



논문

기상청 황사·연무통합예측모델의 황사발원지역 최신화에 관한 연구

A Study on the Updating of Asian Dust Source Regions in Asian Dust Aerosol Model Version 3 (ADAM3) in KMA

이우정*, 강미선

국립기상과학원 예보연구부

Woojeong Lee*, Misun Kang

Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Seogwipo, Republic of Korea

접수일 2023년 3월 17일
수정일 2023년 4월 18일
채택일 2023년 5월 3일

Received 17 March 2023
Revised 18 April 2023
Accepted 3 May 2023

*Corresponding author
Tel : +82-(0)64-780-6567
E-mail : lwj@korea.kr

Abstract The Asian dust source region in the Asian Dust Aerosol model version 3 (ADAM3) has been updated using the 3-hourly reporting Global Telecommunication System observation data from 1997 to 2020 at the observation stations in the Asian dust source region. The horizontal distribution of the total number of dust rise occurrence days from 1997 to 2020 has been significantly increased (decreased) at the 99% confidence level and more (less) than 14 days is used as the renewed (deleted) dust source regions. As a result, some areas of the Northern part of the Mongolia and northwest side of Gobi desert in Mongolia (North east China and Loess plateau in North China) has been added (deleted) from Asian dust source region in ADAM3. Asian dust source regions of the ADAM3 were designed based on the re-delineation through this study. The modified Asian dust source regions (EXP) were compared to the original ADAM3 (CTRL) through two Asian dust events which were observed in Korea peninsula in April 2020 and March 2021. The experiments showed that modeled dust emission is somewhat increased (reduced) by at or near the added (deleted) source regions. As a result, EXP reduced the mean absolute error and positive bias by 1.46% and 4.6% compared to CTRL. This study is expected to be the basis for research to re-delineate the Asian dust source region, consequently connecting to the improvement of dust emission modeling and forecasting in ADAM3.

Key words: Asian dust source region, ADAM3, Asian dust numerical modeling

1. 서론

황사는 자연적으로 발생하는 대표적인 오염물질로 타클라마칸 사막, 황토고원, 내몽골지역의 고비 사막, 중국 북부와 같은 매우 건조 또는 반건조한 지역에서 주로 발생하며 (Park *et al.*, 2021; Husar *et al.*, 2001), 중위도의 강한 북서기류에 의해 중국 동부, 한반도, 일본의 동쪽으로 이동하고, 장거리 이동하는 경우 다른 대륙에서 관측되기도 한다 (Uno *et al.*, 2009; Husar *et al.*, 2001). 사막면지의 조대입자는 잠재적으로 독성이 있는 것으로 간주되며 (Mori *et al.*, 2003), 이 조대입자

는 인체에 알레르기 반응을 일으킬 수 있고, 호흡기 염증의 발생률을 증가시킬 수도 있다 (Honda *et al.*, 2017; Ichinose *et al.*, 2006).

기상청에서는 황사로 인해 한 시간 평균 PM₁₀ 농도가 800 µg/m³ 이상으로 두 시간 이상 지속될 것으로 예상될 때, 황사경보특보를 발표하여 (Shim *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2013), 우리나라 황사발생에 따른 행동요령을 국민들에게 전파한다. 발원지에 설치된 황사 관측장비의 PM₁₀ 농도, 기상위성영상 등을 실시간 분석하고, 수치모델에서 예측한 황사발생 및 이동경로 예측 결과에 예보관들의 지식과 경험을 더하여 최종

적인 황사예보가 이루어진다. 수치예측모델은 예보관들의 최종 판단에 밀그림이 되기 때문에, 수치모델의 예측성능에 따라 예보의 정확도는 크게 달라질 수 있다(Tudor *et al.*, 2013; Shuman, 1978).

기상청은 한반도에 유입되는 황사예측을 위해 우리나라를 포함한 동아시아 영역으로 황사예측모델(ADAM, Asian Dust Aerosol Model)을 개발하여 2007년부터 황사예보에 활용하고 있다(Park *et al.*, 2010; Lee and Park, 2005). 그러나 황사뿐만 아니라 미세먼지로 인한 연무가 빈번하게 발생함에 따라 황사와 함께 연무를 예측할 수 있는 모델의 필요성이 대두되었고, 이에 따라 황사와 연무의 확산예측이 모두 가능하도록 황사·연무통합예측모델(ADAM3, Asian Dust Aerosol Model version III)을 개발하였다(Lim *et al.*, 2021; Ryoo *et al.*, 2020a). 이 모델은 미국환경보호국의 CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System)에 황사발원알고리즘을 적용하여 개발되었으며(Park *et al.*, 2010; Park and In, 2003), 2016년부터 황사와 연무 확산예측을 위해 기상청 현업황사예측모델로 활용되어 오고 있다. ADAM3는 모래(sand), 점토(clay), 양질토(loam)의 비율에 따라 Gobi, Sand, Loess, Mixed (Tibet)의 네 가지로 황사발원지의 토양형태를 구분하고 있으며(Ryoo *et al.*, 2020b; Park *et al.*, 2010; Park, 2002), 모델에서 정의된 황사발원지에서 발원을 위한 일정 조건이 충족될 때 황사발원이 이루어지도록 설정되어 있다(Park *et al.*, 2010).

황사의 발원은 발원지에서 바람, 지면온도, 강수량 등의 기상변수에 의해 크게 영향을 받는다(Guan *et al.*, 2017; Lim and Chun, 2006). 최근 지구온난화에 따른 기후변화는 전 지구 또는 지역적으로 기온과 강수 패턴에 큰 영향을 미치고 있어(Irwandi *et al.*, 2023; Jiang *et al.*, 2017), 황사발원지에서 발원빈도경향이 과거와 비교하여 달라지고 있다(Li *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022; Park *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2015; Hara *et al.*, 2006). 또한 사막화 방지를 위한 중국의 대규모 조림사업 등의 노력으로 발원지역에서 식생의 분포나 비율이 변하고 있어(Chen *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2016a, 2016b;

Deng *et al.*, 2010), 황사발원지역과 토양형태 또한 유의미하게 변하고 있다(Li *et al.*, 2022; Guan *et al.*, 2017; Hara *et al.*, 2006).

ADAM3의 황사발원지와 그의 토양형태는 1998년부터 2006년까지 관측된 황사발생빈도(Park *et al.*, 2010)와 37개의 토양 샘플링을 기반으로 정의된다(Park, 2002). ADAM3는 모델에서 정의된 황사발원지에서만 황사가 발원되도록 설정되어 있기 때문에 최근 발원이 되지 않는 격자이지만 모델발원지에 포함되어 있으면, 모델의 황사발원 조건에 의해 황사발원을 일으켜 사용자에게 거짓경보(False Alarm)를 줄 수 있고, 반대로 모델의 발원지에 포함되어 있지 않은 지역에서 발원이 되는 경우, 모델은 황사발원을 일으킬 수 없기 때문에 사용자는 황사발원정보를 놓칠(Miss) 수 있다. 따라서, ADAM3의 모델예측성 향상을 위해 최근 황사발원경향을 반영하여 발원지 지면정보를 최신화할 필요성이 있다. 본 연구에서는 황사발원지의 최근 관측자료를 이용하여 동아시아 황사발원지의 발원경향과 빈도를 분석하고, Regridded Harmonized World Soil Database v1.2 (RHWSO) 자료를 이용하여 새로 추가된 황사발원지의 토양형태를 정의함으로써 모델의 황사발원지역정보를 최신화하였다. 또한, 최신화된 황사발원지를 ADAM3에 적용하고, 황사사례실험을 통해 이로 인한 모델예측성능의 개선 여부를 분석하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 자료

동아시아 황사발원지의 발원경향을 분석하고자 세계기상기구에 보고되는 종관기상실황 관측자료(synoptic observation, SYNOP) 중 황사발원지에서 먼지 발생과 연관되는 현상관측기호인 7번 자료를 이용하였다. 7번은 관측지점이나 그 근처에서 바람에 의해 모래먼지가 공기 중으로 부유할 때 관측자가 기록하는 코드이다. 분석 기간은 1997년 1월부터 2020년 12

월까지 24년간이다.

