

겨울철 황사 모의시 황사배출량 산정식과 입력자료의 평가: 2007년 12월 29일 황사사례 연구

Estimation of Dust Emission Schemes and Input Parameters in Wintertime Asian Dust Simulation: A Case Study of Winter Dust Event on December 29, 2007

강 정 윤^{1),2)} · 김 상 우¹⁾ · 윤 순 창^{1),*}

¹⁾서울대학교 지구환경과학부, ²⁾일본 기상연구소

(2011년 5월 30일 접수, 2011년 12월 16일 수정, 2012년 1월 11일 채택)

Jung-Yoon Kang^{1),2)}, Sang-Woo Kim¹⁾ and Soon-Chang Yoon^{1),*}

¹⁾*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University*

²⁾*Meteorological Research Institute, Japan*

(Received 30 May 2011, revised 16 December 2011, accepted 11 January 2012)

Abstract

A case study was conducted for a severe wintertime dust event that occurred on December 29, 2007 in Korea. Three different dust emission schemes, namely, those of Marticorena and Bergametti (1995), Lu and Shao (1999), and Shao (2004) (hereinafter, referred to MB, LS, and S04 schemes, respectively) were implemented in Weather Research Forecast with Chemistry (WRF/Chem) to assess their performance in simulating wintertime Asian dust events. WRF/Chem simulation reproduces dust emission over Mongolia on December 27 and 28, 2007 and the onset timing of the dust event in Korea well. There is, however, a huge difference among the estimated dust emission amounts for the three schemes; the dust concentration derived by MB scheme is 6 times larger than that from LS scheme. The three schemes overestimate dust concentrations when comparing to observed surface-level PM₁₀ mass concentrations in Ganghwa, Seoul, and Yeongwol. This discrepancy is thought to be mainly due to the overestimated model winds and the surface condition such as snow cover fraction, which did not adequately represent the real conditions. Considering frozen soil effect on dust emission, the model results are comparable with observation data: it is important to consider frozen soil in simulating wintertime dust events.

Key words : Wintertime Asian dust, WRF/Chem, Dust emission schemes, Frozen soil effect

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)2-880-6717, E-mail : yoon@snu.ac.kr

1. 서 론

중국 대륙의 풍하측에 위치한 우리나라는 중국의 사막, 건조 지역에서 발생하여 이동해오는 황사의 영향을 받는다 (Kim *et al.*, 2008; Chun *et al.*, 2000). 그림 1은 최근 10년간 서울에서 관측된 황사 일수를 봄철(3, 4, 5월)과 겨울철(1, 2, 12월)로 구분하여 그린 것으로, 황사 관측 일수는 주로 봄철에 집중되어 있지만, 겨울철에도 빈번히 발생하고 있음을 확인할 수 있다 (Kim *et al.*, 2010, 2008; Kim and Park, 2001; Chun *et al.*, 2000). 일반적으로 겨울철에 발생하여 우리나라에 영향을 주는 황사의 경우, 빠른 중관 흐름으로 인해 봄철 황사에 비해 황사의 농도가 낮고 지속시간이 짧지만, 1999년 1월에 발생한 황사와 같이 고농도의 황사가 발생하기도 한다 (Kim and Park, 2001). 기존 동아시아 황사농도 예측 모의실험의 경우, 황사가 빈번히 관측되는 봄철 사례에만 집중되어 있으나 (Lee and Park, 2005; Park and In, 2003; In and Park, 2002; Uno *et al.*, 2001), 겨울철의 경우, 봄철과 비교하여 눈 덮임, 식생 등 황사발원지의 지표면 조건 (surface condition)에 큰 차이가 존재하기 때문에 이러한 지표면 성질 하에서 황사농도를 예측하는 모의실험이 필요하다.

현재, 여러 황사농도 예측 모델에서 황사배출량을 산정하기 위해 실험/관측에 기반한 경험식, 물리적 개념을 도입한 식 등이 다양하게 개발되어 사용되고 있으며, 황사배출량의 불확실성을 줄이기 위해서는 황사배출량 산정식 간의 비교가 필요하다. 이런 필요

성에 입각하여 Uno *et al.* (2006)은 서로 다른 황사배출량 산정식을 적용한 황사농도 예측 모델의 비교 연구를 수행하였으며, 모델 상호간의 황사배출량 차이는 2~4배 가량으로 보고하였다. 하지만, Uno *et al.* (2006)의 비교 연구에서는 황사배출량 산정식뿐만 아니라, 모델별로 사용된 기상자료, 지표면 자료, 해상도 등이 서로 달라 모델간의 황사배출량 산정에 대한 직접 비교가 어려웠다.

본 연구에서는 겨울철 고농도 황사사례 (2007년 12월 29일)를 선정하여 세 가지 황사배출량 산정식을 접합한 WRF/Chem 모델을 이용하여 동일한 기상 및 지표 자료 그리고 모델 해상도 조건하에서 모의를 수행하였다. 이를 통해 황사배출량 모수화 식과 사용된 모델 입력 자료 (예, 황사발원지의 지표면 특성)가 황사 발생량에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 겨울 황사 사례 선정

본 연구에서는 12월에 이례적으로 황사주의보(1시간 평균 미세먼지농도 $400 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상)가 발령되었던 2007년 12월 29일을 겨울철 고농도 황사 사례로 정하였다. 12월 28일 몽골 지역에 위치한 저기압의 강한 바람에 의해 내몽골과 만주 지역에서 황사가 발생된 후, 이는 저기압의 이동과 함께 한반도로 수송되어 12월 29일 우리나라에 영향을 미쳤다. 12월 29일 오전 10시쯤 서울, 인천, 경기도 지방에 황사주의보가 발령되

