에어로졸의 배경농도 산정기법에 관한 연구

허정화 · 김상우* · 윤순창 · 김지형 · 김만해 · 김유미

서울대학교 지구환경과학부

(접수: 2013년 8월 12일, 게재확정일: 2013년 9월 8일)

On the Determination Method of Background Aerosol Concentration

Junghwa Heo, Sang-Woo Kim*, Soon-Chang Yoon, Ji-Hyoung Kim, Man-Hae Kim, and Yumi Kim

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

Abstract In this study, we estimate the background concentration of black carbon (BC) mass concentration measured at Gosan Climate Observatory from January 2008 to December 2011 by applying six methods: (1) Mean and Median (2) Trimmed mean method deployed in Inter-agency Monitoring of Protected Visual Environments (IMPROVE) network program (hereafter, IMPROVE method), (3) Concentration-frequency distribution analysis method, (4) Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE) method (hereafter, AGAGE method), (5) Kaufman *et al.* (2001) method (hereafter, Kaufman method), and (6) Airmass sector analysis. The background concentration of BC mass concentrations is estimated to be about 400~900 ng m⁻³, but each method shows a large difference. The estimated background concentration, in general, is arranged in the order of: mean > IMPROVE method > median > Kaufman method > concentration-frequency distribution analysis method > AGAGE method. The background concentration estimated by the airmass sector analysis is found to be about 550 ng m⁻³ which is lower than those estimated by other methods. When we apply the same analytical period (i.e., 4-day and 6-day) to both AGAGE and Kaufman methods, the estimated background concentrations are quite similar. However, further researches on the development of statistical method for estimating background concentration for various gas-phase and particulate pollutants under different environment are needed.

Key words: Background concentration, aerosol, black carbon, Gosan

1. 서 론

Background concentration이나 baseline concentration으로 지칭되는 배경농도는 “인위적 오염원에 의한 국지적인 영향이 없는 조건에서의 농도”라는 의미로 광범위하게 사용되고 있으며, 대기오염 및 대기화학 관점에서 일반적으로 배경농도는 “인위적인 영향에 의한 상대적으로 짧은 평균수명(lifetime)을 갖는 오염물질(에어로졸)의 농도가 최소화된 청정대기에 존재하는 특정 물질의 농도”로 정의한다(NIER, 2010). 그러

나, 우리나라와 같이 다양한 국지적 오염원과 장거리 수송에 따른 영향을 빈번히 받는 지리적 여건하에서는 청정 대기의 상태를 정의하는 것이 쉽지 않다. 인위적으로 발생한 오염물질을 포함하지 않고, 자연적으로 발생한 오염물질만을 포함하는 배경농도는 관측 자료로부터 직접적으로 구할 수 없는 이론상의 농도(Hidy and Blanchard, 2005; Qu *et al.*, 2008)에 가까운 값이라 이를 정확하게 정의하기가 쉽지 않아 연구자에 따라 의미가 약간씩 다르게 정의, 사용되고 있다(Charlson *et al.*, 1974; Jaffe *et al.*, 2005; McDonald-Buller *et al.*, 2011). 또한, 대기 중 에어로졸의 경우 자연적 또는 인위적 발생원에서 직접적으로 대기 중으로 배출되기도 하지만, 다양한 기체상의 전구물질들(precursors)로부터 이차적으로 생성(Kim *et al.*, 2013)

*Corresponding Author: Sang-Woo Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea.
Phone : +82-2-880-6716, Fax : +82-2-883-4972
E-mail : sangwookim@snu.ac.kr

되기 때문에 배경농도를 산정하는데 어려움이 존재한다. 따라서, 좀 더 실용적인 의미에서 배경농도를 “국지적으로 발생한 인위적 오염만을 배제하고 국지적 자연 배출원의 영향과 장거리 수송에 의해 유입된 인위적·자연적 배출원에 의한 영향을 포함하는 오염물질(에어로졸)의 농도”로 정의하여 사용하고 있다(NIER, 2010).

우리나라에서 비교적 깨끗한 배경대기지역으로 알려진 제주 고산에 위치한 고산기후관측소(Gosan Climate Observatory)는 에어로졸과 온실가스의 기후 영향을 산정할 수 있는 장기간의 신뢰성 있는 자료의 생산 및 장거리 이동대기오염물질이 국내 대기질 및 기후에 미치는 잠재적 영향 파악을 목적으로 운영되고 있다. 하지만 이들 고산기후관측소 관측 자료 역시 제주도와 한반도 남해안지역 등에서의 국지적·인위적 영향을 많이 포함하고 있어 이들 영향을 배제하고 배경농도를 추정할 필요가 있다.

관측자료로부터 국지적인 인간 활동에 의한 인위적인 영향을 배제하는 다양한 배경농도 산정방법들이 선행연구에서 보고되었으며, 가장 많이 사용되는 방법 중의 하나가 통계적 분석과 공기과 역학적 분석 방법이다. 본 연구에서는 기존의 잘 알려진 관측 네트워크나 문헌들에 제시된 배경농도 산정 방법들을 고산기후관측소에서의 장기간 관측 자료에 적용하여 배경농도를 산정하고 각 방법론을 비교 평가하고자 한다.

