

고비사막으로부터 황사수송이 가을에 강릉시의 시간별 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ 간의 농도차비와 상관관계에 미치는 영향

이미숙* · 정진도

호서대학교 벤처대학원 보건환경학과

(2011년 11월 17일 접수; 2011년 12월 1일 수정; 2012년 2월 5일 채택)

Impact of Yellow Dust Transport from Gobi Desert on Fractional Ratio and Correlations of Temporal PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ at Gangneung City in Fall

Mi-Sook Lee*, Jin-Do Chung

Department of Health Environment, Graduate School of Venture, Hoseo University, Seoul 137-867, Korea

(Manuscript received 17 November, 2011; revised 1 December, 2011; accepted 5 February, 2012)

Abstract

Hourly concentrations of PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀, were investigated at Gangneung city in the Korean east coast on 0000LST October 26~1800LST October 29, 2003. Before the intrusion of Yellow dust from Gobi Desert, PM₁₀(PM_{2.5}, PM₁) concentration was generally low, more or less than 20 (10, 5) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and higher PM concentration was found at 0900LST at the beginning time of office hour and their maximum ones at 1700LST around its ending time. As correlation coefficient of PM₁₀ and PM_{2.5}(PM_{2.5} and PM₁, and PM₁₀ and PM₁) was very high with 0.90(0.99, 0.84), and fractional ratios of (PM₁₀-PM_{2.5})/PM_{2.5}((PM_{2.5}-PM₁)/PM₁) were 1.37~3.39(0.23~0.54), respectively. It implied that local PM₁₀ concentration could be greatly affected by particulate matters of sizes larger than 2.5 μm , and PM_{2.5} concentration could be by particulate matters of sizes smaller than 2.5 μm . During the dust intrusion, maximum concentration of PM₁₀(PM_{2.5}, PM₁) reached 154.57(93.19, 76.05) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ with 3.8(3.4, 14.1) times higher concentration than before the dust intrusion. As correlation coefficient of PM₁₀ and PM_{2.5}(vice verse, PM_{2.5}, PM₁) was almost perfect high with 0.98(1.00, 0.97) and fractional ratios of (PM₁₀-PM_{2.5})/PM_{2.5}((PM_{2.5}-PM₁)/PM₁) were 0.48~1.25(0.16~0.37), local PM₁₀ concentration could be major affected by particulates smaller than both 2.5 μm and 1 μm (fine particulate), opposite to ones before the dust intrusion. After the ending of dust intrusion, as its coefficient of 0.23(0.81, - 0.36) was very low, except the case of PM_{2.5} and PM₁ and (PM₁₀-PM_{2.5})/PM_{2.5}((PM_{2.5}-PM₁)/PM₁) were 1.13~1.91(0.29~1.90), concentrations of coarse particulates larger than 2.5 μm greatly contributed to PM₁₀ concentration, again. For a whole period, as the correlation coefficients of PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ were very high with 0.94, 1.00 and 0.92, reliable regression equations among PM concentrations were suggested.

Key Words : Gobi Desert, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, Yellow dust, Correlation coefficient, Fractional ratio, Regression equation

*Corresponding author : Mi Sook Lee, Department of Health Environment, Graduate School of Venture, Hoseo University, Seoul 137-867, Korea
Phone: +82-10-7240-0357
E-mail: du8392@hanmail.net

1. 서론

매우 건조한 봄철 3~5월 사이에 주로 중국의 서북쪽에 위치하며 매우 건조한 토양을 갖고 있는 타카라마칸사막, 중국북부와 몽고의 남부에 걸쳐 있는 고비

사막, 오르도스사막, 로에스 몽골고원, 중국 내몽고의 황토고원 등지에서 지표부근의 습도가 30% 이하이고, 지표면 부근의 표층풍속이 10 m/s 이상일 때, 대량의 황사가 발생하여 지상 약 3 km 고도까지 상승한 후 북서풍을 타고 황사먼지가 중국 북부를 거치거나, 또는 남동부를 거친 후에 한국 및 일본으로 수송된다(Middleton, 1986; Huang과 Wang, 1998; Fei와 Qing, 1998; Wang 등, 2000; Lin, 2001; Choi, 2004a; Choi와 Zhang, 2008). 그러나 봄철에 발생하는 황사보다 먼지 발생량은 적다하더라도 가을과 겨울에도 자주 발생하여 한반도의 대기질에 매우 큰 영향을 주기도 한다(최, 2010; 최, 2011).

황사는 많은 양의 큰 입자와 작은 입자의 먼지를 중국내륙과 인접 국가인 한국, 일본 뿐만 아니라 태평양 및 미국의 서해안까지 도달하여 이들 국가의 지역대기질 특히 먼지농도가 평상시에 비해 매우 높아 호흡기 질환과 안질을 크게 증가 시키고 있다(Zhang과 Zhong, 1985; Chung 등, 2001). 봄철 3~5월에 고비사막이나 중국의 내몽고 등지에서 황사가 발생한 후 한반도로 유입되어 온 황사먼지가 지역대기에 미치는 영향에 대한 연구는 많이 이루어져 왔으나(Kim과 Kim, 2003; Choi 등, 2008; Choi 등, 2010). 가을인 10월에 황사가 중국으로부터 한반도로 유입되어 지역의 대기질에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 미미하였다.

본 연구에서는 10월에 황사가 고비사막에서 발생하여 한반도의 동해안 연안도시인 강릉시로 유입되기 전과, 유입 중, 유입이 끝난 후의 기간으로 구분하여, 10 μm 이하의 입경을 갖는 먼지입자(미세입자)들의 농도인 PM_{10} , 2.5 μm 이하의 입경을 갖는 먼지입자(극미세입자)들의 농도인 $\text{PM}_{2.5}$ 와 1 μm 이하의 입경을 갖는 먼지입자(초극미세입자)들의 농도인 PM_1 간의 상관관계를 조사하여 상호 간의 관계를 예측할 수 있는 식을 간구하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 측정지역의 지형

Fig. 1에서와 같이 한반도의 동해 연안은 서쪽으로 500~1500 m 고도의 태백산맥이 남북으로 위치하고,

동쪽으로는 최고수심 3800 m의 동해를 끼고 있어 산악 및 해양의 특성을 갖는 기후 특성을 나타내고 있다. 해발 고도 25 m 내외의 분지로 구성되어 있는 강릉시의 서쪽에는 대관령(896 m)을 포함하여 1000 m 이상의 높은 산들이 위치하고 있으며, 동쪽으로는 해안을 따라 남쪽에서 북상해 오는 동한난류(East Korea Warm Current)와 러시아의 태평양 연안도시인 블라디보스톡시와 한반도 북동 해안인 청진연안을 따라 남해해 오는 북한난류(North Korea Cold Current)가 교차하는 동해를 접하고 있어 기온과 수온변화는 지형과 해양의 영향을 매우 크게 받는다.

또한 강릉 지역에서 관측되는 바람은 산악지형과 해양의 영향으로 해륙풍과 산곡풍이 상호작용하여 낮과 밤에 따라 바람의 방향이 다양하게 나타나는 특성을 나타낸다. 서쪽의 높은 산맥이 찬 북서풍을 막아주고, 한반도 남쪽해안에서 강릉연안지역으로 북상하는 따뜻한 동한난류의 영향으로 강릉연안에서는 겨울에도 영상의 기온을 유지하는 온난한 기후대를 형성하고 있다.

2.2. 측정자료 및 분석방법

2003년 10월 26~29일에 독일 에어러졸 측정기인 “GRIMM-1107 먼지측정기”를 강릉 시내에 위치하고 있는 강원기상청(동경 128.90°, 북위 37.75°, 해발고도 20 m)에 설치하여, 입자상물질을 0.3~20 μm 까지 에어러졸 입자의 직경을 μm 단위로 15개(>0.3, >0.4, >0.5, >0.6, >0.8, >1.0, >1.6, >2.0, >3.0, >4.0, >5.0, >7.5, >10.0, >15.0, >20.0)로 구분하여, 각각의 입자의 크기별 농도를 5초 간격으로 자동적으로 측정된다. 이 장비는 환경부의 검정을 거친 장비로 대부분의 선진국에서 널리 사용되고 있으며, 레이저빔에 의해 개개의 입자크기를 측정하여 농도를 산출하는 시스템을 갖추고 있는 매우 정밀한 먼지측정기이다.

본 연구에서는 입자의 크기별 농도를 5분 간격으로 합산하여 출력하도록 사용자에게 의해 조정되었으며, 측정자료는 현장의 모니터 상에서 그래프와 데이터로 동시에 볼 수 있고, 데이터로그에 자동 저장할 수도 있다. 15개 입경별로 구분하여 측정된 농도는 먼지입자의 입경이 10 μm 이하의 미세입자의 총 먼지량인 PM_{10} 과 2.5 μm 이하의 극미세입자의 총 먼지량인 $\text{PM}_{2.5}$ 및 1

μm 이하의 초극미세입자의 총 먼지량인 PM₁로 재 합산한 후, 매 시각별 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ 농도 변화를 파악할 수 있도록 1시간 평균값으로 재 산정된 자료를 본 연구에 사용하였다.

황사의 영향이 나타난 10월 27일을 기준으로 하여 황사가 유입되기 전, 황사의 유입 중, 황사의 유입이 종료된 후로 나누어서 PM₁₀과 PM_{2.5}, PM_{2.5}와 PM₁, PM₁₀과 PM₁과의 상관관계와 각 농도 간에 상호 미치는 영향을 조사하여, 상호 농도 간에 예측할 수 있는 관계식을 제시하고자 하였다.