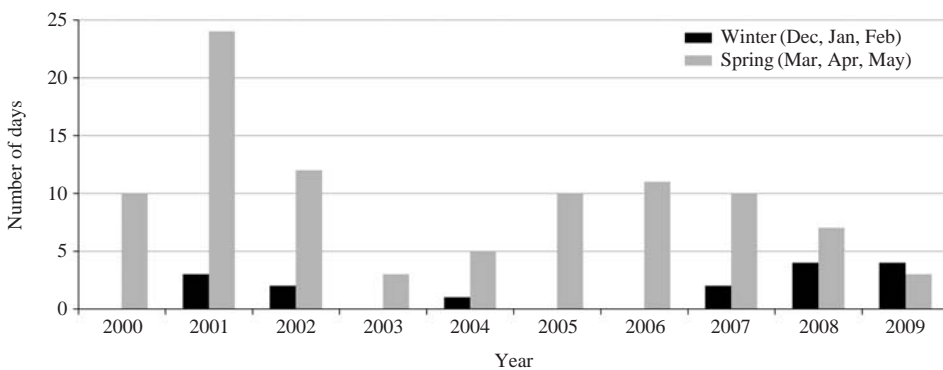


Fig. 1. The number of dust event days occurred in Seoul for the last 10 years (Source: Korea Meteorological Administration).

있으며, 오후 2시에는 PM₁₀ 농도가 강화와 관악산 측정소에서 626 μg m⁻³과 499 μg m⁻³가 관측되는 등 겨울 황사로는 이례적인 강한 황사였다.

2.2 WRF/Chem 모델과 황사배출량 산정식 접합

WRF/Chem은 차세대 기상모델로 각광받는 WRF

에 화학 모듈이 추가된 모델이다. 이 모델에 현재 여러 황사농도 예측 모델에서 널리 사용되고 있는 세가지의 황사배출량 산정식들 (Shao, 2004; Lu and Shao, 1999; Marticorena and Bergametti, 1995)을 접합하여 위에서 언급한 겨울 황사 사례를 모의하였다. 그림 2는 본 연구에 사용된 여러 모수화 식들을 정리하여 나타낸 것이다.

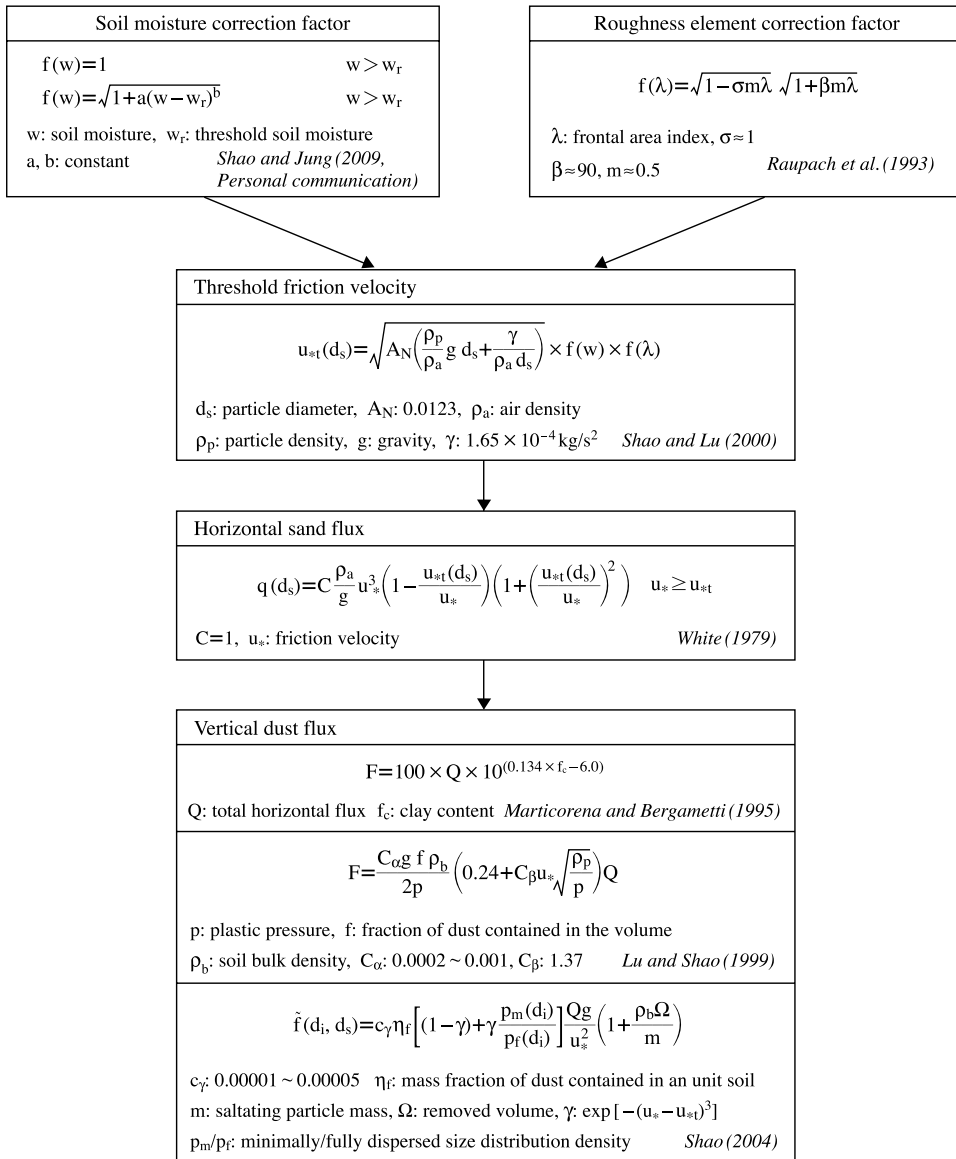


Fig. 2. Flow chart of dust emission calculation.

Table 1. Characteristics of three dust emission schemes.

