시정자료를 이용한 황사의 미세먼지 농도추정 방법 연구

이효정¹⁾ · 이은희^{2)*} · 이상삼²⁾ · 김승범³⁾

¹⁾부산대학교 지구환경시스템 학부

²⁾국립기상연구소 황사연구과

³⁾기상청 예보국

(접수: 2011년 10월 21일, 수정: 2011년 12월 27일, 게재확정일: 2011년 12월 28일)

Study of Methodology for Estimating PM₁₀ Concentration of Asian Dust Using Visibility Data

Hyo-Jung Lee¹⁾, Eun-Hee Lee^{2)*}, Sang-Sam Lee²⁾, and Seungbum Kim³⁾

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University

²⁾Asian Dust Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research

³⁾Forecast Bureau, Korea Meteorological Administration

(Received: 21 October 2011, Revised 27 December 2011, Accepted: 28 December 2011)

Abstract The PM₁₀ concentration data is useful for indentifying intensity and a transport way of Asian dust. However, it is difficult to identify them properly due to the limited spatial resolution and coverage. Therefore, a methodology to estimate PM₁₀ concentration using visibility data obtained from synoptic observation was developed. To derive the converting function, correlation between visibility and PM₁₀ concentration is investigated using visibility and PM₁₀ concentration data observed at 20 stations in Korea from 2005 to 2009. To minimize bias due to atmospheric moisture, data with higher relative humidity over a critical value were eliminated while deriving PM₁₀-visibility relationship. As a result, an exponentially decreasing function of visibility is obtained under the condition that relative humidity is less than 82%. Verification of the visibility converting function to PM₁₀ concentration was carried out for the dust cases in 2010. It was found that spatial distributions of PM₁₀ calculated by visibility are in good agreement with the observed PM₁₀ distribution, especially for the strong dust cases in 2010. And correlation between the derived and observed PM₁₀ concentration was 0.63. We applied the function to obtain distributions of PM₁₀ concentration over North Korea, in which concentration data are not available, and compared them with satellite derived dust index, IODI distributions for dust cases in 2010. It is shown that the visibility function estimates quite similar patterns of dust concentration with IODI image, which suggests that it can contribute for prediction by indentifying transport route of Asian dust.

Keywords: Asian dust, visibility, PM₁₀, relative humidity, IODI

1. 서 론

*Corresponding Author: Eun-Hee Lee, National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Seoul, 156-720, Korea
Phone: +82-70-7850-6761, Fax: +82-2-831-4930
E-mail: eunheelee@korea.kr

황사는 중국과 몽골의 사막, 황토고원, 만주 등에서 강한 바람에 의해 흩날리는 부유 및 수송되는 현상으로 대기 혼탁도 증대, 태양 에너지의 감쇄, 강수 빙정

해의 역할 이외에도 정밀 기계의 손상, 호흡기 질환, 안질환 등의 영향 범위가 광대하다 (Monn *et al.*, 1997). 기상청에서는 PM_{10} 이 일정 농도 이상이거나 가시적으로 흙먼지를 관찰할 수 있을 때 황사를 판정하므로 (김영성, 2011) 일반적으로 지상 PM_{10} 농도로 황사의 강도와 분포를 확인할 수 있다. 그러나 몽골 남부 건조지대, 고비사막, 내몽골사막, 텐겔사막, 황토고원, 타클라마칸사막 등을 포함한 황사의 주요 발원지부터 우리나라까지의 황사 이동 영역 내에서는 PM_{10} 농도 관측 지점이 있더라도 일부 지역에 밀집되어 있어 지상 PM_{10} 농도 관측의 공백지역이 존재하며, 국가간 자료를 공유하는 것 또한 어려운 문제점이 있다. 따라서 황사의 발원부터 수송 및 침착과정이 이루어지는 공간 규모에서의 이동과 강도를 설명하기에는 현재 이용 가능한 지상 PM_{10} 관측망의 분포영역이 부족하며, 공간 해상도가 매우 낮은 실정이다.

이러한 공간 해상도 문제의 하나의 해결책으로 황사 이동경로 영역의 PM_{10} 관측 자료를 확보하기 위해, 중국에서는 시정을 이용하여 추정된 에어러솔 농도를 황사 예측에 활용하고 있다 (Gong and Zhang, 2008). 국내의 경우, PM_{10} 농도와 시정의 상관성에 대한 연구가 활발히 이루어졌으나, 그 상관관계를 보여주는 데에 그쳤다 (Chung *et al.*, 2003; Kim and Kim, 2003; 정진상 등, 2007). 다른 변수를 이용한 PM_{10} 농도 추정 연구에는 대기오염물질 SO_2 , O_3 , NO_2 , CO와 기상변수 풍속, 습도, 혼합고, 강우 등을 이용하여, 회귀분석, 신경망 분석 등을 이용한 PM_{10} 예측 모델에 대한 연구 (구운서 등, 2003, 2005)가 있었으나 오염물질 자료가 있는 수도권에 국한되었고, 이영섭 등 (2006) 연구에서는 구운서 등 (2003, 2005)과 같은 방법에 SVR (Support Vector Regression) 방법을 추가하여 에어러솔과 시정간의 상관관계를 계산하였다. 그러나, 이 역시 대상지역이 특정지역에 제한되어 있었으며 황사를 제외한 에어러솔에 대한 분석만 이루어졌다. 이와 같이 PM_{10} 농도 추정에 관한 선행 연구들은 대부분 특정 지점에 국한되었거나 사례가 적어 일반화시키기 힘들며 검증이 충분히 이루어지지 않았다.

