

고비사막에서 황사의 유입 전, 후의 강릉시에서 매 시각별 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁농도에 영향을 미치는 대기경계층과 상관관계 예측

최효* · 이미숙**

*강릉원주대학교 대기환경과학과 · **강릉원주대학교 동해안생명과학연구소

(2011년 11월 10일 접수, 2011년 12월 21일 수정, 2012년 1월 3일 수락)

Atmospheric Boundary Layer Influenced upon Hourly PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ Concentrations and Their Correlations at Gangneung City before and after Yellow Dust Transportation from Gobi Desert

Hyo Choi* · Mi Sook Lee**

*Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University

**Research Institute of East Sea Life Sciences, Gangneung-Wonju National University

(Received 10 November 2011, Revised 21 December 2011, Accepted 3 January 2012)

요약 : 2003년 10월 26~29일까지 고비사막으로부터 강릉시로 황사의 유입 전, 후의 매 시각별 PM₁₀, PM_{2.5}와 PM₁농도의 영향을 미치는 대기경계층과 PM농도 간의 상관관계 및 회귀식을 조사되었다. 고비사막에서 유입된 황사와 차량에서 방출되는 대기오염물질 및 도로의 비산먼지가 결합되고, 열적내부경계층이 수축되어 강릉 시내 PM농도가 09시 매우 높았다. 수축된 야간접지역전층 내에서 황사, 차량의 배기가스와 주거지역의 난방보일러에서 방출된 대기오염물질이 축적되어 퇴근시간인 17시에 최대농도가 나타났다. 황사의 유입 전에 PM₁₀과 PM_{2.5}(PM_{2.5}와 PM₁, PM₁₀과 PM₁) 간의 상관계수는 0.90(0.99, 0.84)이었고, 황사 유입 기간에는 0.98(1.00, 0.97), 황사의 유입이 종료된 후에는 0.23(0.81, -0.36)로 매우 낮았다.

주요어 : PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, 열적내부경계층, 최대농도, 야간접지경계층, 상관계수, 회귀식

Abstract : Atmospheric boundary layer influenced upon hourly PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁, concentrations and their correlation coefficient and regression equations before and after the intrusion of yellow dusts from Gobi Desert toward Gangneung city were investigated on October 26~29, 2003. PM concentrations of the city were very high at 0900LST(beginning time of office hour) by the combination of yellow dusts from Gobi Desert, emitted atmospheric pollutants from vehicles with flying dusts from the road under a shrunken thermal internal boundary layer. Maximum PM concentrations were detected at 1700LST(ending time of office hour) by the accumulation of yellow dusts from the desert, emitted pollutants from vehicles, flying dusts from the road and emitted pollutants from heating boilers in the resident area under a shrunken nocturnal surface inversion. Correlation coefficient of PM₁₀ and PM_{2.5}(PM_{2.5} and PM₁, and PM₁₀ and PM₁) before the dust intrusion was 0.90(0.99, 0.84) and one with 0.98(1.00, 0.97) during the dust intrusion, but its coefficient of 0.23(0.81, -0.36) after the ending of dust intrusion, was very low.

Key Words : PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, thermal internal boundary layer, maximum concentration, nocturnal surface inversion layer, correlation coefficient, regression equation

1. 서론

일반적으로 한반도의 대기질에 영향을 미치는 황사는 주로 봄철인 3~5월 사이에 중국의 서북쪽에 위치하고 있는 타카라마칸사막, 중국북부와 몽고의 남부에 펼쳐 있는 고비사막, 중국 내몽고의 쿠부치사막(Kubuchi Desert), 오르도스사막(Ordos Desert), 중국의 황토고원(Huangtu Plateau; The Loess Plateau) 등의 지역에서 발생한다(Middleton, 1986; Chon, 1994; Choi and Zhang, 2008).

건조한 황사의 발원지에서 강풍에 의해 먼지폭풍(Dust Storm)이 생기므로 중국에서는 사진폭(沙塵暴-모래먼지폭풍)이라 하고(Choi, 2004), 많은 학자들에 의해 KOSA, Asian Dust, Yellow Sand, Sand Storm, Dust Storm이라고 다양하게 칭하고 있다. 모래먼지폭풍이 발생하면, 많은 양의 황사먼지에 의해 시정이 급격하게 악화된다. 시정이 1km 이내일 때 사진폭(沙塵暴; Sand or dust storm), 10km 이내일 때 양사(揚沙; Blowing Sand), 10km 이상일 때 부진(浮塵; Floating dust)라고 세분하기도 한다(신화통신사, 2009).

우리나라에서는 삼국시대부터 중국의 황사가 한반도로 유입되면 하늘색이 누렇게 변하고, 흙이 섞인 흙비, 토우(雨土), 우토(土雨)가 내린다고 삼국사기(174년 신라 아사달 왕)에 기록되고 있다. 또한 이조실록에는 조선조 말까지의 황사관측 기록이 있어, 황사현상은 수 천년에 걸쳐 중국 및 한국을 포함한 동북아시아 및 동남아에 영향을 주고 있었음을 알 수 있다(Fei and Qing, 1998; Huang and Wang, 1998; Chung *et al.*, 2001; Lin, 2001). 또한 경우에 따라 황사가 태평양을 건너 미국의 서부 지역에 도달하기도 한다(Kotamarthi and Carmichael, 1990).

Kim *et al.*(2001)은 황사기간 중 광주시의 시정 악화가 매우 강화됨을 설명하였다. 황사현상이 나타난 후에는 가축의 전염병인 구제역이 발생에 대한 예방을 위한 국가적인 노력이 있어왔다(행정안전부, 2010). Kim and Kim(2003)은 서울지역에서 먼지분석을 통해, 중국으로부터 황사의 유입 전, 중, 후에 먼지의 입경별 농도, 이온과 중금속분석을 통해 많은 양의 황사먼지가 중국에서 한반도로 수송되었으며, 다량의 $2.5\mu\text{m}$ 이상의 조대입자가 측정지역의 PM농도에 크게 기여하였음을 밝혔다. 정진도 외(2008)은 아산지역에서 황사먼지의 분석을 통해 유사한 결과를 확인하였다.

이와 유사하게 전병일(2003)은 봄철 황사의 유입 시에 PM_{10} 의 농도가 황사의 유입 전에 비해 매우 크게 증가하고, $PM_{2.5}$ 의 농도가 급격하게 감소하여 먼지의 입경이 $2.5\mu\text{m}$ 보다 큰 조대입자가 급격하게 증가함을 밝혔다. 또한 최효(2008), Choi *et al.*(2010)은 봄철 황사의 유입 중에 극미세입자농도인 PM_{10} , 극미세입자농도인 $PM_{2.5}$, 초극미세입자농도인 PM_1 의 매 시각별 농도분석을 통해 $2.5\mu\text{m}$ 이상의 조대입자들의 농도($PM_{10}-PM_{2.5}$)가 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 극미세입자들의 농도보다 PM_{10} 의 농도에 크게 기여함을 밝혔다.

Choi and Choi(2008)가 중·미규모 기상학적(Meso-micro meteorological scale)인 접근으로 먼지폭풍 기간 중 산악연안에서 매 시각별 PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 농도가 낮에 대관령분지 상공과 대관령의 정상을 덮는 상부역전층의 솔 뚜껑 역할로 유입된 황사먼지가 분지 내에 갇혀 PM의 고농도 출현하며, 풍하

측에 분지인 강릉시에서는 대관령으로부터 황사의 유입이 없고, 강릉시의 지표부근에서 방출된 대기 오염물질이 연직으로 확대된 대류경계층의 정상고도까지 상승함으로 지표부근의 PM농도가 낮아진다고 하였다. 또한 Choi *et al.* (2008)은 수치모델에 의해 2001년 3월의 먼지폭풍 기간 중 서울에서 한랭전선의 통과 시에 낮에 연직으로 발달한 대기경계층이 유입된 황사먼지에 의해 급격하게 수축하게 되어 TSP(Total suspended particulates; 총먼지량)와 PM_{2.5}의 농도가 급격하게 높아진다고 설명하였다.

현재 환경부 및 강원도보건환경연구원과 각 지자체에서 대기질을 측정하는 지역에 설치하여 운영 중인 먼지측정기는 대부분이 PM₁₀만 측정이 가능하므로 인해, 호흡기 질환, 폐 질환과 안질 등의 질병을 초래하는 2.5 μ m 또는 1 μ m 이하의 먼지농도인 PM_{2.5}와 PM₁에 대한 정보를 얻을 수가 없어, 얻을 수 있는 방법에 대한 대책이 필요하다. 부분적으로 학자들이 연구목적으로 PM_{2.5}와 PM₁의 측정이 이루어져 오고 있으나 예측에 대한 정보는 한정적이며, 매우 미미하다.

따라서 본 연구에서는 PM의 최대농도가 나타나는 이유를 대기경계층의 발달과 소멸과 연관시켜 설명하고자 한다. 또한 PM₁₀과 PM_{2.5}, PM_{2.5}와 PM₁, PM₁₀과 PM₁과의 상관관계로부터 극미세먼지와 초극미세먼지농도인 PM_{2.5}와 PM₁을 측정하는 먼지측정기가 없는 지역에서 측정되고 있는 미세먼지농도인 PM₁₀으로부터 PM_{2.5}와 PM₁의 농도를 추정할 수 있는 회귀식을 구하여, 황사가 유입될 때 기관지를 거쳐 바로 폐에 바로 도달하여 인체에 극히 해로운 영향을 주는 PM_{2.5}와 PM₁의 농도를 예측하고자 한다.

2. 연구지역 및 분석방법

1) 측정지역의 지형

연구지역인 강릉시의 서쪽에는 대관령(896m)을 포함한 1000m 이상의 높은 산들로 구성된 태백산맥이 동해 연안과 평행하게 남북으로 길게 뻗어있고, 동쪽으로는 동해를 끼고 있어 해풍과 육풍 및 산풍과 곡풍이 상호작용하여 낮과 밤에 따라 바람의 방향이 다양하게 나타나는 특성을 나타낸다. 강릉시는 해발 고도 25m 내외의 분지로 구성되어 있다(그림 1).

2) 측정자료 및 분석방법

독일 GRIMM-1107 먼지측정기를 강원기상청(동경 128.90°, 북위 37.75°; 해발고도 20m)에 설치하여 2003년 10월 26~29일 기간에 300nm~20 μ m 범위의 먼지를 15개 먼지입자의 크기(>0.3~>20.0 μ m)에 따라 구분하여 5분 간격으로 입자상물질인 먼지농도(μ g/m³)를 측정하였다. 이

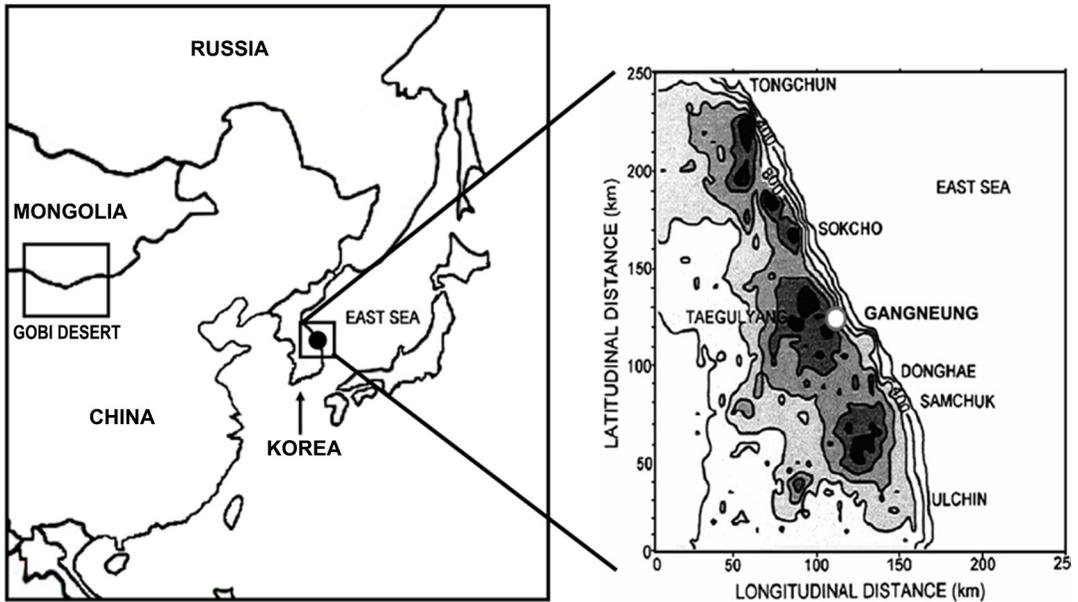


그림 1. 황사의 발원지 및 에어로졸 측정기가 설치된 강원기상청(동경 128.90°, 북위 37.75°; 해발고도 20 m, 강릉시)이 포함된 동북아시아도와 강릉시 부근지도. 왼쪽 그림 속의 작은 사각형과 원형-고비사막과 강릉시

를 다시 먼지입자 크기 $10\mu\text{m}$ 이하의 총 먼지량인 PM_{10} 과 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 총 먼지량인 $PM_{2.5}$ 및 $1\mu\text{m}$ 이하의 총 먼지량인 PM_1 로 합산한 후 PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 농도를 1시간 평균치로 재 산정하여 본 연구의 기본자료로 사용하였다.