2. 배경농도 산정 방법

본 연구에서는 고산기후관측소에서 에셀로미터(Aethalometer)를 통해 관측된 4년간(2008년~2011년)의 블랙카본(Black Carbon) 질량농도 관측자료(880 nm 파장)에 적용하여, 블랙카본의 배경농도를 산정하였다. 에셀로미터는 블랙카본 질량농도를 측정하는 필터기반 관측기기로 인렛을 통해 유입된 공기를 필터에 통과시켜 포집한 후, 필터 위에 빛을 발사하여 감쇄되는 빛의 세기를 통해 블랙카본의 질량농도를 측정한다(Hansen *et al.*, 1984; Hansen, 2003). 본 연구에서는 다음의 6가지 방법을 사용하여 배경농도를 산정하였으며, 각 산정방법에 대하여 간단히 살펴보면 다음과 같다.

(1) 평균(Mean)과 중간값(Median)을 배경농도로 결정하는 방법: 앞에서 언급한 배경농도의 정의에 따라 배경농도를 산정하기가 어려운 경우 단순히 관측자료의 평균과 중간값을 배경농도로 결정하는 방법임.

(2) 미국 Interagency Monitoring of Protected Visual Environments(IMPROVE: <http://vista.cira.colostate.edu/improve/>) 네트워크에서 빈번하게 사용되는 절삭평균(Trimmed mean) 방법(이하 IMPROVE 방법): 관측 기

기의 측정 한계와 고농도 사례의 영향을 최소화 하기 위해 관측자료의 상·하한 10 percentile(%ile, 이하 IMPROVE10) 과 20 percentile(이하 IMPROVE20)을 제거 한 뒤, 즉 10~90 percentile 또는 20~80 percentile에 속하는 관측값들의 평균값을 배경농도로 산정함.

(3) 빈도수 분포 분석법(Concentration-frequency distribution analysis): 관측자료에 자연로그를 취하여 빈도수 분포를 나타내었을 때 그 분포를 가장 잘 설명할 수 있는 가우시안(Gaussian) 분포를 찾아내는 방법이다. 하나의 가우시안 분포로 시작하여 분포의 개수를 추가하면서 관측자료 빈도수 분포의 넓이와 가우시안 분포들의 넓이의 합이 가장 가까울 때까지 반복하며, 선정된 가우시안 분포 중 면적이 가장 큰 분포의 평균을 배경농도로 산정한다(NIER, 2010).

(4) Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE) 방법(이하 AGAGE 방법): 온실가스의 배경농도를 산출 하기 위하여 AGAGE 네트워크에서 사용하는 통계적인 방법으로(O'Doherty *et al.*, 2001), 이산화탄소의 배경농도를 산정할 때 이산화탄소 농도의 계절 변동 특성을 고려하여 121일(약 4개월)의 관측 자료를 사용하여 배경농도를 산출하고, 배경농도보다 높은 값을 오염사례로 간주하여 제거한다. AGAGE 방법을 좀 더 구체적으로 설명하면(Fig. 1), 농도의 증가 또는 감소의 추세를 제거하기 위하여 배경농도 기간인 121일 중, 각 날의 최소값으로 2차 다항식의 추세선을 만들어 관측 값에서 추세를 제거한다. 추세를 제거한 관측 값에서 중간값보다 낮은 관측자료들의 표준편차(σ)를 구한 후, 중간값과 앞에서 구한 표준편차의 2배의 합을 기준으로 하여 기준보다 작은 각 시간의 관측자료를 1차 배경농도로 지정한다. 만약 기준보다 높은 농도를 가진 관측자료가 존재할 때는 1차 배경농도로 지정된 관측자료를 모아서 추세 제거와 새로 지정된 기준으로 배경농도를 다시 산정한다.

Fig. 1. Flow diagram of AGAGE method for estimating background concentration.

이러한 과정을 기준보다 높은 관측 자료의 농도가 하나도 없을 때까지 반복하여 기준보다 낮은 농도의 관측 값들만 분리 되도록 반복하여 배경농도를 산정한다(O'Doherty *et al.*, 2001). 앞에서 언급하였듯이, AGAGE 방법은 장기체류 온실가스의 배경농도(정확히, baseline concentration이라고 AGAGE 네트워크에서는 명명함) 산정을 목적으로 개발된 것이라 상대적으로 수시간에서 수 주의 짧은 평균 수명을 가진 에어로졸에 121일을 배경농도 산정 기준으로 하는 것을 적합하지 않기에, 본 연구에서는 4일(Kaufman 방법과 동일 분석기간) 그리고 6일의 에어로졸 변동 주기를 각각 고려하여 AGAGE 방법을 적용, 배경농도를 산정하였다(3장에 자세히 언급되어 있음).

