CMIP5 모델자료를 이용한 미래 먼지에어러솔 배출 전망과 나지 비율 및 토양 수분과의 관계 분석

김태희¹ · 부경온¹ · 이조한¹ · 조천호²

¹국립기상연구소 기후연구과 · ²국립기상연구소 예보연구과
(2014년 2월 3일 접수, 2014년 2월 17일 수정, 2014년 2월 24일 게재 확정)

Analysis of the Future Emission Changes in Mineral Dust Aerosol in CMIP5 Related to Bare Soil and Soil Moisture Conditions.

TaeHee Kim¹ · Kyung-On Boo¹ · Johan Lee¹ · ChunHo Cho²

¹Climate Research Division, National Institute of Meteorological Research

²Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Research

(Received 3 February 2014, Revised 17 February 2014, Accepted 24 February 2014)

Abstract : Future changes in mineral dust emission are studied using CMIP5 models. These models simulate climatological spatial distribution of dust emission over the observed major sources; Sahara Desert to Arabia and Southwest Asia. Model estimates for the range of global dust emission simulation appear large in the quantity of dust produced and the amplitude of interannual variability. According to the ensemble mean in global annual emissions, projections of four RCPs do not have significant long-term trends in mineral dust aerosol emissions at the end of 21st century. Meanwhile over Northeast Asia, annual emissions are projected to decrease significantly in four RCPs. Reductions appear over the major sources of mineral dust. Seasonally emission reduction in spring is distinct. In April and May, future changes with decreasing emission appear only in RCP4.5 with significance. Aerosol emission amount changes are related to changes in land surface property. We analyze future projection of soil moisture and bare soil area fraction. Regarding the projected decreasing trend in the annual emission amount over Northeast Asia, soil moisture is expected to increase in the emission source region in four RCPs. Relatively, the effect of bare soil area changes over the emission source appears in some models and RCPs.

Key Words : Bare soil, CMIP5, Mineral dust, Soil moisture

주요어 : 나지 비율, CMIP5, 토양수분, 먼지

1. 서론

에어로졸은 복사강제력을 통한 기후변화에 미

치는 영향이 크고 다양하다(Tegen, 2003). 에어로
졸은 산란과 흡수를 통해 지구 복사수지에 영향을
주고(Sokolik *et al.*, 2001; Tegen, 2003; Balkanski

et al., 2007), 적설 · 얼음 위에서는 반사도를 감소시켜 복사수지를 바꾼다(Painter *et al.*, 2007). 특히 해양생태계에서의 먼지(mineral dust)는 철의 영양분으로(Mahowald *et al.*, 2009) 식물성 플랑크톤 성장을 촉진시켜 해양의 탄소순환에도 영향을 미친다(Jickells *et al.*, 2005; Tagliabue *et al.*, 2009). 이러한 기후변화에 미치는 영향으로 인해 에어로졸의 배출량에 대한 많은 관심이 모아지면서 변화되는 기후 조건하에서의 미래 배출량에 대한 전망이 매우 중요해졌다.

먼지는 해염을 제외한 지구상의 에어로졸 성분 중 가장 지배적인 성분이다(Tegen, 2003). 먼지는 지역의 복사에너지 균형에도 영향을 주고(Kinne and Poeschel, 2001; Sokolik and Toon, 1996; Sokolik *et al.*, 2001), 전 지구 탄소 순환에도 영향을 미치며(Ridgwell, 2002), 토지, 해양, 대기의 생지화학적 순환에 영향을 미친다(Bergametti, 1998; Martin and Gordon, 1988).

먼지의 배출과정은 기상장, 지면상태, 토지 상태에 민감하다(Pérez *et al.*, 2011). 먼지는 토양이 건조하고 식생이 거의 없으며 연강수량이 200mm 이하인 건조지역에서(Lee and Kim, 2008) 가장 많이 발생한다. 이와 관련된 자연적 사막과 반 건조 토지는 세계 육지 면적의 33%를 차지하고(Duce, 1995), 주로 북아프리카, 중동, 중앙아시아지역으로 중국의 고비사막, 타클라마칸 사막, 황토고원, 북아프리카의 사하라 사막 등이 있다. 이에 따라 아시아지역에서는 매년 봄철 중국 발원지에서 배출, 수송되어 오는 황사에 대한 많은 연구들이 진행되어 있다(Lee, 2003; Song *et al.*, 2004).

이에 본 연구에서는 CMIP5¹⁾ 참여모델을 이용하여 먼지에 대한 미래 배출량의 정량적 변화를 분석하고, 나지 비율(bare soil fraction)과 토양수분(soil moisture)의 변화를 분석하여 미래 배출량

의 변화 원인을 찾고자 한다. 이러한 분석적 연구는 미래 먼지의 전망을 진단할 수 있는 기초를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구방법

1) 대표농도경로의 정의

기후변화 전망을 위한 온실가스 농도는 IPCC 5차 평가보고서에서 정한 대표농도경로(Representative Concentration Pathway: RCP)를 이용한다(National Institute of Meteorological Research, 2011). 이 시나리오는 IPCC AR5를 위한 새로운 온실 가스 배출 시나리오로서 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 RCP는 '경로(Pathway)'로 간주되고 또한 유사한 복사강제력과 배출 특성을 가진 여러 다른 시나리오 중의 하나라는 측면에서 '대표(Representative)'라는 의미를 가진다.

