Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 31, No. 5 (2021) pp. 593-606
https://doi.org/10.14191/Atmos.2021.31.5.593
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연 구 논 문
(Article)

지난 22년간 한반도 이산화탄소 배경농도 재산정 연구 - WMO/GAW 척도 변경과 NIMS 온실가스 배경농도 산출기법을 중심으로 -

서원익 · 이해영* · 김연희
기상청 국립기상과학원

(접수일: 2021년 9월 10일, 수정일: 2021년 10월 18일, 게재확정일: 2021년 11월 9일)

Revision of 22-year Records of Atmospheric Baseline CO_2 in South Korea: Application of the WMO X2019 CO_2 Scale and a New Baseline Selection Method (NIMS Filter)

Wonick Seo, Haeyoung Lee*, and Yeon-Hee Kim
National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 10 September 2021; revised 18 October 2021; accepted 9 November 2021)

Abstract The Korea Meteorological Administration/National Institute of Meteorological Sciences (KMA/NIMS) has monitored atmospheric CO_2 at Anmyeondo (AMY) World Meteorological Organization (WMO) Global Atmosphere Watch Programme (GAW) regional station since 1999, and expanded its observations at Jeju Gosan Suwolbong station (JGS) in the South and at Ulleungdo-Dokdo stations in the East (ULD and DOK) since 2012. Due to a recent WMO CO_2 scale update and a new filter (NIMS) to select baseline levels at each station, the 22 years of CO_2 data are recalculated. After correction for the new CO_2 scale, we confirmed that those corrected records are reasonable within the compatibility goal (±0.1 ppm of CO_2) between KMA/NIMS and National Oceanic and Atmosphereic Administration (NOAA) flask-air measurements with the new scale. With the new NIMS filter, CO_2 baseline levels are now more representative of the large-scale background compared to previous values, which contained large CO_2 enhancements. Atmospheric CO_2 observed in South Korea is 4 to 8 ppm greater than the global average while the amplitude of seasonal variation is similar (10~13 ppm) to the amplitude averaged over a comparable latitude zone (30°N-60°N). Variations in CO_2 growth rate are also similar, increasing and decreasing similar to global values, as it reflects the net balance between terrestrial respiration and photosynthesis. In 2020, atmospheric CO_2 continued increasing despite the COVID-19 pandemic. Even though fossil emission was reduced (around −7% globally), we still emitted large amounts of anthropogenic CO_2. Overall, since CO_2 has large natural variations and its source was derived from not only fossil fuel but also biomass burning, the small fossil emission reduction could not affect the atmospheric level directly.

Key words: Atmospheric CO_2, WMO/GAW scale, baseline level selection method, background level selection method

*Corresponding Author: Haeyoung Lee, National Institute of Meteorological Sciences, Seohobuk-ro 33, Seogwipo, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6633, Fax: +82-64-780-1112
E-mail: leehy80@korea.kr

1. 서 론

이산화탄소(CO_2)는 가장 중요한 온실가스로 기후변화를 일으키는 주요 원인물질 중 하나로 여겨지며, 전체 복사강제력의 약 66%를 차지한다(Myhre et al., 2013). CO_2의 복사강제력을 계산하기 위해서는 산업화 이전의 농도(270 ppm) 대비 현재 농도를 산정하여 계산하기 때문에 현재 농도를 정확히 관측하여 그 값을 산정하는 것은 미래 기후를 예측하는데 중요하다.

기상청 국립기상과학원은 대기 중 CO_2 농도를 1999년부터 안면도기후변화감시소에서 관측하기 시작하였으며, 2012년에는 고산, 울릉도독도, 독도무인 기후변화감시소를 설립하여 관측하고 있다(Lee et al., 2019). 이 관측 값은 매년 6월경 지구대기감시보고서를 통하여 발표된다.

대기조성물질 중 에어로졸과 반응가스 등은 시간, 일, 월 단위로 이상자료를 제거한 후 산술평균한 값을 발표하는 반면, CO_2와 같은 온실가스는 배경농도(Background level)를 산정하여 발표한다. WMO/GAW (World Meteorological Organization/Global Atmosphere Watch Programme)의 경우 관측소를 지구급 규모(Global station)와 지역급 규모(Regional station)로 구분한다. 지구급 관측소의 경우 북반구 혹은 남반구의 대푯값을 산정할 수 있는 반면, 지역급은 관측소의 고도와 위도를 대표할 수 있을 것으로 기대한다(https://community.wmo.int/activity-areas/gaw/research-infrastructure/gaw-stations/procedure-station-inclusion-gaw-programme, last access Dec. 14, 2021). 기상청의 온실가스 관측소는 모두 WMO/GAW의 지역급 관측소로 지정되어 있다.

따라서 올바르게 배경농도가 산정되지 않고, 관측소 주변의 인위적/자연적 배출과 소멸이 포함될 경우 지역규모의 대표성을 나타내기 어려우며, 장기변동성(증감율)을 오해하게 하여 정책 판단을 지원할 수 없다.

배경농도를 산출하는 방법은 각 관측소의 특성에 맞게 개발되어 왔기 때문에 그 방법이 상이하나 기본적으로 크게 3가지 정도로 구분이 되는데, 1) 지시자(tracer) 활용법 2) 기상자료 활용법 3) 통계기법 등이다.

1) 지시자 활용법은 온실가스와의 상관도 분석을 통해 상관도가 높은 지시자를 찾고, 이를 이용하여 배경농도를 선택하는 기법이다. CO_2의 경우 CO, CH_4, Rn^{222} 등이 활용되어 왔다(Sirignano et al., 2010; Fang et al., 2015; Chambers et al., 2016).

2) 기상자료 활용법은 풍향·풍속 등과 온실가스의 농도 상관성을 바탕으로 배경농도를 선별하는 방법이다. 예를 들면 고산지대의 경우 낮시간에는 지표에서 오염물질과 함께 바람이 불어오지만, 밤시간에는 산의 높은 곳에서 바람이 불어오는 등 정확한 기상패턴에 따른 오염물질 유입 여부가 구분되기 때문에 밤시간의 농도만 선택한다(Bacastow et al., 1985; Thoning et al., 1989). 베어링해드(Baring Head)에서는 해양에서 유입되는 남서풍 기류만 선택하여 배경대기를 산출한다(Lowe et al., 1979).

이 두 방법 모두 널리 사용되는 방법이지만 배경농도 선별 시 추가 자료가 필요하고, 이 자료의 품질관리가 함께 이루어져야 한다는 것이 어려운 점으로 논의 되어왔다. 또한 BC나 CH_4 등 지표자를 활용하였을 때 CO_2의 배경농도가 과소평가 되거나 혹은 계절변동의 오류가 증가하는 결과가 보고된 바 있다(Fang et al., 2015). 안면도나 고산과 같이 계절에 따라 풍향과 풍속에 상관없이 고농도 사례가 나타나는 경우 기상자료를 활용하여 배경농도를 선별하기 어렵다(Lee et al., 2019).

따라서 3)의 통계적 기법을 활용하는 것이 복잡한 지형을 가지고 있는 한반도 관측소에 더욱 적합하다. 배경농도는 잘 섞인 대기상태에서 관측이 되기 때문에 전통적으로 일정시간과 공간에서 변화량이 작다는 가정에서 출발한다(Peterson et al., 1982; Sepúlveda et al., 2014). 통계적 기법은 특히 연속관측 시 유용하며, 많은 경우 시간의 표준편차와 연속값의 차이값을 활용하여 선별할 수 있기 때문이다(Pales and Keeling, 1965; Peterson et al., 1982; Yuan et al., 2018). 국립기상과학원에서도 지속적으로 3)의 통계기법을 통해 자료를 선별하여 왔으나(Cho et al., 2007) 자료의 통계 선별과정에서 실제 고농도 사례 등이 여전히 존재하였으며, 여름철의 값은 많이 절삭되었다. 이럴 경우 커브피팅(curve fitting) 적용 시 관측소의 특성이 정확하게 반영되었다고 하기 어렵다.