(5) Kaufman 방법: Kaufman *et al.*(2001)은 태평양과 대서양의 외딴 지역(remote region)에 위치한 Aerosol Robotic NETwork(AERONET) 관측 지점에서 관측된 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Depth, 이하 AOD)를 사용하여 배경농도를 산정하였다. Kaufman 방법에서는 배경농도를 2~6일 이내의 오염사례 또는 장거리 이동에 의한 영향을 받지 않아 에어로졸의 시간 변동성이 작게 나타나는 안정적인 상태일 때의 농도로 정의하였다. 장거리 수송 등에 의한 영향을 제거하기 위하여 태평양 외딴지역의 AERONET 관측소에서 장기간 측정된 AOD의 표준편차(0.02)를 이용하였다(Sminov *et al.*, 2001). Figure 2에 나타난 바와 같이, 본 연구에서는 배경농도를 산정하기 위해 전 기간 관측 자료의 표준편차를 기준으로 삼고 100시간의

관측 자료를 사용하여 중간값과 표준편차를 구하여, 이렇게 구한 표준편차가 앞서 기준으로 삼은 전 기간 자료의 표준편차보다 크면 장거리 이동 또는 인위적 에어로졸의 영향이 포함된 것으로 판단하여 그때의 중간값은 배경농도 산정에서 제외한다. 따라서 100시간 동안 관측자료의 표준편차가 전 기간 관측자료의 표준편차보다 낮을 때의 중간값이 안정한 상태의 농도로 선정이 된다. 그 후 시점을 한 시간씩 옮겨가며 위의 과정에 따라 안정한 상태의 중간값을 선정하며(running median), 이렇게 선정된 관측자료들의 중간값이 배경농도가 된다. 결과적으로, Kaufman 방법에서는 분석 기간에 대해 하나의 배경농도 값이 제시된다. 한편, Kaufman 방법에서 100시간을 배경농도 산정기간으로 사용한 이유는 앞에서 언급하였듯이 배경농도를 2~6일(48~144시간) 내에 안정적인 상태로 존재하는 농도라 정의하였기 때문이며, 배경농도 산정기간을 50시간부터 100시간까지 변화시키며 그 결과를 비교하였을 때 산정된 배경농도 차이가 미미하였음을 보고하였기에(Kaufman *et al.*, 2001) 본 연구에서는 100시간을 사용하여 배경농도를 산정하였다.

(6) 공기괴(Airmass) 분석을 통한 배경농도 산정: 관측소를 중심으로 특정 방향에 대한 유입 영역(sector)을 나눈 후, 역궤적 분석을 통하여 인위적인 배출원이 없는 지역에서 공기괴가 유입되는 시기에 관측된 값을 배경농도로 산정하는 방법이다.

3. 결 과

3.1 평균, 중간값, IMPROVE 방법, 그리고 빈도수 분포 분석 방법의 배경농도 산정

Figure 3은 고산기후관측소에서 관측된 1시간 평균 블랙카본 질량농도 전체 자료(검은색)와 상·하위 10%ile과 20%ile 자료를 제외한 IMPROVE10(붉은색)과 IMPROVE20(푸른색)의 빈도를 2008년부터 2011년에 대해 그린 것이다. 연도별로 차이는 있지만 300~1,500 ng m⁻³ 내에서 블랙카본의 질량농도 빈도가 조밀하게 분포하는 것을 볼 수 있으며, 평균(Mean)과 중간값(Median)가 각각 880~1050 ng m⁻³와 633~800 ng m⁻³의 범위에서 산정되었다. 상한과 하한 10%ile 및 20%ile를 제외하고 배경농도를 산정한 IMPROVE10과 IMPROVE20의 경우, 평균보다는 작지만 중간값보다 조금 큰 값을 보였다. 이는 연도별로 차이가 있지만 하한 10%ile(약 200 ng m⁻³ 이하의 관측값)와 20%ile(약 300 ng m⁻³ 이하의 관측값)에 의한 영향보다는 상대적으로 상한 10%ile(약 1,300~1,400 ng m⁻³ 이상의 관측값)와 20%ile(약 1,800~2,000 ng m⁻³ 이상의 관측값)의 고농도에 의한 영향이 배제된 결과이다.

Figure 4는 빈도수 분포 분석법(Concentration-frequency

Fig. 2. Same as Fig. 1, except for Kaufman method.

Fig. 3. Frequency of the hourly averaged BC mass concentration (black), IMPROVE10 (red) and IMPROVE20 (blue solid line) observed at the Gosan Climate Observatory from January 2008 to December 2011. Bin size is 100 ng m^{-3} .

