

울릉도 온실기체 관측자료를 이용한 배경대기 평균농도 산정

임윤규¹ · 문운섭^{1,*} · 김진석² · 송상근³ · 홍지형⁴

¹한국교원대학교 환경교육과, 363-791, 충북 청원군 강내면 태성탑연로 250

²한국표준과학연구원 대기환경표준센터, 305-340, 대전광역시 유성구 가정로 267

³부산대학교 지구환경시스템학부, 609-735, 부산광역시 금정구 부산대학교로63번길 2

⁴국립환경과학원 대기공학연구과, 404-708, 인천 서구 난지로 184

An Estimation of Mean Background Concentrations of Greenhouse Gases Observed on Ulleungdo

Yun-Kyu Lim¹, Yun-Seob Moon^{1,*}, Jin Seog Kim²,
Sang-Keun Song³, and Ji Hyung Hong⁴

¹Department of Environmental Education, Korea National University of Education,
Chung-buk 363-791, Korea

²Cent for gas analysis, Korea Research Institute of Standards and Science, Deajeon 305-340, Korea

³Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

⁴Atmospheric Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research,
Incheon 404-708, Korea

Abstract: Mean background concentrations of greenhouse gases such as CO₂ and CH₄ were estimated on Ulleungdo using PICARRO Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS) analyzer. To improve the accuracy of CO₂ and CH₄ concentrations, a standardized QA·QC (Quality Assurance·Quality Control) procedure was employed with three steps: 1) the inspection procedure of physical limitation (e.g. the exclusion of data corresponding to the number of data of ≤50%) for hourly mean values, 2) a stage inspection (e.g. the use of data corresponding to ≥15 observations per day) for daily mean values, and 3) a fast fourier transform (FFT) analysis using curve-fitting methods for the investigation of climatic characteristics. The monthly mean concentrations of CO₂ and CH₄ derived from three-step QA·QC procedure were then compared with those observed at Anmyundo (Korea) and Ryori (Japan). Overall, the error of mean CO₂ and CH₄ concentrations estimated in this study distinctly decreased. However, in comparison with their concentrations monitored at Ryori, the CO₂ concentration at estimated at Ulleungdo is somewhat lower than that of Anmyundo due to the missing data, which is statistically significant. On the other hand, the former has a statistically significant higher value of CH₄ that of the latter.

Keywords: greenhouse gas, FFT, QA·QC

요약: 본 연구에서는 울릉도 온실기체 관측장비(CRDS)에서 관측된 CO₂와 CH₄ 농도를 정형화된 QA·QC 처리절차를 통해 온실기체 평균 배경대기 농도값으로 활용하기 위한 정확도를 향상시켰다. QA·QC 처리절차는 총 3단계로 구성되었다. 첫 번째는 관측자료의 시간별 평균값을 구하기 위한 물리적 한계검사, 기후범위 검사 및 1시간 측정 자료수가 50% 이하인 자료는 제외시키는 과정으로 이루어져 있다. 두 번째는 일평균자료 산출을 위한 단계검사, 앞뒤로 같은 값 일 경우는 제외, 하루 중 관측횟수가 15회 이상 및 일관측 자료의 표준편차가 일표준편차 평균의 3배 이하인 자료만 허용하는 과정이다. 세 번째는 기후적 특성분석 활용을 위한 Curve-fitting methods를 이용한 FFT 적용단계이다. 이상의 QA·QC 절차에 의한 CO₂ 및 CH₄의 월평균농도 값을 안면도 지구대기감시센터 자료와 일본 료리 관측자료와 비교·분석한 결과 CO₂에 있어서는 울릉도 관측자료 누락에 의한 영향이 다소 크게 나타나 안면도 관측값이 배경대기 평균농

*Corresponding author: ysmoon@knue.ac.kr

Tel: 82-43-230-3769

Fax: 82-43-230-3785

도 값으로 유효하였고, CH₄는 안면도 보다 오히려 울릉도 관측값이 한반도 배경대기 평균농도 값으로 더 적절한 것으로 추정되었다.

