

1991~2004년 동아시아에서 관측한 일산화탄소의 지역적 배경 농도

김학성^{1,*} · 정용승²

¹한국교원대학교 지구과학교육과, 363-791, 충북 청원군 강내면 다락리 산 7

²한·중대기과학연구소, 363-891, 충북 청원군 강내면 궁현리 304

Regional Background Levels of Carbon Monoxide Observed in East Asia during 1991~2004

Hak-Sung Kim^{1,*} and Yong-Seung Chung²

¹Department of Earth Science Education, Korea National University of Education, Chungbuk 363-791, Korea

²Korea-China Centre for Atmospheric Research, Chungbuk 363-891, Korea

Abstract: Data of the carbon monoxide concentration observed in Mt. Waliguan in China (WLG), Ulaan Uul in Mongolia (UUM), Tae-ahn Peninsula in Korea (TAP), and Ryori in Japan (RYO) were analyzed for a long period between 1991 and 2004. The annual average concentration of carbon monoxide was the highest at TAP (233 ± 41 ppb) followed by RYO (171 ± 36 ppb), UUM (155 ± 26 ppb), and WLG (135 ± 22 ppb). The seasonal variations being high in spring and low in summer were observed in other areas of Eastern Asia except WLG. TAP was high in carbon monoxide concentration in all seasons compared to WLG, UUM and RYO and shows wide distribution of concentration in the histogram, which is caused by the influence of large-scale air pollution due to its downwind location close to the East Asian continent, China in particular. Also, our data was compared with data measured at Mauna Loa (MLO) in Hawaii. According to the origin of the isentropic backward trajectory and its transport passage, carbon monoxide concentration observed in TAP was analyzed as follows: continental background airflows (CBG) were 216 ± 47 ppb; regionally polluted continental airflows (RPC) were 316 ± 56 ppb; Oceanic background airflows (OBG) were 108 ± 41 ppb; and Partly perturbed oceanic airflows (PPO) were 161 ± 6 ppb. The high concentration of carbon monoxide in TAP is due to the airflow from East Asian continent origin rather than that from the North Pacific origin. Especially, RPC which passes through the eastern China appeared to be the highest in concentration in spring, fall, and winter. However, OBG was affected by the North Pacific air mass with a low carbon monoxide concentration in summer. The NOAA satellite images and GEOS-CHEM model simulation confirmed a large-scale air pollution event that was in the course of expansion from southeastern China bound to the Korean Peninsula and the Korea East Sea by way of the Yellow Sea.

Keywords: carbon monoxide, regional background level, large-scale air pollution, trajectory analysis, satellite image

요약: 동아시아에서 일산화탄소의 지역적 배경 농도 수준을 분석하기 위해, 1991년부터 2004년까지 장기간 중국 Waliguan(WLG), 몽골어의 Ulaan Uul(UUM), 한국의 태안반도(TAP), 일본의 Ryori(RYO)에서 관측한 일산화탄소 농도를 분석하였다. 연평균 일산화탄소 농도는 WLG(135 ± 22 ppb), UUM(155 ± 26 ppb), RYO(171 ± 36 ppb), TAP(233 ± 41 ppb) 순서로 높은 농도를 보이고 있었다. WLG를 제외하고 전체적으로 봄철에 높고 여름철에 낮은 계절 변동의 특징은 동아시아 다른 지점들에서도 공통적으로 나타나고 있다. TAP는 WLG, UUM, RYO와 비교하여 전체 계절에 높은 일산화탄소 농도를 보이고 있으며 히스토그램에서 넓은 농도 분포를 보이는데 동아시아 대륙, 특히 중국의 가까운 풍하측에 위치하고 있어 광역적 대기 오염의 영향이 크기 때문이다. TAP는 중국 동부 지역을 경유하는 RPC가 봄, 가을, 겨울에서 높은 농도를 나타내었고, 여름철에는 저위도 북태평양으로부터의 OBG에 의해 낮은 일산화탄소 농

*Corresponding author: enviro07@knue.ac.kr

Tel: 82-43-230-3777

Fax: 82-43-232-7176

도를 갖고 있는 해양성 기단의 영향을 받고 있다. NOAA 위성 영상과 GEOS-CHEM 모델 시뮬레이션은 중국 남동부 연안으로부터 황해를 거쳐 한반도와 동해로 확산하고 있는 광역적 대기오염 이동 사례를 확인하고 있다.

주요어: 일산화탄소, 지역적 배경 농도, 광역적 대기 오염, 등온위 후진 궤적, 위성 영상

서 론

중국, 한국, 일본을 포함하는 동아시아 지역은 세계 제 3대 공업지역 중 하나로 이 지역에서 인위적 배출량은 해마다 꾸준히 증가해 오고 있다(Streets et al., 2001). 인위적 배출 중 일산화탄소는 아시아 지역에서 2000년에 배출량이 279 Tg이었고, 이 중 중국에서는 116 Tg으로 42%를 차지하고 있다(Streets et al., 2003). 일산화탄소는 대기 중에서 OH와의 반응에 의해 90~95%가 제거되지만(Logan et al., 1981), 동아시아 지역에서는 배출량이 많고 2개월의 긴 생존기간(Novelli et al., 1998) 때문에 장거리 이동에 의해 공간적으로 광역적인 분포를 나타내게 된다.

동아시아 대륙, 특히 중국에서 광역적으로 배출된 대기오염물질이 수 백~수 천 km의 장거리 이동을 통해 한국에 영향을 주고 있음이 인식되고 있다(Chung et al., 2001, 2003; Kim and Chung, 2005). 또한 일본과 북태평양 그리고 북미 서해안 지역에서도 일산화탄소의 지상관측은 동아시아에서 광역적인 배출과 장거리 이동이 영향을 주고 있음을 밝히고 있다(Akimoto et al., 1996; Jaffe et al., 1997; Liang et al., 2004; Pochanart et al., 2004). 따라서 동아시아 지역의 대기 화학성분과 이동의 특성을 밝히고자 집중적인 관측 캠페인이 수행되어 왔다(Hoell et al., 1996, 1997; Huebert et al., 2003; Jacob et al., 2003).