Fig. 4. Frequency distributions of BC mass concentration for 2008, 2009, 2010 and 2011. Blue curves indicate the results estimated by concentration-frequency distribution analysis.

distribution analysis)의 결과로, 자연로그를 취한 블랙카본 질량농도의 빈도를 그린 것이다. 연도별 블랙카본의 분포는 가우시안 분포와 유사하게 나타났다. 관측자료 분포에서 불룩한 부분이 다섯 부분 존재하여 적어도 5개의 가우시안 분포로 이루어졌다고 가정하였으며, 불룩한 부분이 평균에 포함될 수 있도록 초기값을 주어 분석하였다. Figure 4에서 푸른색 가우시

안 분포는 이와 같이 5개의 가우시안 분포를 사용하여 원래 분포에서 분리한 결과이다. 각 가우시안 분포의 평균값은 연도별로 5.0, 5.5, 6.6, 7.1과 7.8 부근에서 나타났고, 대부분 3번째 가우시안 분포가 가장 큰 면적을 차지함을 알 수 있다. 따라서 빈도수 분포 분석법으로부터 산정된 배경농도는 연도별로 $550 \sim 660 \text{ ng m}^{-3}$ 의 범위에서 배경농도가 결정 되었으며(자세한

내용은 Table 1 및 4장에 논의되어 있음), 이 결과는 연도별 중간값보다 낮은 농도를 나타내었다. 간단히 요약하면, 연도별 평균이 가장 높았으며, IMPROVE10, IMPROVE20, 중간값, 그리고 빈도수 분포 분석법 순서로 배경농도가 높게 산정되었다.

3.2 AGAGE 방법과 Kaufman 방법으로 산정된 배경농도

Figure 5a는 121일을 분석기간으로 하여 AGAGE 방법을 통해 산출한 2008년 블랙카본 질량농도의 배경농도를 그린 예로, 빨간색 부분은 AGAGE 방법으로 선별된 배경농도로 $422 \pm 230 \text{ ng m}^{-3}$ 이다. 선정된 배경농도의 계절변화가 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있으며, 특히 여름철(6, 7, 8월)의 경우 다른 계절에 비해 낮은 농도인 500 ng m^{-3} 부근에서 배경농도가 산정되었다. 이는 잦은 강수에 의한 세정효과와 북태평양으로부터 유입된 상대적으로 깨끗한 공기과의 영향에 기인한 것으로 사료된다. 이에 반해 봄과 가을철에 산정된 배경농도는 1000 ng m^{-3} 에 근접하여 AGAGE 방법으로 산정한 배경농도가 계절에 따른 변동성을 반영하고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 5b는 Kaufman 방법으로 산정된 배경농도

(2008년)를 그린 것이다. 녹색점은 100시간 연속 자료의 표준편차가 연간 표준편차보다 작을 때의 100시간 연속자료의 중간값을 나타낸 것으로 이는 Kaufman 방법에서 정의한 안정적인 농도이다. 그리고 붉은색 직선은 안정적인 중간값들(녹색점)의 중간값으로, Kaufman 방법으로 결정되는 배경농도에 해당되며, 2008년에는 약 744 ng m^{-3} 로 배경농도가 산정되었다.

연도별로 산출된 배경농도를 비교하였을 때, 121일의 분석기간을 적용한 AGAGE 방법의 배경농도는 약 $350 \sim 450 \text{ ng m}^{-3}$ 이었으며, Kaufman 방법의 배경농도는 $600 \sim 750 \text{ ng m}^{-3}$ 의 범위에서 산정되었다. 두 방법의 배경농도를 비교해 보았을 때, Kaufman 방법의 배경농도가 항상 AGAGE 방법의 배경농도보다 크게 산정됨을 알 수 있다. 이와 같이 두 방법에서의 배경농도가 다르게 산출되는 이유는 크게 두 가지 요인으로 설명할 수 있다.

첫째, 두 방법에서 정의된 배경농도 산정방법의 차이에 있다. AGAGE 방법에서는 중간값과 중간값보다 낮은 농도들의 표준편차를 구하여, 두 배의 표준편차와 중간값의 합을 배경농도로 분류하는 기준으로 사용하고, 기준보다 낮은 농도를 가진 각 시간의 관측 자료들을 배경농도로 분류하기 때문에 100 ng m^{-3} 보

Fig. 5. Time series of BC mass concentrations (black dots) and estimated background concentrations for 2008: red dots in (a) is the background concentration estimated by AGAGE method, green dots are median values calculated for every 100-hr. The red line in (b) represents and the background concentration [i. e., the median value of the remaining median (green dots)] by Kaufman method.

Fig. 6. Frequency of the occurrence of background concentrations estimated by AGAGE (black line) and Kaufman (red line) methods.