주요어: 온실기체, FFT, 품질검사

서 론

지구대기 중의 모든 기체는 태양복사(단파복사)에 대하여 대체로 투명하나 지구복사(장파복사)에 대해서는 대기중에 미량 포함되어 있는 온실기체(CO₂, CH₄, CFCs, N₂O, O₃ 등)가 흡수·재방출하여 지표부근의 기온을 상승시키는 온실효과를 일으킨다. 이와 같이 온실기체의 중요성이 심각하게 부각됨에 따라 미국 마우나로아에서 1958년부터 대기중 CO₂의 지속적인 관측이 이루어짐을 시작으로 전 세계적으로 많은 관측소가 설치되었다(Keeling et al., 1976, 1995).

우리나라에서도 WMO GAW(World Meteorological Organization Global Air Watch) 프로그램의 일부분으로 안면도에 국가기후변화감시센터를 설립하고 1998년부터 CO₂ 모니터링을 지속적으로 수행하고 있으며, 태안에서도 1990년부터 온실기체 샘플링을 통한 분석이 이루어지고 있다. 안면도의 경우 주로 우리나라 서쪽에서 유입되는 기류의 영향을 받기 때문에 남한에서 발생하는 온실기체의 영향은 배제될 수 있지만, 중국의 영향을 평가할 수 없는 지리적 여건에 놓여있다. 이를 보완하기 위한 일환으로 울릉도 지점에 온실기체(CO₂, CH₄) 관측장비를 2010년 3월에 설치하여 2010년 4월부터 관측을 실시하고 있다. 울릉도 온실기체 관측소는 중국에서 시작된 오염활동뿐만 아니라 한반도에서 발생한 오염활동과 일본의 영향을 관측하는 것이 국제 협약과 관련한 과학적 근거를 가지는데 필요하며, 우리나라 최동단에 위치하고 있고, 육지와와의 최단 거리는 강원도 삼척시 원덕읍과 약 137 km 떨어져 있으며 포항시와의 거리는 약 217 km 떨어져 있어 한반도에서 유출되는 대기환경을 관측하기에는 최적지이다. 따라서 한반도 동해상에 위치한 울릉도 지점에 온실기체 관측자료를 확보함으로써, 중국, 한반도, 일본 등의 보다 입체적인 온실기체 영향 분석이 가능해졌다.

온실기체 관측자료의 활용에 있어서 자료가 가지는 오차의 한계를 명확히 할 필요가 있다. 품질관리는 품질요건을 충족시키기 위하여 사용되는 관측 기술과 활동을 말한다. 주요 목적은 가능한 모든 사용자가 관측자료를 최적으로 사용할 수 있을 정도의 최대한

높은 정확도를 실현하도록 누락자료나 오류자료를 검출하고 오차를 보정하는 것이다. 또한 이러한 기본적인 품질관리 절차에 이어 기후적요인 해석에서 필요한 관측자료의 재해석이 필요하다. 즉 관측값에는 시간규모에 의한 다양한 영향이 내포되어 있는데, 중규모에 따른 일기현상과 같은 국지 영향에 의한 단기변동 성분, 비사인곡선형태의 년 주기성분 그리고 장기추세와 같은 계절적 규모에 따른 월별 변동성의 불연속 등의 영향이 포함되어 있어, 기후학적 해석에 있어 타 지역간의 온실기체 변동성을 비교하기 위해서는 이와 같이 국지적인 영향으로 나타나는 특성들이 반드시 제거되어야 한다(WMO, 2006; 기상관측자료 실시간 품질관리시스템(I) 활용법, 2006).