본 연구에서 지상 PM_{10} 농도 관측의 낮은 공간 해상도를 극복함으로써 황사의 이동 지역 전체의 PM_{10} 농도자료를 확보하여 황사예보에 활용하기 위해, 기상 변수인 시정을 이용하여 PM_{10} 수평 농도장을 추정하는 방법과 검증, 활용 가능성에 대해 연구하였다. 이러한 추정 방법은 시정과 같은 기상변수들이 수십 년간 종관 관측되어왔고 여러 가지 검증 연구에 오랜 기간 활용되어 왔다는 사실에 그 기반을 두고 있다. 예를 들어, Mahowald *et al.* (2007)은 황사 발생의 장기 경향을 파악하기 위해 시정을 이용하였으며, 이를 AERONET (Aerosol Robotic NETwork)의 에어러

솔 광학두께(Aerosol Optical Depth)와 비교를 통해 검증하였다. Lee and Sohn (2011)은 장기간 시정자료를 이용하여 중국 내몽골과 몽골 지역의 황사 발생이 최근에 증가함을 보였다. 또한 WMO에 보고되는 종관 관측 자료, SYNOP (SYNOptic Observation)가 GTS (Global Telecommunication System)를 이용해 전세계적으로 표준화된 방식으로 수집되고 있어, 황사와 같은 중규모 현상을 규명하기에 매우 적합하다. 따라서 본 연구에서는 연간 국내에서 관측된 시정과 PM_{10} 농도 자료를 이용하여 이들 사이의 관계를 분석하고 이를 설명할 수 있는 관계식을 도출하였다. 도출된 식을 2010년 황사 사례에 대하여 적용하여 관측 PM_{10} 과 비교 검증하였다. 또한 PM_{10} 농도 자료를 구할 수 없으나 시정 관측 자료를 이용할 수 있는 북한지역에 대해 변환함수를 적용하여 이 식의 활용 가능성을 확인하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 국내 기상청 지상기상관측소에서 관측한 시정자료와 국내 미세먼지 관측망 PM_{10} 자료를 분석하였다. 시정은 대기의 혼탁 정도를 나타내는 기상요소로서 지표면에서 정상적인 시각을 가진 사람이 목표를 식별할 수 있는 최대 거리를 말한다. 거리마다 그 지역의 주요 건물 또는 지형을 정해놓고 관측 가능여부에 따라 결정하게 되며, 야간에도 주간과 같은 밝은 상태를 가정하고 관측한다. 또한 수평 방향의 시정이 방위에 따라 다를 때 그 최대값을 최대시정, 최소값을 최소시정 또는 최단시정이라고 하는데 지상기상관측소에서는 최단시정을 관측하게 되어있다. 시정은 보통 km 단위로 측정하나 시정이 매우 나쁜 구간에 대해서는 수 m 단위로 기록되며 최대 1 시간 단위로 보고된다.

시정과 지상 PM_{10} 농도의 상관함수 도출을 위해서 기상청 미세먼지 관측망의 자료를 사용하였다. 기상청에서는 2003년부터 베타선 흡수 방법을 이용하는 PM_{10} 측정 장비로 지상 미세먼지 관측망을 구축해오고 있으며, 현재 28개의 지점에서 관측을 하고 있다. 지상 미세먼지 관측망 자료는 5분 간격으로 지상먼지 농도가 제공되며 본 연구에서는 한 시간단위의 정시 자료를 사용하였다. 두 변수의 상관성 분석을 위해서는 PM_{10} 농도와 시정을 동시에 관측하는 지점의 자료를 이용해야 하므로 이를 만족하는 20개의 지점을 선택하였다. Fig. 1에는 본 연구에서 사용한 시정과 PM_{10} 의 관측지점을 나타내었다.

자료의 분석기간은 PM_{10} 관측망의 운영이 시작된 2003년 이후의 최근 6년 (2005~2010년)의 자료를 이용하였다. 도출된 함수를 검증하기 위한 자료로 2010

Fig. 1. Locations of stations observing visibility and PM_{10} . ID numbers and names of corresponding stations are given on the map and below the map, respectively.

년의 시정과 PM_{10} 농도자료를 이용하였고, 상관관계 분석 및 변환함수 도출을 위하여 2005~2009년의 자료를 사용하였다. 분석에 있어서는 시정과 PM_{10} 모두 관측된 경우만을 사용하였고, 둘 중 하나라도 관측이 되지 않은 경우는 제외하였다. 한편, 두 변수 사이의 상관관계를 도출하는 과정에서 기상 조건의 영향을 파악하기 위하여 해당지점의 기상관측자료로부터 얻어진 상대습도와 현재일기 자료를 추가적으로 사용하였다.

또한 연구 결과의 북한지역에 대해 추정된 PM_{10} 농도 검증을 위해 MTSAT-1R의 적외광학두께지수 (Infrared Optical Depth Index, IODI)가 이용되었다. IODI 방법은 적외채널을 이용하여 황사에 의한 복사량의 감쇄율을 광학두께의 변화로 추정할 것이다 (김미자 등, 2008). 북한 지역은 PM_{10} 관측 자료를 구할 수 없기 때문에 변환함수 결과와 IODI 공간분포를 비교함으로써 변환함수의 PM_{10} 농도를 검증하였다.

3. 국내 시정과 PM_{10} 의 특성 분석

국내 시정과 PM_{10} 의 특성을 확인하기 위하여 분석 기간 동안의 각 변수의 평균 공간 분포를 구하였다 (Fig. 2). 분석기간 중 평균 시정은 13.4 km이며, 지점별로는 고산이 18.5 km로 가장 높고, 대관령이 10.5 km로 가장 낮았다. 시정은 서울 및 수도권, 서해안 지역에서 낮게 나타났고 남부지역으로 갈수록 증가하였으며 대관령과 울릉도 등 동해안의 일부 지역에서도 평

Fig. 2. Spatial distributions of (a) mean visibility and (b) mean PM_{10} concentration observed for the period from 2005 to 2009.

균 시정이 낮게 나타났다 (Fig. 2(a)). 한편 PM_{10} 의 평균 농도는 $42.8 \mu g m^{-3}$ 로 서울 및 수도권 지역과 서해안에서 높게 나타났으며 남동해안으로 갈수록 낮게 나타났다. 천안, 수원, 서울 등 중부지역에서는 $49.8 \sim 56.2 \mu g m^{-3}$ 로 다소 높았고 울릉도, 진도, 고산 등 도서 지방에서는 $28.5 \sim 36.6 \mu g m^{-3}$ 정도의 비교적 낮은 PM_{10} 농도가 관측되었다 (Fig. 2(b)). 수도권과 서해안의 낮은 시정과 높은 PM_{10} 농도, 남부 지역에서의 높은 시정과 낮은 PM_{10} 농도의 값을 고려하면, 두 변수의 평균 공간 분포는 강한 음의 상관관계를 보일 것으로 예상할 수가 있다. 그러나 분석기간 전체에 대해서 도출된 시정과 PM_{10} 농도의 상관관계수는 0.18로 낮은 상관성을 가지는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 대관령과 울릉도, 진도 등의 일부 도서지방에서 PM_{10}

농도와 시정이 모두 낮게 나타난 것이 반영되었으며, 이러한 낮은 상관성은 시정 저하와 관련된 기상현상의 빈도로 일부 설명될 수 있다. 시정이 가장 낮았던 대관령은 높은 해발 고도에 위치한 조건으로 인해 평균 연 안개일수가 120일 이상으로 높고 (기상청, 2001), 울릉도와 서해안 도서지방은 특성상 해무가 빈번히 발생하여 (강운정 등, 2001), 이러한 영향들로 인해 낮은 시정이 나타난 것으로 사료된다.

