.12 로 나타나 앞선 공간분포와 함께 분석한 결과 강수에 의한 오존 wash-out 효과의 차이는 상대적으로 미약한 결과를 보였다. 이는 CPS 결과와 마찬가지로 오존 생성 메커니즘으로 볼 때 매우 강

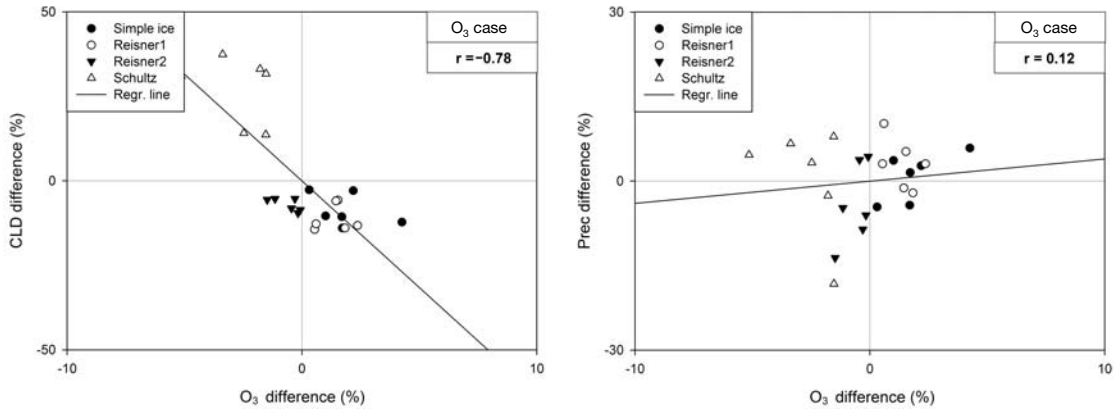


Fig. 16. Scatter diagram of subdivided-domain averaged O₃ concentration differences with regression line against the deviations of cloud fraction (left), and precipitation (right) for all of microphysics schemes.

한 강수사례의 경우 광화학 반응이 아예 작동하지 못하고, 그 결과 낮은 오존 농도로 인해 wash-out 효율 또한 낮은 것으로 해석된다.

일반적으로 강한 적운이 존재하는 조건에서 강수가 발생하므로 강한 강수가 모의된 경우 적운에 의한 복사 차단 효과로 오존 생성이 억제되어 강수와 오존 간에 음의 상관관계가 나타날 가능성도 고려할 수 있으나, 운량은 비강수성 대류운을 포함한 지표로서 많은 운량이 강한 강수 조건을 의미한다고 보기는 어렵다. 또한 대기 중의 수분을 수증기, 구름물, 빙정, 비, 눈 등으로 분류하는 미세물리과정의 특성 상 강한 강수는 구름 수분량의 감소로 연결될 수 있으므로 운량과 강수의 명확한 상관관계를 정의하기에는 무리가 있다. 본 연구의 미세물리방안에 따른 운량 및 강수의 공간분포 차이(그림 12 및 그림 13)에서도 운량과 강수의 관계가 불분명함을 확인할 수 있다. 이에 CPS와 마찬가지로 미세물리방안에 따라 모의된 기온, 혼합비, 대기경계층 높이, 건성침적량을 분석하였으나 모두 오존과는 상이한 분포를 보여 이에 의한 오존 조절 효과는 낮은 것으로 나타났다(그림으로 제시하지 않음). 이는 Schultz 방안이 운량을 매우 크게 모의함에 따라 CPS보다 미세물리방안 간의 일사량 차이가 두드러져 이에 의한 광화학 반응의 조절 효과가 다른 조절 효과에 비해 지배적으로 나타났기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 2006~2007년간 서울, 인천, 수원의 대기오염측정망 자료를 이용하여 고농도 오존 사례일을 택하고 그 중에서 HYSPLIT 모델로 역제적을 분석하여 오존의 장거리 수송 사례를 선정하였다. 총 선정된 2개의 사례에서 적운 모수화 및 미세물리과정에 의한 기상요소의 차이와 오존분포의 차이를 분석하였다. 기상장 모델은 MM5 v3.7.을, 대기질 모델은 CMAQ v4.6을 이용하였다. 기상장 모델인 MM5에서 적운 모수화 방안은 BM, GR, KF2, AK, None을 선택하였으며 미세물리방안은 Simple ice, Reisner-1, Reisner-2, Schultz을 선택하여 각 사례별로 14일간(총 336시간) 모델링을 수행 후 각 모의된 기상요소와 오존의 민감도를 파악하고자 하였다.