다 낮은 농도도 배경농도 산정 시 포함이 된다. 이에 비해 Kaufman 방법에서는 100시간 관측자료의 표준편차가 연도별 표준편차보다 작을 때의 중간값들이 선정이 되고 그 중간값들의 중간값이 배경농도로 산정되므로 AGAGE 방법과 달리 낮은 농도의 블랙카본 질량농도가 안정한 상태로 선정되지 않았기 때문에 배경농도 산정 결과에서 뚜렷한 차이를 보이게 되는 것이다. 이는 AGAGE 방법으로 산정한 배경농도(검은색)와 Kaufman 방법에 의해 구한 블랙카본 질량농도의 연평균 표준편차보다 작은 중간값들의 빈도(붉은색)를 그린 Fig. 6에서도 확인할 수 있다. 2008년부터 2011년까지 공통적으로 Kaufman 방법의 결과들은 낮은 농도에서 빈도수가 적은 반면 고농도에서 빈도수가 크게 나타났다. 2011년에는 $3,000 \text{ ng m}^{-3}$ 의 농도의 관측값들이 안정한 상태로 분류가 되어 안정한 상태의 범위가 AGAGE 방법의 결과보다 넓음을 알 수 있다. Kaufman 방법의 배경농도는 이 값의 분포 중 중간값으로 산출된다. 이에 비해 AGAGE 방법의 배경농도들은 $400\sim600 \text{ ng m}^{-3}$ 사이에 집중되어 있고, 저농도에서 빈도가 많이 분포해 있어 배경농도가 낮게 산정되어 Kaufman 방법의 배경농도보다 작음을 알 수 있다.

둘째, 두 방법은 배경농도 산정기간을 어떻게 결정

하느냐에 따라 배경농도 산정결과가 크게 달라진다. 본 연구에서는 AGAGE 방법과 Kaufman 방법을 적용할 때 각각 121일과 100시간을 배경농도 산정기간으로 사용하여 배경농도를 산출하였다. 이러한 배경농도 산정기간이 배경농도 산정에 미치는 영향을 고찰하기 위해 푸리에 변환(Fourier transform)을 사용한 파워스펙트럼 분석으로 블랙카본 질량농도의 주기를 살펴보았다. 푸리에 변환을 하려면 결측값이 없는 연속적인 관측자료가 필요하다. 하지만 본 연구를 수행하기 위한 관측자료에서는 기기 고장이나 정전 등의 관측 한계 악화 등의 이유로 결측값이 존재한다. 본 연구에서는 3시간 내에는 에어로졸의 농도 변화가 심하지 않다는 가정하에 결측된 기간의 관측자료는 그 전 시간의 관측자료를 내·외삽하는 방법으로, 상대적으로 결측 기간이 적은 2008년과 2010년 블랙카본 질량농도를 사용하여 파워스펙트럼 분석을 실시하였다.

Figure 7은 2008년과 2010년의 파워스펙트럼 분석 결과를 로그 스케일로 그린 것으로, 2008년의 자료에서 블랙카본 질량농도의 주기가 73, 12, 14, 18, 36, 10, 24일의 순으로 나타났으며, 2010년에는 36, 18, 24, 73, 14, 6, 9일의 순으로 나타나 월 변동으로 보이는 36일과 계절변동과 유사한 73일 주기로 해석될

Fig. 7. Power spectrum of BC mass concentrations by Fourier Transform in (a) 2008, and (b) 2010. The dashed-dotted line indicates the 95% confidence level.

수도 있지만, 결과적으로 고산기후관측소에서 관측된 블랙카본 질량농도의 뚜렷한 변동 주기는 찾을 수 없었다. 따라서, AGAGE 방법과 Kaufman 방법을 이용하여 배경농도를 구할 때 필요한 산정기간을 1일부터

31일까지 임의로 적용하여 배경농도를 각각 산정하여 보았다(Fig. 8). AGAGE 방법으로 구한 배경농도(검은색)는 평균과 표준편차의 합으로 보통 표현되지만, Kaufman 방법으로 구한 배경농도(파란색)와 비교해보

Fig. 8. Comparison of background concentrations estimated by AGAGE (black line with dot) and Kaufman (blue line with triangle) methods.

기 위해 평균만 Fig. 8에 나타내었다. 전체적으로 AGAGE 방법의 결과에서 배경농도 산정기간이 하루 일 때를 제외하고 Kaufman 방법의 배경농도가 더 높은 값을 나타내었다. AGAGE 방법의 배경농도 평균은 배경농도 산정기간이 증가할수록 감소하는 경향을 보이지만, Kaufman 방법의 배경농도는 산정기간에 따른 변동이 크지 않았다. 좀 더 자세히 살펴보면, 2008년의 경우 배경농도 산정기간이 3~11일까지 20~50 ng m^{-3} 의 차이를 보이며 비슷한 경향을 보이다가 산정기간이 커질수록 두 방법으로부터 산정된 배경농도의 차이가 커지고 있음을 볼 수 있다. 2009년 역시 3~11일까지는 두 방법의 배경농도가 비슷한 값을 보였지만 12일 이후부터 차이가 커짐을 볼 수 있다. 2010년과 2011년은 각각 4일과 6일에 유사한 배경농도를 보이나 그보다 더 긴 산정기간에서는 차이가 확연히 증가함을 확인할 수 있다.