일반적으로 시정저하는 황사와 연무 (haze), 박무 (mist), 안개 (fog) 현상의 발생과 관계가 있다고 알려져 있다 (백남준 등, 1994; 임주연 등, 2004). 이 중 ‘연무’는 습도가 75% 이하로 낮을 때, 대기 중에 연기, 먼지 등 미세하고 건조한 고체입자가 떠 있어서 공기의 색이 우윳빛으로 흐려 보이는 현상을 말한다 (기상청, 2002). ‘박무’는 $2.5 \mu\text{m}$ 이하의 미세한 물방울이나, 황산염, 질산염과 같은 흡습성 알갱이가 대기 중에 떠 있어서 먼 곳의 물체를 흐려 보이는 현상으로 시정이 1 km 이상, 상대습도가 80~90% 이상인 경우이고 (전영신 등, 2003), 안개는 매우 작은 물방울이 대기 중에 떠다니고 있는 현상을 말하며 (기상청, 2002), 수평시정이 1 km 미만이고, 상대습도는 100%에 가깝다 (임주연 등, 2004).

이러한 현상에서 시정과 PM_{10} 농도 관계를 확인하기 위해, 연구 기간 중 황사, 연무, 박무, 안개 각각의

현상이 나타났을 경우에 대하여 시정과 PM_{10} 농도의 상관계수를 구하였다. 그 결과 에어러솔과 관계된 현상인 황사와 연무에서는 상관계수가 각각 0.44, 0.31, 대기 중의 수증기와 관계된 박무와 안개에서는 0.14, 0.17로 나타났으며, 수증기와 관계된 현상보다 에어러솔에 의해 발생한 현상에서 시정과 PM_{10} 농도의 상관성이 높은 것을 확인할 수 있다.

한편, 연무에서 황사보다 낮은 상관관계가 나타난 원인은 각 현상의 시정의 분포로부터 설명될 수 있다 (Fig. 3). 각 현상의 시정 분포를 보면, 안개 발생 때 시정자료의 90%가 1 km 범위 내에 있으며, 박무와 연무는 1~10 km 범위, 황사는 1~14 km 범위에 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 시정이 안개 1 km 미만, 연무와 박무 1 km 이상 10 km 미만이라는 시정 제한을 두는 관측 지침으로 인한 결과임을 알 수 있다. 따라서 시정제한에 따라 PM_{10} 이 매우 낮을 때에도 시정은 10 km 이상 나타나지 않으며, 반면, PM_{10} 이 매우 높을 때 시정은 1 km 이하 낮게 나타날 수 없으므로, 시정과 PM_{10} 농도의 상관성을 구하기 어렵다. 그러나 황사는 시정의 상한과 하한이 없기 때문에, 황사현상이 발생했을 때의 시정은 PM_{10} 농도의 함수로 나타낼 수 있다고 판단된다.

4. 시정과 PM_{10} 의 변환함수 도출

4.1. 황사 사례 구분

본 연구에서는 황사현상의 자료만을 사용하기 위해, 현재일기 자료를 이용하여 황사현상이 발생한 시각을 구분하여, 전체 자료 (total data)와 황사로 구분된 자료 (Asian dust data) 각각에 대해서 지점별 시정과 PM_{10} 농도의 상관계수를 비교하였다 (Fig. 4(a)). 전체 자료에 대해서 도출된 상관계수는 전 지점 평균 -0.18였으며, 서울에서 -0.37로 가장 높았으며, 대관령에서 가장 낮았다. 황사 기간에서의 상관계수는 전 지점 평균 -0.44였으며, 대구에서 -0.71로 가장 상관성이 높았고, 춘천에서 -0.18로 가장 낮았다. 전체 자료와 비교하면 황사 기간의 상관계수가 18개 지점에서 눈에 띄게 증가하였으며, 대관령이 최고 55배, 진도에서 15배 등으로 급증하였다. 황사 기간 자료의 지점평균 상관계수는 전체 자료에 비해 2.5배 정도 증가하여, 전체적으로 볼 때, 황사로 구분된 자료에서 상관성이 더 높게 나타난 것을 확인할 수 있다.

또한 전체 자료와 황사 발생시 자료의 시정과 PM_{10} 농도 산포도 분석을 비교하였다. 전체 기간 자료의 산포도 (Fig. 4(b))에서 높은 빈도를 차지하고 있던 5 km 이하의 비교적 낮은 시정이지만 PM_{10} 농도 또한 $500 \mu\text{g m}^{-3}$ 이하로 낮아 시정과 PM_{10} 농도의 음의 상관관계에 부합하지 않는 자료들이 황사 기간 자료의

Fig. 3. The ranges of visibility in fog, mist, haze Asian dust phenomena. The dash lines indicate average and the solid lines inside boxes indicate median value. Data in square box are the range of 25th to 75th percentiles. The solid lines outside of box display 10th, 90th percentile and the dots display 5th, 95th percentile of data.

Fig. 4. (a) Correlation coefficients between PM₁₀ concentration and visibility for total data (crosses) and data in Asian dust (circles) at each station. The scatter plots of correlation between visibility and PM₁₀ concentration (b) of the total, and (c) in case of Asian dusts.

산포도 (Fig. 4(c))에서는 제거되었다. 이러한 결과 또한 황사 자료에서 음의 상관성이 더 높음을 설명할 수 있다.

그러나 황사 자료의 산포도에서도 음의 상관관계에 부합되지 않는 PM₁₀ 농도와 시정이 모두 낮은 자료들이 여전히 존재한다 (Fig. 4(c)). 이러한 자료는 현상 구분이 되었음에도 불구하고 여전히 대기 중 수증기의 영향을 받는 자료로 판단된다.

