

# 겨울 황사기간 중 한국, 강릉시의 시간별 가스상 오염물질 농도의 변화 특성 -2005년 2월 14~16일 사례-

최효

강릉원주대학교 대기환경과학과

(2011년 1월 1일 접수, 2011년 1월 7일 수정, 2011년 1월 10일 수락)

## Characteristics of Hourly Variation of Gaseous Pollutant Concentration at Gangneung, Korea for Yellow Sand Event Period in Winter - Case Study of February 14~16, 2005 -

Hyo Choi

Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University

(Received 1 January 2011, Revised 7 January 2011, Accepted 10 January 2011)

**요약** : 겨울철 중국 북부의 황사가 강릉시로 유입되는 2005년 2월 14~16일까지 에어로졸분석기와 복합공기 수신실험기를 사용하여 매 시각별 가스상 물질(CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub>)의 농도와 입자상 물질의 농도(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>)와의 관계를 조사하였다. PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>의 농도가 증가할 때 CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub> 농도가 증가하였다. 2월 14일 20시에 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>의 최대농도가 133.24 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 53.49 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 43.48 $\mu$ g/m<sup>3</sup>로 나타났으며, CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub>의 최대농도도 각각 14,000ppb, 122ppb, 64ppb로 나타났다. 15일 01시에 또 하나의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>의 최대농도가 86.88 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 45.56 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 36.70 $\mu$ g/m<sup>3</sup>로 나타났을 때, CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub>의 최대농도가 각각 15,000ppb, 119ppb, 52ppb로 나타났다. 따라서 가스상물질인 CO, NO<sub>x</sub>가 응축과정을 통해 입자상물질로 전환되어 PM의 농도의 증가에 큰 기여를 하였다. 낮에는 중국에서 유입된 황사 및 가스와 지역에서 방출된 대기오염물질이 결합되어 동풍의 해·곡풍에 의해 대관령의 동쪽 사면의 열적내부경계층 내를 통해 대관령 정상으로 이동하므로 PM과 가스농도가 낮았다. 그러나 야간에 수송된 오염물질들이 하강경사풍에 의해 대관령에서 강릉으로 이동하여 지역의 차량, 난방보일러의 배기가스와 도로의 비산먼지와 결합되고, 동풍의 해상풍에 의해 시내의 야간접지역전층 내에 갇히게 되어 PM과 가스농도가 매우 높게 나타났다.

**주요어** : PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub>, 해·곡풍, 대류경계층, 열적내부경계층, 중력풍, 육풍, 해양대기 경계층, 야간접지역전층

**Abstract** : Using both Aerosol Sampler and Multi-Air Monitoring Laboratory System, the relationship of hourly variations of gas (CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub>) and particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub>) concentrations were investigated on February 14~15, 2005, under the transportation of yellow sand from the northern China toward Gangneung city. When PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> concentrations increased, gaseous (CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub>) concentrations also increased and vice versa. At 2000LST, February 14, maximum concentrations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> occurred with 133.24 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 53.49 $\mu$ g/m<sup>3</sup> and 43.48 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, and maximum ones of CO, NO<sub>x</sub> and O<sub>x</sub> were 14,000ppb, 122ppb and 64ppb, respectively.

When another maximum concentrations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>1</sub> occurred at 0100LST, February 15 with 86.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 45.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 36.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , those of CO, NO<sub>x</sub> and O<sub>x</sub> concentrations were 15,000ppb, 119ppb and 52ppb, respectively. Thus, particulate matters transferred by the condensation processes of gaseous might make a great contribution of the increase of PM concentrations. During the day, as the transported yellow dusts and gases from China combined with locally emitted ones could move toward the top of Mt. Taegulyang inside thermal internal boundary layer of its eastern slope by easterly sea-valley wind, PM and gases concentrations were low at the city. However, at night, as the transported pollutants moved toward Gangneung city under a downslope wind and combined with locally emitted pollutants from vehicles and heating boilers and flying dusts from the road, they were accumulated and trapped inside nocturnal surface inversion layer at the city by easterly marine wind, resulting in high concentrations of PM and gaseous.

**Key Words** : PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub>, sea-valley wind, thermal internal boundary layer, downslope wind, nocturnal surface inversion layer

## 1. 서론

3~5월과 10~12월 사이에 한반도의 대기질에 직접적인 영향을 미치는 황사는 중국의 서북쪽에 위치한 타클라마칸사막, 몽고의 고비사막, 오도로스사막, 로에스 몽골고원, 중국의 북서부 내몽고의 황토고원에서 발생하여 중국 전역과, 한국, 일본을 거쳐 미국 동부 해안까지 그 영향을 주고 있다(Duce *et al.*, 1980; Natsagdorj, 1992; Chon, 1994; Chung and Yoon, 1996; Huang and Wang, 1998; Fei and Qing, 1998; Wang *et al.*, 2000; Lin, 2001; McKendry *et al.*, 2001; Chung *et al.*, 2001; 2003). 몽고의 고비사막이나 중국의 내몽고지역에서 발생하는 황사의 경우에는 높은 산이 있는 고원지역의 사막이나 고원의 건조지역에서 지표부근의 습도가 40% 이하, 풍속이 8~10m/s로 강한 바람이 불 때 발생하지만(Middleton, 1986; Westphal *et al.*, 1987; Choi and Zhang, 2008; Choi *et al.*, 2008), 대부분 평지로 구성되어 있는 아프리카와 오스트레일리아의 사막의 경우 풍속 5m/s 내외의 바람에도 대량의 황사가 발생한다(Yamamoto *et al.*, 2003).

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). 고비사막과 중국 북서부에서 발생한 황사의 수송로에 위치한 중국과 인접국가의 먼지농도는 황사 전에 비해 4배에서 11배 이상으로 높아지고, 대기질의 구성성분에도 영향을 크게 미친다(Chun *et al.*, 2001; Gao and Anderson, 2001; Xuan and Sokolik, 2002; Choi and Choi, 2010).

황사의 미세먼지인 2.5 $\mu\text{m}$  이하의 극미세먼지와 1 $\mu\text{m}$  이하의 초극미세먼지의 눈, 코, 목 등의 점막을 통과하여 폐까지 도달하게 되어 심각한 호흡기 질환을 일으키며(Chung *et al.*, 2003), 다량의 먼지가 식물의 잎에 침착되어 탄소동화작용과 호흡장애를 일으켜 식물을 고사시키거나 또한 황사에 내재된 병원균이 황사와 함께 수송되어 동물의 전염병을 일으켜, 구제역과 같은 심대한 병해를 일으킨다(Jigjidsuren

and Oyuntsetseg, 1998; Choi and Song, 1999).

최근 20년 동안 주로 황사의 발생원인 및 황사의 수송에 대한 연구와 먼지와 수반되는 중금속과 이온 분석은 많이 진행되어 왔다(Phadnis and Carmichael, 2000; Kim and Kim, 2003). 최근에는 미세먼지가 단순히 입자상물질인 먼지입자로만 구성된 것이 아니라 가스상물질의 응축과정을 통해 극미세입자로 전이되며, 극미세입자의 농도의 증가는 미세먼지의 증가로 이어진다고 알려 지고 있다(Nagendra and Khare, 2003; Corsmeier *et al.*, 2006). 황사의 유입이 있을 때에 한반도 지역에서의 먼지농도( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ 와  $PM_{1}$ )와 가스농도( $CO$ ,  $NO_x$ ,  $O_3$ )와의 관계에 대한 연구가 국내에서는 매우 미미하였다(Choi and Speer, 2007). 본 연구에서는 강릉시에 고농도의 미세먼지가 나타날 때 가스상 물질인  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $O_3$ 의 농도와 어떤 관계가 있는가를 파악하기 위해 매 시각별 입자상물질과 가스상물질의 농도를 비교분석하였으며, 강릉연안에서의 미세먼지와 가스상물질의 고농도의 원인을 규명하고자 하였다.