반면 배경농도를 아무리 잘 산출하였다 하더라도 고품질로 자료를 산출할 수 없다면 그 증가율의 의미를 오해하게 할 수 있다. Lee et al. (2019)에 의하면, 관측환경의 변화, 관측기기의 교체, 표준가스 척도의 변경 등이 CO_2 농도의 증가율에 영향을 주었다. 특히 표준가스 척도의 변화는 장기관측에서 가장 중요한 정보로, 표준가스의 척도가 다르다면 값을 정확히 산출할 수 없다(Lee et al., 2021).

현재 기상청 관측소에서 사용하고 있는 WMO-X2007 표준가스의 척도가 2020년 WMO-X2019로 변경되었다(Hall et al., 2021). 이 변화에 의하면, 400 ppm의 이산화탄소 농도가 400.17 ppm으로 증가한다. WMO GAW 관측소들 간 같은 시료를 분석하였을 때 비슷한 범위 안에 있음을 나타내는 호환성 범위(Compatibility goal)가 ±0.1 ppm이고, 최근 10년간 연간 증가율이 2.4 ppm yr^{-1}인 것을 감안하면 0.17 ppm의 차이값은 큰 의미를

가질 수 있다. 따라서 과거 WMO-X2007로 측정한 값을 WMO-X2019의 척도로 보정하지 않는다면, 한반도의 관측소의 증가폭은 다른 관측소들과 다르게 클 수 있다.

따라서 본 연구논문에서는 WMO-X2019 척도로 모든 장기 관측자료를 보정하고 대표성 있는 배경농도를 산출하기 위한 NIMS 필터 방법을 개발하여 지난 22년간의 장기 관측자료에 적용하였으며, 재산정된 값의 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 한반도 온실가스 관측소

한반도의 온실가스 지표관측망은 안면도(AMY; 36.53°N, 126.32°E, 47 m), 제주고산(JGS; 33.29°N, 126.16°E, 71 m), 울릉도독도(ULD; 37.48°N, 130.90°E, 220.9 m), 독도(DOK; 37.23°N, 131.86°E, 24 m, 무인관측소) 총 4개의 관측소로 이루어져 있다(Fig. 1). AMY는 1999년부터 실시간 관측을 비편광적외선분석기(non-dispersive infrared analyzer, NDIR, Ultramat 6, Simens, Germany)로 관측하기 시작하여 매 30초마다 관측자료를 얻었으며, 2012년부터 공동감쇠분광기(Cavity Ring Down Spectroscopy, CRDS, G2401, Picarro, USA)로 측정하여 매 5초마다 관측값을 얻기 시작하였다. JGS와 ULD, DOK 또한 2012년부터 공동감쇠분광기로 관측을 시작하였으나, ULD와 DOK의 자료는 2014년부터 공개되고 있다. 기본 관측시스템은 인렛, 펌프, 제습장치, 관측기기의 순으로 되어 있으며 사용하는 제습장치의 경우 한국표준과학연구원과 기상청의 특허 개발로 이루어졌다(제10-2013-0090710, 2013). 모든 관측소의 검교정시 사용하는 표준가스는 WMO-X2007 척도를 사용하여 값을 확정하여 왔으나 WMO의 척도 변경에 따라 모든 자료가 재산정되었다(section2.2). 각 관측소의 관측불확도는 0.114~0.116 ppm으로 비슷한 수준이다(Lee et al., 2019). 관측소들의 시스템 구성과 CO_2의 특성은 Lee et al. (2019)에 상세히 소개되어 있다.

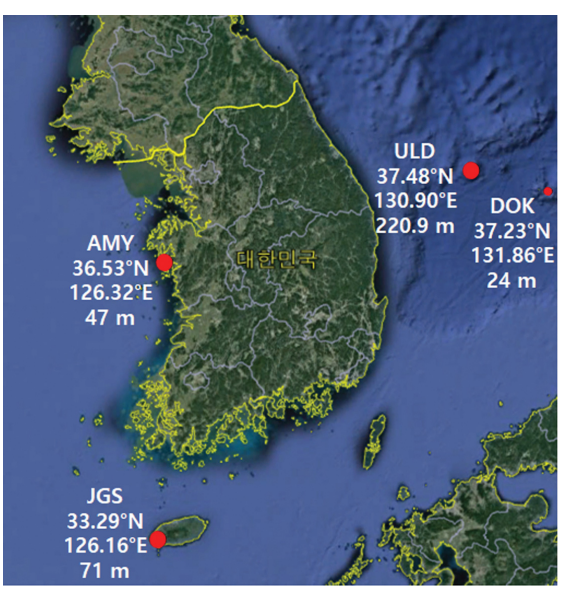

Fig. 1. Locations of KMA/NIMS monitoring stations in South Korea: Anmyeondo (AMY), Jejudo Gosan Suwolbong (JGS), Ullengdo (ULD) and Dokdo (DOK, unmanned). The figure panels are derived from Google Maps.

2.2 WMO 척도 변경에 따른 CO_2 농도 보정

척도란 CO_2의 농도 산정 시 기준이 되는 값으로 2.1절에서 서술하였듯이 한반도 관측망은 2019년까지 WMO-X2007 척도로 대기 중 농도를 산정하였다. Hall et al. (2021)에 따르면 WMO-X2007의 1차 표준은 15개의 알루미늄 실린더에 자연대기조성의 건조공기로 이루어져 있으며 마노미터(manometer)를 이용하여 값을 확정하였으나 비리얼계수(virial coefficient, 기체상태방정식에 사용되는 계수)의 보정과 마노미터(manometer)에서 측정 시 가스의 누출이 발견되어 보정하게 되었다. 이 보정한 척도를 WMO-X2019로 정의하였다.

논문에 서술된 보정 수식은 다음과 같다.

$$X2019 = 1.00079 \times X2007 - 0.142 \ \ (ppm)$$

여기에서 X2007은 WMO-X2007을 기준하여 산정된 CO_2 농도, WMO-X2019를 기준하여 산정한 CO_2 농도는 X2019로 표기하였다. 척도 변경에 대한 자세한 내용은 Hall et al. (2021)에 서술되어 있으며, 이번 연구에서는 논문에 서술된 대로 위의 보정 수식을 통하여 모든 값을 재산정 하였다.

2.3 L0~L2 자료의 산정

관측소에서 관측된 5초 자료를 원시자료(L0)로 정의하고, L0의 자료가 두 단계(자동과 수동)의 플래깅을 거쳐 L1 자료로 정의된다. 자동 QC (AQC)의 경우 H_2O의 값이 0.02% 이상일 때, 공동(Cavity)의 온도와 압력이 제공한 값의 범위에서 벗어날 때, 밸브의 포지션이 샘플의 주입이 아닐 때 등을 기준하여 걸러지며, 수동 QC (MQC)의 경우 약 60여개의 종류가 있으며, 각 관측소의 로그북을 기준하여 인렛의 필터 교체, 다이어프램 펌프, 유량, 제습장치, 검교정기간, 실험 기간, 관측소의 주변환경 및 극한 기상 등을 표기하여 플래깅한다.

