

가을 황사발생 시 고비사막에서 수송된 극미세입자가 입자상물질 농도 (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁)에 미친 영향 -2003년 10월 27일 사례-

최효

강릉원주대학교 대기환경과학과

(2010년 9월 9일 접수, 2010년 10월 5일 수정, 2010년 10월 12일 수락)

Impact of Fine Particulate Matters Transported from Gobi Desert to Particulate Matter Concentrations (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) for Yellow Sand Event Period in Fall: Case Study of October 27, 2003

Hyo Choi

Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University

(Received 9 September 2010, Revised 5 October 2010, Accepted 12 October 2010)

요약 : 황사발생 전과 후인 2003년 10월 26일 00시부터 29일 18시까지 한국의 동쪽 연안에 있는 강릉시에서 PM₁₀, PM_{2.5}와 PM₁ 매 시간별 분포를 조사하였다. 황사가 고비사막으로부터 유입되기 전까지는 매 시간 PM₁₀ 농도가 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외, PM_{2.5}가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외, PM₁가 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외로 매우 낮은 농도를 나타내지만 황사가 유입된 10월 27일 09시부터 28일 05시까지 PM₁₀의 농도의 범위가 48.20~154.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 평상시 비해 PM₁₀의 농도가 3.8배로 높았다. 유사하게 PM_{2.5}의 농도는 26.92~93.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 변화폭을 나타내며, 최대 3.4 배로 높게 나타났고, PM₁의 농도는 19.63~76.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 변화폭을 갖고, 최대 14.1배가 되었다. 황사가 나타나는 동안에는 수송된 황사먼지의 집중적인 유입과 동시에 도로 위의 차량의 밀집과 일몰 후 주거지역에서의 보일러 가동으로 출근시간인 09시와 퇴근시간인 17시에 PM의 고농도가 나타났다. 황사가 관측되기 전에는 미세입자와 극미세입자의 비율을 나타내는 (PM₁₀-PM_{2.5})/PM_{2.5}는 0.75~7.12, 극미세입자와 초극미세입자의 비율을 나타내는 (PM_{2.5}-PM₁)/PM₁는 0.23~1.90로 나타났으며, 황사가 관측되는 기간에는 0.60~1.25와 0.21~0.37을 각각 나타내었다. 강릉시에 황사가 나타나기 전에는 2.5 μm 큰 입자들이 2.5 μm 이하의 극미세입자보다 PM₁₀의 농도에 큰 영향을 주었으나, 황사가 관측되는 기간에는 2.5 μm 이하의 극미세입자들이 PM₁₀의 고농도 출현에 크게 기여하였다. 황사가 관측되는 기간에는 지역의 PM고농도에 2.5 μm 이상의 큰 입자가 기여하는 일반적인 양상과 반대였다.

주요어 : PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁

Abstract : Hourly distribution of PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations at Gangneung city in the eastern coast of Korea from 0000LST October 26 to 1800LST October 29, 2003. Before the intrusion of dust from the northern China toward the city, PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ concentrations were generally low more or less than 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, except for PM₁₀ of 69.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at 1800 LST, October 26, respectively. From 0900 LST October 27 through 0500LST, October 28 during the

intrusion of dust toward the city, PM_{10} concentrations were in the range of $48.20\sim 154.57\mu\text{g}/\text{m}^3$ and maximum concentration was 3.8 times higher than the maximum concentration of non-dust period. Similarly, $PM_{2.5}$ (PM_1) concentrations were in the range of $26.92\sim 93.19\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($19.63\sim 76.05\mu\text{g}/\text{m}^3$) with maximum concentration of 3.4 (14.1) times higher than one of non-dust period and their general concentrations. During the dust period under the intensive intrusion of dusts from Gobi Desert toward the city, higher PM concentrations were detected at 0900LST at the beginning time of office and 1700LST at the ending time of office due to high density of traffic vehicles on the road and more operating heating boilers near the sunset. Before the dust period, fractional ratios of $(PM_{10}-PM_{2.5})/PM_{2.5}$ were 0.75~7.12 and $(PM_{2.5}-PM_1)/PM_1$ were 0.23~1.90. These ratios implied that coarse particulate greater than $2.5\mu\text{m}$ made a great contribution to PM_{10} concentration and fine particulate greater than $1\mu\text{m}$ to $PM_{2.5}$, resulting in the contribution of coarse particulates to local particulate concentrations. However, during the dust period, their ratios were 0.60~1.25 and 0.21~0.37, which implied fine particulate smaller than $2.5\mu\text{m}$ and $1\mu\text{m}$ sizes made great contributions to PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations, respectively. The great contribution of fine particulate matter smaller than $2.5\mu\text{m}$ to local high PM concentration during the dust period was opposite to the general pattern of PM concentration with the particulate's contribution greater than $2.5\mu\text{m}$.

Key Words : PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1

1. 서론

황사의 발원지는 중국의 북서부와 몽고이지만 주로 봄철 3~5월 사이에 황사가 발생하며, 10월부터 12월에도 발생하기도 한다(Natsagdorj, 1992; Chon, 1994; Chung and Yoon, 1996; Chung *et al.*, 2001). 황사는 중국의 서북쪽에 위치한 타카라마칸사막, 몽고의 고비사막, 오도로스사막, 로에스 몽골고원, 중국 내몽고의 황토고원에서 발생하여 중국 전역과, 한국, 일본을 거쳐 심지어 미국 동부 해안까지 그 영향을 주고 있다(Duce *et al.*, 1980; Huang and Wang, 1998; Fei and Qing, 1998; Wang *et al.*, 2000; Lin, 2001; McKendry *et al.*, 2001; Chung *et al.*, 2003). 황사는 많은 양의 큰 입자와 작은 입자의 먼지를 동시에 중국내륙과 인접 국가로 수송하므로, 황사의 수송로에 위치한 지역에서의 먼지농도는 정상시에 비해 4배에서 10배 이상으로 높아지고, 대기 구성성분에도 영향을 크게 미친다(Chun *et al.*, 2001; Gao and Anderson, 2001; Xuan and Sokolik, 2002). 중국에서 발생하는 황사는 아프리카의 사하라 사막과 오스트레일리아의 사막에서 발생하는 황사와는 발생조건이 다소 다르다(Middleton, 1986; Westphal *et al.*, 1987; Zhang and Zhong, 1985; Choi and Zhang, 2008). 몽고의 고비사막이나 중국의 내몽고지역에서 발생하는 황사의 경우에는 높은 산이 있는 고원지역의 사막이나 고원의 건조지역에서 지표부근의 습도가 30% 이하, 풍속이 8~10m/s로 강한 바람이 불 때 발생하지만, 대부분 평지로 구성되어 있는 아프리카와 오스트레일리아의 사막의 경우는 풍속이 5m/s 내외로도 발생한다(Yamamoto *et al.*, 2003; Choi and Zhang, 2008). 발원지에서 배출되는 황사의 양의 30% 정도가 발원지 부근에 재 침착되고, 20%는 중국내륙의 주변지역으로 수송되며, 50%는 장거리 수송되어, 한국, 일본, 태평양 및 미국의 서해안까지 도달하여 침착되고 있다(Zhang and Zhong, 1985).