## 2. 연구지역 및 분석방법

### 1) 연구지역의 지형

연구기간 중 황사가 발원했던 지역은 고비사막과 내몽고(그림 1a의 원 N)이었으며, 황사 먼지의 측정 지역인 강릉시는 해발 고도 25m 내외의 분지로 구성되어 있으며, 서쪽으로는 500~1,500m 고도의 태백

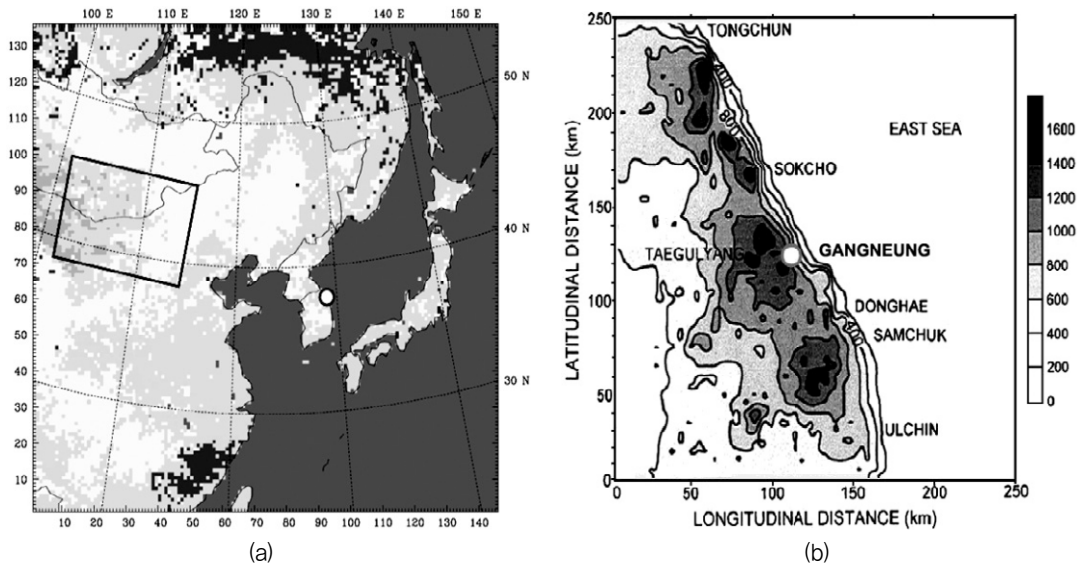


그림 1. 중국의 북부지역의 토지이용도 (Land-Use Chart; 네모상자-황사발원지, 원-강릉시)와 한국 동해안의 강릉시 부근(해발 고도 20m, 폭 10km)의 2차원 지형도

산맥이 남북으로 연안을 따라 위치하고, 동쪽으로는 동해를 끼고 있다(그림 1). 강릉시의 서쪽에는 865m의 대관령이 위치하고, 동쪽 해안을 따라 남쪽에서 북상해 오는 동한난류(East Korea Warm Current)와 북한연안을 따라 남하해 오는 북한한류(North Korea Cold Current)의 영향으로 분지인 강릉시는 대륙성과 해양성기후를 동시에 갖는 기후대를 형성하며, 여름에는 같은 위도 상의 내륙도시보다 기온이 낮고, 겨울에는 오히려 기온이 더 높다.

## 2) 측정자료 및 분석방법

독일 GRIMM회사 제품의 먼지측정기 모델1107를 강원기상청(37.75°N, 128.90°E)에서 설치하여 2005년 2월 14일~16일에 입자상물질인 먼지농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 300nm~20 $\mu\text{m}$ 까지의 먼지를 15개 먼지입자의 크기에 따라 구분하여 레이저빔으로 입자의 개수를 산출하여 농도를 측정하였으며, 이를 다시 10 $\mu\text{m}$  이하의 총 먼지량인 PM<sub>10</sub>, 2.5 $\mu\text{m}$  이하의 총 먼지량인 PM<sub>2.5</sub>과 1 $\mu\text{m}$  이하의 총 먼지량인 PM<sub>1</sub>의 매 시간별 농도분포를 조사하였다. 또한 중국으로부터 수송된 황사먼지가 지역의 먼지농도인 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>에 미치는 영향을 분석하였다.

동시에 같은 기간에 강원기상청 인접 지역인 강릉시 옥천동의 병원 옥상(약 4m 고도)에 강원도보건환경연구원에 의해 설치된 프랑스 Environment S. A.사의 복합공기수신실험기(Multi-Air Monitoring Laboratory System)를 사용하여 NO<sub>x</sub>(측정모델 AC31M), CO(측정모델 CO11M), O<sub>3</sub>(측정모델 O341M)의 매 시간별 농도를 측정하였다. 황사기간 중에 지역에서 측정된 가스상물질인 CO, NO<sub>x</sub>(NO<sub>2</sub>+NO)와 O<sub>x</sub>(NO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>)의 시간별 농도를 분석하여, 황사기간 중에 중국에서 수송된 가스상물질과 입자상물질이 지역의 입자상 및 가스상물질의 농도에 어느 정도의 영향을 미치는 가를 나타내고자 하였다. 그리고 황사기간 중 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>의 시간별 분포와 CO, NO<sub>x</sub>(NO<sub>2</sub>+NO)와 O<sub>x</sub>(NO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>)의 시간별 분포를 상호 비교하여 가스상물질의 증가가 입자상물질농도의 증가에 기여하는 정도를 파악하고자 하였다.

NO<sub>x</sub>의 측정방법은 화학발광법으로 NO와 O<sub>3</sub>가 반응하여 NO<sub>2</sub>가 생성될 때 빛이 방출되며 이 빛을 측정함으로써 NO의 농도를 측정하였고, NO<sub>2</sub>는 O<sub>3</sub>와 직접 반응하지 않으므로 Converter에서 NO로 환원시켜 기존의 NO와 함께 NO<sub>x</sub>로 측정한 후 NO값을 감하여 NO<sub>2</sub> 농도를 구하였다. CO의 측정방법은 비분산 적외선 분석법으로, 1차 광원에서 방사된 적외선은 Chopper에 의해서 일정한 주기로 시료 Cell과 기준 Cell에 들어가며, 적외선이 시료 Cell을 통과할 때 시료가스 중 함유되어 있는 측정성분에 의해 적외선이 흡수되거나 불활성으로 봉인된 기준 Cell에는 적외선이 흡수되지 않는 상태로 통과된다. 따라서 검출기에 유입되는 적외선의 양에는 미세한 차이가 생기며 이 에너지 차로 인해 CO 농도를 측정하였다. O<sub>3</sub>의 측정방법은 자외선광도법이며, 오존은 253.7nm 부근에서 자외선을 흡수하므로 시료 cell을 이용 흡광도를 측정하여 시료가스 중의 오존농도를 측정하였다. O<sub>x</sub>는 어떤 지역에서 산소의 수용량을 나타내므로 황사기간과 비 황사기간에 강릉지역의 산소수용량의 변화를 파악하는데는 O<sub>3</sub> 보다 O<sub>x</sub> 자료를 사용하여 그 변화 양상을 파악하고자 하였다.

본 연구에서 중국으로부터 강릉시로의 황사의 수송을 수평 및 연직으로 파악하기 위해 GOES 위성에 의한 황사의 분포사진, NOAA의 Hysplit single particle model에 의한 입자의 역유적궤도, WRF-3.0 모델에 의한 850hpa(약 1.5km) 고도에서의 유선도를 사용하였다. 잠재와도가 등온위선 상을 따라 공기의 집중과 와해를 나타낼 수 있으므로(Haynes and McIntyre, 1987), WRF-3.0 모델에 의해 재현된 잠재와도의 분포를 나타내는 그림 10b에서 강릉지역의 지표면 부근에 방향이 상이한 2개의 바람에 의해 포위된 공기의 집중(검은 부분)은 그림 9에서 이 시각 무렵의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>의 최대농도와 매우 잘 일치하였다. 중국지역과 강릉지역의 대기오염물질의 방출양에 대한 자료가 전무하므로 대기오염확산모델을 사용할 수 없었으며, 강릉지역에는 라이다측정기가 설치되어 있지 않으므로 이 자료도 사용할 수 없었다.