환경부 및 강원도보건환경연구원과 각 지자체에서 대기질을 측정하는 지역에 설치하여 운영 중인 먼지 측정기는 대부분이 PM₁₀만 측정이 가능하며, 부분적으로 학자들의 연구목적으로 PM_{2.5}와 PM₁의 측정이 이루어져 오고 있다. 본 연구에서는 위의 상관관계로부터 극미세먼지와 초극미세먼지의 농도인 PM_{2.5}와 PM₁을 측정하는 먼지측정기가 없더라도 미세먼지 농도인 PM₁₀으로부터 PM_{2.5}와 PM₁의 농도를 추정할 수 있는 회귀식(Regression equation)을 고안하고자 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀의 매시각별 분포 특성

Fig. 2는 강릉시의 중심에 위치한 강원기상청에서 2003년 10월 26일 00시~29일 1600LST에 측정된 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 매 시각별 농도분포이다. 황사의 영향이 강릉시에 나타나기 전인 10월 26일 0000LST ~ 27일 0700LST까지는 PM₁₀의 농도가 14.51~69.8 μg/m³ 분포로 나타났으며, 매 시각별 농도분포가 전형적인 도시형의 PM농도분포를 나타내었다. PM_{2.5}와 PM₁의 농도분포는 각각 5.02~26.92 μg/m³과 3.82~19.63 μg/m³이었으며, 모두 PM₁₀과 같은 시간대에 농도의 증감을 나타내었다. 일반적으로 우리나라에서 서울시와 같은 대도시에서는 평상시에 80 μg/m³ 내외의 농도를 보이지만, 공장과 같은 오염원이 없는 매우 청정한 도시인 강릉시에서의 PM₁₀의 농도가 40 μg/m³ 이내를 유지하며 50 μg/m³을 넘기가 어렵다(Choi와 Choi, 2008).

출근시간대인 0900LST에 PM농도가 높고, 퇴근시간대인 1800LST에 최대농도가 나타나는 이유는 출퇴근 시간에 많은 차량이 운행되어 차량 연료의 연소에 따른 대기오염물질의 방출량이 높고, 도로로부터

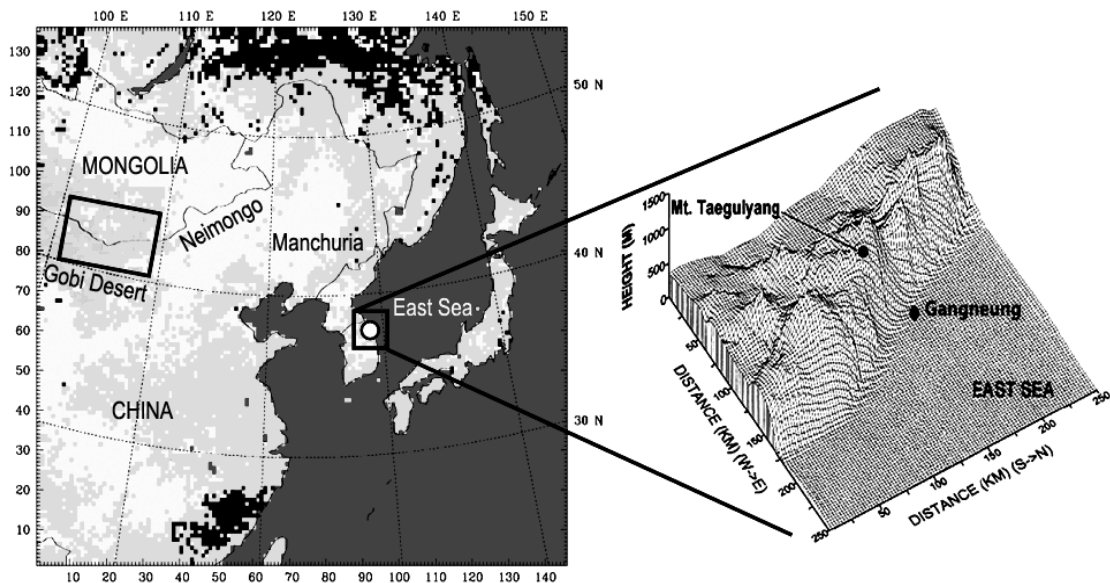


Fig. 1. (a) Topographical features of land-use in the northeastern Asia and (b) three-dimensional topography in the vicinity of Gangneung city. Big and small boxes in (a) include Gobi Desert and Gangneung city.

먼지 발생이 높아 PM농도가 높게 되었다(Choi 등, 2010). 일반적으로 일출 후부터는 종관서풍이 탁월하지 않는 경우에 동해와 강릉분지에서 해풍과 곡풍(Sea and valley breeze)이 불지만, 일몰시부터는 낮의 풍계와 반대로 강릉시의 서쪽에 위치한 태백산맥으로부터 강릉시로 서풍인 산풍과 육풍 (Mountain and land breeze)이 불게 되어 이 서풍에 의해 대관령 정상 쪽에서 찬 공기가 강릉시내로 유입되므로 시내 지표부근의 기온이 급격하게 하강하는 양상을 나타낸다(Choi, 2004b). 따라서 일몰 무렵부터 대부분의 주거지역에서 난방보일러를 사용하게 되므로 퇴근 시간대의 차량으로부터 대기오염물질의 방출 및 도로로부터의 먼지와 난방보일러로부터 방출되는 대기오염물질이 결합하여 0900LST 무렵의 PM농도보다 더 높은 최대농도가 1800LST에 나타나게 되었다고 생각된다.

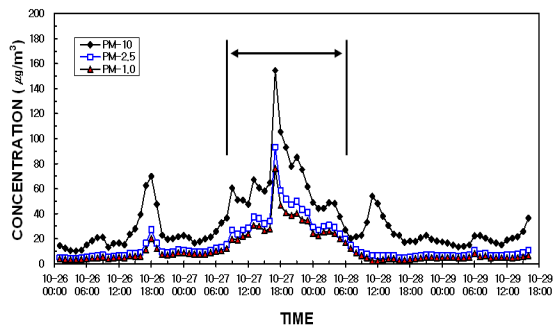


Fig. 2. Hourly concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ and $\text{PM}_{1.0}$ at an aerosol sampling point of Gangwon Meteorological Administration, Gangneung city, Korea on October 26~29, 2003. The interval between two vertical lines denotes a period of dust intrusion toward Gangneung city, Korea.

출근시간대인 0900LST 무렵에 PM농도가 오전 중 최대치를 갖지만 매우 높지 않은 이유는, 일출 후부터 태양광선에 의한 지표 가열에 의한 대류경계층 (Convective boundary layer)의 연직 확대로 지표부근의 차량으로부터 대기오염물질의 방출과 도로로부터의 비산먼지 등 대기오염물질이 대류에 의해 상승하게 된다. 대류경계층 처럼 강릉연안에서 대관령의 정상까지 사면을 따라 지표가열에 의해 약 300 m 두께로 발달하는 열적내부경계층(Thermal internal

boundary layer; TIBL) 내에 위치한 강릉시의 지표부근에서 출근시간대에 많은 차량에 의해 방출된 오염물질로 인해 PM의 농도가 순간적으로는 높게 나타나더라도 곧 대류에 의해 열적내부경계층의 상부로 상승 후 대관령의 정상으로 이동하므로 실제 PM의 농도가 높지 않는다. 반면에 일몰 무렵부터 야간의 지표 냉각으로 인해 형성되는 안정층인 야간접지역전층 (Nocturnal surface inversion layer)의 고도가 주간 열적내부경계층에 비해 낮은 약 100~150 m 정도로 축소되고, 지표부근에서 방출된 대기오염물질이 야간 접지역전층의 지표로 하강하여 축적되므로 1800LST에 최대농도가 나타난다. 본 연구에서 최대농도가 나타난 시간대가 이전에 Choi와 Choi(2008)가 수행한 2004년 3월 황사가 강릉시에 유입되기 전의 시각별 PM농도에 대한 연구 결과와 매우 유사하였다.

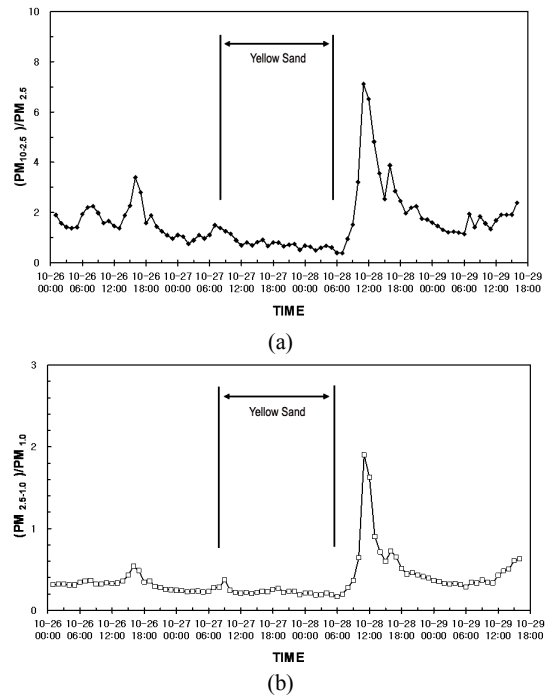


Fig. 3. Hourly fractional ratios of (a) $(\text{PM}_{10}-\text{PM}_{2.5})/\text{PM}_{2.5}$ and (b) $(\text{PM}_{2.5}-\text{PM}_1)/\text{PM}_1$ at an aerosol sampling point of Gangwon Meteorological Administration, Gangneung city, Korea on October 26~29, 2003. 3a and b showed more precious results than previous researches by Choi(2010).