황사의 수송에 의한 고농도의 먼지 입자는 호흡기 질환과 안질을 크게 증가 시키며, 특히 2.5 μ m 이하의 극미세먼지와 1 μ m 이하의 초극미세먼지의 눈, 코, 목 등의 점막을 통과하여 인체의 각 부위에서 걸러지지 않은 상태로 폐까지 도달하게 되어 심각한 호흡기 질환을 일으키고 있다(Chung *et al.*, 2003). 식물의 잎에 다량의 먼지가 침착되어 탄소동화작용과 호흡장애를 일으켜, 식물성장의 방해와 식물을 고사시키거나 또한 동물의 호흡기 질환과 황사에 내재된 병원균이 황사와 함께 수송되어 전염병을 일으켜, 구제역과 같은 심대한 병해를 일으켜 막대한 경제적인 손해를 주고 있다(Jigjidsuren and Oyuntsetseg, 1998; Choi and Song, 1999). 최근 20년 동안 황사의 발생원인 및 황사의 수송에 대한 연구와 먼지와 수반되는 중금속과 이온분석이 주로 연구의 대상이었으며(Phadnis and Carmichael, 2000), PM_{2.5}와 PM₁와 같은 극미세먼지와 초극미세먼지의 농도분포의 특성과 황사발생 시에 중국에서 수송된 먼지와 지역에서 항상 발생하는 미세먼지 양이 결합하여 지역에서의 농도가 몇 시간 동안에 고농도를 초래하는 원인에 대한 연구는 아직까지 미흡하다(Kim and Kim, 2003; Choi, 2008; Choi and Choi, 2008; Choi and Zhang, 2008; Choi *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2010).

본 연구에서는 황사가 고비사막이나 중국북부의 내몽고의 지역에서 발생하여 한반도로 수송되어 지역의 대기질에 크게 영향을 미치는 시기가 일반적으로 3~5월까지로 알려져 왔으나 이와는 달리 10월에도 황사의 유입에 의해 지역의 대기질이 크게 악화되었다. 따라서 수송된 황사가 지역의 대기질에 미치는 영향을 파악하기위해 오염물질을 다량 방출하는 산업체가 없는 강릉시를 선택하여 30nm~20 μ m까지의 먼지입자를 크기별로 15개 구간으로 나누어서 측정하였다. 측정된 먼지농도들을 다시 합산한 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁로 구분한 후, 황사가 유입되기 전과 유입된 후의 PM_{2.5}와 PM₁ 농도가 지역의 대기질, 특히 PM₁₀의 먼지농도에 PM_{2.5}와 PM₁ 농도가 얼마나 영향을 미치는가를 연구하였다.

2. 연구지역 및 분석방법

1) 측정지역의 지형, 자료 및 분석방법

강릉시는 서쪽으로는 500~1500m 고도의 태백산맥이 남북으로 연안을 따라 위치하고, 동쪽으로는 동해를 끼고 있는 강릉시는 해발 고도 25m 내외의 분지로 구성되어 있다(그림 1). 특히 강릉시의 서쪽에는 865m의 대관령이 위치하고, 동쪽 해안을 따라 남쪽에서 북상해 오는 동한난류(East Korea Warm Current)와 북한연안을 따라 남하해오는 북한한류(North Korea Cold Current)의 영향으로 대륙성과 해양성기후를 동시에 갖는 기후대를 형성한다.

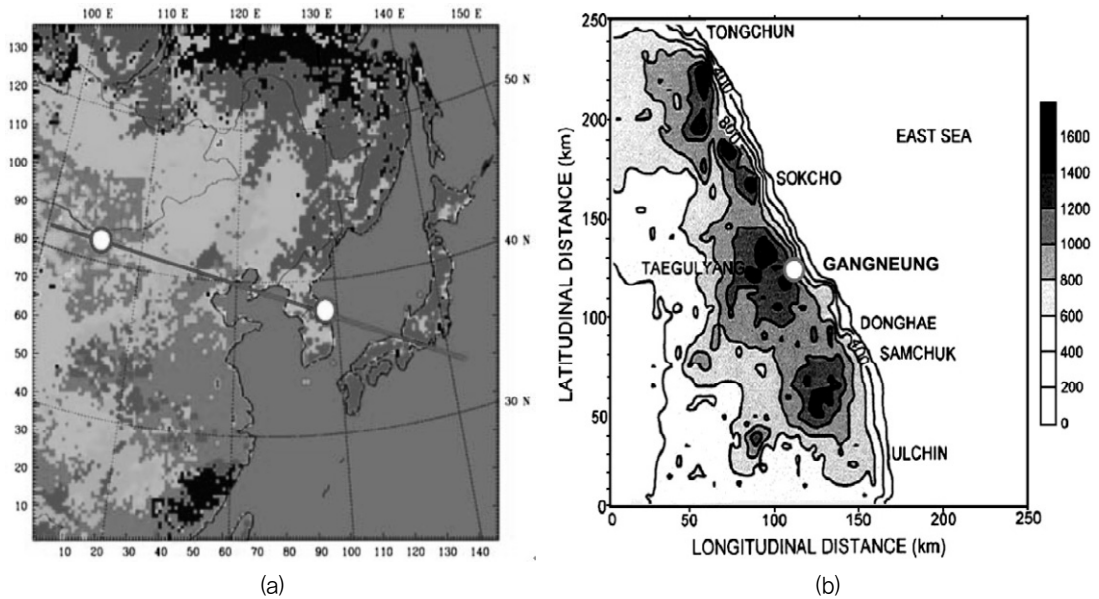


그림 1. 중국의 북부지역의 육지-사용도 (Land-Use Chart)와 한반도 동쪽 연안에 위치한 강릉시 부근(해발고도 20m; 폭 10km)의 2차원 지형도

2) 측정자료 및 분석방법

강원기상청(동경 128.90°; 북위 37.75°)에서 2003년 10월 26일~29일에 입자상물질인 먼지농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 독일 GRIMM회사 제품의 먼지측정기 모델 1108과 모델1107를 설치하여 300nm~20 μm 까지의 먼지를 15개 먼지입자의 크기에 따라 구분하여 측정하였으며, 이를 다시 10 μm 이하의 총 먼지량인 PM_{10} , 2.5 μm 이하의 총 먼지량인 $\text{PM}_{2.5}$ 와 1 μm 이하의 총 먼지량인 PM_1 의 매 시각별 농도를 황사 전, 황사기간, 황사 후로 나누어서 시각별 농도분포를 조사하였다. 또한 황사의 유입 전과 유입 중에 중국으로부터 수송된 황사먼지가 지역의 먼지농도인 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1 에 어떻게 기여하고 있는가를 파악하기 위해 $(\text{PM}_{10}-\text{PM}_{2.5})/\text{PM}_{2.5}$ 와 $(\text{PM}_{2.5}-\text{PM}_1)/\text{PM}_1$ 을 조사하였으며, 2.5 μm 이상인 조대입자와 1 μm 이하인 초극미세입자가 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1 에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 연구결과

1) 강릉시의 황사 관측 전후의 종관기상상태

강릉시에서 황사가 나타나기 전인 2003년 10월 27일 00z(0900LST)에 몽고의 동쪽에 1002hPa의 저기

압의 중심이 있고, 1025hPa의 고기압은 일본의 혼슈에 위치하고 있어, 한반도는 북저-남고 형태의 기압배치 상태의 영향 하에 서풍이 불고 있었다. 이 저기압이 차츰 시간이 지남에 따라 한반도로 접근하면서 28일 1800UTC(28일 0300LST)에 한반도 북쪽의 동쪽연안인 청진 연안해역에 중심을 두게 되면서 급격하게 발달한다. 이때 기압배치도 북저-남고 형태에서 서고-동저형태로 바뀌어 북풍의 강한 바람이 한반도 동해안에서 불었다(그림 2, 3, 4, 5).