황사가 유입되기 전인 10월 26~27일, 황사의 유입 중인 10월 27~28일, 황사의 유입이 끝난 후의 기간인 10월 28~29일로 나누어서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$, $PM_{2.5}$ 와 PM_1 , PM_{10} 과 PM_1 과의 상관관계를 구하여, 상호간에 어떤 관계를 갖는가를 파악하였다.

환경부의 관측망과 각 지자체의 관측망에서는 단지 PM_{10} 만 측정이 가능하다. 강원도의 대기오염측정망은 원주지방환경청과 강원도보건환경연구원이 관리하고 있으며, 본 연구 지역인 강릉시의 관측망은 강원도보건환경연구원이 관리하고 있고, 타 도에서와 마찬가지로 대기질을 측정하는 지역에 설치하여 운영 중인 먼지측정기는 PM_{10} 만 측정이 가능하다. 본 연구에서는 매 시각별 측정된 미세입자 농도인 PM_{10} , 극미세입자농도인 $PM_{2.5}$, 초극미세입자농도인 PM_1 으로부터 극미세먼지와 초극미세먼지농도인 $PM_{2.5}$ 와 PM_1 을 측정하는 먼지측정기가 없더라도 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 상관관계와 회귀식을 구하여 $PM_{2.5}$ 의 농도를 계산하거나, PM_1 과 $PM_{2.5}$ 의 상관관계와 회귀식을 구하여 PM_1 의 농도를 계산하거나, PM_1 과 PM_{10} 의 상관관계와 회귀식을 구하여 PM_1 의 농도를 계산할 수 있는 예측식을 고안하고자 하였다.

3. 연구결과

1) PM농도와 황사입자의 역유적궤도, 유선도, 대기경계층과의 관계 - 황사의 유입 전

(1) 매 시각별 PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ 농도변화

고비사막으로부터 강릉시로 황사의 유입이 있기 전인 10월 26일 00시~27일 07시까지 매 시각별 PM₁₀의 농도가 최저농도가 14.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 최고농도가 69.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다(그림 2). PM_{2.5}의 농도분포의 범위는 최저농도가 5.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 최고농도가 26.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 유사하게 PM₁의 최저농도가 3.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 최고농도가 19.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

강릉시는 다량의 대기오염물질을 배출하는 공장이 없으므로 대기오염물질의 주 배출원은 도로 위의 차량과 주거지역에서의 난방 및 취사용 보일러이다(Choi *et al.*, 2010). 서풍 하에서 부분적으로 서울 등지의 대도시로부터 강릉지역으로의 대기오염물질의 수송과 황사기간에 황사의 수송에 의해 영향이 없는 기간에는 평상시의 PM₁₀ 농도가 30~50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이내를 유지한 이전의 연구사례에 비해 농도가 좀 더 낮게 나타났으며, PM₁₀ 증가할 때 같은 시간대에 PM_{2.5}와 PM₁의 농도가 증가하고, PM₁₀ 농도가 감소할 때도 PM_{2.5}와 PM₁의 농도가 감소하는 경향은 매우 유사하였다.

최 효(2011)의 겨울 황사기간과 Choi and Choi(2008)의 봄 황사기간 중에 강릉시의 시간별 오염물질농도의 변화에 대한 연구에서 PM 농도의 증감의 경향과 매우 유사하였다. 그러나 황사의 유입이 종료된 후에는 PM₁₀ 증가할 때 같은 시간대에 PM_{2.5}와 PM₁의 농도가 증가하지 않았다.

매우 높은 PM농도가 오전과 오후에 한번씩 각각 나타났으며, 특히 출근시간대인 09시에 PM농도가 높고, 퇴근시간대인 18시에 최대농도가 나타났다. 이와 같이 PM의 농도가 매우 높은 이유는 출근

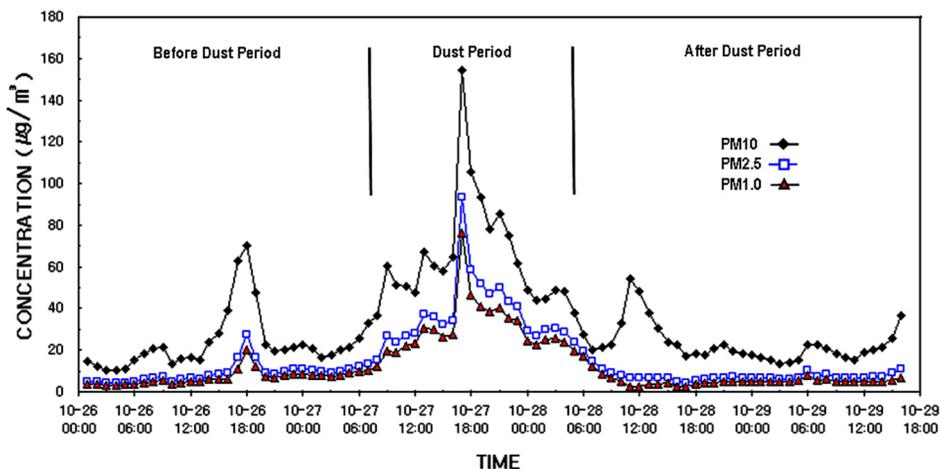


그림 2. 2003년 10월 26~29일까지 강릉시의 강원기상청(동경 128.90°, 북위 37.75°, 해발고도 20m, 강릉시)에서 측정된 매 시각별 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 분포

시간대인 8~9시에는 많은 차량이 강릉 시내에서 운행되어 차량 연료의 연소에 의해 많은 입자상물질과 가스상물질이 합쳐진 대기오염물질의 방출량이 높고, 도로에서 차량의 이동에 의해 비산하는 먼지의 양이 많아 PM 농도가 높게 나타났다. 퇴근시간대인 일몰 무렵에는 출근시간대와 마찬가지로 많은 차량으로부터 연료의 연소에 의해 입자상물질과 가스상물질의 방출량이 매우 높고, 비산하는 먼지 양이 많아 PM 농도가 높게 나타날 수 있었다.

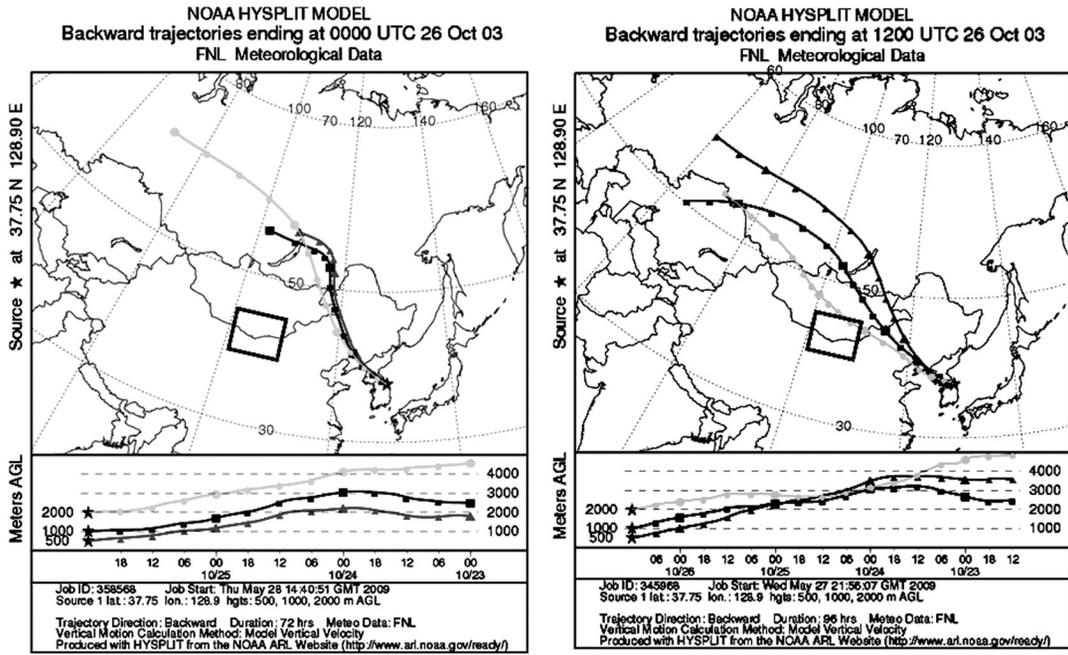
이 뿐만 아니라 10월 말 무렵에는 강릉시의 서쪽에 위치한 해발고도 896m의 대관령으로부터 찬 서풍의 공기가 강릉시로 불어오므로 강릉시의 저녁 기온이 매우 낮아진다. 따라서 대부분의 주거지역에서 초저녁에 난방보일러를 사용하게 되므로, 난방보일러로부터 방출되는 대기오염물질이 퇴근시간대의 차량으로부터 방출되는 대기오염물질 및 도로에서 부유한 먼지와 결합하여 오전 9시 무렵의 PM 농도보다 더 높은 PM 의 최대농도가 18시에 나타날 수 있었다. 이와 같이 저녁 무렵에 PM 의 농도가 높아지는 경향은 Choi and Choi(2008)에 의한 봄철 황사폭풍의 사례연구에서 황의 유입 전에 22시에 최대농도가 나타난 경우와 유사하며, 단지 몇 시간의 시차가 있었다.

(2) PM 의 최고농도와 황사입자의 역유적궤도, 유선도, 대기경계층과의 관계

황사 입자의 수송경로를 보다 정확하게 파악하기 위해 NOAA-HYSPLIT 모델 (Hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory)을 사용하였으며, 고비사막에서 발생한 황사가 강릉으로 유입될 수 있는 과정을 지상 500m, 1000m, 2000m 고도에서 공기입자의 역유적궤도(Backward trajectory)를 그려서 파악하였다(그림 3). 황사의 영향이 나타나기 33시간 전인 10월 26일 09시(그림 3a)와 20시간 전인 10월 26일 21시(그림 3b)에 공기입자의 역유적궤도를 보면, 시베리아에서 출발한 공기의 입자가 약 1일 후에는 몽고의 북동부와 몽고의 중부지역의 3km 이상의 고도를 거쳐 강릉시의 2000m, 1000m와 500m 고도에 도달하므로 고비사막을 벗어난 초원지대로부터 청정한 공기가 강릉시로 유입되었음을 알 수 있다. 따라서 강릉시의 PM 농도는 고비사막에서 발원한 황사의 영향을 받지 않았다. 이와 같은 공기입자의 역유적궤도가 10월 27일 07시까지 지속되어 강릉시에서의 매 시각별 PM 농도 변화에는 황사의 영향이 없는 강릉지역 자체에서 방출된 대기오염물질에 의해 좌우되었다.

