

경험식을 이용한 발원지 황사의 시간별 발생량 추정

Estimation of Hourly Emission Flux of Asian Dust Using Empirical Formulas in the Source Area

문 윤 섭* · 이 승 환

한국교원대학교 환경교육학과

(2009년 9월 8일 접수, 2009년 10월 20일 수정, 2009년 11월 23일 채택)

Yun-Seob Moon* and Seong-Hwan Lee

*Department of Environmental Education, Korea National University of Education,
Chung-buk 363-791, Korea*

(Received 8 September 2009, revised 20 October 2009, accepted 23 November 2009)

Abstract

The purpose of this study is to estimate hourly Asian dust emission flux in springtime by using the optimized Weather Research Forecasting model (WRF) in order to accurately predict the horizontal flux of Asian dusts. Asian dust emission flux using 5 empirical formulas such as US EPA, Park and Inn, Wang, The Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport (GOCART) and Dust Entrainment and Deposition (DEAD) were calculated and compared by using classified land-use types and size distribution at various locations in China and Mongolia together with the hourly meteorological elements of the WRF model. As a result, the empirical formula in US EPA among them, which was considered the various conditions such as vegetation, soil type and terrain, was better than the other 4 empirical formulas. However, these formulas were adjusted hourly and vertically in time and space because there was different order and time resolution of dust emissions from original empirical formulas.

Key words : Asian dust emission flux, Weather Research Forecasting model (WRF), Vertical and horizontal flux, Empirical formulas

1. 서 론

황사는 중국 서북 건조지역의 사막과 황토고원뿐만 아니라 우리나라와 상대적으로 가까운 만주에서도 발원한다고 알려져 있다(Jeon *et al.*, 2003). 우리나라

에서 관측되는 황사는 주로 봄철 3~5월에 집중해서 나타나며, 연도별 발생빈도가 다르긴 하지만 중국 내륙 건조지대의 확장으로 인해 그 발생빈도나 강도가 증가하고 있고, 최근에는 가을철에도 황사가 발생하고 있다. 2000년 이후 2003년과 2004년을 제외하고는 매년 10일 이상의 황사가 관측되었고, 특히 2002년과 2006년에는 예전에 찾아볼 수 없었던 강한 황사가 한반도에서 관측되었다.

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)43-230-3769, E-mail : ysmoon@knue.ac.kr

환경과 대기질에 대한 관심이 증대되고, 마스크에 서 황사에보 발표를 비중 있게 다루면서 황사에 대한 관심은 그 어느 때보다 높은 편이다. 생활과 산업 전반에 영향을 주는 황사현상을 분석하고 정확히 예측하기 위한 연구가 다양한 측면에서 수행되어 왔다. 또한 정량적인 황사에보를 실시함에 있어서 황사에보 수치모델을 구축하고, 황사 발원지 기상 및 먼지 발생량 정보의 획득에도 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 사막과 건조지대 등 황사 발원지에 대한 정보가 충분하지 않아 황사 발원지의 다양한 조건과 기상상태에 따른 황사의 연직플럭스를 파악하기가 쉽지 않다.

이에 발원지의 황사 발생 연직플럭스를 산정하기 위한 경험식 연구가 여러 가지 측면에서 수행되어 왔다. Westphal *et al.* (1988, 1987)은 발원지의 마찰속도와 식생분포를 이용하여 $10\mu\text{m}$ 보다 작은 먼지입자의 플럭스를 추정하였고, Park and Inn (2003)은 이를 발전시켜 $10\mu\text{m}$ 보다 큰 먼지에 대해서도 적용할 수 있는 경험식을 제시하였다. 또한 Wang *et al.* (2000)은 토지피복도와 습도를 고려하여 부유입자의 크기 분포에 따라 발생량을 산정하는 방법을 개발하였다. 그리고 Ginoux *et al.* (2004, 2001)은 Gillette and Passi (1988)에 의해 개발된 경험식을 개량하여 지형적 침전률과 지상풍의 풍속, 입자 크기에 따른 입계풍속을 적용하여 발생량을 산정한 GOCART(The Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport) 모델을 개발하였다. 게다가 Zender *et al.* (2003)은 White (1979)의 이론에 의한 먼지배출 산정 모델인 DEAD (Dust Entrainment and Deposition) 모델을 개발하였다.

하지만 황사 발생량은 황사 발원지에서의 식생분포, 토양 함수율, 지상 풍속 등에 따라 결과가 달라질 수 있다. 대부분의 선행 연구들은 사용된 이들 자료의 수평 격자를 너무 크게 고려하였거나 서로 다른 물리변수를 사용하였기 때문에 발원지에서의 황사 발생량이 차이를 나타내었다. 무엇보다도 우리나라 황사에보의 정확도를 높이기 위해서는 이들 경험식 간의 상호 비교를 통한 황사 발원지에서의 연직플럭스 산정이 필요하게 되었다(Kim *et al.*, 2003).

따라서 본 연구에서는 2007년 봄철의 발원지 황사 발생 사례에 대해 5개 선행 연구의 경험식들을 이용함으로써 시간별 발생량을 추정하고자 하였다. 이를 위하여 각 경험식의 기상관련 물리변수는 최근 개발된 WRF(Weather Research and Forecast) 모델의 기상요소를 이용하였다. 동시에 경험식 간의 황사 발생량은 인공위성의 황사분석영상과 대조함으로써 민감도를 확인하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 황사 발생량 산정 경험식

황사 발원지인 중국과 몽고의 건조지대에서의 황사 발생량을 정량적으로 추정하기 위해 많은 연구가 이루어졌다. 본 연구에서는 발원지의 황사 발생량을 산정하기 위해 미국 국립환경청(EPA)의 준 경험식(Xuan, 1999), 우리나라 기상청의 Park and Inn (2003) 경험식, 중국의 Wang *et al.* (2000) 경험식, 그리고 GOCART 모델과 DEAD 모델 내 먼지 산정식을 각각 이용하였다. 각 경험식에서 사용된 변수 목록은

Table 1. Parameters and data needed in empirical formula.

US EPA	Park and Inn	Wang <i>et al.</i>	GOCART	DEAD
Soil type	Vegetation	Land type	Sediment probability	Sandblasting mass efficiency
Erodibility index	Reduce factor	Humidity	Size fraction of particle	Wind friction speed
TSP ratio	Threshold friction velocity	Size fraction of particle	Wind speed	Threshold friction velocity
Climate index	Friction velocity	Threshold friction velocity	Threshold velocity	Particle density
Wind speed	Wind speed	Friction velocity	Particle density	Particle size
Vegetation	Surface roughness	Surface roughness	Particle size	
Surface roughness			Surface wetness	
Unsheltered field width				
Surface area				

표 1과 같고, 상세한 내용은 다음과 같다.