그 결과 동북아 지역에서 한반도로 장거리 이동되는 고농도 오존 사례는 CPS 중 GR, KF2 방안이 양상블 평균한 결과에 제일 가깝고, 상대적으로 변동성이 적고 안정한 특성을 보였다. 전반적으로 CPS 민감도 실험을 통해 시간, 도메인, 적운 모수화 방안에 따라 최대 10% 이상 차이가 나타났으며 특히 화남 지방 및 태평양에서 BM 또는 AK를 사용했을 때 두드러진 차이를 보였다. 주요 기상인자인 운량과 강수는 모두 적운 모수화 방안에 따라 크게 영향을 받았으나(특히 강수) 오존 농도와 비교해 볼 때 운량이

많은 지역은 오존이 적게 모의되며 온량이 적을수록 오존은 크게 모의되는 강한 음의 상관관계가 분명하였다. 반면 강수는 지역별 차이가 많았고 특히 태평양과 화남지방에서 방안별 차이가 매우 두드러졌으나, 공간분포가 오존과 상이할 뿐만 아니라 오존-강수의 상관관계는 낮게 모의되어 습성침적에 의한 오존의 민감도는 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 구름에 의한 단파 복사 차폐 효과는 꾸준히 나타날 수 있지만 강수에 의한 wash-out 효과는 강한 강수일에 오존 농도가 있을 때 초기에 일시적으로 소멸될 수 있기 때문으로 사료된다. 따라서 강한 강수 사례의 경우 다량의 오존이 존재하기 어려워 습성침적 효율이 낮은 것으로 추론할 수 있다. 지역적으로는 수분량이 많은 태평양 및 화남지역에서 오존 농도 및 기상요소의 차이가 크게 나타났으며 이는 수분이 많은 조건에서 CPS의 민감도가 높음을 시사한다.

미세물리과정은 중국내륙에서 오존 농도 차이가 두드러졌으며 도메인에 상관없이 방안별로 모두 유사한 분포를 보였다. 각 방안 중 Reisner-1과 Reisner-2는 전 영역에서 양상을 평균에 견주어서 상대적으로 안정한 경향을 보였다. Simple ice 방안은 적용하였을 경우 평균 농도와 비교하여 시간에 따른 농도 변동 폭이 크게 나타난 반면, Schultz 방안은 대부분의 모델링 수행 기간 중 타 방안에 비해 낮은 농도를 모의하여 최대 10% 이상의 차이를 보여 특이할 만하였다. 이는 해당 방안이 온량을 매우 크게 모의함에 따라 단파 복사에 의한 오존 생성을 제일 크게 억제함으로써 나타난 현상으로서, 타 방안 또한 오존과 온량 간에 음의 상관관계가 있음을 확인하였다.

본 연구는 비록 제한된 사례에 불과하지만 결국 MM5-CMAQ을 이용한 동북아 장거리 수송 사례의 오염 물질 모의에 있어 CPS와 미세물리과정을 선정할 경우 이상의 결과를 충분히 고려되어야 할 것으로 판단된다. 특히 미세물리방안 중 Schultz 방안은 매우 극단적인 온량을 보여서, 오존 농도를 크게 조절하는 것으로 판단되어 보다 다양한 사례 연구를 통해 그 차이를 유발하는 연구를 추가적으로 연구할 필요가 있을 것으로 판단된다. 아울러 본 연구에서 제외된 적운모수화방안 및 미세물리방안 또한 사례 연구가 필요할 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 본 연구 결과에 나타난 방안별 모의 결과를 통해 몇 가지 기상변수의 변동과 광화학 특성과의 연관성을

파악할 수 있었으며, 이는 동북아시아에서 각 방안별 변동성의 정도를 정성적으로 파악하는 데 도움이 될 것으로 판단되며, 나아가 구름 및 강수과정의 민감도에 대한 기본적인 결과와 기초 자료를 제공했다는 차원에서 의의가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다. 본 논문을 세심하게 심사해 주신 심사위원분들께 감사드립니다.