플래깅된 L1 자료는 장기관측자료의 검토, 플라스

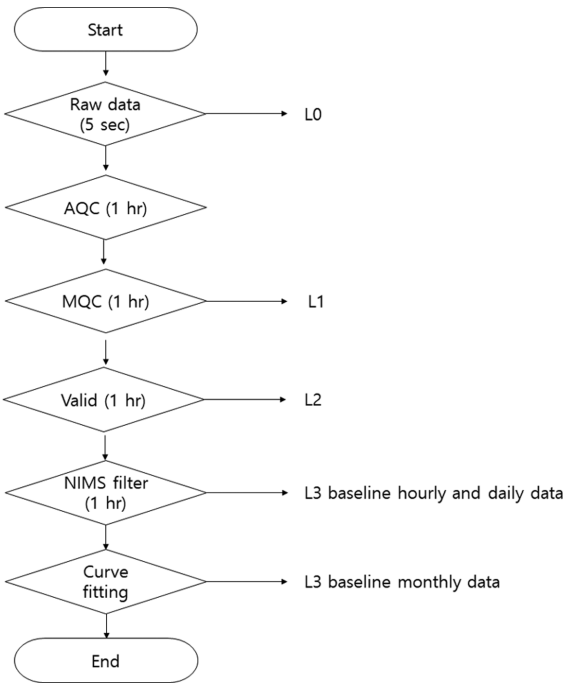

Fig. 2. Flowchart of data selection steps starting from raw data based on 5 second averages.

크 샘플링과의 비교, 비슷한 위도대의 다른 관측소와의 비교, 다른 관측 항목 자료와의 비교 등을 통해 온실가스 담당자에 의해 시간자료(L2)로 확정된다(Fig. 2; Lee et al., 2019). 1999년부터 2020년까지 선별된 L2자료까지의 수집율은 평균 87% 수준으로 2017년 이후로 꾸준히 90% 이상의 수집율을 보이고 있다.

2.4 L3: 배경농도 산정(L3 hourly, daily): NIMS 필터

L3부터는 배경농도를 산정하기 위해 통계적 기법을 이용하여 관측값에서 CO_2 배경농도를 선택하였다. 서론에서 언급하였듯이, 통계적 기법의 기본 가정은 배경농도의 경우 시공간적 농도의 변화량이 작기 때문에(Fig. 3) 주로 시간 표준편차(HS: Hourly Standard deviation)와 연속값의 차이(CD: Differences of Consecutive values)를 이용하여 값을 선택하는 경우가 많다(Pales and Keeling, 1965; Peterson et al., 1982; Yuan et al., 2018). 실제로 기상청의 생산 자료는 Cho et al. (2007)에 의거해 HS와 CD의 차이를 이용하여 구해왔으며, 이 때 자료의 30% 정도만이 선택되었으나 여전히 고농도 사례가 많이 관측되었다(Fig. 7; Lee et al., 2019). 특히, HS와 CD 만을 적용하여 배경농도를 산정할 경우 특히 오랫동안 지속되는 고농도 사례(e.g. 6일간 유지)는 여전히 값을 거를 수 없었다(Fig. 4).

따라서 이번 연구에서는 배경농도가 유지되는 기간(농도의 변화량이 적은 기간)의 변동성을 고려하여 HS와 CD로 값을 재산정하였다[Fig. 3; 식(1)과 (2)]. 이 때, HS와 CD의 기준값은 지난 3년(2018년부터 2020년)간 선별한 배경농도 사례의 CO_2 HS와 CD의 누적 히스토그램이 90%가 되는 구간을 선택하였다. 배경농도 사례의 경우 잘 섞인 대기조건에서 큰 규모의 종관기상하에 관측되는 것을 알 수 있다(Fig. 3). 따라서 이들 배경대기 조건 내에서 HS와 CD의 기준값을 선정하였으나, 계절과 사례에 따라 약간은 다른 평균값을 보여 수렴구간으로 여겨지는 90%가 되는 값을 기준값으로 선택하였다.

또한 보통 고농도 사례가 일시적으로 존재(약 6~10시간) 하는 경우 HS와 CD 만으로도 대부분 제거되었다(Fig. 5). 이후, 장기간 지속되는 고농도 사례의 제거를 위해 HS와 CD로 선택된 자료와 그 자료의 30일 이동중앙값과의 차이(MD: Differences from 30-day moving Median)를 이용하여 배경농도를 선정하였다[식(3)]. MD의 기준값은 30일 이동표준편차(σ_{30d})의 α배로 하였고 α 값은 경험적으로 결정하였다.

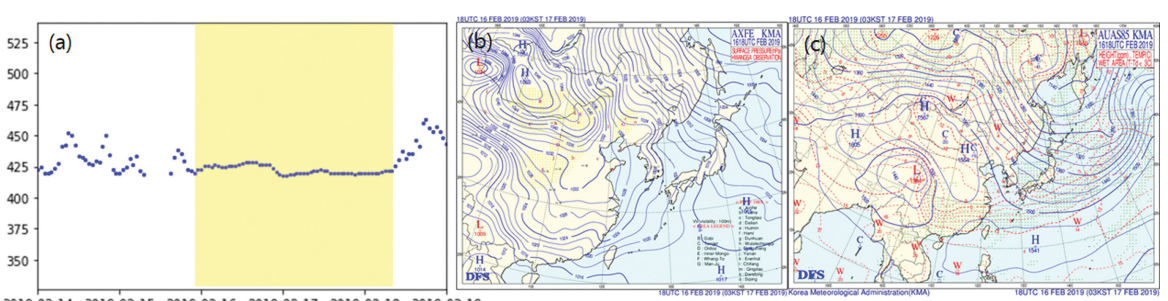

Fig. 3. (a) Selected baseline CO_2 cases observed from Feb. 16 to 18 in 2019 (yellow area) with HS and CD as 0.36 ± 0.35 ppm and 0.26 ± 0.29 ppm respectively. (b) surface weather map and (c) synoptic condition at 850 hpa on 16 Feb., 2020 while observing well-mixed air mass.

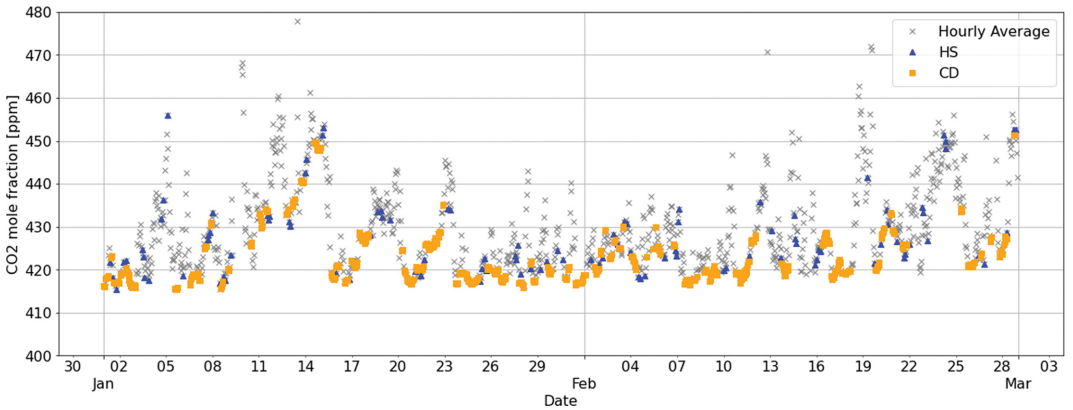

Fig. 4. The selected CO_2 L3 data by HS and CD. Data that cannot be representative of the regions still remain in the high episode period from 8 to 16 Jan, 2019.