2.1.1 US EPA

미국 환경보호청(EPA)에 의해 제시된 먼지 발생량 산정의 준 경험식은 다음과 같다(Xuan, 1999).

$$Q = ceKCLVA \tag{1}$$

여기서 Q 는 A (ha) 면적에서 배출되는 연간 총면적 발생량이고, c 와 e 는 총미세먼지비율과 침식지수를 나타내며 토양형에 따라 결정된다. K 는 지표면의 거칠기계수이고 1 (smooth) 또는 0.5 (rough)의 값을 가진다. C 는 $0.504u^3/PE^2$ 로 계산되는 기후계수로, 여기에서 u 는 연평균풍속 (ms^{-1}), PE 는 Thornthwaite의 강수효과지수로 연강수량/연증발량을 나타낸다. 식(1)에서 L 은 노출대지폭계수로 0.7 또는 1.0으로 정하며, V 는 식생계수로 식생이 없을 때는 1.0으로 정해진다. Xuan(1999)은 자의적으로 1/8~1/2까지 추정하며, 논문에서는 1/8로 계산하였다. 그리고 A 는 대상 지표면적이다.

2.1.2 기상청

Westphal *et al.* (1988, 1987)은 입경 0.1~30 μm 인 먼지입자의 플럭스를 아래와 같이 추정하였다.

$$\begin{cases} F_a = 5.2 \times 10^{-14} u_*^4 & \text{if } u_* \geq u_{*t} \\ F_a = 0 & \text{if } u_* < u_{*t} \end{cases} \tag{2}$$

여기서, u_* 는 마찰속도이다.

하지만 Park and Inn (2003)은 0.1~37 μm 인 먼지입자의 플럭스를 아래와 같이 보완하였으며, 현재 우리나라 기상청에서 황사예보모델로 사용하고 있다.

$$\begin{cases} F_a = 7.117 \times 10^{-14} u_*^4 & \text{if } u_* \geq u_{*t} \\ F_a = 0 & \text{if } u_* < u_{*t} \end{cases} \tag{3}$$

위의 식들은 식생으로 덮인 지역의 경우 식생으로 덮인 부분의 비율 F_i 와 감쇄계수 R_i 을 고려하여 아래와 같이 된다.

$$F_a = \sum_i (1 - F_i R_i) \times 5.2 \times 10^{-14} u_*^4 \quad \text{if } u_* \geq u_{*t} \tag{4}$$

2.1.3 중국

중국의 Wang *et al.* (2000)은 황사 발생시 입자크기, 토양유형, 그리고 지역에 따라 결정되는 마찰속도의 임계값 ($25 \sim 70 \text{ cm s}^{-1}$)보다 큰 마찰속도와 Zhang *et*

al. (2001)의 연구로부터 황사 발원지의 상대습도가 40% 이하이고, 한랭전선을 동반한 저기압계가 우세한 기압배치일 때 아래 식(5)에 의해 황사 발생량을 산정하였다.

$$\frac{C_{i,j,l}^{t+\Delta t} - C_{i,j,l}^t}{\Delta t} = \frac{Q_{i,j,l}}{\Delta Z_{i,j}} \tag{5}$$

여기서, $C_{i,j,l}^t$ 는 위치 i, j 시간 t 에서 l 번째 크기의 황사농도이며, Δt 는 시간간격, 그리고 $\Delta Z_{i,j}$ 는 모델 최하위층의 두께이다. $Q_{i,j,l}$ 는 모델 최하위층에서의 배출강도로, 아래식으로 계산된다.

$$Q_{i,j,l} = C_1 C_2 u_{*i,j,l}^2 \left(1 - \frac{u_{*0i,j,l}}{u_{*i,j,l}} \right) W_{i,j,l} R_{i,j,l} \tag{6}$$

여기서 C_1 은 12 유형의 서로 다른 토지피복도에 따른 가중인자이다. C_2 는 경험상수로 2.9×10^{-11} 이고, $u_{*i,j,l}$ 는 상사이론에 의해 계산된 마찰속도로 입자크기에 따라 다른 값을 가진다. $u_{*0i,j,l}$ 는 입자크기에 따라 결정되는 마찰속도 $u_{*i,j,l}$ 의 임계값이고, $W_{i,j,l}$ 는 상대습도(RH)에 의해 결정되는 습도계수로 산출식은 식(7)과 같다.

$$W_{i,j,l} = \begin{cases} (1 - RH/RH_0) & \dots\dots RH < RH_0 \\ 0 & \dots\dots RH \geq RH_0 \end{cases} \tag{7}$$

여기서, RH 는 지표면의 상대습도이고, RH_0 는 상대습도 임계값(40%)이다. 마지막으로 $R_{i,j,l}$ 는 황사 발원지에서 부유먼지의 크기분포로부터 얻어진 l 번째 풍속 모래의 비율로 지역과 입자크기에 따라 다르게 주어진다.

2.1.4 GOCART 모델

GOCALT 모델에서 입자먼지 플럭스 F_p 는 Gillette and Passi(1988)에 의해 개발된 경험식에 S 라는 원함수(source function)를 붙여서 Ginoux *et al.* (2004, 2001)이 개량한 수식으로 다음과 같다.

$$F_p = \begin{cases} CS S_p u_{10m}^2 (u_{10m} - u_{tp}) & \text{if } u_{10m} > u_{tp} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{8}$$

여기서 C 는 $1 \mu g s^2 m^{-5}$ 로 단위를 맞추기 위한 계수이고, S 는 Ginoux *et al.* (2001)에 의해 기술된 원함수로서 식(9)와 같다. 이것은 노출된 대지에서 풍식이 일어나 축적된 토사가 있을 확률을 나타낸다.

$$S = \left(\frac{z_{\max} - z_i}{z_{\max} - z_{\min}} \right)^5 \quad (9)$$

여기서 S 는 고도 z 인 격자 i 에서 추적된 토사가 있을 확률이고, z_{\max} 와 z_{\min} 은 $10^\circ \times 10^\circ$ 지형도에서 최대, 최소 높이이다.