4.2. 상대습도 임계값

황사가 시작되거나 종료될 시각은 PM₁₀ 농도가 낮다. 이러한 때에 상대습도가 높다면, 황사는 보고되었으나 시정이 PM₁₀ 농도 뿐만 아니라 대기 중 수증기의 영향을 받았을 가능성이 있다. 상대습도가 시정

에 미치는 영향에 대해서는 이미 많은 연구에서 언급되어 왔다. 오현선과 윤순창 (1995)은 상대습도가 시정에 직접 영향을 미치며, 이에 따라 혼합비와 시정과의 높은 음의 관계가 있음을 도출하였다. 정길란과 윤순창 (1996)은 서울대학교에서 측정한 시정기기 자료 분석에서 상대습도가 낮을 때 시정이 30 km 이상이 많은 빈도를 차지하며, 상대습도가 높은 경우 시정이 10 km 미만의 빈도가 높았다는 결과를 발표하였다. 또한 윤순창과 이강웅 (1998)은 서울 지역의 시정 장애 요인을 밝히는 연구에서 입자상 물질의 영향 이외에도, 일반적으로 습도가 높을 때 시정이 나빠지는 결과를 도출하였다. 뿐만 아니라 선행하는 기상현상이 없을 때 상대습도 75%를 기준으로 연무와 박무의 현상을 구분한다는 기상청 관측 지침에서도 시정

Fig. 5. Percentile ratios of cases in a 10% relative humidity interval for TOTAL case data (top) and CONTROL case data (bottom).

과 상대습도가 관련 있음을 알 수 있다.

따라서, 앞 절의 황사 기간 산포도 분석에서 나타난 시정과 PM_{10} 의 상관관계가 현저히 낮은 자료들은 높은 상대습도의 영향을 받았을 것으로 가정하고, 황사기간 자료 중 상관관계가 특히 낮은 자료 군집에서의 상대습도의 특성을 조사하였다. PM_{10} 과 시정의 상관관계가 낮다고 보여지는 고농도-저시정 자료 군집(시정 5 km 이하, PM_{10} 농도 $500 \mu g m^{-3}$ 이하)을 추출(이하, Control)하여 상대습도 구간별 빈도 양상을 분석하였으며, 비교를 위해서 동일한 분석을 전체 자료 군집 (Total)에 대해 수행하였으며 그 결과를 Fig. 5에 제시하였다.

Total에서는 평균 상대습도 57.78%로, 평균에서 가장 높은 빈도를 보이며, 평균으로부터 좌우로 낮아지는 정규분포형태를 확인할 수 있었다. 반면 Control에서는 평균 상대습도가 73.74%로 Total에 비해 높은 값을 가지며, 자료의 75%가 상대습도 60% 이상에서

나타남을 확인할 수 있다. 이를 통해, Control 자료의 대부분이 Total의 평균 상대습도보다 높은 상대습도를 가지는 특성이 있음을 알 수 있다. 따라서 시정과 에어러솔이 모두 낮은 경우, 에어러솔의 영향보다 상대습도의 영향으로 인해 시정이 감쇄되었다는 것으로 추론할 수 있다.

그러나 본 연구에서는 시정과 PM_{10} 변환함수 도출을 위해, PM_{10} 농도와 시정의 상관성만을 고려해야 하므로, 상대습도가 시정에 미치는 영향을 배제할 필요가 있다. 상대습도의 영향을 받지 않는 자료를 추출하기 위해서는 상대습도의 임계값이 필요한데, 시정과 상대습도에 대한 연구는 상관관계를 확인하는 정성적인 연구(오현선과 윤순창, 1995; 정길란과 윤순창, 1996; 윤순창과 이강웅, 1998)만이 이루어졌을 뿐 정량적인 임계값을 제시한 연구는 없었다.

따라서 본 연구에서는 시정과 PM_{10} 농도 상관관계에 상대습도의 영향이 비교적 적게 반영된 자료를 추출하기 위해, 상대습도 변화에 따른 시정과 PM_{10} 의 상관관계를 확인하였다. 상대습도는 0~100% 범위에서 1% 단위로 관측 되는데, 본 연구에서 황사 발생기간 자료 (Total)의 상대습도 최대값은 99%, 최소값은 8%이다. 이 자료로부터, 99% 이하 모든 자료, 98% 이하 모든 자료 등 99%부터 50%까지 상대습도 1% 단위로 상대습도 상한값을 정하여 각 구간의 자료를 구성하였다. 이러한 상대습도 각 구간의 시정과 PM_{10} 농도 자료를 이용하여, 그 구간에서의 회귀함수를 구하였다. 이 때, 회귀함수의 기본형은 Chung et al. (2003)에서 사용한 것과 같이 두 변수를 이용한 지수감소형 함수로 선택하였고, 각 계수는 관측값과 종속된 변수의 예측값 차이 제곱의 합들이 최소가 되는 계수를 반복적으로 구하는 방법인 Levenberg-Marquardt 알고

Fig. 6. Root mean square errors of PM_{10} concentration calculated by the optimal regression equations obtained under the relative humidity (RH) conditions limited by the given threshold values.

리즘을 이용하여 구하였다. 각 구간별로 도출된 회귀 함수를 이용하여 추정된 PM_{10} 농도와 관측 PM_{10} 농도 자료의 RMSE (Root Mean Square Error)를 산출하였다 (Fig. 6). RMSE는 상대습도 82% 구간까지 낮아졌다가 다시 증감하는 경향을 보였으나, 급격하게 낮아진 RMSE의 감소추세를 고려하면 82% 구간 이후의 RMSE 증감은 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단되어, 상대습도 임계값을 82% 이하로 정하였다. 또한 상대습도 구간에 따라 회귀함수의 계수 변화양상 또한 RMSE의 변화양상과 유사하였고, 임계 상대습도 조건 이하에서는 함수식의 변화가 상대적으로 적음을 확인하였다. 따라서 이러한 임계값 이하에서 시정-미세먼지의 상관관계에 있어서 상대습도 변화에 따른 영향은 상대적으로 적은 것으로 볼 수 있다고 가정하였다. 임계상대습도 이하의 자료로부터 도출된 회귀 함수를 시정과 PM_{10} 의 농도의 변환함수로 결정하였고, 이 변환식은 다음과 같다.

$$PM_{10} = 1023 \exp(-0.17VIS) \quad (1)$$

위 식에서 PM_{10} 은 직경 $10 \mu m$ 이하 미세먼지의 농도 ($\mu g m^{-3}$)를, VIS는 km 단위의 시정을 의미한다.