그림 2와 3에서 보는바와 같이 10월 27일 12시에는 한반도에서는 남서풍의 종관풍이 탁월하며, 한반도 동쪽 연안에서는 서풍이 지배적이다. 저기압의 발달에 따른 등압선 간격이 좁아지게 되어 경도풍속의 증가가 예상된다. 28일 0000UTC(0900LST)에서 1200UTC(2100LST)까지 저기압이 급속하게 발달하며, 러시아의 블라디보스토크 연안해역으로 이동하였다(그림 4, 5). 그림 4에서와 같이 저기압의 중심의 이동은 매우 느렸으며, 저기압의 중심기압이 998hPa로 감소하면서 기압은 4hPa의 강화가 있었고, 특히 등압선 간격이 좁아짐에 따라 기압경도력 증가에 의한 풍속 강화와 급격한 전선의 이동에 의해 강풍의 출현이 예상되었다.

따라서 이러한 강한 북서풍이 부는 기상상태에서 중국의 북쪽에 위치한 고비사막으로부터 많은 양의 황사가 강릉시로 유입될 수 있어 강릉시의 지표부근에서의 PM의 농도가 매우 높게 나타났다(그림 3, 4, 10). 그러나 낮에는 태광광선에 의한 지표가열로 지표부근의 공기가 가열되어 상승하는 대류경계층이 발달하므로 지표부근의 공기 상승하면서 동시에 먼지와 같은 오염물질이 동반 상승되므로, 지표부근의 먼지농도는 그림 10에서와 같이 일반적으로 낮아지며, 10월 27일 12시에 PM농도가 높지 않음을 알 수 있다(Choi *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2010).

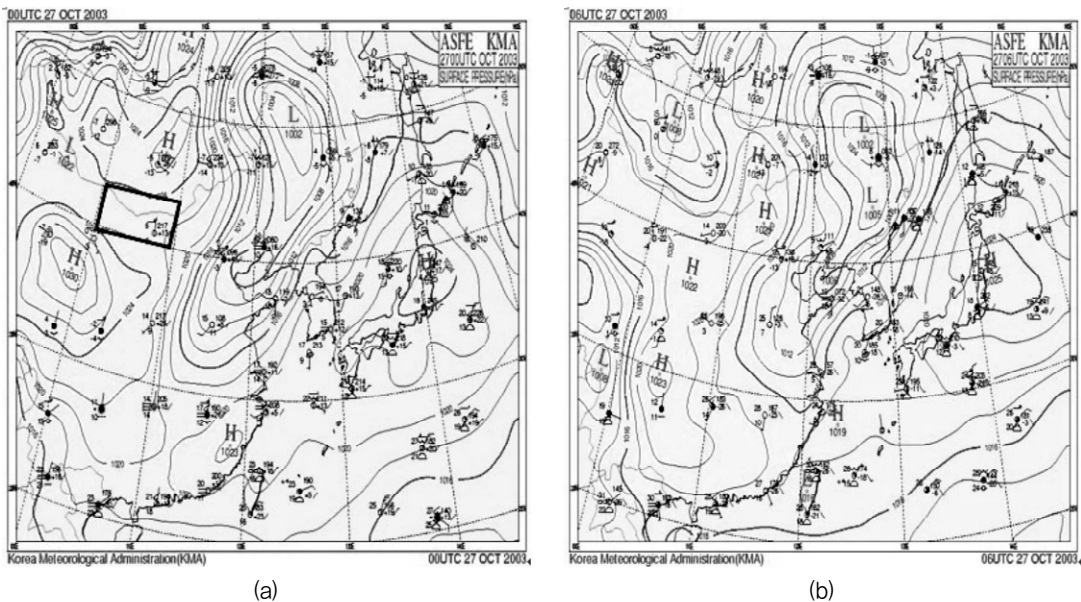
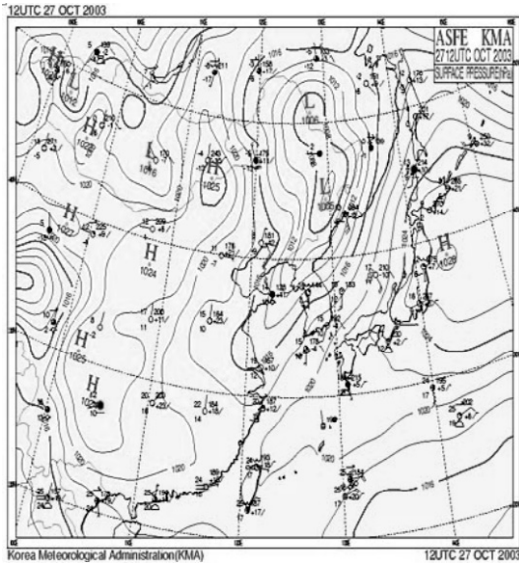
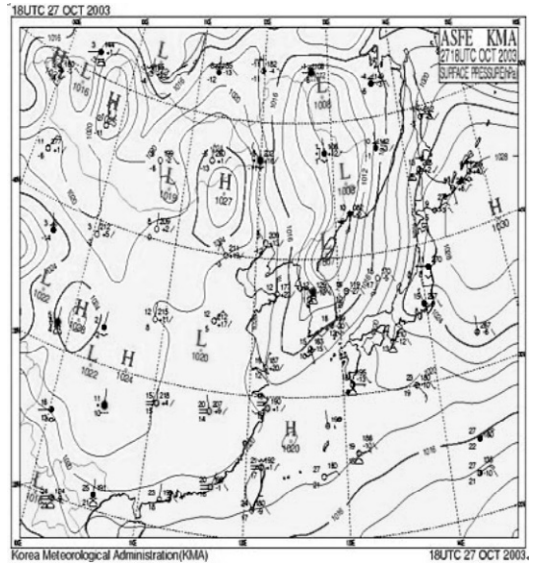


그림 2. (a) 2007년 10월 27일 0000UTC(0900LST), (b) 0600UTC(1500LST) 일기도

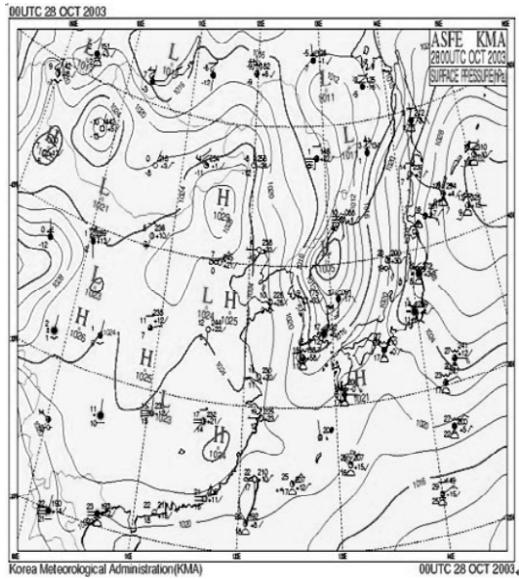


(a)

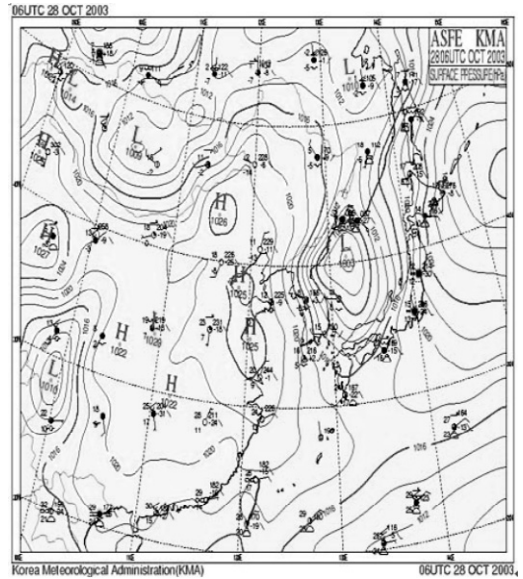


(b)