식 (8)에서 s_p 는 토양입자 크기별 분율로 Ginox (2004)에 의해 제시된다. u_{10m} 은 지상 10m의 풍속이고, 입자크기 계급 p 에 대한 풍속임계속도 u_{tp} 는 Marticorena and Berametti (1995)의 수식을 인용하여 식 (10)과 같이 정해진다.

$$u_{tp} = 0.13 \frac{\sqrt{\frac{\rho_p g \Phi_p}{\rho_a}} \sqrt{1 + \frac{6 \times 10^{-7}}{\rho_p g \Phi_p^{2.5}}}}{\sqrt{1.7638(4.6 \times 10^6 [\Phi_p^{1.56} + 1])^{0.092} - 1}} \quad (10)$$

여기서, ρ_p 는 입자 밀도이고, Φ_p 는 입자크기 계급 p 의 입자유효직경 (μm)이다. 이 입자크기 계급별 임계속도에 토양 습도의 흡착효과를 고려하면 위의 식은 아래와 같이 수정된다.

$$u_{tp\omega} = \begin{cases} u_{tp} \times (1.2 + 0.2 \log_{10} \omega) & \text{if } \omega < 0.5 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

여기서, ω 는 지표면습윤도이다.

2.1.5 DEAD 모델

Zender *et al.* (2003)이 제시한 DEAD 모델에서 먼지의 연직플럭스 F_d 는 식 (12)와 같이 정해진다.

$$F_d = \alpha Q_s \quad (12)$$

여기서, α 는 모래의 분사량 효율로 식 (13)과 같이 계산된다.

$$\alpha = 100 \exp [(13.4 M_{clay} - 6.0) \ln 10] \quad (13)$$

M_{clay} 는 기원 토양에서 점토의 분율로 0.0(모래)부터 0.20(사양토)까지 기원 토양의 성격에 따라 결정된다. 식 (12)에서 Q_s 는 White (1979)의 이론에 의한 큰 입자에 대한 수평 도약 플럭스의 총량이고 아래 식으로 계산된다.

$$Q_s = \frac{c_s \rho u_*^3}{g} \left(1 - \frac{u_{*f}}{u_*} \right) \left(1 + \frac{u_{*f}}{u_*} \right) \quad (14)$$

여기서 c_s 는 2.61이고, ρ 는 대기의 밀도, g 는 중력가속도, u_* 는 바람의 마찰속도이다. u_{*f} 는 바람의 임계마찰

속도로 아래와 같이 계산된다.

$$u_{*f}(D) = \begin{cases} 0.0144 \rho_p g D (1 - 0.0858 e^{-0.0617(Re_{*f} - 10)}) \\ \left(1 + \frac{6 \times 10^{-7}}{\rho_p g D^{2.5}} \right)^{1/2} \rho^{-1/2} & \text{if } Re_{*f} > 10 \\ \left[\frac{0.1666681 \rho_p g D}{-1 + 1.928 Re_{*f}^{0.0922}} \left(1 + \frac{6 \times 10^{-7}}{\rho_p g D^{2.5}} \right) \right]^{1/2} \rho^{-1/2} & \text{if } 0.03 \leq Re_{*f} \leq 10 \end{cases} \quad (15)$$

이 식에서, ρ_p 는 입자의 밀도이고, D 는 도약할 수 있는 최적의 입자크기이며, Re_{*f} 는 임계마찰레이놀즈수이다.

2.2 자료 및 실험설계

2.2.1 격자영역 및 입력자료

우리나라에 영향을 미치는 황사의 연직플럭스 산정을 위해 본 연구에 사용된 격자영역은 그림 1과 같이 $75^\circ\text{E} \sim 125^\circ\text{E}$, $30^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$ 에 걸치는 중국과 몽고의 건조지대를 포함하는 격자간격 30km인 가로 210, 세로 125개의 격자로 나누었다. 황사의 연직플럭스는 중국, 몽골의 건조지역을 포함하는 6,400개의 격자점을 이용하여 산정하였으며 그림 1에서 내부에 영역으로 표시하였다. 이 격자 영역에는 몽골 남부 건조지대, 고비사막, 내몽골사막, 텐겔사막, 황토고원, 타클라마칸사막과 함께 최근 황사 발생이 잦은 만주 지역까지 포함시켰다.

연구 사례일은 최근 발생한 황사 중 우리나라에 강하게 영향을 미쳤던 2007년 3월 30일~4월 1일의 사례를 선정하였다. 기상자료로는 미국 기상자료센터의 NCEP(National Centers for Environmental Predic-

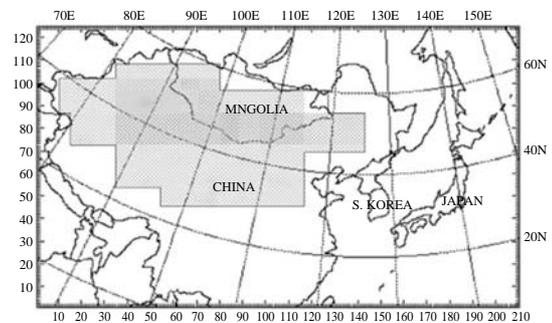


Fig. 1. Model domains in this study.