전 세계 토양 특성을 추정하기 위해, 유엔식량농업 기구, 국제토양정보센터-세계토양정보, 유럽공동연구센터, 중국 과학아카데미 토양과학연구소 등 세계 여러 기관들은 각 기관이 보유한 토양지도, 토양프로파일, 지형 등의 자료를 공유하여 Harmonized World Soil Database v1.2 (HWSD)를 생산하였다(Wieder *et al.*, 2014). 본 연구에서 사용한 RHWS는 HWSD를 0.05° 해상도로 재격자화(regrid)한 것으로 이 자료를 이용하여 최근 발원경향 분석함으로써 새롭게 추가되는 지역의 토양정보를 정의하였다.

2.2 분석 방법

본 연구의 분석 영역은 우리나라에 영향을 주는 주요 황사발원지를 포함하는 70~150°E, 5~60°N의 동아시아지역이다. 최근 황사발원경향을 분석하고자 각 관측지점별, 연별로 현상관측기호 7번의 빈도를 계산하였고, ADAM3 해상도 (25 km)로 재격자화하였으며, 모든 격자에서 분석 기간인 1997년부터 2020년까

지 황사발생빈도의 증감추세를 확인하였다. 시간에 따른 황사발생빈도의 증감을 확인하기 위하여 각 격자에서 만 칸들 시험(Mann-Kendall Trend Test, MK 테스트)을 실시하였다. MK 테스트는 변화경향 추세를 위하여 가장 많이 이용하는 기법 중의 하나로 본 연구에서는 MK 테스트를 거쳐 통계적으로 99% 유의미하게 황사발원빈도가 증가하거나 감소하는 격자를 발원지 최신화를 위한 대상후보로 선정하였다. ADAM3는 최근 9년간 황사발생빈도가 14일 이상인 격자를 황사발원지로 정의하였다(Park *et al.*, 2010). 최근 황사발생빈도경향이 통계적으로 유의미하게 감소하는 격자일지라도 과거에 황사발원이 일어났던 지역(격자)에서 언제든지 황사발원이 일어날 가능성을 배제할 수 없기 때문에, 대상후보 격자 중에서 최근 9년간(2012~2020년) 14일 이상 증가하고 감소하는 격자를 계산하였다. 최종적으로 황사발원지가 추가되는 격자는 황사발생빈도경향이 99% 이상 증가하면서 최근 9년간 14일 이상 발원이 되었던 지역으로 이 두 조건을 모두 만족하면 새로운 발원지로 추가하였고, 황

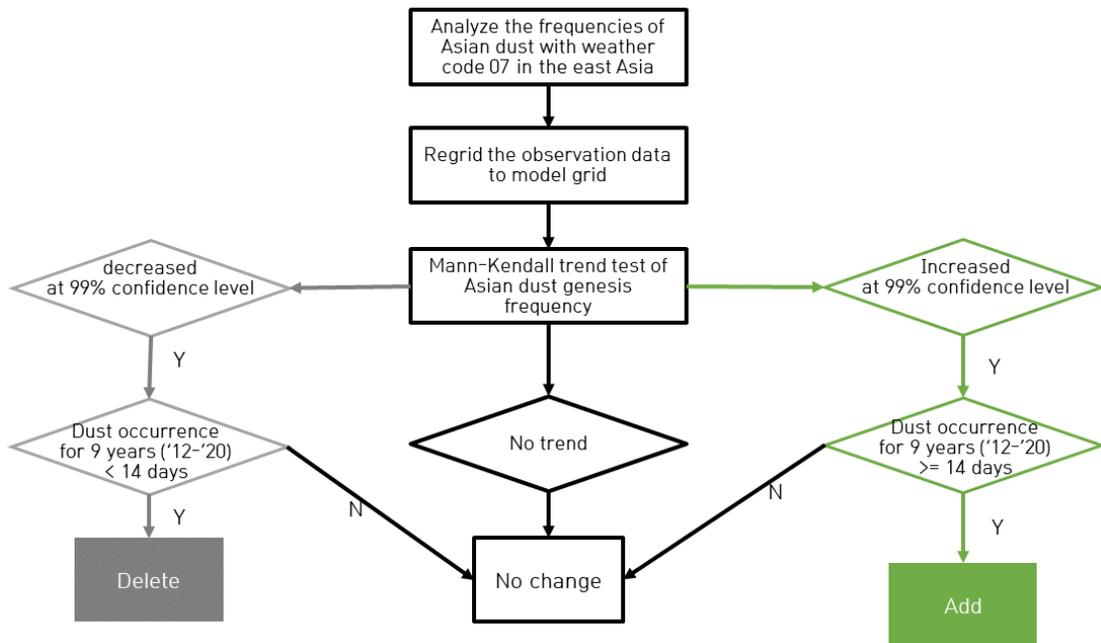


Fig. 1. Schematic flowchart for updating and deleting of Asian dust source region in ADAM3 in this study.

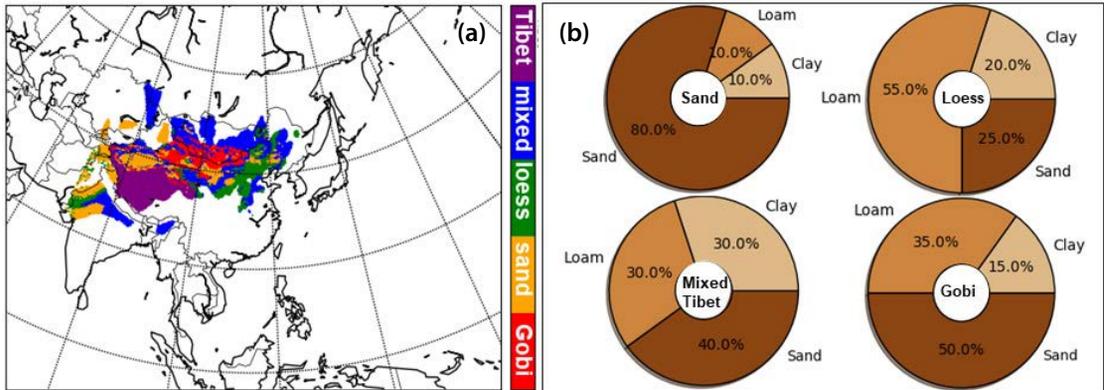


Fig. 2. (a) The spatial distribution of the surface soil types (Gobi, sand, loess, mixed, Tibet) in the Asian dust source region. (b) soil ratio of sand, loam, and clay of the each soil type defined in the ADAM3. Please note that the soil ratio of Tibet is the same in the mixed.

사발생빈도경향이 통계적으로 99% 이상 감소하면서 최근 9년간 14일 미만으로 발원이 되었던 격자는 기존 발원지에서 삭제하였다(그림 1).

본 연구를 통해 새롭게 추가되는 격자의 토양유형을 구분하기 위해 RHWSD에서 제공하는 모래(sand), 점토(clay), 미사질(silt) 정보를 이용하였다. ADAM3는 황사발원지의 토양유형(그림 2(a))을 모래(sand), 점토(clay), 양질토(loam)의 비율을 이용하여 구분한다(그림 2(b), Park and Lee, 2004). 발원지 토양유형 중, Sand의 경우 모래(sand)의 비율이 80% 이상, 점토(clay)와 양질토(loam)는 각각 10%를 차지한다. Gobi의 경우, 모래(sand)의 비율은 50%, 점토(clay)와 양질토(loam)는 15, 35%, Mixed는 모래(sand)가 40%, 점토(clay)와 양질토(loam)는 30%씩 차지하며, Loess의 경우, 양질토(loam)의 비율은 55%, 모래(sand) 25%, 점토(clay)는 20%로 나타난다. RHWSD에서 제공하는 모래(sand), 점토(clay), 미사질(silt)의 정보를 이용하여 양질토(loam)의 비율을 추정할 수는 있지만(USDA, 2017, 1951), 불확실성이 높다(Moreno-Maroto and Alonso-Azcarate, 2022). ADAM3의 발원지 토양유형 중 Sand, Gobi, Mixed의 경우 모래(sand)의 비율이 가장 큰 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 RHWSD에서 제공하는 모래(sand)의 비율을 이용하

여, 그림 2(b)의 모래(sand) 비율을 기반으로 새롭게 추가되는 격자의 토양형태를 다음과 같이 모래(sand)가 80% 이상일 때, Sand, 50% 이상 80% 미만일 때는 Gobi, 40% 이상 50% 미만은 Mixed, 40% 미만은 Loess로 구분하여 정의하였다.