배경관측지점에서 장기간 지속적인 관측은 장거리 이동에 따른 대기성분의 변동에 관한 가치 있는 조사 결과를 얻을 수 있다. 일반적으로 지구적인 규모의 일산화탄소 배경 농도는 남반구에서부터 북반구로 높아지고, 특히 북반구의 고위도에서 낮은 저위도에서 이른 봄에 최대 농도를 보이는 것으로 조사되었다(Novelli et al., 1998). 그러나 본 연구는 주로 서풍 기류의 영향을 받고 있으며 일산화탄소의 배출이 많은 동아시아에서 장기간 관측자료를 바탕으로 일산화탄소의 지역적 배경 농도 수준에 초점을 맞추고 있다. 동아시아 대륙, 특히 중국에 가까운 위치에 놓여 있는 한반도의 태안에서 일산화탄소의 지역적 배경농

도 수준에 대한 조사는 1990년대 초에 이루어졌다(정용승과 이근준, 1993). 여기에 더하여 2004년까지 장기간 관측한 일산화탄소의 지역적 배경농도 수준의 특성을 동아시아 지역에서 기류의 이동 경로에 따라 조사할 필요가 있다.

자료 및 분석

Fig. 1은 동아시아 지역에서 관측지점들의 지리적 위치를 나타내고 있다. 미국 NOAA/ESRL(National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory) CCGG(Carbon Cycle Greenhouse Gases group)은 전 세계 63개 지점에서 관측하고 있으며, 동아시아에서는 한국의 TAP, 몽골 이아의 UUM, 중국의 WLG 관측소를 공동 운영하고 있다. 또한 일본 기상청에서는 RYO 관측소를 운영하고 있다. 각 관측지점에 대한 자세한 설명은 Table 1에 요약하였다. WLG, UUM은 TAP, RYO와 비교하여 동아시아 대륙의 풍상측에 위치하고 있으며, TAP는 한반도의 서쪽 끝 해안에 위치하고 있으며 중국의 대기오염 배출과 장거리 이동의 영향을 크게 받고 있는 관측지점 이다(Chung et al., 2001; Kim and Chung, 2005).

일산화탄소 농도를 관측하기 위한 공기 채집은 미국 NOAA/ESRL에서 제공한 Martin and Kitzis Sampler를 사용하여 flask에 공기를 넣는 flask air sampling 방법을 사용하였으며, TSP에서는 1990년부터 일주일에 1~2회를 하루 중 12~16 LST에 수행하였다. 채집된 공기는 미국 NOAA/ESRL로 보내지고 분석되어 일산화탄소 농도 값이 얻어진다. 또한 CO₂, CH₄ 등의 농도가 분석되고 있으며, 1990년대 초부터 TAP에서 관측한 이러한 기체성분의 지역적 배경농도에 관한 연구가 이루어 졌다(이근준과 정용승, 1993; 정용승과 이근준, 1992). 채집된 공기의 분석에 관한 자세한 내용은 Novelli et al.(1998)에 의해 기술되어 있으며, 본 연구에서는 1991년부터 2004년까지 NOAA/ESRL에서 분석한 TAP, WLG, UUM의 일산화탄소 농도 자료를 이용하였다. 또한 RYO의 일산화탄소

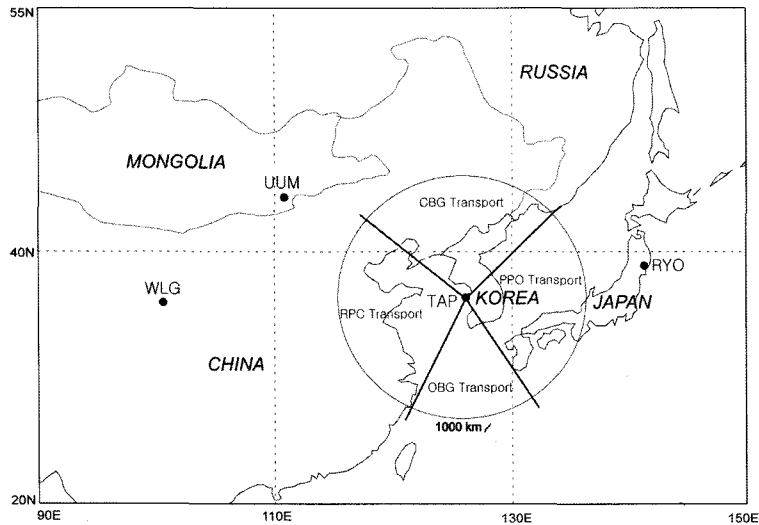


Fig. 1. Locations of the background sites in the East Asian region. Passages of the airflows arriving at TAP are classified to the continental background (CBG) transport, regionally polluted continental (RPC) transport, oceanic background (OBG) transport, and partly perturbed oceanic (PPO) transport.

농도는 일본 기상청의 자료를 이용하였다.