3.3 공기괴 분석으로 산정된 배경농도

본 연구에서는 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 역제적 모델(Draxler and Rolph, 2003)을 이용하여 매일 1회(0300 UTC)에 고산기후관측소로부터 72시간 동안의 역제적 분석을 수행하였다. 고산기후관측소를 중심으로 500 km 이내에서 3일 이상 정체된 공기괴가 유입된 사례와 중국, 한국, 일본, 해양에서의 유입 경로로 총 5개의 영역(Sector)으로 구분하였다(Fig. 9a). 역제적 분석 결과에 따라 유입경로가 명확할 때의 블랙카본 관측자료만을 사용하였으며, 북태평양으로부터 공기괴가 유입되었을 때의 블랙카본 질량농도를 배경농도로 산정하였다. 2009년부터 2011년의 분석 기간 중 유입경로를 명확하게 구분할 수 있는 총 655 일에 대해 분석을 수행하였으며, 유입 영역(sector)에

Fig. 9. (a) Classification of air mass transport pathways and (b) Frequency distribution of BC mass concentrations for each pathway.

따라 각각의 관측 일수를 Fig. 9a에 나타내었다. 유입된 경로들을 자세히 살펴보면 중국에서 유입된 사례가 253일로 가장 높았고, 정체된 사례가 42일로 가장 적었으며, 해양에서 유입된 사례는 133일로 세 번째로 높았다. Figure 9b는 각 유입경로에 따른 블랙카본 질량농도의 평균과 빈도를 나타낸 것으로서 중국 대륙으로부터 유입되었을 때 다른 유입경로에 비해 고농도의 빈도수가 많았으며 그때의 블랙카본 질량농도 평균은 $1180 \pm 865 \text{ ng m}^{-3}$ 로 여러 유입경로들 중에서 가장 높은 값을 나타내었다. 공기괴가 한반도를 거쳐 유입된 경우와 일본에서 유입된 경우는 중국 대륙으로부터 유입된 경우보다 낮은 값을 보였으며, 해양에서 유입되는 경우는 종종 $2,000 \text{ ng m}^{-3}$ 를 초과할 때도 있었지만 다른 유입경로에 비해 저농도 빈도수가 많았으며 이 경우의 평균 블랙카본 질량농도는 $552 \pm 393 \text{ ng m}^{-3}$ 으로 가장 낮게 나타났으며, 이를 일반적으로 배경농도로 간주한다. 그러나, 오염원이 불특정 방향에 위치하여 있거나 국지적인 바람이 복잡하여 풍향 또는 역채적 분석만으로 오염원의 영향을 안정적으로 배제할 수 없는 경우에는 적용이 불가능하다. 특히 해륙풍과 같이 비교적 짧은 시기 동안 주기적으로 교체되는 바람이 있을 경우 전반적으로 바람의 방향과 상관없이 오염원의 영향이 골고루 혼합되는 현상이 나타나 풍향만으로 인위적인 오염을 배제하여 배경농도를 추정하기가 어려운 제한점을 지니고 있다 (NIER, 2010).

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 다음의 6가지 배경농도 산정 방법들을 고산기후관측소에서 관측된 4년간(2008년~2011년)의 블랙카본 질량농도 관측자료에 적용하여, 블랙카본의 배경농도를 산정하고 각 방법론을 비교 평가하였다: (1) 평균(Mean)과 중간값(Median), (2) 미국 Interagency Monitoring of Protected Visual Environments 네트워크에서 빈번하게 사용되는 절삭평균(Trimmed mean) 방법(이하 IMPROVE 방법), (3) 빈도수 분포 분석법(Concentration-frequency distribution analysis),

(4) Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE) 방법(이하 AGAGE 방법), (5) Kaufman 방법, (6) 공기괴(Airmass) 분석을 통한 배경농도 산정방법.

Table 1은 앞에서 언급된 6가지 방법을 통해 산정된 배경농도를 정리한 것이다. 블랙카본 질량농도의 연도별 평균(Mean)이 가장 높은 값을 보였으며, 그 다음으로 IMPROVE10과 IMPROVE20의 순서로 배경농도가 높은 결과를 보였다. 이로부터 고농도의 관측자료가 배경농도 산정에 포함될수록 배경농도를 더 높게 산출함을 알 수 있다. 상대적으로 고농도 관측자료의 영향을 덜 받는 연도별 블랙카본 질량농도의 중간값이 그 다음으로 나타났으며, 빈도수 분포 분석의 배경농도 결과는 중간값보다 낮은 농도를 산정하였다. 100시간의 배경농도 산정기간을 사용한 Kaufman 방법의 배경농도는 연도별 중간값보다 낮은 값을 나타내었고, 배경농도 결과들 중 121일의 배경농도 산정기간을 사용한 AGAGE 방법의 배경농도가 가장 낮게 산정되었다. 여기서 배경농도 산정기간을 4일과 6일로 사용했을 때의 결과를 나타낸 이유는 4일이 Kaufman 방법의 100시간 배경농도 선정기간과 비슷하여 두 방법으로 구한 배경농도를 비교하기 위해서이며, 배경농도 산정기간을 변경하며 얻은 결과에서 3~11일 사이에 유사한 경향을 나타내었는데 이때의 예시로 6일의 결과를 Table 1에 언급하였다. AGAGE 방법의 배경농도 산정기간이 121일에서 4일로 줄어듦수록 배경농도가 증가하는 것을 알 수 있다. 여기서 4일(96시간)을 배경농도 산정기간으로 사용하였을 때의 AGAGE 방법의 배경농도와 100시간을 사용한 Kaufman 방법의 배경농도를 비교해 보았을 때, 두 방법에서 산정된 배경농도가 비슷하게 산정됨을 볼 수 있다. 이는 AGAGE 방법과 Kaufman 방법이 배경농도를 산정하는데 있어 고농도 블랙카본 질량농도 자료를 평균이나 IMPROVE 방법보다 효과적으로 배제함을 알 수 있다.