### 3. 연구결과

#### 1) 황사 전·후의 황사입자의 위성사진, 역유적궤도 및 유선도

그림 2는 2005년 2월 13일 1500 LST와 2월 14일 1500 LST에 GOES 위성에 의해 관측된 황사의 분포를 나타낸다. 2월 13일에는 황사가 고비사막의 밑에 위치한 내몽고지역에서 발원하여 황사가 부분적으로 한반도를 거쳐 동해와 일본 홋카이도와 혼슈지역에 나타내고 있으며, 2월 14일에는 구름에 의해 황

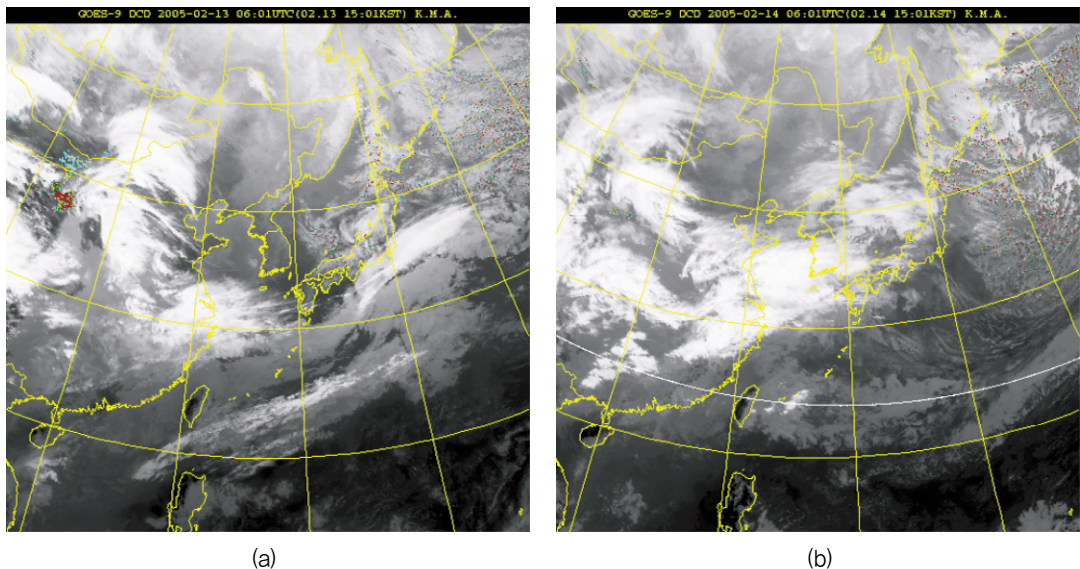


그림 2. GOES 위성에 의한 황사의 공간분포 - (a) 2005년 2월 13일 1500 LST, (b) 2005년 2월 14일 1500 LST. 그림(a)의 고비사막 아래와 동해 및 일본열도에 황사의 분포

사의 분포가 잘 나타나지 않지만, 일본열도의 동쪽 태평양에 황사의 분포가 나타나므로 한반도를 거쳐 황사가 수송되었을 것으로 생각된다. 구름에 의해 황사의 분포가 잘 나타나지 않으므로 NOAA의 Hysplit single particle model에 의한 입자의 역유적궤도를 그려서 황사의 수송관계를 파악하였다(그림 3, 4, 5, 6).

그림 3~6는 황사의 발원지(그림 2b의 사각형)로부터 강릉으로 황사가 유입되기 직전인 2월 14일 03시부터 황사의 영향에서 벗어난 시간인 15일 21시까지 NOAA Hysplit Trajectory 모델을 사용하여 지상 500m, 2,000m, 3,000m 고도에서 입자의 역유적궤도(Particle Backward Trajectory)를 나타낸다. 그림에서와 같이 황사의 발원지인 고비사막과 몽골의 동쪽에 위치한 내몽고로부터 황사가 강릉으로 유입되는 과정을 알 수 있다. 고비사막과 내몽고의 지표고도가 일반적으로 1km 이상으로 높고, 강릉의 서쪽에 위치하여 남북으로 뻗어 있는 태백산맥의 고도가 500~1,500m이므로 강릉으로 유입되는 황사가 어떤 고도에서 주로 유입되어 강릉의 대기질에 영향을 주는 기를 파악하기 위해 500m, 2,000m, 3,000m로 구분하여 입자의 역유적궤도를 추적하였다.

황사의 영향이 비교적 약하게 나타난 시각(황사 전)인 2월 14일 03시에는 황사가 발원지의 지표에서 바람에 의해 상승한 후 2,000m 고도의 상공에 있던 황사가 중국 동북부 지역인 북경과 천진을 통과한 후 강릉의 500m 상공으로 유입되어 강릉에서 평상시의 지표면 부근의 PM 농도인  $40\mu\text{m}$ 보다 약  $20\mu\text{m}$  높게 PM 농도의 증가에 기여하였다(그림 3). 그러나 황사발원지의 4,000m 고도에서의 황사는 2,000m 고도로 낮게 이동하면서 황해에서 장시간 머문 후에 강릉으로 유입되므로 이 고도에서 황사 수송이 강릉지역의 PM 농도 증가에 미치는 영향은 작다. 또한 황사의 발원지가 아닌 중국의 남부의 저고도에서 강릉의 3,000m 고도로 유입된 공기는 황사가 포함되지 않은 일반적인 공기이므로 강릉시의 PM 농도의 증가에 기여할 수 없었다.

14일 09시부터는 강릉의 3,000m, 2,000m, 500m 고도 모두에서 내몽고의 유사한 고도로부터 강릉시 내로 황사의 유입이 있음을 볼 수 있다(그림 3b). 그림 7a의 850hPa 고도(약 1.5km)의 공기의 유선도에서 보는 바와 같이 부분적으로는 황사의 유입이 내몽고로부터 있으나 동시에 중국의 남부로부터 비교적 깨끗한 공기가 강릉시로 유입되어 강릉시의 PM 농도가 높지 않았다. 15시와 21시에서는 황사가 내몽고로부터 강릉시의 3,000m와 2,000m 고도로 유입이 있었고, 500m 고도의 황사는 고비사막으로부터 강릉으로 유입되고 있음을 알 수 있다(그림 4). 이는 15시 이전의 시간대에서는 황사가 내몽고로부터 강릉으로 유입이 있었지만, 이후 시간에서는 내몽고와 고비사막 두 지역으로부터 다량의 황사유입이 있게 되어 강릉시의 PM 농도가 20시에 최대치를 갖게 되었다. 그림 7b에서와 같이 850hPa 고도의 유선도로 부터 황사가 내몽고에서 강릉시로 1,500m 고도로 유입되는 것을 알 수 있다.

그림 4b, 5a, 5b에서 14일 21시 이후부터 15일 09시까지는 황사의 발원지로부터 멀리 떨어진 중국의 남부로부터 저층의 공기가 강릉시의 3,000m 고도로 이동해 오므로 내몽고나 고비사막의 먼지가 강릉으로 유입되기는 어렵다. 내몽고의 상층으로 부상되었던 황사가 강릉시의 2,000m 고도로 유입되었지만 황해에서 12시간 이상 체류하게 되어 많은 양의 황사먼지가 해상으로 낙하되므로 부분적으로 유입된 황