동아시아 지역에서 기류의 이동경로에 따라 일산화탄소의 지역적 배경농도 수준을 분석하기 위해 1991년부터 2004년까지 TAP에서 관측한 일산화탄소 농도와 등온위 후진케적을 분석하였다. 등온위 후진케적은 NOAA/ESRL의 모델로써 Harris(1982)에 의해 개발된 것으로, TAP에서 공기 채집을 수행한 날 09 LST에 도착하는 등온위 후진케적을 분석에 이용하였다. TAP에 도착하는 등온위 후진케적은 발생 지역과 그리고 TAP를 중심으로 약 1,000 km 거리에서부터의 이동경로에 따라 네 가지로 분류하였다(Fig. 1). 이 때 등온위 후진케적의 경로가 이동 중 회전을 하는 것은 분석에서 제외하였다. 동아시아 지역은 계절풍에 따른 시베리아의 대륙성 기류와 북태평양으로부터의 해양성 기류의 계절적 변화가 뚜렷하다. 따라서 등온위 후진케적을 발생지역에 따라 대륙성과 해양성으로 구분하였고 그 구분이 명확하지 않은 것은 제외하였다.

대륙성 기류의 등온위 후진케적은 동아시아 지역의

일산화탄소 배출량 분포(Liang et al., 2004)와 TAP에 도착하기 전 이동경로에 따라 두 가지로 구분하였다. 대륙성 기류의 등온위 후진케적은 유라시아 대륙의 북동부, 시베리아 대륙의 동부에서 발원하여 한반도의 북북동~북서 지역으로부터 TAP에 유입하는 CBG와 시베리아 대륙과 위도가 더 낮은 지역에서 발원하여 중국 발해만 남쪽의 동부지역과 황해를 지나 태안에 유입하는 RPC로 분류하였다. CBG는 산업적인 일산화탄소의 배출이 많은 지역을 경유하지 않기 때문에 배경적 이라고 고려될 수 있는 반면 RPC는 중국 동부의 산업 지역을 경유하고 있다. 중국 동부에는 화북공업지역, 상하이 공업지역이 위치하고 있으며 베이징, 톈진, 상하이 등의 대도시가 있어 인구밀도가 가장 높은 지역이기도 하다. Kim and Chung(2005)은 TAP에서 관측된 오존의 농도를 등온위 후진케적의 경로에 따라 대륙성 배경농도와 광역적으로 오염된 농도 수준으로 분류하였다. 대륙성 기류는 주로 봄, 가을, 겨울철에 나타난다. 해양성 기류의 등온위 후진케적은 북태평양의 서부에서 발원하여

Table 1. Details of the background sites in the East Asian region

Station Name	Country	Latitude	Longitude	Altitude (a. s. l)
WLG	China	36° 17' N	100° 54' E	3810 m
UUM	Mongolia	44° 27' N	111° 05' E	914 m
TAP	Korea	36° 43' N	126° 07' E	20 m
RYO	Japan	39° 02' N	141° 49' E	260 m

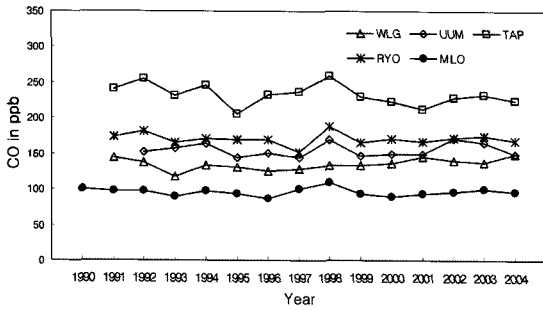


Fig. 2. Annual mean CO concentrations at Mt. Waliguan (WLG) in China, Ulaan Uul in Mongolia (UUM), Tac-ahn Peninsula (TAP) in Korea, Ryori (RYO) in Japan, and Mauna Loa (MLO) in Hawaii for 1990~2004.

동중국해와 황해를 경유하여 TAP에 도착하는 OBG와 일본과 한국을 경유하는 PPO로 분류하였다. 태평양인 저위도의 해양성 기류는 주로 여름철에 나타나고 있으며 일산화탄소를 적게 함유하고 있다.

분석 결과 및 논의

동아시아의 지역적 일산화탄소 농도 분포

Fig. 2는 중국의 WLG, 몽골리아의 UUM, 한국의 TAP, 일본의 RYO 그리고 하와이 MLO에서 1990~2004년에 관측된 일산화탄소 농도의 연평균 변동을 보이고 있다. 동아시아 지역은 지구 배경 관측 지점인 하와이 MLO(19.54°N, 155.58°W, 3397 m)의 96 ± 19 ppb와 비교하여 높은 농도를 보이고 있으며, WLG(135 ± 22 ppb), UUM(155 ± 26 ppb), RYO(171 ± 36 ppb), TAP(233 ± 41 ppb) 순서로 높은 농도를 보이고 있다. TAP와 WLG는 비슷한 위도에 위치하여 있지만, WLG는 동아시아 대륙의 풍상측에 있다. 반면 TAP는 중국 동부 지역으로부터 황해를 사이에 두고 350~700 km의 풍하측에 위치하며 서풍의 영향을 받고 있기 때문에 가장 높은 일산화탄소 농도 수준을 보이고 있다. UUM은 중국 오염발생원의 풍상측에 위치하고 있어 TAP 보다는 낮지만 WLG 보다는 높은 일산화탄소 농도 수준을 보이고 있다. 일본의 RYO는 TAP 보다 동아시아 대륙으로부터 더 동쪽의 풍하측에 위치하여 TAP 보다 낮은 농도 수준을 보여준다. 연별 변동 중 1998년에는 MLO 뿐 아니라 UUM, TAP, RYO에서 일산화탄소의 농도가 높게 관측 되었는데, 이것은 한국의 중부 농촌 지역인 청원에서 오존 농도의 연별 변동 경향에서도 분석되

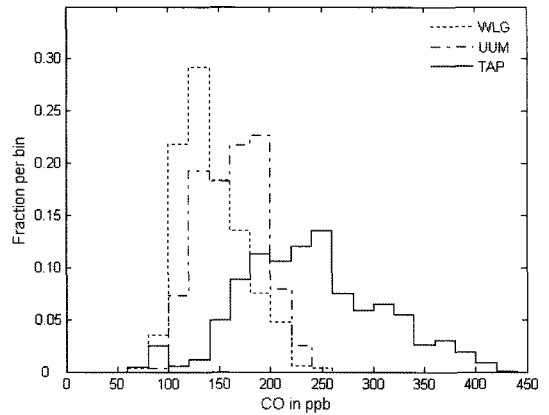


Fig. 3. Histograms of CO concentrations measured at TAP, UUM, and WLG for 1991~2004.