4종의 RCP 시나리오가 있으며 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우를 RCP8.5 시나리오, 지구가 회복력을 가질 수 있는 최대 한계 값인 경우를 RCP2.6시나리오, 그리고 온실가스 저감정책이 어느 정도 실현되는 경우를 RCP4.5/6.0시나리오로 구성하였다. 여기서 숫자는 복사강제력의 양으로 단위는 Wm^{-2} 이다. 좀 더 자세히 살펴보면 RCP8.5 시나리오는 2100년에 복사강제력이 $8.5w/m^2$ 를 초과하는 고농도 시나리오로서 오스트리아의 ILASA Integrated Assessment Framework와 MESSAGE 모델링 팀에 의해 개발되었다. RCP6.0 시나리오의 경우는 2100년 까지 복사강제력이 $6w/m^2$ 까지 증가하다가 이후 안정화 되는 중간 농도 시나리오로서 일본의 NIES (National Institute for Environment Studies)의 AIM 모델링 팀에 의해 개발되었고, RCP4.5 시나리오는 2100년까지 복사강제력이 약 $4.5w/m^2$

까지 증가하다가 이후 그대로 4.5w/m^2 의 복사강제력을 유지하여 안정화 되는 저 농도 시나리오로서 Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute(JGCRI)의 MiniCAM 모델링 팀에 의해 개발되었다. 마지막으로 RCP2.6 시나리오는 2100년 전에 복사강제력이 약 3w/m^2 에 도달하고 이후 하강하여 2100년에는 2.6w/m^2 에 도달하는 시나리오이다.

2) 자료 및 연구방법

본 연구에서 사용 된 먼지 분석자료는 <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>에서 제공되는 CMIP5 데이터를 사용하였고, 사용된 CMIP5모델은 HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, GISS-E2-H, GISS-E2-R, MIROC5, MIROC-ESM, MRI-CGCM3, CSIRO-Mk3.6.0, CanESM2로, 총 10개의 모델의 12개의 적분자료를 사용하였다(Table 1). 그 중 HadGEM2-AO 모델은 제어 실험²⁾ 1000년 중 제어 실험의 200년, 400년, 500년 결과를 초기 조건으로 한 과거

기후 모의실험의 적분 자료를 사용하였다. 기간은 총 1860~2100년 자료로서 4종의 RCP 시나리오(RCP2,6/4,5/6,0/8,5)에 대해 분석하였다. HadGEM2-CC모델의 RCP2,6/6,0시나리오 적분자료와CanESM2모델의 RCP6,0시나리오 적분자료는 제공되지 않아 분석에서 제외하였다. 사용된 변수는 먼지의 총 배출률(Total emission rate of mineral dust, $\text{g km}^{-2}\text{mon}^{-1}$)이다.

먼지배출에 영향을 주는 지면조건 분석을 위해 나지 비율(%)과 토양수분(kgm^2) 변수를 추가 분석하였다. 그 중 나지 비율은 Table 1의 모델 중 자료가 제공되는 HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, GISS-E2-H, GISS-E2-R, MIROC5, MIROC-ESM모델의 자료를 사용하였고, 사용된 변수는 Bare Soil Fraction(%)으로 먼지와 동일한 기간을 4종의 RCP 시나리오에 대하여 분석하였다. 마찬가지로 HadGEM2-CC모델의 RCP2,6/6,0 시나리오 적분결과는 제공되지 않아 분석에서 제외하였다.

토양수분의 경우에는 Table 1의 모델 중 자료

Table 1. CMIP5 dataset used in this study

Model	Grid (lat×lon)	Number of Simulations	Institution
CanESM2	64×128	1	Canadian Center for Climate Modeling and Analysis
CSIRO-Mk3.6.0	96×192	1	Queensland Climate Change Centre of Excellence and Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
HadGME2-AO	145×192	3	Korea Meteorological Administration, UK Met Office Hadley Centre
HadGEM2-ES	145×192	1	UK Met Office Hadley Centre
HadGEM2-CC	145×192	1	
GISS-E2-H	90×144	1	NASAGoddardInstitute for Space Studies USA
GISS-E2-R	90×144	1	
MIROC5	128×256	1	University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology
MIROC-ESM	64×128	1	
MRI-CGCM3	16×320	1	

가 제공되는 HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, GISS-E2-R, MIROC5, MIROC-ESM, MRI-CGCM3, CSIRO-Mk 3.6.0, CanESM2 모델의 자료를 사용하였다. 사용된 변수는 Moisture in upper portion of soil column (kgm^2)으로 먼지와 동일한 기간을 4종의 RCP 시나리오에 대해 분석하였다. HadGEM2-AO의 ic200 적분결과와 HadGEM2-CC의 RCP 2,6/6,0 시나리오의 적분결과는 제공되지 않아 분석에서 제외하였다.

분석은 전 지구와 동북아시아 지역에 대해 실시하였으며, 동북아시아 지역은 위도 $80^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$, 경도 $30^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 지역으로 설정하였다. 또한 코펜의 기후구분의 정의를 이용하여 현재(1971–2000년, 20세기말) 대비 미래(2071–2100년, 21세기말) 변화를 분석하였다.

3. 결과

이 연구에서는 먼저 전 지구에서의 먼지 배출률의 변화를 살펴 보았다. 또한 주요 발원지가 위치해 있으며 우리나라에 가장 많은 영향을 미치는 동북아시아 지역의 연간 변화를 살펴 보았으며, 먼지가 가장 많이 방출되는 봄철(Xuan and Sokolik, 2002) 동북아시아 지역의 변화를 살펴 보았다.

1) 전 지구 전망

Figure 1은 20세기말 대비 21세기 말 먼지 배출률의 변화율³⁾을 나타낸 것으로 21세기 말 HadGEM2-AO, GISS-E2-R, CISRO-Mk3.6.0, CanESM2 4개의 모델은 4종의 RCP 시나리오에 대해 20세기말대비 증가를 나타냈고, HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, MIROC-ESM, MIROC-CGCM3 4개의 모델은 감소를 전망하였다. 그 외 모델들은 RCP에 따라 증가, 감소 경

Figure1. Changes (%) in global annual mean emission rate of mineral dust at the end of 21st century (2071~2100) for four RCPs relative to the present-day period (1971~2000).