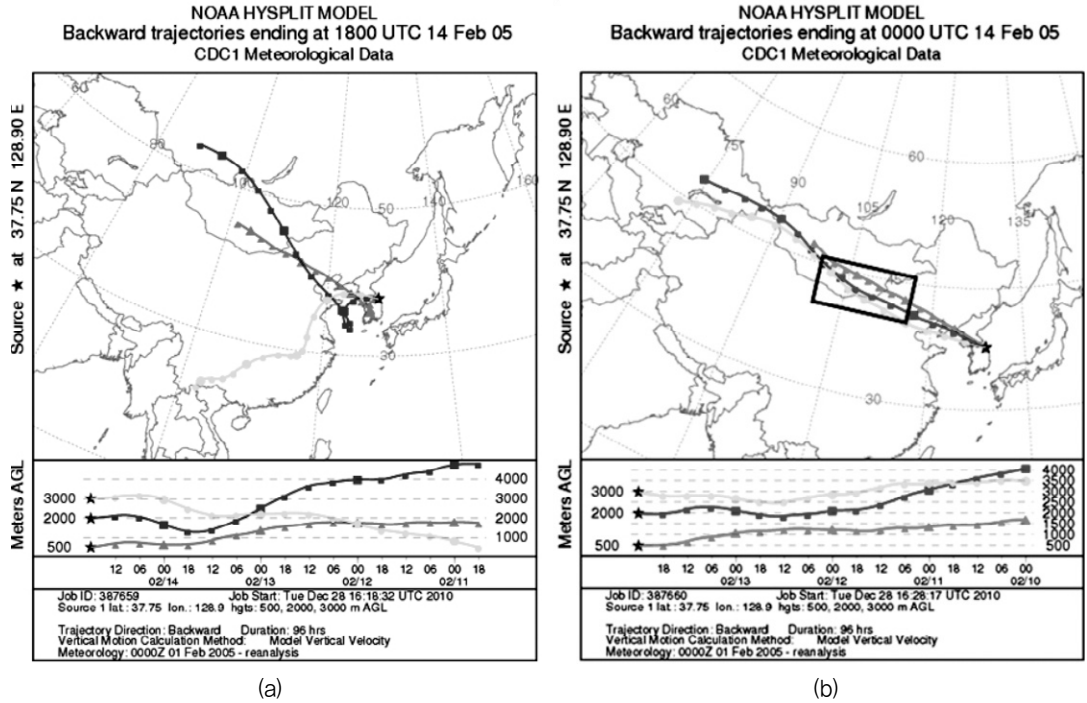


그림 3. 역유적궤도 종료시각 - (a) 2005년 2월 14일 0300 LST, (b) 0900 LST

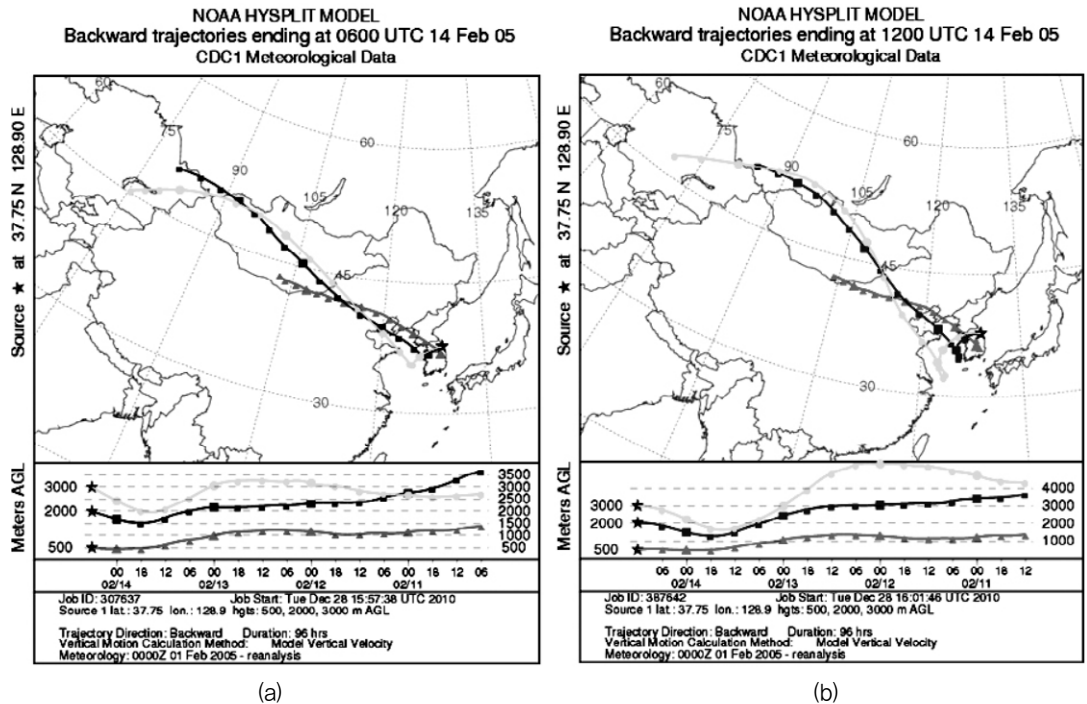


그림 4. 역유적궤도 종료시각 - (a) 2005년 2월 14일 1500 LST, (b) 2100 LST

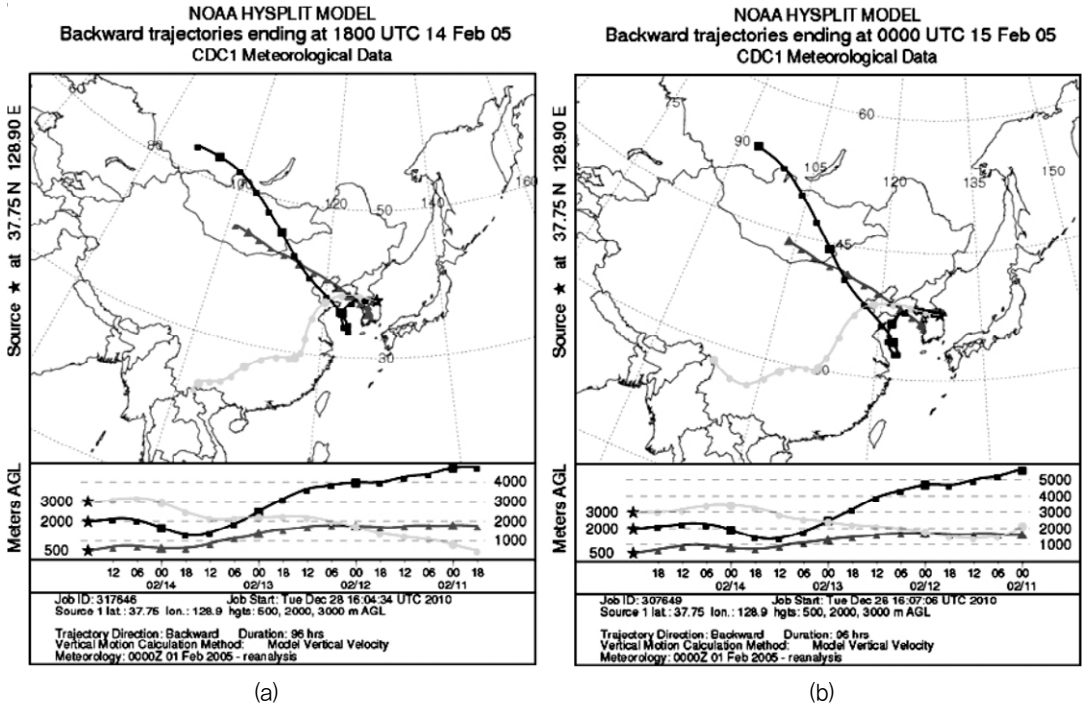


그림 5. 역유적궤도 종료시각 - (a) 2005년 2월 15일 0300 LST, (b) 0900 LST

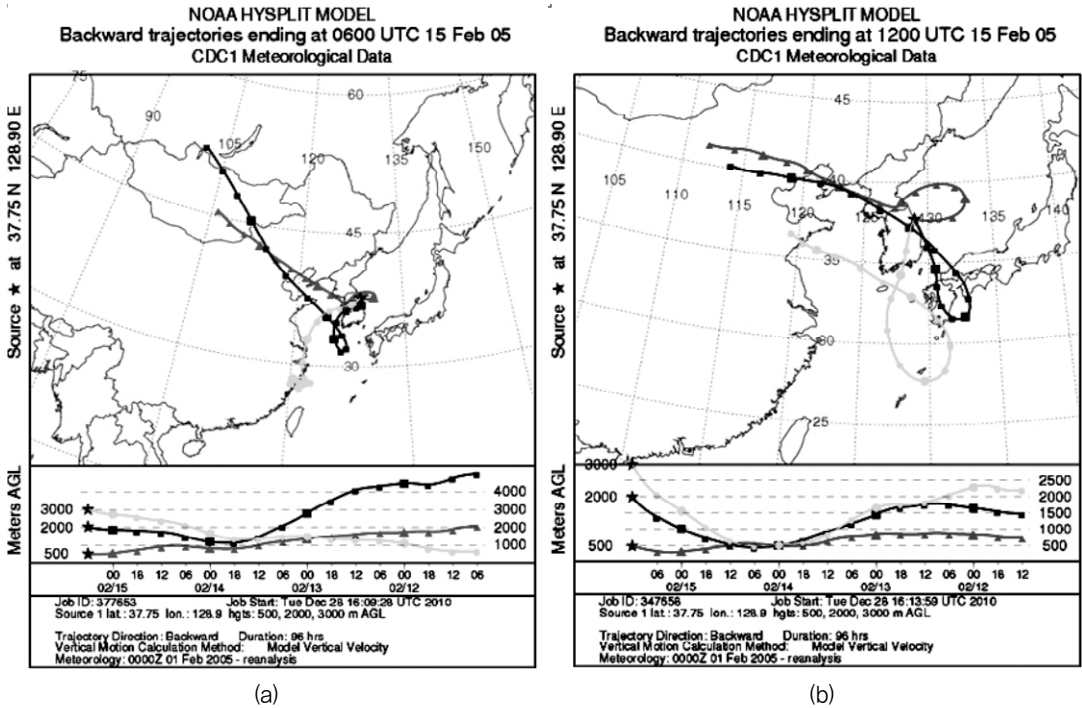
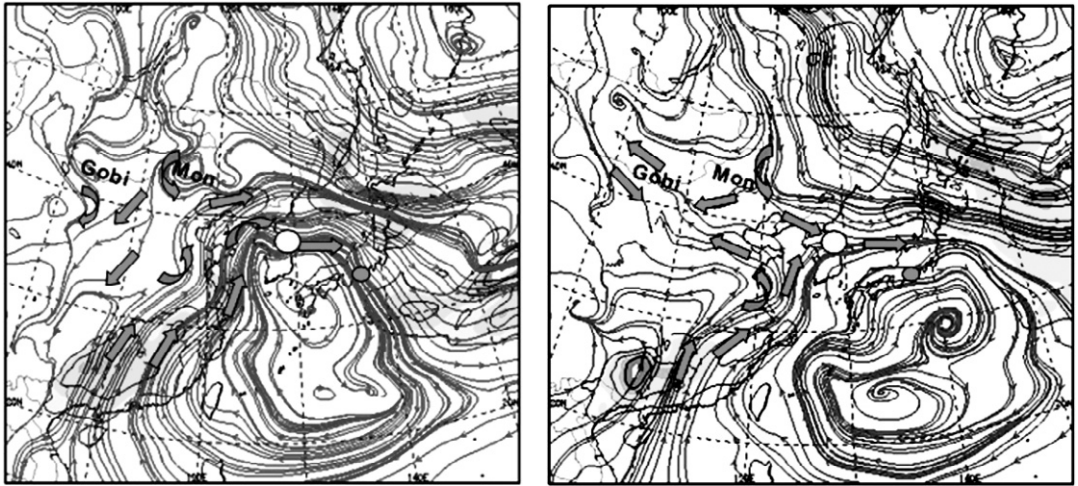