중국의 북쪽에 위치한 고비사막으로부터 강한 북서풍에 의해 많은 양의 황사가 중국 남동부를 거쳐 남서풍을 따라 강릉시로 유입되는 10월 27일 0800LST~28일 0500LST까지는 황사의 유입에 의해 강릉시에서 PM₁₀의 농도 변화가 36.71~154.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 황사의 영향이 있기 전에 비해 농도가 최대 3.8배로 높게 나타났으며, 최대농도가 황사의 유입 전에 비해 1시간 이른 일몰 시간인 1700LST에 나타났다. PM_{2.5}와 PM₁의 농도변화는 26.92~93.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 19.63~76.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 각각 나타났으며, 황사의 유입 전의 농도에 비해 각각 최대 3.4배와 14.1배였다. 27일 0700LST 이후에는 고비사막에서 많은 양의 황사가 강릉시로 유입되면서 강릉시내에서 축적되므로 PM의 농도가 매우 높게 나타났다.

그러나 10월 27일에 비록 많은 양의 황사가 지속적으로 유입되더라도, 강릉지역의 지표부근에서 배출된 대기오염물질과 유입된 황사가 낮에 대류에 의해 먼지 등의 오염물질이 대류경계층 상부 고도까지 상승함으로 전반적으로 10월 26일의 PM농도보다 훨씬 높은 상태에서 1200LST에 PM농도가 다소 낮아지는 현상을 보였다. 지속적으로 많은 양의 황사가 강릉시로 유입됨에 따라 대류경계층 내에 먼지량이 계속 증가하게 되어 강릉시의 지표부근에서 PM농도가 증가하는 상태를 유지하였다.

또한 중국에서 발원한 많은 먼지가 강릉으로 수송되어 지표부근과 상공의 먼지에 의해 낮에 지표에 도달하는 태양복사량이 차단되므로 황사의 유입 전에 비해 대류경계층이 발달하지 못하여 대류경계층의 두께가 얇아지게 되며, 얇아진 대류경계층 내에 유입된 황사먼지와 지역에서 배출된 대기오염물질이 차츰 침착하게 되므로 PM의 농도가 전날에 비해 몇 배로 증가하게 되었다(Choi 등, 2008). 일몰 무렵에는 지표냉각에 의해 대류경계층보다 훨씬 낮은 약 150 m 내외의 야간접지역전층이 형성되어 강릉시에서 배출된 대기오염물질과 유입된 황사가 역전층 내의 지표부근에 축적되므로 1700LST에 최대농도가 나타났다.

3.2. PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ 간의 상관관계, 회귀식 및 농도차비

3.2.1. 황사의 유입 전

Fig. 4a에서 보는 바와 같이 강릉시에 황사의 영향

이 나타나기 전인 2003년 10월 26일 1200UTC (2100LST = UTC + 0900)에 몽고의 고비사막을 중심으로 북서쪽에 1026 hPa와 남서쪽에 1027 hPa의 고기압과 중국 동북부의 만주에 1002 hPa와 동남쪽인 천진부근에 1007 hPa의 저기압이 위치하고 있어 서고-동저의 기압 배치를 나타내고 있다. 이와 같은 기압 배치로 인해 고비사막에서는 북서풍이 불었고, 중국의 동부와 한반도 동해안은 남서풍이 지배적이었다.

황사 발원지인 고비사막에서 강한 북서풍에 의해 유도된 황사먼지는 한랭전선의 후면에서 북서풍과 전면에서 남서풍에 의해 만주지역으로의 수송이 예상되므로 동해연안의 강릉시로 먼지의 수송이 어려운 상태였다. 따라서 강릉시의 PM농도 변화에는 고비사막에서 수송되는 황사 먼지의 영향이 없음을 알 수 있다.

Fig. 4b에서 보는 바와 같이 NOAA HYSPLIT모델 (Hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory)을 사용하여 지상 500 m, 1000 m, 2000 m 고도에서 공기입자의 역유적궤도(Backward trajectory)를 보면 시베리아와 몽고 동북부의 3 km 이상의 고도에서 청정한 공기가 강릉시의 2000 m, 1000 m와 500 m 고도에 도달하므로 몽고의 고비사막에서 발원한 먼지가 강릉시로 유입을 기대하기는 어렵다. 따라서 10월 26일 2100LST에 강릉시의 PM농도는 고비사막에서 발원한 황사의 영향을 받지 않았다는 것을 알 수 있으며, 이와 같은 상태는 27일 0700LST까지 지속되었다.

최(2010)는 2003년 10월 26~29일까지의 PM자료의 시간별 분포특성에 대해서는 연구하였으나, PM₁₀과 PM_{2.5}, PM_{2.5}와 PM₁, PM₁₀과 PM₁과의 상관관계와 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ 간의 농도예측을 위한 회귀식에 대한 연구가 없었다. 본 연구에서는 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ 상호 간의 상관관계와 농도차비((PM₁₀-PM_{2.5})/PM₁ 및 (PM_{2.5}-PM₁)/PM₁)을 관련시켜, 황사의 유입 전, 유입 중, 유입 종료 후의 PM농도 특성에 대해 종합적인 해석을 하여 최(2010)가 수행한 이전 연구의 부족한 부분을 상세하게 설명하고자 하였다.

Fig. 5는 2003년 10월 26일 0000LST~9일 1600LST까지 먼지 측정기간 중 강릉시에 황사의 영향이 나타나기 전인 10월 26일 0000LST~27일 0700LST까지 PM₁₀과 PM_{2.5}, PM_{2.5}와 PM₁, PM₁₀과 PM₁과의 상관관계와 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ 간의 농도예측을 위한 회귀식

을 나타내고 있다. Fig. 5a에서 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 상관계수는 0.90으로 상관관계가 매우 높았다. 이것은 $2.5 \mu m$ 이하의 작은 먼지입자(극미세입자)들의 총량이 미세입자인 PM_{10} 농도에 크게 기여하였다는 것을 의미한다. 매우 높은 상관관계로부터 PM_{10} 농도를 $PM_{2.5}$ 농도로부터 예측할 수 있는 회귀식이 제시되었다.

Fig. 3a에서 황사가 유입되기 전에는 농도차비(PM_{10} - $PM_{2.5}$)/ PM_{10} 의 값이 1.37~3.39로 입자의 크기가 $2.5 \mu m$ 이상이고 $10 \mu m$ 보다 작은 조대입자(Coarse particulate)의 농도인 PM_{10} - $PM_{2.5}$ 가 극미세입자 $2.5 \mu m$ 이하의 먼지총량인 $PM_{2.5}$ 의 농도보다 27~239%가 더 많으므로, 비록 $2.5 \mu m$ 이하의 입자들의 먼지농도인 $PM_{2.5}$ 가 크게 기여했다라도 $2.5 \mu m$ 이상의 조대입자들이 훨씬 더 많이 PM_{10} 의 구성에 기여했음을 알 수 있다.

Fig. 5b에서 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 농도와의 상관계수는 0.99로 $2.5 \mu m$ 이하의 극미세입자인 $PM_{2.5}$ 농도에 $1 \mu m$ 이하의 작은 먼지입자인 초극미세입자들의 총량인 PM_{10} 농도가 99%의 영향을 미칠 정도로 $PM_{2.5}$ 농도의 거의 대부분을 차지하였다. Fig. 3b에서 농도차비($PM_{2.5}$ - PM_{10})/ PM_{10} 가 0.23~0.54이므로 입자의 크기가 $1 \mu m$ 이상이고 $2.5 \mu m$ 보다 작은 입자의 농도인 $PM_{2.5}$ - PM_{10} 이 $1 \mu m$ 이하의 먼지총량인 PM_{10} 보다 $PM_{2.5}$ 농도구성에 23~54%로 적은 영향 밖에 주지 못하여,

극미세입자들의 먼지농도인 $PM_{2.5}$ 에는 초극미세입자들의 농도인 PM_{10} 이 지배적으로 작용하였다.

Geller 등(2004)은 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 은 연소-에어러졸과 대기에서 광화학반응이나 물리적인 형상의 변화과정에서 성장하는 입자들로 구성된다고 주장하였다. Evagelopoulos 등(2006)은 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 농도는 가스상물질과 먼지 등의 입자상물질 모두로부터 생성될 수 있으며, 미세한 크기의 1차적인 입자상오염물질 뿐만 아니라 자동차 배기가스 같은 가스상오염물질들이 대기 속에서 응축되어 2차적인 입자상오염물질로 전환되어 구성된다고 또한 호흡통로에서 입자의 관통력은 입자의 크기의 함수로 나타낼 수 있고, 보다 더 작은 입자인 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 이 폐의 가장 깊은 곳까지 도달하며, 유럽에서는 주변대기환경입자로서 $PM_{2.5}$ 를 인체건강의 지표로서 널리 대표적으로 간주된다고 설명하였다. 따라서 본 연구에서는 특히 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 농도분포를 면밀하게 파악하고자 하였다.