그림 3. (a) 10월 27일 1200UTC(2100LST), (b) 1800UTC(10월 28일 0300LST) 일기도



(a)



(b)

그림 4. (a) 10월 28일 0000UTC(0900LST), (b) 0600UTC(1500LST) 일기도

강원기상청 대관령기상대에서 관측된 바람 측정 자료에 의하면, 18시에는 대관령 정상 상공에 16.3m/s의 강풍대가 형성되어 대관령 부근에서는 서풍의 표층풍이 12m/s로 불었고, 강한 서풍의 하강

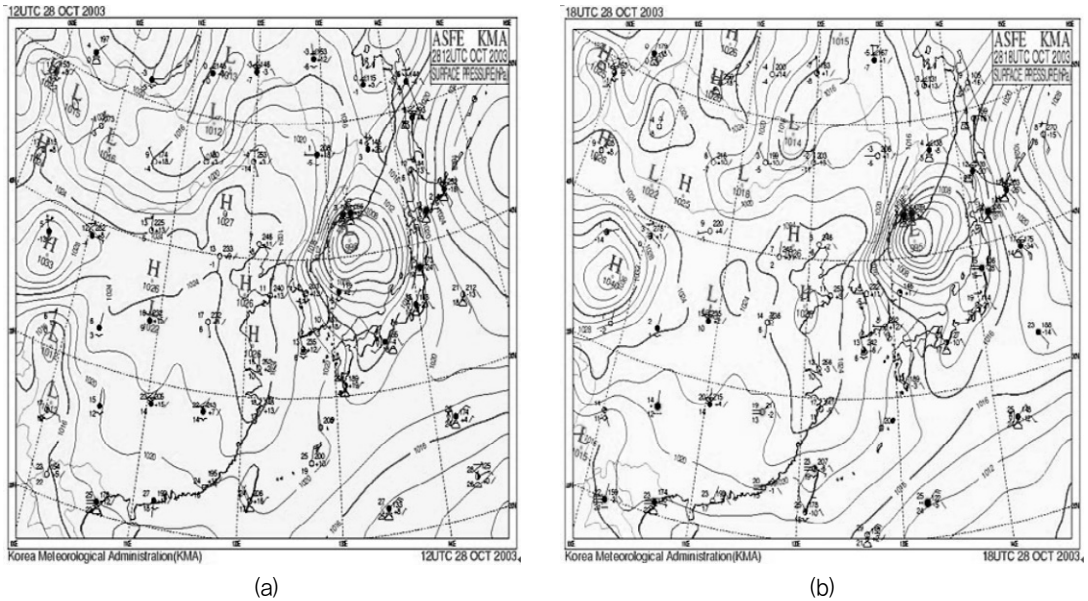
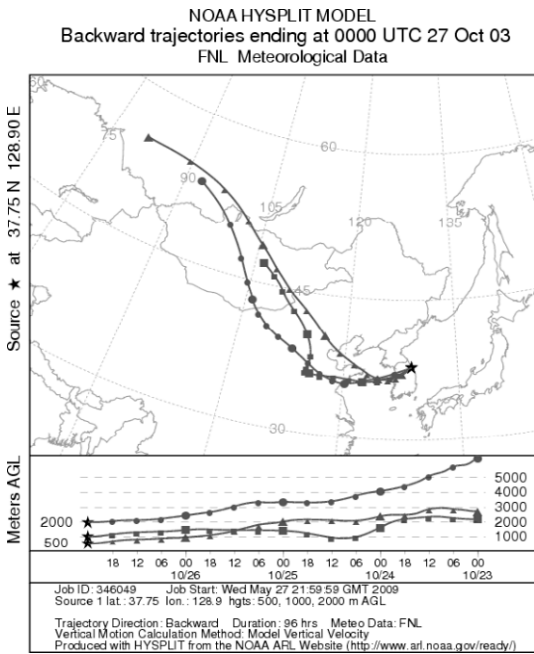


그림 5. (a) 10월 28일 1200UTC(2100LST), (b) 1800UTC(10월 29일 0300LST) 일기도

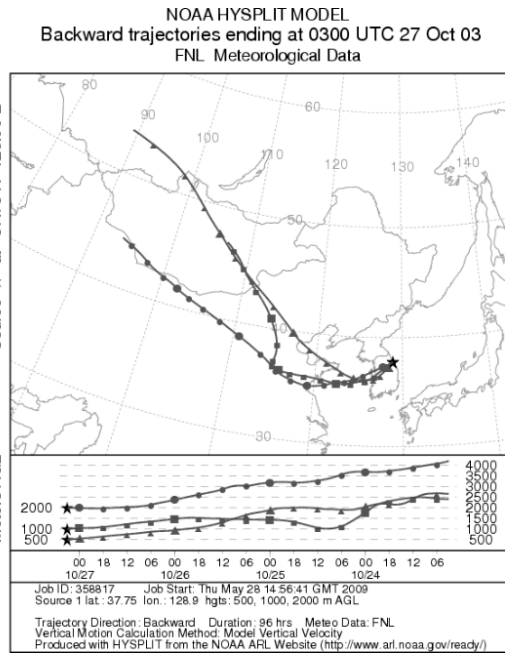
류가 강릉의 서쪽 사면에 도달하면서 지표 충돌로 풍속이 약화되어 강릉시내에는 1m/s 내외의 약한 서풍이 불었다(Choi and Choi, 2010). 이와 같이 강한 서풍으로 인해 중국에서 한반도로 유입된 황사가 빠르게 대관령을 거쳐 강릉시내로 유입된 후에 수송된 황사가 강릉시내의 약풍에 의해 강릉시내에 정체 되므로 10월 27일 18시에 PM농도가 최대로 높아졌다. 이때 퇴근 시간대이므로 도로 위의 많은 차량으로부터 많은 양의 매연, 가스 등 방출되어 PM의 농도가 더욱 높아질 수 있었다. 동시에 일몰 후의 기온 하강 및 취사로 인해 주거지역의 난방보일러의 가동으로 인한 가스 및 매연 량의 증가도 이 시간대의 PM농도 증가에 기여할 수 있었을 것이다. 18시 이후부터는 강풍대가 강릉 시내를 거쳐 동해로 이동하므로 강릉시내에 정체된 먼지도 강풍에 동반되어 동해로 이동하게 되어 강릉시내의 지표부근에서의 PM농도는 급격하게 감소하게 되었다.(그림 10, 11).

2) 황사입자의 역유적궤도

그림 6~9는 NOAA Hysplit 모델을 사용하여 지상 500m, 1000m, 3000m 고도에서 입자의 역유적궤도(Backward Trajectory)를 나타내며, 그림에서와 같이 황사가 고비사막으로부터 강릉으로 유입되는 과정을 알 수 있다. 지속적으로 강한 북서풍이 고비사막에서 중국 동북부 지역을 통과한 후 한반도 중부 지역을 거쳐 대관령에 도달하면서 더욱 강한 서풍으로 강화되었으며, 대관령을 사면을 따라 하강하면서 하강폭풍(Downslope wind storm)으로 강화되었다. 그림 6b에서 2003년 10월 27일 12시부터는 고비사막으로부터 강릉으로 3000m 고도에서 먼지의 수송이 있었으며, 10월 27일 18시(그림 7b)에는