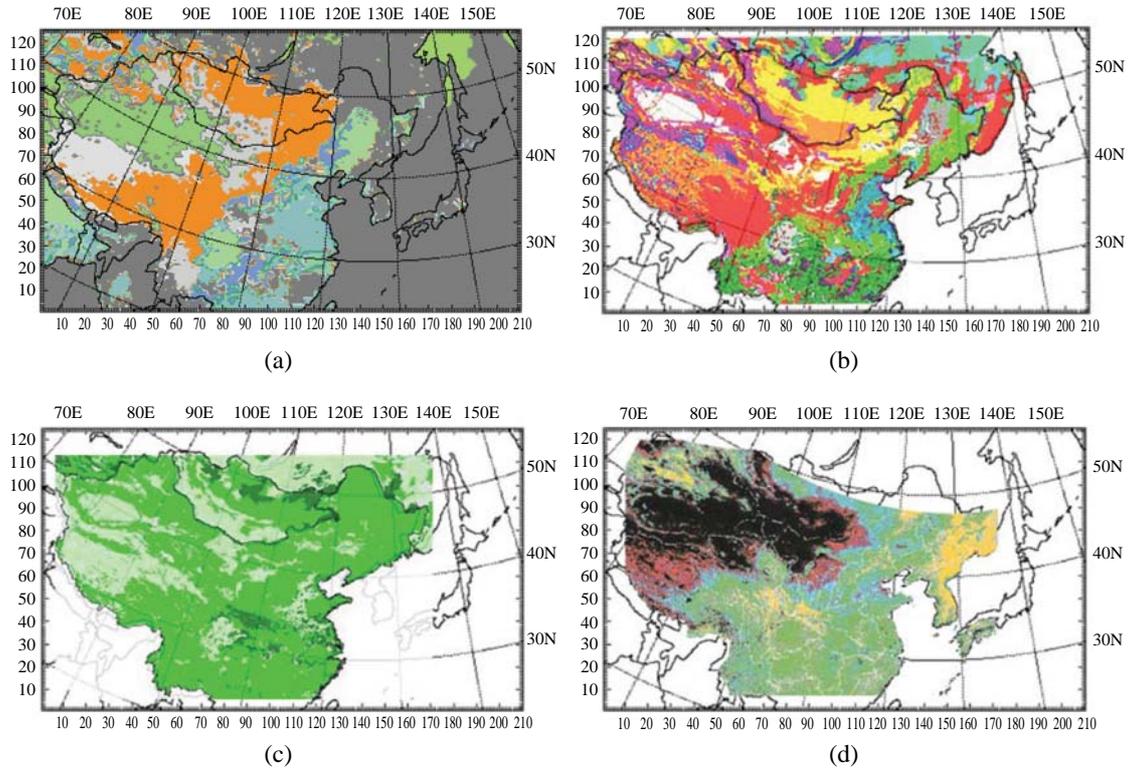


Fig. 2. Input data such as (a) land use, (b) major soil types, (c) major texture classes, and (d) vegetation index for calculating dust emission flux.

tion) 자료를 사용하였다. 이 때 WRF 모델링 시간은 72시간으로 하여 사례 일 전후에 대해 각 날짜마다 수행하였고, 모델 결과로부터 매시간별, 격자점별 풍향, 풍속, 마찰속도, 식생 분율, 식생 카테고리, 토지피복도, 해면고도 등의 텍스트 자료를 산출하였다.

황사 발원지의 발생량 산정을 위한 자료로는 IIASA (The International Institute for Applied Systems Analysis)의 LUC(The Land Use Change and Agriculture program)에서 제공되는 토지피복도, 식생, 토양자료와 미국지질조사소(USGS: U.S. Geological Survey)의 토지피복도 자료, 미항공우주국(NASA, National Aeronautics and Space Administration)의 OMI(Ozone Monitoring Instrument) 에어로졸 자료, 중국 위성 기상센터의 식생지도 등을 구하였다(그림 2)황사 발생량의 실시간 비교를 위한 위성사진 자료로는 일본 기상청 MTSAT(Multi-Functional Transport Satellite)의 아시아영역 황사분석영상을 이용하였다.

2.2.2 US EPA의 경험식 적용

먼저 IIASA-LUC의 토양 피복 지도를 구하여 포토샵 7.0 프로그램을 이용하여 Lambert 좌표계로 변환하였다. 이를 모델링 격자와 일치시키고 나서 각 격자점에서 토양형을 읽어 들여 엑셀 프로그램에 입력하였다. 그리고 입력한 토양형 자료를 기초로 하여 50µm 이하의 총 미세먼지 항목(c)과 토양형에 따른 침식지수(e)를 산정하였다. 다음에는 IIASA-LUC의 ‘경작지’, ‘목초지’, ‘숲’, ‘수역’으로 구분된 주요 토지 피복 범주 지도에서 지표면의 거칠기계수(K)를 고려하여 입력하였다. 그리고 기후계수(C)는 연평균 풍속과 Thornthwaite 강수효과지수로 계산되므로 본 연구에서는 이 식을 시간당 발생량으로 조정하였다. 즉, 연평균 풍속 대신에 WRF 모델에서 격자별로 출력한 시간 평균 풍속을 적용하였고, 기후의 건조 정도를 나타내는 Thornthwaite 강수효과지수는 시간당 변화에서는 의미가 없으므로 상수로 처리하였다. 이 경우

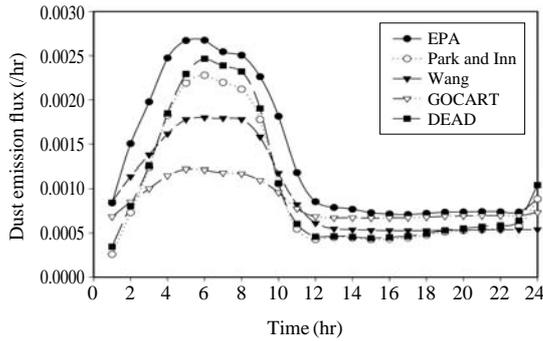


Fig. 3. Hourly variation of Asian dust emissions in the given area on 30 March 2007.

시간당 발생량의 크기나 단위가 원래 식에서 의도한 것과 다소 차이를 보일 수가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 감안하여 이를 다른 4 개의 경험식과 비교하여 대상지역 먼지 총발생량의 시간별 계수를 조정하였고, 그 결과를 그림 3에 나타내었다.

노출대지폭계수(L)는 구글의 위성사진 서비스를 이용하여 노출대지의 폭이 300 m인 경우 0.7로, 600 m 이상일 경우 1.0으로 정하였다. 식생계수(V)는 식생이 없을 때 1.0이고, 식생이 있을 때 1/8~1/2의 값을 가진다. Xuan(1999)는 이 값을 자의적으로 1/8로 일괄적으로 계산하였으나, 본 연구에서는 WRF 모델에서 격자점의 식생분율을 출력하여 경험식에 입력함으로써 좀 더 상세한 결과를 얻을 수 있었다.

2.2.3 Park and Inn의 경험식 적용

Park and Inn(2003) 추정법의 근간이 되는 Westphal *et al.*(1987)의 연구에서는 먼지 $10\mu\text{m}$ 보다 작은 먼지입자의 연직플럭스를 추정하였고, 뒤에 원래의 추정식에 5.2를 곱하여 입경 $0.1\sim 30\mu\text{m}$ 인 먼지입자의 연직플럭스로 산정하였다. 하지만 Park and Inn은 원래의 추정식에 7.117을 곱하여 $0.1\sim 37\mu\text{m}$ 인 먼지입자의 연직플럭스로 산정하였고, 여기에 식생으로 덮인 부분의 비율(F_i)과 식생범주에 따른 감쇄계수(R_i)를 고려하였다. 본 연구에서는 최종적으로 수정 보완된 Park and Inn의 경험식을 적용하여 계산하였다. 이 식을 적용하기 위해서는 상사이론으로 지표면 마찰속도 u_* 를 산정하여야 하는데, WRF 모델을 이용할 경우 u_* 를 바로 추출할 수 있다. 그리고 식생으로 덮인 부분의 비율(F_i)과 식생범주 역시 WRF 모델 결과로

부터 추출하여 이용하였다.