향이 다르게 나타났다. 그 중 RCP2.6을 제외한 3종의 RCP 시나리오에 대해 GISS-E2-H 모델은 감소를, MIROC5 모델은 증가를 전망하였다. HadGEM2-AO 모델 한 멤버의 RCP8.5 시나리오가 20.7%로 가장 큰 증가를 보였으며, MIROC-ESM 모델의 RCP4.5 시나리오가 -21.4%로 가장 큰 감소를 보였다.

모의된 전 지구 먼지의 배출량은 20세기 말 $0.25 \sim 1.36 \text{ g km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ 로 모델간 편차가 매우 컸고, 이와 마찬가지로 21세기말 또한 $0.23 \sim 1.28$ (RCP2.6), $0.23 \sim 1.30$ (RCP4.5), $0.23 \sim 1.14$ (RCP6.0), $0.23 \sim 1.23$ (RCP8.5)으로 모델간의 편차가 매우 컸다. 모델 별로 다른 증가, 감소 경향을 보여 미래 먼지 배출률의 전망은 불확실 했다. 이는 선행연구에서의 현재 기후모델이 전 지구 먼지 배출모의에 있어서 모델간에 편차가 매우 크다는

결과와 일치하였다(Zhao *et al.*, 2013, Textor *et al.*, 2006, Huneus *et al.*, 2011). 이러한 모델 간 차이는 각 모델이 먼지배출, 소멸, 물리 화학적 특성, 크기 등을 각기 다르게 표현하는 것과 연관이 있다고 알려져 있다.

21세기말 전 지구 먼지 배출률의 증가와 감소 경향이 모델마다 다양한 것은 Figure 2에서도 확인할 수 있다. Figure 2는 각 모델의 1860~2100년 평균을 기준으로 아노말리를 구한 뒤 그 값을 단순 평균한 앙상블값이다. 결과를 보면 19세기 말대비 20세기말 배출률이 증가경향을 보이나, 4종의 RCP에 따른 20세기말 대비 21세기말 적분 결과는 5% 유의수준에서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 모델간의 분산이 21세기말로 가면 서 점차 커지는 것과 관련된 것으로 보인다.

먼지 배출의 공간분포를 살펴보면 각 모델마

Figure 2. Time series of global annual mean emission rate of mineral dust ($\text{g km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$) deviated from the mean value of 1860~2100. Shaded areas represent the ensemble spreads of 9-year moving averaged time series and solid line means ensemble mean.

Figure 3. Horizontal section for annual emission rate. Annual emission rate of mineral dust ($\text{g km}^{-2} \text{mon}^{-1}$) for the period of 1971~2000.

Figure 4. Horizontal section for changes of annual emission rate. Changes ($\text{g km}^{-2} \text{mon}^{-1}$) of annual emission of mineral dust in 2071~2100 deviated from the period of 1971~2000 for RCP 8.5.

다 배출물의 정량적인 차이는 있으나 북아프리카, 중동, 인도, 아시아, 호주의 건조지역에서 대체로 배출률이 크게 나타났다(Figure 3). P'erez *et al.* (2011)에 따르면 연평균 먼지 배출량의 50~70%가 북아프리카, 10~25%는 아시아 사막에서 배출된다고 알려져 있다. 이와 유사하게 20세기 말 모의결과에서 먼지 배출률이 큰 지역은 북아프리카와 아시아 내륙 건조지역이다. 또한 중동, 인도, 아시아, 호주의 건조지역도 배출률이 크고 이 지역에서 20세기말 대비 21세기말 변화가 매우 크다.

10개 모델 중 20세기말 대비 21세기 감소가 가장 큰 것은 HadGEM2-ES, HadGEM2-CC 모델이다(Figure 4). 주요 배출원 지역과 대륙에서 먼지 배출률 감소가 전망되며 이는 식생분포의 변화와 연관된 것으로 판단된다. HadGEM2-ES, HadGEM2-CC 모델의 경우 역학적 식생모델에 의해 지표식생이 증가하고 토양면적이 축소되어 그 결과 먼지 배출 감소에 영향을 주기 때문이다. 이는 현재에 비해 20~60%가량의 먼지 배출이 감소할 것으로 예측한 선행연구(Mahowald *et al.*, 2006) 결과와 마찬가지로 온난화에 따른 배출원 지역의 면적축소의 영향으로 생각된다.

RCP 8.5 시나리오에 따른 20세기 말 대비 21세기말 배출률 변화에 대한 공간 분포를 살펴보면 주요 먼지 배출원 지역에서 대체로 감소가 전망된다. CanESM2 모델의 경우와 같이 미래에도 배출원에서 먼지 배출률이 증가하는 경우가 일부 모델에서 지역적으로 나타나기도 한다. 마찬가지로 정량적인 변화률의 차이는 존재 하지만 다른 3종의 RCP 시나리오에서도 유사한 분포가 나타났다. Figure 4에서 미래 먼지 배출은 공간적으로 작은 규모로 발생하는 것을 알 수 있으며 이에 대해서는 추가연구가 필요하다.