었다(Kim and Chung, 2003). 1998년 시베리아에서는 산불이 다른 해와 비교하여 많이 발생했는데, Kato et al.(2002)은 일본의 Happo에서 1998년 관측한 일산화탄소의 농도와 오존 농도가 시베리아에서 발생한 산불에 의한 장거리 이동 영향으로 각각 ~30 ppb, ~7 ppb 증가 했음을 제시하고 있다. 또한, 1998년 TAP에 도착하는 CBG 등은위 후진계적은 시베리아로부터 낮은 고도의 이동경로를 보이고 있었다.

Fig. 3은 TAP, UUM, WLG에서 1991~2004년에 관측한 일산화탄소 농도를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 세 지역의 차이가 명확하게 나타나고 있다. WLG에서 히스토그램이 좁은 분포 범위를 보이는 것은 관측된 일산화탄소 농도가 거의 일정함을 보이는 것이다. 반면, TAP에서는 넓은 분포 범위를 보이고 있는데, 광역적 대기오염의 영향을 받고 있기 때문이다. UUM에서 일산화탄소의 농도 분포가 WLG와 TAP의 사이지만 모양이 WLG와 비슷하다.

동아시아 지역의 일산화탄소 농도 계절 변동

Fig. 4는 중국의 WLG, 몽골리아의 UUM, 한국의 TAP, 일본의 RYO와 하와이의 MLO에서 1990~2004년에 관측한 일산화탄소 농도의 월평균 변동을 보여 주고 있다. 동아시아의 WLG, UUM, TAP 모두 하와이의 MLO 보다 높은 농도 수준을 보여주고 있으며, 특히 TAP가 가장 높은 일산화탄소 농도를 나타내고 있다. 전체적으로 3~5월 중에 최대를 보이고, 7~8월에 최소(WLG는 11월)를 보이고 있으며, 그리고 가을과 겨울에 서서히 증가하는 모습을 보인다. 동아시아 지역에서 이러한 계절적 특징은 배출과 장거리

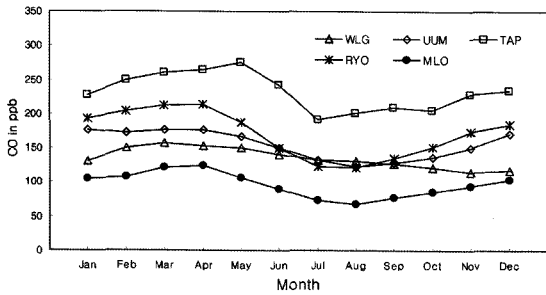


Fig. 4. Monthly mean CO concentrations at WLG, UUM, TAP, RYO, and MLO for 1990-2004.

이동 그리고 몬순에 의한 대륙성, 해양성 기단의 영향에 대한 변환과정을 반영하고 있으며 일본의 여러 지점에서의 관측결과와 비슷하다(Pochanart et al., 1999, 2004). 화석연료의 소비로 배출원으로부터 겨울과 이른 봄에 대기 중에 축적 되고 장거리 이동에 의해 높은 농도를 보이며 여름에는 저위도 지역의 태평양으로부터 일산화탄소의 농도가 낮은 기단의 영향을 받게 된다.

TAP와 RYO에서는 월 평균 일산화탄소 농도 중 최대값과 최소값의 차이가 각각 85 ppb, 92 ppb로 뚜렷한 계절 차이를 보이는데 RYO에서는 여름철 북태평양 기단의 영향을 크게 받고 있어 TAP 보다 큰 차이를 나타낸다. 반면, WLG에서는 최대값과 최소값의 차이가 42 ppb로 3월에 최대값이 나타난 후 계속적으로 꾸준히 감소하여 11월에 최소값을 나타내는데, 비슷한 위도의 TAP와 비교하면 뚜렷한 계절 변동을 보이고 있지 않는다. WLG는 동아시아 대륙의 풍상측에 위치하고 있으며, 고도가 3,810 m로 지표경계층의 영향을 적게 받고 있어 연 중 일산화탄소의 농도가 다른 지역보다 일정하게 나타나고 있다. UUM은 월 평균 일산화탄소 농도 중 최대값과 최소값의 차이가 54 ppb로 WLG와 TAP의 사이에 있다.

Fig. 5는 동아시아 지역의 TAP, UUM, WLG에서 1991~2004년에 관측한 일산화탄소 농도를 계절에 따라 히스토그램으로 나타낸 것이다. 봄은 3~5월, 여름은 6~8월, 가을은 9~11월, 겨울은 12~2월로 하였다. 세 지역에 대한 히스토그램에서 봄과 겨울에 뚜렷한

