

## 동아시아 지역에서 광역적 대기오염의 이동: 위성과 지상 관측

김학성<sup>1,\*</sup> · 정용승<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국교원대학교 지구과학교육과, 363-791 충북 청원군 강내면 다락리 산 7

<sup>2</sup>한·중대기과학연구소, 363-891 충북 청원군 강내면 궁현리 304

## Large-Scale Transport of Air Pollutants in the East Asian Region: Satellite and Ground Observations

Hak-Sung Kim<sup>1,\*</sup> and Yong-Seung Chung<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Korea National University of Education,  
Choongbuk 363-791, Korea

<sup>2</sup>Korea-China Centre for Atmospheric Research, Choongbuk 363-891, Korea

**Abstract:** Five episodes of the large-scale transport of air pollutants in East Asia and its inflow into the Korean Peninsula have been analyzed through satellite and ground observations. These episodes include regionally polluted continental air mass, which is created by the pollutants produced in the cities and the industrial regions in China, to land on or pass through the Korean Peninsula by way of the Yellow Sea. The analysis of the NOAA satellite observation data made it possible to create images by combining 3 channels of visible and infrared ray ranges and also to identify the distribution and the transport of the air pollution mass over the Yellow Sea. The ground observation data of the air pollutants gathered in Chongwon were found highly valuable in verifying the information in comparison with ones from the satellite. Especially, regarding the episodes of large-scale transport of the air pollutants, the difference of concentration between PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> was found small with the increase of PM<sub>2.5</sub> value. The concentration of PM<sub>10</sub> in the episode of yellow sand, however, was found much higher than that of PM<sub>2.5</sub>. In the episode of 27 January 2006, the inflow of the regionally polluted continental air mass into the central and southwestern region of the Korean Peninsula was observed sequentially in the various ground observatories as well as by the satellite. The north-northwest airflow dissipated the clouds over from Mt. Halla in Jeju Island up to far downwind, reduced air pollution, and created von Kármán vortex.

**Keywords:** large-scale transport of air pollutants, episodes, satellite and ground observation, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>

**요약:** 동아시아에서 광역적인 대기오염 이동과 한반도 유입을 인공위성과 지상 관측을 통해 5개의 사례를 분석하였다. 이 사례들은 주로 중국 대륙의 도시와 산업지대에서 배출된 오염물질들이 황해를 지나 한반도에 상륙 및 통과하는 광역적인 대기오염 이동이다. NOAA인공위성 관측 자료의 분석은 가시영역과 적외선 영역의 3개 채널을 합성하여 영상을 만들고, 황해 위에서 대기오염의 분포와 이동을 구별해 낼 수 있었다. 또한 청원의 배경관측지점에서 대기오염의 지상 관측 자료는 인공위성 관측 자료와 비교하여 검증하는데 매우 가치가 있었다. 특히, 광역적 대기오염의 이동 사례에서는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도의 차이가 적으면서, PM<sub>2.5</sub>값이 높게 증가한다. 그러나 황사의 경우는 PM<sub>10</sub> 농도가 훨씬 높게 관측되어 PM<sub>2.5</sub>와의 차이가 매우 큼이 특징적이다. 2006년 1월 27일의 사례에서는 중국 발원의 광역적 대기오염이 한반도의 중부 및 남서지역으로의 유입을 인공위성뿐 아니라 여러 지상관측소들에서 순차적으로 관측할 수 있었다. 북북서 기류가 제주도 한라산을 넘어서 풍하측 멀리까지 구름을 소산시키고 대기오염을 감소시키며, 카르만 소용돌이를 만들고 있었다.

**주요어:** 광역적인 대기오염 이동, 사례, 위성과 지상관측, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>

\*Corresponding author: enviro07@knue.ac.kr

Tel: 82-43-230-3777

Fax: 82-43-232-7176

## 서론

동아시아가 세계 3대 공업지역으로 부상함에 따라 이 지역의 국제적인 대기오염 관측이 지속적으로 수행되고 있다. 인위적인 대기오염 물질이 중국에서 발생한 후 광역적으로 황해를 지나 한반도와 일본에 영향을 주고 있다(Chung et al., 2001, 2003; Kim and Chung, 2005). 따라서 황해 지역의 대기오염 현황과 그 영향 평가는 지속적으로 수행되어야 하며 광역적인 대기오염 사례에 대한 관측과 분석의 연구가 필요하다.

인공위성은 에어로솔의 산란 및 흡수 광을 관측하므로 광역적 대기오염을 향해 연직 보다는 사선으로 놓여 있을 때 잘 감지할 수 있다. 인공위성을 이용한 이러한 관측 방법은 산불의 연기를 관측 할 때 이용되었다(Chung and Le, 1984). 또한, 인공위성을 이용한 모니터링은 황사, 광역적 대기오염, 산불연기, 화산의 배출 연기 등을 포함 한다(Chung et al., 1981; Chung, 1986; Chung, 1992; Chung et al., 2005).

광역적 대기오염 이동에 의해 풍하측에서는 먼지와  $O_3$ ,  $NO_x$  등의 농도가 높게 증가한다. 대기오염이 발생하면 국지적으로 확산될 뿐 아니라, 중·장거리를 이동하여 제 2의 독성 오염물질로 변화하여 영향을 줄 수 있다. 한반도의 태안에서는 중국 동부 지역으로부터 황해를 거치며 정체적이고 광역적인 대기오염 이동에 의해 황산염(sulphate)과 광화학적으로 생성된  $O_3$ 이 북-북서 기류에 의한 배경농도 보다 높게 관측되었다(정용승과 김태근, 1991; Kim and Chung, 2005). 한편,  $CO$ 는 동아시아 지역에서 배출량이 많고 계절에 따라서 수 개월의 긴 생존기간(Novelli et al., 1998) 때문에 장거리 이동에 의해 공간적으로 광역적인 분포를 나타내게 되는데, 동아시아에서 한반도의 태안이 가장 높은 농도 수준을 나타내고 있다(김학성과 정용승, 2006).

황해 지역이 고기압의 중심과 후면에 위치할 때

수 100~1,000 km 이상 광역적으로 중국발원의 오염 물질이 황해에 서서히 모이며(build-up) 연무와 대기 오염 농도가 높게 증가한다(Kim and Chung, 2005). 본 연구에서는 황해에 광역적으로 축적 및 이동되는 대기오염을 모니터링하기 위해 인공위성 영상을 분석하고 한반도 중부의 청원에서 대기오염 농도를 관측하였다. 그 결과를 이 연구에 포함하여, 특히 5개 사례조사와 논의를 하였다.

## 관측 및 분석 방법

### 인공위성 관측

NOAA 위성이 관측한 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) 자료는 산불탐지, 에어로졸 및 황사 탐지, 해수면 온도산출, 적조 현상 탐지, 화산재 탐지 그리고 NDVI(Numerical Differential Vegetation Index) 산출 등에 매우 유용하다. NOAA-KLM에 탑재되어 있는 AVHRR/3의 채널별 특징은 Table 1에 잘 나타난다. 각 채널 모두 위성의 직하점에서 1.1 km 해상도를 가지며 직하점에서 멀어질수록 그 해상도는 떨어진다.