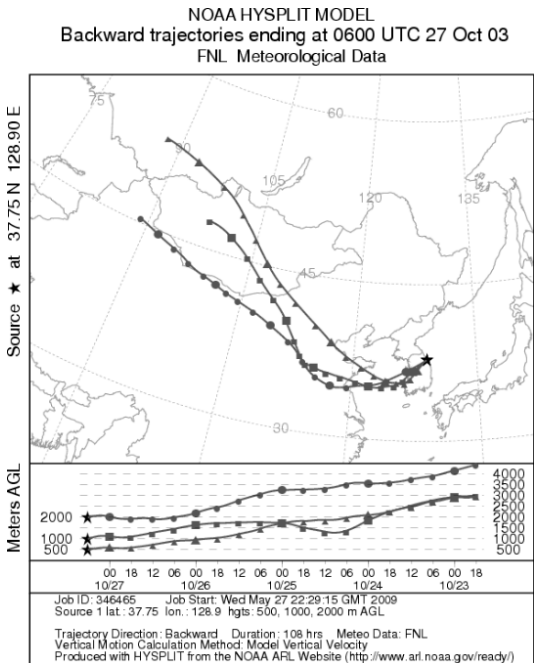


(a)

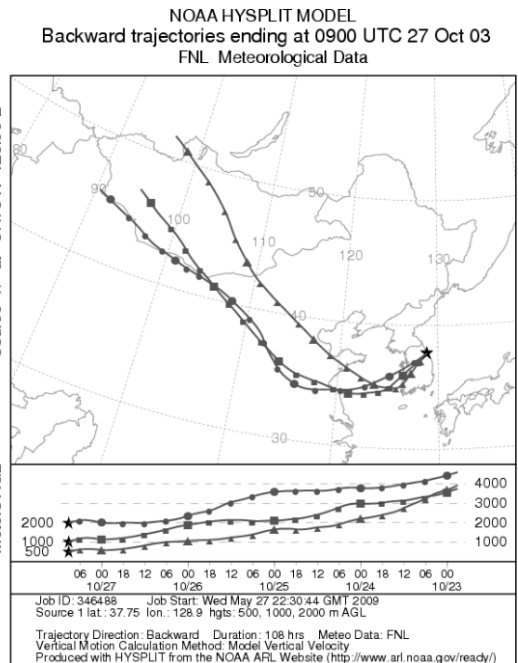


(b)

그림 6. 역유적궤도 종료시각-(a) 2003년 10월 27일 0000UTC(0900LST), (b) 0300UTC(1200LST)



(a)



(b)

그림 7. 역유적궤도 종료시각-(a) 2003년 10월 27일 0600UTC(1500LST), (b) 0900UTC(1800LST)

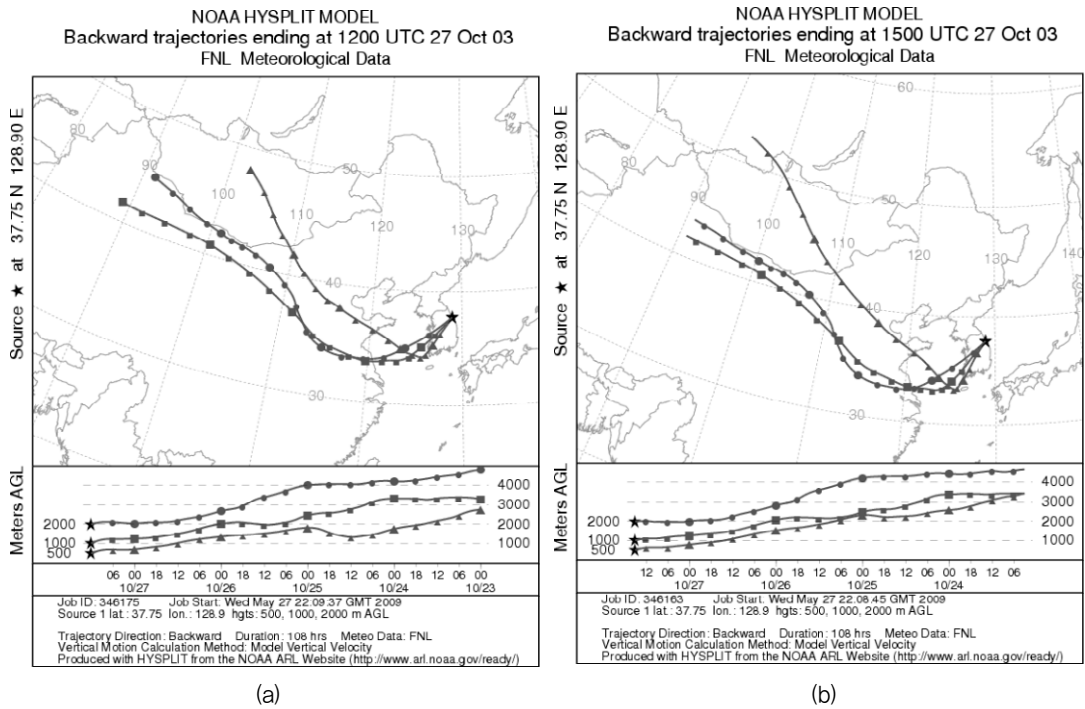


그림 8. 역유적궤도 종료시각-(a) 2003년 10월 27일 1200UTC(2100LST), (b) 1500UTC(10월 28일 0000LST).

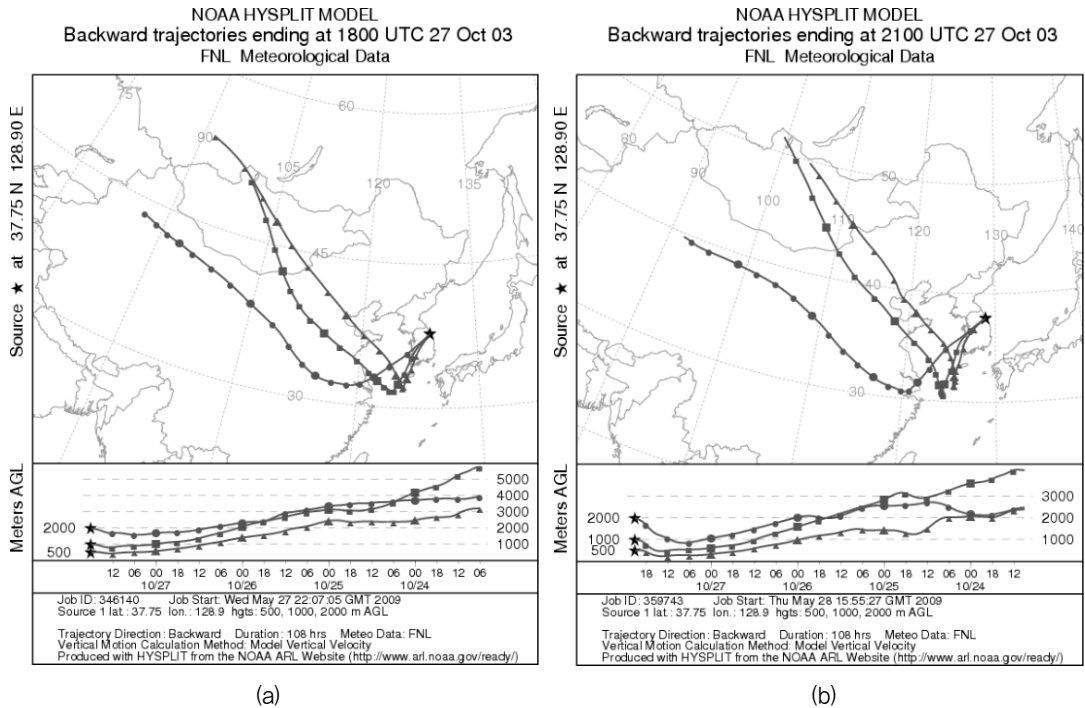


그림 9. 역유적궤도 종료시각-(a) 2003년 10월 27일 1800UTC(10월 28일 0300LST), (b) 2100UTC(10월 28일 0600LST).