2) 동북아시아 연평균 먼지 배출률

21세기말 동북아시아($30\sim55^{\circ}\text{N}$, $80\sim145^{\circ}\text{E}$) 지역 연간 배출률은 20세기말에 비해 과반수 이상의 모델이 감소를 전망하였다(Figure 5). RCP2.6 시나리오의 5개 모델, RCP4.5 시나리오의 7개 모델, RCP6.0 시나리오의 7개 모델, RCP8.5 시나리오의 7개 모델이 감소를 전망하였다. 각 모델 별로 살펴보면 HadGEM2-AO 모델의 한 멤버는 4종의 RCP 시나리오에 대해 20세기말대비 21세기말 증가를, HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, MIROC5, MIROC-ESM 4개의 모델은 감소를 전망하였다. HadGEM2-AO 모델의 두 멤버는 RCP4.5, GISS-E2-R 모델은 RCP6.0, MRI-CGCM3 모델은 RCP8.5 시나리오를 제외한 나머지 3종의 RCP 시나리오에 대해 증가를, GISS-E2-H 모델은 RCP2.6 시나리오를 제외한 나머지 3종의 RCP 시나리오에 대해 감소를 전망하였다. 그 중 HadGEM2-AO 모델 한 멤버의 RCP8.5 시나리오가 +5.7%로 가장 큰 증가율을 보이며, MIROC-ESM 모델의 RCP6.0 시나리오가 -60.8%로 가장 큰 감소율을 보였다.

모의된 배출률은 전 지구의 먼지 배출 모의결과와 동일하게 동북아시아지역에서도 20세기말 모델 간의 편차는 $0.50\sim3.72\text{g km}^{-2}\text{mon}^{-1}$ 으로 컸다. 21세기말 모델 간의 편차는 $0.50\sim3.71$ (RCP2.6), $0.50\sim3.90$ (RCP4.5), $0.50\sim3.68$ (RCP6.0), $0.49\sim3.76$ (RCP8.5)으로 전 지구와 마찬가지로 20세기말 대비 21세기말 모델간의 편차는 증가하였다. 모델 별로 증가, 감소 모의경향은 다르나 대체적으로 감소를 모의하고 있으며, 이는 변동성이 큰 일부 모델 값에 영향을 받은 것으로 보인다(Figure 6). 그 중에서 MIROC-ESM 모델의 영향이 가장 큰 것으로 판단된다(Figure 5).

21세기말 먼지는 4종의 RCP 시나리오에 대해 대체적으로 감소를 전망하고 있으며, 앙상블 평

Figure 5. Changes (%) in annual mean emission rate of mineral dust over North-East Asia at the end of 21st century (2071~2100) for four RCPs relative to the present-day period (1971~2000).

Figure 6. Time series of annual mean emission rate of mineral dust ($\text{g km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$) deviated from the mean value of 1860~2100 over North-East Asia. Shaded areas represent the ensemble spreads of 9-year moving averaged time series and solid line means ensemble mean.

균에서 RCP2.6 시나리오의 경우 감소 경향이 작고 나머지 3종의 RCP 시나리오의 경우는 2060년 이후 감소가 뚜렷하다. 5% 유의수준에서 4종의 RCP 시나리오 전부 20세기말 대비 21세기 변화율이 유의하였고 평균값과 더불어 분산 역시 21세기말로 갈수록 더욱 커지는 경향을 보였다. 앞선 Figure 2에서 미래 배출량의 증감 경향에 대한 모델간의 분산은 컸다. 특히 감소경향을 보이는 모델들의 감소율은 증가율보다 컸다. 이러한 21세기말 전망에 대한 양상별 평균의 결과는 분산 폭을 감안할 때 미래 전망결과에 대한 불확실성이 큰 것으로 판단된다.

대부분 모델들은 Xuan and Sokolik(2002)에서 언급된 것과 같이 40°N 위도대를 따라 위치한 90-

110°E의 고비사막을 포함한 건조지역의 먼지 배출 분포를 잘 모의하고 있다. 대체적으로 모든 모델이 주요 배출지역에서 감소를 모의하며 상세규모로 배출률의 증가, 감소 경향이 일부 모델에서 모의되고 있다.

3) 동북아시아 먼지 배출률의 월별 변화

Figure 7에서 각 모델의 월별 먼지 배출률 절대값은 크게 차이가 났다. 그 중 CSIRO-Mk3.6.0 모델의 절대값이 가장 크고, GISS-E2-H, GISS-E2-R모델의 절대값이 가장 작았다. 4종의 RCP 시나리오에 따른 21세기말 월별 변화량은 20세기말과 거의 동일하게 나타났다. MIROC-ESM 모델을 제외한 모든 모델에서 봄철에 최대값을 보

Figure 7. Monthly variations of dust emission amount ($\text{g km}^{-2} \text{mon}^{-1}$) for 1971~2000 over North-East Asia (30~55°N, 80~140°E) in each model.

이며, MIROC5, MIROC-ESM, MRI-CGCM, CSIRO-Mk3.6.0, CanESM2 5개 모델은 가을철에 2차 극값을 모의하였다. 이는 가을철에 건조해진 토양과 대체적인 추수 시기로 인한 지면의 나지화의 영향으로 인한 것으로 보이며 이는 Littmann(1991)의 선행연구 결과와 일치하였으며, Xuan and Sokolik(2002)의 선행연구에서 정의한 3가지 타입의 지역 중 80~100°E, 35~45°N 지역에서 보이는 변화와 동일하다.

20세기말 봄철이 여름철에 비해 배출률이 더 크며 이는 21세기말 4종의 RCP 시나리오와 동일하게 나타난다. 이는 선행연구의 모델결과와 일치하였으며(Xuan and Sokolik, 2002), 봄철 3, 4, 5월 중에서 4, 5월이 3월에 비해 많은 양의 먼지를 배출하였다. 이로부터 앞선 Figure 5에서 HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, MIROC5, MIROC-ESM 모델의 21세기말 동북아시아지역 연간 배출률 감소는 1,2차 최대 배출률을 보이는 봄철과 가을철의 값이 감소한 것에 기인되었음을 알 수 있

다.