Scheme	Feature	Strength	Weakness	Remark
MB	Empirically-derived scheme	Simple	Not applicable to soils that have more than 20% clay	Derived by using Saharan desert data
LS	Physically-based scheme	Has physical meaning	Complex and Requiring many information	Considering saltation bombardment
S04	Physically-based scheme	Has physical meaning	Complex and Requiring many information	Considering saltation bombardment+ aggregate disintegration

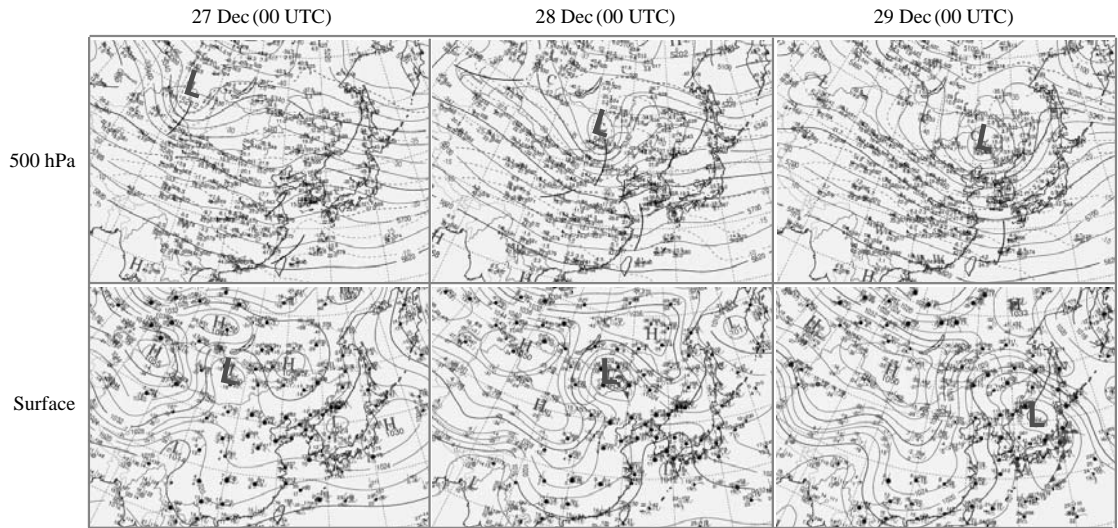


Fig. 3. Weather maps on the surface and 500 hPa during December 27 ~ 29, 2007.

황사가 배출되기 위해서는, 바람이 입자가 움직일 때 필요한 최소한의 값(임계마찰속도, threshold friction velocity, u_{*c})보다 커야 하며, 토양에 수분이 있거나 식생 등이 분포하게 되면 임계마찰속도 값에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 임계마찰속도 계산에 Shao and Lu (2000)에 제시된 방법을 이용하였으며, 토양 수분과 식생 등의 효과를 포함하기 위해 토양 수분 보정 상수(soil moisture correction factor, $f(w)$: Shao and Jung, 2009; Fécan *et al.*, 1999, private communication)와 거칠기 요소(roughness element)에 의한 보정 상수(roughness element correction factor, $f(\lambda)$: Raupach *et al.*, 1993)를 고려하였다. 작은 황사 입자들은 보통 다른 큰 모래 입자들에 붙어있거나 뭉쳐있기 때문에 연직으로 배출되기 위해서는 입자들 간의 결속력(binding energy)보다 큰 힘이 가해져야 한다. 즉, 바람에 의해 수평으로 구르는 모래 입자가 땅

에 부딪힐 때 전달되는 힘이 결속력보다 클 때 황사 입자가 연직으로 배출되게 된다. 황사의 연직 배출량은 수평으로 구르는 모래 입자의 양(수평 모래속, Horizontal sand flux, Q)에 비례하게 되며, 이 계산에는 White (1979)가 제시한 식을 사용하였다. 그림 2에 나타난 바와 같이, 본 연구에서는 수평 모래속 계산 과정까지는 모두 동일하나, 이후 연직 황사배출량(vertical dust flux, F) 계산은 기존 문헌에 제시된 세 가지 서로 다른 식을 사용하였다.

- (1) 관측 자료를 이용하여 수평 모래속과 연직 황사 배출량 사이의 비례 관계식을 점토 함유량(clay content)으로 표현한 Marticorena and Bergametti (1995)(이하, MB로 표시),
- (2) 큰 입자가 바람에 의해 구르면서 파인(도약입자에 의한 충격 과정: saltating bombardment 과정)

땅의 부피를 고려하여 황사배출량을 나타낸 Lu and Shao (1999) (이하, LS로 표시),

(3) Lu and Shao (1999)가 고려한 saltating bombardment 과정에 모래, 작은 입자 등의 혼합재 (aggregate)가 바람에 의해 구르면서 깨어져서 (aggregate disintegration 과정) 발생하는 황사배출량까지 함께 모수화 한 Shao (2004) (이하, S04로 표시)

위의 세 가지 황사배출량 산정식의 특성 및 장단점을 표 1에 정리하였다.

한편, 황사배출량 계산에 필요한 마찰속도 (friction velocity, u_*), 토양 수분, 식생 피복 지수 (vegetation cover) 등은 WRF/Chem 모델이 제공하는 값을 그대로 이용하였다.

2.3 모델 환경 설정

황사배출량 산정식을 접합한 WRF/Chem 모델을 이용하여 2007년 12월 29일 관측된 겨울 황사 사례 모의를 위해, 동아시아 지역을 모의 영역으로 설정하고 30 km 간격의 가로 150, 세로 100개의 격자에 대해 2007년 12월 25일 00 UTC부터 30일 00 UTC까지 5일간 모의하였다.