그림 4a에서 10월 26일 09시에 고비사막을 거쳐 가는 850hPa(약 1.5km) 고도의 유선도(Streamline)에서 보면, 몽고의 동쪽인 중국의 내몽고를 거쳐 만주지역으로 공기의 흐름을 파악할 수 있다. 강릉지역으로 유입되는 공기는 황사의 발원지인 고비사막에서 남쪽으로 약 700km 이상 떨어진 곳에서 출발하여 중국의 천진을 거쳐 발해만으로 진입한 후 중국의 요동지방과 평안북도를 거쳐 강릉으로 도달하므로 고비사막에서 발원한 황사면지와는 관계가 없는 공기가 강릉으로 유입되었다. 따라서 고비사막에서 발생한 황사면지는 내몽고를 거쳐 중국의 만주지역으로 이동하면서 확산되어 갔으며, 강릉지역으로 유입이 되지 못하여 강릉에서 PM 농도 변화에는 황사면지가 영향을 주지 못했다.

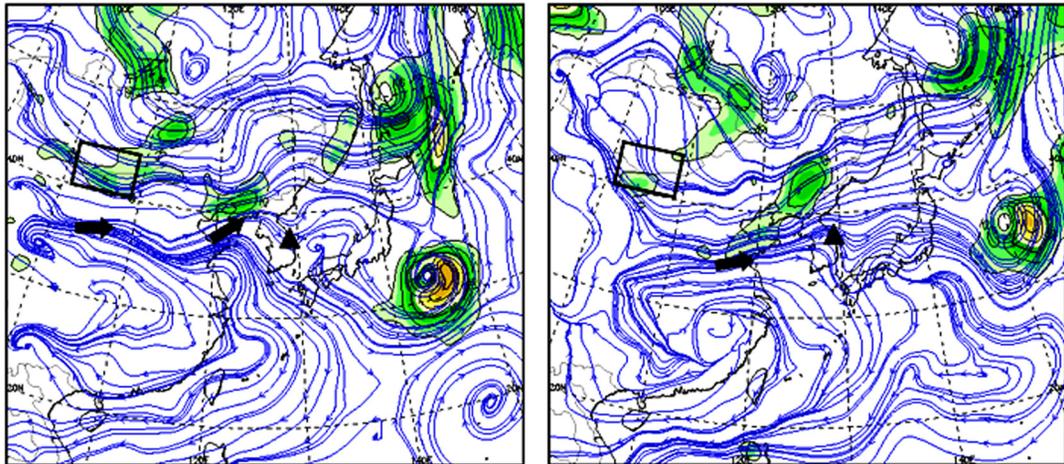
그림 4b에서 10월 26일 21시에는 고비사막의 중앙에서 출발한 공기는 고비사막의 동쪽에 위치한 내몽고를 거쳐 만주지역으로 이동하고 있고, 고비사막의 남서부에서 출발한 공기의 흐름은 09시



(a)

(b)

그림 3. 역유적궤도--(a) 2003년 10월 26일 0000UTC(0900LST), (b) 1200UTC(2100LST).
그림 속의 작은 사각형, 별표-고비사막, 강릉시



(a)

(b)

그림 4. 850hPa 고도에서의 유선도--(a) 2003년 10월 26일 0000UTC(0900LST), (b) 1200UTC(2100LST).
그림 속의 작은 사각형, 화살표, 작은 삼각형, 회색지역-고비사막, 공기흐름, 강릉시, 12.5m/s 이상의 강풍역

보다는 좀 더 남쪽으로 이동한 후 중국의 동쪽 연안인 산둥반도의 북쪽을 거쳐 한반도의 북부인 평안 남도를 통과한다. 이 두 경로를 따라 황사먼지가 이동 및 확산을 하게 되므로 강릉지역으로 황사먼지의 유입이 없었다.

따라서 강릉지역에 유입된 공기는 중국의 공업지역이 아닌 위난성 등의 남부지역에서 중부지역으로 이동한 후 중국의 산둥반도를 거쳐 강릉지역으로 이동하므로 강릉 지역으로는 황사먼지의 유입을 기대할 수 없다. 따라서 이 시간대에는 강릉지역의 PM 농도가 황사먼지와는 관계가 없이 강릉지역에서 퇴근 시간대의 많은 차량으로부터 다량의 대기오염물질의 방출 및 도로로부터의 비산먼지와 난방 보일러의 가동에 의해 방출되는 대기오염물질이 결합하여 09시 무렵의 PM 농도보다 더 높은 최대 농도가 초저녁 무렵인 18시에 나타나게 되었다.

그림 2에서 황사 전의 PM의 매 시각별 농도를 보면, 많은 차량의 운행으로 차량 연료의 연소에 의해 많은 입자상물질과 가스상물질의 방출량이 높고, 차량의 이동에 의해 도로에서 먼지 발생이 높아 PM 농도가 높게 나타날 수 있는 조건이지만 실제 출근시간대인 9시 무렵을 제외하고 높지 않았다. 그 이유는, 그림 5a에서 보는 바와 같이 일출 후부터 태양광선에 의한 지표의 가열에 의한 강릉연안에서 대관령의 동쪽 사면을 따라 대관령의 정상까지 열적내부경계층(Thermal internal boundary layer; TIBL)의 연직 및 수평으로 확대로 인해 강릉 시내 지표부근의 차량으로부터 방출된 대기오염물질과 도로로부터의 비산먼지 등 대기오염물질이 대류에 의해 열적내부경계층의 정상으로 상승하게 되므로, 지표부근에서 낮에 PM의 농도가 높지 않게 되었다.

반면에 일몰 무렵부터 그림 5b에서 보는 바와 같이 야간의 지표냉각으로 인해 형성되는 매우 안정층인 야간접지역전층 (Nocturnal surface inversion layer; NSIL)의 고도가 주간 대류경계층에 비해 매우 낮은 약 200m 정도로 낮아지게 된다. 매우 얇은 두께의 야간접지역전층내의 지표부근에서 차량에 의해 방출된 대기오염물질, 도로로부터의 비산먼지 및 주거지역으로부터 난방보일러의 가동으로 배출된 대기오염물질이 매우 안정층인 야간접지역전층에서 상승하지 못하고 지표부근으로 하강하여 축적되므로 18시에 최대농도로 나타날 수 있었을 것이다(Choi, 2004; Choi *et al.*, 2010; 최효, 2011). 이 후 시간대에는 야간에 운행하는 차량의 감소로 차량으로부터 방출되는 대기오염물질의 양이 감소하므로 PM 농도가 낮게 되었다.

2) PM 농도와 황사입자의 역유적궤도, 대기경계층과의 관계 - 황사 유입 기간

(1) 매 시각별 PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ 농도변화

10월 27일 08시~28일 05시까지는 고비사막으로부터 강한 북서풍에 의해 많은 양의 황사먼지가 한반도의 동해안에 위치한 강릉시로 유입되어 강릉시에서 PM₁₀의 농도분포의 범위가 최저농도가 36.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 최고농도가 154.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. PM₁₀의 농도가 황사의 유입이 있기 전인 10월 26일의 PM₁₀의 농도에 비해 최대 3.8배로 높게 나타났으며, 최대농도의 출현 시각이 황사의 유

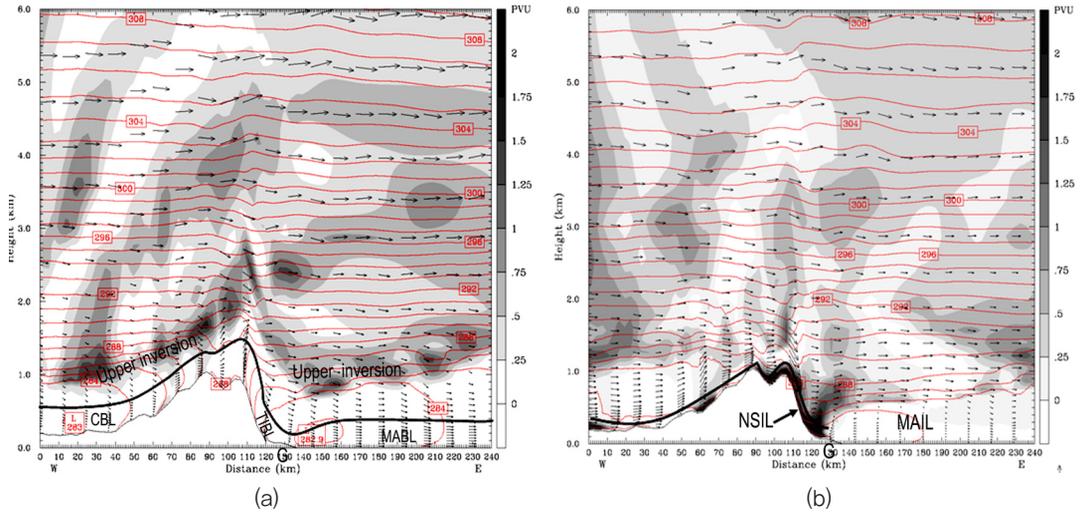


그림 5. WRF-3.3모델에 의해 재현된 풍속(m/s), 잠재온도(K), 잠재와도(PVU)-(a) 2003년 10월 26일 1200LST, (b) 26일 1800LST(PM의 최대농도 출현시각). (a) CBL, TIBL, MAIL-Convective boundary layer(대류경계층), Thermal internal boundary layer(열적내부경계층), Marine atmospheric inversion layer(해양대기역전층), (b) G, NSIL-강릉시, Nocturnal surface inversion layer(야간접지역전층)

입이 있기 전에 비해 1시간 이른 일몰시인 17시에 나타났다.

PM_{2.5}의 매시각별 농도변화는 최저농도가 26.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 최고농도가 93.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과이였으며, PM₁의 최저농도는 19.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 최고농도가 76.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 각각 나타났다. PM_{2.5}와 PM₁의 최고농도는 황사의 유입 전인 10월 26일의 농도에 비해 각각 최대 3.4배와 14.1배였다. PM₁₀의 농도가 증가할 때 PM_{2.5}와 PM₁ 농도가 증가하고, PM₁₀의 농도가 감소할 때 PM_{2.5}와 PM₁ 농도가 감소하는 경향이 나타났다. PM_{2.5}와 PM₁의 농도는 황사의 유입 전인 10월 26일에 비해 각각 최대 3.4배와 14.1배로 증가하였으며, 최대농도의 변화폭이 PM₁₀에 보다 매우 높았다.

매우 높은 PM농도가 출근시간대인 09시에 나타났고, 퇴근시간대인 17시에 최대농도가 나타났다. 이와 같이 PM의 농도가 매우 높은 이유는 고비사막에서 발원한 황사가 강릉시내로 유입되고 있는 상태에서 출근 시간대인 8~9시에 강릉시내에서 운행되는 많은 차량으로부터 많은 양의 대기오염물질, 도로의 비산먼지가 결합하여 황사가 유입되기 전일인 10월 26일 09시보다 PM농도가 매우 높게 나타났다.

퇴근시간대인 일몰 무렵에 고비사막으로부터 지속적으로 유입되고 있는 황사와 출근시간대와 마찬가지로 많은 차량에서 방출되는 대기오염물질, 비산먼지와 저녁 무렵에 주거지역의 난방보일러로부터 방출되는 대기오염물질이 결합되어 오전 9시 무렵의 PM농도보다 더 높은 PM의 최대농도가 17시에 나타났다. 또한 그림 6b와 7b에서 보는 바와 같이 유입되는 황사의 양이 09시보다 더 많이 유입되고 있었으므로 26일의 18시보다 1시간 일찍 최대농도가 나타날 수 있었다.