4) 동북아시아 4, 5월 먼지 배출률

앞서 살펴 본 바와 같이 4, 5월이 봄철 중 많은 양의 먼지를 배출함에 따라 4, 5월 동북아시아의 먼지 배출률을 살펴 보았다. 21세기말 동북아시아지역 봄철 먼지 배출량은 RCP6.0과 RCP8.5 시나리오의 경우 다수의 모델이 감소를 전망하였다(Figure 8). RCP2.6 시나리오의 경우 6개 모델이 증가를, 5개 모델이 감소를 전망하였고, RCP4.5 시나리오의 경우 각각 6개 모델이 증가, 감소를 전망하였다. RCP6.0의 경우 3개 모델이 증가를 7개 모델이 감소를 전망하였으며, 또한 RCP8.5 시나리오의 경우 4개 모델이 증가를 8개 모델은 감소를 전망하였다.

모델 별로 살펴보면, HadGEM2-AO 모델의 두 멤버가 4종의 RCP 시나리오에 대해 증가를 HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, GISS-E2-H, MIROC5, MIROC-ESM 5개 모델은 4종의

Figure 8. Changes (%) in April-May emission rate of mineral dust over North-East Asia at the end of 21st century (2071~2100) for four RCPs relative to the present-day period (1971~2000).

RCP 시나리오에 대해 감소를 전망하였다. 그 외, GISS-E2-R 모델은 RCP6.0, MRI-CGCM3 모델은 RCP8.5 시나리오를 제외한 나머지 3종의 RCP 시나리오에 대해 증가를, CSIRO-Mk3.6.0 모델은 RCP4.5를 제외한 나머지 3종의 RCP 시나리오에 대해 감소를 전망하였다. 본 연구에 사용된 모델들의 20세기말 대비 21세기말 먼지 배출률의 증가는 $-60.4 \sim 23.1\%$ 로 다양한 결과를 나타냈다. MRI-CGCM3 모델이 RCP4.5 시나리오에서 $+23.1\%$ 로 가장 큰 증가를, MIROC-ESM 모델의 RCP6.0 시나리오가 -60.4% 로 가장 큰 감소폭을 보였다.

21세기말 먼지는 4종의 RCP 시나리오에 대해 연평균과 마찬가지로 대체적으로 감소를 전망하고 있으며, RCP2.6과 RCP6.0 시나리오가 감소율이

가장 작고 RCP8.5시나리오가 감소율이 가장 크다. 5%유의 수준에서 RCP4.5 시나리오의 20세기말 대비 21세기 변화율만이 유의하게 분석되었다.

봄철 북동아시아 지역의 편차는 20세기말 $1.18 \sim 5.88 \text{ g km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$, 21세기말 $1.05 \sim 5.72$ (RCP2.6), $1.03 \sim 5.99$ (RCP4.5), $0.66 \sim 5.78$ (RCP6.0), $1.00 \sim 5.59$ (RCP8.5)로 모델간의 편차가 매우 컸다. 이는 앞서 살펴본 Figure 6의 연평균결과보다 더 큰 편차를 보였다. 21세기말에 변동폭이 큰 모델로는 RCP4.5 시나리오의 경우 MRI-CGCM3 모델과 HadGEM2-CC 모델이며, RCP8.5 시나리오의 경우에는 HadGEM2-CC 모델로 분석되었다(Figure 9).

Figure 9. Time series of April-May emission rate of mineral dust ($\text{g km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$) over North-East Asia deviated from the mean value of 1860~2100. Shaded areas represent the ensemble spreads of 9-year moving averaged time series and solid line means ensemble mean.

Figure 10. Ensemble mean of changes in annual dust emission rate ($\text{g km}^{-2} \text{mon}^{-1}$) for 2071~2100 deviated from 1971~2000 for RCPs, but for the number of models above 5.

5) 지역별 먼지 배출률 변화

먼지 배출에 대해 지역별로 21세기말 어떤 경향을 전망하는지 보기 위해 Figure 4의 먼지 배출률 변화 경향이 모델에서 과반수(5개) 이상 동일한

경우만 단순 평균하였다(Figure 10). 즉 한 격자에서 동일한 부호 값을 가지는 모델이 과반수 이상인 경우에만 배출률을 단순 평균 해주었고, 과반수를 넘지 못하는 경우에는 격자의 값을 0값으로

처리 해주었다. 그 결과 먼지의 주요 배출지역인 북아프리카, 중동, 인도, 중앙아시아의 건조 지역에서 배출물의 감소가 모의되고, 유럽, 북미, 남미, 남아프리카 일부 지역은 증가가 모의된다. 4종의 RCP 시나리오에 대해 분포가 모두 유사하며 호주는 RCP 시나리오마다 지역별 변화가 다르게 나타났다. 하지만 북아프리카와 중동지역의 대체적인 감소경향은 대규모지역에서 균질하게 나타나기 보다 지역적으로 증가, 감소 경향이 혼재되어 있어 매우 큰 변동성이 나타난 것으로 보인다. 이에 따른 향후 상세 지역규모의 추가 연구가 필요하다. 이는 P'erez *et al.* (2011)의 산발적, 공간적으로 비균질하게 작은 규모에서 먼지배출이 임계점을 넘은 경우에만 발생 한다는 결과를 반영한다.