또한 모델의 마찰속도가 임계마찰속도 값보다 커야 먼지입자 발생량이 산출되는데, Park and Inn의 연구에서는 대상지역을 Gobi, Sand, Loess 지역으로 나누어 각각 60cm^{-1} , 50cm^{-1} , 40cm^{-1} 일 때 관측값에 가장 잘 일치한다고 보고하고 있다. 그러나 본 연구에서는 IIASA-LUC의 주요 토지 피복 범주 지도에서 광물 구성요소를 'coarse', 'medium', 'fine'인 영역으로 구분한 후 격자 값을 입력하였으며 각각의 임계마찰속도는 60cm^{-1} , 50cm^{-1} , 40cm^{-1} 를 적용하였다.

2.2.4 Wang의 경험식 적용

Wang *et al.*(2000)의 경험식을 적용하기 위해선 발원지의 광물입자크기와 조성비율이 종류(class)별로 산정되어 있어야 한다. 따라서 각 종류별로 발생량을 계산하여 조성비율을 곱한 후에 종류별 발생량을 합산함으로써 격자점에서의 먼지 발생량을 산정하였다.

본 연구에서는 Wang *et al.*의 연구에서 제시된 것과 같이 12유형의 토지피복도로 구분하였는데, WRF 모델 결과에서 출력된 토지피복범주에서 '불모지 또는 희박한 식생'영역은 심각한 사막 토지의 입자분포를, 그 외 지역은 잠재 사막 토지의 입자분포를 따랐다. 또한 어느 정도 식생이 있는 숲지역은 잠재 사막 토지로 취급될 수 있지만, Wang *et al.*의 식에서는 서로 다른 토지피복도에 따른 가중인자(C_1)를 주고 있기 때문에 숲 지역에서의 먼지입자 발생량은 없는 것으로 계산된다. 여기서 C_1 은 WRF 모델 결과로부터 출력한 토지 피복 범주의 값을 이용하여 환산하였고, 마찰속도(u_*)와 지표면의 상대습도(RH) 역시 WRF 모델 결과로부터 출력하였다.

Wang *et al.*의 식에서는 한 지점에서 입자의 조성비율에 따라 각각의 입자 크기별로 발생량을 산정하는데, 이때 임계마찰속도도 입자의 크기별로 달라지게 된다. 본 연구에서는 입자 크기별 임계마찰속도를 Ginoux *et al.*(2001)의 종류 p에 대한 풍속임계속도 u_{p*} 로 적용하였다. 즉, 이 u_{p*} 를 EPA의 발생량 산정지침에 의거하여 임계마찰속도인 u_{*c} 로 환산하여 적용하였다. 이 경우에 직경 $50\mu\text{m}$ 인 입자의 풍속 임계속도는 50cm^{-1} 정도로 계산되는데, 이 값은 풍동실험의 결과보다는 작은 값이라고 언급하고 있다.

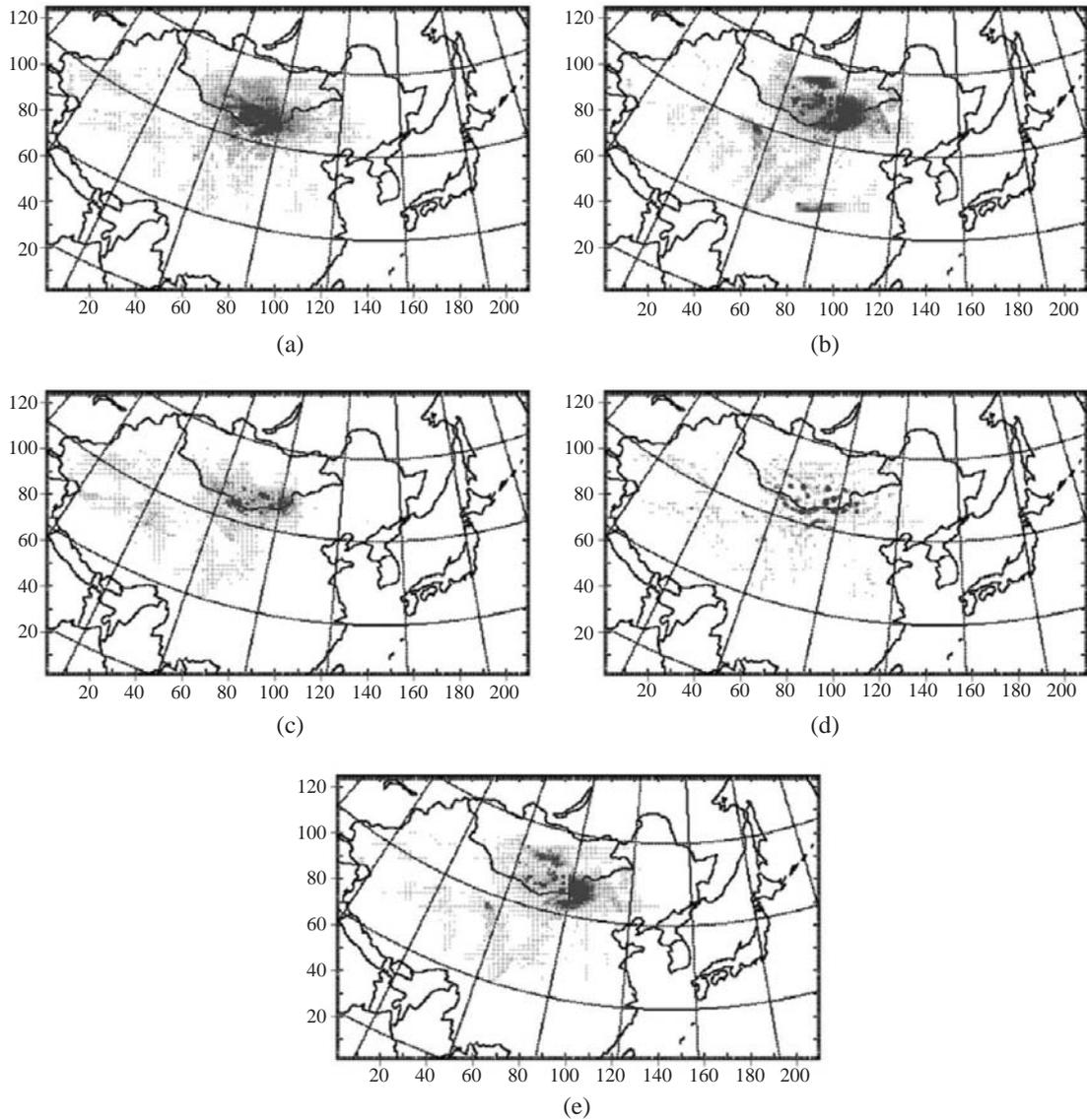


Fig. 4. Emission flux of Asian dusts calculated by (a) US EPA model, (b) Park and Inn's formula, (c) Wang *et al.*'s formula, (d) GOCART model, and (e) DEAD model at 0600 UTC on 30 March 2007.