Fig. 5c에서와 같이, PM_{10} 과 PM_{10} 의 상관계수는 0.84로 상관관계가 여전히 매우 높아, PM_{10} 의 농도변화에 $1 \mu m$ 이하의 먼지들이 크게 기여하였으며, $1 \mu m$ 보다 큰 입자들이 PM_{10} 의 농도변화에 부분적으로 영향을 주었음을 알 수 있다. 따라서 강릉시에 황사 유입의 영향이 없는 기간 동안에도 PM_{10} 의 농도에 비록

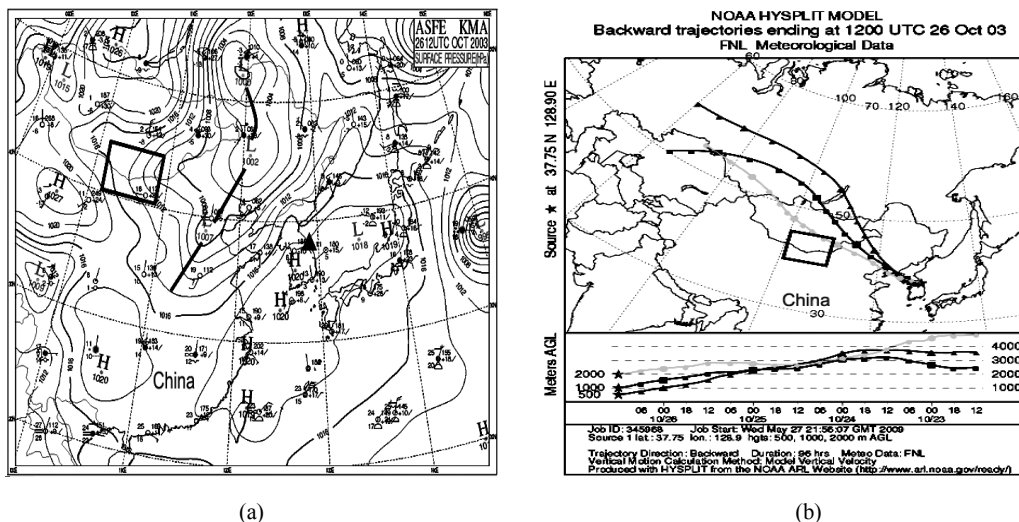


Fig. 4. (a) Surface pressure chart and (b) backward trajectory using HYSPLIT model at 1200UTC(2100LST), October 26, 2003. A small box, thick line and a triangle denote Gobi Desert, cold front and Gangneung city, Korea, respectively.

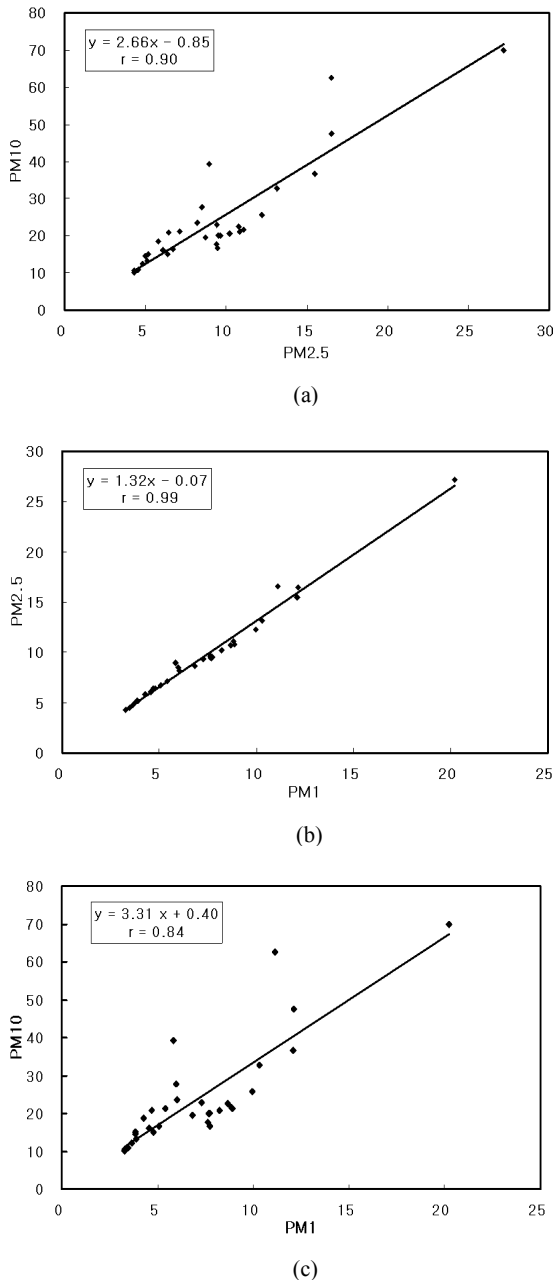


Fig. 5. Correlation coefficient and regression equation between (a) PM₁₀ and PM_{2.5}, (b) PM_{2.5} and PM₁, (c) PM₁₀ and PM₁ before the dust intrusion from Gobi Desert to Gangneung city on October 26~27, 2003.

극미세먼지입자인 2.5 μm 이하의 작은 먼지입자들과 초극미세먼지인 1 μm 이하의 먼지입자들의 총량이 모두 크게 기여하였지만 여전히 정량적으로는 2.5 μm 이상의 큰 먼지입자들이 더 많이 기여하였다.

3.2.2. 황사의 유입 중

Fig. 6a에서 보는바와 같이 1002h Pa의 저기압의 중심이 중국 북서부와 몽고 동쪽 사이에 위치하고, 한랭전선이 발해만을 가로질러 중국의 화북지방의 서쪽에 위치한 석가장사까지 확장되어 있다. Fig. 4a에서 10월 26일 2100LST에 황사의 발원지인 고비사막에서 강한 북서풍에 의해 유도된 황사먼지는 시간이 지남에 따라 동쪽으로 이동하게 되었고, Fig. 6a의 27일 0900LST에는 한랭전선의 후면의 조밀한 등압선 간격에 의해 생성된 강한 북풍에 의해 중국 북동부로 이동하던 황사가 중국의 중부 지역으로 남하한 후 한랭전선의 전면에서 남서풍에 의해 한반도의 중부 지역과 중국의 요동지역까지 수송이 가능함에 따라 강릉시로 황사먼지의 수송이 용이했을 것이다. 따라서 10월 27일 0900LST부터 수송된 황사와 강릉지역에서 출근시간대의 밀집된 차량들에 의해 배출되는 대기오염물질의 결합으로 PM농도가 전날인 10월 26일 0900LST에 비해 10월 27일 0900LST에는 매우 높게 나타나게 되었다.

Fig. 7a의 HYSPLIT모델 의한 역유적궤도에서 황사의 발원지인 고비사막에서 가열된 지표면에 강한 북서풍에 의해 황사먼지가 발생한 후에는 일반적으로 대류에 의해 황사먼지는 약 3~3.5 km 고도까지 확장되는 대류경계층상부까지 상승한 후 서풍에 의해 동쪽으로 이동하게 된다(Choi, 2004a). 10월 24일에 고비사막에서 황사가 발생한 후 고비사막의 3000 m 상공에서 10월 27일 0000UTC(0900LST)에 강릉시의 2000 m 고도에 도달했다. 동시에 고비사막의 동쪽에서 중국의 북부지역까지 넓게 펼쳐진 내몽고지역의 2~3 km 상공을 지나가는 황사먼지입자들은 강릉시의 1000 m와 500 m 고도에 도달하게 되어, 강릉시의 PM 농도의 증가에 크게 기여할 수 있었다.

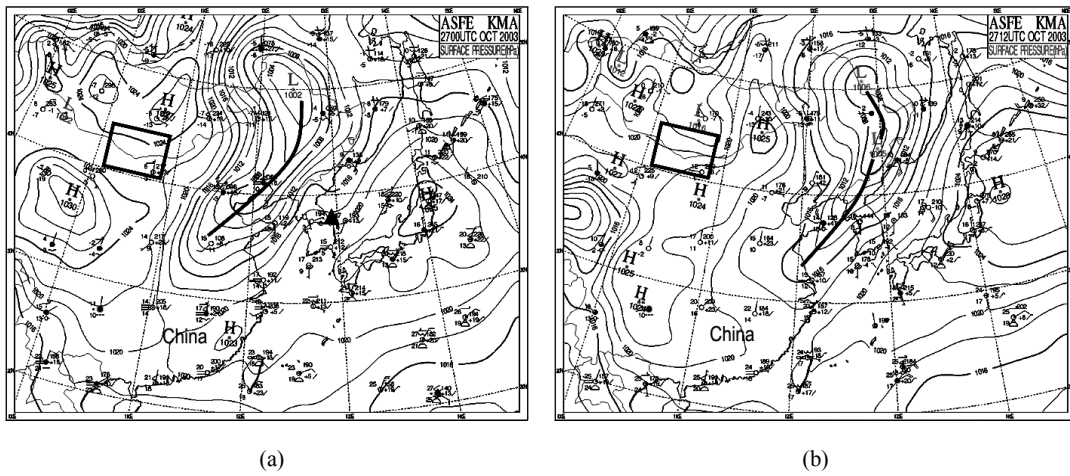


Fig. 6. Surface pressure chart at (a) 0000UTC(0900LST) and (b) 1200UTC(2100LST), October 27, 2003. A small box, thick line and a triangle denote Gobi Desert, cold front and Gangneung city, Korea, respectively.