6) 나지면적비율 변화와 먼지배출률 변화

먼지의 배출과정은 지면상태에 민감하다. Mahowald *et al.* (2006)에 따르면 대기 중 온실가스 증가와 온난화에 따른 미래 식생성장이 활발해지면서 먼지 배출이 감소할 것이라고 전망하였다. 토양이 건조하고 식생이 거의 없는 지역이 주요 배출원지역임을 고려할 때 미래 먼지 배출률 변화는 배출원 지역의 지표조건 및 면적 변화와 연관되어 있을 것으로 보인다. 이에 나지 면적 비율의 변화를 통해서 배출률 변화 경향을 이해하고자 하였다. 각 모델의 21세기말 나지 면적 변화에 대한 공간분포는 4종의 RCP 시나리오에 대해서 전반적으로 유사하다. 그러나, 모델마다 지면과정과 피복조건이 다르기 때문에 나지 면적 변화의 공간분포와 정량적 변화율은 모델마다 차이가 크게 나타난다.

전 대륙에서 나지 면적 변화 감소가 뚜렷한 것은 HadGEM2계열의 모델들이며 지역별로 북아프리카, 중동, 인도, 중앙아시아, 호주에서 각

모델 별로 다양한 변화경향과 변화폭을 보였다. 전 지구 연평균 먼지 배출률과 나지 비율을 비교한 결과 HadGEM2-ES, HadGEM2-CC는 21세기말 감소하는 경향을 보였다(Figure 11). 그러나 GISS-E2-H, GISS-E2-R, MIROC5, MIROC-ESM 모델의 21세기말 경향은 일부 시나리오에서만 동일하였다(Figure 11). 전 지구 연간 변화에서 GISS-E2-H 모델의 RCP8.5, GISS-E2-R 모델의 RCP4.5/6.0, MIROC5 모델의 RCP2.6/4.5, MIROC-ESM 모델의 RCP2.6 시나리오에서만 나지 면적과 먼지 배출률 경향이 동일하였다.

북동아시아지역 연간 변화(Figure 12)에서는 GISS-E2-H 모델의 RCP4.5/6.0/8.5, GISS-E2-R 모델의 RCP6.0, MIROC5 모델의 4종의 RCP, MIROC-ESM 모델의 RCP2.6/4.5 시나리오에서 먼지 배출률과 나지 비율의 증가, 감소 경향이 동일하였다. MIROC-ESM 모델의 RCP8.5 시나리오에서 북동아시아 지역의 나지 비율은 증가하나, 먼지 배출률은 감소하는 상반된 결과에 대해서는 추후 연구가 필요할 것으로 보인다.

분석 결과 GISS-E2계열 모델들과 MIROC 계열 모델들의 먼지 배출률 변화는 나지 비율 변화로 설명하기 어려우나, HadGEM2계열(HadGEM2-AO 제외) 모델들은 나지 비율 변화로 일부분을 설명할 수 있다.

7) 토양수분 변화와 먼지 배출률 변화

Liu *et al.* (2004)에 따르면 배출원지역인 건조 및 반 건조 지역의 식생은 토양 수분에 매우 민감하며, 토양수분의 증가는 표면을 먼지 배출이 제한되는 특정 토양으로 조장한다. 따라서 이번 장에서는 토양수분의 변화를 통해서 배출률 변화 경향을 이해하고자 하였다.

각 모델의 21세기말 토양수분 변화에 대한 공간분포는 4종의 RCP 시나리오에 대해서 전반적으

Figure 11. Future changes in global mean annual dust emission (left) and bare soil fraction (right) deviated from the mean value of 1971~2000 for RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5.

Figure 12. Same as in Fig. 11, but for the North-East Asia region.

Figure 13. Time Series of soil moisture(kg m^{-2}) in upper layer over the region of $35\sim 50^{\circ}\text{N}$, $80\sim 100^{\circ}\text{E}$ deviated from the mean value of 1860~2100. Shaded areas represent the ensemble spreads of 9-year moving averaged time series and solid line means ensemble mean.

로 유사하다. 앞선 Figure 4와 유사한 양상을 보이며 배출률이 증가한 지역은 건조해 졌으며, 감소한 지역은 습윤해 졌다. 나지 비율과 마찬가지로 HadGEM2 계열의 모델들이 감소가 뚜렷하게 보였으며, 지역별로 살펴 보면 북아프리카, 동북아시아, 인도, 호주의 일부 지역에서 대체로 토양이 습윤해 졌으며 북아메리카 남부와 남아메리카 북부, 남아프리카, 호주의 일부 지역에서 대체로 토양이 건조해졌다.

5% 유의 수준에서 유의한 결과를 나타낸 동북아시아의 연간 4종의 RCP 시나리오와 동북아시아의 봄철 RCP4.5 시나리오에 대하여 먼지 배출이 감소 하는 지역(연간: $35\sim 50^{\circ}\text{N}$, $80\sim 100^{\circ}\text{E}$ /봄철: $30\sim 50^{\circ}\text{N}$, $80\sim 100^{\circ}\text{E}$)을 설정하였고 이 지역에 실제로 토양 수분이 증가하는지를 알아 보았다. 일부 모델에서만 지역적 분포가 일치하는 경

향을 보였으나 양상불 평균 시계열에서의 동북아시아 연간 토양수분은 4종의 RCP 시나리오에 대해 20세기말 대비 21세기 말 증가하는 경향을 보였다. RCP2.6 시나리오의 경우 뚜렷한 증가 추세를 보였으며, RCP 4.5/6.0 시나리오의 경우 2050년을 기준으로 급격하게 감소하는 추세를 보였으나 2080년을 기점으로 다시 증가하는 추세를 보였다(Figure 13).