3000m, 1000m 고도 모두에서 고비사막으로부터 강릉시내로 황사의 유입이 있음을 볼 수 있다. 이후 27일 21시와 28일 00시까지도 같은 양상을 나타냈다(그림 8).

그러나 28일 03시부터는 3000m 고도에서만 고비사막으로부터의 강릉으로 황사의 유입이 나타나며, 그 이하의 고도에서는 고비사막의 동쪽과 중국동북부지방에서 공기의 유입이 있어 이전의 시간대에 고비사막에서 발생한 황사가 이들 지역으로 확산된 후 부분적으로 2000m와 500m의 고도에서 강릉으로 황사먼지가 유입될 수 있으나 그 양은 적을 것으로 생각 된다. 28일 06시부터는 3000m, 2000m, 500m 고도 모두에서 고비사막으로부터 멀리 떨어진 지역에서 공기입자가 강릉으로 이동해 오므로 고비사막의 먼지가 강릉으로 유입되기는 어렵다(그림 9b).

따라서 실제 고비사막으로부터 강릉지역으로 황사의 유입은 3000m와 2000m 고도에서만 이루어졌고 유입되었던 시각은 10월 27일 03시에서 28일 05시까지였다. 특히 10월 27일 16시부터 28일 00시까지 집중적으로 고비사막으로부터 강릉시내로 황사의 유입이 있었으며, 이것은 그림 10에서 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 매 시각별 농도분포와도 매우 잘 일치한다.

3) 황사발생 전·후의 입자상물질(PM)의 매시각별 농도분포

그림 10은 강릉시에 위치한 강원기상청에서 2003년 10월 26일 00시~29일 16시까지 측정된 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 매 시각별 농도분포이다. 황사가 강릉시에 나타나기 전인 10월 26일 00시부터 10월 27일 09시까지는 PM₁₀의 농도가 14.51~69.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 분포를 전반적으로 낮게 나타내며, 출근시간대인 09시와 퇴근시간대인 18시에 고농도를 갖고, 18시에 최대농도로 나타났다. PM_{2.5}와 PM₁은 시간별 분포가 PM₁₀과 같은 시간대에 증감을 나타내며, 5.02~26.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 3.82~19.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 분포를 갖는다.

27일 09시부터 28일 04시까지의 황사의 유입에 의해 강릉시에서 PM₁₀의 농도가 48.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 27일 17시에 최대농도 154.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 변화하며, 평상시의 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외의 농도에 비해 3.8배로 높게 나타났다. PM_{2.5}의 농도는 26.92~93.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 변화폭을 나타내며, 최대 3.4배로 높게 나타났다. 출근 시간대인 09시에 농도가 높고, 퇴근시간대인 17시에 매우 높은 이유는 출, 퇴근 시간에 많은 차량이 운행되어 대기오염물질의 방출량이 높고, 도로로부터 먼지 발생이 높아 PM 농도가 높게 된다. 특히 퇴근시간 무렵에 주거지역에서 야간 난방보일러 사용으로 오전과는 달리 PM농도가 높을 수 있다.

동시에 야간에 지표 냉각으로 형성되는 야간접지역전층의 고도가 200m 정도로 매우 낮아져 PM의 농도가 높게 된다. 이것은 출근시간대인 09시 무렵에 농도가 높더라도 매우 높지 않은 이유는 차량이 운행되어 대기오염물질의 방출량이 높고, 도로로부터의 먼지 발생이 높아지더라도 낮에 지표 가열에 의한 지표부근의 공기가 가열되어 상승하여 생기는 대류경계층이 연직으로 확대되어 지표부근의 먼지 등의 오염물질이 동반 상승하므로 PM농도가 매우 높기가 어렵다(Choi and Choi, 2008; Choi *et al.*, 2010). 따라서 야간접지역전층이 형성되기 시작한 직후인 17시에 수송된 황사먼지가 얇은 대기경계층 내에서 높은 농도를 갖게 되고, 또한 퇴근시간대의 많은 차량과 보일러 가동으로 방출되는 많은 양의 오염물질

로 17시에 최대농도를 나타낼 수 있었을 것이다.

반면에 12시 무렵에는 대류경계층이 높게 발달하므로 지표부근의 대기오염물질이 대류경계층고도로 상승하므로 지표부근 PM농도는 낮게 된다. PM₁의 경우 6.93~76.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 변화폭을 보이며, 황사 전에 비해 3.8배의 큰 값을 보였다. 황사가 끝난 10월 28일 09시 이후에는 12시를 제외하고 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 농도가 각각 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 매우 낮았다. 전반적으로 출근시간대인 7~10시 사이에 높고, 황사가 최대로 영향을 준 27일 17시를 제외하고 일몰 후 3시간이 지나서 농도가 높았다.

그림 10은 10월 26~29일까지 PM₁₀과 PM_{2.5}, PM_{2.5}와 PM₁, PM₁₀과 PM₁의 차이를 나타내며, 황사가 관측되기 전인 26일 00시에서 27일 08시까지 PM₁₀-PM_{2.5}의 최대농도 차는 46.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, PM_{2.5}-PM₁과 PM₁₀-PM₁은 각각, 6.98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 51.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 황사가 관측되는 기간에는 27일 17시에 최대농도가 각각 61.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 17.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 78.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며 황사 전에 비해 큰 폭의 변화가 나타났다. 황사 전인 26일 00시~27일 08시까지 10 μm 이하~2.5 μm 이상의 입자들의 농도가 PM₁₀의 농도에 크게 영향을 주었으며, 황사기간에는 그 영향이 더욱더 크게 작용하였다. 황사 후인 28일 10시부터는 황사 전과 유사한 양상을 갖는다.

그림 12는 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁간의 상호 기여도를 파악하기 위해 $(\text{PM}_{10}-\text{PM}_{2.5})/\text{PM}_{2.5}$, $(\text{PM}_{2.5}-\text{PM}_1)/\text{PM}_1$ 와 $(\text{PM}_{10}-\text{PM}_1)/\text{PM}_1$ 을 계산하였다. $(\text{PM}_{10}-\text{PM}_{2.5})/\text{PM}_{2.5}$ 은 10 μm 와 2.5 μm 사이의 큰 먼지입자의 먼지량(즉 농도)과 2.5 μm 이하의 작은 먼지입자의 농도를 비교한 것으로 강릉시에 황사가 나타나기 전인 10월 27일 08시까지의 2.5 μm 이상의 큰 조대입자들이 2.5 μm 이하의 극미세입자들보다 PM₁₀의 농도에 0.75~7.12배로 큰 영향을 주었다. 그러나 황사가 강릉시로 유입된 10월 27일 09시~10월 28일 05까지는 0.60~1.25배로 2.5 μm 이하의 작은 극미세입자들이 2.5 μm 이상의 조대입자들보다 PM₁₀의 농도에 크게 기여하였다. 유사하게, $(\text{PM}_{2.5}-\text{PM}_1)/\text{PM}_1$ 는 2.5 μm 와 1 μm 사이의 극미세입자의 먼지량(즉 농도)과 1 μm 이하의 초극미세입자의 농도를 비교한 것으로 황사가 나타나기 전에는 1 μm 이상의 큰 극미세입자들이 1 μm 이하의 초극미세입자들보다 PM_{2.5}의 농도에 0.23~1.90배로 큰 영향을 주었다. 반면에 황사기간에는 반대로 0.21~0.37배로 나타나므로 1 μm 이하의 작은 초극미세입자들이 1 μm 이상의 극미세입자들보다 PM_{2.5}의 농도에 크게 기여함에 따라 황사기간에는 고비사막에서 수송된 먼지 중에 매우 작은 입자들이 강릉 지역의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도 증가에 크게 기여하였음을 알 수 있다. $(\text{PM}_{10}-\text{PM}_1)/\text{PM}_1$ 은 1 μm 이상의 큰 입자들과 1 μm 이하의 초극미세입자들의 농도가 PM₁₀의 구성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 황사 전에는 1.05~2.56, 황사기간에는 1.02~2.09로 황사의 유입과 관계없이 강릉지역의 PM₁₀의 농도에는 1 μm 이상의 큰 입자들이 작은 입자들보다 크게 기여함을 알 수 있다.