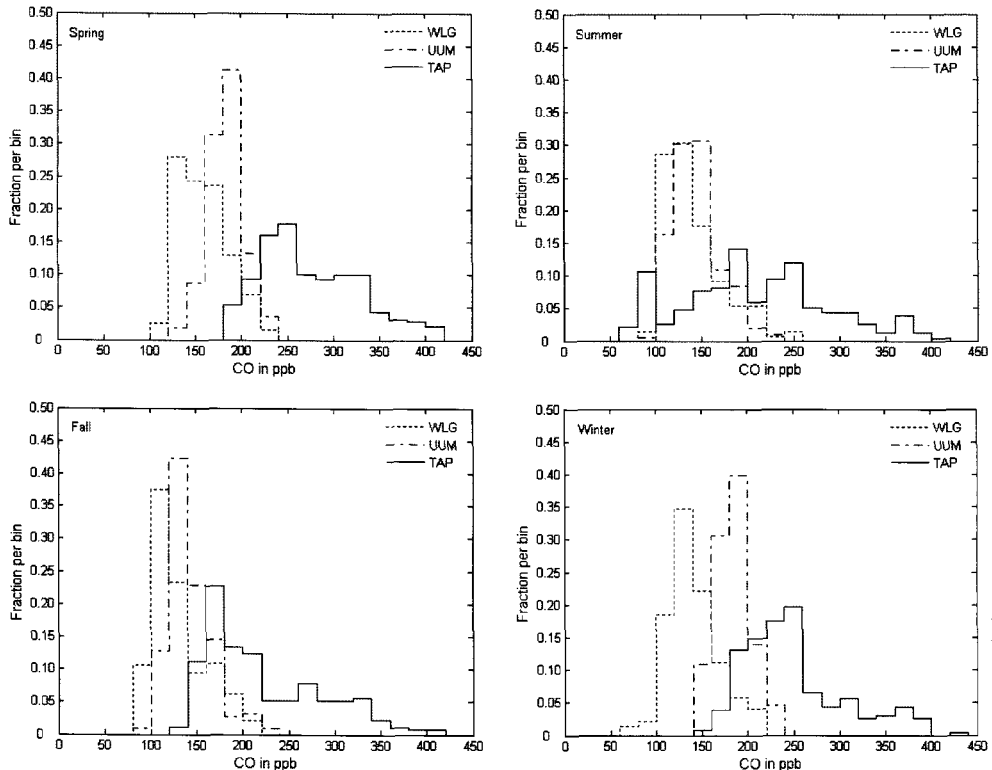


Fig. 5. Histograms of CO concentrations measured at TAP, UUM, and WLG for 1991-2004: Spring, summer, fall, and winter are March-May, June-August, September-November, and December-February, respectively.

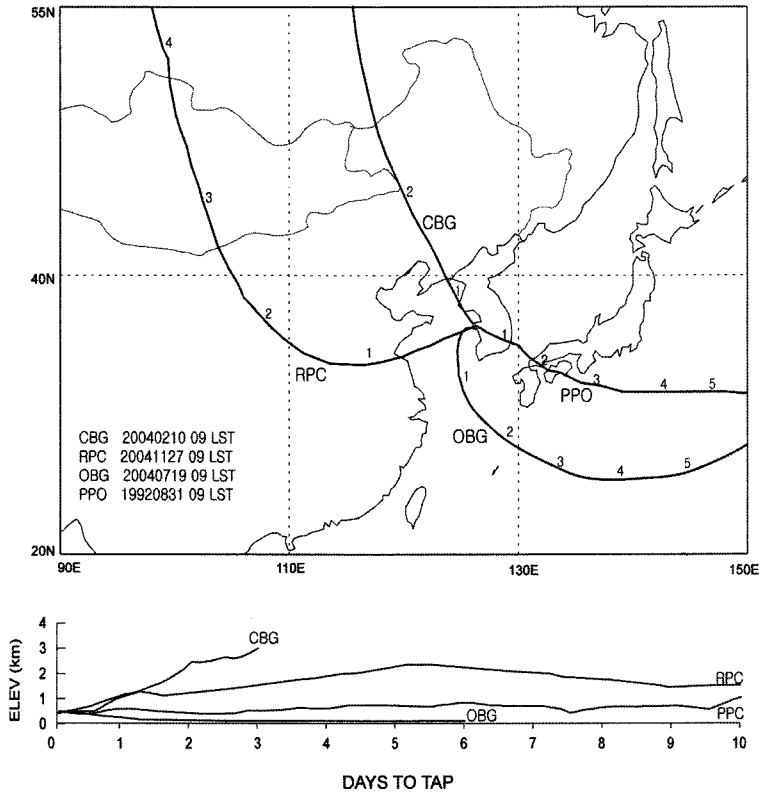


Fig. 6. Four examples of airflows arriving at TAP show the isentropic backward trajectories: CBG transport, RPC transport, OBG transport, and PPO transport.

차이를 보이고 있다. 전체 계절에서 WLJ, UUM 지역이 좁고 뾰족한 모양을 보이는 것은 일산화탄소 농도 값이 거의 일정함을 나타내는 것으로, 특히 여름과 가을철에는 거의 일치하고 있다. 반면, TAP에서 일산화탄소 농도 분포의 범위가 넓은 것은 광역적인 대기오염을 반영하는 것이며 여름철에는 높은 농도의 사례뿐 아니라 다른 계절에 비교하여 낮은 농도의 사례가 많이 나타나고 있다. 북태평양으로부터 낮은 일산화탄소 농도를 가지고 있는 해양성 기류의 영향을 많이 받고 있기 때문이다.

TAP에서 일산화탄소 농도의 등온위 후진 궤적 분석

TAP에서 1991~2004년에 관측한 일산화탄소 농도와 Fig. 1의 분류에 따라 등온위 후진궤적의 이동 경로가 명확한 것만을 선택한 242 사례에 대하여 네 가지로 분류하였고, Fig. 6은 각 유형의 대표적인 예를 보여주고 있다. 시베리아대륙에서 발원한 등온위 후진궤적은 내몽골 동부, 만주지역을 1.5 km 이상의 고도에서 빠르게 지나쳐 한반도의 북서~북북동 방향

으로부터 유입하였다. 이러한 CBG는 북서~북북서 쪽으로부터의 빈도가 높아 68%를 보였다. RPC는 시베리아 대륙으로부터 몽골리아, 중국 내륙과 동부지역 그리고 황해를 거쳐 TAP에 도착하고 있는데 19%를 나타냈다. 반면, 북태평양에서 시작된 등온위 후진궤적은 1 km 이하의 낮은 고도로 이동하고 있지만 오염 배출원을 거치지 않는 해양성 기류로 동중국해와 황해를 거쳐 TAP에 도착하는 OBG가 11%, 한국과 일본을 거치는 PPO는 2%를 나타내고 있다.