2.2.5 GOCART 모델의 적용

GOCART 모델은 먼지 발생량 산정에서 오랫동안 쓰여 왔던 Gillette and Passi (1988)의 경험식을 근간으로 하여 Ginoux *et al.* (2003, 2001)을 적용하였다. 이 경우 다른 모델에서는 없는 원함수(S)라는 개념이 들어가는데, 이것은 어떤 노출된 대지에서 풍식이 일어나 축적된 토사가 있을 확률을 의미한다. 본 연구

에서는 S 를 산정하기 위해 그림 1의 입자먼지 발생량 영역의 격자점과 이 영역 외곽의 8개 지점의 해면고도를 비교하였다. 이를 통해 최대 및 최소 고도를 산정한 후 수식에 의해 S 를 계산하였다.

Wang *et al.*의 경험식에서는 입자크기별로 조성비율을 고려하였지만 GOCART 모델에서는 점토의 분율을 입자 크기별로 비교적 간단한 값으로 분류하여

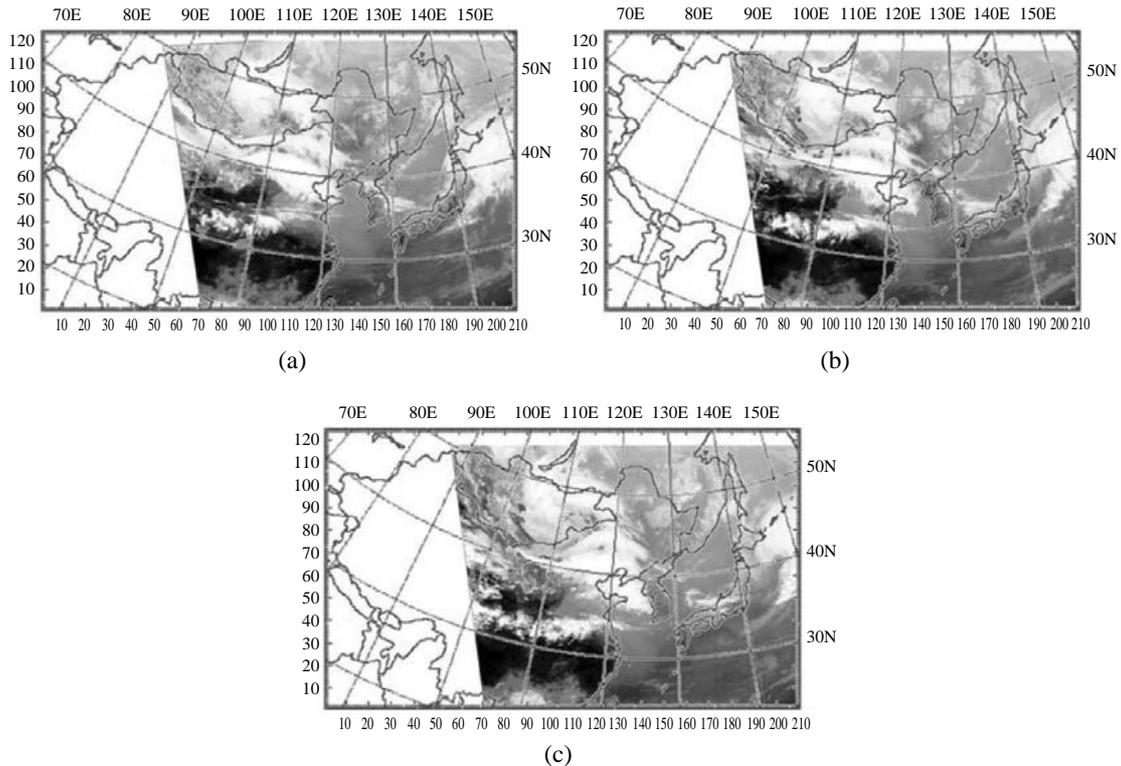


Fig. 5. IDDI analyzing image of MTSAT-IR satellite at (a) 0233UTC, (b) 0433UTC, and (c) 0633UTC on 30 March 2007.

s_p 로 산정하였다. 본 연구에서는 Ginoux *et al.* (2004)에 의해 제시된 것과 같이 입자크기를 4개의 종류로 나누어 s_p 를 정하였다.

모델 변수가 되는 높이 10m의 풍속 u_{10m} 은 WRF 모델 결과로부터 출력하였고, u_{ip} 는 입자 크기별로 Marticorena and Bertrametti (1995) 수식을 인용한 Ginoux *et al.* (2004)식에 의해 산정하였다.

2.2.6 DEAD 모델의 적용

Zender *et al.* (2003)에 의해 개발된 DEAD 모델은 입자 크기에 따라 조성비를 고려하여 각각 발생량을 계산하여 합산하는 Wang *et al.*의 경험식이나 GOC-ART 모델과 방식은 같지만 사용되는 변수가 M_{clay} , u_s , u_{st} 의 세 가지로 단순하다. M_{clay} 는 기원 토양에서 점토의 분량으로 IIASA-LUC의 '토양조직지도'로부터 입력하여 환산하였고, u_s 는 WRF 모델 결과로부터 추출하였다. 그러나 DEAD 모델에서 적용하는 u_{st} 는 비교적 복잡한 경험식으로 계산되며, 이때 임계 마찰

레이놀즈수가 고려된다. 따라서 본 연구에서는 실시간 황사 발생량 산정과 황사 수송 모델링을 고려하여 DEAD 모델의 u_{st} 산정 방식보다는 Ginoux *et al.* (2001)의 종류 p에 대한 풍속임계속도 u_{ip} 를 EPA의 발생량 산정지침에 의거하여 임계마찰속도인 u_{st} 로 환산하여 적용하였다. 즉 Wang *et al.*의 경험식에 사용된 것과 같은 입자크기등급과 임계마찰속도를 적용하여 황사 발생량을 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 먼지 발생량의 수평적 분포

2007년 3월 30일 중국과 몽고의 황사 발생 사례에 대해 각 경험식을 적용하여 황사 발생량을 산정하였다. 적용한 사례일에 대해 US EPA 경험식을 포함한 5개 경험식의 대상지역 먼지 발생량 시간별 추이를 그림 3에 나타내었는데, 24시간 중 0200~1000