(2) PM의 최고농도와 황사입자의 역유적궤도, 유선도, 대기경계층과의 관계

27일 09시에 황사의 입자의 궤적을 파악하기 위해 HYSPLIT 모델을 사용하였다(그림 5b). 습도가 40% 이하인 매우 건조한 고비사막의 지표면에 10m/s 이상의 강한 북서풍이 불면 황사먼지가 발생한다. 이 황사먼지는 낮에 고비사막의 지표에서 대류에 의해 3.5km 고도까지 상승한 후 서풍에 의해 몽고 및 중국의 동부로 이동하거나 또는 북서풍에 의해 중국의 남부와 동부를 거쳐 한반도와 일본 및 태평양으로 이동하므로(Choi, 2004; Choi and Zhang, 2008), 고비사막의 3000m 상공에서 강릉시로의 이동을 역 추적할 필요가 있다.

약 72시간 전인 10월 24일에 고비사막에서 발생한 황사가 고비사막의 3000m 상공에서 중국의 화북지역을 거친 후에 10월 27일 0000UTC(09시)에 강릉시의 2000m 고도에 도달했다(그림 5b). 또한 다른 두 개의 입자의 역유적궤도에서는 고비사막의 북동부 1500m와 1000m에서 중국의 내몽고와 북경을 거쳐 남동진하는 황사먼지입자들이 강릉시의 1000m와 500m 고도에 도달하므로 강릉시의 09시에 PM농도가 증가할 수 있었다.

그림 7a의 850hPa 고도에서의 유선도에서 보는 바와 같이 10월 27일 강릉지역으로 황사의 유입이 시작된 시각인 09시에 고비사막을 통과하는 공기의 흐름이 중국의 남동부 지역과 동부 연안의 발해만, 산둥반도, 상하이시 부근의 넓은 지역을 통과한 후 황해를 거쳐 한반도 중부지역과 강릉시 부근

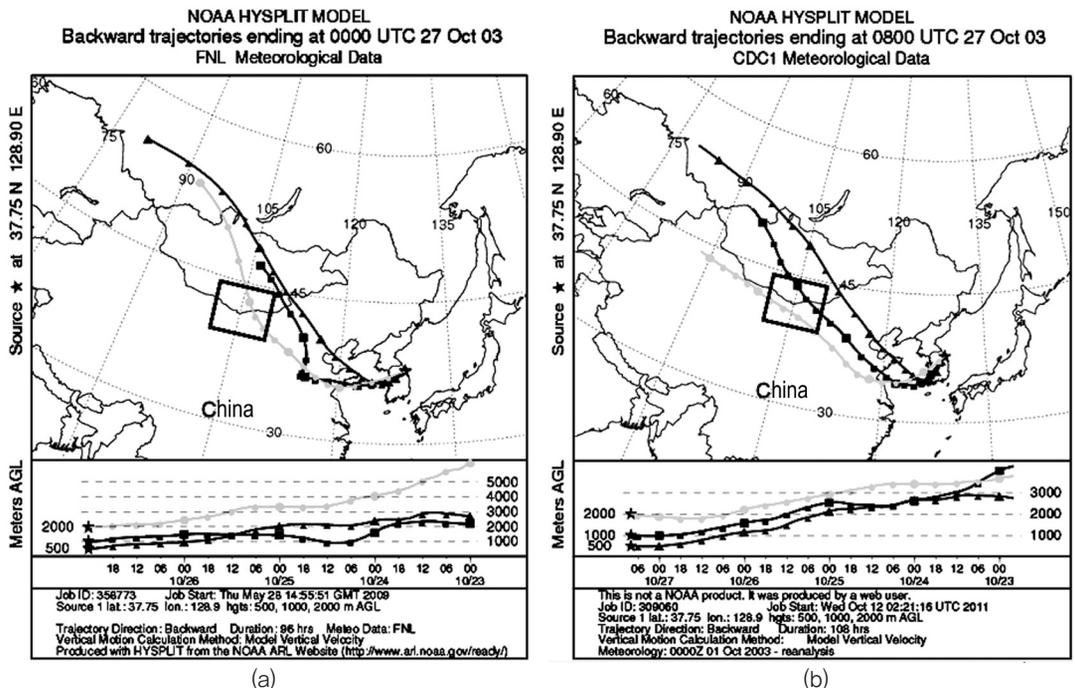


그림 6. 역유적궤도--(a) 2003년 10월 27일 0000UTC(0900LST), (b) 0800UTC(1700LST).

그림 속의 작은 사각형, 별표-고비사막, 강릉시

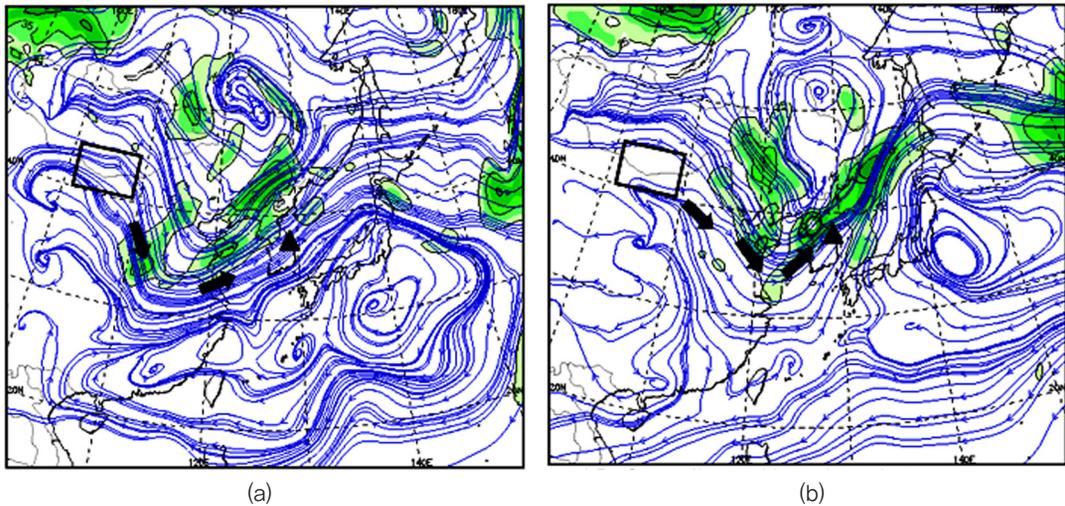


그림 7. 동북아 지역에서 850hPa 고도(약 1.5km)에서의 유선도-(a) 2003년 10월 27일 0000UTC(0900 LST), (b) 1200UTC(2100 LST), 작은 사각형, 작은 삼각형, 화살표, 회색지역-고비사막, 강릉시, 공기흐름, 12.5m/s 이상의 강풍지역

에 이른다. 따라서 고비사막에서 발생한 황사는 이 경로를 따라 강릉연안으로 유입이 되었다는 것을 알 수 있다.

따라서 강릉지역에서 출근 시간대의 많은 차량으로부터 다량의 대기오염물질의 방출 및 도로로부터의 비산먼지와 고비사막으로부터 지속적으로 유입되는 황사먼지가 결합하여 09시 무렵의 PM농도가 황사먼지의 유입이 있기 전날인 10월 26일 09시 보다 더 높은 농도가 나타났다(그림 2).

최대 PM농도가 출현한 시각인 그림 7b의 10월 27일 0800UTC(17시)에 황사 입자의 역유적궤도에서 보면, 2000m와 1000m 역유적궤도가 고비사막을 관동한 후 산동반도 남쪽의 중국의 서주시-황해 남부-한반도 남부-강릉시로 연결되고 있다. 또한 500m 역유적궤도는 황해남부-한반도 남부-강릉시에서 2000m와 1000m 역유적궤도와 겹쳐지게 되어 황사먼지가 강릉의 상공 2000~500m에 집적될 뿐만 아니라 동시에 지표부근으로 유입이 되어 강릉시의 09시에 PM농도가 증가할 수 있었다.

그림 7b의 10월 27일 1200UTC(21시)에 850hPa 고도의 유선도에서 보는 바와 같이 고비사막에서 출발한 공기의 흐름이 중국의 동부 도시인 서주-황해의 남부-한반도 중부-강릉 부근을 통과한다. 따라서 고비사막에서 발생한 황사는 이 경로를 따라 강릉연안으로 유입이 되었다는 것을 알 수 있다. 따라서 강릉지역에서 퇴근 시간대의 많은 차량으로부터 다량의 대기오염물질의 방출 및 도로로부터의 비산먼지와 고비사막으로부터 지속적으로 유입되는 황사먼지가 결합하여 야간접지경계층의 하부인 지표부근에 침착하게 되어 17시 무렵에 강릉시내에서 최대 PM농도가 발생하게 되었다.

그림 2와 그림 8에서 보는 바와 같이 10월 27일 07시 이후부터는 중국의 북쪽에 위치한고비사막으로부터 많은 양의 황사가 강릉시로 유입되었고, 강릉시내에서 방출되는 차량으로부터의 배기가스 및 입자상오염물질로 구성된 대기오염물질이 도로로부터의 비산먼지와 결합하여 09시에 PM의 농도가

매우 높게 유도되었다. 그러나 27일 낮에 비록 많은 양의 황사가 고비사막에서 중국을 거쳐 강릉시내로 지속적인 유입이 있더라도, 강릉시내의 지표부근에서 방출된 대기오염물질과 결합된 입자상물질이 낮에 지표 가열에 의한 대류에 의해 열적내부경계층의 정상까지 상승하기 때문에 10월 26일 낮의 PM 농도 보다는 훨씬 높은 PM 농도를 유지하더라도 12시에 PM 농도가 다소 낮아지게 되었다.

10월 27일 12시 이후에도 중국으로부터 지속적으로 많은 양의 황사가 강릉시로 유입됨에 따라 비록 대류에 의해 먼지가 열적내부경계층 정상으로 상승하더라도 열적내부경계층 내에 먼지양이 계속 증가하게 되었고, 시간이 지남에 따라 강릉시의 지표부근에서 PM 농도가 지속적으로 증가하여 일몰 무렵인 17시에 최대 PM 농도가 나타날 수 있게 되었다. 중국으로부터 강릉시내로 황사의 지속적인 유입에 의해 열적내부경계층 내에 위치한 강릉시내의 열적내부경계층의 정상에서 지표까지 먼지 농도가 증가하게 되므로 낮에 지표에 도달하는 태양복사량이 많이 차단되므로 지표가열에 의한 대류가 약해지게 된다.

따라서 약해진 대류에 의해 지표부근의 먼지와 대기오염물질의 상승이 둔화되고, 동시에 약해진 대류에 의해 열적내부경계층이 황사의 유입 전인 10월 26일의 낮에 비해 덜 발달하게 되므로 대류경계층의 두께가 얇아지게 되었다. 얇아진 대류경계층 내에 유입된 황사먼지와 지역에서 배출된 대기오염물질이 차츰 침착하게 되므로 지표부근에서의 PM의 농도가 전날에 비해 몇 배로 증가할 수 있었다(Choi *et al.*, 2008).