본 연구를 통해 최신화된 황사발원지를 ADAM3에 적용하였고, 기존의 ADAM3 결과와 비교를 통해 그 효용성을 평가하였다. 우리나라에 영향을 주었던 황사사례를 선정하여 모델을 수행하고, 기존 결과와 예측성을 비교하여 분석하였다. 이를 위해 황사발원지와 우리나라 관측지점(그림 3)에서 관측된 PM₁₀과 모델에서 예측한 PM₁₀의 시계열을 비교하였고, 평균편향오차(Mean Bias Error, MBE), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 이용하여 사례별로 통계검증을 수행하였다. 황사발원지와 우리나라의 PM₁₀ 관측지점에서 MBE(식 1)와 RMSE(식 2)는 예측 값과 관측 값의 차이를 나타내는 척도로 0에 가까울수록 예측 값과 관측 값의 수치가 서로 유사하다고 평가된다.

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i) \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i)^2} \tag{2}$$

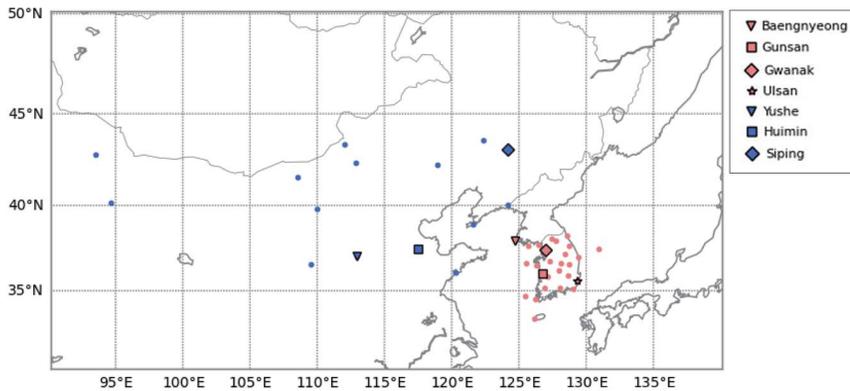


Fig. 3. The spatial distribution of the PM_{10} mass concentration observation stations in KMA-CMA joint monitoring stations (blue dots) and KMA (red dots). The blue inverted triangle, square and diamond marks and red inverted triangle, square, diamond and star marks indicate the observation sites described in this paper.

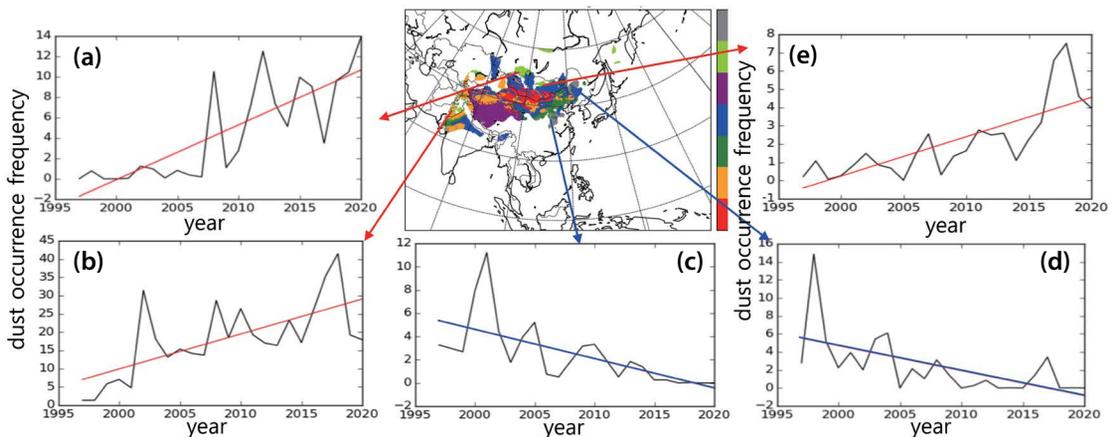


Fig. 4. The spatial distribution of the updated Asian dust source region and (a)~(e) some examples of time series of Asian dust genesis frequency which is significantly increased or decreased from 1997 to 2020 at the 99% confidence level (student's t -test).

위 식에서 N 과 i 는 각 사례별 총 모델수행 횟수, 모델의 각 수행 횟수를 의미한다. f_i 와 o_i 는 각각 i 번째 모델 수행 결과의 PM_{10} 의 예측 값과 관측 값을 의미한다.

3. 결 과

3.1 동아시아 황사발원지역 최신화

그림 4는 분석 영역에서 분석 기간 동안 MK 테스

트를 거쳐 통계적으로 99% 유의미하게 황사발원빈도가 증가하거나 감소하는 격자 중 일부를 그림으로 나타낸 것이다. 그림 4의 시계열 그림에서 검은색 선은 1997년부터 2020년까지 연도별 각 격자의 황사발생 빈도를 나타내고, 빨간색과 파란색 실선은 추세선을 나타낸다. 추세선 분석 결과, 몽골 북부 및 동부, 타클라마칸 사막 남서쪽(파키스탄 동부) 일부 발원지에서 통계적으로 99% 유의하게 발원이 증가하고 있는 것을 알 수 있으며(그림 4(a), (b), (e)), 황토고원과 중국

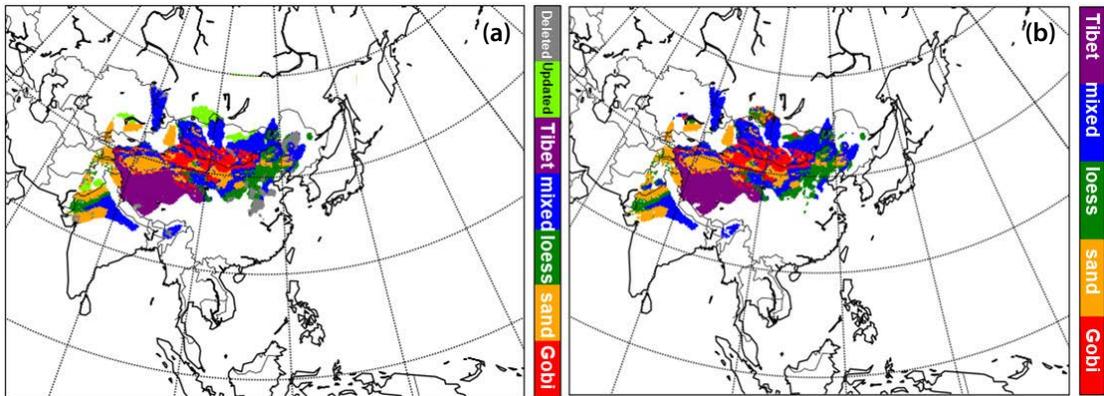


Fig. 5. The spatial distribution of (a) the updated and deleted Asian dust source region and (b) its surface soil types in the ADAM3. The colors in (a) are same as in Fig. 1 but for final updated (light green) and deleted (gray).

만주 일부지역에서 유의하게 발원이 감소하고 있는 것을 알 수 있다(그림 4(c), (d)).