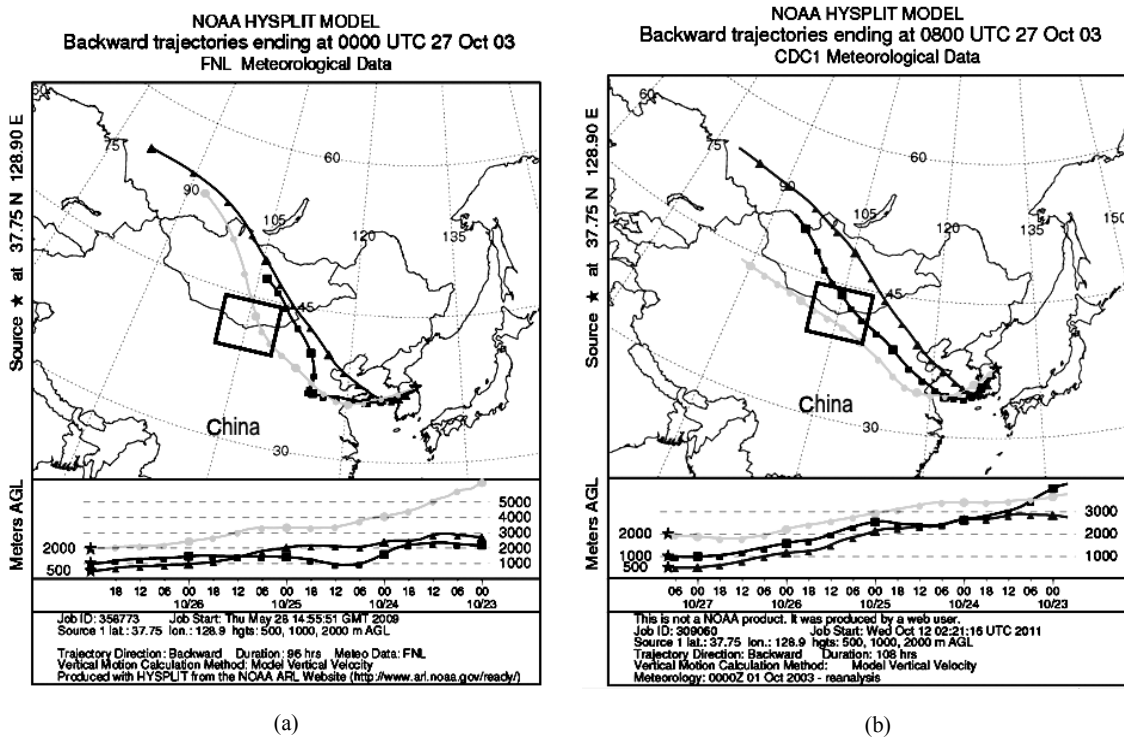


Fig. 7. Backward trajectory using HYSPLIT model at (a) 0000UTC(0900LST) and (b) 1200UTC (2100LST) on October 27, 2003. A small box inside figures denotes Gobi Desert.

기상청에서 지상일기도는 매 3시간 간격, 상층일기도는 매 6시간 간격으로 제공하므로, 강릉시에서 PM 농도가 최대치를 갖는 시각인 10월 27일 1700LST의 일기도를 획득하기가 어려워, 상, 하층의 기압배치 상태를 매 6시간 간격으로 조사하였다. 따라서 10월 27일 1700LST의 기압배치 상태는 1200UTC(2100LST) 일기도를 통해 조사하였다. Fig. 6b에서 10월 27일 2100LST에 hPa의 고기압이 몽고의 동북지역에 위치하였고, 중국의 동북부지역에 위치했던 저기압은 차츰 동쪽으로 이동하게 되어 한랭전선이 한반도의 북부지역에서 만주북부지역까지 펼쳐지게 되었다. 이와 같은 기압배치상태로 인해 고비사막부근에서는 북풍이, 중국 남부지역에서는 남서풍이 불게 되었으며, 연구지역인 강릉시를 포함하여 한반도 전역에도 남서풍이 지배적으로 불게 되었다. 따라서 고비사막에서 발생한 황사먼지는 몽고-내몽고-중국남부지역을 통과한 후 한국의 동쪽 연안인 강릉시에 도달할 수 있는 기상상태가 되었다.

Fig. 7b의 역유적궤도에서, 10월 24일과 25일에 고비사막의 3000 m 상공과 고비사막의 동쪽에 위치한 내몽고의 2000 m를 통과한 황사먼지입자들이 한반도 동쪽 연안으로 불어 왔으며, 강릉시에는 10월 27일 0800UTC(1700LST)에 1000 m와 500 m 고도에 도달하게 되었다. 따라서 고비사막과 내몽고에서 대량의 황사먼지가 발생한 후 강릉시로 수송되어 지표면 부근에서의 PM₁₀(PM_{2.5}, PM₁)의 농도가 급격하게 증가하는데 황사먼지가 크게 기여하였다. 이와 같은 황사먼지의 지속적인 수송은 익일 28일 0400LST까지 지속되었다.

Fig. 8은 관측기간 중 황사가 나타나는 기간인 10월 27일 0900LST~28일 0500LST까지 PM₁₀와 PM_{2.5}, PM_{2.5}과 PM₁, PM₁₀과 PM₁농도와의 상관관계와 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁농도 간의 회귀식을 나타내고 있다. PM_{2.5}와 PM₁₀의 상관계수는 0.98로 상관관계가 매우 높으며 PM₁₀의 농도 변화에 극미세입자인 2.5 μm 이하의 작은 먼지입자들의 농도가 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. PM_{2.5}과 PM₁의 상관계수는 1.00으로 PM_{2.5}의 농도에 초극미세입자인 1 μm 이하의 먼지입자들의 총량이 PM_{2.5}의 농도에 100% 정도로 영향을 준다는 것을 알 수 있다. PM₁₀과 PM₁과의 상관계수는

0.97로 매우 상관관계가 크며, 미세입자인 PM₁₀의 농도변화에 초극미세입자인 1 μm 이하의 먼지들이 크게 기여하였다.

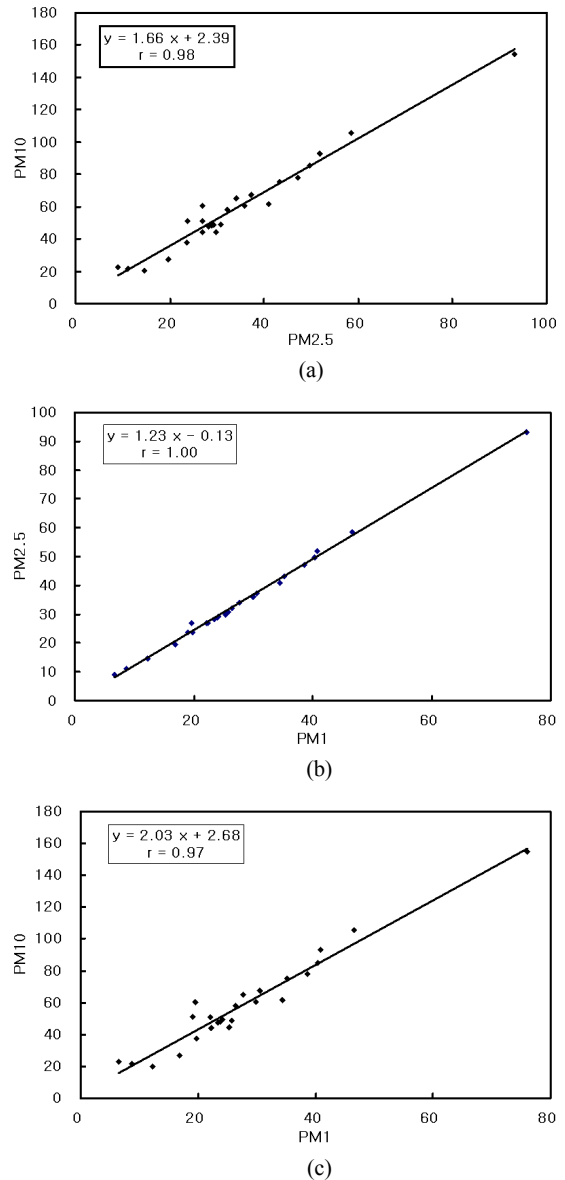


Fig. 8. Correlation coefficient and regression equation between (a) PM₁₀ and PM_{2.5}, (b) PM_{2.5} and PM₁, (c) PM₁₀ and PM₁ concentrations before the dust intrusion from Gobi Desert to Gangneung city on October 27~28, 2003.

Fig. 3a에서 황사가 유입되는 중에는 농도차비 ($PM_{10}-PM_{2.5}$)/ PM_{10} 의 값이 0.48~1.25이므로 대략 0.5 부근의 값을 취하므로, 입자의 크기가 $2.5 \mu m$ 이하인 극미세입자의 먼지총량인 $PM_{2.5}$ 의 농도가 $2.5 \mu m$ 이상이고 $10 \mu m$ 보다 작은 조대입자(Coarse particulate)의 농도인 $PM_{10}-PM_{2.5}$ 보다 미세입자의 농도인 PM_{10} 의 농도에 약 2배의 영향을 주었음을 알 수 있다. 이는 중국에서 발원하는 황사가 한반도로 유입될 때, 조대입자가 지역의 PM_{10} 농도에 절대적인 영향을 준다는 일반적인 기존의 연구결과와는 결과가 반대로 나타났다(공 등, 2002; Kim 등, 2003; 정 등, 2008; 전, 2010; 최, 2008; 최, 2011). 즉 극미세입자들의 먼지농도인 PM_{10} 에 $PM_{2.5}$ 가 크게 기여했다라도 $2.5 \mu m$ 이하의 극미세입자들이 조대입자들보다 약 배 정도 PM_{10} 의 구성에 기여했음을 알 수 있다.

$PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 농도와의 상관계수는 0.99로 $2.5 \mu m$ 이하의 극미세입자인 $PM_{2.5}$ 농도에 $1 \mu m$ 이하의 매우 작은 먼지입자인 초극미세입자들의 총량을 나타내는 PM_{10} 농도가 99%의 영향을 미칠 정도로 $PM_{2.5}$ 농도의 거의 대부분을 차지하였다. Fig. 3b에서 농도차비 ($PM_{2.5}-PM_{10}$)/ PM_{10} 가 0.16~0.37이므로 입자의 크기가 $1 \mu m$ 이상이고 $2.5 \mu m$ 보다 작은 입자의 농도인 $PM_{2.5}-PM_{10}$ 이 $1 \mu m$ 이하의 먼지총량인 PM_{10} 의 농도에 비해

$PM_{2.5}$ 농도구성에 16~37%로 약 30% 이하로 적은 영향 밖에 주지 못하여, 극미세입자들의 먼지농도인 $PM_{2.5}$ 에는 초극미세입자들의 농도인 PM_{10} 지배적으로 작용하였음을 알 수 있다.

따라서 황사가 강릉시에 나타난 기간 동안 PM_{10} 의 농도는 극미세먼지 $2.5 \mu m$ 와 초미세먼지인 $1 \mu m$ 이하의 먼지입자들의 농도가 매우 크게 기여하였다. 따라서 PM_{10} 의 구성이 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 간의 상관관계가 매우 높아 상호간의 예측공식을 사용하여 PM_{10} 로부터 $PM_{2.5}$ 의 농도, $PM_{2.5}$ 로부터 PM_{10} 농도와 PM_{10} 로부터 PM_{10} 의 농도를 예측할 수 있으며, 역의 경우도 같은 방법으로 계산할 수 있다.

3.2.3. 황사의 유입이 끝난 후

10월 27일 0000UTC (0900LST)에는 27일 2100LST에 만주 북부 지역에 위치하고 있던 저기압이 동쪽으로 이동함에 따라 한랭전선이 우리나라 남서해안에서 강릉을 거쳐 러시아의 블라디보스톡시의 북쪽 지역까지 펼쳐져 있었다. 이때 청진 연안해역에서 중규모 저기압발달(Meso-cyclogenesis)이 있어 이로 인해 강릉 연안에도 매우 강한 바람이 불게 되었다(Fig. 9a). 이때 기압배치가 서고-동저형태로 바뀌어 강한 북풍의 바람이 한반도 동해안에서 탁월하게 불었으며, 한랭전선의 후면에서는 북풍이, 반면에 전면인 동해연안에서

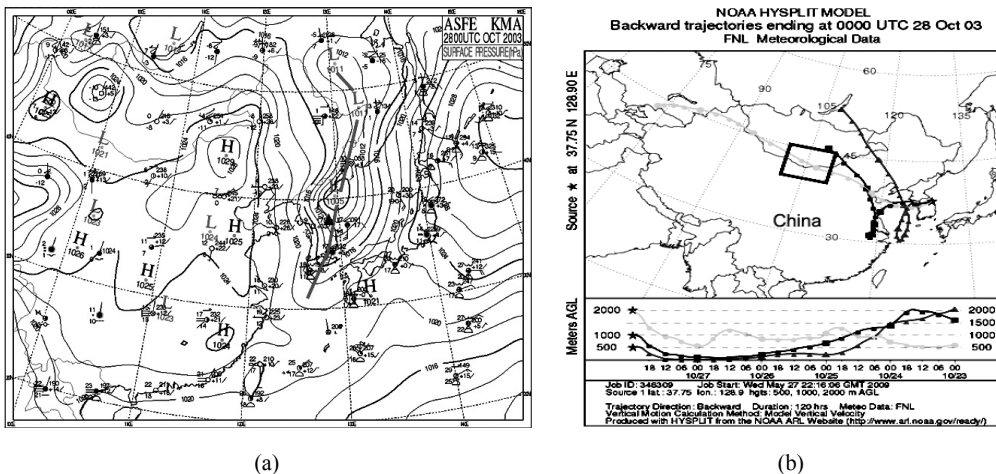


Fig. 9. (a) Surface pressure chart and (b) backward trajectory using HYSPLIT model at 0000UTC(0900LST), October 28, 2003. A small box, thick line and a triangle inside the figure denote Gobi Desert, cold front and Gangneung city, Korea, respectively.

는 남서풍 내지 남풍이 탁월하였다. 따라서 10월 28일 0500LST 이후는 황사가 고비사막으로부터 한반도 동해 연안도시인 강릉시로의 수송되기는 매우 어려웠다.

10월 28일 0900LST에 Fig. 9b의 상부와 하부의 역유적궤도의 양상을 보면, 고비사막에서가 아닌 내몽고 지역 (그림 속의 작은 사각형 박)에서 중국남부를 통과한 후 황해를 건너는 기간인 10월 26~27일, 약 1일간 황해의 해면 부근에 머문 후에 10월 28일에 강릉시의 1000 m, 500 m 고도에 도달하므로 상당한 양의 황사먼지가 황해에 낙하하게 되었을 것으로 예상된다. 황해에서 침적되지 않은 나머지 황사먼지가 강릉시로 수송이 되어 그 양은 많지 않으므로 강릉지역에서 PM농도의 증가에는 크게 기여하지 못했다.

Fig. 10은 황사의 영향이 끝난 후인 10월 28일 0600LST~29일 1600LST까지 PM₁₀와 PM_{2.5}, PM_{2.5}와 PM₁, PM₁₀과 PM₁농도와의 상관관계와 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁농도 간의 회귀식을 나타내고 있다. PM₁₀와 PM_{2.5}와의 상관계수는 0.23로 상관관계가 매우 낮았으며 PM₁₀의 농도변화에 극미세입자인 2.5 μm 이하의 작은 먼지입자들의 농도가 매우 미약하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 즉 입자의 크기가 2.5 μm 이상인 조대입자가 PM₁₀의 농도변화에 큰 영향을 주었을 것이다. 반면에 PM_{2.5}와 PM₁과의 상관계수는 0.81이므로 여전히 매우 높아 PM_{2.5}의 농도형성에 PM₁농도가 매우 크게 기여하였다. 즉 PM_{2.5}의 농도변화에는 초극미세입자인 1 μm 이하의 먼지입자들의 총량이 매우 크게 영향을 주었다. Fig. 3a에서 이와 같은 사실을 파악할 수 있다.

Fig. 3a에서 황사의 유입이 끝난 후에는 농도차비 (PM₁₀-PM_{2.5})/PM₁₀의 값이 1.13~1.91로 미세입자의 농도인 PM₁₀의 농도에 입자의 크기가 2.5 μm 이상이고 10 μm보다 작은 조대입자의 농도인 PM₁₀-PM_{2.5}이 입자의 크기가 2.5 μm 이하인 극미세입자의 먼지총량인 PM_{2.5}의 농도보다 13~91% 더 많이 영향을 주었음을 알 수 있다. 이는 중국에서 발원하는 황사가 한반도로 유입이 끝난 후에는 조대입자가 지역의 PM₁₀농도에 절대적인 영향을 주었다.

PM_{2.5}와 PM₁농도와의 상관계수는 0.81로 2.5 μm 이하의 극미세입자인 PM_{2.5}농도에 1 μm 이하의 매우 작은 먼지입자인 초극미세입자들의 총량을 나타내는

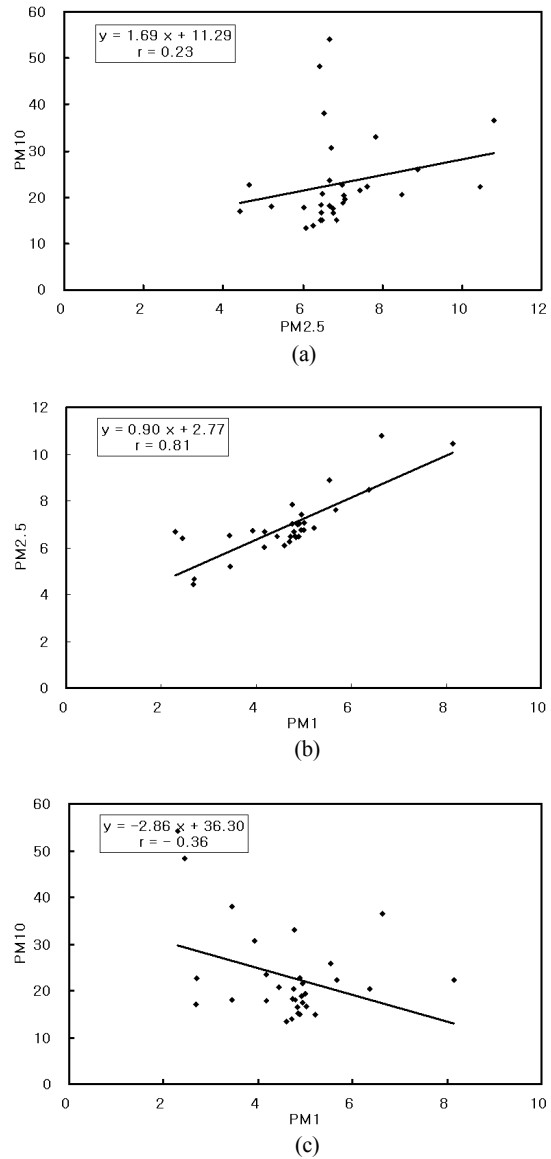


Fig. 10. Correlation coefficient and regression equation between (a) PM₁₀ and PM_{2.5}, (b) PM_{2.5} and PM₁, (c) PM₁₀ and PM₁ after the ending of dust intrusion from Gobi Desert to Gangneung city on October 28~29, 2003.