일몰 후에는 태양광선에 의한 지표 가열이 없어지므로 지표냉각이 시작되며, 이 지표냉각에 의해 지표부근에서 대류경계층보다 얇은 약 150m 내외의 야간접지역전층이 형성된다. 이 야간접지역

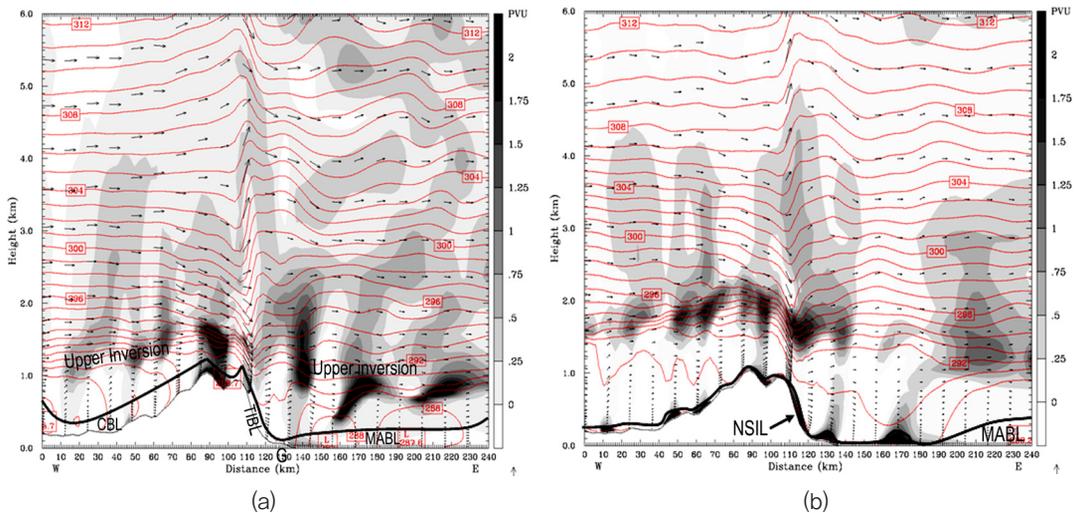


그림 8. WRF-3.3모델에 의해 재현된 풍속(m/s), 잠재온도(K), 잠재와도(PVU)-(a) 2003년 10월 27일 1200LST, (b) 27일 1700LST(PM의 최대농도 출현시각). (a) CBL, TIBL, MABL-Convective boundary layer(대류경계층), Thermal internal boundary layer(열적내부경계층), Marine atmospheric boundary layer(해양대기경계층), (b) G, NSIL-강릉시, Nocturnal surface inversion layer(야간접지역전층)

층은 강한 안정층을 유지하므로 접지경계층 내의 공기는 하강한다. 따라서 강릉시에서 배출된 대기 오염물질과 고비사막에서 발원한 후 중국의 중부와 동부를 거쳐 한반도의 동해안으로 유입된 황사가 야간접지역전층 내의 강릉시내의 지표부근에 축적되고, 퇴근 시간대인 강릉시내의 많은 차량에서 배출되는 대기오염물질과 도로로부터의 비산먼지 및 지역의 주거지로부터의 난방보일러의 가동에 의한 대기오염물질의 방출이 결합되어 전날 26일의 18시보다 1시간 이른 시각인 17시에 최대농도가 나타날 수 있는 상태였다.

따라서 고비사막에서 황사의 유입이 있게 되면 최대 PM농도의 출현시각이 황사의 유입이 없는 시기에 비해 이른 시각에 나타날 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 가을에 나타난 황사기간에 최대 PM농도의 출현시각이, Choi and Choi(2008)의 봄철 황사폭풍 기간에 대기순환과 대기경계층에 영향을 받는 PM의 농도에 대한 연구에서 최대 PM농도의 출현 시각과도 거의 일치하였다.

3) PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀농도와 황사입자의 역유적궤도, 유선도와의 관계 - 황사 종료 후

(1) 매 시각별 PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ 농도변화

고비사막으로부터 강릉시로 황사의 유입이 종료된 후인 10월 28일 06시~29일 18시까지 매 시각별 PM₁₀의 농도가 최저농도가 13.39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최고농도가 54.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 황사의 유입 전과 유사하게 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 농도를 나타낸다(그림 2). PM_{2.5}의 농도는 최저농도가 4.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최고농도가 19.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, PM₁의 농도는 최저농도가 2.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최고농도가 16.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. PM₁₀의 농도가 증가하거나 감소하는 시간대에 PM_{2.5}와 PM₁ 농도가 감소하는 양상을 나타내지 않았으며, PM_{2.5}와 PM₁의 매 시각별 농도의 변화폭이 매우 작고, 시간에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내었다. 10월 28일 11시에 최대 PM₁₀의 농도가 54.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 나머지 시간대에서 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 유지하다가 21시에 높게 나타났다.

10월 29일에는 황사의 영향이 전혀 없는 평상시의 PM농도분포를 나타내며, 07시에 높고, 낮에는 낮으며 18시에 높은 양상을 나타내었다. 그러나 PM_{2.5}와 PM₁의 매 시각별 농도의 변화는 매우 작아 시간에는 무관한 농도분포를 보였다.

(2) PM의 농도와 황사입자의 역유적궤도, 유선도와의 관계

그림 9a에서 황사의 유입이 종료된 직후인 2003년 10월 28일 09시의 10월 23일 00시에 중국의 북서부 밖에 위치한 키르키스탄의 성공 500m에서 출발한 공기입자가 25~26일에는 고비사막 상공 1000m를 통과한 후 발해만-황해중부를 거쳐 27~28일 09시에 강릉시의 상공 500~2000m으로 유입되었다. 따라서 고비사막으로부터 발원한 황사가 강릉지역으로 일부 유입이 되었으나 강릉시내의 지표 부근에서의 PM농도에는 영향이 매우 작았다고 생각된다.

동시에 23일에 몽고의 동부(그림 속의 사각형 밖) 상공 1500m에서 출발한 공기입자가 중국의 내몽

고를 거쳐 26일에는 중국의 동부연안의 지표 상공에서 체류한 후에 다시 27일 06시까지 황해 중부해역의 해면 부근에서 약 1일간 체류하였다. 약 1일간 황해의 해면 부근에 체류 후에 다시 10월 28일에 산둥반도-한반도 중부지역을 거친 후에 강릉시의 500~1000m 고도에 도달하므로 근본적으로 고비사막에서 발원하지 않은 공기입자 즉 황사가 아닌 공기입자가 중국의 내몽고와 동부연안을 통과 한 후한 황해를 거쳐 유입되어 오므로, 비록 다소 오염된 공기입자가 동반되어 온다하더라도 황해해면에 대부분 낙하되었을 것으로 예상되기 때문에 강릉지역에서 PM농도의 증가에는 고비사막의 황사와는 관련이 없다.

또한 바이칼호수 상공 2000m 고도에서 출발한 청정한 공기입자는 몽고의 동북부-내몽고-요동반도를 거친 후에 26~27일 2일간에 황해 남부 해역의 해면부근에 체류한 후에 28일 09시에 강릉 상공의 500m 고도에 도달하였다. 따라서 황해의 해면 상 저층에 체류시에 많은 대기오염물질이 해면에 침착되었다고 생각되며, 10월 28일 0000UTC(09시)에 강릉시로 황사면지의 유입은 없었다. 그러나 공기입자가 26일과 27일에 황해 해면에서 체류하는 동안 부분적으로 2.5µm 이상의 비교적 큰 입경의 해염입자들이 공기 속으로 들어온 후 다음날인 10월 28일 09시에 강릉으로 유입이 가능하므로 그림 2에서와 같이 10월 28일 11시에 지역에서 방출된 대기오염물질과 결합하여 강릉시내의 지표부근에서의 PM₁₀의 농도가 매우 증가하고, 반면에 극미세입자와 초극미세입자농도인 PM_{2.5}와 PM₁농도가

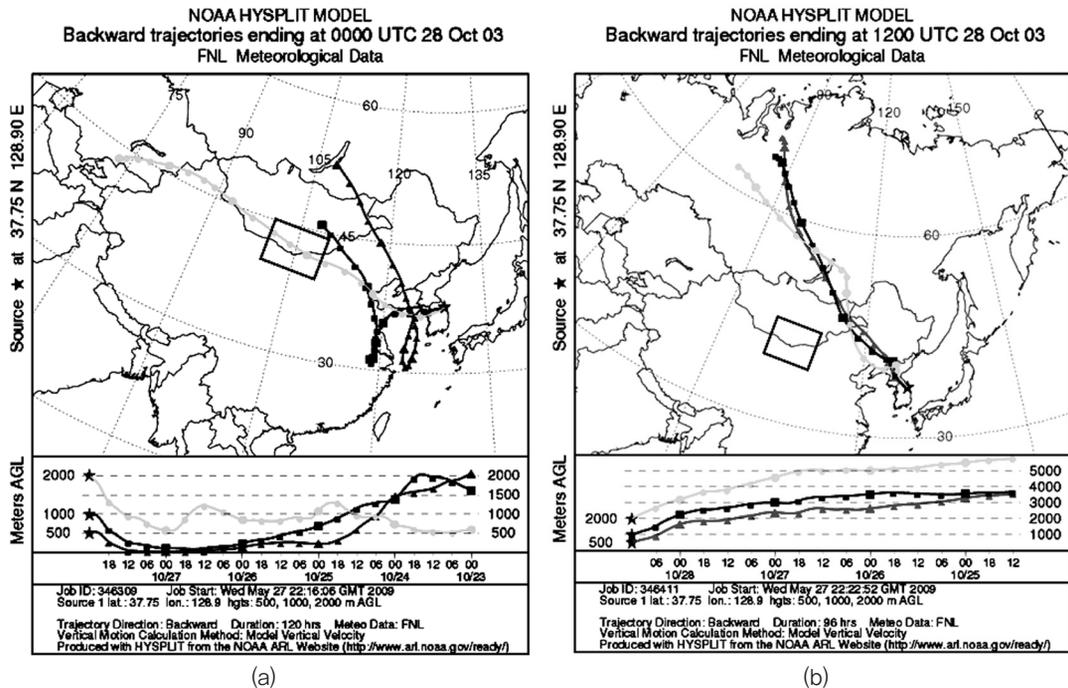


그림 9. 역유적궤도-(a) 2003년 10월 28일 0000UTC(0900LST), (b) 1200UTC(2100LST).

그림 속의 작은 사각형, 별표-고비사막, 강릉시

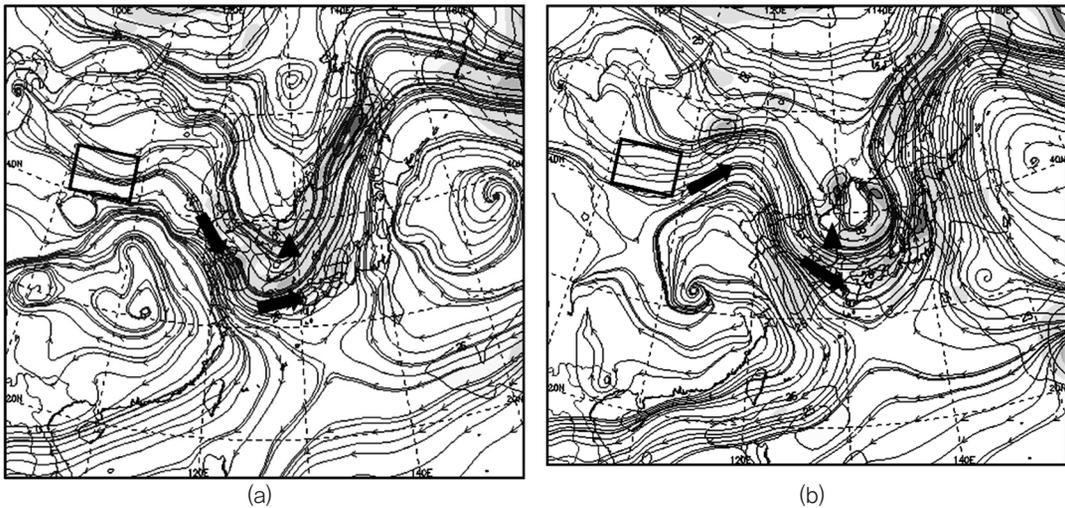


그림 10. 동북아 지역에서 850hPa 고도(약 1.5km)에서의 유선도-(a) 2003년 10월 28일 0000UTC(0900 LST), (b) 1200UTC(2100 LST), 작은 사각형, 작은 삼각형, 화살표, 회색지역-고비사막, 강릉시, 공기흐름, 12.5m/s 이상의 강풍지역

낮게 되었을 것으로 생각된다.