황사의 유입에 의해 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁이 모두 고농도를 나타낸 24일 18시부터 25일 11시에는 오히려 2.5 μm 이상의 큰 먼지입자들이 2.5 μm 이하의 작은 먼지입자들 농도보다 PM₁₀의 고농도 출현에 0.26~0.87로 작게 기여를 하였다. 황사가 중국으로부터 한반도로 유입되는 기간에는 한 반도의 측정지점에서 측정된 PM₁₀의 고농도 출현에 주로 2.5 μm 보다 큰 먼지입자가 다량으로 측정되는 일반적인 사례와 달리(Kim and Kim, 2003; Choi *et al.*, 2010), 10월 27일의 경우에는 PM₁₀의 고농도 출현에 2.5 μm

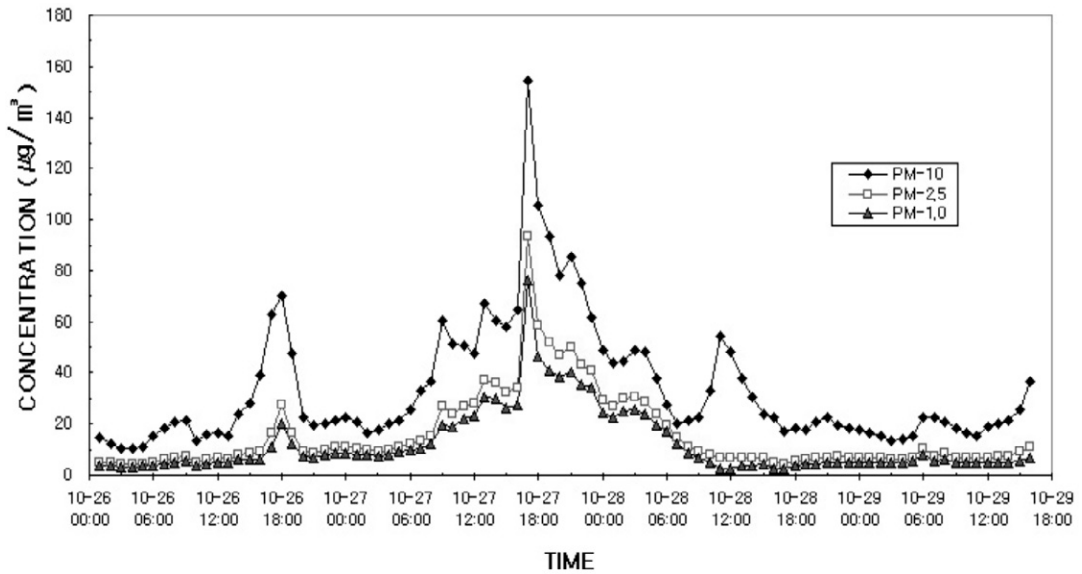


그림 10. 2003년 10월 26일~29일까지 강원기상청에서 측정된 매 시각별 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 분포

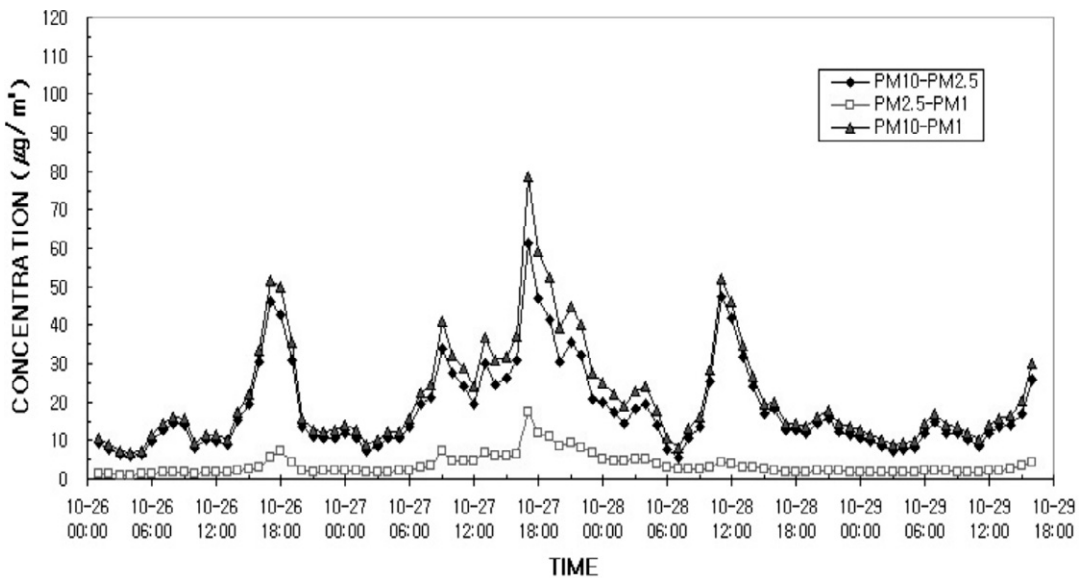


그림 11. 2003년 10월 26일~29일까지 강원기상청에서 측정된 매 시각별 PM₁₀-PM_{2.5}, PM_{2.5}-PM₁, (PM₁₀-PM₁) 농도차($\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 분포

이하의 입자들이 $2.5\mu\text{m}$ 이상의 큰 입자들 보다 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 전반적으로 09시와 18시에 큰 값의 농도가 나타났다.

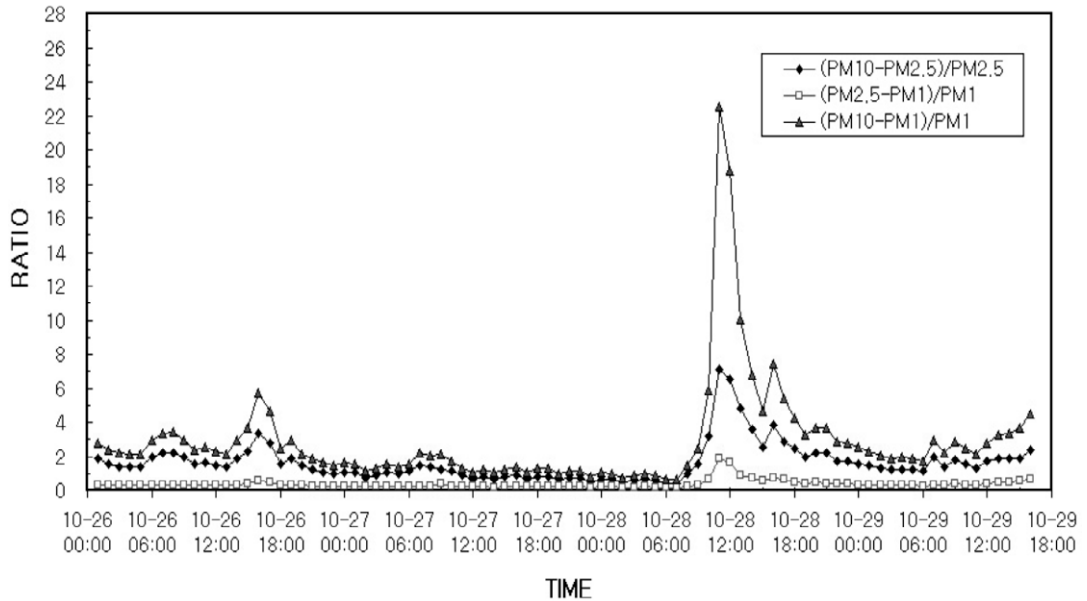


그림 12. 2003년 10월 26일~29일까지 강원기상청에서 측정된 매 시각별 (PM₁₀-PM_{2.5})/PM_{2.5}, (PM_{2.5}-PM₁)/PM₁, (PM₁₀-PM₁)/PM₁의 분포