NOAA 위성을 이용한 대기오염 관측 기술은 여러 연구에서 설명되고 있다(Chung and Le, 1984; Chung, 1986; Chung et al., 2003). NOAA 위성이 관측한 AVHRR/3 자료에서 채널 1, 2, 4를 기초로 하여 false color composite 기술로 제작한 영상을 만들어 광역적 대기오염 이동을 분석했다. 채널 1(0.58~0.68  $\mu m$ )은 붉은색으로 하고, 채널 2(0.725~1.00  $\mu m$ )는 초록색으로 하고, 채널 4(10.30~11.30  $\mu m$ )는 파란색을 할당하였다. 이러한 false color composite 분석에 의하면 해양과 호수는 낮은 반사율을 보이기 때문에 대기오염이 없을 때 일반적으로 파란색으로 보인다. 또한 구름은 흰색으로 보이며 땅은 초록색으로 보이게 된다. 해양 또는 호수 위에서 산업발원의 광역적 대기오염 이동은 자홍색을 보이며, 오염 연기(smoke

**Table 1.** Characteristics of AVHRR/3 in NOAA satellites

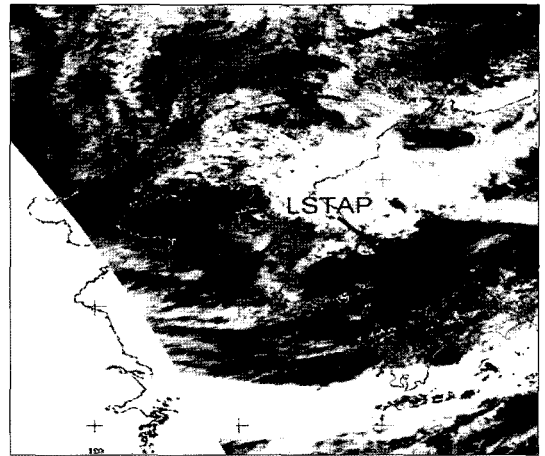
Sensor	Wavelength ( $\mu m$ )	Resolution (km)	Typical use
Channel 1	0.58-0.68	1.1	Daytime cloud and surface mapping
Channel 2	0.725-1.00	1.1	Daytime detection of land/water boundaries
Channel 3a	1.58-1.64	1.1	Daytime detection of snow and ice
Channel 3b	3.55-3.93	1.1	Fire detection, night time detection of cloud
Channel 4	10.30-11.30	1.1	Cloud mapping, sea surface temperature
Channel 5	11.50-12.50	1.1	Sea surface temperature

plume) 역시 자홍색 또는 노랑-자줏빛 색을 나타내게 된다.

**대기오염 관측**

한반도 중부에 위치한 청원(127.22°E, 36.34°N, 93 m)에서 대기오염 모니터링을 실시하였다. 청원 관측 지점은 태안반도 서쪽 해안가에서 약 120 km 동쪽 풍하측에 있으며, 기류가 태안에서 청원까지 도착하는데 약 3~5시간이 소요되며, 청원의 풍상측 태안반도까지는 광역적 대기오염을 발생시킬만한 도시와 산업단지가 존재하지 않는다.

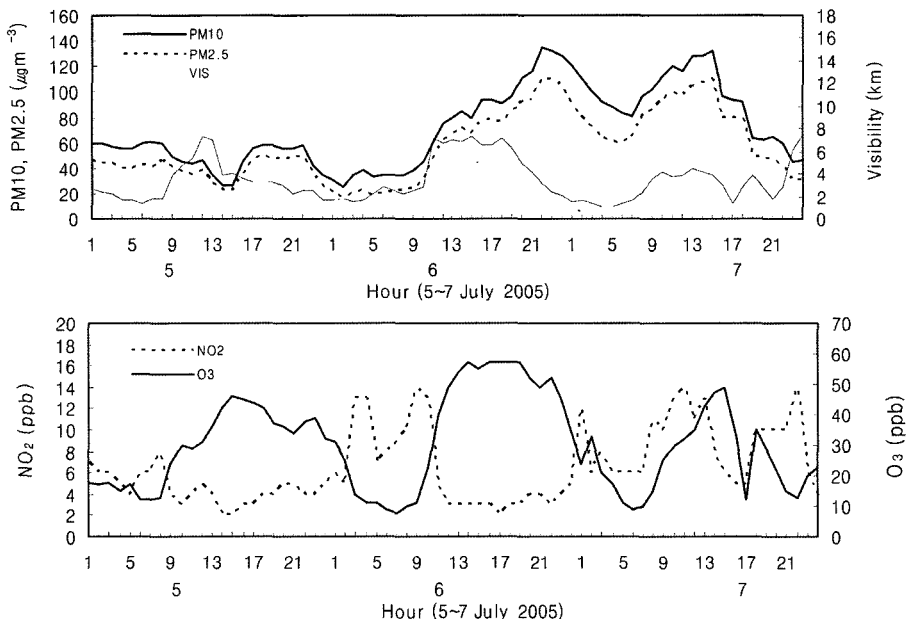
O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 대기오염과 시정을 연중무휴로 관측하고 있다. O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, 측정 장비는 Thermo Environmental Instrument사의 장비들을 이용하였다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 농도를 관측하는 데는 Rupprecht & Patashnick의 TEOM Series 1400a를 이용하였다. 이 기기는 필터에 모아지는 먼지의 질량을 TEOM(Tapered Element Oscillating Microbalance) 방식으로 직접 측정한다. 그리고 Belfort Instrument 사의 Model 6000을 이용하여 시정을 관측하였다. Model 6000은 적외선의 산란에 의해 0~16 km 범위의 시정을 10% 또는 3 m 이내의 정확도로 측정하도록 설계되었다.



**Fig. 1.** Satellite image of NOAA 16 (1413 LST, 6 July 2005) showing a large-scale transport of air pollutants (LSTAP) from the Yellow Sea via south Korea to East Sea.

**광역적 대기오염의 이동 경로 분석**

한반도에 유입되는 기류의 이동궤적을 통해 광역적 대기오염의 이동경로를 추적하는데 미국 NOAA/ESRL의 등온위 후진궤적 모델(Harris, 1982)을 연구에 이용하였다. 등온위 후진궤적은 기류가 움직인 자취를 의미하는 것으로 등온위면을 따라 움직이는 기



**Fig. 2.** Variations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, visibility, NO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub> observed at Chongwon during 5~7 July 2005.

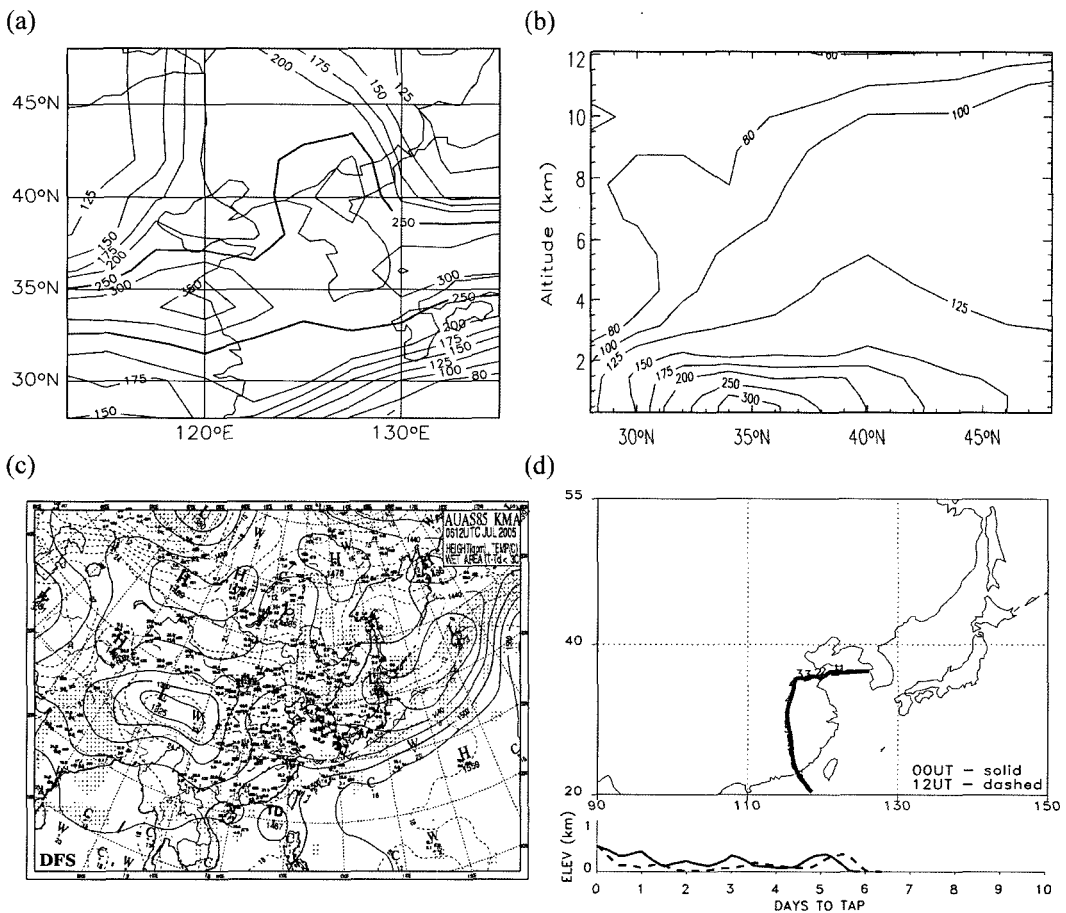
류는 그 물리적인 성질이 변하지 않는다. 12시간 간격(00, 12 UT)으로 태안에 도착하는 기류의 등온위 후진궤적을 이용하였다. 또한, 황해의 광역적 대기오염 이동은 중관적 규모의 대기운동의 영향을 받는다 (Kim and Chung, 2005). 중관 기상장의 영향에 따른 대기오염 이동을 분석하기 위해 기상청의 지상일기도와 850 hPa 일기도를 분석하였다.