PM₁농도가 절대적인 영향을 미칠 정도로 PM_{2.5}농도의 거의 대부분을 차지하였다. Fig. 3b에서 (PM_{2.5}-PM₁)/PM₁가 0.29~1.90로 입자의 크기가 1 μm 이상이고 2.5 μm보다 작은 입자의 농도인 PM_{2.5}-PM₁이 1 μm 이하의

먼지총량인 PM_{10} 의 농도에 비해 $PM_{2.5}$ 농도구성에 29~190%로 부분적으로는 큰 영향을 주는 시간대를 제외하고는 대부분의 시각에서 적은 영향 밖에 주지 못하여, 극미세입자들의 먼지농도인 $PM_{2.5}$ 에는 초극미세입자들의 농도인 PM_1 지배적으로 작용하였음을 알 수 있다.

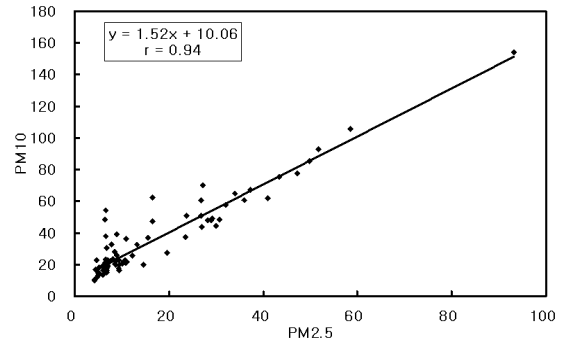
그러나 PM_{10} 과 PM_1 과의 상관계수는 -0.36으로 상관관계가 거의 없어 미세입자인 PM_{10} 의 농도변화에 초극미세입자인 $1 \mu m$ 이하의 먼지들이 기여하지 못했다. 황사가 유입되기 전의 경우와 비교하면, 상관관계가 매우 낮게 나타나는 것은 Fig. 9b에서 보는 바와 같이, 한반도로 매우 적은 양의 황사가 유입되는 과정에서 황사먼지의 역유적궤도를 보면, 황사먼지가 10월 26일부터 약 1일간 황해의 해면 부근에서 체류하게 되어 상당량의 황사먼지가 해면에 침적되었을 것이다. 또한 이들 황사가 황해상의 해양입자들과 병합 등의 복잡한 과정을 겪어면서 이와 같은 현상이 발생했을 것으로 추정된다. 현재 이 기간에 황해 해상에서 측정된 PM자료가 국내에는 없어 정확하게 원인 분석을 하기가 어렵다.

따라서 황사의 유입이 끝난 후에는 PM농도는 주로 극미세입자인 $2.5 \mu m$ 보다 큰 조대입자가 크게 영향을 미쳤으며, 또한 극미세입자나 초극미세입자들의 영향은 매우 미미하였다. 따라서 상관관계가 매우 높은 $PM_{2.5}$ 와 PM_1 과의 관계를 예측하는 회귀식만 사용하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

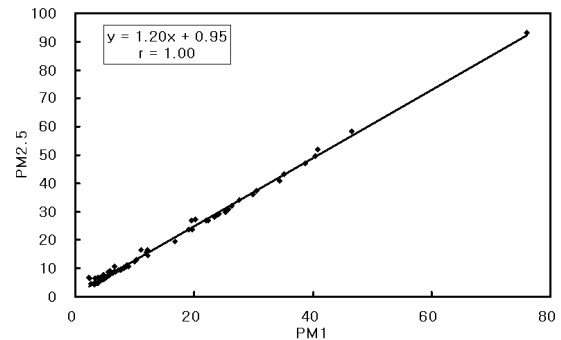
3.2.4. 전 기간

Fig. 11은 10은 2003년 10월 26일~29일까지 강릉 시내에 황사의 유입 전, 유입기간, 유입 종료 후와 구분하지 않고 PM측정의 전 기간에서 PM_{10} 와 $PM_{2.5}$, $PM_{2.5}$ 과 PM_1 , PM_{10} 과 PM_1 과의 상관관계와 PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 농도 간의 예측식을 나타내고 있다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 와의 상관계수는 0.94로 매우 높은 상관관계를 나타내어 PM_{10} 의 농도 변화에 $2.5 \mu m$ 이하의 작은 먼지입자들의 농도가 크게 작용하였다는 것을 알 수 있다(Fig. 11a).

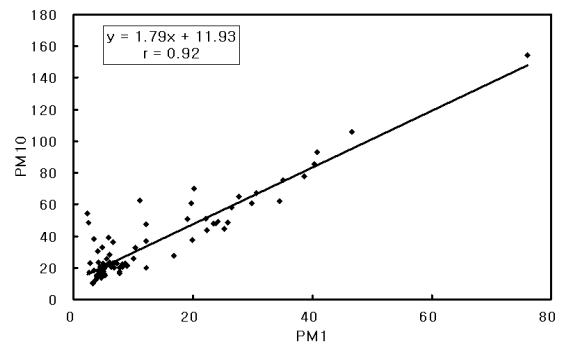
$PM_{2.5}$ 과 PM_1 의 상관계수는 1.00으로 완벽한 상관관계를 나타내므로 $PM_{2.5}$ 의 농도에 초극미세입자인 $1 \mu m$ 이하의 먼지입자들의 총량이 $PM_{2.5}$ 의 농도에 100%



(a)



(b)



(c)

Fig. 11. Correlation coefficient and regression equation between (a) PM_{10} and $PM_{2.5}$, (b) $PM_{2.5}$ and PM_1 , (c) PM_{10} and PM_1 at Gangneung city on October 26~29(whole period), 2003.

정도로 크게 영향을 주었다(Fig. 11b). PM_{10} 과 PM_1 과의 상관계수는 0.92로 매우 상관관계가 크며, 미세입자인 PM_{10} 의 농도변화에 초극미세입자인 $1 \mu m$ 이하의

Table 1. Correlation coefficient and regression equation between (a) PM₁₀ and PM_{2.5}, (b) PM_{2.5} and PM₁, (c) PM₁₀ and PM₁ before, during and after the dust intrusion from Gobi Desert to Gangneung city on October 26~29, 2003

Period (dust intrusion)	Item (Y - X)	Correlation coefficient (r)	Regression equation
2003/10/26~27 (Before)	PM10 - PM2.5	0.90	Y = 2.66X - 0.85
	PM2.5 - PM1.0	0.99	Y = 1.32X - 0.07
	PM10 - PM1.0	0.84	Y = 3.31X + 0.40
2003/10/27~28 (During)	PM10 - PM2.5	0.98	Y = 1.66X + 2.39
	PM2.5 - PM1.0	1.00	Y = 1.23X - 0.13
	PM10 - PM1.0	0.97	Y = 2.03X + 2.68
2003/10/28~29 (After)	PM10 - PM2.5	0.23	Y = 1.69X + 11.29
	PM2.5 - PM1.0	0.81	Y = 0.90X + 2.77
	PM10 - PM1.0	- 0.36	Y = -2.86X + 36.30
2003/10/26~29 (Whole)	PM10 - PM2.5	0.94	Y = 1.52X + 10.06
	PM2.5 - PM1.0	1.00	Y = 1.20X + 0.95
	PM10 - PM1.0	0.92	Y = 1.79X + 11.93

먼지들의 농도가 여전히 크게 기여하였다. 따라서 PM₁₀의 농도변화는 극미세먼지 2.5 μm와 초미세먼지인 1 μm 이하의 먼지입자들이 모두 매우 크게 기여하였다(Fig. 11c).

PM₁₀과 PM_{2.5}와 PM₁₀과 PM₁ 간 상호 농도를 예측할 수 있는 회귀식이 고안하였다(Table 1). 회귀식을 사용하여 국가연구소 및 지자체에서 설치된 측정소의 임의의 PM₁₀ 자료가 주어지면, PM_{2.5}와 PM₁의 농도값을 신뢰할 수 있을 정도로 정확하게 예측할 수 있다. 또한 역으로 PM_{2.5}와 PM₁₀, PM₁과 PM_{2.5}와 PM₁과 PM₁₀ 상호 간의 회귀식을 사용하여 PM_{2.5}, PM₁₀과 PM₁₀의 각각의 농도를 예측할 수도 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

10월 하순에 고비사막에서 황사가 발생한 후 한반도로 수송되어 강릉의 지역 대기질, 특히 입자살물질인 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 농도가 크게 증가하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 황사가 강릉시로 유입되기 전에는 매 시각 미세입자의 농도인 PM₁₀(극미세입자의 농도인 PM_{2.5}, 초극미세입자의 농도인 PM₁)의 농도가 20 μg/m³ 내외

(10 μg/m³ 내외, 5 μg/m³ 내외)로 농도가 매우 낮았다. 황사의 유입 기간에는 PM₁₀(PM_{2.5}, PM₁)의 최대농도가 154.57 μg/m³(93.19 μg/m³, 76.05 μg/m³)로 평상시의 3.8배(3.4배, 14.1 배)로 높았다. 중국으로부터 유입된 황사먼지가 강릉시에서 출퇴근 시간대의 밀집된 차량운행과 일몰 후의 주거지역에서 가동되는 보일러로 배출되는 대기오염물질들과 결합하여 09시(출근 시각)와 17시(퇴근시각)에 고농도의 PM이 나타나며, 최대농도는 17시에 나타났다.