3. 2007년 12월 29일 황사 사례 분석 결과

3.1 종관 기상 특징과 황사 발생 모의

2007년 12월 29일에 우리나라에 관측된 황사는

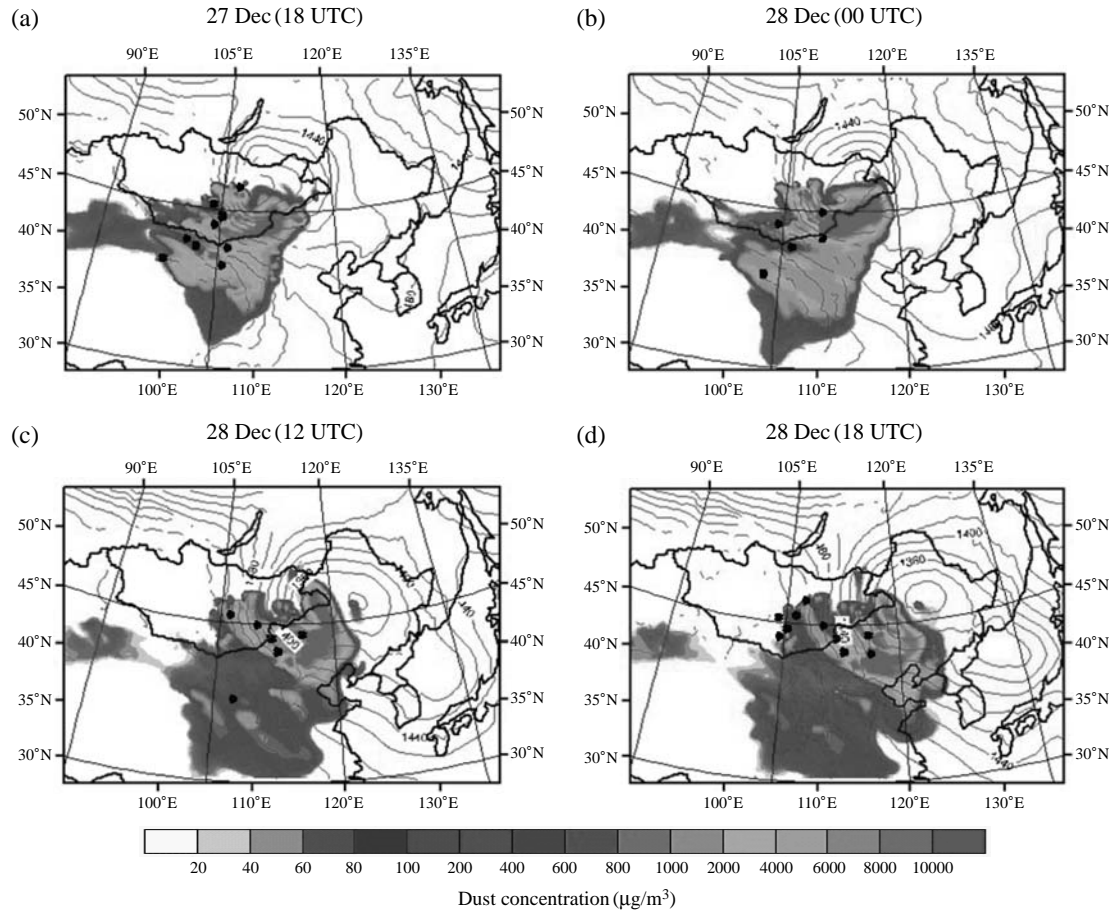


Fig. 4. Dust mass concentration for the lowest layer derived from S04 scheme. The SYNOP weather reports related with dust phenomena (black dot) and geopotential height (red contour) at 850 hPa are superimposed.

12월 27일과 28일에 걸쳐 몽골 지역에 존재하는 저기압과 뒤따르는 고기압 사이의 강한 기압 경도력으로 인해 발생하였으며, 저기압의 이동과 함께 우리나라로 수송되어 왔다. 그림 3은 기상청에서 제공하는 일기도로, 상층(500 hPa)의 기압골과 지표면의 저기압이 존재하고 있으며 등압선이 저기압 후면에 조밀하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 모델의 황사 모의가 실제 관측과 일치하는지 확인하기 위해 황사가 관측된 지점(중관기상코드 ww=7~9, 30~35)을 모델 농도 결과와 함께 그림 4에 나타내었다. 그림 4에는 S04 스킴을 통해 산출된 모델 최하층의 황사 농도를 표시하였으며, 모델의 850 hPa의 지오폠펀셜 고도도 함께 나타내었다. 지오폠펀셜 고도의 등고선으로부터 몽골의 동북쪽 지역의 저기압 존재를 확인할 수 있으며, 저기압의 남쪽 후면에 황사 먼지가 나타나고 있다. 황사 중관기상코드를 나타내는 지역이 대부분 모델의 황사 농도 지역에 포함되는 것으로 보아 모델의 황사 모의가 실제 황사 사례와 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2 황사 배출 스킴간의 차이

그림 5는 본 연구에 사용된 세 가지 스킴별 황사 배출량 결과를 황사 발원지부분을 확대하여 그린 것이다. 수평 모래속은 그림 2에서 설명한 바와 같이, 동일하게 계산이 되었기 때문에, MB, LS, S04의 황사 배출 지역은 모두 같지만, 그 양에 있어서는 차이가 크다. 관측 자료를 이용하여 경험적으로 도출된 MB 스킴이 가장 많은 황사배출량을 모의하고 있으며, 황사 발생의 물리적 과정을 고려하는 LS 스킴과 S04 스킴은 saltating bombardment 과정에서 비슷한 모수화를 사용하기 때문에 비슷한 황사배출량을 모의하고 있다. 비록 차이가 작기는 하지만 S04가 LS 보다 많은 황사배출량을 보이는데, 이는 LS 스킴에서는 고려하지 않는 aggregate disintegration 과정이 S04 스킴에는 포함되어 있기 때문이다.