그림 5(a)는 기존의 황사발원지와 더불어 본 연구를 통해 최종적으로 선정된 발원지 추가/삭제 격자를 보여준다. 그림에서 새롭게 추가된 격자 수는 1,301개(연두색)로 전체 모델 영역의 약 1.74%를 차지하며, 삭제된 격자 수는 727개(회색)로 모델에서 정의된 발원지의 약 1.14%를 차지한다. 중국 북동지역 및 중국 동부, 황토고원, 고비 사막 일부에서 황사발원지가 삭제되었으며, 몽골 북부와 동부 그리고 파키스탄 동부 일부 지역에서 새롭게 황사발원지가 추가된 것을 알 수 있다. 그림 5(b)는 최종적으로 최신화된 황사발원지를 나타낸 것으로, 토양형태는 몽골 북부는 Loess, Sand, Gobi, 몽골 서부는 Loess와 Gobi, 파키스탄 동부는 Mixed로 정의된 것을 알 수 있다.

3.2 발원지 최신화 적용 통한 ADAM3 성능 평가

본 연구를 통해 최신화된 황사발원지를 ADAM3에 적용하여 모델을 수행하고 기존의 기상청 현업모델과 비교 검증을 통해 그 효용성을 평가하였다. 이를 위해 다음과 같이 두 가지 실험을 설계하였다. 첫 번째 실험은 기상청 현업 ADAM3에서 정의한 황사발원지를 이용하여 모델을 수행한 결과이며, 황사발원지는 그림 2(a)와 같고, CNTL로 명명하였다. 두 번째 실험은

기상청 현업 ADAM3에서 황사발원지만 최신화한 것으로 모델에서 정의한 황사발원지는 그림 5(b)와 같고, EXP로 명명하였다. 황사발원지 최신화에 따른 모델예측성을 분석하기 위해, 두 실험에 사용된 황사발원지 이외에 초기, 물리, 경계, 기상입력자료 등의 모든 조건은 동일하게 설정하였다.

수치실험은 본 연구를 통해 발원지에 변화가 있었던 곳에서 황사가 발원하여 우리나라에 영향을 주었던 황사 두 가지 사례를 선정하였다. 두 사례 모두 발원지에서 황사가 발원한 날부터 우리나라에 영향 준 날을 모두 포함하도록 기간을 설정하였다. 첫 번째 사례는 만주지역에서 발원하여 우리나라에 영향을 준 사례로 발원지 삭제가 일부 이루어진 만주지역에서 발원하였기 때문에 발원지 삭제로 인한 모델의 예측성을 기존 모델과 비교해 볼 수 있다. 실험 기간은 2020년 4월 19일 00 UTC부터 4월 23일 18 UTC로 4월 20일과 21일 중국 만주지역에서 황사가 발원하여 22일 우리나라 서해안을 중심으로 약 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만으로 영향을 주었다. 두 번째 사례는 우리나라에 5년만에 황사특보가 발표된 사례로 (Kim *et al.*, 2022), 발원지 추가와 삭제가 동시에 이루어진 곳에서 발원하였기 때문에, 발원지 추가와 삭제로 인한 모델의 예측성을 기존 모델과 비교해 볼 수 있다. 실험 기간은 2021년 3월 27일 00 UTC부터 31일 18 UTC로 3월 27

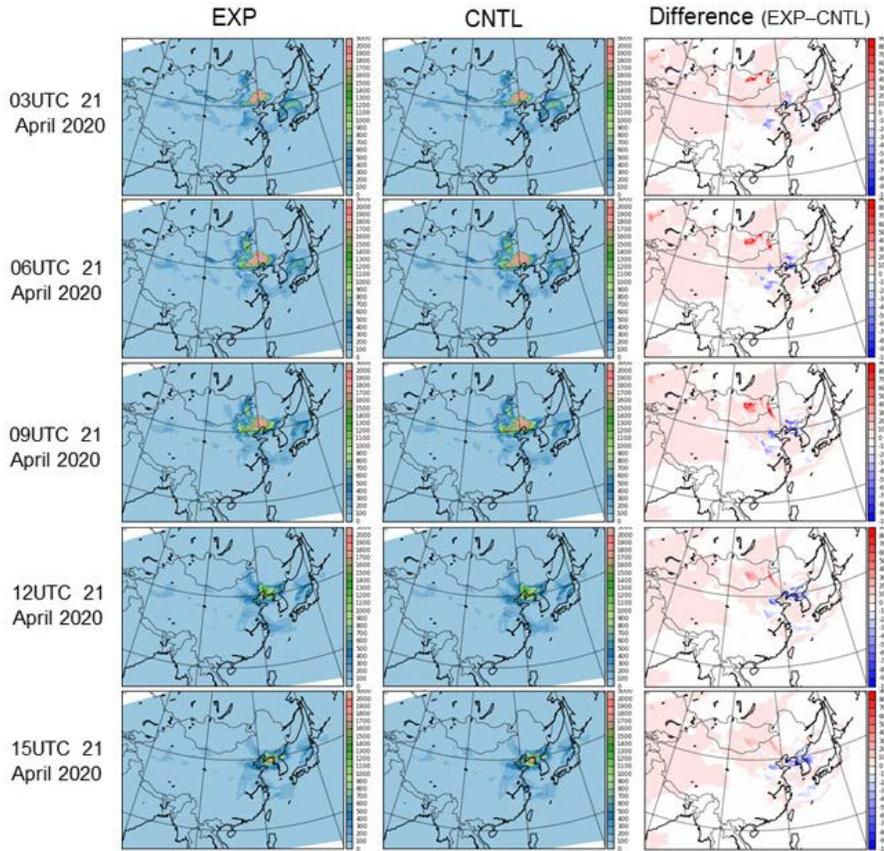


Fig. 6. Spatial distribution of PM_{10} for EXP, CNTL and their difference between EXP and CNTL from 03 UTC to 15 UTC 21 April 2020 (3 hr interval).

일과 28일 중국 북부 및 고비 사막 부근에서 발원하여 3월 29일 우리나라에 전역에 큰 영향을 주었다. 두 사례 모두 실험 기간 동안 CNTL과 EXP 실험에 대해 6시간 간격으로 모델을 수행하였다. 이에 따라, 첫 번째와 두 번째 사례의 모델수행 횟수는 각각 20번이다 (5일×4번/1일).

그림 6은 첫 번째 사례의 4월 21일 03 UTC부터 15 UTC까지 3시간 간격으로 각 모델실험 (CNTL, EXP)에서 예측한 황사 PM_{10} 공간분포를 비교한 것이다. 4월 21일 03, 06 UTC 공간분포에서 두 실험의 차이를 보면 EXP가 CNTL에 비해 만주에서 황사발원이 적게 된 것을 알 수 있으며, 발원이 적게 됨으로써 우리나라로 유입되는 PM_{10} 예측농도 또한 CNTL에 비해 낮

게 모의된 것을 알 수 있다. 그림 7은 황사경유지와 우리나라의 주요관측지점에 대해 4월 19일 00 UTC에 EXP와 CNTL이 예측한 PM_{10} 을 관측 값과 함께 시계열로 비교하고 RMSE와 MBE를 막대그래프로 나타낸 것이다. 그림 7의 (a)와 (b)는 중국 동부지역에 위치한 위서와 후이민 관측지점을 나타내며 CNTL과 EXP 모두 황사발원을 관측에 비해 과대모의한 것을 알 수 있다. 그러나, 위서는 4월 19일과 21일, 후이민은 4월 20일과 21일, EXP 실험이 CNTL에 비해 농도를 다소 낮게 모의했으며, 이로 인해 모델의 RMSE와 MBE가 CNTL에 비해 작아진 것을 알 수 있다. 그림 7의 (c)와 (d)는 우리나라 백령도와 군산에서 각 모델의 예측 PM_{10} 과 관측 값을 비교한 것이다. 그림 7의 (a), (b)와