Table 2는 TAP에서 관측한 일산화탄소의 농도를 등온위 후진 궤적에 따라 분류하여 분석한 것이다. 네 가지로 분류한 일산화탄소 농도는 Kruskal-Wallis test를 통해 0.01의 유의수준 내에서 통계적으로 유의미한 차이가 있음을 보였다. 동아시아 대륙으로부터 기원하여 TAP에 도착하는 등온위 후진궤적에 의한 일산화탄소의 농도는 RPC(316 ± 56 ppb)가 CBG(216 ± 47 ppb) 보다 높게 나타났으며, 두 경로가 계절적 변동을 보이는데 RPC가 CBG 보다 전체 계절에 걸쳐 높게 나타났다. 특히, RPC에 의한 일산화탄소의

Table 2. Average CO concentrations of CBG, RPC, OBG, and PPO

(unit: ppb)

Month	CBG	RPC	OBG	PPO
Mar~May	236 ± 41	327 ± 44	-	-
Jun~Aug	-	-	101 ± 35	161 ± 6
Sep~Nov	193 ± 50	300 ± 80	187 ± 3	-
Dec~Feb	223 ± 42	315 ± 42	-	-
Average	216 ± 47	316 ± 56	108 ± 41	161 ± 6

농도는 Fig. 4의 계절 변동과 비슷하게 봄철에 최고 값을 나타냈다. 북태평양에서 기원하여 TAP에 도착하는 등온위 후진계적의 경로는 주로 여름과 일부 가을철에만 관측이 되었다. OBG(108 ± 41 ppb)는 북태평양으로부터 동중국해와 황해를 거치는 해양 위의 이동경로를 보이기 때문에 PPO(161 ± 6 ppb)의 일본이나 한반도를 거치는 경로보다 일산화탄소의 농도가 낮다. 또한 저위도의 북태평양 기단에는 일산화탄소를 적게 가지고 있기 때문에 해양성 기류에 의한 일산화탄소 농도는 대륙성 기원의 기류보다 낮다. 대기 중 일산화탄소의 농도는 OH와의 반응에 의해 소멸되기 때문에 OH의 계절적 변동에 의해 영향을 부분적으로 받을 수 있지만(Novelli et al., 1998), 배출원의 공간적 분포와 장거리 이동 그리고 계절적 변동이 더 크게 영향을 주고 있다.

황해지역에서 광역적 대기오염 이동 사례

Fig. 7은 2004년 12월 10일 황해 지역의 광역적 대기오염 이동 사례에 대한 NOAA 위성 영상(Chung et al., 2001; Chung et al., 2003), 일기도, GEOS-CHEM 모델 분석(Bey et al., 2001)을 나타낸 것이다. Fig. 7a NOAA 위성 영상은 중국 남동부 양쯔강 하류의 상하이 부근 지역으로부터 황해와 한반도 중부 지방을 거쳐 동해 북동쪽으로 확산하고 있는 광역적 대기오염(LSTAP)을 보여주고 있다. 약 15시간 전인 12월 9일 21 LST 지상일기도(Fig. 7b)에서는 한반도 중부 지방에는 북서쪽으로부터 이동하여 온 이동성 저기압의 한랭전선 전면에 위치하고 있어 중국 남동 지역으로부터 남서풍의 영향을 받기 시작했고, 이러한 중관 기상 상태는 다음 날인 12월 10일까지 지속되었다. 황해지역, 특히 중국 동부지역으로부터 한반도로 광역적 대기오염을 이동시키는 이러한 중관 기상적 패턴은 이전 연구에서도 잘 보여지고 있다(Kim and Chung, 2005).

NOAA 위성 영상에서 보여지는 광역적 대기오염의 이동은 GEOS-CHEM 모델 시뮬레이션에 의한

930 hPa(0.7 km) 일산화탄소 농도분포와도 일치하는 모습을 볼 수 있다(Fig. 7c). 930 hPa 면에서는 상하이 주변 지역이 350 ppb 이상의 농도 범위를 보이고 있으며 황해와 한반도를 거쳐 북동쪽의 동해로 확산되고 있는 지역에서는 300 ppb 이상의 농도 범위를 보이며 NOAA 위성 영상에서와 같은 광역적인 띠 모양을 나타내고 있다. Fig. 7d는 GEOS-CHEM 모델에 의해 일산화탄소의 농도를 북위 28~48°, 동경 113~135°의 지역을 고도에 따라 자오선 평균값으로 나타낸 것이다. 중국 동부 지역과 한반도 위에서는 평균 250 ppb 이상의 농도를 보이고 있다. 또한 3 km 이상 고도에서는 등치선의 간격이 넓어지고 있는 반면 고도 1~3 km에는 일산화탄소 농도 125~200 ppb의 등치선이 집중되어 있어, 대기오염이 광역적으로 이동하는 고도 분포를 나타내고 있다.

결론

동아시아에서 일산화탄소의 지역적 배경 농도 수준을 분석하기 위해, 1991년부터 2004년까지 중국의 WLJ, 몽골리아의 UUM, 한국의 TAP, 일본의 RYO에서 장기간 관측한 일산화탄소 농도를 분석하였다. 연평균 일산화탄소 농도는 WLJ 135 ± 22 ppb, UUM 155 ± 26 ppb, RYO 171 ± 36 ppb, TAP 233 ± 41 ppb 순서로 높은 농도를 보이고 있다.