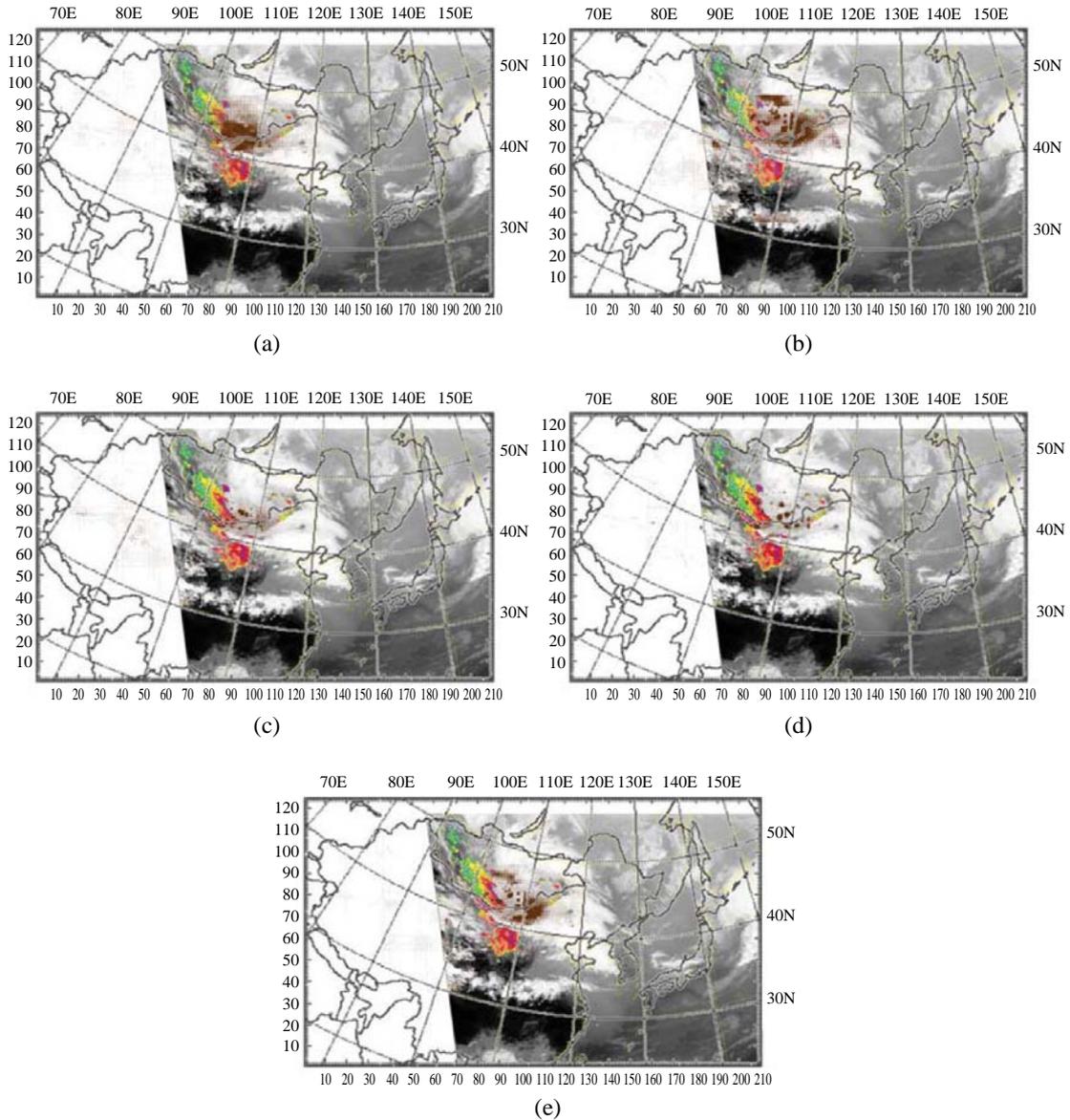


Fig. 6. Combination between IDD images of MTSAT and vertical flux of Asian dusts calculated by (a) US EPA model, (b) Park and Inn's formula, (c) Wang *et al.*'s formula, (d) GOCART model, and (e) DEAD model at 0600UTC on 30 March 2007.

UTC에 전체 먼지 발생량의 약 70%가 집중되어 나타났다. 특히 0600UTC에 먼지 발생량이 가장 많았으며 24시간 동안 발생한 먼지의 약 16~20%가 발생하였다. 이는 경험식에 변수로 포함되어 있는 풍속과 황사 발생량이 비례하기 때문인데, 0600UTC에 대

상 격자에서의 평균풍속이 가장 컸음을 알 수 있다. 황사 발생량이 가장 많았던 3월 30일 0600UTC의 시간당 발생량의 수평적 분포를 각 경험식 별로 그림 4에 나타내었다. 각각 산정된 발생량의 수평적 분포는 경험식 별로

차이가 나타나고 있다. 이들 경험식에서는 토지피복 지도나 토양형태를 고려할 때 어느 정도의 가중치를 곱할 것인가, 또는 풍속의 임계값을 결정하는 방법, 풍속의 승수, 경험식 별로 고려되는 특별한 인자 등에 따라서 발생량 분포가 달라질 수 있다. 즉 황사의 발생량 산정에 있어서 기상요소나 지형·환경요인 중 어느 쪽의 기여율이 크기에 따라서 발생량 지역의 분포양상이 다르게 결정될 수 있다.

본 연구에서 추정된 각 격자점에서의 황사 발생량 자료는 대기질 모델의 입력자료로 이용된다. 따라서 황사 발생량에 대한 각 경험식의 계수는 다양한 사례의 황사 모델링 농도와 측정 농도간의 비교를 통해서 조정할 수 있다. 하지만 본 연구에서의 주안점은 각 경험식간 황사 발생량이 인공위성 관측값과 비교하여 지역적으로 얼마나 잘 일치하고 있는지를 제시하는 것이다.

그림 5는 사례일의 MTSAT 인공위성에서 촬영, 분석한 적외차 황사지수(IDDI, Infrared Difference for Dust Index) 사진이다(기상청, www.kma.go.kr). IDDI는 황사와 같은 에어로졸 성분이 대기 중에 부유하는 경우에 주성분인 석영 및 장석 성분에 의한 적외선 복사의 감쇄효과를 지수로 산출한 것이다(Kim *et al.*, 2007). IDDI로 나타난 것은 부유한 황사면지이고, 본 연구로 산정한 것은 지표면에서의 연직 플럭스이기 때문에 단순한 상대비교는 어렵다. 그래서 0600 UTC의 발생량 산정 결과를 위성사진과 비교하기 위해서 0233UTC, 0433UTC의 IDDI 사진을 참고하여 0633UTC에 IDDI지수가 높아진 지역을 발생 지역으로 추정하였는데, 이는 그림 5의 0633UTC 영상에서 몽고 남부의 황사 이동방향의 전면부에서 붉게 나타난 지역으로 판단된다.