각 방법으로 산정된 배경농도의 실질적인 물리적 의미에 대해 생각해보면, 먼저 본 연구의 결과들은 수학적 방법론으로 고농도의 영향을 배제하는 방향으로 배경농도를 산정한 것이기에 국지적 배출된 인위적

Table 1. Comparison of estimated background concentrations determined from six methods (unit: ng m^{-3}).

	Mean $\pm$ Standard deviation			Median	Concentration Frequency Distribution	Kaufman method	AGAGE method				Trajectory Analysis (Ocean Airmass)
	All data	IMPROVE10	IMPROVE20			100-hr	121-day	6-day	4-day		
2008	1048 $\pm$ 984	886 $\pm$ 463	837 $\pm$ 305	800	601	744	422 $\pm$ 230	730 $\pm$ 583	718 $\pm$ 575	552 $\pm$ 393	
2009	957 $\pm$ 901	808 $\pm$ 420	763 $\pm$ 283	730	665	696	365 $\pm$ 213	668 $\pm$ 525	682 $\pm$ 556		
2010	875 $\pm$ 761	735 $\pm$ 354	684 $\pm$ 223	633	589	620	445 $\pm$ 174	583 $\pm$ 370	614 $\pm$ 457		
2011	882 $\pm$ 849	736 $\pm$ 366	700 $\pm$ 245	665	550	632	349 $\pm$ 175	617 $\pm$ 544	703 $\pm$ 747		
All	944 $\pm$ 884	794 $\pm$ 410	749 $\pm$ 274	701	604	682	403 $\pm$ 203	652 $\pm$ 515	678 $\pm$ 587	552 $\pm$ 393	

오염물질의 영향을 정확하게 분리해 내었다고 보기는 어렵다. 국지적 배출된 인위적 발생 에어로졸의 두드러진 특징은 산발적인 고농도 사례를 나타내는데, 장거리 이동해온 에어로졸들의 영향 또한 항상 발생하지 않고 계절에 따라 다르게 나타나기 때문이다. 그래서 본 연구에서 산정한 배경농도의 결과에는 고농도의 인위적 발생 에어로졸의 영향과 고농도의 장거리 이동의 영향이 일부 제외되었다고 판단된다. IMPROVE 방법에서 관측자료의 고농도 사례 발생 및 기기한계로 인한 오차 등의 낮은 농도를 제외한 농도들은 평소의 대기 상태로 볼 수 있으며, IMPROVE 방법의 결과는 평소 대기의 대푯값을 의미하는 것으로 사료된다. 다만 수치상으로 농도의 어디까지를 고농도의 발생으로 설정해야 하는가에 대한 고민이 필요하다. 빈도수분포 분석방법은 여러 개의 가우시안 분포를 사용하여 관측된 결과 내에 있는 다양한 농도 분포의 사례들로 분리해 내는 것으로서, 가장 넓은 분포가 배경농도를 대표하게 된다. 이것은 사례들을 걸러내고 남은 평균 대기 상태를 나타내는 것으로 IMPROVE 방법과 비슷한 의미이지만, IMPROVE 방법보다는 조금 더 인위적 영향을 걸러낼 수 있는 장점이 있다. 하지만 사용해야 하는 가우시안 분포의 개수, 그리고 각 가우시안 분포가 가지고 있는 의미 파악이 어려운 점을 단점으로 꼽을 수 있다. AGAGE 방법은 방법의 특성에 따라 대부분의 고농도 사례가 거의 배제되기에 고농도 사례에 의한 영향이 다른 방법에 비해 최소로 반영이 되어, 본 연구에서의 실용적 배경농도의 정의보다 국립환경과학원(2010)에서 밝힌 인위적인 에어로졸 배출에 의한 영향이 최소화된 대기에서의 에어로졸의 농도와 그 의미가 가깝다고 볼 수 있다. Kaufman 방법은 전 기간 에어로졸의 변동보다 배경농도 산정 기간 내의 변동성이 높을 때를 국지적 오염원 발생 등으로 여겨 배경농도산정에 제외시킨다. 전 기간 에어로졸의 농도 분포 안에는 여러 고농도 영향들의 포함 되어 있어 변동성 또한 높을 것이다. 그래서 그 기준으로 고농도 발생 및 인위적 배출 사례를 평가할 때 안정한 배경농도 구분이 명확하지 않을 수도 있지만, 고농도의 영향을 덜 받는 중간값을 사용함으로써 안정한 농도를 산출할 수 있다. Kaufman 방법의 배경농도의 의미에 있어서는 산발적인 인위적 오염을 배제한 안정적인 농도를 나타냄과 동시에 장거리이동에 의한 고농도의 영향 또한 일부분 소거되었지만 본 연구에서의 실용적 배경농도와 근접한 의미를 가지고 있다고 생각된다.