### 결과 및 논의

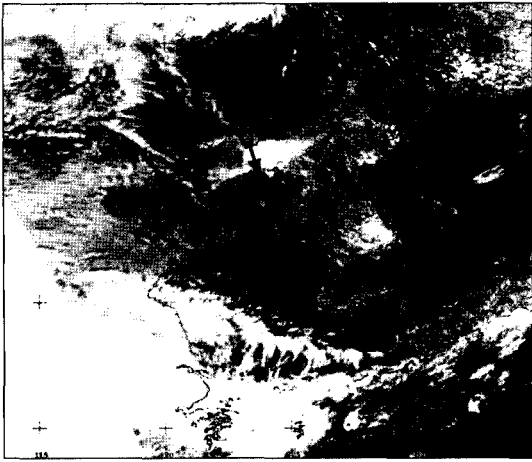
#### 2005년 7월 6~7일 사례

Figure 1은 2005년 7월 6일 NOAA 16(1413 LST) 위성 영상으로 중국 산둥 반도 남쪽에서 시작된 폭 400 km의 광역적 대기오염(LSTAP)은 남한과 남해를

지나 동해 남쪽 대부분을 점유하고 있다. Fig. 2는 2005년 7월 5~7일 청원에서 관측한 대기오염 농도와 시정의 시간별 변동을 도식화한 것이다. 7월 5일 대기 중  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$  농도는 각각 최대  $61 \mu g m^{-3}$ ,  $50 \mu g m^{-3}$ 에서 6일에는 각각  $135 \mu g m^{-3}$ ,  $111 \mu g m^{-3}$ 까지 급하게 증가하였다. 자연적으로 발생하는 황사는  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$  농도의 차이가 크게 나타나지만 (Chung at al., 2005), 이 사례는 두 값의 차이가  $24 \mu g m^{-3}$ 로 거의 비슷하게 높은 값을 보인다.  $PM_{2.5}$  농도가 높게 증가하는 것은 황해에서 유입된 산업적인 대기오염의 영향이다. 또한  $O_3$  생성의 전조물인  $NO_2$  농도는 5일 최고 7 ppb이었지만, 6일 오전에는 12~14 ppb로 증가하였다가 6일 오후에는  $O_3$ 이 57 ppb(5일 46 ppb)로 광화학적 생성이 증가하며 급히 감소되었



**Fig. 3.** (a) Model simulation of CO concentrations at 930 hPa (700 m), (b) zonal average (Latitude: 28~48N, Longitude: 113~135E) of CO concentrations conducted using by GEOS-CHEM global three-dimensional model of tropospheric chemistry, (c) a 850 hPa meteorological map by Korea Meteorological Administration and (d) trajectories arriving at Tae-ahn Peninsula (TAP) on 6 July 2005.

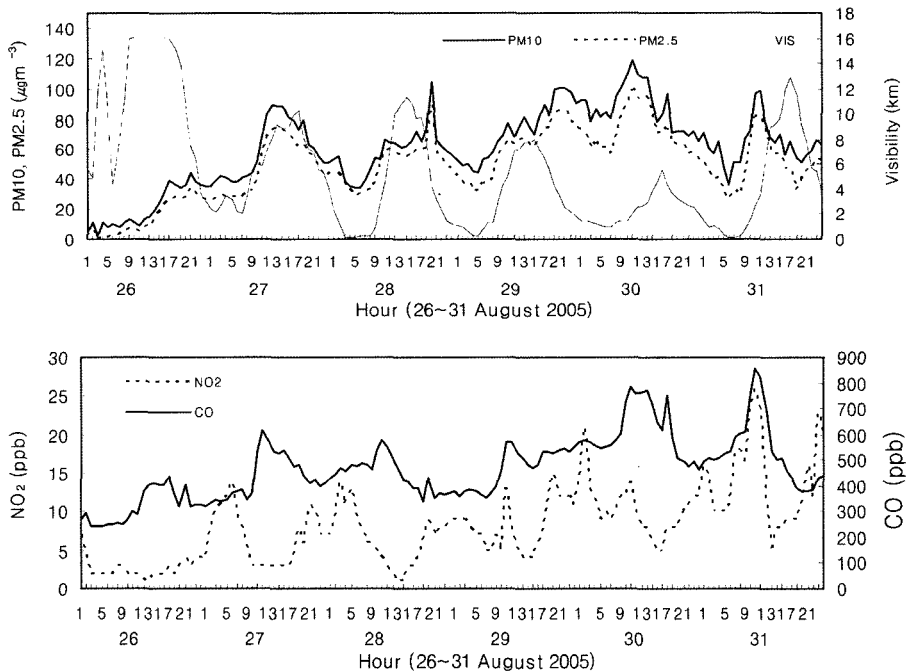


**Fig. 4.** Satellite image of NOAA 18 (1331 LST, 28 August 2005) showing a large-scale transport of air pollutants (LSTAP) over the Yellow Sea and the Korean Peninsula.

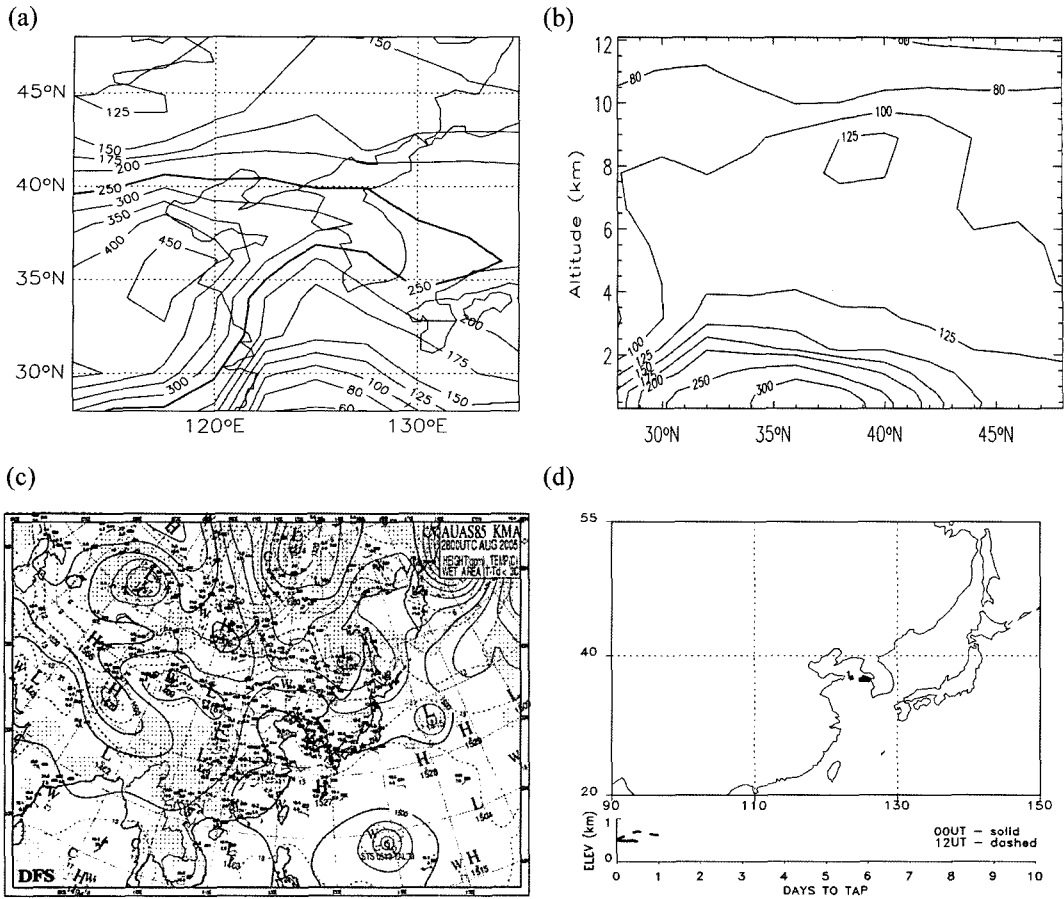
다. 중국 동부지역을 거쳐 황해에서 체류하는 동안 광화학적 생성에 의해  $O_3$  농도가 증가되어 한반도에 유입하는 것을 관측했었다(Kim and Chung, 2005).