그림 9b에서 28일 21시에는 세 개의 공기입자의 역유적궤도가 모두 고비사막에서 멀리 떨어진 몽고의 동부지역을 거쳐 만주-한반도 북부-강릉으로 연결되어 있어 고비사막에서 발원한 황사의 유입은 기대하기 어렵다. 따라서 강릉시내의 지표부근에서의 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 와 PM_1 의 농도는 매우 낮았으며, 황사의 영향은 없었다.

그림 10의 850hPa 고도(약 1.5km)에서의 유선도에서 보면 10월 28일 09시와 21시의 고비사막에서 발원한 황사가 모두 발해만-황해 남부를 거쳐 일본 큐슈지역으로 이동해 간다. 따라서 강릉지역으로 황사의 유입을 기대하기가 어렵다. 즉 그림 9a와 9b에서 언급한 바와 같이 강릉지역으로 유입된 공기는 모두 고비사막에서 멀리 떨어진 몽고의 동부지역에서 유입되어 유선도의 설명과 잘 부합된다.

4) PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10} 농도 간의 상관관계

(1) 황사의 유입 전

그림 11은 강릉시에 황사의 유입이 있기 전인 10월 26일 00시~27일 07시까지 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 과의 상관관계와 $PM_{2.5}$ 로부터 PM_{10} 의 농도를 예측하기 위한 회귀곡선식을 나타내고 있다. $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 상관계수는 0.90으로 상관관계가 매우 높아, 미세입자인 PM_{10} 농도는 극미세입자인 $2.5\mu m$ 이하의 작은 먼지입자들의 총량이 크게 기여하였다. 이 상관관계로부터 환경부와 도별 지자체에서 측정된 미세입자농도인 PM_{10} 으로부터 측정되지 않고 있고, 기관지를 통과하여 폐에 도달할 수 있는 극미세입자의 농도인 $PM_{2.5}$ 농도를 계산할 수 있다.

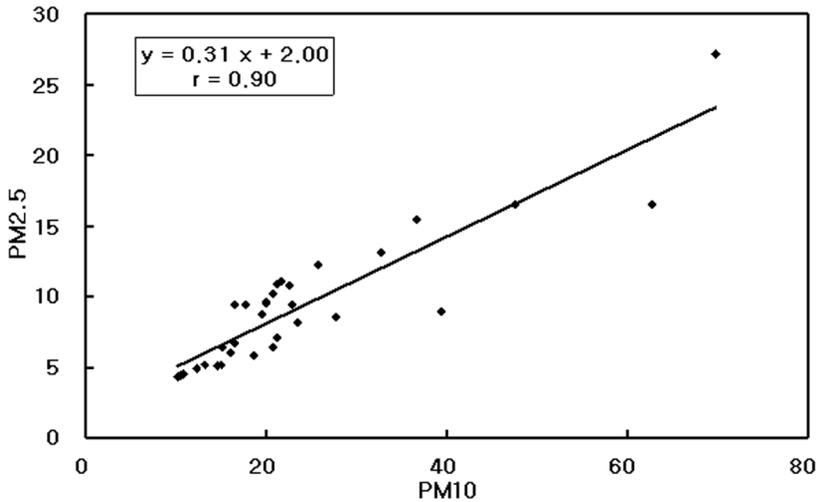


그림 11. PM_{2.5}와 PM₁₀의 상관관계와 회귀식 - 강릉시에 황사의 유입 전(2003년 10월 26~27일)

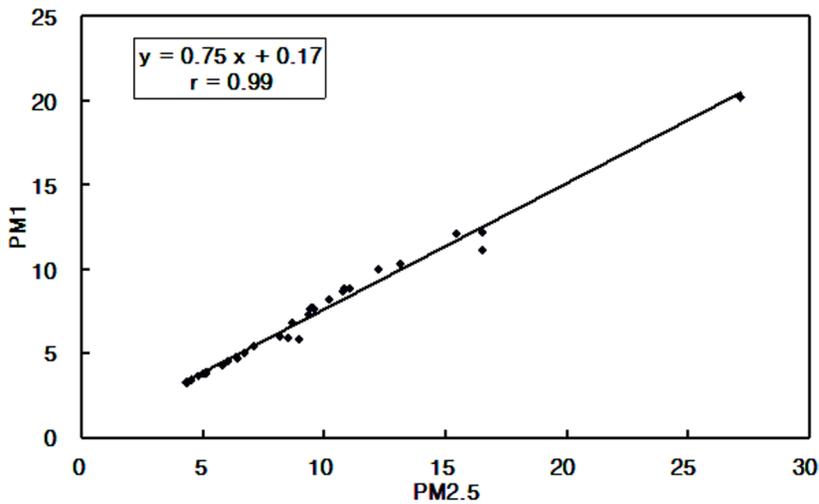


그림 12. PM₁과 PM_{2.5}의 상관관계와 회귀식 - 강릉시에 황사의 유입 전(2003년 10월 26~27일)

그림 12는 같은 기간에 PM₁과 PM_{2.5}와의 상관관계와 PM₁로부터 PM_{2.5}의 농도를 예측하기 위한 회귀곡선식을 나타내고 있다. PM₁과 PM_{2.5}와의 상관계수는 0.99로 거의 완벽한 상관관계를 나타내며, 2.5 μ m 이하의 극미세입자인 PM_{2.5}농도에 초극미세입자인 입경 1 μ m 이하의 매우 작은 먼지입자의 총량을 나타내는 PM₁농도가 거의 대부분을 차지할 정도로 완벽한 영향을 미쳤다. 따라서회귀식에 의해 PM_{2.5}로부터 PM₁를 계산한 값은 실제 관측치와 비교하면 그 차이가 매우 작다.

그림 13은 PM₁과 PM₁₀과의 상관관계와 PM₁₀으로부터 PM₁의 농도를 예측할 수 있는 회귀식을 나타내고 있다. PM₁과 PM₁₀과의 상관계수는 0.84이며, 상관관계가 여전히 매우 높다. 그러나 이 상관

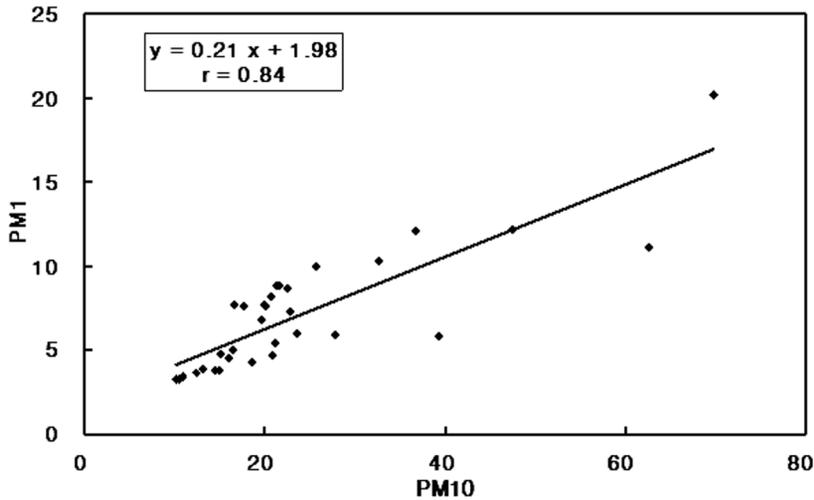


그림 13. PM₁과 PM₁₀의 상관관계와 회귀식 - 강릉시에 황사의 유입 전(2003년 10월 26~27일)

관계는 미세입자인 PM₁₀농도에 1 μ m 이하의 작은 초극미세입자인 먼지입자들의 총량이 PM₁농도가 크게 기여하였을 뿐만 아니라 1 μ m 이상의 먼지입자들도 PM₁₀농도 구성에 기여하였다고 생각된다. 따라서 이 회귀식에 의한 예측치는 실제 관측치와 약간의 차이를 보인다.

(2) 황사 기간

황사가 고비사막에서 강릉시내로 유입되어 PM농도에 영향을 주기 시작한 10월 27일 08시부터 28일 05시까지 PM_{2.5}와 PM₁₀과의 상관관계와 PM_{2.5}로부터 PM₁₀의 농도를 예측하기 위한 회귀곡선 식이 그림 14에서 보는 바와 같다. 10월 27일 09시와 21시의 일기도, 공기입자의 역유적궤도와 850 hPa 고도의 유선도에서 보는 바와 같이 27일 07시 이후부터는 고비사막에서 출발한 공기의 황사입자가 중국의 동부 도시인 서주-황해의 남부-한반도 중부를 거쳐 강릉시로 유입이 되어 강릉지역에서 많은 차량으로부터 다량의 대기오염물질의 방출 및 도로로부터의 비산먼지와 고비사막으로부터 지속적으로 유입되는 황사먼지가 결합하여 PM의 농도가 매우 높았다.

PM_{2.5}와 PM₁₀의 상관계수는 0.98로 상관관계가 완벽할 정도로 매우 높았다. 이는 PM₁₀의 농도 변화에 극미세입자인 2.5 μ m 이하의 작은 먼지입자들의 농도가 매우 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 제시된 농도예측을 위한 회귀식을 이용하여 측정된 PM₁₀의 농도로부터 PM_{2.5}의 농도를 계산할 수 있을 것이다.

그림 15에서 PM₁과 PM_{2.5}의 상관계수는 1.00으로 완벽한 상관관계를 나타낸다. 이는 입경 2.5 μ m 이하의 먼지입자들의 총량인 극미세입자의 농도, PM_{2.5}에 초극미세입자인 입경 1 μ m 이하의 먼지입자들의 총량이 PM₁의 농도가 절대적인 영향을 주었다. 따라서 제시된 회귀식을 사용하여 PM_{2.5}부터 거의 완벽하게 정확한 PM₁농도를 계산할 수 있다.

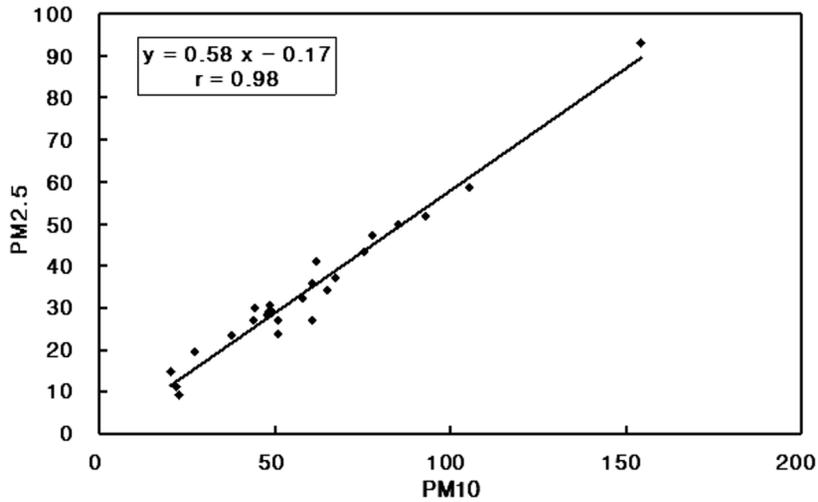


그림 14. PM_{2.5}와 PM₁₀의 상관관계와 회귀식 - 강릉시에 황사의 유입 기간(2003년 10월 27~28일)

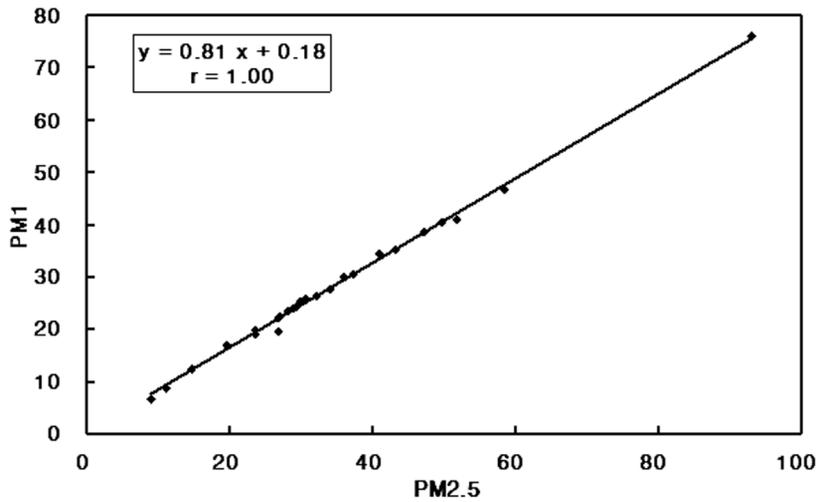


그림 15. PM₁과 PM_{2.5}의 상관관계와 회귀식 - 강릉시에 황사의 유입 기간(2003년 10월 27~28일)

그림 16에서 PM₁과 PM₁₀과의 상관계수는 0.97로 상관관계가 매우 높았다. 미세입자농도인 PM₁₀의 농도에 초극미세입자인 1 μ m 이하의 먼지들의 농도인 PM₁이 크게 작용하였다. 따라서 PM_{2.5}와 PM₁₀, PM₁과 PM_{2.5}, PM₁과 PM₁₀ 간의 상관관계가 매우 높아 상호간의 예측공식을 사용하여 PM₁₀으로부터 원하는 PM_{2.5}와 PM₁농도를 계산하여 황사기간에서의 PM₁₀, PM_{2.5} 및 PM₁농도를 정확하게 예측할 수 있을 것이다.