이를 위한 방법으로 Keeling et al.(1989)은 Objective curve fitting 방법을 활용 하였는데, 이 방법은 관측값을 주기를 가지는 함수로 표현하여 일주기 및 계절주기의 변동성을 가지는 값들을 제거하는데 효과적이라 할 수 있다. 또한 Thoning et al.(1989)에 의한 digital filtering 기법 역시 기후적요인 해석에 많이 활용되었다. 이 방법은 비교적 짧은 주기를 가지는 요소의 진폭을 절반 수준으로 맞춰줌으로써, 짧은 주기성을 가지는 값들의 영향을 줄이는 역할을 하는 것이다. 자료의 시계열값에 의존하는 바가 크고 시작과 끝 부분에 해당하는 기간의 오차가 크다는 단점이 있지만, 다른 계산적인 오차에 비해서 영향이 적어 많이 쓰이는 방법이다. 그리고 두 방법을 병행하여 관측자료에서 계절적 변동성과 장기변동성을 추출하는 연구가 이루어져 왔다(Masarie and Tans, 1995; Conway et al., 1994).

울릉도에 설치된 온실기체 관측값을 우리나라 온실기체 배경대기 농도값의 정확한 산출을 위해서는 관측소 주변의 국지오염소스의 영향과 기상 패턴 및 관측환경 변화에서 일시적이고 돌발적인 고농도 피크를 제거해야 한다(Cho et al., 2007; 2007년 지구대기감시 보고서). 이를 위해 본 연구에서는 울릉도 온실기체(CO₂, CH₄) 관측자료의 QA·QC(Quality Assurance·Quality Control) 절차를 통해 관측자료의 노이즈를 제거하였고, 이 자료를 바탕으로 Curve-fitting method를 이용한 FFT(Fast Fourier Transform)분석을 통해

단기변동, 계절적 변동성과 장기변동성을 추출하였다. 그 결과를 현재 우리나라 배경농도 대표지점인 안면도 관측값과 WDCGG(World Data Center for Greenhouse Gases)에서 권고하는 QC 절차가 이루어지는 일본 료리 관측자료와 비교를 통해 본 연구에서 제시한 배경대기 평균 농도값 계산방법의 적절성을 살펴보았다.

관측자료 및 QA · QC 처리절차

온실기체 관측자료

본 연구에서 사용된 온실기체(CO₂, CH₄) 관측자료는 울릉도기상대(Fig. 1)에 설치된 PICARRO Cavity Ring-Down Spectroscopy(CRDS, G13 모델)로 분석한 자료로, CO₂의 경우 300-500 ppmV, CH₄는 1-3 ppmV의 관측장비의 기계적인 오차 허용범위를 가지고 있다. 관측기기 자체에서 내포하고 있는 오차는 시간에 따른 측정기기의 변이현상과 같은 장비의 재연성에 따른 교정문제와 2주마다 교환해서 사용하는 시료가스 주입에 따른 노이즈 수준의 변동성 등이 있다.

울릉도기상대에 설치된 온실기체 관측장비는 2010년 3월에 설치·운영되고 있고, 본 연구에서 사용한 자료기간은 2010년 4월-2011년 7월까지이며, 2011년 1

월과 2월은 측정기기의 점검으로 인하여 누락되었다.

본 연구의 QA·QC 처리결과와의 적절성을 위해서 WDCGG의 안면도(2010년 1월-12월) 및 일본 료리(2010년 1월-2011년 7월) 지역의 CO₂와 CH₄의 월평균자료와 비교·분석하였다.

QA · QC 처리절차

온실가스 자료는 주변의 인위적인 영향 및 생물활동 등에 의한 영향을 많이 받기 때문에 자료처리 과정에 있어서 QC 과정이 반드시 필요하다. 현재 WDCGG에서 권고하는 배경대기 CO₂ 자료는 다음과 같은 과정으로 이루어져 있다. 첫째, 매시간 평균 농도는 측정 장비의 운영상 오차 자료를 배제한 원시 자료로부터 계산되며 둘째, 매시간 평균 농도자료는 원시 자료가 60개 미만일 때 산출되지 않는다. 셋째, 매시간 표준편차가 일정값 A를 초과하는 경우의 매시간 평균 농도는 제외된다. 넷째, 매시간 평균 농도자료와 관측전후 자료의 차이가 일정값 B를 초과할 경우 그 자료는 제외된다. 여기에서 A값과 B값은 관측자료 분석을 통해 기준을 정할 수 있다(JMA, 2007).