Figure 3a는 7월 6일 15 LST GEOS-CHEM 모델 시뮬레이션 (<http://www-.as.harvard.edu/chemistry/trop/>

geos)으로 930 hPa(700 m)에서 CO 농도의 등치선을 나타내고 있다. GEOS-CHEM 모델(Bey et al., 2001)은 NASA의 GEOS(Goddard Earth Observing System)에 축적되는 기상자료에 의해 동기화된다. 산둥 반도 아래 지역으로부터 황해와 한반도 그리고 동해까지 250 ppb 이상의 등치선이 NOAA 위성 영상의 광역적 대기오염 이동(Fig. 1)과 일치하는 분포를 보이고 있다. Fig. 3b의 위도별 평균 CO 농도의 고도분포에서는 대기오염의 광역적 이동 중심이 한반도의 중·남부인 34~36°N 지표면 가까이 300 ppb 이상으로 있으며, 고도 2 km까지 150 ppb 이상이 집중적으로 확산되어 있다. 2005년 7월 6~7일 한반도 주변의 종관 기상적 상황은 일본 규슈 남쪽에 위치한 정체(장마) 전선과 함께 하층에는 기압경도가 약하고 바람이 거의 무풍 상태였지만, 850 hPa 일기도(Fig. 3c)에서는 황해지역과 한반도 중·남부 지역에 약  $5 \text{ ms}^{-1}$ 의 서북서 바람이 1440~1470 m에서 지속적으로 불고 있었다. 청원의 관측 지점은 위성영상과 GEOS-CHEM 모델 시뮬레이션에서 보여지는 광역적 대기오염 이동의 중심에 위치하고 있었다. 그리고 청원 관측지점에서 서해안까지 광역적 대기오염을 발생시킬 수 있는 커다란 도시와 산업단지가 없다는 것은 황해에서 유입



**Fig. 5.** Variations of  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , visibility,  $NO_2$  and CO observed at Chongwon during 26~31 August 2005.



**Fig. 6.** (a) Model simulation of CO concentrations at 930 hPa (700 m), (b) zonal average (Latitude: 28–48N, Longitude: 113–135E) of CO concentrations conducted using by GEOS-CHEM global three-dimensional model of tropospheric chemistry, (c) a 850 hPa meteorological map by Korea Meteorological Administration and (d) trajectories arriving at TAP on 28 August 2005.

된 광역적 대기오염의 영향이 크게 미치고 있음을 제시하고 있다. 그리고, Fig. 3d의 5일간 등온위 후진 궤적 분석은 3일 전부터 산둥 반도 쪽에서 약한 기류가 한반도에 도착하였으며 4~5일 전에는 중국 남 쪽에서 올라와 중국 중부를 거치며 산업적 대기오염 배출의 영향을 받고 있었다.

**2005년 8월 27~31일 사례**

Figure 4는 2005년 8월 28일 NOAA 18(1331 LST) 위성 영상으로 광역적인 대기오염이 황해에 퍼져 있다. Fig. 5는 8월 26~31일 청원에서 관측한 대기오염 농도와 시정의 시간별 변동을 보여준다. PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도는 27일부터 꾸준히 증가하였으며 30일에 각각 119 μg m<sup>-3</sup>, 100 μg m<sup>-3</sup> 최고 농도를 보

였다. 특히, PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도가 매우 비슷하게 변동하며 PM<sub>2.5</sub> 농도가 높게 증가되었음은 황해에서 유입된 광역적 대기오염 영향으로 분석된다. 시정은 27~28일에 높다가 30~31일에는 낮게 관측되었다. 또한, NO<sub>2</sub>, CO 농도는 28일까지 각각 최대 14 ppb, 581 ppb로 비교적 낮게 나타나다가 31일에는 각각 26 ppb, 857 ppb까지 증가하였다.

Figure 6a와 6b는 8월 28일 12 LST GEOS-CHEM 모델 시뮬레이션으로 930 hPa(700 m)에서는 산둥반도를 중심으로 중국 동부지역으로부터 황해, 한반도, 동해까지 일산화탄소 250 ppb 이상이 광역적 띠 모양을 나타내고 있다. 34~39°N의 위도별 평균 CO 농도는 지표면 가까이 300 ppb 이상이 집중되어 있고, 4 km 고도까지 125 ppb 이상이 확산되어 있다. Fig.



Fig. 7. Satellite image of NOAA 18 (1356 LST, 24 October 2005) showing a large-scale transport of air pollutants (LSTAP) over the Yellow Sea crossing the Korean Peninsula.

6c는 8월 28일 09 LST 850 hPa일기도며 한반도는 북태평양 고기압의 영향으로 정체적이고 더운 날씨를 보였다. 그리고 Fig. 6d의 등온위 후진궤적에서 기류의 흐름은 비교적 느려서 한반도에 유입되는 기류는

1일 전부터 산둥반도로부터 황해에 정체하고 있었으므로 대기오염이 황해에 축적(build-up) 될 수 있는 조건이었다.

2005년 10월 24~25일 사례

Figure 7은 2005년 10월 24일 NOAA 18(1356 LST) 위성 영상이다. 24일에는 광역적 대기오염이 북한과 남한의 서해안에 상륙하였고, 25일에는 남한을 지나 동해와 일본으로 이동하였다. Fig. 8은 10월 24~27일 청원에서 관측한 대기오염과 시정의 시간별 변동을 나타낸다. PM<sub>10</sub>은 24일 오전 20~25 µg m<sup>-3</sup>의 배경적 농도를 기록하였으나, 광역적 대기오염이 청원에 유입하여 17 LST 이후 80~104 µg m<sup>-3</sup>로 증가하였다. PM<sub>2.5</sub>는 80~85 µg m<sup>-3</sup>로서 인위적으로 발생된 먼지임을 나타낸다. 25일에는 황해의 광역적 오염이 남한 대부분에 영향을 주며, PM<sub>10</sub>이 22 LST에서 26일 03 LST 사이에 121~128 µg m<sup>-3</sup>, PM<sub>2.5</sub>는 90~93 µg m<sup>-3</sup>이 발생되었다. 그리고 27일에도 PM<sub>10</sub>은 19~20 LST에 104~118 µg m<sup>-3</sup>, PM<sub>2.5</sub>는 82~90 µg m<sup>-3</sup>을 기록하여 전형적인 황해의 인위적인 대기오염의 영향을 나타냈다.