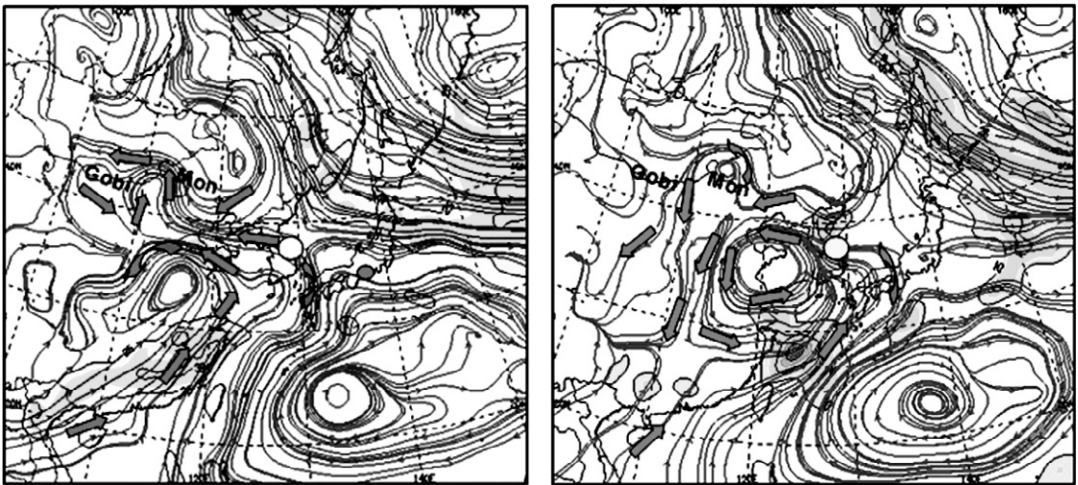
그림 6. 역유적궤도 종료시각 - (a) 2005년 2월 15일 1500 LST, (b) 2100 LST





(a) (b)

그림 7. 유선도 - (a) 2005년 2월 14일 0900 LST, (b) 2100 LST



(a) (b)

그림 8. 유선도 - (a) 2005년 2월 15일 0900 LST, (b) 2100 LST

사가 강릉시의 PM 농도 증가에 기여하기가 어렵다 (그림 5, 8). 반면에 500m 고도에서는 고비사막과 내몽고로부터 황해를 거쳐 우리나라 남서부 지역을 거쳐 강릉으로 유입되고 있어 황사의 직접적인 유입에 비해 강릉으로의 유입량은 적다.

15일 15시에는 3,000m 고도의 경우 중국의 남동 연안 해역에서 공기의 유입이 있으며, 2,000m 고도에서도 내몽고를 거쳐 황해로 유입된 후 우리나라 남서해안에서 1일 이상 머문 후에 강릉으로 유입되므로 황사의 수송을 기대하기 어렵다 (그림 6a). 500m 고도에서도 황사가 한반도 중부로 유입된 후 동해로

진입하고, 다시 강릉으로 유입되므로 다량의 황사 유입이 적었다. 이와 같은 공기의 순환은 그림 8a의 850hPa 고도에서의 유선도에서 잘 나타나고 있다. 15일 21시에 3,000m, 2,000m와 5,00m 고도로 유입 되는 공기는 모두 황해, 남해, 동해 해역을 각각 경유하므로 대부분의 황사가 해상에 낙하하고, 강릉으로 수송이 어렵기 때문에, 강릉의 PM 농도가  $25\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하로 감소하였다(그림 6b, 8b).

따라서 실제 내몽고와 고비사막으로부터 강릉지역으로 황사의 유입은 2월 14일 09시부터 15일 03시 이전까지였다. 특히 2월 14일 09시부터 15일 01시까지 집중적으로 내몽고와 고비사막으로부터 강릉시 내로 황사의 유입이 있었으며, 잠재와도에 의한 공기의 집중과 와해를 나타내는 잠재와도의 분포를 나타내는 그림 10b에서 강릉지역의 지표면 부근에 다른 2개의 바람에 의해 포위된 공기의 집중은(검은 부분)은 그림 9에서 이 시각 무렵의  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_1$ 의 최대농도와 매우 잘 일치한다(Haynes and McIntyre, 1987).

## 2) 황사발생 전·후의 입자상물질(PM)의 매시각별 농도분포와 대기경계층과의 관계

그림 9는 2005년 2월 14일 00시에서 16일 00시까지 강릉시에 위치한 강원기상청의 1.5m 높이의 백엽 상 내에 설치된 GRIM-1107모델의 먼지측정기로 측정된  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_1$ 의 매 시각별 농도분포이다. 오염물질을 배출하는 산업체가 거의 없는 청정도시인 강릉시의  $\text{PM}_{10}$  농도는 일반적으로  $40\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하로 낮다. 관측기간 중  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_1$ 의 농도 범위는  $24.48\sim 133.24\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $19.37\sim 53.49\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $13.80\sim 43.48\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 황사가 유입되기 전과, 황사기간 중, 황사의 영향이 소멸된 후 농도의 변화 폭이 매우

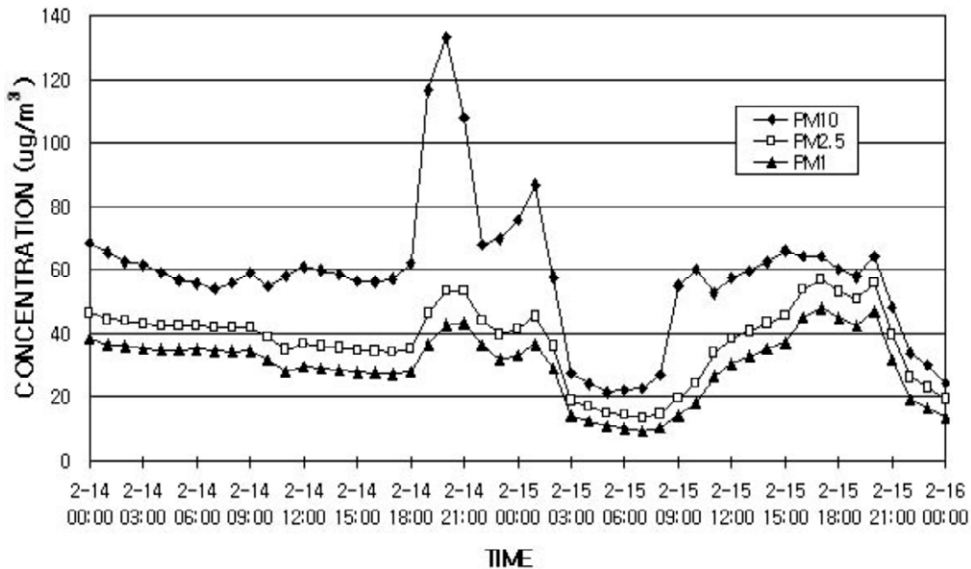


그림 9. 2005년 2월 14일~16일까지 강원기상청에서 측정된 매 시각별  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_1$  농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 분포