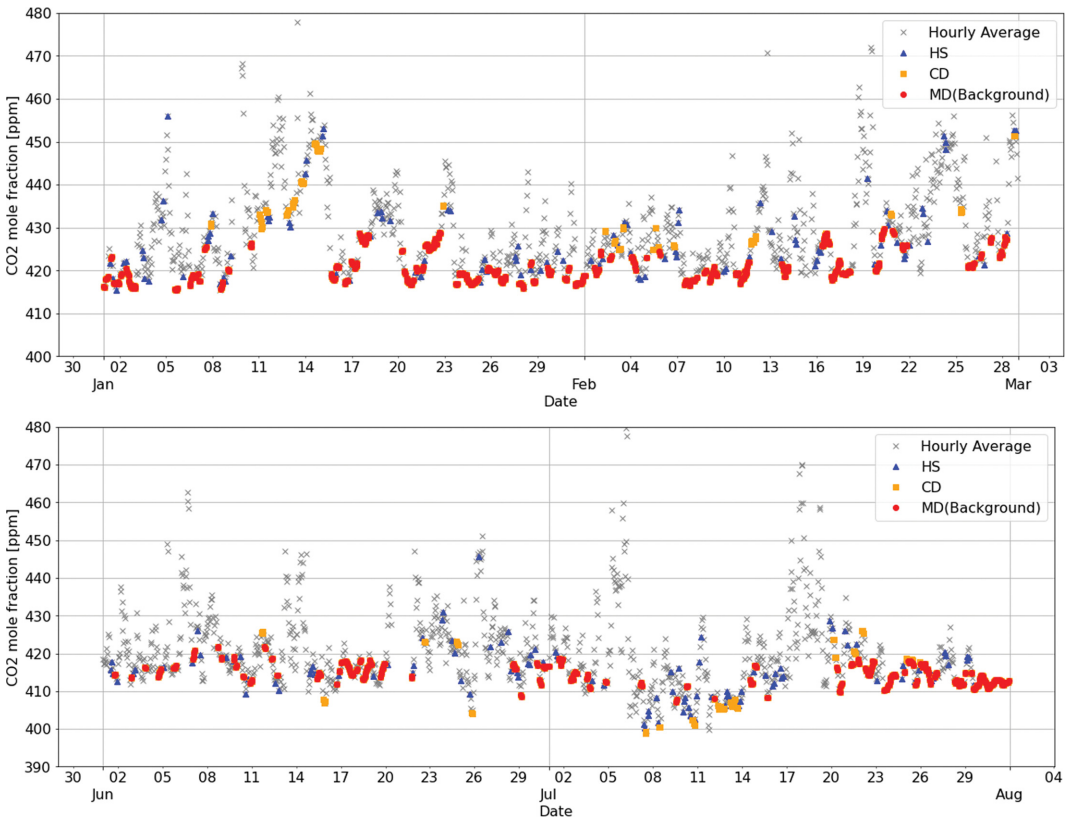

Fig. 5. Data selection examples in winter (JF) and in summer (JJ) computed by the criteria of HS, CD and MS.

배경농도 선정 순서는 다음과 같다(NIMS 필터).

STEP 1: $HS(t) \le A$ (1)

STEP 2: $|HA(t) - HA(t-1)| \le B$
또는 $|HA(t) - HA(t+1)| \le B$ (2)

STEP 3: $|\ HA(t) - 30\ \text{days moving median of HA}\ | \le C$ (3)

여기서 t는 시간을 나타내며 HA는 CO_2 농도의 1시간 평균값이다. STEP 3의 30일 이동중앙값 계산시

Table 1. The criteria and percentage of selected the background level from the observed data at each station.

	AMY	JGS	ULD	DOK
Data period	1999 to 2020	2012 to 2020	2014 to 2020	2014 to 2020
HS [ppm]	0.5	0.5	0.3	0.4
CD [ppm]	0.9	0.8	0.5	0.5
MS [ppm]		$1.3\sigma_{30d}$		
Spring, MAM [%]	34.27	42.33	32.34	70.71
Summer, JJA [%]	17.27	31.99	10.81	62.01
Autumn, SON [%]	17.36	34.96	33.41	66.98
Winter, DJF [%]	28.27	52.57	51.42	72.37
Total [%]	24.28	40.64	33.31	68.47

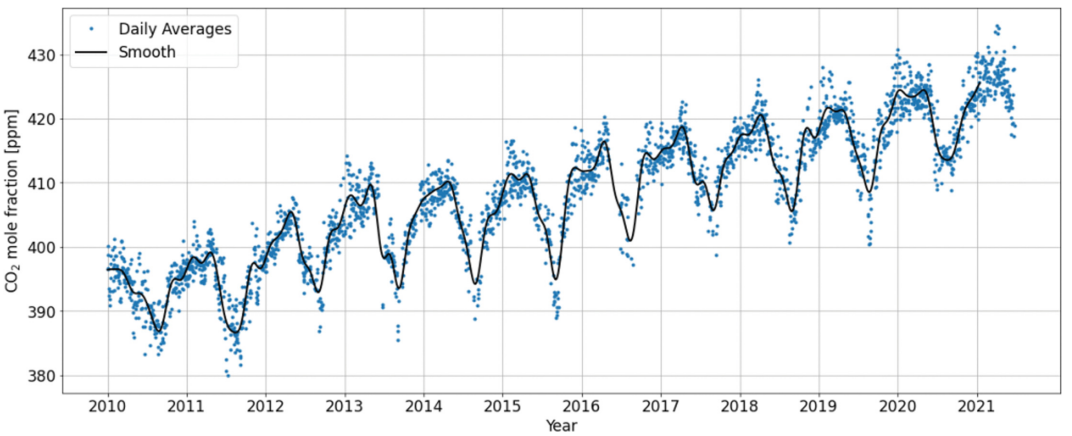

Fig. 6. Daily averages of CO_2 observed at AMY (NIMS filter) and smooth data using low pass filter (NIMS filter + curve fitting).

윈도우의 중심은 t 시간이다. A, B, C는 각각 HS, CD, MD의 기준값이다.

이렇게 하였을 때 AMY, JGS, ULD, DOK의 각 HS, CD, MD의 기준값은 Table 1과 같다. 또한 이 때 최종적으로 선별된 자료는 약 24~68%로 독도 관측소가 가장 많은 관측자료를 남긴다(Table 1). 이를 통해 AMY가 가장 관대한 HS와 CD의 기준값으로 자료를 선별하여도 이산화탄소의 배출과 소멸의 영향을 많이 받는 지역에 위치했음을 나타내며, DOK는 ULD와 비슷한 HS와 CD의 기준값으로 자료를 선택하나 DOK가 상대적으로 잘 섞인 공기궤가 더 많이 관측되어 L3 선별자료가 더 많이 남음을 알 수 있다.

NIMS 필터로 선정된 1시간 자료(Fig. 2의 L3 hourly data)를 이용하여 CO_2 일평균 자료를 산정했다(Fig. 2의 L3 daily data).

2.5 L3: 배경농도의 월평균 산정(L3 monthly): NIMS 필터+ 커브피팅 방법

NIMS 필터를 사용한 일평균 자료는 지역의 영향을 받는 단기 변동성을 포함하고 있는데, 이 단기 변동성을 제거하여 몇 주 이상의 시간 스케일에 걸쳐 일어나는 CO_2 농도를 분석하기 위해 추가적인 필터링 방법이 필요하다.