이를 바탕으로 본 연구에서는 울릉도 기상대에 설치된 온실기체 관측자료의 QA·QC 처리절차는 크게 4부분으로 나눌 수 있다.



Fig. 1. Geographical locations of the monitoring sites of greenhouse gases (Circle: Anmyundo, Triangle: Ulleungdo, and Square: Ryori).

첫 번째는 울릉도기상대에 설치된 온실기체 관측자료 제어 컴퓨터에서 지정된 서버로 자료를 백업 프로그램을 통해서 자동적으로 전송하게 된다. 이때 자료수신 및 관측자료의 정상유무를 판단한다.

두 번째는 QC 단계1로써, 물리적 한계검사(기계적 허용범위; CO₂: 300-500 ppmV, CH₄: 1-3 ppmV), 기후범위 검사(1시간 평균 표준편차(σ)가 3σ 이상인 자료 제거) 및 1시간 측정 자료수가 50% 이하인 자료는 제외시킨 유효 관측자료만을 이용하여 시간별 평균자료를 생산한다.

세 번째는 QC 단계2로써, 단계검사(1시간 평균 관측값을 기준으로 전후 자료가 3σ 이상인 값은 제외) 및 앞뒤로 같은 값일 경우는 제외시키며, 하루 중 관측횟수가 15회 이상 일관측 자료의 표준편차가 일표준편차 평균의 3배 이하인 자료만 허용함으로써 유효 관측자료만을 이용하여 일평균자료를 생산한다.

네 번째는 QC 단계3으로 몇 주 보다 긴 시간 스케일의 단주기 변동과 같은 성분을 제거할 필요가 있다. 본 연구에서는 Masarie and Tans(1995)이 제안한 Curve-fitting methods를 이용하여 단주기 변동성분 자료를 제거하였는데, Curve-fitting methods의 기본 원리는 자료가 나타내는 장기 추세를 2차 다항식으로 표현하고 특히, 평균 계절변동주기는 2개의 조화급수로 표현이 가능하다.

식 (1)은 Curve-fitting methods의 수식을 나타낸 것으로 2차 다항식으로 구성된 장기경향 함수와 푸리에 함수로 이루어진 계절주기 항으로 이루어져 있다.

$$f(t) = a_0 + a_1 + a_2 t^2 + \sum_{k=1}^3 [b_{2k-1} \sin(\omega_k t) + b_{2k} \cos(\omega_k t)] \quad (1)$$

여기서 t=시간, a_i 는 경년주기 파라미터, b_k 는 년주기 파라미터, $\omega_k = \frac{2\pi}{T}$ 로 각진동수이며, T=365.25, k는 1에서 3으로 증가하는 조화함수의 형태를 나타내고 있다.

식 (1)에 제시한 Curve-fitting methods의 2차 다항식의 계수들은 실제 관측값을 이용하여 3차 역행렬 매트릭스를 이용하여 계산할 수 있다. 앞에서 제시된 QC 단계2까지 유효 관측값과 2차 다항식으로 계산된 결과값의 차를 이용하여 FFT 분석을 실시한다. 즉, 2차 다항식의 방정식값과 FFT분석으로 계산된 값의 합으로 최종적인 계산값이 이루어진다. FFT 분석이 이루어질때, 일반적으로 북반구에서의 일정한 대기의 혼합은 2-3개월간 이내 존재하므로 계절변동 성분으로부터 2-3개월 미만의 단파(7.3 cycle/년)와 장기 변동 성분으로부터 2년 미만(0.55 cycle/년)의 단파를 제거하는 digital filtering이 수행된다(Thoning et al., 1989).

이상과 같은 방법을 통하여 산정된 FFT함수를 이용하여 유효하지 않은 일평균값은 FFT 계산값을 이용하여 월평균값으로 역산하게 된다.