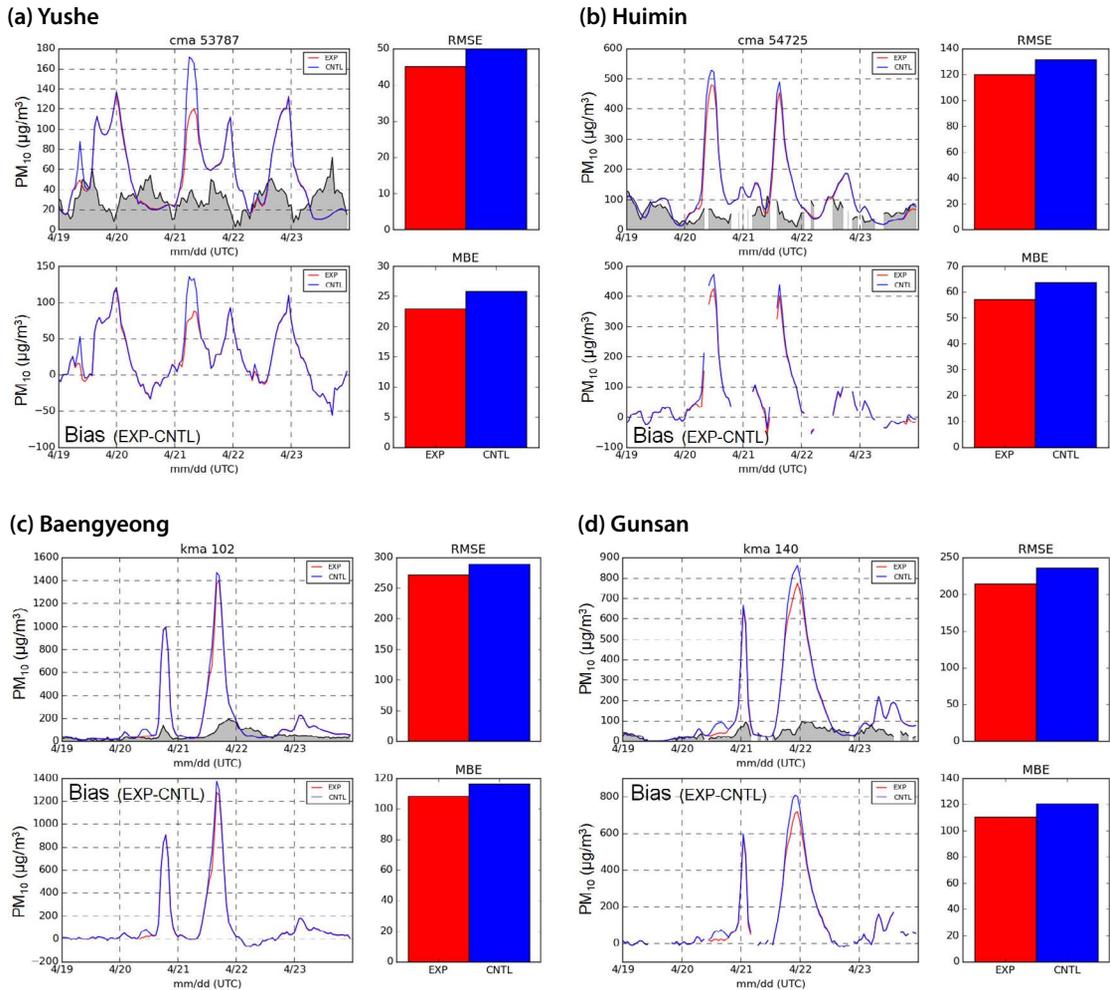


Fig. 7. Time series of PM₁₀ for observation (black solid line with gray shaded), CNTL (blue solid line), EXP (red solid line) at (a) Yushe, (b) Huimin, (c) Baengyeong, and (d) Gunsan. The comparison of root mean square error and mean bias error against forecast lead time for the CNTL and EXP are shown in the right box.

마찬가지로 관측에 비해 CNTL과 EXP 모두 과대모의 하였으나, EXP의 경우 4월 22일 우리나라에 유입되는 황사농도를 CNTL에 비해 다소 낮게 모의한 것을 알 수 있다. 이는 황사발원지 최신화로 인해 만주지역의 발원지가 일부 삭제됨으로써 황사발원을 억제하여 모델의 황사 과대모의를 줄이고 우리나라 PM₁₀ 농도의 양의 바이어스를 줄인 것으로 판단된다.

그림 8은 두 번째 사례에 대한 CNTL과 EXP 실험의 PM₁₀ 공간분포 비교를 보여준다. 3월 27일 12 UTC

의 공간분포를 살펴보면, 본 연구를 통해 발원지 최신화가 이루어진 몽골 동부지역에서 EXP의 황사농도가 CNTL에 비해 다소 높게 모의된 것을 알 수 있다. 이후 전체적으로 황사는 CNTL에 비해 다소 높은 PM₁₀을 예측하며 동쪽으로 이동하지만 그 차이는 크지 않은 것을 알 수 있다. 그림 9는 중국 만주지역의 쓰핑과 중국 동부의 위서에서 관측된 황사와 EXP와 CNTL이 예측한 PM₁₀을 시계열로 비교하고, 각 실험의 RMSE와 MBE를 막대그래프로 나타낸 것이다. 만주지역에

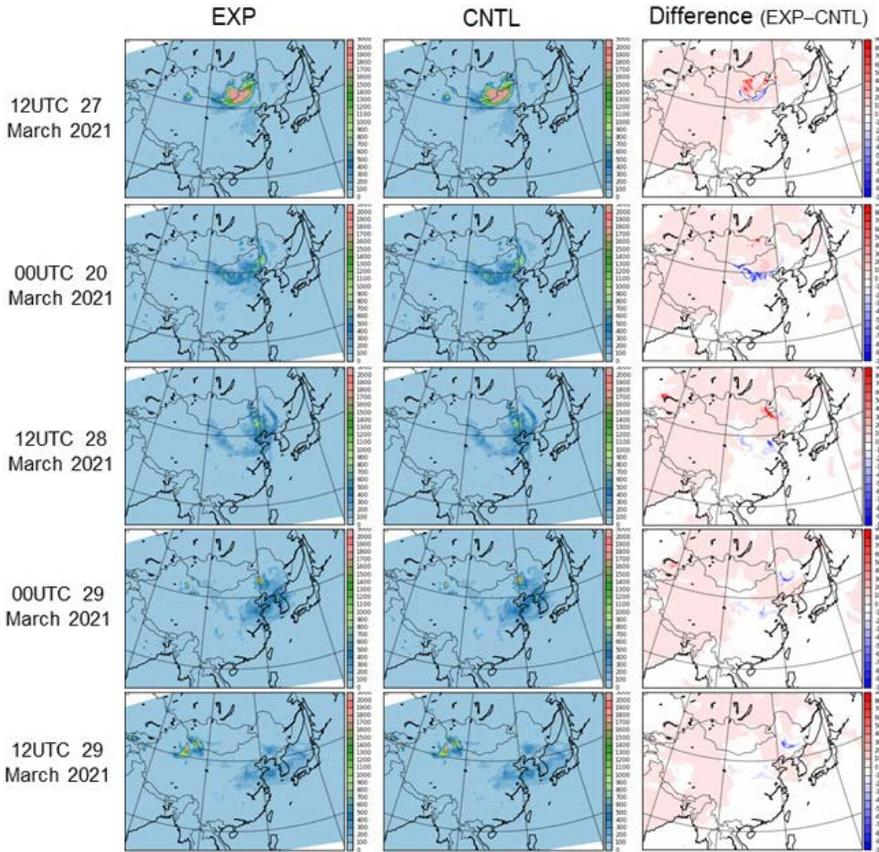


Fig. 8. Same as Fig. 6 but for from 12 UTC 27 March 2021 to 12 UTC 29 March 2021.