3.3 관측과의 비교검증 및 모델 입력 자료의 영향 분석

WRF/Chem 모델에 접합하였던 세 가지 황사배출

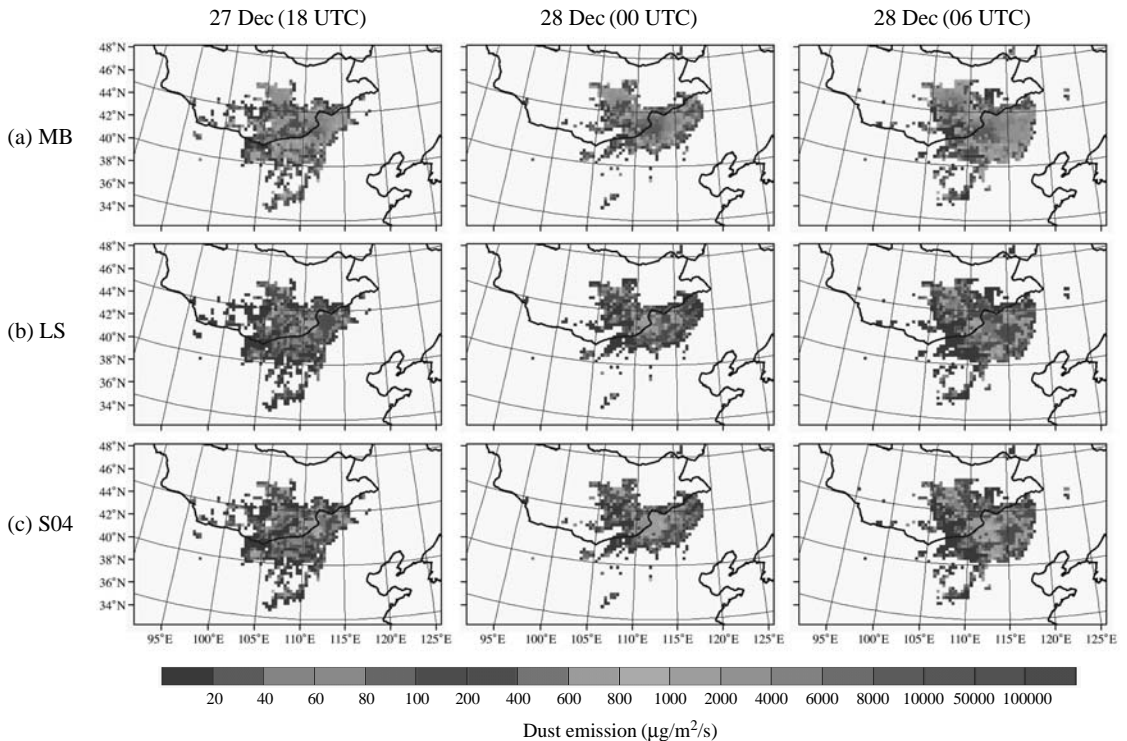


Fig. 5. Dust emission derived by (a) MB, (b) LS, and (c) S04 schemes for the period of December 27~28, 2007.

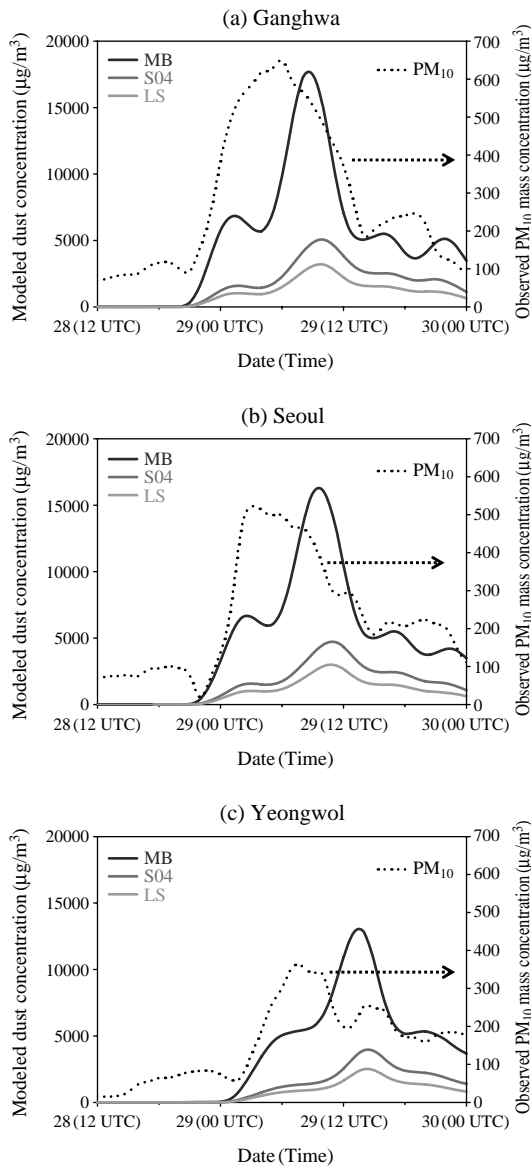


Fig. 6. Comparison between modeled dust mass concentration (solid line) for MB, LS, and S04 schemes and observed PM₁₀ data (dotted line) in (a) Ganghwa, (b) Seoul, and (c) Yeongwol. Noted that the y-axis for modeled dust mass concentration is left and the y-axis for observed PM₁₀ mass concentration is right.

량 산정식의 모의 정도를 관측과 비교 검증하기 위해 강화, 서울, 영월에서의 모델 황사 농도의 시계열

과 기상청의 관측 PM₁₀ 농도의 시계열을 그림 6에 함께 나타내었다. 관측 자료와 비교하기 위해서 모델 최하층의 입자 크기가 10µm 이하인 황사 농도를 사용하였다. 황사 발원지에서 멀어질수록 모의되는 황사 농도가 줄어들며 황사 현상이 발생하는 시점도 늦어짐을 확인할 수 있다. 이렇듯 황사가 각 측정소에서 관측되는 시작 시점을 모델이 일관되게 잘 모의하고 있으나, 모의된 황사 농도는 관측 농도와 차이가 매우 크다. 모델에서 모의한 황사 농도는 왼쪽 y축 눈금이며, 관측 PM₁₀ 농도는 오른쪽 y축 눈금으로 표시하였다. 그림 5에서 확인한 바와 같이 MB 스킴이 황사발원지에서 가장 많은 황사배출량을 모의하였고, 따라서 한반도로 수송되어 오는 황사의 농도도 가장 크게 나타난다. MB 스킴으로부터 모의된 황사 농도는 LS 스킴으로부터 모의된 황사 농도의 6배 정도 되며, S04 스킴의 황사 농도는 LS 스킴의 황사 농도의 1.5배 정도의 결과를 보였다. 표 1에서 비교한 바와 같이, MB 스킴은 사하라 사막의 관측 데이터를 사용하여 경험식을 도출하였는데, 물리적 개념을 바탕으로 한 LS와 S04 스킴보다 훨씬 과대 모의하는 것으로 보아 동아시아에 적합하지 않은 것으로 추정된다. 한편, 세 가지 황사배출량 산정식 중 가장 작은 농도를 보이는 LS 스킴조차 관측 PM₁₀ 농도보다 크게 모의하는 것을 알 수 있다.