결과 및 논의

본 연구에서는 앞서 설명한 바와 같이 관측자료 품질관리 절차를 편의상 3가지 단계로 구분하여 진행하였다. Table 1은 CO₂와 CH₄ 관측자료의 원시자료와 QC 단계1과 단계2의 결과에 따른 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 평균에 있어서 CO₂의 경우는 QC 과정에 의해서 감소하였고 CH₄는 증가한 것으로 나타났다. 즉, CO₂ 원시 관측값의 경우는 높게 관측된 경우가 많았고 CH₄에 있어서는 낮게 관측된 경우가 많은 것으로 조사되었다. 표준편차에 있어서 CO₂는 QC Step2에서 CH₄는 QC Step1에서 현저히 줄어든 것을 알 수 있다. 이러한 결과에서 CO₂는 CH₄에 비해서 시간별 편차가 다소 크게 작용함을 알 수 있고, CH₄는 시간별 편차범위 보다는 관측기에서 기인한 오차가 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 2는 CO₂와 CH₄ 관측자료의 원시자료와 QC 단계1과 단계2의 결과를 나타낸 것이다. 원시자료에 나타나듯이 CRDS 관측기계에 의한 노이즈가 QC 단계1과 단계2에 의해

Table 1. A statistical summary of greenhouse gases (ppm) derived on Ulleungdo: results compared between raw data and two QC (Quality Control) steps

Category	CO ₂		CH ₄	
	Average	Std. deviation	Average	Std. deviation
Hourly mean raw data	399.02	14.12	1.86	0.29
Hourly mean QC Step 1	398.50	11.61	1.88	0.05
Hourly mean QC Step 2	396.74	6.83	1.87	0.04

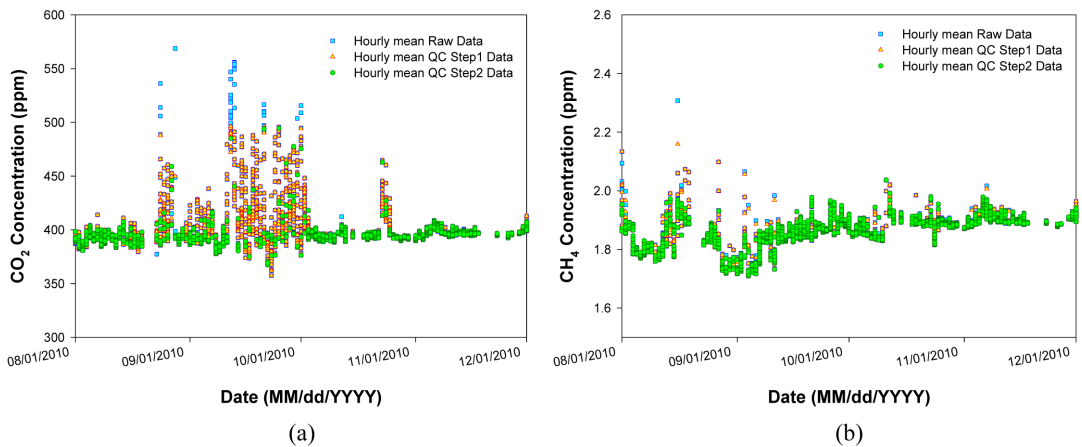


Fig. 2. Time series of hourly mean concentrations of (a) atmospheric CO₂ and (b) CH₄ for each QC step on Ulleungdo from October to November 2010.