위치한 쓰핑의 경우, 3월 28일 00 UTC부터 12 UTC 사이에 EXP가 CNTL에 비해 모델의 황사농도 과대모의를 다소 줄인 것을 알 수 있으며, 이로 인해 bias 차이(모델 값-관측 값) 또한 EXP에 비해 0에 가까워진 것을 알 수 있다. 이는 3월 28일 만주지역에서 이루어진 황사발원 시, CNTL에 비해 관측과 가깝게 발원 모의함으로써 모델의 과대모의를 줄인 것을 알 수 있다. 황사경유지인 위서(그림 8(b))의 경우, EXP가 CNTL에 비해 농도를 다소 적게 모의하나 그 차이는 크지 않은 것을 알 수 있다. 그림 8의 (c)와 (d)는 우리나라 관악산과 울산에서 관측된 PM_{10} 과 각 모델실험 결과를 비교한 것이다. 실험 기간 동안 전반적으로 EXP와 CNTL 간 큰 차이를 보이지 않았으나, 황사의 영향을

벗어난 3월 31일 이후에 EXP가 CNTL에 비해 황사농도가 관측과 가깝게 모의되었다.

각 사례별로 수행된 CNTL과 EXP에 대하여 RMSE와 MBE를 중국과 우리나라 관측자료(그림 2)를 이용하여 검증하였다(표 1). 첫 번째 사례의 경우, RMSE와 MBE 모두 CNTL에 비하여 EXP 실험이 중국과 우리나라에서 모두 낮았으며, PM_{10} 예측 개선율은 중국과 우리나라에서 RMSE 기준 각각 1.46%, 4.6%, MBE 기준 각각 1.95%, 5.73%로 나타났다. 두 번째 실험의 경우, CNTL과 EXP 실험 간의 RMSE와 MBE 모두 비슷하게 나타나 PM_{10} 예측성이 유의미한 차이를 보이지 않았다.

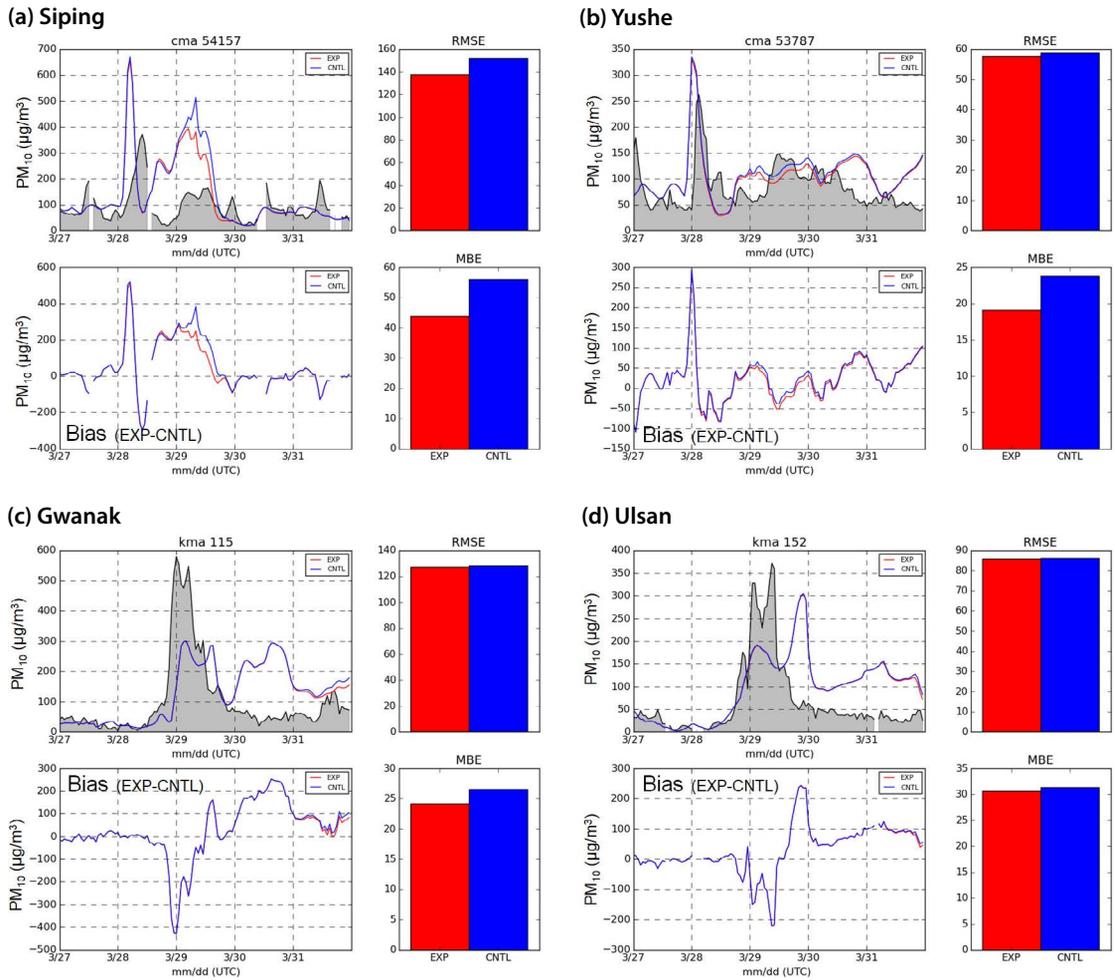


Fig. 9. Same as Fig. 7 but for (a) Siping, (b) Yushe, (c) Gwanak, and (d) Ulsan.

Table 1. The comparison of root mean square error and mean bias error for CNTL and EXP for the Case 1 (00 UTC 19 April 2020 to 18 UTC 23 April 2020) and Case 2 (00 UTC 27 March 2021 to 18 UTC 31 March 2021) in China and Korea.

	Case 1				Case 2			
	RMSE		MBE		RMSE		MBE	
	CNTL	EXP	CNTL	EXP	CNTL	EXP	CNTL	EXP
China	150.9	148.7	63.4	62.2	233.3	234.6	180.4	180.7
Korea	198.5	189.3	83.7	78.9	8.4	4.7	-22.7	-22.9

4. 결 론

기상청 현업 ADAM3에서 사용하고 있는 황사발원

지는 지금으로부터 약 20년 전 관측자료를 이용하여 정의된 것으로 모델의 예측성능 향상을 위해 최근 황사발원경향을 반영한 최신화된 황사발원지를 사용할

필요가 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 최근 관측자료와 격자화된 최신 전 세계 토양자료를 이용하여 동아시아 황사발원지를 최신화하였다. 기존 ADAM3의 황사발원지에서 중국 북동지역 및 황토고원 일부 지역에서 발원지가 삭제된 것은 최근 중국의 녹지화로 인한 강수량의 증가가 황사발원 억제에 영향을 미쳤을 것으로 분석되며 (Ji et al., 2020; Yu et al., 2014; Mao et al., 2010; Wang et al., 2008), 몽골 북·동부지역에 발원지가 추가된 것은 몽골의 사막화와 관련이 있을 수 있다 (Meng et al., 2021; Wei et al., 2018; Zolotokrylin et al., 2016). 본 연구를 통해 최신화된 황사발원지를 기상청 현업 ADAM3에 적용하여 그 효용성을 평가하였다. 최신화된 발원지(EXP)와 기존 정의된 발원지(CNTL)의 차이 이외의 모든 조건을 동일하게 설정하고, 발원지 추가와 삭제가 이루어진 지역에서 발원하여 우리나라에 영향을 준 두 가지 사례를 선정하여 모델을 수행하여 검증하였다. 전체적으로 황사발원지가 추가된 몽골 북·중동지역에서 EXP의 황사발원이 CNTL에 비해 강하게 나타나고 황사발원지가 삭제된 중국 만주 일부 지역과 중국 황토고원에서는 황사발원이 억제되는 것을 확인하였다. 만주지역에서 발원하여 우리나라에 영향을 준 첫 번째 사례의 경우, EXP 실험에서 중국 만주지역의 황사발원을 CNTL에 비해 적게 모의함에 따라, 모델의 과대모의를 줄이고, 우리나라로 유입되는 황사 PM₁₀ 농도 역시 CNTL에 비해 적게 모의하여 양의 바이어스를 줄였다. 이로 인한 PM₁₀ 예측 개선율은 중국과 우리나라에서 각각 RSME 기준 1.46%, 4.6%로 나타났다. 우리나라 흑산도에서 1,484 µg/m³의 고농도 PM₁₀이 관측된 사례 2의 경우, 기존 발원지와 크게 차이가 나지 않은 중국 북부 및 고비 사막 부근에서 발원하여 CNTL과 EXP 실험에서 중국 및 우리나라 모두 PM₁₀ 예측농도에 유의미한 차이를 보이지 않았다. 이 두 실험을 통해 황사발원지가 최신화되어 추가된 지역에서는 황사발원이 다소 증가하고 삭제된 지역에서는 다소 감소하는 경향을 확인하였다. 최신화된 황사발원지 또는 그 부근에서 황사가 발원하는 경우, 모델의 PM₁₀ 예측성능