동북아시아의 봄철 RCP4.5 시나리오의 경우 20세기말 대비 21세기말 감소하는 경향을 보였다. 따라서 봄철 먼지 감소에는 토양 수분보다는 다른 요인이 결정적으로 작용한 것으로 보이며 선행연구(Goudie and Middleton, 1992; Littmann *et al.*, 1991; Qian *et al.*, 2002)에 언급된 것처럼 저기압 활동의 대기순환에 대한 추가 연구가 필요하다.

4. 요약

10개의 CMIP5 모델 앙상블 평균자료를 이용하여 4종의 RCP에 따른 21세기말 먼지 배출량의 변화를 전 지구와 북동아시아 지역으로 나누어 분석해 보았다.

각 모델들은 북아프리카, 중동, 인도, 중앙아시아의 건조지역으로 알려진 주요 배출원의 공간분포를 잘 모의하고 있었다. 전 지구 연간 먼지 배출량은 20세기말 $0.25 \sim 1.36 \text{ g km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ 로 모델간의 편차가 컸고, 21세기 말에는 모델간의 분산이 더 커졌다. 이는 전 지구 먼지 배출물 모의에 있어 모델간에 편차가 매우 크다는 기존 선행연구 결과와 일치하였다(Textor *et al.*, 2006, Huneceus *et al.*, 2011). 모델마다 미래 전 지구 먼지 배출량의 변화경향은 다양하여 앙상블 자료에 근거한 증가, 감소에 대한 변화 경향은 유의하지 않은 것으로 분석되었다.

동북아시아 지역의 연간 먼지 배출량의 공간분포는 4종의 RCP 시나리오 대해 모두 유사 하였으며 전 지구 연간 변화와 마찬가지로 모델간의 편차가 크다. 앙상블 평균값을 보면 4종의 RCP 시나리오에 대해 21세기말 모두 5% 유의수준에서 감소경향이 전망된다. 이는 계절적으로는 배출물이 최대를 보이는 봄철의 큰 감소와 더불어 2차 극값을 보이는 가을철의 감소로 인한 것으로 보이며, 공간적으로는 북아프리카, 중동, 인도, 중앙아시아 건조지역의 주요 배출원의 먼지 배출물 감소가 주된 원인으로 보인다.

봄철 가장 많은 양의 먼지를 배출하는 4,5월의 동북아시아 먼지 배출량은 21세기말 4종의 RCP 시나리오 대해 연평균과 마찬가지로 대체적으로 감소를 전망하였다. 하지만 그 중 RCP4.5 시나리오의 변화만이 5% 유의수준에서 유의하였다.

Mahowald *et al.* (2006)에서 언급된 먼지 배출

량의 미래 변화와 온난화에 따른 식생성장의 연관성을 살펴보기 위해 지면조건으로 20세기 말 대비 21세기말 나지 면적변화율과 토양수분 변화율을 조사하였다. 21세기말 HadGEM2-ES, HadGEM2-CC 모델의 먼지 배출률과 나지 면적 비율이 4종의 RCP 시나리오에 대해 경향이 일치하였고, GISS-E2-H, GISS-E2-R, MIROC5, MIROC-ESM 모델의 경우 RCP6.0 시나리오만 경향이 일치하였다. 또한 HadGEM2-AO 모델의 경우 나지 면적이 연간 동일하게 고정되어 있어, 미래 먼지 배출의 경향을 이해하기 위해서는 추가 분석이 필요한 것으로 판단된다.

토양 수분의 경우 먼지 배출량이 감소하는 동북아시아지역에서 토양수분이 증가하는 양상을 보이며 일부 모델에서는 지리적 변화 경향이 일치하였다. 5% 유의수준에서 유의한 결과를 나타낸 동북아시아 연간 먼지 배출은 토양수분과 관계가 큰 것으로 나타났으나 봄철 먼지 배출은 토양수분과의 관계 이외에 다른 변수들과의 관계가 더 큰 것으로 판단된다.

분석 방법 중 앙상블 평균시 배출량을 단순 평균하여 분석하였다. 이 연구에서 사용된 모델들의 배출량 연간 변동폭이 모델마다 달라 큰 편차가 나타난 것으로 보아 향후 이를 고려한 가중치를 둔 앙상블 방법에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

사사

본 연구는 기상청 국립기상연구소 주요사업 'NIMR-2012-B-2'의 일환으로 수행되었습니다.

주

- 1) CMIP5: The fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project.
- 2) 제어 실험 (pre-industrial control): 1860년의 온실가스 농도로 고정 한 기후변화모델을 적분하여 대기-해양-해빙을 준평형 상태로 안정화 시키는 작업.
- 3) $\frac{(21세기말\ 먼지배출률)-(20세기말\ 먼지배출률)}{(20세기말\ 먼지배출률)} \times 100$
- 4) $y_i = (x_i - \frac{\sum_{1860}^{2100} x_i}{(2100-1860+1)})$ 의 값의 9-moving average.)
 x_i = i 년도의 배출률, y_i = i 년도의 아노말리값, $i=1860 \sim 2100$ 년