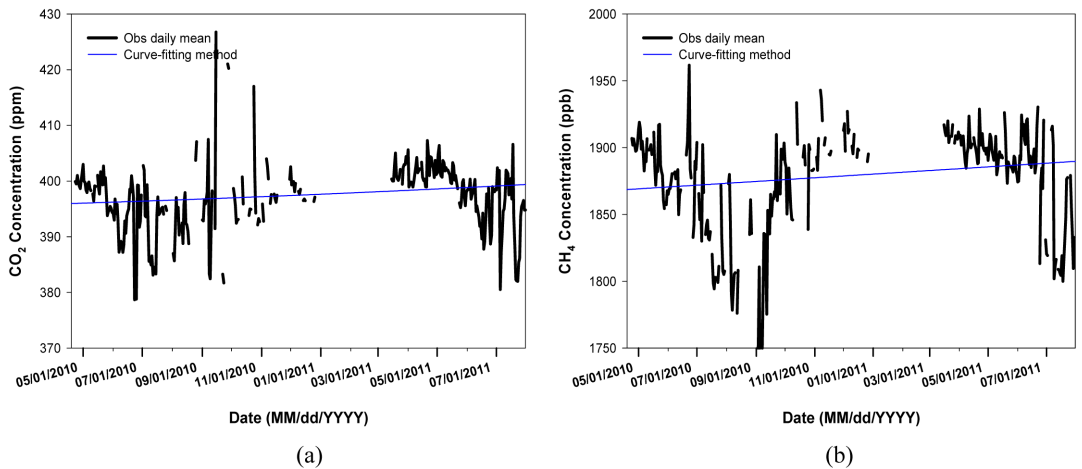


Fig. 3. Time series of daily mean concentrations of (a) atmospheric CO₂ and (b) CH₄ observed and calculated using curve fitting methods on Ulleungdo from January 2010 to July 2011.

서 현저히 감소함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 수행한 QA·QC 처리절차가 온실기체 관측자료가 가지는 노이즈 제거에 효과가 있음을 시사한다.

Fig. 3은 QA·QC 처리를 통한 관측값으로 온실기체의 단기, 장기변동 및 계절적변동 성분을 제거한 FFT 결과를 나타낸 것이다. FFT 분석은 관측자료가 가지는 패턴형식을 따르는 것으로 본 연구에서 사용된 관측자료 기간이 기후적으로 활용하기에는 많이 부족한 면이 있어, 비교적 직선형태의 결과가 도출되었다. 그러나 이는 자료기간이 보완된다면 해결될 문제로 판단된다.

Fig. 4는 본연구의 QA·QC처리 절차를 통한 울릉도 FFT의 월평균값과 WDCGG의 안면도 및 료리의

월평균값을 나타낸 것이다. 울릉도 월평균값 중 FFT 처리과정에서 발생하는 자료기간의 시작과 끝 지점에서 나타나는 오차값은 제외하였다. 료리는 GAW (Global Air Watch)에서 관리하는 아시아 지역을 대표할 수 있는 지역규모의 관측소로 우리나라의 안면도 및 울릉도와 비슷한 위도대에 있어, 본 연구결과의 비교에 있어서 적절하다고 할 수 있다. 안면도와 료리 역시, 온실기체 관측값의 국지적인 영향을 제거하기 위한 QC 과정을 거친 자료이다. CO₂는 전반적으로 료리의 경향패턴을 울릉도 및 안면도 모두 잘 따르고 있으나, CH₄는 주변지역의 영향이 강하게 나타나는 안면도 보다 울릉도의 관측자료가 료리보다 더 유사함을 시사한다. 보다 정략적인 분석을 위해