이 향상되는 것을 확인하였으며, 발원지에서 개선율은 2% 미만인 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 우리나라에 영향을 주었던 봄철 황사사례 두 기간만을 이용하여 검증하였기 때문에 보다 정확한 검증을 위하여, 추후 더 많은 사례와 계절별, 월별 또는 연별로 나누어 비교하고 분석할 필요가 있다.

본 연구는 최신 관측자료를 이용하여, 최근 황사발원경향을 포함시켰다는 것에 큰 의의가 있지만 몇 가지 생각해 볼 점이 있다. 첫 번째로, 본 연구에서는 새롭게 추가된 황사발원지 격자를 RHWSO에서 제공하는 모래(sand) 비율을 이용하여 발원지 토양정보를 정의하였다. ADAM3는 발원지역의 모래(sand), 점토(clay), 양질토(loam) 정보를 이용하여 발원지 토양정보를 정의하였기 때문에, 주변 격자와 토양정보의 불연속이 있을 수 있다. 따라서, 추후 모델의 모든 황사발원지 격자에 대해 동일한 최신 토양자료로 토양정보를 갱신할 필요가 있다. 두 번째, 본 연구에서는 1월에서 12월 모든 기간의 GTS 관측자료를 이용하여 황사발원경향을 분석하였다. 황사는 계절에 따라 발원빈도 및 지역적 특성이 달라질 수 있기 때문에 월별 또는 계절별로 황사발원경향을 분석하고 모델 내에서도 다르게 정의할 필요가 있다. 세 번째, 본 연구에서는 GTS 지점관측자료를 이용하여 ADAM3의 격자에 맞게 재격자화하여 발원경향을 분석하였다. 그러나 지점자료를 격자화할 때 자료가 조밀하지 않은 지역에서는 부정확한 값이 들어갈 수 있다. 따라서, 지점관측자료와 함께 재분석자료를 이용하여 추가적으로 연구해 볼 필요가 있다. 네 번째, 최근 황사발원경향이 통계적으로 유의미하게 감소하는 추세이지만, 1~2년에 한 번 발원하는 경우가 포함될 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 통계적으로 유의미하게 감소함과 동시에 최근 9년간 14일 미만으로 발생한 황사발원지를 삭제하였다. 그러나, 주기적이지는 않지만 불규칙적으로 발원하는 발원지에 대한 삭제는 우리나라에 영향을 미칠 가능성을 배제할 수 없고 이러한 발원이 우리나라에 영향을 미칠 수 있기 때문에 황사발원 감시 차원에서 부적절할 수 있다. 따라서 기존에 정의된 황사발원지

삭제에 대한 결정은 더 엄격한 기준을 적용해야 할 필요가 있다. 다섯째, 본 연구에서는 본 연구에서 황사발원원은 황사의 사전적 정의에 따라 “발원지에서의 황사발원을 바람에 의해 불려 올라간 다량의 흙먼지”에 초점을 맞추었다. 또한, 현재의 황사발원빈도 계산에 이전 시간의 발원이 미칠 수 있는 영향을 배제시키고자 WMO에서 먼지(dust)와 관련되어 보고하는 기상현상 코드 중 7번만을 이용하였다. 그러나, WMO에서 보고하는 먼지(dust) 관련 코드는 총 11개(6~9번, 30~35번, 98번)로 먼지(dust)와 관련된 모든 또는 일부 코드를 이용하여 황사발생빈도를 계산하고 결과를 상호비교해 볼 필요가 있다. 마지막으로 본 연구에서는 GTS 자료 수집의 한계로 최근 24년 자료를 이용하여 황사발원경향을 분석하였다. 그러나, 기후는 분석기간 이외의 30년 또는 그 이상의 주기로 변동성이 있을 수 있기 때문에 기존에 정의되었던 황사발원지를 삭제하는 것은 성급하게 판단될 수 있다. 추후, 30년 이상의 자료 기간을 확보한다면 보다 정확한 발원지 최신화가 이루어질 것으로 기대한다.

본 연구를 통해 최신화된 ADAM3의 황사발원지는 추후 일정 기간의 시험운영기간과 더 많은 황사사례들에 대한 분석, 검증을 거쳐 기상청 현업 ADAM3를 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, ADAM3는 발원지에서 관측에 비해 과대모의하는 경향이 있으므로 (Ryoo *et al.*, 2020a), 개선을 위해 발원지 최신화 뿐만 아니라, 모델에 입력되는 기상예측입력자료의 개선, 더 많은 관측 PM₁₀ 자료 수집과 위성관측자료 등을 통한 자료동화 개선이 종합적으로 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「황사·연무 감시 및 예보기술 개발」(KMA2018-00521)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Chen, C., Park, T., Wnag, X., Piao, S., Xu, B., Chaturvedi, R.K., Fuchs, R., Brovkin, V., Ciais, P., Fensholt, R., Tommervik, H., Bala, G., Zhu, Z., Nemani, R.R., Myneni, R.B. (2019) China and India lead in greening of the world through land-use management, *Nature Sustainability*, 2, 122-129.
- Deng, X., Jiang, Q., Su, H., Wu, F. (2010) Trace forest conversions in Northeast China with a 1-km area percentage data model, *Journal of Applied Remote Sensing*, 4, 041893.
- Guan, Q., Sun, X., Yang, J., Pan, B., Zhao, S., Wang, L. (2017) Dust storms in northern China: long-term spatiotemporal characteristics and climate controls, *Journal of Climate*, 30(17), 6683-6700.
- Hara, Y., Uno, I., Wang, Z. (2006) Long-term variation of Asian dust and related climate factors, *Atmospheric Environment*, 40, 6730-6740.
- Honda, A., Sawahara, T., Hayashi, T., Tsuji, K., Fukushima, W., Oishi, M., Kitamura, G., Kudo, H., Ito, S., Yoshida, S., Ichinose, T., Ueda, K., Takano, H. (2017) Biological factor related to Asian sand dust particles contributes to the exacerbation of asthma, *Journal of Applied Toxicology*, 37(5), 583-590.
- Husar, R.B., Tratt, D.M., Schichtel, B.A., Falke, S.R., Li, F., Jaffe, D., Gasso, S., Gill, T., Laulainen, N.S., Lu, F., Reheis, M.C., Chun, Y., Westphal, D., Holben, B.N., Gueymard, C., McKendry, I., Kuring, N., Feldman, G.C., McClain, C., Frouin, R.J., Merrill, J., DuBois, D., Vignola, F., Murayama, T., Nickovic, S., Wilson, W.E., Sassen, K., Sugimoto, N., Malm, W.C. (2001) Asian dust events of April 1998, *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), 18317-18330.
- Ichinose, T., Sadakane, K., Takano, H., Yanagisawa, R., Nishikawa, M., Mori, I., Kawazato, H., Yasuda, A., Hiyoshi, K., Shibamoto, T. (2006) Enhancement of miteallergen-induced eosinophil infiltration in the murine airway and local cytokine/chemokine expression by Asian sand dust, *Journal of Toxicology Environment Health, Part A*, 69(16), 1571-1575.
- Irwandi, H., Rosid, M.S., Mart, T. (2023) Effects of climate change on temperature and precipitation in the Lake Toba region, Indonesia, based on ERA5-land data with quantile mapping bias correction, *Scientific Reports*, 13(1), 2542.
- Ji, Y., Zhou, G., Luo, T., Dan, Y., Zhou, L., Lv, X. (2020) Variation of net primary productivity and its drivers in China's forests during 2000-2018, *Forest Ecosystems*, 7, 1-11.