또한 O<sub>3</sub>은 25일 최고 60 ppb까지 증가하였고, NO<sub>2</sub>

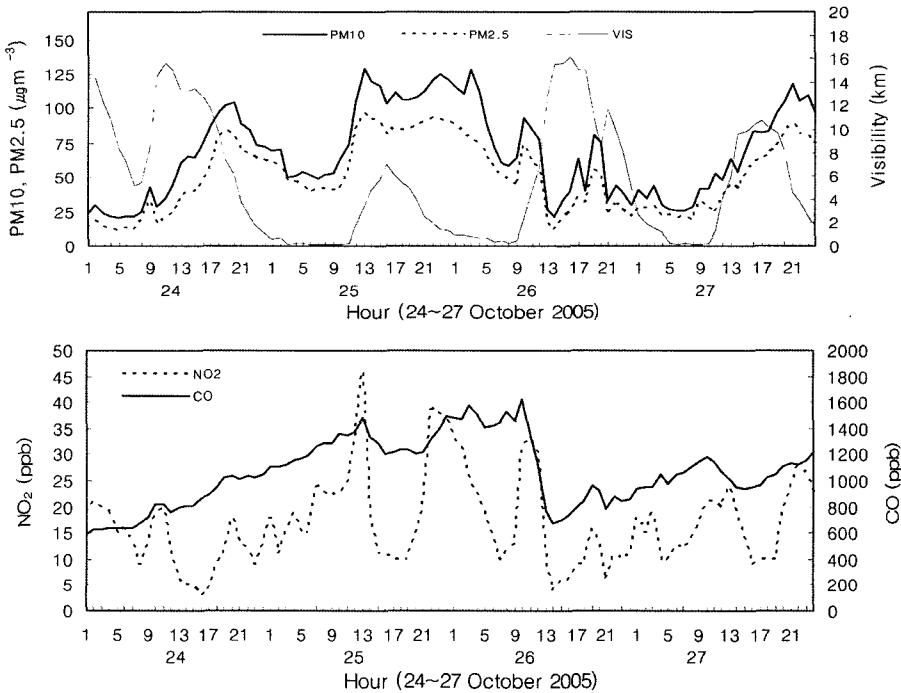
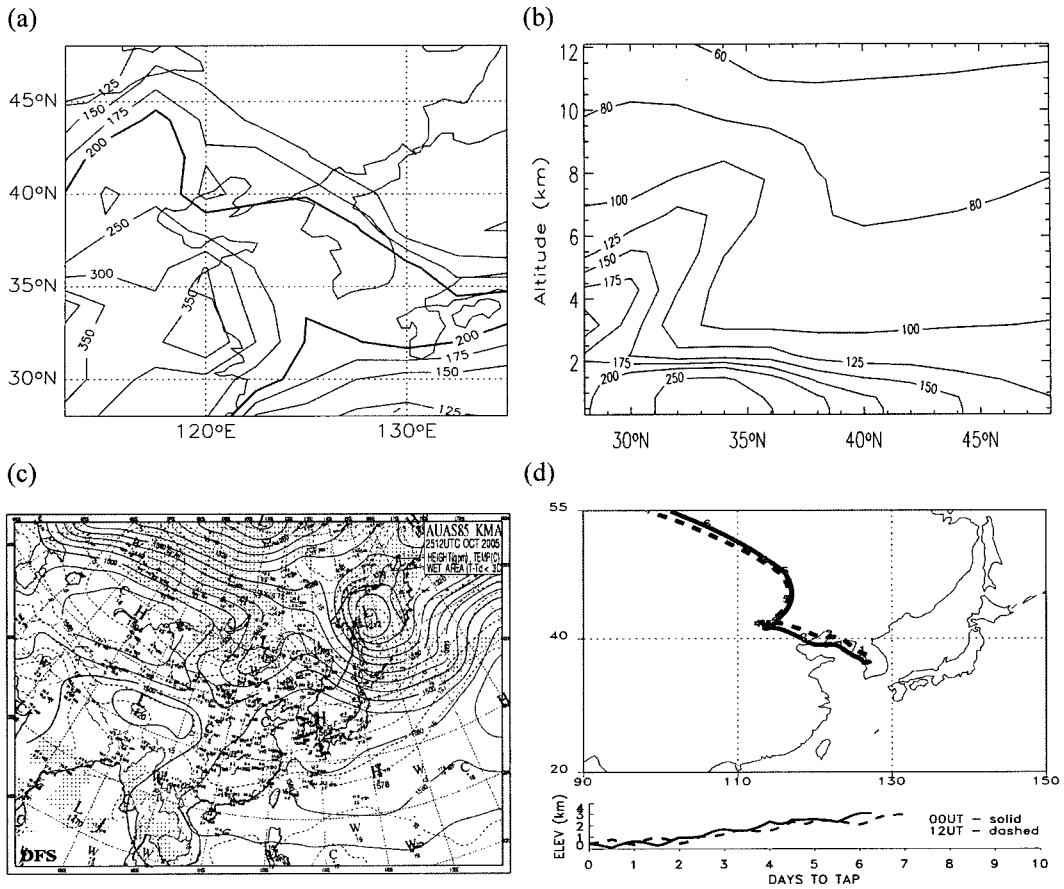


Fig. 8. Variations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, visibility, NO<sub>2</sub> and CO observed at Chongwon during 24~27 October 2005.



**Fig. 9.** (a) Model simulation of CO concentrations at 930 hPa (700 m), (b) zonal average (Latitude: 28~48N, Longitude: 113~135E) of CO concentrations conducted using by GEOS-CHEM global three-dimensional model of tropospheric chemistry, (c) a 850 hPa meteorological map by Korea Meteorological Administration and (d) trajectories arriving at TAP on 25 October 2005.

는 20~46 ppb로 높은 농도가 발생하였다. CO는 24일 596 ppb이던 것이 점진적으로 증가되어, 25일 1,478 ppb, 26일 1,577 ppb, 27일 1,213 ppb를 보였다. 시정은 24일 비교적 양호하였으며, 25일에는 오전에 100 m 이하의 안개와 연무가 있었으나 오후에는 시정 최고 값이 겨우 6~7 km로서 광역적 대기오염 발생을 확인시켜준다. 26일 오전의 최저 시정은 200 m, 오후에는 16 km로 개선되었으나 27일에도 안개와 연무로 인해 시정이 100 m 이하가 되었다.

Figure 9a는 10월 25일 12 LST GEOS-CHEM 모델 시뮬레이션으로 930 hPa(700 m)에서는 중국의 동부지역 전체에서 황해, 한반도를 거쳐 일본 남부 지역까지 CO의 농도가 200 ppb 이상의 광역적 분포를 보이고 있다. Fig. 9b의 위도별 평균CO 농도의 고도 분포에서는 31~36°N 지표면 가까이 250 ppb 이상이

집중되어 있으며, 고도 8 km까지 100 ppb 이상을 보이며 수직적으로 확산되어 있다.

Figure 9c는 10월 25일 21 LST 850 hPa 일기도다. 이동성 고기압이 중국내륙에서 한반도를 지나 동해와 일본의 남동쪽으로 이동하여 황해는 고기압의 후면에 위치하여 기류가 정체적이었다. 이러한 종관 기상장의 특징은 27일 21시 이후 한랭전선이 한반도를 북서로부터 북동으로 지나갈 때까지 지속되었다. 한편, Fig. 9d의 등온위 후진계적은 23일부터 한반도에 도착하는 공기는 북서쪽에서 유입되었으며, 25일 한반도에 도착한 기류의 이동 경로 역시 3~4일전 베이징으로부터 정체적인 흐름을 보이며 유입되었다.