4. 결론

고비사막이나 중국북부의 내몽고의 지역에서 황사가 발생한 후 한반도로 수송되어 강릉의 지역 대기 질에 크게 영향을 미치는 시기는 일반적으로 3월부터 5월까지로 알려져 왔으나 10월에도 황사의 유입에 의해 지역의 대기질이 악화되는 것을 파악하게 되었다. 황사가 고비사막으로부터 강릉시로 유입되기 전까지는 300nm~20 μ m 먼지입경을 15개 구간으로 나누어 측정된 농도를 다시 합산한 PM₁₀, PM_{2.5}와 PM₁의 농도가 20 μ g/m³ 이하로 매우 낮지만 황사가 유입된 이후부터는 PM₁₀의 농도의 범위가 48.20~154.57 μ g/m³로 평상시의 3.8배가 증가하였다. PM_{2.5}는 평상시의 10 μ g/m³ 내외의 농도보다 훨씬 초과된 26.92~93.19 μ g/m³의 농도를 갖고, 최대 3.4배가 되었다. 유사하게 PM₁의 평상시의 5 μ g/m³ 농도보다 높은 19.63~76.05 μ g/m³의 농도로 최대 14.1배로 증가하여, 중국으로부터 유입된 황사먼지가 지역의 먼지농도의 증가에 크게 기여하였다. 황사기간에는 유입되는 많은 양의 황사가 출근시간인 09시와 퇴근시간인 17시에 도로 위의 다량의 차량으로부터 방출되는 오염물질과 함께 PM의 고농도를 나타내며, 특히 17시에는 차량과 주거지역의 난방보일러의 가동으로 방출되는 오염물질과 더불어 야간접지역전송의 수축으로 최대농도가 나타났다. 강릉시에 황사의 영향이 나타나기 전에는 2.5 μ m 이상의 조대입자들이 2.5 μ m 이하의 극미세입자보다 PM₁₀의 농도에 큰 영향을 주었으나, 황사가 유입된 이후에는 2.5 μ m 이하의 극미세입자들이 PM₁₀의 고농도 출현에 크게 기여를 하였다. 황사기간에는 한반도에 PM농도에 2.5 μ m 이상의 조대입자가 크게 영향을 준다는 기존의 학설과는 반대의 결과였으며, 수송된 극미세먼지가 한반

도의 청정지역의 먼지농도에 크게 영향을 주므로 호흡기질환 등의 예방과 환자에관리에 주의를 요한다.

사사

본 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER2006-2308)- “산악연안에서 바람폭풍의 생성역학과 예측”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Choi, H., 2008, Comparison of PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in the mountainous coastal city, Gangneung before and after the Yellow Sand event in spring, *Journal of Environmental Sciences*, 17(6), 633-645.
- Choi, H. and Choi, D. S., 2008, Concentration of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ influenced by atmospheric circulation and atmospheric boundary layer in the Korean mountainous coast during duststorm period, *Atmospheric Research*, 89, 330-337.
- Choi, H. and Choi, S. M., 2010, Generation of windstorm in the eastern mountainous coast of Korea, *Disaster Advances*, 3(2), 24-34.
- Choi, H., Choi, D. S., and Choi, S. M., 2010, Meteorological condition and atmospheric boundary layer influenced upon temporal concentrations of PM₁, 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.
- Choi, H. Zhang, Y. H., and Takahashi, S., 2004, Recycling of suspended particulates by the interaction of sea-land breeze circulation and complex coastal terrain, *Meteorology & Atmospheric Physics*, 87, 109-120.
- Choi, S. W. and Song, H. D., 1999, Variation of concentration of heavy metal during Yellow sand period of winter season at Taegu area, *Bulletin of Environmental Sciences*, 4(11), 1-13.
- Chon, H., 1994, Historical records of yellow sand observations in China, *Research & Environmental Sciences*, 7-6, 1-11.
- Chun, Y. S., Kim, J. Y., Choi, J. C., Boo, K. O., Oh, S. N., and Lee, M. H., 2001, Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 2715-2721.
- Chung, Y. S. and Yoon, M. B., 1996, On the occurrence of yellow sand and atmospheric loadings, *Atmospheric Environment*, 30, 2387-2397.

- Chung, Y. S., Kim, H. S., Jugder, D., Natsagdorj, L., and Chen, S. J. 2003, On sand and duststorms and associated significant dustfall observed in Chongju-Chongwon, Korea. *Water, Air, and Soil Pollution: Focuss*, 3, 5-19.
- 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 Sciences*, 37, 305-316.
- Duce, R. A., Unni, C. K., Ray, B. J., Prospero, J. M., and Merrill, J. T., 1980, Long-range transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: temporal variability, *Science*, 209, 1522-1524.
- 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.
- Gao, Y. and Anderson, J. R., 2001, Characteristics of Chinese aerosols determined by individual particle analysis, *Journal of Geophysical Research*, 106 (D16), 18037-18045.
- Huang, M. and Wang, Z., 1998, A model for long-range transport of yellow sand in East Asia, *Atmosphere. Sinica*, 22, 625-637.
- Jigjidsuren, S. and Oyuntsetseg, S., 1998: Pasture land utilization problems and ecosystem. Ecological sustainable development. *Ulaanbaatar*, 2, 206-212.
- 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.
- Lin, T. H., 2001, Long-range transport of yellow sand to Taiwan in spring 2000: Observed evidence and simulation, *Atmospheric Environment*. 35, 5873-5882.
- McKendry, I. G., Hacker, J. P., Stull, R. Sakiyama, S., Mignacca, D., and Reid, K., 2001, Long-range transport of Asian dust to the lower Fraser Valley, British Columbia, Canada, *Journal of Geophysical Research*, 106 (D16), 18361-18370.
- Middleton, N. J., 1986, A geography of dust storms in southwest Asia, *Journal of Climate*, 6, 183-196.
- Natsagdorj, L., 1992, Strong wind frequency around the Bulgan Soum of Umnigobi Aimag. Publication of Hydro-Meteor, Research Institute of Mongolia, *Ulaanbaatar*, 7, 74-80.
- Phadnis, M. J. and Carmichael, G. R., 2000, Numerical investigation of the influence of mineral dust on the tropospheric chemistry of East Asia, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 36, 285-323.
- Wang, Z., Ueda, H., and Huang, M., 2000, A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia, *Journal of Geophysical Research*, 26, 947-956.
- Westphal, D., Toon, O. B., and Carson, T. N., 1987, A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms, *Journal of Geophysical Research*, 92, 3027-3049.
- Xuan, J. and Sokolik, I. N., 2002, Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China, *Atmospheric Environment*, 36, 4863-4876.
- Yamamoto, K., Aoyama, M., Ito, K., Kasahara, M., Kitada, T., and Kurata, G., 2003, Development of long range transport model for mineral dust in east Asia, *Proceedings of ASSQ conference*, March, Tsukuba, Japan.
- Zhang, Y. and Zhong, Y., 1985, The simulation and diagnosis for a strong wind associated with northeast low, *Acta Meteorology. Sinica*, 43, 97-105.