다음으로 그림 4의 경험식별 황사 발생량 분포를 그림 5의 0633UTC 사진과 겹쳐서 발생 지역의 일치성을 비교해 보았다. 이것을 그림 6에 나타내었다.

MTAST 위성의 IDDI 사진과 각 경험식별 발생량 산정 결과를 겹쳐 보았을 때 Park and Inn의 경험식과 DEAD 모델 결과는 최대 발생량 지점이 훨씬 동쪽으로 벗어나 있다. Wang *et al.*의 경험식과 GOCART 모델 결과는 실제 황사 발생지점과 동일한 격자에서 발생량을 산정하였으나 수평 규모는 훨씬 작게 예측되었으며, 위성사진에서는 나타나지 않는 116~117°E, 43°N 위치에서도 많은 발생량이 산정되었다. US

EPA 경험식 적용 결과는 118°E, 39°N 부근의 먼지 발생을 반영하고 있지 않지만 몽고 남부와 고비사막의 발생량을 잘 묘사하고 있다. 주어진 사례일에 대한 경험식 적용 결과만을 본다면 5개의 경험식 중에서 식생, 토양, 지형 등의 조건이 보다 상세히 고려된 US EPA 경험식의 결과가 분포 패턴에 있어서 양호한 것으로 나타났다. 하지만 이들 경험식의 경우는 관측값과의 상호 비교를 통하여 향상이 가능하므로 시간별 황사 발생량의 예보에 적절히 활용할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 발원지의 시간별 황사 발생량을 정확하게 산정하기 위하여 타클라마칸부터 만주지역까지 75°E~125°E, 30°N~50°N에 분포한 중국 내륙의 건조지대를 30 km 격자로 나누어 계산하였다. 또한 WRF 기상모델 결과로부터 추출한 바람장과 습도 등을 이용하여 5개 경험식에 적용하였다. 그리고 주어진 사례일에 대한 이들 경험식의 결과에 대해서는 위성자료와 비교하였다.

2007년 3월 30일 중국과 몽고의 황사 발생 사례에 대해 각 경험식을 적용하여 시간별 황사 발생량을 산정하였다. 그 결과 각 경험식에서 가중치를 두는 변수가 기상요인인지 지형·환경요인인지에 따라 먼지 발생량의 지역적 분포 양상이 다르게 나타났다. 위성자료와의 비교 결과로는 분포 패턴에서 각 경험식 간에 약간의 차이는 있었지만, 다른 4개의 경험식보다 식생, 토양, 지형 등의 조건이 보다 상세히 고려된 US EPA 경험식의 결과가 관측값과 유사하게 나타났다. 따라서 황사에 대한 예보 정확도를 향상시키려면, 이들 경험식의 물리적 변수를 관측값과 비교·개선함으로써 이를 통한 앙상블예보가 필요함을 알 수 있다. 동시에 연구자가 활용할 수 있는 중국과 몽고 지역의 최신 지리정보, 기상정보 및 발생량정보 데이터베이스가 마련되어야 할 것이다.

또한 본 연구에서 제시된 황사 발생량의 경험식들은 대기오염 확산모델의 실시간 비산먼지 발생량의 입력자료로 사용이 가능하다. 따라서 추후 연구에서는 이들 결과를 관측자료와 대조하는 과정을 통해 계수조정과 단위환산을 보다 개선할 필요가 있다. 그

리고 이들 경험식을 대기확산모델에 직접 적용함으로써 다양한 사례 일에 대한 먼지 농도의 민감도 분석을 수행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2006년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(한국학술진흥재단)의 “WRF-CMAQ 모델을 이용하여 봄철 동아시아 상공에서 절리저기압의 발달시나리오에 따른 오존 및 미세먼지(황사)의 연직 플럭스 추정” 연구 지원을 받아 수행된 연구이다(KRF-2006-331-C00297).

참 고 문 헌

Gillette, D.A. and R. Passi (1988) Modeling dust emission caused by wind erosion, *Journal of Geophysical Research*, 93, 14233-14242.

Ginoux, P., J.M. Prospero, O. Torres, and M. Chin (2004) Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: correlation with North Atlantic Oscillation, *Environmental Modeling & Software*, 19, 113-128.

Ginoux, P., M. Chin, I. Tegen., J.M. Prospero., B. Holben., O. Dubovik, and S. Lin (2001) Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model, *Journal of Geophysical Research*, 106, 20255-20273.

Jeon, Y.S., S.G. Jo, Y.W. Kim, J.G. Lee (2003) Asian dust phenomena occurring in Manjoo, *Journal of Korean Meteorological Society*, 39(2), 251-263.

Kim, M.J, W.Y. Kim, and Y.J. Kim (2007) Calculation of Infrared Difference for Dust Index (IDDI) using the MTSAT-IR satellite data, database established by the Korean Meteorological Society (<http://www.ko->

mes.or.kr/ytboard/).

Kim, Y.K., S.K. Song, Y.S. Moon, and J.H. Jeong (2003) A study on estimating methods and their simulations for dust emissions during Asian dust events in the Eastern Asia, *Proceeding of the 2003 Spring Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35, 177-178.

Marticorena, B. and G. Bertrametti (1995) Modeling the atmospheric dust cycle, Design of a soil-derived dust emission scheme, *Journal of Geophysical Research*, 100, 16414-16430.

Park, S.W. and W.J. Inn (2003) Estimation of dust emission amount for a dust storm event occurred in April 1998 in China, *Water, Air, and Soil Pollution*, 148, 201-221.

Wang, J., H. Ueda, and M. Huang (2000) A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia, *Journal of Geophysical Research*, 105, 26947-26959.

Westphal, D.L., O.B. Toon, and T.N. Carson (1987) A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms, *Journal of Geophysical Research*, 92, 3027-3049.

Westphal, D.L., O.B. Toon, and T.N. Carson (1988) A case study of mobilisation and transport of Saharan dust, *Journal of Atmospheric Science*, 45, 2145-2175.

White, B.R. (1979) Soil transport by winds on Mars, *Journal of Geophysical Research*, 84, 4643-4651.

Xuan, J. (1999) Dust emission factors for environment of Northern China, *Atmospheric Environment*, 33, 1767-1776.

Zender, C.S., H. Bian, and D. Newman (2003) Mineral dust entrainment and deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology, *Journal of Geophysical Research*, 108, 1-19.

Zhang, D. and Y. Iwasaka (2001) Chlorine deposition on dust particles in marine atmosphere, *Geophysical Research Letters*, 28, 3613-3616.