첫 번째 단계는 일평균을 이용하여 장기추세를 설명하는 다항식과 연 변동을 설명하는 고조파(harmonics)로 구성된 적합함수를 계산하는 것이다(Masarie and Tans, 1995). 두 번째는 일평균 자료와 적합함수의 차이를 푸리에 변환하여 주파수 영역으로 이동한 다음 저역통과필터를 이용하여 고주파 성분을 제거한 후 역 푸리에 변환을 한다. 역 변환된 값에 적합함수를 더하면 몇 주 이상의 주기 성분만을 갖는 필터링된 CO_2 농도가 구해진다(Thoning, 1989). 사용된 적합함수[식(4)]와 저역통과필터 함수[식(5)]는 다음과 같다.

$$f(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \Sigma_{k=1}^{4}\left[b_{2k-1}\sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + b_{2k}\cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right)\right] \quad (4)$$

$$H(f) = \exp\left[-\ln(2) * \left(\frac{f}{f_c}\right)^6\right] \quad (5)$$

식(4)의 t는 일 단위의 시간이며, T는 365.25일 이다. 식(5)의 f는 주파수이며, f_c는 차단 주파수이다. 북반구에서는 균일한 대기혼합이 2~3개월 이내에 일어나기 때문에(Czeplak and Junge, 1974) 차단 주파수로 사용한 값은 (80 day/cycle)$^{-1}$이다. Figure 6는 일평균 자료와 필터링 된 CO_2 농도를 보여준다. 이 필터링 된 CO_2 일자료를 이용하여 월평균을 산정하였다(Fig. 2의 L3 monthly data).

3. 결과 및 토의

3.1 척도 변경에 의한 보정(L2 시간자료)과 NIMS 필터 적용(L3 일자료)의 검증

척도변경과 NIMS 필터에 대한 적용이 적절한지 판단하기 위하여 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 분석하는 플라스크 자료(Dlugokencky et al., 2021)와 비교하였다. AMY는 2014년부터 실시간 온실가스 관측기기와 동일한 인렛을 통해 플라스크 시료를 주1회 포집하여 NOAA로 송부하고 그 분석 값을 AMY 자료와 비교해왔다. 이 때 AMY의 자료는 플라스크를 포집했던 동일한 시간대의 L2 시간평균 자료이다. NOAA는 WMO/GAW의 관측네트워크 내에서 표준 척도 기관으로 우리 자료의 품질관리가 정확히 이루어졌는지를 상호 비교를 통해 정확히 산출할 수 있다(WMO, 2020). 또한 플라스크 시료 포집 시 혼합고가 가장 높은 낮시간(주로 14~17시) 중 관측자료가 안정적인 값을 나타내는 때를 고려하기 때문에 NIMS 필터를 적용한 배경농도 값과의 비교가 쉽다.

척도를 WMO-X2019로 변경한 AMY L2 자료와 NOAA에서 동일척도로 분석한 플라스크의 자료를 비교하여 그 차잇값이 호환성 범위 안에 존재하는지 확인하였다. 호환성 범위란, 분석 결과 차잇값을 수용할 수 있는 범위로 정의된다(JCGM, 2012). 두 기관간 차잇값의 편차는 연마다 달랐으나 2014년을 제외하고

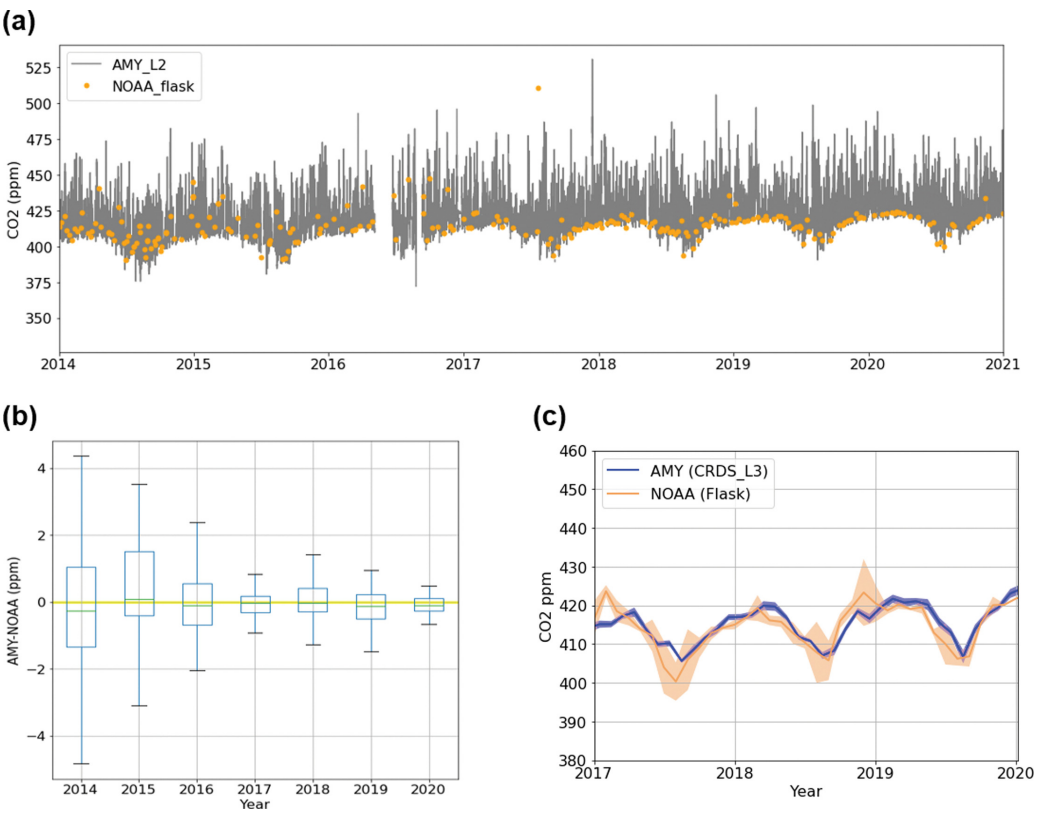

Fig. 7. (a) Quasi-continuous L2 data from CRDS (grey) and weekly flask-air data sampled at AMY and analyzed by NOAA (orange), (b) differences between the two data sets and (c) two baseline monthly CO_2 from flask-air samples and from CRDS at AMY.

중앙값이 호환성 범위(±0.1 ppm) 안에 있어 AMY의 척도 변경이 잘 반영되었음을 알 수 있다(Fig. 7b). 2014년부터 2016년까지 차잇값의 편차가 큰 이유는 고농도 사례가 다른 해보다 많이 포집되었기 때문으로 판단하였다(Fig. 7a). Figure 3에서 확인할 수 있듯이 고농도 사례의 경우 한 시간 동안의 변화량이 크고, 플라스크의 포집은 10분 이내로 이루어지기 때문에 고농도 사례에서의 시간평균과 플라스크 값의 비교가 이루어질 경우 차잇값이 클 수 있다.

따라서 배경농도가 상대적으로 많이 포집되었다고 판단되는 2017년부터의 플라스크 자료 중 NOAA가 확정한 자료(Valid)와, AMY의 배경농도 관측자료(L3 일자료)를 각각 월평균하여 비교하였다(Fig. 7c). 2020년의 경우 NOAA에서 배경농도로 확정한 자료가 없어 이번 비교에는 포함하지 않았다. 차잇값은 NIMS 필터를 거친 AMY L3 자료가 NOAA 플라스크 자료보다 연평균 약 0.79 ppm 높았다. NOAA 플라스크 자료는 주 1회의 샘플링 중 배경농도로 선택된 값들의 월평균값으로 자료의 개수가 적고 월평균 1σ 값이 0.01~6%로 변동폭이 크다. 반면, AMY L3 자료의 월평균 1σ 값은 0.1~0.4%로 변동폭이 더 작고 보다 많은 관측자료를 확보하고 있기 때문에(Table 1) 상대적으로 대표성이 있다고 판단하였다. 또한 과거 필터링을 적용하였을 때와 NIMS 필터를 적용한 L3와 비교하였을 때 NIMS 필터에서 과거에 거르지 못했던 고농도 사례가 제거되었으며, 과거 10%도 남지 않았던 여름철 자료가 많이 선별되어 보다 대표성 있는 농도를 산출하였음을 확인하였다(Fig. 8).