참고문헌

- Balkanski, Y., Schuiz, M., Claquin, T., and Guibert, S., 2007, Reevaluation of Mineral aerosol radiative forcings suggests a better agreement with satellite and AERONET data, *Atmos. Chem Phys.*, 7, 81-95.
- Bergametti, G., 1998, Mineral aerosols: Renewed interest for climate forcing and CAS, Chinese Desertification Map, in Resource and Environment Data-base. *Chinese Academy of Sciences, Beijing 1998*, 1, 13-17.
- Duce, R. A., 1995, Sources, distributions, and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate, *Aerosol Forcing of Climate*, 43-72.
- Eun-Hee Lee, Hee-Jin In, Soon-Ung Park, 2003, Relevance for weather conditions and dust generation on generated area in spring 2002, *Atmosphere*, 13.1: 246-247 (in Korean).
- Goudie, A. S. and Middleton, N. J., 1992, The changing frequency of dust storms through time, *Clim. Change*, 20, 197-225.
- Huneus, N., Schulz, M., Balkanski, Y., Griesfeller, J., Prospero, J., Kinne, S., Bauer, S., Boucher, O., Chin, M., Dentener, F., Diehl, T., Easter, R., Fillmore, D., Ghan, S., Ginoux, P., Grini, A., Horowitz, L., Koch, D., Krol, M. C., and Landing, W., 2011, Global dust model intercomparison in AeroCom phase I, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 7781-7816.
- Jickells, T. D., An, Z. S., Andersen, K. K., Baker, A. R., Bergametti, G., Brooks, N., Cao, J. J., Boyd, P. W., Duce, R. A., Hunter, K. A., Kawahata, H., Kubilay, N., laRoche, J., Liss, P. S., Mahowald, N., Prospero, J. M., Ridgwell, A. J., Tegen, I., and Torres, R., 2005, Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate, *Science*, 308(5718), 67-71.
- Jong-Jae Lee and Cheol-Hee Kim, 2008, Characteristics of dust-generating from yellow dust generated area of recently - analysis of dust generation trend since 2002, *Korea Meteorological Society*, 18(4), 493-506 (in Korean).
- Kinne, S. and Pueschel, R., 2001, Aerosol radiative forcing for Asian continental outflow, *Atmos. Environ.*, 35(30), 5019-5028.
- Littmann, T., 1991, Dust storm frequency in Asia: climatic control and variability, *International Journal of Climatology*, 11, 393-412.
- Liu, X., Yin, Z. Y., Zhang, X., Yang, X., 2004, Analyses of the spring dust storm frequency of northern China in relation to antecedent and concurrent wind, precipitation, vegetation and soil moisture conditions, *Journal of geophysical research*, 109(D16), D16210.
- Mahowald, N. M., Yoshioka, M., William, D., Andrew, J., David, W., and Danielle, B., 2006, Climate response and radiative forcing from mineral aerosols during the lastglacial maximum, pre-industrial, current and doubled-carbon dioxide climates, *Geophys. Res. Lett.*, 33.
- Mahowald, N. M., Engelstaedter, S., Luo, C., Sealy, A., Artaxo, P., Benitez-Nelson, C., Bonnet, S., Chen, Y., Chuang, P. Y., Cohen, D. D., Dulac, F., Herut, B., Johansen, A. M., Kubilay, N., Losno, R., Maenhaut, W., Paytan, A., Prospero,

- J. A., Shank, L. M., and Siefert, R. L., 2009, Atmospheric Iron Deposition: Global Distribution, Variability, and Human Perturbations, *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 1, 245-278.
- Martin, J. M. and Gordon, R. M., 1988, Northeast Pacific iron distributions in relation to phytoplankton productivity, *Deep-Sea Res.*, 35, 177-196.
- National Institute of Meteorological Research, 2011, *Climate change scenario produced by NIMR in preparation of IPCC 5th assessment report* (in Korean).
- Pérez, C., Haustein, K., Janjic, J., Jorba, O., Huneeus, N., Baldasano, J. M., Black, T., Basart, S., Nickovic, S., Miller, R. L., Perlwitz, J. P., Schulz, M., and Thomson, M., 2011, Atmospheric dust modeling from meso to global scales with the online NMMB/BSC-Dust model – Part 1: Model description, annual simulations and evaluation, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 13001-13027.
- Painter, T. H., Barrett, A. P., Landry, C. C., Neff, J. C., Cassidy, M. P., Lawrence, C. R., McBride, K. E., and Farmer, G. L., 2007, Impact of disturbed desert soils on duration of mountain snow cover, *Geophysical Research Letter*, 34(12).
- Qian, W. and Y. Zhu, 2001, Climate change in China from 1880 to 1997 and its impact on the environmental condition, *Clim. Change*, 50, 419-444.
- Ridgwell, A. J., 2002, Dust in the Earth system: The biogeochemical linking of land, air and sea, *Phil. Trans. R. Soc. Lond*, A360, 2905-2924.
- Sang-Keun Song, Yoo-Keun Kim, and Ju-Hee Jung, 2004, Research of quantitative analysis and Meteorology relevant for yellow dust phenomenon in the spring, fall of 2002, *Korea Meteorological Society spring conference in 2004*, 88-89 (in Korean).
- Sokolik, I. N. and O. B. Toon, 1996, Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols, *Nature*, 381, 681-683.
- Sokolik, I. N., Winker, D., Bergametti, G., Gillette, D., Carmichael, G., Kaufman, Y., Gomes, L., Schuetz, L., and Penner, J., 2001, Introduction to special section on mineral dust : outstanding problems in quantifying the radiative impact of mineral dust, *Journal of Geophysical Research*, 106, 18015-18028.
- Tagliabue, A., Bopp, L., and Aumont, O., 2009, Evaluating the importance of atmospheric and sedimentary iron sources to Southern Ocean biogeochemistry, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L13601.
- Tegen, I., 2003, Modeling the mineral dust aerosol cycle in the climate system, *Quaternary Sci. Rev.*, 22 (18-19), 1821-1834.
- Textor, C. *et al.*, 2006, Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within AeroCom, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 1777-1813.
- Xuan, J. and Sokolik, I. N., 2002, Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China, *Atmospheric Environment*, 36, 4863-4876.
- Zhao, C., Chen, S., Leung, L. R., Qian, Y., Kok, J., Zaveri, R., and Huang, J., 2013, Uncertainty in modeling dust mass balance and radiative forcing from size parameterization, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 13, 19649-19700.