한편, 변환함수의 기본 형태는 두 변수를 이용한 지수감소형태이므로 식의 특성상, 계수의 제한을 받기 때문에 시정이 0에 가까워져도 PM_{10} 농도가 $1,023 \mu g m^{-3}$

이상 산출되지 못하는 한계를 가지고 있다. 그러나, 도출된 변환함수 (식1)는 선행연구인 Chung *et al.* (2003)연구와 Gong and Zhang (2008)에서 도출된 함수와 유사한 형태임을 확인할 수 있다 (Fig. 7). 특히 본 연구의 변환함수는 Chung *et al.* (2003)의 함수와는 매우 유사하며, 약 $200 \mu g m^{-3}$ 정도의 PM_{10} 농도 차이를 보이는 것으로 나타났다. 본 연구의 변환함수와 Chung *et al.* (2003) 모두 Gong and Zhang (2008) 보다는 크게 낮은 농도를 보이는데, 이러한 것은 발원지 지역과 풍하측 지역인 한반도에서의 황사의 입자 수 분포 등 물리적 특성이 크게 다른 것에 기인하는 것으로 보인다.

5. 변환함수의 검증: 2010년 황사 사례에 적용

도출된 변환식을 2010년 황사 사례에 적용하여 검증을 수행하였다. 2010년에 관측된 총 15차례 황사에 대해서 변환함수를 이용하여 추정된 PM_{10} 농도와 관측 PM_{10} 농도를 비교하였다 (Fig. 8). 20개의 지점에서 관측된 2010년 황사사례 중 시정과 PM_{10} 농도가 결측이 아닌 자료는 1205개가 있으며, 시정 자료를 이용하여 추정된 PM_{10} 농도와 관측된 농도의 상관계수는 0.63, RMSE는 285.74였다. 도출된 변환식을 이용하면 PM_{10} 농도가 변환함수 계수의 제약을 받아 $1,023 \mu g m^{-3}$ 이상의 농도로 산출되지 못하는 한계점이 상관계수와 RMSE 값에 일부 영향을 주었을 것으로 사료된다. 관측된 농도 $1,023 \mu g m^{-3}$ 이상 자료의

Fig. 7. Scatter diagram of visibility and PM10 concentration satisfying the threshold relative humidity condition ($RH < 82\%$), with the regression function derived in this study. Converting functions of two precedent studies (Chung *et al.*, (2003), Gong and Zhang (2008)) are presented for the comparison.

Fig. 8. Scatter plot of calculated and observed PM_{10} concentration in 2010. Data number, correlation coefficient, and RMSE are given in the figure.

추정된 농도와 관측된 농도로 계산된 RMSE가 1007.62로 매우 크게 나타난 결과로 미루어, 식의 계수가 오차 발생에 일부 기인됨을 확인하였다.

Table 1에는 국내에서 관측된 15개의 황사 사례 각각에 대해서 기간, 이용된 자료 수, 관측된 지점의 수, 시정 변환함수를 이용하여 구한 PM_{10} 농도 값의 평균과 관측 PM_{10} 농도 값의 평균, 평균오차, 그리고 상관계수를 나타내었다. 2호와 3호 황사는 발원지는 각각 내몽골과 만주로 다르지만 13일 동시에 우리나라

에 영향을 주었기 때문에 함께 분석하였다. 각 사례의 상관계수는 최대 0.72 (7호와 12호)까지 나타났으나 1, 9, 10, 11, 13호의 황사 사례에는 상관성이 매우 낮게 나타났다. 상관성이 낮게 나타난 사례는 대부분 황사가 관측된 지점의 수와 분석에 이용된 자료의 수가 다른 사례에 비해 적었으며, 평균 PM_{10} 농도가 낮은 특징이 있었다. 그러나 전국적으로 영향을 주는 황사나 주의보 이상의 짙은 황사에서는 상관성이 매우 높게 나타나, 시정을 이용한 황사농도의 추정식

Table 1. Characteristics of 15 Asian dust cases observed in Korea in 2010: period, number of observed sample data and stations (National Institute of Meteorological Research, 2011). Number of stations reporting dust, number of hourly data (visibility and PM_{10}), average of calculated and observed PM_{10} concentration, RMSE and correlation coefficient between calculated and observed PM_{10} .

Cases	Period (Duration time)	Sample number (Number of stations)	Average of calculated PM_{10} ($\mu g m^{-3}$)	Average of observed PM_{10} ($\mu g m^{-3}$)	RMSE	Correlation coefficient
1 **	2010.1.25 (10h 5min)	41 (11)	242.96	175.20	132.32	0.14
2,3 **	2010.3.12~13 (16h 55min, 19h 15min)	91 (19)	217.51	182.03	126.66	0.25
4* **	2010.3.15~16 (27h 20min)	297 (20)	179.88	251.34	108.72	0.52
5*	2010.3.20~21 (15h 15min)	148 (19)	483.05	763.52	665.76	0.71
6	2010.3.23~24 (17h 10min)	46 (9)	173.65	150.15	58.57	0.19
7	2010.4.1 (11h 10min)	7 (1)	297.46	153.14	147.45	0.72
8 **	2010.4.23 (21h 25min)	33 (9)	133.91	124.36	43.02	0.31
9	2010.4.27 (8h 45min)	18 (6)	361.82	106.94	348.33	0.59
10	2010.5.89 (15h 45min)	14 (3)	165.54	236.07	86.75	0.08
11	2010.5.10~11 (31h 25min)	61 (13)	90.92	146.70	83.82	0.03
12*	2010.11.11~13 (37h 30min)	185 (20)	419.49	583.00	283.65	0.72
13	2010.11.27 (13h 10min)	23 (9)	169.56	222.09	106.65	0.08
14 **	2010.12.23 (19h 20min)	116 (20)	433.36	262.44	238.90	0.47
15 **	2010.12.10~11 (18h 10min)	125 (20)	296.85	217.78	133.99	0.47
Total		1205	292.46	338.83	285.74	0.63

*Cases issued Asian dust watch/warning

**Cases passed through North Korea

Fig. 9. The spatial distributions of calculated (left) and observed (right) PM10 concentration at (a) 12 UTC, 15 UTC and 18 UTC 20 March 2010 during the 5th Asian dust case of 2010, (b) 12 UTC, 18 UTC, 11 Nov. and 00 UTC 12 November 2010 during the 12th Asian dust case of 2010.

Fig. 9. Continued.

이 활용 가능할 것으로 판단된다.