**2005년 11월 11일 사례**

Figure 10은 2005년 11월 10일 NOAA 18(1424



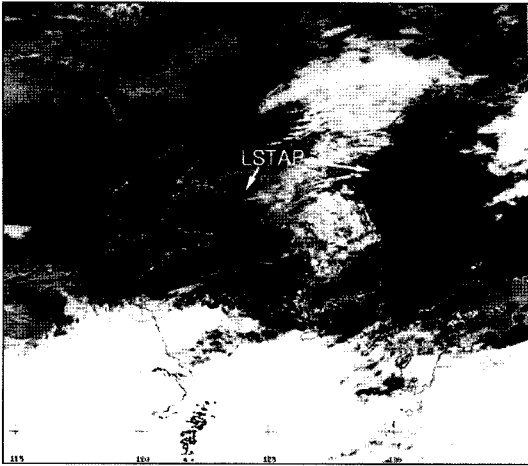


Fig. 10. Satellite image of NOAA 18 (1424 LST, 10 November 2005) showing a large-scale transport of air pollutants (LSTAP) over the Yellow Sea, Korea and East Sea.

LST) 위성 영상으로 광역적 대기오염과 누런 하층운이 황해와 한반도에 분포하고 있다. Fig. 11은 11월 10~12일 대기오염과 시정의 시간별 변동을 보여준다. 10일 PM<sub>10</sub> 농도는 최고 83 μg m<sup>-3</sup>, PM<sub>2.5</sub>는 37 μg m<sup>-3</sup>이었으며, 황해로부터 광역적 대기오염의 유입과 함께 11일에는 PM<sub>10</sub> 140 μg m<sup>-3</sup>, PM<sub>2.5</sub> 89 μg m<sup>-3</sup>

로 증가하였다. CO는 10일 796 ppb에서 11일 최고 1,358 ppb로 증가되었다. 한편, SO<sub>2</sub>는 10일 최고 8 ppb, 11일 최고 12 ppb가 발생되었다. 시정은 10일 비교적 양호하였으나, 11일 새벽 500 m 이하이고 13 LST에도 4.1 km로서 광역적 대기오염의 이동을 나타낸다.

Figure 12a는 11월 10일 15 LST GEOS-CHEM 모델 시뮬레이션으로 970 hPa(700 m)면에서 CO 농도가 중국 남동 지역으로부터 황해를 거쳐 한반도 북동쪽으로 250 ppb 이상의 광역적 분포를 보이는 것이 위성영상과 일치한다. 또한 Fig. 12b의 위도별 평균 CO 농도의 고도 분포에서 35°N까지 지표면 가까이 350 ppb 이상, 그리고 고도 5.5 km까지 125 ppb가 확산되어 있다.

Figure 12c는 11월 10일 21 LST 850 hPa 일기이다. 고기압이 중국으로부터 한반도를 거쳐 일본 동쪽으로 이동하여 위치하고 있어, 한반도는 고기압 후면에 놓여 대체적으로 따뜻하고 대기오염이 황해에 축적되는 조건이었다. 그리고 Fig. 12d의 등온위 후진 궤적 분석은 11월 10일 한반도에는 3일전 중국 베이징을 경유하여 북서쪽으로부터 유입되는 기류가 도착하고 있다. 그리고 11월 9일과 11일 역시 북서쪽에서 기류가 도착하고 있는 것으로 분석 되었다.

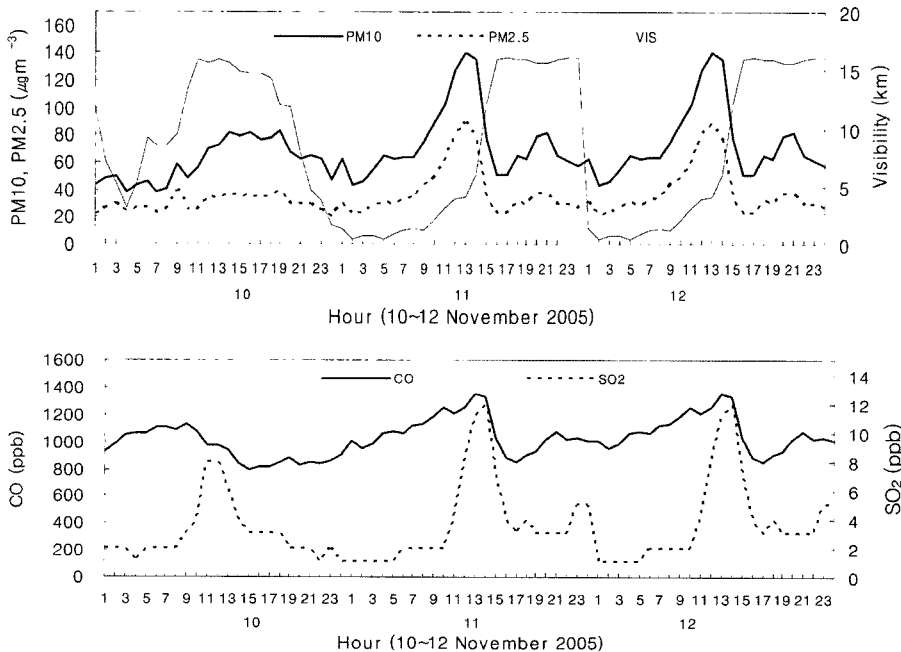
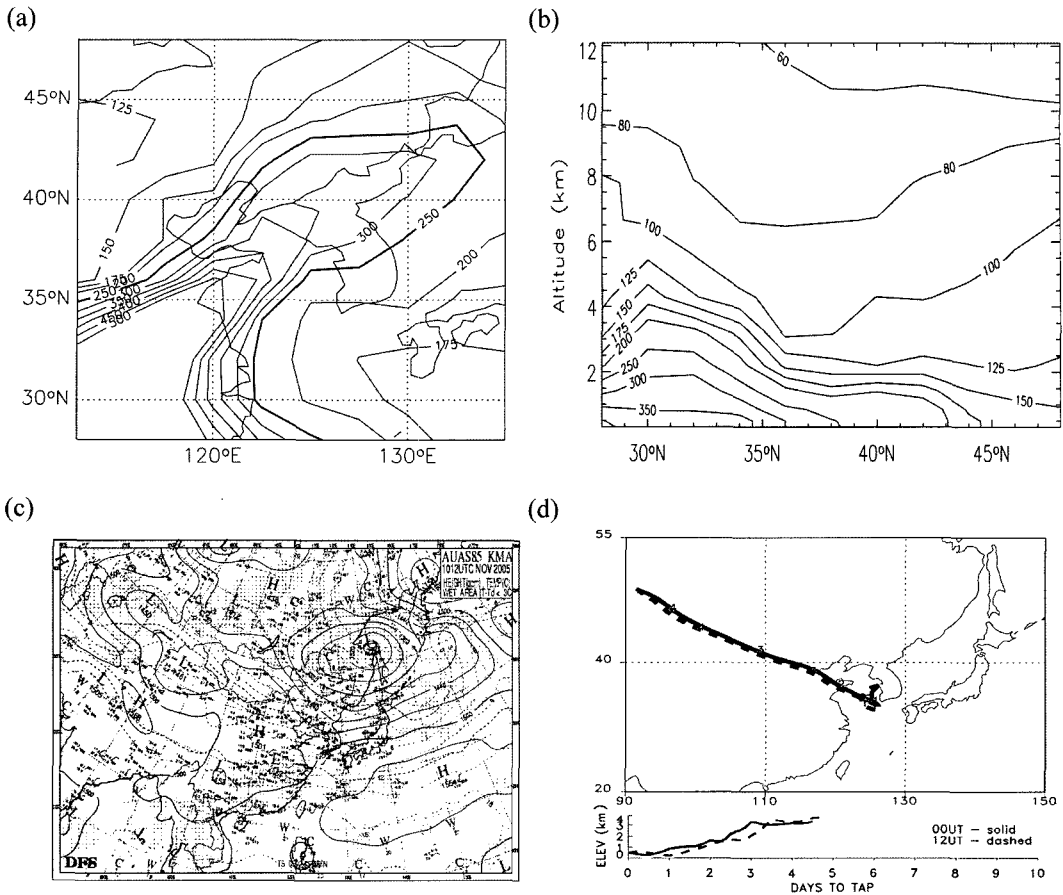


Fig. 11. Variations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, visibility, CO and SO<sub>2</sub> observed at Chongwon during 10~12 November 2005.