한편, 해양에서 유입되었을 때의 블랙카본 질량농도의 범위가 다른 방법으로 산정된 배경농도의 범주에 포함되는 것을 알 수 있다. 보다 상세하고 짧은 주기에서의 배경농도의 변동 특성을 이해하기 위해서는

역제적 방법을 이용하는 것보다 통계적인 방법을 이용하는 것이 더 효과적이다. 다양한 가스상 오염물질이나 에어로졸들은 그 종류에 따라 자연적·인위적 배출원이 다르고 대기에서의 평균수명이 다르기 때문에 통계적인 방법을 적용하여 각각의 물질에 대한 배경농도를 산정하는 연구가 필요한 것으로 사료된다. 물론 이를 위해서는 국지적으로 배출된 인위적인 오염물질의 영향을 보다 정확하게 배제할 수 있는 통계적 방법에 대한 연구도 병행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업(CATER 2012-3020)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Charlson, R. J., S. E. Schwartz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A. Coakley Jr., J. E. Hansen, and D. J. Hoffman, 1992: Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, **255**, 423-430, doi:10.1126/science.255.5043.423.
- Draxler, R. R., and G. D. Rolph, 2003: HYSPLIT (HYbrid SingleParticle Lagrangian Integrated Trajectory). Model access via NOAA ARL READY Website <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Hansen, A. D. A., H. Rosen, and T. Novakov, 1984: The aethalometer: An instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles. *Sci. Total Environ.*, **36**, 191-196.
- , 2003: The Aethalometer, Manual, Magee Scientific, Berkeley, California, USA.
- Hidy, G. M., and C. L. Blanchard, 2005: The midlatitude North American background aerosol and global aerosol variation. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, **55**, 1585-1599.
- Jaffe, D., S. Tamura, and J. Harris, 2005: Seasonal cycle and composition of background fine particles along the west coast of the U.S. *Atmos. Environ.*, **39**, 297-306.
- Kaufman, Y. J., A. Smirnov, B. N. Holben, and O. Dubovik, 2001: Baseline maritime aerosol: Methodology to derive the optical thickness and scattering properties. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3251-3254.
- Kim, Y., S.-C. Yoon, S.-W. Kim, K.-Y. Kim, H.-C. Lim, and J. Ryu, 2013: Observation of new particle formation and growth events in Asian continental outflow. *Atmos. Environ.*, **64**, 160-168.

- McDonald-Buller, E. C., and Coauthors, 2011: Establishing policy relevant background (PRB) ozone concentrations in the united states. *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 9484-9497.
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2010: Assessment of background aerosol density distribution and characteristics of long-range transport for utilization of Baek-Ryeong-Do observatory data, final report, pp 105.
- O'Doherty, S., and Coauthors, 2001: In situ chloroform measurements at Advanced Global Atmospheric Gases Experiment atmospheric research stations from 1994 to 1998. *J. Geophys. Res.*, **106**, 20429-20444.
- Qu, W. J., X. Y. Zhang, R. Arimoto, D. Wang, Y. Q. Wang, L. W. Yan, and Y. Li, 2008: Chemical composition of the background aerosol at two sites in southwestern and northwestern China: potential influences of regional transport. *Tellus*, **60B**, 657-673.
- Smirnov, A., B. N. Holben, Y. Kaufman, O. Dubovik, T. Eck, I. Slutsker, C. Pietras, and R. Halthore, 2002: Optical properties of atmospheric aerosol in maritime environments. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 501-523.
- ※ 영어로 작성되지 않은 한글 및 일본어 참고문헌은 편집진에서 영어로 번역하였습니다. 번역된 참고문헌은 다음과 같습니다.
- 국립환경과학원, 2010: 백령도 측정소 자료활용도 제고를 위한 배경 지역 농도특성 파악 및 장거리이동량 산정 연구, pp 105.
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2010: Assessment of background aerosol density distribution and characteristics of long-range transport for utilization of Baek-Ryeong-Do observatory data, final report, pp 105.