참고 문헌

- Anthes, R.A. (1977) A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model, *Monthly Weather Review*, 105, 270-286.
- Arakawa, A. (2004) The Cumulus Parameterization Problem: Past, Present, and Future. *Journal of Climate*, 17, 2493-2525.
- Betts, A.K. and M.J. Miller (1986) A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX, and Arctic air-mass data sets, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112, 693-709.
- Cotton, W.R. and R.A. Anthes (1990) Storm and cloud dynamics. Academic press, Inc.
- Dudhia, J. (1989) Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *Journal of Atmospheric Science*, 46, 3077-3107.
- Dudhia, J. (2005) Chapter 8: Part II: Physics Options in MM5, NCAR.
- Giorgi, F. and C. Shields (1999) Tests of precipitation parameterizations available in latest version of NCAR regional climate model (RegCM) over continental United States, *Journal of Geophysical Research*, 104, 6353-6375.
- Gochis, D.J., W.J. Shuttleworth, and Z.-L. Yang (2002) Sensitivity of the modeled North America monsoon regional climate to convective parameterization, *Monthly Weather Review*, 130, 1282-1298.
- Grell, G.A., J. Dudhia, and D.R. Stauffer (1994) A Description of the Fifth Generation Pen State/NCAR Mesoscale

- Model, NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research, 122.
- Kain, J.S. (2004) The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43, 170-181.
- Kang, H.-S. and S.-Y. Hong (2008) Sensitivity of the simulated East Asian summer monsoon climatology to four convective parameterization schemes, *Journal of Geophysics Research*, 113, D15119, doi:10.1029/2007JD009692.
- Kim, H.-R., Y.-J. Kim, and C.-H. Kim (2011) Effects of convective parameterization schemes on estimation of the annual wet deposition over Northeast Asia, *Atmospheric Environment*, 45, 727-735.
- Kuo, H.L. (1974) Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow, *Journal of Atmospheric Science*, 31, 1232-1240.
- Lee, J.-B. and D.-K. Lee (2011) Impact of Cumulus Parameterization Schemes with Different Horizontal Grid Sizes on Prediction of Heavy Rainfall, *Atmosphere*, 21(4), 391-404. (in Korean with English abstract)
- Liang, X.-Z., M. Xu, K.E. Kunkel, G.A. Grell, and J.S. Kain (2007) Regional Climate Model Simulation of U.S.-Mexico Summer Precipitation Using the Optimal Ensemble of Two Cumulus Parameterizations, *Journal of Climate*, 20, 5201-5207.
- Bhanu Kumar, O.S.R.U., S.R. Rao, and K.M. Krishna (2007) Role of cumulus parameterization schemes in simulating heavy rainfall episodes off the coast of Maharashtra state during 28 June-4 July 2007, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 105(3), 167-179.
- Queen, A.N., Y. Zhang, R. Gilliamb, and J. Pleim (2008) Examining the sensitivity of MM5-CMAQ predictions to explicit microphysics schemes and horizontal grid resolutions, Part I-Database, evaluation protocol, and precipitation predictions, *Atmospheric Environment*, 42, 3842-3855.
- Reisner, J., R.T. Bruintjes, and R.M. Rasmussen (1993) Preliminary comparisons between MM5 NCAR/Penn State model generated icing forecasts and observations. Preprints, the Fifth International Conference on Aviation Weather Systems, Vienna, VA, 2-6 August, 5pp.
- Reisner, J., R.M. Rasmussen, and R.T. Bruintjes (1998) Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142, 1071-1107.
- Schultz, P. (1995) An explicit cloud physics parameterization for operational numerical weather Prediction, *Monthly Weather Review*, 123, 3331-3343.
- Seol, K.-H. and S.-Y. Hong (2006) Effects of Physical Parameterizations on the Simulation of a Snowfall Event over Korea Caused by Air-mass Transformation, *Atmosphere*, 16(3), 203-213. (in Korean with English abstract)
- Stoelinga, M.T., P.V. Hobbs, C.F. Mass, and J.D. Locatelli (2003) Improvement of microphysical parameterization through observational verification experiment, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84, 1807-1826.
- Tao, Z., A. Williams, H.-C. Huang, M. Caughey, and X.-Z. Liang (2008) Sensitivity of Surface Ozone Simulation to Cumulus Parameterization, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 1456-1466.
- Wang, H., M. Zhang, and M. Liu (2006) Influence of Moist Schemes in MM5 on the Uncertainties of "03·7" Heavy Rainfall Numerical simulation, *Journal of Applied Meteorological Science*, 17(3), 346-353.
- Wang, W. and N.L. Seaman (1997) A comparison study of convective parameterization schemes in a mesoscale model, *Monthly Weather Review*, 125, 252-278.
- Warner, T.T., R.A. Peterson, and R.E. Treadon (1997) A tutorial on lateral boundary conditions as a basic and potentially serious limitation to regional numerical weather prediction, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2599-2617.
- Zhang, Q., D.G. Streets, G.R. Carmichael, K.B. He, H. Huo, A. Kannari, Z. Klimont, I.S. Park, S. Reddy, J.S. Fu, D. Chen, L. Duan, Y. Lei, L.T. Wang, and Z.L. Yao (2009) Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Journal of Atmospheric Chemistry Physics*, 9, 5131-5153.