**Fig. 12.** (a) Model simulation of CO concentrations at 930 hPa (700 m), (d) zonal average (Latitude: 28~48N, Longitude: 113~135E) of CO concentrations conducted using by GEOS-CHEM global three-dimensional model of tropospheric chemistry, (c) a 850 hPa meteorological map by Korea Meteorological Administration and (d) trajectories arriving at TAP on 10 November 2005.

**2006년 1월 27일 사례**

Figure 13은 2006년 1월 27일 NOAA 18(1435 LST) 위성 영상이다. 광역적 대기오염은 산둥 반도 북쪽으로부터 27일 10:55 LST 충남에 이르렀다가 14:35 LST 이후 전북과 전남으로 이동하였다.

Table 2는 1월 27~28일 청원, 충남, 전북, 전남, 제주, 서귀포에서 관측한 PM<sub>10</sub>의 시간별 변동을 보여 주고 있다. 충북 청원은 27일 10~11 LST에 PM<sub>10</sub> 78 µg m<sup>-3</sup>가 21 LST에 110 µg m<sup>-3</sup>로 증가되었으며, 환경부의 충남 관측소 평균은 15~21 LST에 108~118 µg m<sup>-3</sup>로 증가되었다. 전북의 PM<sub>10</sub> 평균 최고 농도는 충남보다 많은 100~145 µg m<sup>-3</sup>이었고, 전남의 PM<sub>10</sub> 평균 최고 농도는 황해의 광역적 대기오염과 함께 107~154 µg m<sup>-3</sup>를 기록하였다.

위성 영상에서 오염 강도가 큰 제주시의 최고

PM<sub>10</sub>은 200~227 µg m<sup>-3</sup>로서 황사와 같은 농도를 보여준다. 그러나, 풍하측인 서귀포의 최고 농도는 137~167 µg m<sup>-3</sup>로서, 제주 보다 낮은 것은 소용돌이의 영향이다. 서귀포 쪽에는 지형성 하강기류에 의하여 수렴기류가 건조하고 구름이 소산되었으며, 오염 물질들이 다소 확산 및 침전되어 PM<sub>10</sub>이 제주보다 훨씬 낮았다. GEOS-CHEM 모델 시뮬레이션에 의한 Fig. 14a의 930 hPa(700 m)에서는 중국 동부지역으로부터 황해를 거쳐 한반도 그리고 일본 남서지역까지 250 ppb 이상의 농도가 분포하고 있다. 또한 Fig. 14b의 위도별 평균 CO의 고도분포에서 32~35°N의 지표가까이 500 ppb 이상이 집중되어 있으며, 고도 3 km까지 125 ppb로 확산되어 있다.

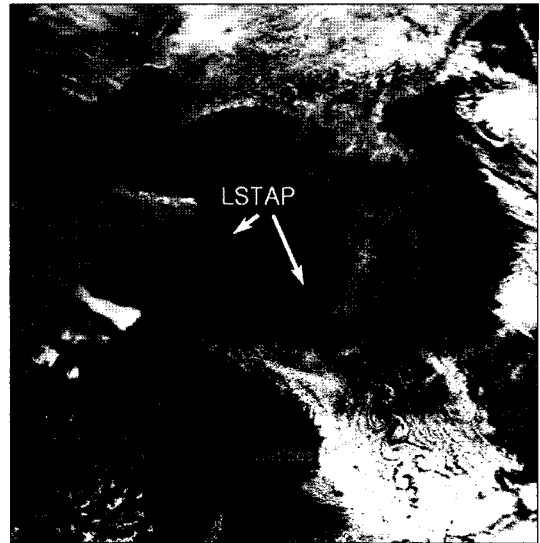
Figure 14c는 2006년 1월 27일 지상 일기도이다. 당시 대륙성 고기압이 남만주에 위치하여 등압선은

**Table 2.** Dust concentrations ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) in  $\text{PM}_{10}$  measured in Chongwon, Choongnam, Chonbook, Chonnam, Jeju and Seogueepo during 27-28 January 2006

Hour	Chong-won	Choong-nam	Chon-book	Chon-nam	Jeju	Seogueepo
1	70	92	87	80	91	124
2	69	86	92	71	91	112
3	67	84	93	74	90	111
4	71	79	89	79	90	109
5	73	74	95	77	78	114
6	74	67	95	73	87	122
7	74	59	94	78	83	112
8	74	56	102	87	86	114
9	75	65	110	107	99	167
10	78	84	112	125	116	107
11	78	94	116	148	124	86
12	75	97	111	154	132	84
13	74	98	110	137	139	81
14	73	99	100	141	146	101
15	75	108	119	154	166	92
16	61	111	131	151	165	101
17	68	113	131	144	227	93
18	54	92	136	134	184	114
19	78	111	138	122	200	127
20	103	113	145	116	199	137
21	110	118	135	114	165	124
22	103	110	131	115	110	109
23	94	104	126	113	87	101
24	87	91	123	108	93	93
1	84	78	114	105	85	80
2	80	88	131	102	64	58
3	78	89	108	96	61	35
4	70	85	112	92	55	35
5	78	82	112	90	58	23
6	91	84	124	90	57	17
7	93	81	122	85	55	15
8	85	89	118	87	49	17

북-남으로 놓여 있었고 바람은 대체적으로 북북서풍이 제주도에 불었다. 황해 연안은 짙은 안개와 박무로 기상 관측이 되었다. Fig. 14d는 850 hPa 일기도며, 제주도는 마루 우측에서 북북서풍이  $15 \text{ ms}^{-1}$ 로 지속적으로 불고 있었다.

Figure 15는 제주의 단열선도를 보여준다. 0000 UT 와 1200 UT 에 850 hPa 이하는 고도에 따라 북풍이 북북서로 바뀌었다. 대체적으로, 925 hPa(1,270 m)에서 740 hPa(2,500 m)까지 기류가 매우 안정하였으므로 소용돌이 구름은 이 층 사이에서 형성된 것으로 분석된다.