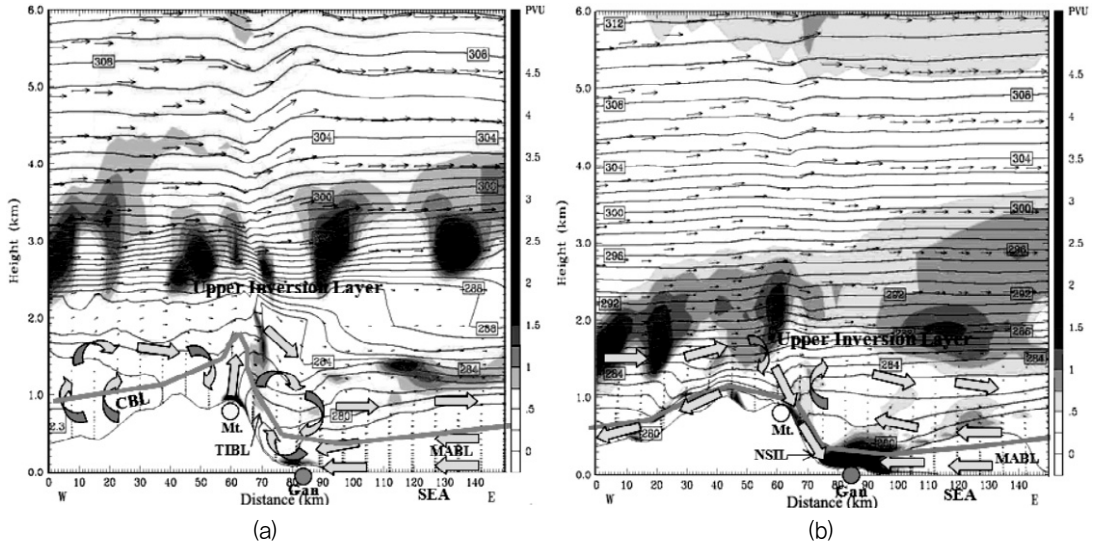


그림 10. WRF-3.0모델에 의해 재현된 연직잠재온도-풍속-잠재와도분포 - (a) 2005년 2월 14일 1500 LST, (b) 2100 LST. (a)-CBL, TIBL, MAIL, GAN-Convective boundary layer(대류경계층), Thermal internal boundary layer(열적내부경계층), Marine atmospheric boundary layer(해양대기경계층), 강릉시, (b) NSIL-Nocturnal surface inversion layer(야간접지경계층). (b)의 강릉지표부근의 검은지역-공기(오염물질)의 축적

크다. 그러나 중국으로부터 황사의 유입에 의해 강릉의 대기질이 영향을 받기 시작한 2월 14일 00시부터 황사의 영향이 종료되는 2월 15일 02시까지 PM<sub>10</sub>의 농도가 54.16~133.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 분포를 나타내며, 14일 20시에 최대농도로 나타났다. PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>의 시간별 분포가 PM<sub>10</sub>과 같은 시간대에 증감을 나타내며, 35.02~53.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 28.18~43.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 분포를 갖는다. 2월 14일 00시부터 일몰 시각인 17시까지(퇴근 1시간 전) PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>의 매 시각별 농도는 거의 변화가 없었다.

일반적으로 황사의 유입이 없을 때는 교통량이 많은 출근시간대인 09시와 퇴근시간대인 18시에 PM<sub>10</sub> 농도가 높게 나타나지만, 2월 14일 09시부터 다량의 황사가 강릉시로 지속적으로 유입되고 있어 17시까지의 다량의 황사에 의해 PM<sub>10</sub>의 농도가 거의 변화없이 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  내외로 나타났다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>는 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  내외의 농도로 PM<sub>10</sub>과 거의 같은 유형의 시간별 농도분포를 나타내었다. 예보연구에 예측모델(WRF, Weather Research & Forecasting Model)의 3.0버전을 사용하여 재현된 그림 10의 대기 경계층과 바람장의 그림에서와 같이, 15시에 황사의 농도가 낮게 나타나는 이유는 낮에 태양광선에 의해 지표부근의 공기의 가열되어 대류현상이 생기며, 대류에 의해 지표부근의 공기와 대기오염물질이 대류경계층(CBL, Convective boundary layer)고도로 동반 상승하면서 동풍인 해풍에 의해 대관령의 동쪽사면을 따라 형성된 열적내부경계층(TIBL, Thermal internal boundary layer) 내를 통해 대관령 정상 쪽으로 이동하므로 강릉시 지표부근의 PM 농도가 낮게 나타났다(그림 9a, 10a).

최대교통량을 갖는 퇴근시간인 18시 이후부터 PM의 농도가 높게 나타나는 첫 번째 이유는 퇴근 시간

무렵에 많은 차량이 운행되면서 차량으로부터 방출하는 입자상물질과 가스상물질의 양이 증가하고, 동시에 차량운행으로 인해 도로에서 발생하는 먼지의 양이 증가하므로 PM 농도가 높게 되었다. 또한 퇴근 시간 무렵에 기온 하강 및 취사로 인해 주거지역에서 난방보일러의 가동으로 다량의 가스 및 매연이 발생한다. 차량과 도로로부터 발생된 가스 및 입자상 오염물질과 먼지들이 중국으로부터 유입되는 황사먼지와 함께 중첩되어 오전의 PM 농도분포 양상과는 달리 PM 농도가 일몰 후에 높게 나타날 수 있었다(그림 10b). 따라서 최대교통량을 갖는 14일 18시 이후부터 20시까지 입자상물질의 농도가 지속적으로 증가하여 20시에 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>의 최대농도가 각각 133.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 53.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 43.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다(그림 9b).

두 번째 PM의 고농도가 나타나는 이유는, 일몰 후 지표냉각에 의해 낮에 높게 형성되는 대류경계층보다 키가 낮은 야간접지역전층이 형성함에 따라 많은 양의 방출된 먼지입자와 가스들이 역전층내의 지표부근에 갇히게 되어, 지표부근의 PM 농도가 매우 높게 나타났다(그림 10b). 그림 10b에서 보는 바와 같이, 대관령의 산의 정상에서 동쪽사면을 따라 하강하는 중력풍(Katabatic wind)과 강릉분지에서 동해로 부는 육풍(Land breeze)에 의해 강화된 하강경사풍(Downslope wind)에 의해 강릉시로 수송된 황사먼지가 강릉시내의 야간접지역전층(Nocturnal surface inversion layer) 내에서 동해로부터 강릉시로 부는 동풍에 의해 갇히게 되어 20시 무렵에 강릉시의 지표부근의 PM 농도가 매우 높게 되었다(Choi *et al.*, 2004; Choi, 2008; Choi and Choi, 2008; Choi *et al.*, 2010).

20시 이후부터는 도로 위로 운행하는 차량수가 감소하고, 일몰 무렵에 난방을 위해 보일러가 가동된 후 차츰 시간이 지남에 따라 일반적으로 가동률이 감소하므로 22시에는 PM<sub>10</sub> 농도가 68.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하였다. 그러나 이 시간 무렵에는 중국으로부터의 다량의 황사의 유입되어 PM 농도가 매우 낮지 않았다. 또한 그림 10b에서 보는바와 같이 야간에 시간이 경과할수록 지표가 더욱 냉각되어 지표냉각에 의해 낮의 대류경계층 보다 매우 낮게 형성된 야간접지역전층 내의 지표부근으로 대부분의 대기오염물질이 하강하여 축적되므로 15일 01시에 PM<sub>10</sub>의 농도가 86.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 두 번째의 최대치가 되었다. 동시에 낮에 강릉시에서 서쪽의 대관령 정상으로 이동하여 상승했던 대기오염물질들의 일부가 하강경사풍을 따라 강릉시로 재 순환되어 유입되었을 것으로 생각된다(Choi *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2010). 따라서 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>의 2개 최대농도 중 첫 번째 최대농도가 2월 14일 20시, 두 번째 최대농도가 2월 15일 01시에 관측되었다.