3. 3. 1 WRF/Chem의 바람장 모의 정확도

황사배출량의 과대 모의 원인을 확인하기 위해, 모델에서 모의하는 10 m의 바람장과 지상관측자료인 SYNOP 데이터의 바람세기를 비교하였다. 그림 7에 모델의 10m의 바람장을 컨투어로 나타내고, 그 위에 각 관측소가 나타난 바람세기를 색깔등급을 동일하게 하여 표시하였다. 대체적으로 모델에서 모의하고 있는 바람장이 지상관측 바람세기보다 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 모델에서 바람세기가 12 m s⁻¹ 이상인 지역에서 지상관측 바람세기는 그보다 작은 바람세기를 보인다. 이렇게 과대 모의된 바람장은 모델에서 큰 황사 농도를 모의한 원인 중의 하나로 사료된다.

3. 3. 2 적설지역분포 (snow cover) 모의 정확도

황사 모의에서 지표면의 상태 역시 황사배출량에 큰 영향을 미치는데, 특히 겨울철의 경우 황사 발원지에서의 적설 정보가 황사 발생량에 큰 영향을 미친

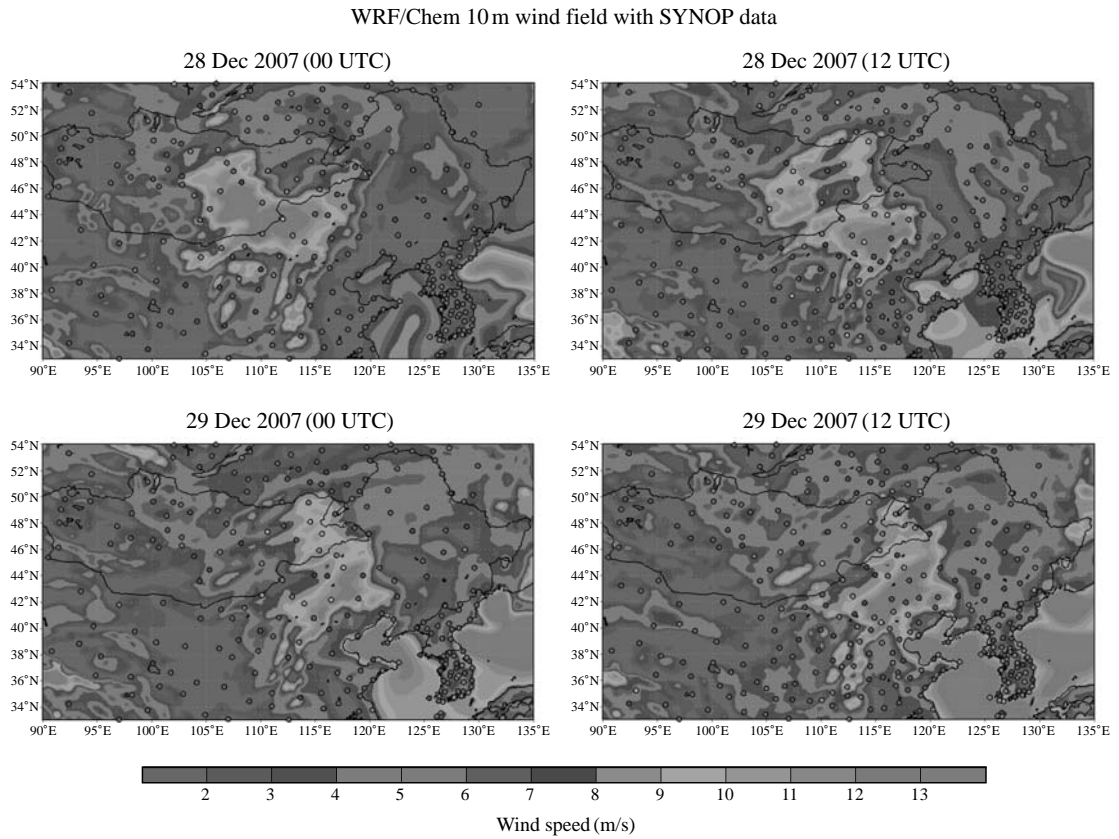


Fig. 7. Comparison of modeled 10 m wind speed with observation wind field (SYNOP data) for the period of December 28~29, 2007. The shading indicates the magnitude of modeled wind speed and the observed wind speeds for each weather station are superimposed as circles filled with the same color scale.