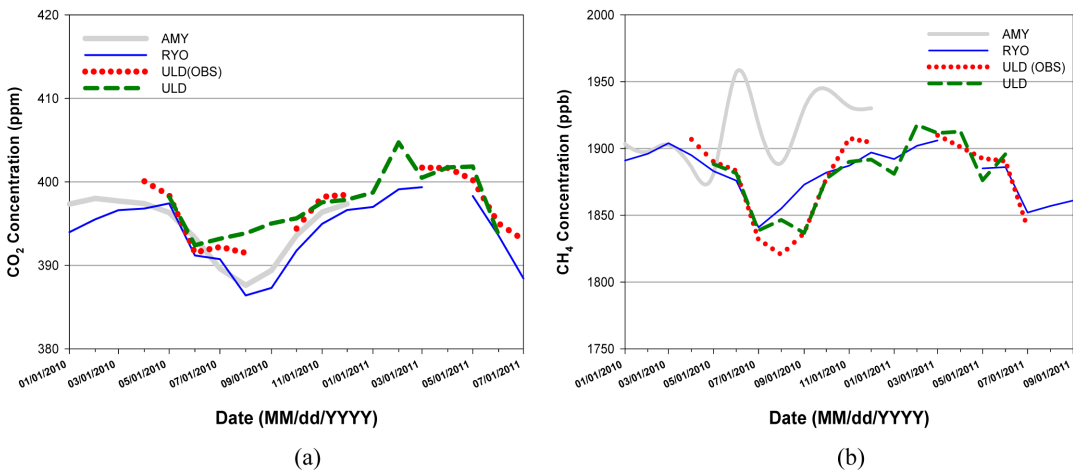


Fig. 4. Time series of monthly mean concentrations (a) atmospheric CO₂ and (b) CH₄ obtained from FFT analysis from January 2010 to September 2011. “AMY”, “RYO”, “ULD (OBS)”, and “ULD” in the figure denote Anmyeondo, Ryori, Ulleungdo-observation, and Ulleungdo-FFT analysis, respectively.

Table 2. Correlation and RMSE of monthly mean concentrations of atmospheric CO₂ (ppm) and CH₄ (ppb) obtained from FFT analysis between two (Anmyeondo and Ulleungdo) and Ryori sites

Site	CO ₂			CH ₄		
	Correlation	RMSE	Ave.	Correlation	RMSE	Ave.
Anmyeondo	0.93	1.77	394.50	-0.10	44.84	1914.23
Ulleungdo	0.82	3.86	397.16	0.87	12.65	1879.37

Table 2에 료리를 기준으로 상관도와 RMSE(Root Mean Square Error) 및 평균값을 나타내었다. CO₂는 안면도가 울릉도 보다 상관도와 RMSE가 더 양호한 것으로 나타났으나, 울릉도의 자료기간 중 2010년 9-10월, 2011년 1-3월 자료가 누락 또는 QC에 제거됨에 따라 오차가 크게 적용된 것으로 판단된다. CH₄에 있어서 안면도는 무상관으로 나타남을 알 수 있는데, 이는 관측값에서 국지적인 영향이 크게 적용된 것으로 판단되며 울릉도에서는 상관도가 0.87로 료리와 아주 유사함을 알 수 있다. 잡음제거 및 국지적인 영향이 배제된 배경대기 CO₂ 평균농도 값으로 안면도는 394.50 ppm, 울릉도는 397.16 ppm, 료리는 394.50 ppm으로 나타나 안면도와 료리가 잘 일치하고 있음을 알 수 있고 울릉도는 다소 높게 나타나 자료의 누락효과가 비교적 크게 반영되고 있음을 알 수 있다. CH₄에 있어서 안면도는 1914.23 ppb, 울릉도는 1879.37 ppb, 료리는 1881.05 ppb로 나타나 국지적 영향이 크게 나타난 안면도 보다 울릉도가 한반도 배경대기 값으로 적절함을 시사한다.

결론

본 연구에서는 울릉도에 설치된 온실기체 관측장비(CRDS)에서 관측된 CO₂와 CH₄ 농도를 정형화된 QA·QC 처리절차를 통해 관측자료의 노이즈를 제거하였고, 기후적 특성분석 활용을 위하여 Curve-fitting methods를 이용한 FFT분석을 실시하여 장단기변동 및 계절적 변동성분을 제거하였다. 또한 이러한 결과를 안면도와 료리의 관측값과 비교·분석하였다.

먼저, QA·QC 처리절차는 총 3단계로 구성하였다. 첫 번째 관측자료의 시간별 평균값을 구하기 위하여 물리적 한계검사, 기후범위 검사 및 1시간 측정 자료수가 50% 이하인 자료는 제외시켰다. 두 번째 일평균자료 산출을 위해 단계검사, 앞뒤로 같은 값일 경우는 제외, 하루 중 관측횟수가 15회 이상 및 일관측자료의 표준편차가 일표준편차 평균의 3배 이하인 자료만 허용하였다. 세 번째 기후적 특성분석 활용을 위한 Curve-fitting methods를 이용한 FFT 적용단계이다.