- Jiang, R., Gan, T.Y., Xie, J., Wang, N., Kuo, C.-C. (2017) Historical and potential changes of precipitation and temperature of Alberta subjected to climate change impact: 1900-2100, *Theoretical and Applied Climatology*, 127, 725-739.
- Kim, J.E., Jung, W.S., Seo, W., Li, S., Oh, S.M., Shin, D., Ko, H.-J., Yoo, H.-J., Chung, C.-Y., Kim, Y.-H. (2022) Characteristics of Asian dust observed over the Yellow Sea during YES-AQ Campaign in March, 2021 based on Vessel and Aircraft Measurement, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4), 557-576.
- Lee, E.-H., Park, S.-U. (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.
- Lee, H., Kim, H., Honda, Y., Lim, Y.-H., Yi, S. (2013) Effect of Asian dust storms on daily mortality in seven metropolitan cities of Korea, *Atmospheric Environment*, 79, 510-517.
- Li, M., Wu, P., Ma, Z., Pan, Z., Lv, M., Yang, Q., Duan, Y. (2022) The increasing role of vegetation transpiration in soil moisture loss across China under global warming, *Journal of Hydrometeorology*, 23(2), 253-274.
- Li, N., Guo, L., Fan, B. (2015) A new perspective on understanding the reduced spring dust storm frequency in inner Mongolia, China, *International Journal of Disaster Risk Science*, 6, 216-225.
- Lim, J.Y., Chun, Y. (2006) The characteristics of Asian dust events in Northeast Asia during the springtime from 1993 to 2004, *Global and Planetary Change*, 52(1-4), 231-247.
- Lim, Y., Kang, M., Kim, J. (2021) Sensitivity analysis of the dust-generation algorithm in ADAM3 by incorporating surface-wetness effects, *Atmosphere*, 12(7), 872.
- Mao, J.F., Dan, L., Wang, B., Dai, Y.J. (2010) Simulation and evaluation of terrestrial ecosystem NPP with M-SDGVM over continental China, *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(2), 427-442.
- Meng, X., Gao, X., Li, S., Li, S., Lei, J. (2021) Monitoring desertification in Mongolia based on landsat images and Google Earth Engine from 1990 to 2020, *Ecological Indicators*, 129, 107908.
- Moreno-Maroto, J.M., Alonso-Azcarate, J. (2022) Evaluation of the USDA soil texture triangle through Atterberg limits and an alternative classification system, *Applied Clay Science*, 229, 106689. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106689>
- Mori, N.M., Tanimura, T., Quan, H. (2003) Change in size distribution and chemical composition of kosa (Asian dust) aerosol during long-range transport, *Atmospheric Environment*, 37(30), 4253-4263.
- Park, S.-B., Cho, J.-A., Park, S.S., Koo, J.-H., Lee, Y.G. (2021) A possible linkage between dust frequency and Siberian high in March over Northeast Asia, *Atmosphere*, 12, 176.
- Park, S.-U. (2002) Field survey of Yellow Sand source regions. Proceedings of workshop of Asian dust, 22 March, 2002, Korea Meteorological Administration, Korea.
- Park, S.U., Choe, A., Lee, E.H., Park, M.S., Song, X. (2010) The Asian dust aerosol model 2 (ADAM2) with the use of normalized difference vegetation index (NDVI) obtained from the Spot4/vegetation data, *Theoretical and Applied Climatology*, 101, 191-208.
- Park, S.U., In, H.J. (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 Atmospheres*, 108, 1-21.
- Park, S.U., Lee, E.-H. (2004) Parameterization of Asian dust (Hwangsa) particle-size distributions for use in dust emission models, *Atmospheric Environment*, 38, 2155-2162.
- Ryoo, S.B., Kim, J., Cho, J.H. (2020a) Performance of KMA-ADAM3 in identifying Asian dust days over Northern China, *Atmosphere*, 11, 593.
- Ryoo, S.B., Lim, Y.-K., Park, Y.-S. (2020b) Seasonal Asian dust forecasting using GloSea5-ADAM, *Atmosphere*, 11(5), 526.
- Shim, K., Kim, M.-H., Lee, H.-J., Nishizawa, T., Shimizu, A., Kobayashi, H., Kim, C.-H., Kim, S.-W. (2022) Exacerbation of PM_{2.5} concentration due to unpredictable weak Asian dust storm: A case study of an extraordinarily long-lasting spring haze episode in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 287, 119261.
- Shuman, F.G. (1978) Numerical weather prediction, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 59(1), 5-17.
- Tudor, M., Styepan, I.-S., Antiono, S., Kristian, H., Alica, B. (2013) Forecasting weather in Croatia using ALADIN numerical weather prediction model, *Climate Change and Regional/Local Responses*, IntechOpen.
- Uno, I., Eguchi, K., Yumimoto, K., Takemura, T., Shimizu, A., Uematsu, M., Liu, Z., Wang, Z., Hara, Y., Sugimoto, N. (2009) Asian dust transported one full circuit around the globe, *Nature Geoscience*, 2(8), 557-560.
- U.S. Department of Agriculture (USDA) (1951) Soil survey manual, Soil Conservation Service Volume Handbook 18.
- U.S. Department of Agriculture (USDA) (2017) Soil survey manual, Soil Conservation Service Volume Handbook 18 (chapter 3).
- Wang, Q., Zhao, P., Ren, H., Kakubari, Y. (2008) Spatiotemporal

- dynamics of forest net primary production in China over the past two decades, *Global and Planetary Change*, 61, 267-274.
- Wei, H., Wang, J., Cheng, K., Li, G., Ochir, A., Davaasuren, D., Chonokhuu, S. (2018) Desertification information extraction based on feature space combinations on the Mongolian Plateau, *Remote Sensing*, 10, 1614.
- Wieder, W.R., Boehnert, J., Bonan, G.B., Langseth, M. (2014) RegridDED harmonized world soil database v1.2, ORNL DAAC.
- Wu, C., Lin, Z., Shao, Y., Liu, X., Li, Y. (2022) Drivers of recent decline in dust activity East Asia, *Nature Communications*, 13(1), 7105.
- Yu, C., Wang, B., Liu, H., Yang, X.S., Xiu, Z.Z. (2014) Dynamic change of net production and mean net primary productivity of China's forests, *Forest Research*, 27(4), 542-550.
- Zhang, X., Huang, T., Zhang, L., Shen, Y., Zhao, Y., Gao, H., Mao, X., Jia, C., Ma, J. (2016a) Three-north shelter forest program contribution to long-term increasing trends of biogenic isoprene emissions in northern China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 6949-6960.
- Zhang, Y., Peng, C., Li, W., Tian, L., Zhu, Q., Chen, H., Fang, X., Zhang, G., Liu, G., Mu, X., Li, Z., Li, S., Yang, Y., Wang, J., Xiao, X. (2016b) Multiple afforestation programs accelerate the greenness in the 'Three North' region of China from 1982 to 2013, *Ecological Indicators*, 61, 404-412.
- Zolotokrylin, A.N., Gunin, P.D., Titkova, T.B., Bazha, S.N., Danzhailova, E.V., Kazantseva, T.I. (2016) Diagnosis of the desertification dynamics of arid pastures in Mongolia from observation in key areas and MODIS data, *Arid Ecosystems*, 6(3), 149-157.

Authors Information

- 이우정 (국립기상과학원 예보연구부 연구사)
(lwj@korea.kr)
- 강미선 (국립기상과학원 예보연구부 연구원)
(misun0106@korea.kr)