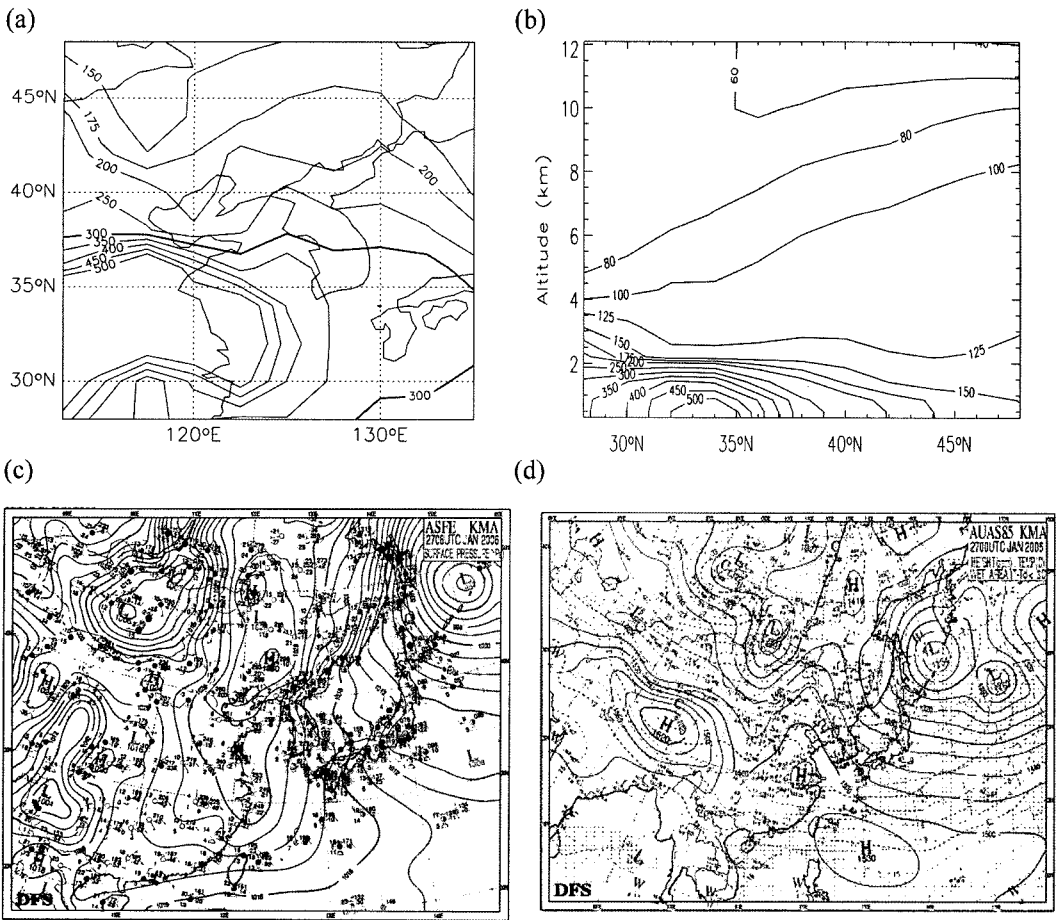


**Fig. 13.** Satellite image of NOAA 18 (1435 LST, 27 January 2006) showing large-scale transport of air pollutants (LSTAP) over the Yellow Sea moving to SW Korea and crossing to Jeju Island (Hanra Mts) producing von Kármán vortices.

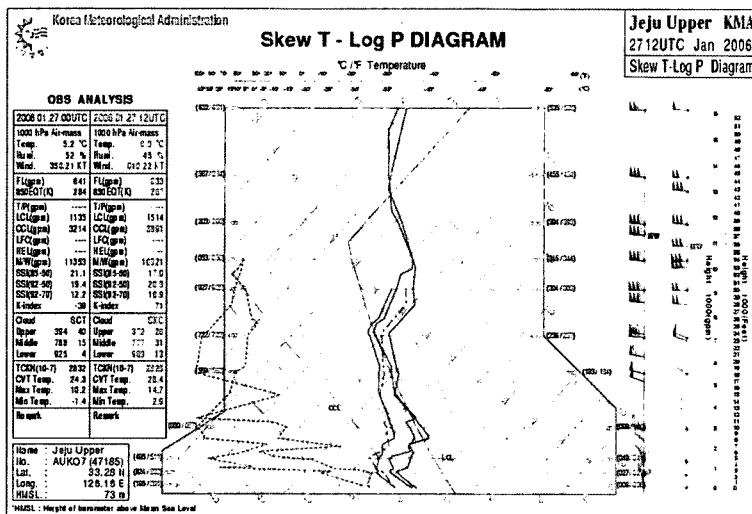
## 결론

이 연구는 동아시아에서 광역적인 대기오염 이동과 한반도 유입을 관측, 분석 및 확인하였다. 여기에 논의된 5개 사례에서  $\text{PM}_{10}$ 과  $\text{PM}_{2.5}$  차이가 적고  $\text{PM}_{2.5}$  값이 비교적 높다. 그러나, 자연적으로 발생하는 황사의 경우는  $\text{PM}_{10}$ 이 훨씬 높게 관측된 반면  $\text{PM}_{2.5}$  농도가 낮아 두 값의 차이가 매우 큼이 특징이다.

NOAA-N 위성 영상은 가시영역과 적외선 영역의 3개 채널을 합성해서 false color composite 기술로 얻어낸 결과이며(Chung and Le, 1984), 일반적인 구름과 광역적 대기오염을 분별하여 분석 할 수 있었다. 등온위 후진체적은 광역적 대기오염의 이동경로 추적과 지상 대기오염의 관측 자료는 위성자료와 비교 검증하는데 매우 가치가 있었다.  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ 뿐 아니라  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ 의 농도가 광역적 대기오염의 이동과 한반도 유입에 따라 증가하는 것을 확인하였다. GEOS-CHEM 모델 시뮬레이션은 위성영상의 광역적 대기오염 이동과 비슷한  $\text{CO}$  농도 분포를 확인했고, 대기오염이 지표면으로부터 최고 8 km 고도까지 확산되어 있었다. 그러므로, 여기 포함된 사례는 동아시아 대륙, 주로 중국의 도시와 산업 지



**Fig. 14.** (a) Model simulation of CO concentrations at 930 hPa (700 m), (b) zonal average (Latitude: 28–48N, Longitude: 113–135E) of CO concentrations conducted using by GEOS-CHEM global three-dimensional model of tropospheric chemistry, (c) a surface meteorological map and (d) 850 hPa map by Korea Meteorological Administration on 27 January 2006.



**Fig. 15.** An upper-air sounding chart at Jeju (27 January 2006).

대에서 배출된 오염물질들이 황해를 지나 한반도에 상륙 및 통과하는 광역적인 대기오염이다.

특히, 2006년 1월 27일 광역적 대기오염의 한반도 중부 및 남서 지역 유입을 비교적 정확히 관측할 수 있었다. 제주도 한라산을 넘어 지나가는 기류는 풍하측 멀리까지 구름을 소산시키고 대기오염 물질을 감소시킬 뿐 만 아니라 남쪽 500 km 이상까지 von Kármán 이 발견한 소용돌이를 제조하였다.

## 사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-3103)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

김학성, 정용승, 2006, 1991~2004년 동아시아에서 관측한 일산화탄소의 배경농도. 한국지구과학회지, 27(6), 643-652.

정용승, 김태균, 1991, 대기오염의 장거리 이동 사례연구: 황사, TSP, Sulphate의 발원지 추적. 한국대기보전학회지, 7(3), 197-202.

Bey, I., Jacob, D.J., Yantosca, R.M., Logan, J.A., Field, B.D., Fiore, A.M., Li, Q., Liu, H.Y., Mickley, L.J., and Schultz, M.G., 2001, Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation. Journal of Geophysical Research, 106, 23073-23096.

Chung Y.S., 1986, Air pollution detection by satellites: The

transport and deposition of air pollutants over ocean. Atmospheric Environment, 20, 617-630.

Chung Y.S., 1992, On the observations of yellow sand in Korea. Atmospheric Environment, 26A, 2743-2749.

Chung, Y.S., Gallant, A., Fanaki, F., and Millan, M., 1981, On the observations of Mount St. Helens volcanic emissions. Atmospheric-Ocean, 19, 172-178.

Chung, Y.S. and Le, H.V., 1984, Detection of forest-fire smoke plumes by satellite image. Atmospheric Environment, 18, 2143-2151.

Chung, Y.S., Kim, H.S., and Park, K.H., 2001, Acidic precipitation and large-scale transport of air pollutants observed in Korea. Water, Air, and Soil Pollution, 130, 367-372.

Chung, Y.S., Kim, H.S., and Kim, Y.S., 2003, On large-scale air pollution in the Yellow Sea region: Satellite and ground measurements. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 19, 83-88.

Chung, Y.S., Kim, H.S., Park, K.H., Dulam, J., and Gao, T., 2005, Observations of duststorms in China, Mongolia and associated dustfalls in Korea in Spring 2003. Water, Air and Soil Pollution: Focus 5 (3-6), 15-35.

Harris, J.M., 1982, The GMCC atmospheric trajectory program, NOAA Environmental Research Laboratories, NOAA Tech Memo, ERL-ARL-116, 30 p.

Kim, H.S. and Chung, Y.S., 2005, On surface ozone associated with long-range transport in the Yellow Sea region. Water, Air and Soil Pollution, 142, 1-18.

Novelli, P.C., Masarie, K.A., and Lang, P.M., 1998, Distributions and recent changes of carbon monoxide in the lower troposphere. Journal of Geophysical Research, 103 (D15), 19015-19033.

2007년 1월 25일 접수  
 2007년 1월 31일 수정원고 접수  
 2007년 2월 5일 채택