3.2 커브피팅을 적용(L3 월자료)한 한반도 관측소의 CO_2 농도 특성

월평균 자료(Section 2.5)를 중심으로 AMY, JGS, ULD와 DOK의 CO_2 월평균 농도와 계절변동을 비교하였다(Figs. 9, 10). AMY는 1999년부터 2020년까지 22년간 측정하여 한반도에서는 가장 긴 실시간 자료를 보유하고 있다. 2020년 평균농도가 420.4 ppm으로 1999년 연평균 농도 369.2 ppm과 비교하여 51.2 ppm 증가하였으며 약 1.14배 증가하였다. 산업화 이전 전지구 평균 농도(278 ppm) 대비 1.5배 증가한 값으로 전지구의 농도 증가율과 유사한 수준이다.

2020년 평균농도는 AMY(420.4 ppm) > JGS (418.9 ppm) > ULD (417.6 ppm) > DOK (416.6 ppm) 순으로 나타났다. 2020년 전지구 평균이 412.5 ppm (https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2/co2_anmean_gl.txt, last access July 26, 2021)인 것을 고려할 때, 한반도의 관측소값이 대부분 높은 것을 알 수 있다. 전지구 값이 한반도 지역보다 농도가 낮은 것은 한반도를 비롯한 동아시아 지역에 주요 배출지역이 포함되어 있을 뿐 아니라(전지구 CO_2 배출의 36%, http://edgar.jrc.ec.europa.eu, last access July 26, 2021) 북반구에 비해 산업과 인구분포가 낮은 남반구의 CO_2 값이 평균에 포함되기 때문이다(WDCGG, 2020). 더불어 한반도 관측소의 고도가 지구급 관측소들에 비해 상대적으로 낮아 배출과 흡수에 영향을 많이 받는다. 비슷한 이유로 DOK의 고도(24 m)가 AMY (47 m) 보다 낮지만 CO_2 농도가 낮은 것은 상대적으로 주변 배출원의 영향이 적기 때문으로 사료된다.

AMY는 1999년부터, JGS는 2012년부터, ULD와 DOK는 2014년부터 2020년까지 모든 자료를 사용하여 계절변동폭을 살펴보았다(Fig. 10). 계절변동폭은 ULD (13.1 ppm) > AMY와 DOK (12.2 ppm) > JGS (10.8 ppm) 순으로 나타났다. 우리나라 모든 관측소에서 4월에 가장 높은 값을 나타내고, 8월에 가장 낮은 값을 나타냈다. 이 값은 같은 위도대(30°~60°N)에서의

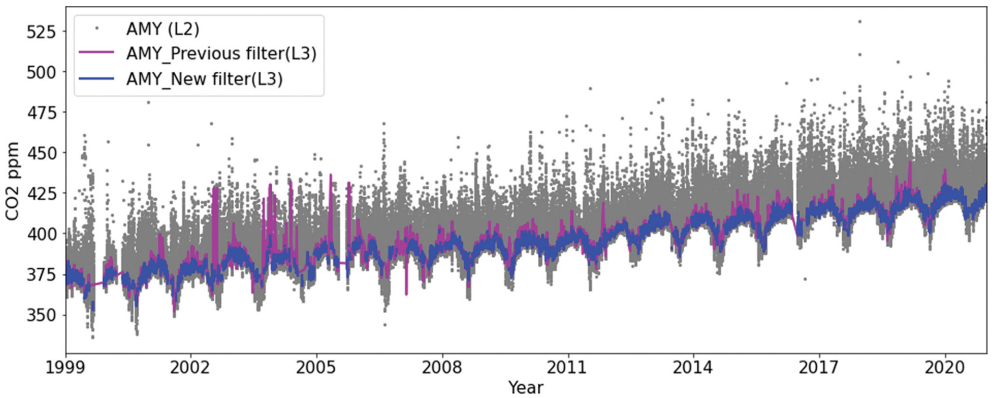

Fig. 8. Quasi-continuous L2 hourly data (gray) from CRDS, the selected L3 data after applying previous filter (magenta, Cho et al., 2007), and the selected L3 data with NIMS filter (blue, this study) at AMY.

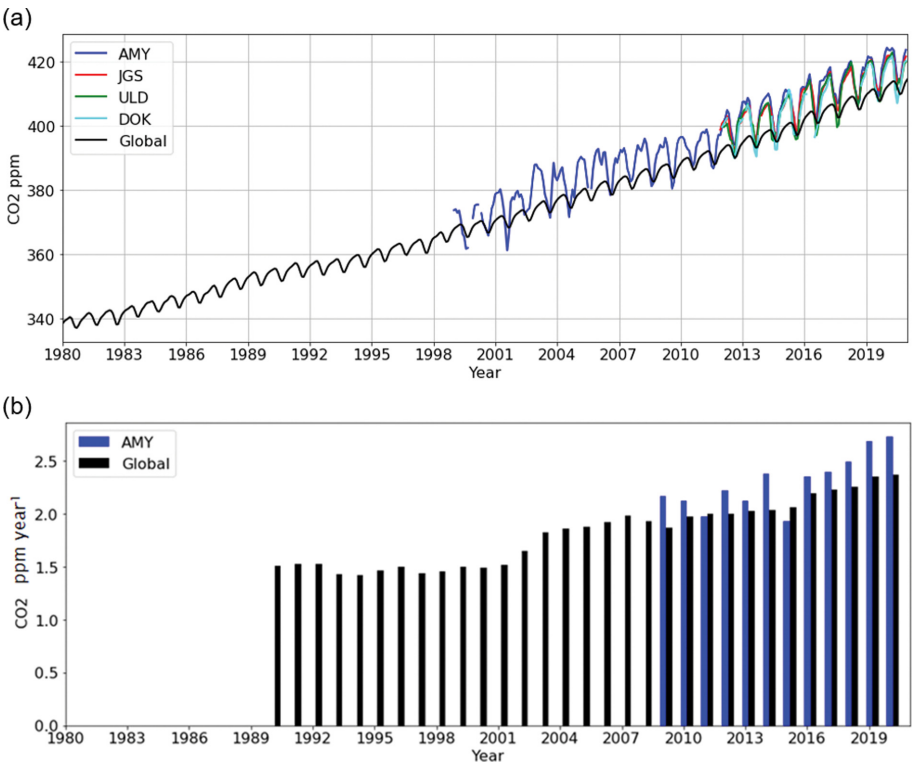

Fig. 9. Time series of (a) L3 monthly CO_2 at AMY, JGS, ULD, DOK and global and (b) decadal moving averages of the growth rate for AMY and global. Annual growth rate was defined as the increase in the annual mean from the corresponding value in the previous year.

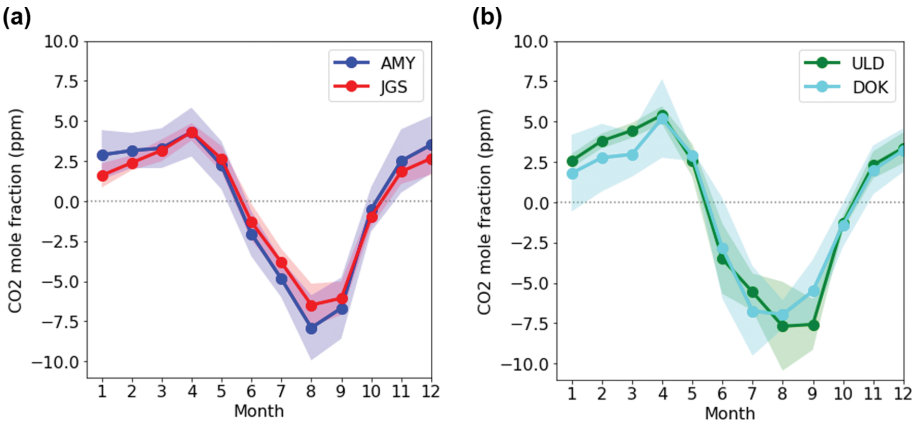

Fig. 10. CO_2 seasonal variations at (a) AMY (1999~2020) and JGS (2012~2020) and (b) ULD (2014~2020) and DOK (2014~2020). Y-axis indicates the detrended seasonal cycle of CO_2 mole fraction.