2) 황사의 유입 전에는 PM₁₀과 PM₁(PM_{2.5}와 PM₁, PM₁₀과 PM₁) 간의 상관계수는 0.90(0.99, 0.84)로 매우 높아 PM₁₀의 농도변화에 2.5 μm 이하의 작은 먼지입자들의 총량이 크게 작용하였고, 동시에 PM_{2.5}의 농도변화에 1 μm 이하의 작은 먼지입자들이 크게 작용하였다. 그러나 농도차비인 (PM₁₀-PM_{2.5})/PM₁₀((PM_{2.5}-PM₁)/PM₁)은 1.37~3.39(0.23~0.54)이므로 PM₁₀농도의 변화에 2.5 μm 이상이면서 10 μm 이하의 입자(조대입자)들의 농도(PM₁₀-PM_{2.5})가 PM_{2.5}보다 더 크게 기여했으며, PM_{2.5}의 농도에는 초극미세입자인 1 μm 이하의 입자들의 먼지농도가 절대적으로 크게 기여했다.

3) 황사의 유입 중에는 농도인 PM₁₀과 PM₁(PM_{2.5}와 PM₁, PM₁₀과 PM₁) 간의 상관계수는 0.98(1.00, 0.97)로 PM₁₀의 농도변화에 2.5 μm 이하의 작은 먼지

입자들의 총량이, $PM_{2.5}$ 의 농도변화에 $1 \mu m$ 이하의 작은 먼지입자들이 절대적으로 크게 작용하였다. 즉 $(PM_{10}-PM_{2.5})/PM_{10} ((PM_{2.5}-PM_1)/PM_1)$ 은 0.48~1.25 (0.16~0.37)이므로 PM_{10} 농도에 $2.5 \mu m$ 이하의 극미세 입자들의 농도인 $PM_{2.5}$ 가, $PM_{2.5}$ 의 농도에는 $1 \mu m$ 이하의 입자인 초극미세입자들의 먼지농도가 지배적으로 크게 기여했다. 이는 중국에서 발원하는 황사가 한반도로 유입될 때, 조대입자가 지역의 PM_{10} 농도에 절대적인 영향을 준다는 일반적인 결과는 반대의 결과를 나타내고 있다.

4) 황사의 유입이 끝난 후에는 PM_{10} 과 $PM_1(PM_{2.5}$ 와 PM_1, PM_{10} 과 $PM_1)$ 간의 상관계수가 0.23 (0.81, -0.36)로 $PM_{2.5}$ 와 PM_1 간의 상관관계를 제외하고 관계가 매우 낮아, PM_{10} 의 농도에는 $2.5 \mu m$ 이상의 조대입자가 큰 영향을 주었고 $2.5 \mu m$ 이하의 극미세입자와 $1 \mu m$ 이하의 초극미세입자들의 영향은 매우 미미하였다. 반면에 $PM_{2.5}$ 의 농도 형성에 PM_1 농도가 매우 크게 기여하였다. PM_{10} 의 농도변화에 PM_1 의 농도가 기여하지 못한 이유는 10월 26일부터 약 1일간 중국에서 유입된 황사먼지가 황해의 해면 부근에서 체류하는 동안 침전과 해양입자들과의 복합적인 작용에 의해 이와 같은 현상이 발생했을 것으로 추정된다. $(PM_{10}-PM_{2.5})/PM_{10}((PM_{2.5}-PM_1)/PM_1)$ 은 1.13~1.91(0.29~1.90)이므로 PM_{10} 농도에는 $PM_{2.5}-PM_{2.5}$ 의 조대입자가, $PM_{2.5}$ 의 농도에는 $1 \mu m$ 이하의 입자인 초극미세입자들의 먼지농도가 절대적으로 크게 기여했다.

5) 전 기간을 걸쳐, $PM_{10}, PM_{2.5}, PM_1$ 농도 간의 상관관계는 0.94, 1.00, 0.92로 매우 높았으며, 전반적으로 PM_{10} 의 농도에 $PM_{2.5}$ 와 PM_1 의 농도가 크게 기여하였다. 따라서 PM_1 농도로부터 $PM_{2.5}$ 농도를 계산하거나 PM_1 과 $PM_{2.5}$ 로부터 PM_{10} 농도를 예측할 수 있는 회귀공식이 제시되었다.

참 고 문 헌

- 공주부, 한진석, 문광주, 안준영, 정다위, 이석조, 김정은, 김영준, 2002, 제주도 고산에서의 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 성분 특성 분석, 한국대기환경학회 2002 추계학술대회 논문집, 147-148.
- 전병일, 2010, 부산지역 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도의 시간 및 공간적 변화 특성, 19(8), 1013-1023.
- 정진도, 황승민, 최희석, 2008, 아산지역의 황사/비황사 시 $PM_{2.5}, PM_{10}$ 농도 특성에 관한 연구, 대한환경공학회지, 30(11), 1111-1115.
- 최효, 2008, 봄철 황사 전 후 산악연안도시, 강릉시에서 $PM_1, PM_{2.5}, PM_{10}$ 의 농도 비교, 한국환경과학회지, 17(5), 84-95.
- 최효, 2010, 가을 황사발생 시 고비사막에서 수송된 극미세입자가 입자상물질농도 ($PM_{10}, PM_{2.5}, PM_1$)에 미친 영향-2003년 10월 27일 사례, 기후연구, 5(3), 219-233.
- 최효, 2011, 겨울 황사기간 중 한국, 강릉시의 시간별 가스상오염물질 농도의 변화특성-2005년 2월 14-16일 사례, 기후연구, 6(1), 59-76.
- Choi, H., 2004a, Influence of large scale motion and atmospheric boundary layer upon duststorm generation and local particulate concentration, Ph.D. thesis, Peking University Press, 80.
- Choi, H., 2004b: Tropical night (nocturnal thermal high) in the mountainous coastal city. J. Environ. Sci., 13, 965-985.
- Choi, H., Choi, D. S., Choi, S. M., 2010, Meteorological condition and atmospheric boundary layer influenced upon temporal concentrations of $PM_1, PM_{2.5}$ at a coastal city, Korea for Yellow Sand Event from Gobi Desert, Disaster Adv., 3(4), 309-315.
- Choi, H., Choi, D. S., 2008, Concentration of $PM_{10}, PM_{2.5}$ and PM_1 influenced by atmospheric circulation and atmospheric boundary layer in the Korean mountainous coast during duststorm period, Atmos. Res., 89, 330-337.
- Choi, H., Zhang, Y. H., 2008, Prediction of duststorm evolution by vorticity theory, Atmos. Res., 89, 338-350.
- Choi, H., Zhang, Y. H., Kim, K. H., 2008, Sudden high concentration of TSP affected by atmospheric boundary layer in Seoul metropolitan area during duststorm period, Environ. Inter., 34(5), 635-647.
- Chung, Y. S., Kim, H. S., Natsagdorj, L., Jugder, D., Chen, S. J., 2001, On yellow sand occurred during 1997-2000, J. Korean Meteor. Sci., 37, 305-316.
- Evangelopoulos, V., Zoras, S., Triantafyllou, A. G., Albanis, T. A., 2006, $PM_{10}-PM_{2.5}$ time series and fractal analysis, Global Nest J., 8(3), 234-240.
- Fei, J., Qing, Y., 1998, The numerical simulation on dust-storm over east Asia II: A case analysis, Acta

- Sci. & Nat., Univ. Pekinensis, 34(5), 639-645.
- Geller, M. D., Fine, P. M., Sioutas, C., 2004, The relationship between real time and time integrated coarse (2.5-10 μ m), intermodal (1-2.5 μ m), and fine (<2.5 μ m) particulate matter in the Los Angeles basin, Air & Waste Manage. Assoi., 54, 1029-1039.
- Huang, M., Wang, Z., 1998, A model for long-range transport of yellow sand in East Asia, Atmos. Sinica, 22, 625-637.
- Kim, H. K., Kim, M. Y., 2003, The effects of Asian dust on particulate matter fractionation in Seoul, Korea during spring 2001, Chemosphere, 51, 707-721.
- Lin, T. H., 2001, Long-range transport of yellow sand to Taiwan in spring 2000: Observed evidence and simulation, Atmos. Environ., 35, 5873-5882.
- Middleton, N. J., 1986, A geography of dust storms in southwest Asia, J. Climate, 6, 183-196.
- Wang, Z., Ueda, H., Huang, M., 2000, A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia, J. Geophys. Res., 26, 947-956.
- Zhang, Y., Zhong, Y., 1985, The simulation and diagnosis for a strong wind associated with northeast low, Acta Meteor. Sinica, 43, 97-105.