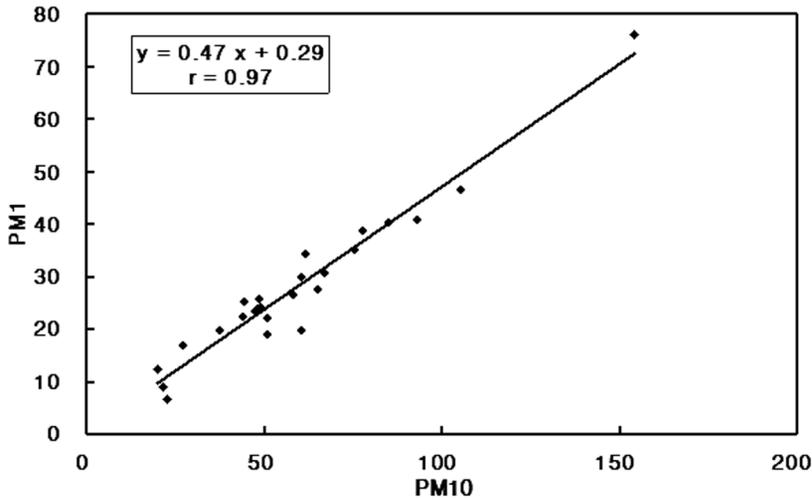


그림 16. PM₁과 PM₁₀의 상관관계와 회귀식 - 강릉시에 황사의 유입 기간(2003년 10월 27~28일)

(3) 황사 후

황사의 영향이 끝난 후인 10월 28일 06시~29일 16시까지 PM_{2.5} 농도와 PM₁₀ 농도와의 상관관계와 PM₁₀ 농도로부터 PM_{2.5} 농도를 예측할 수 있는 회귀식을 나타내고 있다(그림 17). PM_{2.5}와 PM₁₀의 상관관계수가 0.23로 상관관계가 매우 낮았다. 이는 입경이 10 μ m 이하의 미세먼지농도인 PM₁₀의 농도변화에 극미세입자인 입경이 2.5 μ m 이하의 작은 먼지입자들의 농도가 매우 미약하게 작용하므로, 오히려 입경이 2.5 μ m 이상인 조대입자의 농도가 PM₁₀의 농도변화에 큰 영향을 주었을 것이다. 최효(2010)의 이전 연구에서 2.5 μ m 이상인 조대입자의 농도(PM_{10-2.5})가 PM₁₀의 농도변화에 영향을 주

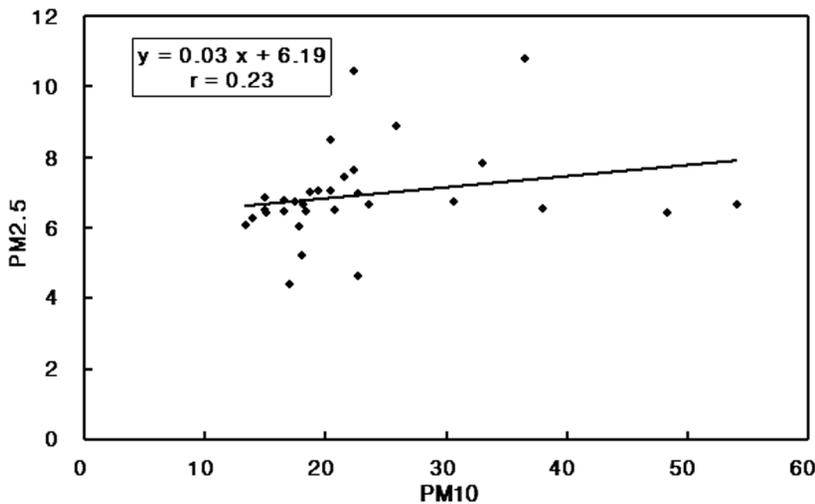


그림 17. PM_{2.5}와 PM₁₀의 상관관계와 회귀식 - 강릉시에 황사유입 종료 후(2003년 10월 28~29일)

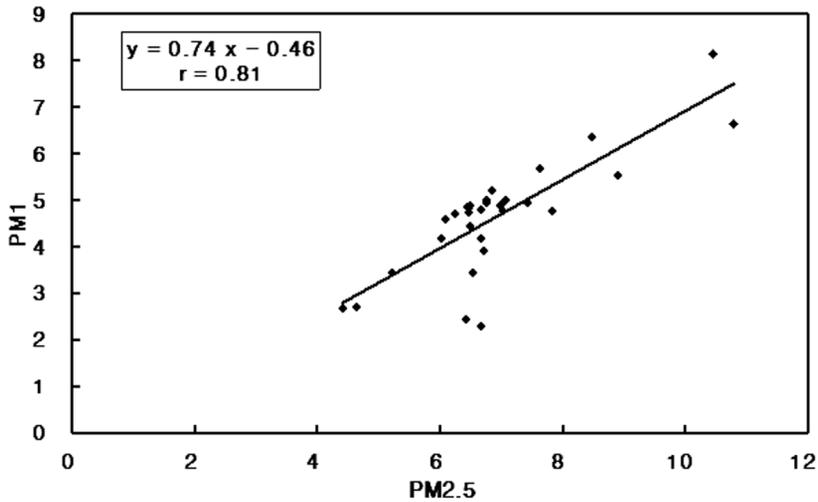


그림 18. PM₁과 PM_{2.5}의 상관관계와 회귀식 - 강릉시에 황사유입 종료 후(2003년 10월 28~29일)

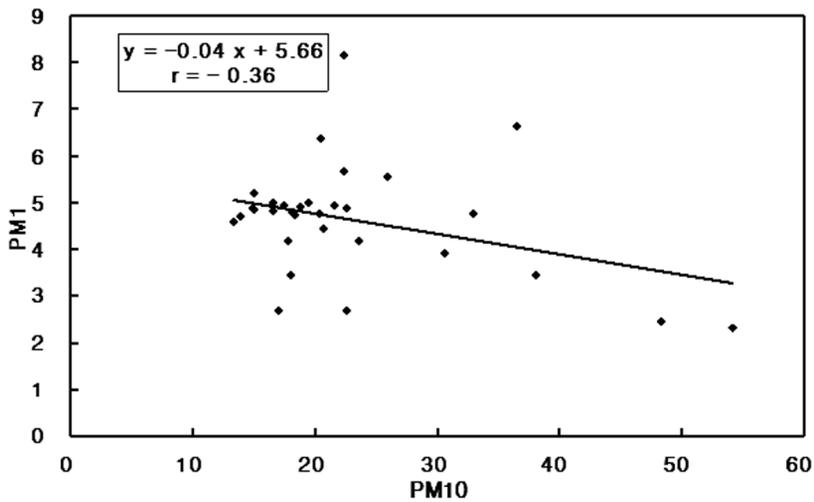


그림 19. PM₁과 PM₁₀의 상관관계와 회귀식 - 강릉시에 황사유입 종료 후(2003년 10월 28~29일)

었음을 밝혔다. 따라서 PM₁₀ 농도로부터 PM_{2.5} 농도를 계산하여 사용하는 것은 정확도가 매우 낮게 된다.

이와는 달리 PM₁과 PM_{2.5}와의 상관관계는 비교적 높은 0.81의 상관계수를 나타낸다(그림 18). 이는 2.5 μ m 이하의 작은 먼지입자들의 농도인 PM_{2.5}에 입경이 1 μ m 이하의 초극미세입자들이 크게 영향을 주었음을 알 수 있다. 그러나 부분적으로는 입경이 2.5 μ m 보다 작고 입경이 1 μ m 이상인 먼지입자들이 기여하였다고 생각할 수 있다. 회귀식을 사용하여 PM_{2.5}로부터 PM₁를 계산하여 예측할 수 있다.

그림 19에서 PM_1 과 PM_{10} 과의 상관계수는 -0.36 이므로 상관관계가 역으로 약간의 관계가 있다. 이는 PM_{10} 의 농도변화에 초극미세입자들의 농도인 PM_1 의 영향이 매우 미미하고, 오히려 입경이 $1\mu m$ 이상 또는 $2.5\mu m$ 이상인 조대입자의 농도가 크게 작용하였음을 의미하므로 회귀식에 의해 PM_1 농도를 예측하기는 어렵다.

(4) 전 기간

비 황사기간과 황사기간을 포함하여 2003년 10월 26일~29일까지 전 측정기간에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$, $PM_{2.5}$ 과 PM_1 , PM_{10} 과 PM_1 과의 상관계수와 PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 농도 상호 간의 농도를 예측할 수 있는 회귀식이 계산되었다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 와의 상관계수가 0.94 로 매우 높게 나타났다(그림 20). 이는 PM_{10} 의 농도 변화에 입경이 $2.5\mu m$ 이하의 작은 먼지입자들의 농도인 $PM_{2.5}$ 가 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

유사하게 $PM_{2.5}$ 과 PM_1 의 상관계수는 1.00 으로 완벽한 상관관계를 나타내므로, $PM_{2.5}$ 농도 증가에 초극미세입자인 입경이 $1\mu m$ 이하의 먼지입자들의 총량이 PM_1 농도가 100% 정도로 크게 영향을 미친다(그림 21). PM_{10} 과 PM_1 과의 상관계수는 0.92 로 매우 상관관계가 크며, 미세입자인 PM_{10} 의 농도 변화에 초극미세입자인 입경이 $1\mu m$ 이하의 먼지들의 농도가 여전히 크게 기여하였다(그림 22). 따라서 PM_{10} 의 농도변화는 먼지입경이 $2.5\mu m$ 이하의 극미세먼지와 입경이 $1\mu m$ 이하의 초미세먼지입자들이 모두 매우 크게 기여하였다.