계절변동폭(약 12 ppm)과 그 경향성(4월 최대, 8월 최소)이 유사하다(WDCGG, 2020). 반면, 각 월의 변동폭(1σ)은 서쪽 관측소인 AMY와 JGS의 경우 1~2 ppm 수준으로 일정하게 관측되었으나 동쪽 관측소인 ULD와 DOK의 경우 0.4~3 ppm까지 그 폭의 변화가 컸으며 특히 여름철(6~8월)에 이러한 경향이 두드러졌다. DOK의 경우 여름철 제습장치의 문제로 측정자료가 없는 해가 많이 존재하여 변동폭이 큰것으로 사료되

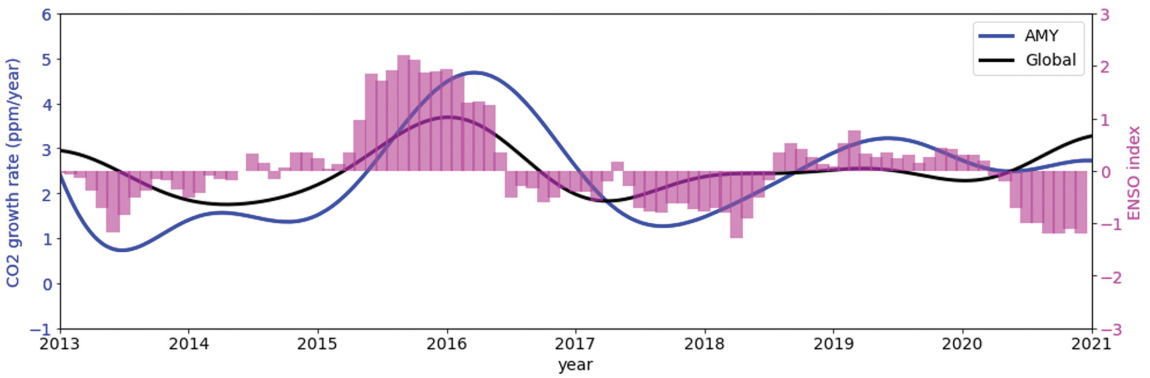

Fig. 11. ENSO index (magenta bars), CO_2 global (black line) and AMY growth rate (blue line) from 2013 to 2020.

었다(KMA, 2021). ULD의 경우 다른 해와 다르게 2020년 7월과 8월의 농도가 과거 보다 높게 나타나 변동폭이 증가한 것으로 나타났으며 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

3.3 커브피팅을 적용(L3 월자료)한 한반도 관측소의 CO_2 농도 증가율

보통 CO_2가 한번 배출되면, 약 45%가 육상과 해양으로 흡수되고 그 나머지가 대기 중에 남는다(Le Quéré et al., 2015). 한반도뿐 아니라 전 세계적으로 증가율이 가속화되는 이유는 CO_2의 인위적 배출이 지속적으로 증가하는 반면, 육상과 해양에서의 CO_2 흡수량이 줄어들기 때문으로 보고되고 있다(Canadell et al., 2007).

2020년 AMY, JGS, ULD와 DOK의 CO_2 농도는 전년도에 비해 각각 2.7 ppm, 2.4 ppm, 2.3 ppm 그리고 1.8 ppm 증가한 것으로 나타났으며, 전지구의 경우 2.4 ppm 증가하여 안면도의 증가율이 전지구 보다 높았다. 가장 관측 기간이 긴 AMY의 CO_2 10년 평균의 증가율과 전지구 값을 비교하였을 때, 두 값 모두 점차 증가율이 가속화되는 것을 확인할 수 있었다. 실제로 1980년대의 전지구 CO_2 증가율은 1.5 ppm yr^{-1}였으나, 2000년대 들어서 1.9 ppm yr^{-1}를 나타냈고, 최근 2.4 ppm yr^{-1} (2010~2019년)를 기록하였다. AMY도 이와 비슷하게 관측 초기 2000년대 2.2 ppm yr^{-1}를 나타냈으나, 최근 10년간 2.7 ppm yr^{-1}를 보였다.

중앙/동태평양의 해수면의 온난화 혹은 냉각화에 의해 값이 달라지는 ENSO (El Niño-Southern Oscillation) 지수와 전지구 탄소순환은 상관관계가 높다 (Keeling and Revelle, 1985; Braswell et al., 1997; Rayner and Law, 1999). 이는 ENSO 지수가 높을 시 생물과 토양에서의 호흡에 의한 배출이 흡수보다 높기 때문으로 알려져 왔다(Keeling et al., 1995; Jones et al., 2001). 따라서 만일 우리가 지역 오염원을 제외하고 배경농도를 잘 산출했다면, 전지구와 비슷한 경향을 나타내며 ENSO 지수와 높은 상관도를 나타낼 것으로 판단하였다. 실제로 전지구 증가율과 L3 자료로 구한 AMY의 증가율은 ENSO 지수의 증가와 잘 일치하는 것으로 판단되었다. 특히 1950년 이후 전 세계적으로 8번째로 강했던 2015/16년 El Niño는 16개월 동안 고온 현상을 나타내었으며, AMY와 전지구는 2016년 증가율이 각각 3.7 ppm yr^{-1}, 3.4 ppm yr^{-1}로 최근 10년 평균대비 1 ppm 이상의 높은 증가율을 보였다(Figs. 8b, 11). 반면 ENSO 지수에 대한 반응은 AMY가 전지구보다 4~5개월 늦게 관측되었다. CO_2의 증가는 El Niño에 의한 NPP (net primary production)의 감소와 상관이 높으며 동아시아의 NPP 아노말리는 아한대 봄철(boreal spring) 동안 최댓값이 나타나기 때문에 아한대 겨울(boreal winter) 동안 최댓값을 나타내는 ENSO 지수보다 4~5개월 후에 CO_2 증가율의 최댓값이 나타난다(Kim et al., 2016). 이는 AMY의 CO_2 증가율과 ENSO 지수에서도 이러한 현상이 반영되어 실제 반영된 것으로 판단되어, NIMS 필터를 이용하여 산출한 AMY의 배경농도가 지역 영향을 배제한 증가율을 잘 반영하고 있음을 확인하였다.

JGS의 경우 2011년 말 관측소의 위치 변경으로 인해(33.30°N, 126.21°E에서 33.29°N, 126.16°E) 2012년 자료의 안정화 기간을 거쳤으며, 2017년 인렛의 높이를 6 m에서 12 m로 확장하여 관측하여 환경적 변화의 영향이 있을 것으로 판단하였으며, ULD와 DOK의 경우 2014년부터 공식값이 생산되어 본 분석에서는 제외하였다.