시정을 이용한 에어러술 추정 방법의 검증을 위해

전국적으로 관측된 짙은 황사 사례 중 5호와 12호에 대해서 추정된 PM_{10} 의 공간 분포를 관측 농도의 분

포를 이용하여 검증하였다 (Fig. 9). 5호 황사는 내몽골에서 강하게 발원하여 발해만과 중국 중부지방을 거쳐 우리나라에서 기상청 계기 관측 이래 가장 높은 PM_{10} 시간 평균 농도 $2,712 \mu g m^{-3}$ (흑산도)를 기록한 사례였다(국립기상연구소, 2011). 해당 황사 사례에서는 3월 20일 오후 백령도와 전남지역을 시작으로 전국에 영향을 주었으며, 중부와 남부지방에서 매우 짙은 농도가 관측되었으며 전국적으로 황사 경보가 발표되었던 사례이다. 이 과정에서 흑산도에서 시간평균 최고 PM_{10} 농도가 3월 20일 11 UTC에 기록되었다. 황사가 한반도를 통과한 기간 중 3월 20일 12 UTC, 15 UTC, 18 UTC에 대하여 시정으로부터 추정된 PM_{10} 농도의 공간분포를 관측값과 비교하였다(Fig. 9(a)). 도출된 농도의 분포는 관측에 비해서 낮게 나타나는 경향이 보이나 관측된 공간 분포 양상은 대체로 유사하게 나타남을 알 수 있다. 20일 12 UTC에서는 중북부 지역을 제외한 전국에서 $1,000 \mu g m^{-3}$ 이상의 농도가 관측된 것에 비해, 추정된 값은 $800 \mu g m^{-3}$ 이하의 수준으로 분포하고 있고, 15 UTC와 18 UTC에서도 변환된 PM_{10} 농도가 다소 낮은 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 관측값이 높게 나타난 지역의 PM_{10} 농도가 대부분 $1,500 \mu g m^{-3}$ 을 넘어, 변환함수의 추정 한계치 ($1,023 \mu g m^{-3}$)를 넘는 경우이다. 이러한 농도 값의 한계에도 불구하고 추정된 농도분포는 12 UTC에 관측된 우리나라 경기 북부 지방을 제외한 고농도 분포경향과 15 UTC에 관측된 남동해안 중심의 고농도 분포와 일치하였다. 18 UTC에서도 일부 강원 지역의 오차를 포함하고 있었으나, 동해안으로 빠져나가는 황사를 잘 추정한 것을 확인할 수 있다.

12호 황사는 중국 북부, 고비 지역에서 발원하여 황토고원을 거쳐 백령도, 서해안부터 전국에 영향을 주었으며, PM_{10} 시간 평균 최고농도가 $1,664 \mu g m^{-3}$ 로 황사경보가 발효된 사례이다 (국립기상연구소, 2011). 이 사례에서는 황사가 서해안으로 유입되기 시작하여 남해로 빠져나가면서 백령도에서 최고 농도가 11월 11일 11 UTC, 고산에서 12일 00 UTC에 나타났다. 전국이 황사의 영향권에 속한 11일 12 UTC, 11일 18 UTC, 12일 00 UTC의 공간분포를 Fig. 9(b)에 제시하였다. 11일 12 UTC의 추정된 값과 관측값 모두에서 서해안 지역을 중심으로 내륙지역으로 유입된 황사를 확인할 수 있다. 18 UTC의 시정으로부터 변환된 PM_{10} 농도 분포는 내륙지방에서 높게 관측된 PM_{10} 농도 분포와 상당히 유사한 분포를 확인할 수 있었으나, 남서해안지역에서 관측된 고농도 PM_{10} 이 나타나지 않았으며, 추정된 값은 5호 황사 결과와 마찬가지로 관측에 비해 $200 \mu g m^{-3}$ 이상 낮게 나타났다. 이 역시, 추풍령 $1,265 \mu g m^{-3}$, 안동 $1,018 \mu g m^{-3}$, 광주 $1,151 \mu g m^{-3}$, 진도 $1,064 \mu g m^{-3}$ 등 변환함수의 계수 이상의 농

도가 관측되었기 때문에 판단되며, 11일 12 UTC의 결과에도 일부 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 12일 00 UTC의 변환된 PM_{10} 공간 분포에서 남부지역에서 나타난 높은 PM_{10} 농도는, 고산에서 관측된 PM_{10} 최고 농도 $788 \mu g m^{-3}$ 을 중심으로 남부지역에 고농도 PM_{10} 이 관측된 것과 그 경향과 값이 일치하는 것을 확인할 수 있다.

2010년의 사례에 대한 검증 결과, 관측된 지점과 자료의 수가 상대적으로 적은 열은 황사 사례에서는 추정된 PM_{10} 농도가 관측값과 오차를 보였으나, 전국적으로 관측되어 자료수가 충분히 많은 황사사례는 상관계수가 높게 나타났다. 또한 주의보 이상의 짙은 황사사례에서는 변환된 PM_{10} 의 공간 분포가 이동 경로와 농도가 낮은 지역과 높은 지역의 상대적 차이는 관측과 유사하게 설명하였다. 따라서 시정을 이용하여 변환된 PM_{10} 농도는 정량적인 값은 관측에 비해 낮게 추정되었지만 황사의 이동 경향은 잘 나타내어 황사의 경로를 확인하는 것에 충분히 활용될 수 있으며, 실시간 시정을 이용한 PM_{10} 농도 추정을 통해 황사 예측에도 활용될 가능성이 있다고 판단된다.

6. 변환함수의 활용: 북한 지역에 적용

본 연구에서 도출한 변환함수를 북한지역을 포함하여 적용해 보았다. 북한의 PM_{10} 농도 자료는 이용할 수 없으나, 27개의 SYNOP지점에서 관측한 시정자료가 있기 때문에 시정을 이용하여 PM_{10} 분포를 구하였다. 북한 지역은 만주에서 발생하는 황사의 주된 이동경로이며 (김수민 등, 2010), 2010년 황사 사례들의 이동 경로를 보면, 내몽골에서 발생한 황사도 북서기류가 강한 초봄과 겨울에는 빈번히 북한을 통과하였다 (국립기상연구소, 2011). 따라서 북한은 황사 이동 예상 경로 중 우리나라와 가장 인접해 있기 때문에 북한 PM_{10} 농도의 추정은 국내 황사 농도 및 이동경로 예측에 기여할 수 있다. 따라서 변환함수를 북한 시정에 적용하여 북한의 PM_{10} 농도를 추정하였으며, 이를 MTSAT-1R위성의 IODI와 비교하여 활용가능성을 확인하였다.