일산화탄소 농도의 계절 변동에서 WLJ를 제외하고 봄철에 높고 여름철에 낮은 모습을 보이는데 일본의 다른 지점에서의 관측과 비슷하다. TAP는 다른 지역에 비하여 전체 계절에 높은 농도를 보이고 있다. 봄, 겨울철에 대기 중에 축적과 장거리 이동 그리고 동아시아 몬순이 일산화탄소 농도의 계절 변동에 영향을 주고 있다. 일산화탄소 농도의 계절에 따른 히스토그램의 분석에서 TAP, UUM, WLJ 세 지역이 봄과 겨울에 뚜렷한 차이를 보이고 있었다. WLJ, UUM에서는 히스토그램 범위가 좁게 나타나는데 일산화탄소 농도가 거의 일정하기 때문이다. 반면,

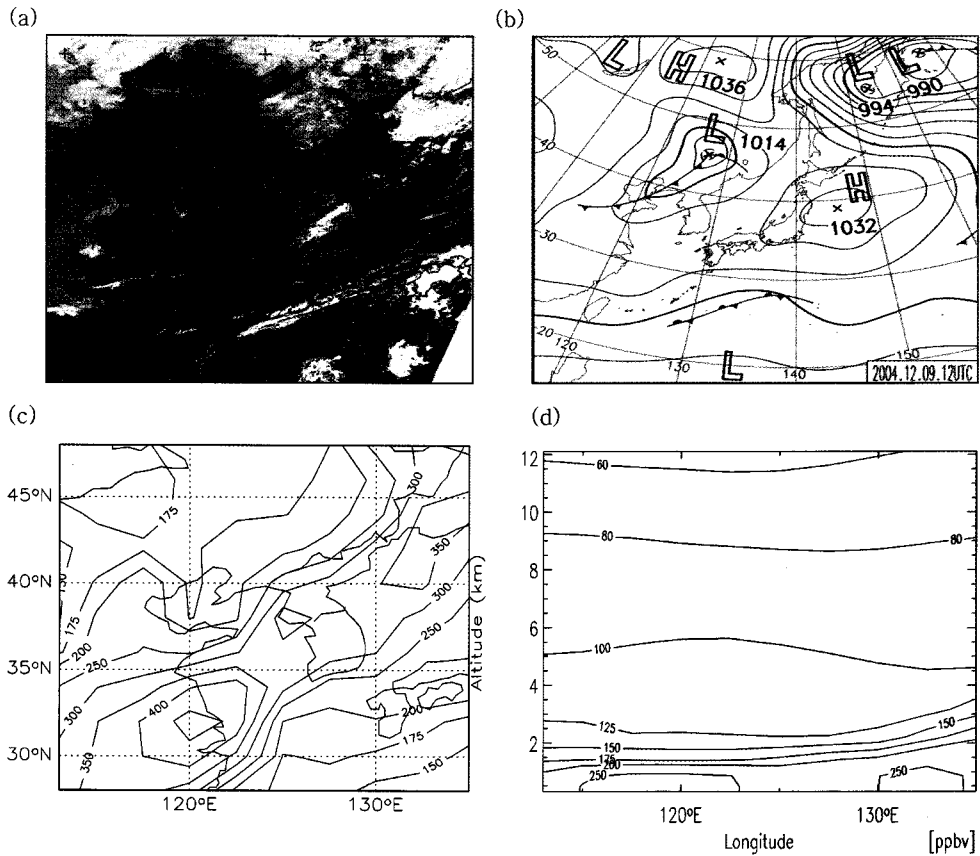


Fig. 7. (a) Satellite image of NOAA 17 (1141 LST, 10 Dec. 2004) showing a large-scale transport of air pollution (LSTAP) over the Yellow Sea, Korea and Korea East Sea. (b) A meteorological map showing the movement of airflow from southeast of China to Korea East Sea. (c) Model simulation of CO concentrations at 930 hPa (0.7 km), and (d) meridional average (Latitude: 28~48N, Longitude: 113~135E) of CO concentrations conducted using by GEOS-CHEM global three-dimensional model of tropospheric chemistry (<http://www-as.harvard.edu/chemistry/trop/geos/>).

TAP에서는 WLJ, UUM 보다 농도 분포 범위가 넓고 특히 여름에는 높은 농도뿐 아니라 낮은 농도의 빈도가 높게 관측되었다. 지리적으로 WLJ와 UUM은 TAP, RYO와 비슷한 위도 분포를 보이며 동아시아 대륙의 풍상측에 위치하고 있는 반면, TAP는 중국으로부터 350~700 km의 풍하측에 위치하고 있어 다른 지역보다 광역적 대기 오염의 영향을 크게 받고 있다.

한반도의 배경관측 지점인 TAP에서 일산화탄소 농도는 등온위 후진 궤적의 분석에 따라 네 가지 수준으로 분류된다. 동아시아 대륙으로부터 발원하여 BCG와 RPC 경로에 의해 일산화탄소 농도는 각각 216 ± 47 ppb와 316 ± 56 ppb를 나타내었다. 대륙성 기원의 이동 경로는 주로 봄, 가을, 겨울에 관측되었으며 RPC에 의한 일산화탄소 농도는 CBG와 비교하여 중

국 동부의 산업 지역을 거치기 때문에 전체 계절에서 높게 나타났다. 저위도인 북태평양으로부터 기원하여 해양 위를 이동하는 OBG는 108 ± 41 ppb, 한국 또는 일본을 거치는 PPO는 161 ± 6 ppb를 나타내었으며, 주로 여름철에 관측되었다.