15일 01시 이후부터 06시까지 강릉시에서 생성된 대부분의 입자상물질들이 서풍에 의해 동해로 확산되므로 지표부근의 PM 농도가 21.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 급격하게 감소하였다. 또한 15일 05~06시 무렵에는 강릉시에 약한 강수가 있어 강수에 의한 오염물질의 세척이 있게 되므로 PM의 농도가 낮게 나타났다. 2.9~4.7m/s의 범위의 비교적 약한 남서풍이 강릉시에서 15일 10시까지 관측되었으며, 이후 한랭전선이 통과한 후 동풍의 해풍이 강릉시로 불어오며 따라 풍속이 2m/s 이하로 감소하고, 11~17시 사이에 풍계가 북동풍으로 변화하여 강릉시는 황사의 영향으로부터 벗어나게 되었다. PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>의 매 시각별 농도분포가 PM<sub>10</sub>과 매우 유사하였으며, 최대농도가 나타난 시각도 PM<sub>10</sub>의 최대치가 나타난 2월 14일

20시와 같았다.

### 3) 황사발생 전·후의 매 시각별 가스농도분포

그림 11은 매 시각별 CO, NO<sub>x</sub>(NO<sub>2</sub>+NO)와 O<sub>x</sub>(O<sub>3</sub>+NO<sub>2</sub>) 가스의 농도분포이다. 강원보건환경연구원 에서 강릉시에 위치한 강원기상청의 인접지역인 강릉시 임당동에 설치한 복합공기수신실험기(Multi-Air Monitoring Laboratory System)을 사용하여 2005년 2월 14~16일의 NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>3</sub>의 매 시각별 농도를 측정하였다. 황사기간 중에 매 시각별 가스상물질의 농도와 입자상물질의 농도와의 관계를 분석하기 위해 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>의 시간별 분포와 CO, NO<sub>x</sub>와 O<sub>x</sub>의 시간별 분포를 상호 비교하였다.

가스상물질이 입자상물질로의 전환에 대한 연구는 최근에 부분적으로 이루어지고 있으며, 가스상물질이 응축과정을 통해 입자상물질로 전환되어 PM의 농도에 큰 영향을 미치게 된다(Choi and Speer, 2007). 특히 본 연구에서는 관측을 통해 극미세입자농도인 PM<sub>2.5</sub>와 초미세입자농도인 PM<sub>1</sub> 시간별 농도 변화와 CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub>의 시간별 농도변화를 비교 및 분석하여 황사기간에 중국으로부터 수송된 입자상물질 즉 황사먼지와 가스상물질이 지역의 PM의 농도와 가스상물질의 농도에 얼마나 기여하는 파악하고자 하였다. 본 연구에서는 중국 측의 측정자료의 획득이 현실적으로 어렵기 때문에 가스상물질의 응축량을 정량적으로 측정하여 지역 대기질에 기여하는 정도를 나타내기는 어렵다. 그러나 황사기간에 중국으로부터 수송된 입자상물질과 가스상물질에 의해 기여에서의 입자상 및 가스상물질의 매 시각별 변화를 나타내었다. 그림 9에서 강릉시에 황사의 유입이 시작되기 전인 14일 00시부터 17시까지와 18시부터 16일 00시까지 황사의 영향이 끝나는 기간에도 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>의 농도가 증가할 때 그림 11의

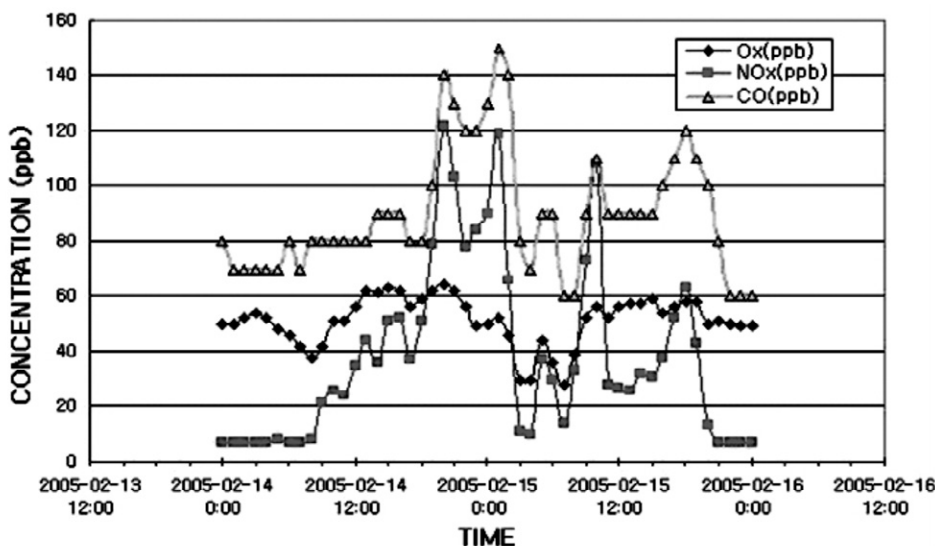


그림 11. 2005년 2월 14~26일까지 강릉시에서 측정된 매 시각별 가스(CO×100, NO<sub>x</sub>(NO<sub>2</sub>+NO), O<sub>x</sub>(O<sub>3</sub>+NO<sub>2</sub>))농도분포(ppb)

CO, NO<sub>x</sub> 농도가 모두 증가하는 양상을 보였으며, PM 농도가 감소할 때 2월 15일 05시를 제외하고 동반 감소하였다. 특히 황사의 유입 전과 황사기간 내에 모두 CO의 시간별 농도분포가 PM의 시간별 농도 분포와 매우 유사하였으며, NO<sub>x</sub> 농도는 2월 14일 00시부터 17시까지 관측기간 초반인 황사의 유입이 적은 기간에만 7~37ppb까지 급격한 변화를 나타내는 것을 제외하고는 변화양상이 거의 같다. O<sub>x</sub>는 28~64ppb의 분포를 갖고, PM, CO, NO<sub>x</sub>의 시각별 농도분포와 전반적으로 유사한 형태의 분포를 나타내지만 그 변화폭은 CO, NO<sub>x</sub>에 비해 매우 작았다.

황사가 강릉시로 대량으로 유입됨에 따라 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 40 $\mu$ g/m<sup>3</sup>을 초과하기 시작한 2월 14일 18시부터 15일 03시까지 CO 농도가 6,000~14,000ppb의 범위에 있으며, NO<sub>x</sub> 농도는 51~122ppb의 범위에 있다. PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>의 최대농도가 나타난 시각인 14일 20시에 CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub>의 농도가 각각 14,000ppb, 122ppb, 64ppb로 나타났다. 2월 15일 01시에 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>의 농도가 두 번째로 큰 값을 갖게 될 때, CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub>의 농도가 각각 15,000ppb, 119ppb, 52ppb로 최대치로 나타났다. 따라서 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>의 농도가 14일에 첫 번째 최대치가 나타난 시각인 20시에 CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub>의 농도가 각각 첫 번째 최대치로 나타났다. 다음날 15일 01시에 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>의 농도가 최대치로 나타나는 시각에 CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub>의 농도가 최대치를 보이고, 매 시각별 농도변화 양상이 매우 유사하므로 강릉지역에서 가스상물질이 응축과정을 통해 입자상물질로 전환되어 PM의 농도에 큰 영향을 미치게 되었음을 알 수 있었다. 특히 NO<sub>x</sub>는 CO와 O<sub>3</sub>에 비해 응축이 잘 일어나므로 PM의 증가에 기여도가 높았을 것으로 생각된다.

CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>x</sub>의 농도가 14일 20시와 15일 01시에 최대농도를 나타내는 것은 PM의 경우와 마찬가지로 최대교통량을 갖는 퇴근시간인 18시 이후부터 2시간 후인 20시까지 많은 차량이 운행되면서 방출하는 가스상물질의 양이 증가하고, 또한 퇴근시간 이후 야간의 기온 하강 및 취사로 인해 주거지역에서 난방보일러의 가동으로 방출된 다량의 가스 및 매연은 황사가 중국 동북부의 대도시인 북경과 천진을 통과한 후 강릉으로 유입될 때 중국의 2개 도시에서 방출되는 가스 및 매연과 함께 강릉시내에서 중첩되므로 강릉지역의 가스상물질의 농도가 높게 나타나게 되었다. 고비사막과 내몽고의 황사발원지로부터 지표에서 바람에 의해 황사가 상승한 후 중국 동북부에 위치하면서 한국의 대기질수준을 초과하는 고농도의 입자상물질과 가스상물질이 거의 매일 방출되고 있고 약 1,400만명의 인구밀도와 많은 공장을 갖고 있는 북경과 천진을 통과한 후 강릉으로 유입될 때 일반적으로 고농도의 입자상물질과 가스상물질이 강릉으로 동반 수송되므로 강릉에서 가스농도가 매우 높게 나타나게 되었다. 중국의 대도시에서 이미 가스상물질의 응축에 의해 입자상물질로의 전환이 이루어진 상태로 강릉으로 유입되었거나 또는 강릉으로 유입된 가스상물질이 강릉에서 방출된 지역의 가스상물질과 결합한 후에 입자상물질로 응축되어 PM의 농도가 높아지게 되었는지는 중국 측의 자료를 구할 수가 없어 구분하기가 어렵다.

일몰 후 지표냉각에 의해 낮게 형성되는 야간접지역전층 내에서 많은 양의 가스들이 지표부근에 갇히게 되어, 지표부근의 가스농도가 매우 높게 나타났다(그림 10b, 11). 가스상물질의 수송과정은 PM과 유사하게 그림 10b에서 보는 바와 같이, 중력풍과 육풍에 의해 강화된 하강경사풍에 의해 중국으로부터

강릉시로 황사먼지와 함께 수송된 가스상물질과 강릉시 자체에서 야간에 방출된 가스상물질들이 해양 대기경계층(Marine atmospheric boundary layer) 내로 부는 동풍에 의해 동해로 이동해 가지 못하고 강릉시내의 역전층 내에 갇히게 되어 20시 무렵에 강릉시의 지표부근의 가스상물질의 농도가 매우 높게 되었으며, 강릉지역의 지표면 부근에 공기의 집중(검은 부분)이 잘 나타나고 있다.

20시 이후부터는 도로 위로 운행하는 차량수가 감소하고, 난방을 위한 보일러의 가동은 차츰 시간이 지남에 따라 가동률이 감소하므로 방출되는 gas와 매연량이 감소하게 되어 가스상물질들의 농도가 04시까지 급격하게 감소하였다. 05시에 gas의 농도가 다시 증가하는데 이것은 일출 직전의 매우 낮은 기온 상태에서 난방보일러의 재 가동으로 방출된 gas들의 영향으로 생각된다. 그 이유는 그림 9에서 PM의 농도가 01시에서 05까지 지속적으로 감소하고 있어 가스상물질들이 중국으로부터 강릉으로 수송되어 강릉지역의 가스농도를 높게 초래하기 어렵기 때문이다.

따라서  $\text{NO}_x$ 의 농도와 CO의 농도가 증감이 나타나는 시간대가 모두 일치하였으며, 가스상물질인 CO와  $\text{NO}_x$ 가  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_1$ 의 농도증가와 감소에 직접적인 영향을 미치게 된다는 사실을 알 수 있다. 특히 강릉지역에 황사가 유입되어 PM의 농도가 높아질 때 가스상물질인 CO와  $\text{NO}_x$ 도 동시에 높아지므로, 지역오염원에서 발생한 가스상물질 외에 중국으로부터 수송되어온 가스상물질이 강릉지역의 가스상 오염물질의 농도에 크게 기여하고 있다. 또한 가스상물질이 응축되어 지역먼지농도의 증가에도 동시에 크게 기여함을 알 수 있다. 반면에  $\text{O}_x$ 의 시간별 변화가 매우 작아,  $\text{O}_x$ 의 증감이 지역 PM 농도의 증감에 영향을 거의 주지 않았다.

## 4. 결론

겨울철 고비사막이나 중국북부의 내몽고의 지역에서 황사가 발생한 후 강릉지역으로 유입될 때  $\text{PM}_{2.5}$ 와  $\text{PM}_1$ 의 시간별 분포가  $\text{PM}_{10}$ 과 같은 시간대에 증감을 나타내며,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_1$ 의 최대농도가 2월 14일 20시와 익일 15일 01시에 나타났다. 또한  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ 와  $\text{PM}_1$ 의 농도가 증가할 때 CO,  $\text{NO}_x$  농도가 모두 증가하는 양상을 보였으며, PM 농도가 감소할 때 CO,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_x$  농도가 증가하는 2월 15일 05시를 제외하고 동반 감소하였다. CO의 시간별 농도분포가 PM의 시간별 농도분포와 매우 유사하였지만,  $\text{NO}_x$  농도는 황사의 유입이 적은 관측기간의 초반에만 급격하게 증가하는 것을 제외하고 CO의 변화양상과 거의 같았다.  $\text{O}_x$ 의 농도분포는 PM, CO,  $\text{NO}_x$ 의 시간별 농도분포와 전반적으로 유사한 형태의 분포를 나타내지만 그 변화폭은 CO,  $\text{NO}_x$ 에 비해 매우 작았다.  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ 와  $\text{PM}_1$ 의 최대농도가 나타난 시각에 CO,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_x$ 의 농도가 각각 최대치를 나타내므로 가스상물질인 CO,  $\text{NO}_x$ 가 응축과정을 통해 입자상물질로 전환되어 PM의 농도에 큰 영향을 미치게 되었음을 알 수 있었다.

낮에는 중국으로부터 유입된 황사와 지역에서 발생한 입자상물질과 가스상물질인 대기오염물질이 대류경계층고도의 정상으로 동반 상승하면서 동풍인 해풍에 의해 대관령의 동쪽사면을 따라 형성된 열적

내부경계층 내를 통해 대관령 정상 쪽으로 이동하므로 강릉시 지표부근의 PM과 가스농도가 낮았다. 반면에 최대교통량을 갖는 퇴근 이후 2시간 이내에 차량과 도로로부터 발생된 오염물질과 먼지와, 기온하강 및 취사로 인해 주거지역에서 난방보일러의 가동으로 인한 다량의 가스 및 매연이 중국으로부터 유입되는 황사먼지 및 가스와 중첩되어 일몰 후에 높게 나타났다. 또한 야간의 지표 냉각에 의해 생성된 대관령에서 강릉으로 부는 중력풍과 육풍에 의해 중국으로부터 수송된 황사먼지와 가스상물질이 강릉시 자체에서 방출된 오염물질과 중첩되고, 동풍의 의해 강릉시내의 야간접지역전층 내에 갇히게 되어 14일 20시에 PM과 가스농도가 매우 높게 나타났다. 황사의 수송량의 변화에 따라 PM과 가스농도가 감소하다가 익일 15일 01시에 황사의 수송량의 증가에 의해 다시 PM과 가스농도가 증가한 후 황사의 유입이 감소함에 따라 농도가 감소하였다.

## 사사

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-313-2007-2-C00777)-강릉연안에서 시간별 고농도의 입자상물질(PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>)과 가스상물질(CO, NO<sub>x</sub>) 농도의 황사기간 중 비교.

## 참고문헌

- 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.
- Choi, H., 2008, Comparison of PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> 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 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> 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. and Speer, M. S., 2007, Influences of secondary chemical gas processes on PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentrations over the Korean coast, *Advances in Geosciences*, 9, 209-244.
- Choi, H. and Zhang, Y. H., 2008, Prediction of duststorm evolution by vorticity theory, *Atmospheric Research*, 89, 338-350.
- Choi, H., Choi, D. S., and Choi, S. M., 2010, Meteorological condition and atmospheric boundary layer influenced upon temporal concentrations of PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> at a coastal city, Korea for Yellow Sand Event from Gobi Desert, *Disaster Advances*, 3(4), 309-315.
- 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.
- 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.
- Corsmeier, U., Kossmann, M., Kalthoff, N., Sturman, A., 2006, Temporal evolution of winter smog with a nocturnal boundary layer at Christchurch, New Zealand, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 91, 129-148.
- 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.
- Haynes, P. H. and McIntyre, M. E., 1987, On the evolution of vorticity and potential vorticity in the presence of diabatic heating and frictional or other forces, *Journal of Atmospheric Sciences*, 44, 828-841.
- 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.
- Nagendra, S. and Khare, M., 2003, Diurnal and seasonal variations of carbon monoxide and nitrogen dioxide in Delhi city, *International Journal of Environment and Pollution*, 19(1), 76-92.
- 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.