이상의 QA·QC 절차에 의해서 울릉도 관측자료의 노이즈가 확연히 감소하는 것을 알 수 있었고, Curve-fitting methods를 이용하여 기후학적으로 분석한 CO₂ 및 CH₄의 월평균농도 값을 안면도와 료리 관측자료와 비교·분석한 결과 CO₂에 있어서는 관측자료의 누락에 의한 오차의 영향이 다소 크게 나타나 안면도 관측값이 배경대기 평균농도 값으로 유효하였고, CH₄는 안면도 보다 오히려 울릉도 관측값이 한반도 배경대기 평균농도 값으로 더 적절함을 시사하였다. 본 연구에서 제시한 안면도와 울릉도의 한반도 온실기체 배경대기 농도값의 비교에 있어 자료의 기간이 다소 짧아 비교적 통계적인 결론을 유추하기에는 다소 무리가 있을 수 있다. 그러나 안면도 CH₄ 관측값에서 나타나는 국지적인 요인에 의한 변동성이 울릉도 관측값에는 나타나지 않고 있어, 울릉도 관측소의 위치가 한반도 배경대기 관측소로써 적합함에 주목할 필요는 있다.

본 연구의 QA·QC 처리 및 FFT 분석 시스템을 적용하여 운영중인 한반도 온실기체 감시시스템의 일환으로 설치된 울릉도 온실기체 관측자료는 다양한 연구목적의 활용에 이바지 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 기후과학연구관리단의(RACS 2010-1601)의 “온실가스 관측 원격 관리 기술개발” 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

기상청 관측국 기술노트, 2006, 기상관측자료 실시간 품질 관리시스템(I) 활용법, 2006-2.
기상청, 2007, 지구대기감시보고서, 기상청.

- Cho, C.H., Kim, J.S., and Yoo, H.J., 2007, Atmospheric carbon dioxide variations at Korea GAW center from 1999 to 2006, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 43, 359-365.
- Conway, Y.J., Tans, P.P., Waterman, L.S., Thoning, K.W., Kitzis, D.R., Masarie, K.A., and Zhang, Ni, 1994, Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory Global Air Sampling Network, *Journal of Geophysical Research*, 99, 22831-22855.
- JMA, 2007, Observation Results for 2005, Annual Report on Atmospheric and Marine Environment Monitoring No.7, Japan Meteorological Agency.
- Keeling, C.D., Bacastow, R.B., Bainbridge, A.E., Ekdahl, C.A., Guenther, P.R., Waterman, L.S., and Chin, J.F.S., 1976, Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa observatory, Hawaii, *Tellus*, 28, 538-551
- Keeling, C.D., Bacastow, R.B., Carter, A.F., Piper, S.C., Whorf, T.P., Heimann, M., Mook, W.G., and Roeloffzen, H., 1989, A three-dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds, 1. Analysis of observational data, *Geophysical Monograph*, 55, 65-236.
- Keeling, C.D., Whorf, T.P., Wahlen, M., and van der Plicht, J., 1995, Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980, *Nature*, 375, 666-670.
- Masarie, K.A. and Tans, P.P., 1995, Extension and integration of atmospheric carbon dioxide data into globally consistent measurement record, *Journal of Geophysical Research*, 100, 11593-11610.
- Thoning, K.W., Tans, P.P., and Komhyr, W.D., 1989, Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa observatory, 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974-1985, *Journal of Geophysical Research*, 94, 8549-8565.
- WMO, 2006, WMO WDCGG DATA SUMMARY, WDCGG No. 30, Volume IV-Greenhouse Gases and Other Atmospheric Gases, JMA, 88pp.

2011년 11월 10일 접수
2011년 12월 19일 수정원고 접수
2012년 2월 21일 채택