고위도 시베리아 대륙에서 발원하여 TAP에 영향을 주고 있는 기류에 의한 일산화탄소의 농도가 저위도 북태평양으로부터의 경로보다 높은 것은 북반구의 고위도에서 지구적인 규모의 일산화탄소 배경농도 수준이 높게 나타나고 있는 조사와 일치한다. 그러나 NOAA 위성 영상과 GEOS-CHEM 모델 시뮬레이션을 통한 사례 분석은 TAP가 동아시아 대륙, 특히 중국으로부터 광역적 대기 오염 이동의 영향을 받고 있음을 보여준다.

사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-3103)과 2005년도 한국고원대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 이근준, 정용승, 1993, 한국의 태안반도에서 관측된 이산화탄소의 배경농도에 관한 연구: 1990~1992년 자료를 중심으로. 한국대기보전학회지, 9(1), 61-68.
- 정용승, 이근준, 1992, 한국의 태안반도에서 관측된 CH_4 의 지역적 배경농도에 관한 연구: 1990~1992년 자료를 중심으로. 한국대기보전학회지, 1(2), 33-48.
- 정용승, 이근준, 1993, 한국의 태안반도에서 관측된 CO의 지역적 배경농도에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 9(3), 200-206.
- Akimoto, H., Mukai, H., Nishikawa, M., Murano, K., Hatakeyama, S., Liu, C.M., Buhr, M., Hsu, K.J., Jaffe, D.A., Zhang, L., Honrath, R., Merrill, J.T., and Newell, R. E., 1996, Long-range transport of ozone in the East Asian Pacific rim region. *Journal of Geophysical Research*, 101, 1999-2010.
- 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., 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.
- Harris, J.M., 1982, The GMCC atmospheric trajectory program. NOAA Environmental Research Laboratories, NOAA Tech Memo, ERL-ARL-116, 30 p.
- Hoell, J.M., Davis, D.D., Liu, S.C., Newell, R., Shipham, M., Akimoto, H., McNeal, R.J., Bendura, R.J., and Drewry, J.W., 1996, Pacific Exploratory Mission-West A (PEM-West A): September-October 1991. *Journal of Geophysical Research*, 101, 1641-1653.
- Hoell, J.M., Davis, D.D., Liu, S.C., Newell, R.E., Akimoto, H., McNeal, R.J., and Bendura, R.J., 1997, The Pacific Exploratory Mission-West Phase B: February-March 1994. *Journal of Geophysical Research*, 102, 28223-28239.
- Huebert, B., Bates, T., Russell, P., Seinfeld, J., Wang, M., Uematsu, M., and Kim, Y.J., 2003, An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts. *Journal of Geophysical Research*, 108, 8633, doi:10.1029/2003JD003550.
- Jacob, D.J., Crawford, J.H., Kleb, M.M., Connors, V.S., Bendura, R.J., Raper, J.L., Sachse, G.W., Gille, J.C., Emmons, L., and Heald, C.L., 2003, The transport and chemical evolution over the Pacific (TRACE-P) aircraft mission: Design, execution, and first results. *Journal of Geophysical Research*, 108, 9000, doi:10.1029/2002JD003276.
- Jaffe, D., Mahura, A., Kelley, J., Atkins, J., Novelli, P.C., and Merrill, J., 1997, Impact of Asian emissions on the remote North Pacific atmosphere: Interpretation of CO data from Shemya, Guam, Midway and Mauna Loa. *Journal of Geophysical Research*, 102 (D23), 28627-28635.
- Kato, S., Pochanart, P., Hirokawa, J., Kajii, Y., Akimoto, H., Ozaki, Y., Obi, K., Katsuno, T., Streets, D.G., and Minko, N.P., 2002, The influence of Siberian forest fires on carbon monoxide concentrations at Happo, Japan. *Atmospheric Environment*, 36, 385-390.
- Kim, H.S. and Chung, Y.S., 2003, Surface ozone and precursors observed in a rural area of Korea 1993-2001. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 39 (6), 689-698.
- Kim, H.S. and Chung, Y.S., 2005, On surface O_3 associated with long-range transport in the Yellow Sea region. *Water, Air, and Soil Pollution*, 165, 95-112.
- Liang, Q., Jaegle, L., Jaffe, D.A., Weiss-Penzias, P., Heckman, A., and Snow, J.A., 2004, Long-range transport of Asian pollution to the northeast Pacific: Seasonal variations and transport pathways of carbon monoxide. *Journal of Geophysical Research*, 109, D23S07, doi:10.1029/2003JD004402.
- Logan, J.A., Prather, M.J., Wofsy, S.C., and McElroy, M.B., 1981, Tropospheric chemistry: A global perspective. *Journal of Geophysical Research*, 86, 7210-7254.
- 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.
- Pochanart, P., Hirokawa, J., Kajii, Y., Akimoto, H., and Nakao, M., 1999, Influence of regional-scale anthropogenic activity in northeast Asia on seasonal variations of surface ozone and carbon monoxide observed at Oki, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 104, 3621-3631.
- Pochanart, P., Kato, S., Katsuno, T., and Akimoto, H., 2004, Eurasian continental background and regionally polluted levels of ozone and CO observed in northeast Asia. *Atmospheric Environment*, 38, 1325-1336.

Streets, D.G., Tsai, N.Y., Akimoto, H., and Oka, K., 2001, Trends in emissions of acidifying species in Asia, 1987-1997. *Water, Air, and Soil Pollution*, 130, 187-192.

Streets, D.G., Bond, T.C., Carmichael, G.R., Fernandes, S.D., Fu, Q., He, D., Klimont, Z., Nelson, S.M., Tsai,

N.Y., Wang, M.Q., Woo, J.H., and Yarber, K.F., 2003, An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D21), 8809, doi:10.1029/2002JD003093.

2006년 8월 22일 접수
2006년 11월 3일 수정원고 접수
2006년 11월 7일 채택