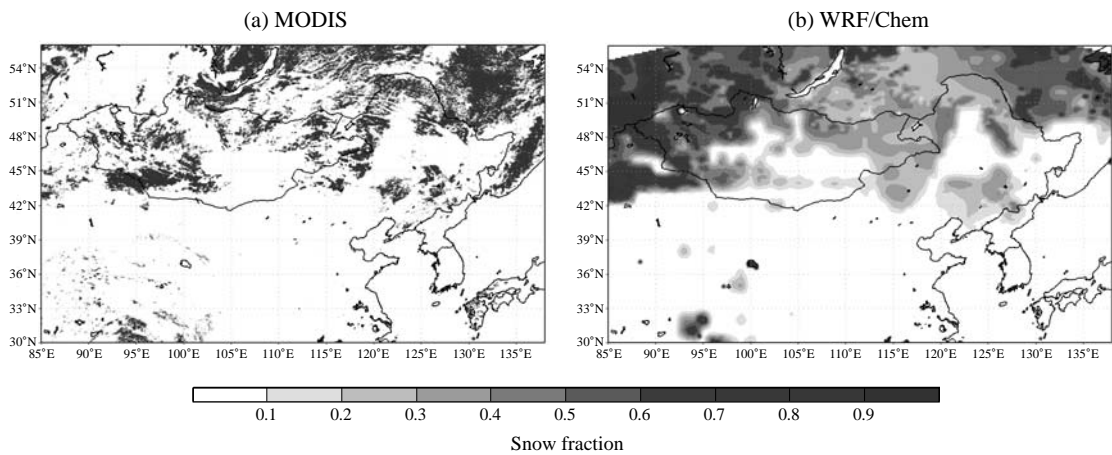


Fig. 8. (a) MODIS snow cover, and (b) WRF/Chem snow cover on December 25, 2007.

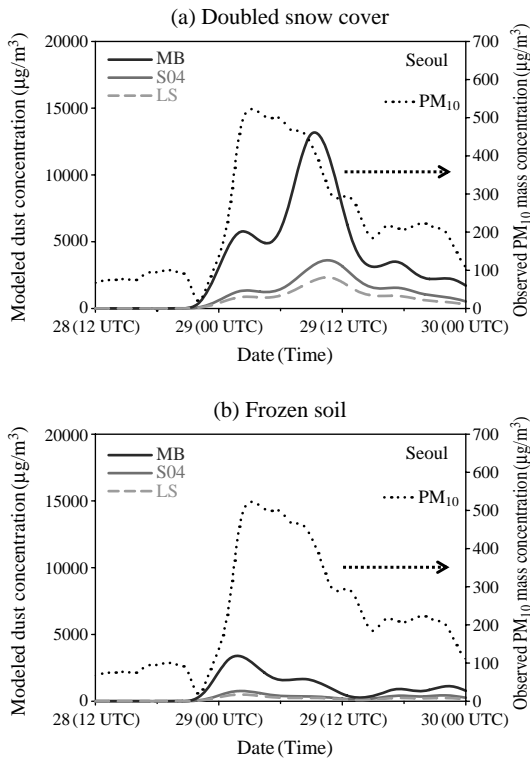


Fig. 9. Comparison of modeled dust mass concentration and observed PM_{10} mass concentration at Seoul for (a) doubled snow cover and (b) frozen soil conditions.

다. 그림 8은 2007년 12월 25일 모델의 적설지역분포와 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)를 통해 관측된 적설지역분포를 비교하여 그린 것이다. 비록, 본 연구에 사용된 모델의 적설지역분포는 MODIS의 적설지역분포와 거의 비슷한 양상을 보이지만, 황사 발원지인 내몽골 동쪽 지역의 모델 적설지역분포값(0.4 이하)이 MODIS로부터 관측된 적설지역분포값(대부분 1)보다 작다. 이러한 적설지역분포 차이가 황사 발생량에 미치는 영향을 살펴보기 위해 모델의 적설지역분포값을 임의로 2배 늘려 모의해 보았다(그림 9(a)). 그림 6(b)의 결과와 비교했을 때, 발생된 황사 농도가 약 30% 정도 감소했음을 확인할 수 있다. 본 사례의 황사 발원지인 내몽골 지역과 몽골의 남부 지역의 적설지역분포값을 실제보다 낮게 모델에서 모의하여, 전체적으로 모델

이 황사 농도를 과대 모의할 가능성도 있을 것으로 판단된다.

3. 3. 3 언 토양의 고려 여부

겨울철의 경우, 황사 발원지의 적설지역분포뿐만 아니라 낮은 온도로 인해 토양이 어는 조건으로 황사 발생이 억제될 가능성이 있다. 언 토양 여부를 판단하기 위해 본 연구에서는 토양의 온도와 수분을 기준으로 삼았다. 토양의 온도는 0°C 이하이며, 토양 수분 기준값을 바꾸어 가면서 모델을 수행하였다. 그림 9(b)에는 토양의 수분이 40% 이상일 때 황사가 발생하지 않도록 하여 모델 수행을 실시한 결과를 나타내었다. 황사 발생량이 언 토양의 조건으로 인해 많이 줄어서, 서울에서 관측된 황사 농도가 언 토양을 고려하지 않았을 때의 약 20% 정도의 값을 보이며, 황사 농도 시계열의 모양도 바뀌었다. 토양이 얼었을 때, 황사가 발생하지 않는 조건을 추가하게 되면, 모델의 과대모의가 줄어들어 관측 결과와 유사해진다. 즉, 겨울철 황사 모의에는 언 토양의 조건이 고려되어야 함을 알 수 있다. 하지만, 토양 수분의 임계값 선정에 따라 그 결과가 많이 달라지므로 정확한 황사배출량의 모의를 위해서는 언 토양에서의 황사 발생과 관련한 관측이 필요하다.

한편, 동일한 수평 모래속, 기상장, 지표자료 조건 하에도 세 가지 황사배출량 산정 스킴이 최대 6배 정도 차이를 나타내는 것은 현재 존재하는 배출량 산정식의 부정확성을 보여준다. MB 스킴은 사하라 사막에서의 관측 자료를 이용하여 황사배출량을 경험식으로 계산했지만 사용된 자료의 수가 너무 작으며, 주로 모래로 이루어진 사하라 사막과는 달리 모래, 자갈, 황토 등으로 이루어진 동아시아의 복잡한 지표 환경 (Park and In, 2003; In and Park, 2002; Chun, 1997) 경험식(MB스킴)을 적용하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다. LS와 S04 스킴은 비록 물리적인 개념을 바탕으로 황사배출량 산정식을 산출하였지만, 지표면 성질과 관련되어 고려해야 할 많은 변수들 때문에 이들의 정확도가 배출량 산출 결과에 크게 영향을 미치게 된다. 보다 정확한 황사배출량 예측을 위해서는, 황사 발원지에서의 다양한 조건하의 관측과 실험을 통해서 배출량 산정식의 개선과 평가가 필요하다.