2010년 황사 사례 중 북한지역을 통과한 사례는 1, 2, 3, 4, 8, 14, 15호 황사가 있다. 이 중, 2호와 3호는 앞 절에서 언급한 바와 같이 한 사례로 간주하여 각 6 사례에 대해 변환함수를 적용하여 시정으로부터 PM_{10} 농도장을 구하였다. IODI 영상 분석을 통해, 각 사례의 기간 중 황사가 북한의 가장 넓은 지역에 분포하고 있는 시각을 선정하여 그 시각의 시정을 이용하여 구한 PM_{10} 공간 분포와 IODI 영상을 Fig. 10에 제시하였다.

선정된 시각은 1호 사례의 1월 24일 21 UTC, 2-3

Fig. 10. Spatial distributions of calculated PM₁₀ concentration using visibility data (left) and IODI images of MTSAT (right) at (a) 21 UTC 24 January (b) 15 UTC 12 March, (c) 18 UTC 15 March, (d) 00 UTC 2 April, (e) 18 UTC 2 December, and (f) 09 UTC 10 December in 2010.

호 사례의 3월 12일 15 UTC, 4호 사례의 3월 15일 18 UTC, 8호 사례의 4월 2일 00 UTC, 14호 사례의 12월 2일 18 UTC, 15호 사례의 12월 10일 09 UTC 이다. 1월 24일 21 UTC의 북한 시정은 1개의 지점에

서만 관측되었기 때문에, 정확한 PM₁₀ 농도 분포를 추정하기 어렵다. 또한 IODI 영상에서 북한의 양강도와 자강도 지역의 구름에 의한 차폐로 인해 황사의 분포를 확인하지 못하므로 북한 1개의 지점에서의 시정

Fig. 10. Continued.

으로 변환된 고농도 PM₁₀을 IODI와 비교 분석 할 수 없었다 (Fig. 10(a)). 2-3호 사례의 3월 12일 15 UTC 변환된 PM₁₀ 농도 분포 또한 북한 지역 27개 지점 중 18개의 지점의 시정미가 결측되어 변환된 PM₁₀ 농도를 검증하는 것이 어려운 한계를 보였다. 따라서 향후 변환된 PM₁₀ 농도 자료를 활용할 경우, 자료 획득율이

낮은 시각은 제외하여야 할 것으로 사료된다 (Fig. 10(b)). 4호 황사, 3월 15일 18UTC의 PM₁₀ 분포도와 IODI 영상에서는 황사가 평양을 포함한 황해도 지방에 존재하는 것을 공통적으로 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 10(c)). 그러나, 추정된 PM₁₀ 분포도에서 지상 PM₁₀ 농도가 높은 것으로 나타난 북한 동해

Fig. 10. Continued

안 지역은 IODI 영상에서 상층운이 존재하는 것으로 확인되어 IODI와 직접적인 비교가 어렵다. 8호 황사 4월 2일 00 UTC 추정된 PM₁₀ 농도는 자강도가 비교적 높게 나타났으며, 북한의 전 지역에서 높게 나타났다 (Fig. 10(d)). 그러나 8호 황사의 IODI 영상에서도 북한 동안 지역의 구름의 차폐로 인해, 이 지역은

PM₁₀ 분포도의 정확한 검증이 어렵다. 따라서 IODI에서 구름의 차폐로 검증이 어려운 지역에 대해서는 향후 황사단기예측모델, 황사일기도 등의 다양한 자료를 이용하여 직접적인 검증을 수행할 것이다. 또한 14호 황사의 12월 2일 18 UTC의 추정된 공간분포도와 IODI 모두에서 황해도와 경기도 북부지역에 나

탄산 높게 나타난 황사의 분포를 확인 할 수 있으며 (Fig. 10(e)), 12월 10일 09 UTC의 추정된 PM_{10} 농도 분포와 IODI 영상을 비교한 결과, 북한의 서해안 지역에 나타난 황사를 추정된 분포에서 잘 나타내고 있으나, 함경도 지역에서 추정된 PM_{10} 농도가 높게 나타난 부분은 Fig. 10(f)에서 확인할 수 있듯이 구름의 차폐로 인해 IODI 영상과는 정확한 비교를 할 수 없었다.

PM_{10} 농도 관측 자료를 구할 수 없는 북한 지역에 변환함수 적용결과, 시정을 이용하여 추정된 PM_{10} 농도가 IODI와 유사한 경향을 보였다. IODI가 구름의 차폐와 같이 이용될 수 없을 조건에서는 북한 황사의 이동과 분포를 확인하는 것에 시정자료를 이용한 추정 방법이 충분히 활용될 수 있다고 판단된다. 따라서 시정을 이용한 PM_{10} 농도 추정 방법은 북한 지역 뿐만 아니라, 황사 이동 예상 경로 중 PM_{10} 농도를 측정할 수 없는 일부 지역을 기상변수인 시정을 이용하여 PM_{10} 농도를 추정함으로써 황사 예보의 좋은 참고자료로 이용될 수 있을 것으로 예상된다.

7. 결론 및 제언

본 연구에서는 황사 이동 예상 경로 중 PM_{10} 농도를 측정할 수 없는 일부 지역의 PM_{10} 농도 정보를 얻기 위해, 황사 발생 및 이동 영역 내 조밀하게 분포하는 기상변수 시정을 이용하여 PM_{10} 농도를 추정하는 방법에 대하여 연구하였다.