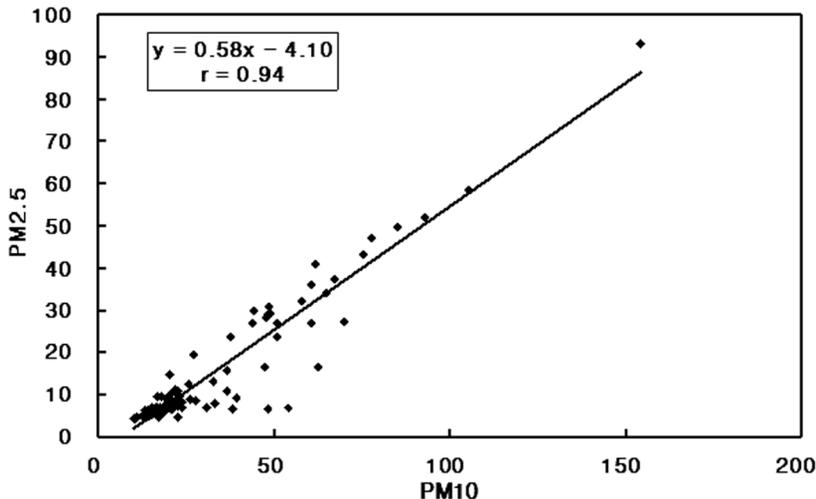


그림 20. $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 상관관계와 회귀식 - 전 기간(2003년 10월 26~29일)

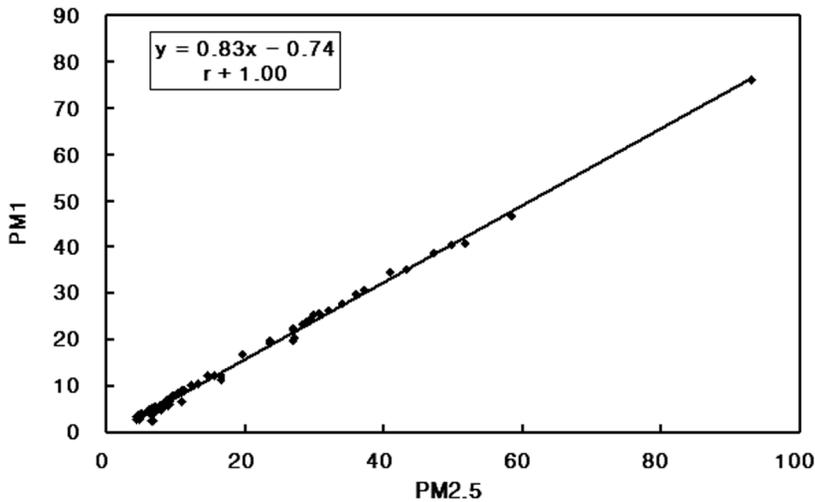


그림 21. PM_1 과 $PM_{2.5}$ 의 상관관계와 회귀식 - 전기간(2003년 10월 26~29일).

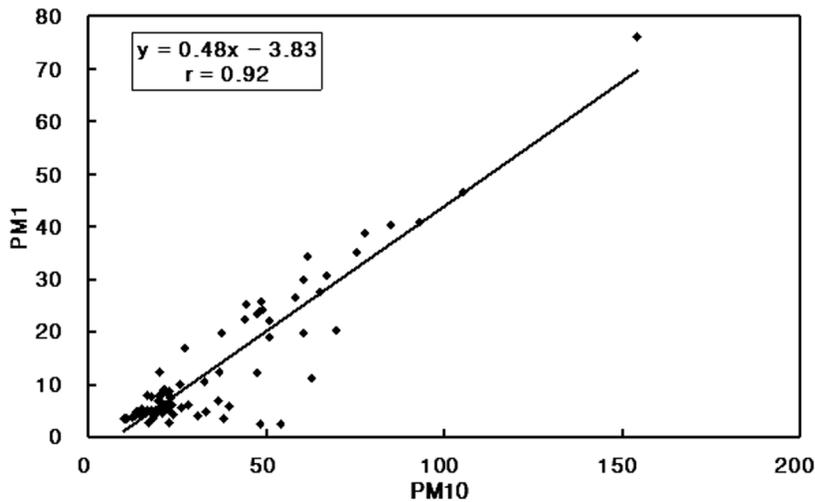


그림 22. PM_1 과 PM_{10} 의 상관관계와 회귀식 - 전기간(2003년 10월 26~29일).

5) PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10} 농도 간 예측을 위한 회귀식

표 1에서 PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 농도 간 상호예측을 위한 회귀식이 제시되었으며, 회귀식을 사용하여 원하는 각각의 PM 농도를 계산할 수 있다. 고비사막에서 발원한 황사가 강릉시내로 유입 전과 유입 기간에는 농도 간의 상관관계가 매우 높아 회귀식을 사용하여 PM 농도를 예측하는 것은 타당하지만 황사유입이 종료된 후에 PM_1 과 $PM_{2.5}$ 의 상관계수를 제외하고 나머지는 매우 낮아 회귀식을 사용하기에는 한계가 있을 것으로 생각된다.

표 1. 2003년 10월 26~29일까지 강릉시에서 측정된 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ 농도간의 상관관계와 회귀식.

기간	항목 (Y-X)	상관관계(r)	회귀식
2003. 10. 26.~10. 27. (황사 전)	PM _{2.5} - PM ₁₀	0.90	Y = 0.31X + 2.00
	PM ₁ - PM _{2.5}	0.99	Y = 0.75X + 0.17
	PM ₁ - PM ₁₀	0.84	Y = 0.21X + 1.98
2003. 10. 27.~10. 28. (황사기간)	PM _{2.5} - PM ₁₀	0.98	Y = 0.58X - 0.17
	PM ₁ - PM _{2.5}	1.00	Y = 0.81X + 0.81
	PM ₁ - PM ₁₀	0.97	Y = 0.47X + 0.29
2003. 10. 28.~10. 29. (황사 종료 후)	PM _{2.5} - PM ₁₀	0.23	Y = 0.03X + 6.19
	PM ₁ - PM _{2.5}	0.81	Y = 0.74X - 0.46
	PM ₁ - PM ₁₀	-0.36	Y = -0.04X + 5.66
2003. 10. 26.~10. 29. (전 기간)	PM _{2.5} - PM ₁₀	0.94	Y = 0.58X - 4.10
	PM ₁ - PM _{2.5}	1.00	Y = 0.83X - 0.74
	PM ₁ - PM ₁₀	0.92	Y = 0.48X - 3.83

4. 결론

고비사막에서 발원한 황사가 강릉 연안으로 유입이 있었던 기간에는 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 최대농도가 황사의 유입 전 후의 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외에 비해 약 3.8배, 3.4배, 14.1배로 높은 154.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 93.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 76.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 출근시간대인 09시와 퇴근시간대인 18시에 시내에서 운행되는 많은 차량으로부터 연료의 연소에 따른 대기오염물질과 도로 위의 비산먼지에 의해 PM 농도가 높았으며, 특히 일몰 후의 주거지역에서 난방보일러의 가동에 의해 방출되는 대기오염물질들과 결합하여 최대 PM농도가 황사 유입 전에는 18시에 나타났으며, 대량의 황사 유입이 있는 황사기간에는 17시에 출현하였다.

낮에는 출근시간대인 09시를 제외하고, 태양광선에 의한 지표가열에 기인해 열적내부경계층이 강릉연안에서 대관령의 정상까지 약 200m의 두께를 갖고 연직으로 발달하여, 강릉시내의 지표로부터 방출된 대기오염물질들이 열적내부경계층의 정상까지 상승하게 되어 지표부근에서 PM 농도들이 12시에는 낮았다. 반면에 일몰 직후에 도시 도로 상의 차량에서 방출되는 오염물질과 비산먼지 및 주거지역의 보일러의 가동에 의해 방출되는 오염물질들이 고비사막에서 수송된 먼지들과 결합되고, 결합된 먼지입자들이 수축된 야간접지경계층의 지표로 침적되어 17시에 최대PM 농도를 초래했다.

황사의 유입 전에는 PM₁₀과 PM_{2.5}, PM_{2.5}와 PM₁, PM₁₀과 PM₁ 간의 상관계수는 0.90, 0.99, 0.84로 매우 높았다. 황사가 유입 기간에는 이들 농도 간의 상관계수가 0.98, 1.00, 0.97로 거의 완벽한 상관관계를 나타내었다. 그러나 황사 유입이 종료된 후에는 상관관계가 0.23, 0.81, -0.36로 PM_{2.5}와 PM₁

간의 상관관계를 제외하고 관계가 매우 낮았다. 전 기간을 걸쳐, PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 농도 간의 상관관계는 0.94, 1.00, 0.92로 매우 높았으며, PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 의 상호 간의 농도를 예측할 수 있는 제시된 회귀식을 사용하여 각각의 농도를 계산할 수 있다.

사사

본 연구는 이미숙의 호서대학교 박사학위 과정에서 연구된 내용의 일부가 포함되어 있으며, 2011~2012년, 기상청 기상지진기술개발사업(CATER2006-2308)–“산악연안에서 바람폭풍의 생성역학과 예측”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 신화통신사, 2009, 중국과 한국이 사진폭에 대하여 관측소를 세움, 기상청.
- 전병일, 2003, 2002년 부산지역 봄철 황사/비황사시 PM_{10} 중의 중금속 농도 특성, 환경영향평가, 12(2), 100-110.
- 정진도·황승민·최희석, 2008, 아산지역의 황사/비황사시 $PM_{2.5}$, 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 농도비교, 한국환경과학회지, 17(5), 84-95.
- 최효, 2010, 가을 황사발생 시 고비사막에서 수송된 극미세입자가 잇바상물질 농도 (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1)에 미친 영향, 기후연구, 5(3), 219-233.
- 최효, 2011, 겨울 황사기간 중 한국, 강릉시의 시간별 가스상 오염물질 농도의 변화특성-2005년 2월 14~16일 사례, 기후연구, 6(1), 59-76.
- 행정안전부, 2010, 황사현상이 예상되는 경우 축산농가의 관리수칙 참조 및 구제역 예방.
- Choi, H., 2004, Influence of large scale motion and atmospheric boundary layer upon duststorm generation and local particulate concentration, Ph.D. thesis, Peking University Press, 80pp.
- Choi, H. and 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, *Atmospheric Research*, 89, 330-337.
- Choi, H., Choi, D. S., and 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 Advances*, 3(4), 309-315.
- Choi, H. and Zhang, Y. H., 2008, Prediction of duststorm evolution by vorticity theory, *Atmospheric Research*, 89, 338-350.
- Choi, H., Zhang, Y. H., and Kim, K. H., 2008, Sudden high concentration of TSP affected by atmospheric

- boundary layer in Seoul metropolitan area during duststorm period, *Environmental International*, 34(5), 635-647.
- Chon, H., 1994, Historical records of yellow sand observations in China, *Research of Environmental Sciences*, 7(6), 1-11.
- Chung, Y. S., Kim, H. S., Natsagdorj, L., Jugder, D., and Chen, S. J., 2001, On yellow sand occurred during 1997-2000, *Journal of Korean Meteorological Society*, 37, 305-316.
- Fei, J. and Qing, Y., 1998, The numerical simulation on dust-storm over east Asia II: A case analysis, *Acta Science & Nature*, Univ. Pekinensis, 34(5), 639-645.
- Huang, M. and Wang, Z., 1998, A model for long-range transport of yellow sand in East Asia, *Atmosphere Sinica*, 22, 625-637.
- Kim, H. K. and Kim, M. Y., 2003, The effects of Asian dust on particulate matter fractionation in Seoul, Korea during spring 2001, *Chemosphere*, 51, 707-721.
- Kim, K. W., Kim, Y. J., and Oh, S. J., 2001, Visibility impairment during yellow sand periods in the urban atmosphere of Kwangju, Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 5157-5167.
- Kotamarthi, V. R. and Carmichael, G. R., 1990, The long range transport of pollutants in the Pacific rim region, *Atmospheric Environment*, 24A, 1521-1534.
- Lin, T. H., 2001, Long-range transport of yellow sand to Taiwan in spring 2000: Observed evidence and simulation, *Atmospheric Environment*, 35, 5873-5882.
- Middleton, N. J., 1986, A geography of dust storms in Southwest Asia, *Journal of Climate*, 6, 183-196.