4. 결 론

황사 주의보가 발령되었던 2007년 12월 29일 겨울 황사 사례를 선정하여, 여러 가지 황사배출량 산정식을 집합한 WRF/Chem 모델을 이용하여 사례 분석을 실시하였다. 사용한 황사배출량 산정식은 Marticorena and Bergametti (1995), Lu and Shao (1999), Shao (2004) (각각 MB, LS, S04로 표시) 스킴으로, 황사배출량을 산정하는데 있어서 각자 다른 접근 방법을 사용하기 때문에 모의 결과는 스킴별로 다르게 나타난다.

모델은 12월 27일과 28일 몽골의 동북쪽 지역의 저기압 남쪽 후면에서 황사 먼지의 발생을 잘 모사하고 있지만, 스킴별 황사배출량은 차이가 커서 MB 스킴이 가장 많은 황사배출량을 나타내며, LS 스킴은 가장 적은 결과를 보인다. 사하라 사막 자료를 바탕으로 경험적으로 만들어진 MB 스킴은 동아시아 황사농도를 예측하는데 적합하지 않은 것으로 추정된다. 강화, 서울, 영월에서의 관측 PM₁₀ 농도와 모델 황사 농도의 시계열을 비교해 보았을 때, 황사 도달 시점은 모델에서 잘 모의하고 있으나, 세 스킴 중 가장 적은 황사배출량을 나타낸 LS 스킴조차도 황사 농도를 과대 모의하고 있음을 확인하였다. 이는 모델에서 바람장을 과대 평가한 것과 황사 발원지의 적설지역분포값과 같은 지표면 정보의 부정확성 때문으로 사료된다. 또한, 언 토양에서 황사 배출이 되지 않는 조건으로 모델을 수행하였더니, 모델의 과대 모의가 확실하게 줄어드는 것을 확인하였으며, 이를 통해 겨울철 황사 모의에는 언 토양의 고려가 필요하다고 생각된다.

바람장의 정확한 모의가 우선되고, 황사 발원지의 지표면 특성과 황사배출량 등의 관측 자료가 있을 때, 관측 자료와 모델 결과의 비교를 통해 스킴의 개선이 가능하며, 정확한 황사배출량을 예측할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2010년도 중견연구자지

원사업-핵심공동)을 받아 수행된 연구임(No.2010-0026794).

참 고 문 헌

- Chun, Y.-S. (1997) Long range transport of yellow sand with special emphasis on the dust rise conditions in the source regions, Ph. D. dissertation, Department of Atmospheric Science, Seoul National University, Korea, 129pp.
- Chun, Y.-S., J. Kim, K.-O. Boo, and N.-O. Kim (2000) The features associated with the yellow sand phenomenon observed in Korea in wintertime, The Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 16(5), 487-497. (in Korean with English abstract)
- Fécan, F., B. Marticorena, and G. Bergametti (1999) Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas, Annales Geophysicae, 17(1), 149-157.
- In, H.-J. and S.-U. Park (2002) A simulation of long-range transport of yellow sand observed in April 1998 in Korea, Atmospheric Environment, 36, 4173-4187.
- Kim, B.-G. and S.-U. Park (2001) Transport and evolution of a winter-time Yellow sand observed in Korea, Atmospheric Environment, 35(18), 3191-3201.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, and J. Kim (2008) Columnar Asian dust particle properties observed by sun/sky radiometers from 2000 to 2006 in Korea, Atmospheric Environment, 42, 492-504.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, J. Kim, J.-Y. Kang, and N. Sugimoto (2010) Asian dust event observed in Seoul, Korea, during 29 ~ 31 May 2008: Analysis of transport and vertical distribution of dust particles from lidar and surface measurements, Science of the Total Environment, 408, 1707-1718.
- Lee, E.-H. and S.-U. Park (2005) A numerical simulation of an Asian dust (Hwangsa) event observed in Korea on March 10 ~ 12, 2004 using the modified ADAM model, Advances in Geosciences, 5, 67-76.
- Lu, H. and Y. Shao (1999) A new model for dust emission by saltation bombardment, Journal of Geophysical Research, 104(D14), 16827-16842.
- Marticorena, B. and G. Bergametti (1995) Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme, Journal of Geophysical Research,

- 100(16), 16415-16430.
- Park, S.-U. and H.-J. In (2003) Parameterization of dust emission for the simulation of the yellow sand (Asian dust) event observed in March 2002 in Korea, *Journal of Geophysical Research*, 108(D19), 4618, doi: 10.1029/2003JD003484.
- Raupach, M., D. Gillette, and J. Leys (1993) The effect of roughness elements on wind erosion threshold, *Journal of Geophysical Research*, 98(D2), 3023-3029.
- Shao, Y. (2004) Simplification of a dust emission scheme and comparison with data, *Journal of Geophysical Research*, 109(D10), D10202.
- Shao, Y. and H. Lu (2000) A simple expression for wind erosion threshold friction velocity, *Journal of Geophysical Research*, 105(D17), 22437-22443.
- Uno, I., H. Amano, S. Emori, K. Kinoshita, I. Matsui, and N. Sugimoto (2001) Trans-Pacific yellow sand transport observed in April 1998: A numerical simulation, *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), 18331.
- Uno, I., Z. Wang, M. Chiba, Y.S. Chun, S.L. Gong, Y. Hara, E. Jung, S.-S. Lee, M. Liu, M. Mikami, S. Music, S. Nickovic, S. Satake, Y. Shao, Z. Song, N. Sugimoto, T. Tanaka, and D.L. Westphal (2006) Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia: Overview, *Journal of Geophysical Research*, 111, D12213. Doi: 10.1029/2005JD006575.
- White, B. (1979) Soil transport by winds on Mars, *Journal of Geophysical Research*, 84(B9), 4643-4651.