2005~2009년의 최근 5년 황사 기간의 에어러솔 농도와 시정의 음의 상관관계를 확인하고 이를 이용하여 변환식을 도출하였다. 도출 과정에서 시정- PM_{10} 농도의 상관성에 영향을 미치는 일기현상과 수증기의 간섭효과를 최소화하기 위해, 황사현상의 자료만을 이용하였으며 상대습도 구간별 함수식을 구하여 상대습도 구간의 증가에 따라서 RMSE가 급격히 증가하기 시작하는 상대습도 임계상한값을 찾아 그 이하에서 적용가능한 변환함수를 최종 결정하였다. 도출된 변환함수의 검증에서 2010년 15차례 발생한 황사에 대해 추정된 PM_{10} 농도와 관측 농도가 상관계수 0.63으로 유의한 결과를 나타냄을 확인하였다. 변환함수의 계수 $1,023 \mu g m^{-3}$ 이상의 농도를 추정하지 못하는 것에서 기인된 오차가 포함되어 있지만, 공간 분포 분석을 통해 살펴본 황사의 이동 경향은 관측과 유사하게 나타났다. 변환함수의 활용 가능성을 확인하기 위해, 봄철 황사 4가지 사례에 대해 PM_{10} 농도 관측 자료를 이용할 수 없는 북한 지역의 공간분포도를 추정하였고, 이를 IODI와 비교를 통해 변환 값의 활용가능성을 확인하였다. 북한 지역 시정의 결측으로 인해 검증이 어려운 일부 황사사례를 제외하면, 추정된 에

어러솔은 이동 경향과 고농도 지역의 추세를 적절히 판단하는데 활용할 수 있었다. 또한 변환함수를 이용하여 구한 에어러솔 농도를 이용하여 구름의 차폐에 취약한 IODI의 단점을 보완할 수 있는 가능성을 확인하였다.

도출된 변환함수는 전국 관측 자료를 이용하는 과정에서 PM_{10} 이 아닌 대도시의 기체상 오염물질과 $PM_{2.5}$ 가 시정에 미치는 영향을 포함하고 있는 한계점이 있으나, 본 연구의 결과에서 황사가 이동하는 경로의 PM_{10} 농도 관측 자료가 없는 지역에 적용하여 황사 예보 참고자료로 활용될 수 있음이 확인되었다. 그러나 보다 축적된 PM_{10} 및 시정자료를 통한 지역적 특성이 반영된 지역별 변환함수, 상대습도를 도입한 변환함수 개발 등의 추가적인 연구가 요구된다. 또한 향후 현재 지방 기상청 및 전국 기상대에 확장되고 있는 시정계의 측정 정확도가 확보되면, 변환함수를 도출하는 과정에 계기관측 시정자료를 추가 이용함으로써 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 "예보기술지원 및 활용 연구 (NIMR-2012-B-1)" 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 강운정, 김태희, 황승언, 남재철, 2001: 해무 다발 해역의 해수면열수지 관측 및 분석. *대기*, **11** (1), 154-156.
- 구원서, 권희용, 윤희영, 2003: 통계모델을 이용한 실시간 오염도 예보 시스템 개발 (PM-10). *한국대기환경학회 추계학술대회논문집*, 445-446.
- 구원서, 윤원정, 권희용, 양재문, 최종혁, 윤희영, 2005: 전일 미세먼지 (PM_{10}) 예보 시스템 개발. *한국대기환경학회 추계학술대회논문집*, 403-404.
- 국립기상연구소, 2011: 2010년도 황사보고서. 309.
- 기상청, 2001: 한국 기후표 (1971-2000). 188.
- _____, 2002: 기상용어해설. 204.
- 김미자, 김윤재, 손은하, 김금란, 안명환, 2008: 정지기상위성 자료를 이용한 정량적 황사지수 개발 연구. *대기*, **18**(4), 267-277.
- 김수민, 김승범, 전영신, 2010: 만주에서 발원한 황사 (II): 2001년 이후 사례를 중심으로. *대기*, **20**(3), 273-286.
- 김영성, 2011: 황사의 대기환경영향. *한국대기환경학회지*, **27**(3), 255-271.
- 백남준, 김태오, 김용표, 문길주, 1994: 시정장애현상 원인과 그 규명방법: 수도권 지역의 시정장애현상 연구를 위

- 하여. *한국대기보전학회지*, **10(1)**, 123.
- 오현선, 윤순창, 1995: 시정악화에 영향을 미치는 대기오염 및 기상장의 특성. *한국대기환경학회 1995년 학술대회 논문집*, **1**, 125-129.
- 윤순창, 이강웅, 1998: 서울지역의 시정 장애 요인에 관한 연구. *한국대기보전학회지*, **14(3)**, 229-235.
- 이영섭, 김현구, 박종석, 김희경, 2006: 변수변환을 통한 포항지역 미세먼지의 통계적 예보모형에 관한 연구. *한국대기환경학회지*, **22(5)**, 614-626.
- 임주연, 전영신, 조경미, 이상삼, 신혜정, 2004: 2003년 5월의 연무 관측시 에어로졸의 기상·물리·화학 특성. *한국대기환경학회지*, **20(5)**, 697-711.
- 전영신, 임주연, 최병철, 2003: 황사현상과 연무현상에 따른 서울의 봄철 에어로졸 특성. *한국기상학회지*, **39(4)**, 459-474.
- 정길란, 윤순창, 1996: 서울대 캠퍼스에서의 시정장애 요인의 측정 및 분석. *대기환경학회 1996년 학술대회논문집*, **1**, 75-77.
- 정진상, 이한림, Jianwei Gu, Shaojia Fan, 김영준, 2007: PRD 2006 관측 동안의 시정감쇄 및 에어로졸의 특성과의 상관관계 연구. *2007 환경공동학술대회 발표논문집*, 1370-1371.
- Chung, Y. S., Kim, H. S., Park, K. H., Jhun, J. G., and Chen, S. J., 2003: Atmospheric loadings, concentrations and visibility associated with sandstorms: satellite and meteorological analysis. *Water, Air, and Soil Pollut.*, **3**, 21-40.
- Gong, S. L., and Zhang, X. Y., 2008: CUACE/Dust-an integrated system of observation and modeling systems for operational dust forecasting in Asia. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 2333-2340.
- Kim, Y. J., and Kim, K. W., 2003: Visibility impairment by atmospheric fine particles in an urban area. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **19(3)**, 99-120.
- Lee, E.-H., and Sohn, B.-J., 2011: Recent increasing trend in dust frequency over Mongolia and Inner Mongolia regions and its association with climate and surface condition change. *Atmos. Environ.*, **45**, 4611-4616.
- Mahowald, N. M., Ballantine, J. A., Feddema, J., and Remankutty, N., 2007: Global trends in visibility: implications for dust sources. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 3309-3339.
- Monn, C. H., V. Carabias, M. Junker, R. Waeber, M. Karrer, and H. U. Wanner, 1997: Small-scale spatial variability of particulate matter < 10 μm (PM₁₀) and nitrogen dioxide. *Atmos. Environ.*, **31(15)**, 2243-2247.