3.4 배경농도로 본 2020년 코로나-19 동안의 CO_2 변화

2020년 코로나-19 기간에 전지구 인위적 CO_2 배출량이 7% 수준(불확도 3~11%)으로 감소하였음이 보고되었으며, 우리나라도 7% 정도 감소한 것으로 보고

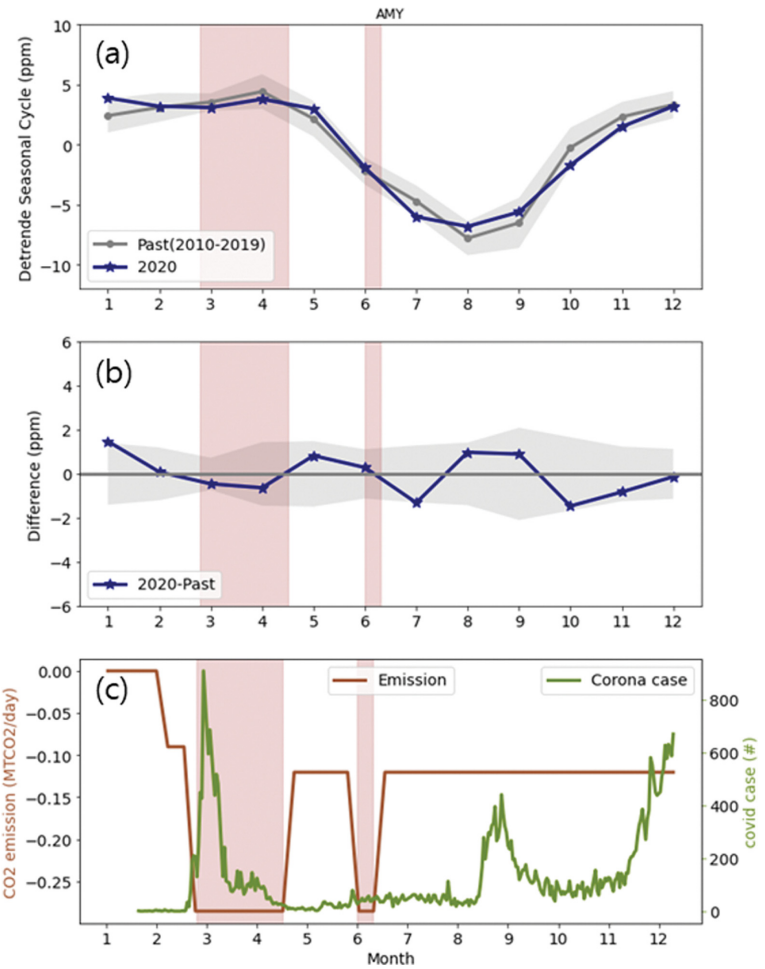

Fig. 12. (a) The seasonal cycle of CO_2 at AMY after removal of the long-term increase. The gray line is the mean seasonal cycle during 2010~2019 and the gray band shows the variability of the seasonal cycle (one standard deviation) over 10 years. The navy line is the seasonal cycle during 2020. (b) Deviations from grey line above for both the gray uncertainty band and navy. (c) Brown line Is the difference in CO_2 emissions between 2019 and 2020 (Le Quere et al., 2020, https://www.icos-cp.eu/gcp-covid19, last access, May 2021) and for green line the reported number of covid-19 in South Korea, 2020 (http://ncov.mohw.go.kr/, last access, May 2021).

되었으나(Le Quere et al., 2020) 대기 중 CO_2 농도는 지속 증가하였다.

2019년 대비 2020년 우리나라 CO_2 배출량의 차이를 보면 2월 이후부터 코로나 사례가 급격히 증가하여, 사회적 거리두기가 이행되었던 2월 말에서 4월 중순까지 배출량의 감소폭이 가장 컸다(Fig. 12c). 이 기간 동안 대기 중 CO_2 농도 값이 실제 감소하였는지 살펴보기 위해 안면도 기후변화감시소의 2020년 CO_2 계절 변동값(seasonal cycle)과 과거 10년(2010~2019년, 배출량 감소가 없었던 기간)의 평균 계절 변동값을 비교하였다(Figs. 12a, b). 회색 음영 처리한 부분은 지난 10년간의 계절변동값의 표준편차(10년 평균의 1σ)이다. 만일 코로나-19로 인해 2월 말부터 CO_2 배출량이 약 25% 정도 감소되었다면, 3월부터 대기 중 CO_2는 지난 10년의 계절변동폭보다 매월 약 0.2 ppm씩 낮아질 것으로 모델 결과 추측되었다(https://www.carbonbrief.org/analysis-what-impact-will-the-coronavirus-pandemic-have-on-atmospheric-co2; https://gml.noaa.gov/ccgg/covid2. html, last access August, 2021).

그러나 코로나-19로 인한 배출량 감소가 가장 두드러졌던 2020년 봄철(3~5월)을 포함하여 2020년 대기 중 CO_2 농도의 계절변동은 10년간의 계절변동값의 월

별 표준편차(회색 음영, 1σ) 안에 있었다. CO_2는 대기로 한번 배출되면 해양과 지표 생태에서 흡수하고 남은 양이 대기 중에 머물기 때문에, 계절변동이 크다. Section 3.2에서 설명하였듯이 대기 중 CO_2의 연 최댓값은 지표 식생이 활발해지기 직전까지 누적되어 4월에 관측되며, 연 최솟값은 광합성 활동으로 흡수가 큰 8월에 나타난다. AMY의 최댓값과 최솟값의 차이가 약 12 ppm에 이르며, 지난 10년간 이 계절변동의 월별 표준편차는 약 ±2 ppm (Figs. 12a, b 회색 음영)으로 지구급 관측소인 마우나로아(±0.6 ppm)보다 큰 값이다. 따라서 우리나라의 CO_2는 지구급 관측소보다 매년 계절변동에 영향을 주는 인자가 다양할 뿐 아니라, 화석연료와 더불어 생체소각에 의해(약 23%) 영향을 받기 때문에 대기 중 CO_2의 감소는 화석연료 배출의 감소만으로 설명할 수 없다(Lee et al., 2020). 따라서 CO_2의 배출원을 정확히 파악하고 계절변동성을 넘어서는 파격적이고 지속적인 배출량 감소가 정책적으로 이루어져야 한다.

4. 요약 및 결론

기상청 국립기상과학원에서는 1999년 AMY를 시작으로 2012년 JGS, 2014년 ULD, DOK로 확장하여 한반도의 삼면을 둘러싼 대기 중 CO_2를 감시하는 관측망을 구성하였다. 본 연구논문에서는 2020년 WMO GAW의 척도 변경(WMO-X2019)과 새로운 배경농도 통계기법인 NIMS 필터의 방법을 설명하였으며, 이들을 적용한 지난 22년간의 한반도 CO_2 배경농도의 대표성과 정확도를 검증하였다.

가장 먼저 WMO-X2019로 척도를 변경한 NOAA의 AMY 플라스크 자료와 AMY 실시간 관측자료의 차잇값이 WMO의 호환성 범위(±0.1 ppm)안에 존재해, 척도 변경이 잘 적용되었음을 확인하였다. 반면 플라스크와 NIMS필터를 적용한 실시간의 연평균 배경농도는 약 0.79 ppm의 차이를 보였으나, 플라스크는 가장 낮은 값을 선택함으로 여름철에는 과소평가 될 수 있으며, 실시간 자료의 1σ 값(0.1~0.4%)이 안정적으로 관측되어 실시간 자료가 대표성을 확보하였다고 판단하였다.

NIMS 필터와 커브피팅을 동시 적용한 CO_2 연평균 농도는 AMY > JGS > ULD > DOK의 순으로 나타났으며, 한반도 관측소들은 전지구 평균보다 약 4~8 ppm 높았다. 반면 계절변동 폭은 같은 위도대(30°~60°N)의 관측소들과 유사한 10~13 ppm을 나타냈으며 4월에 최곳값 8월에 최솟값을 나타냈다. 가장 관측기간이 긴 AMY는 관측 초기와 비교하여 51.2 ppm 증가하였으며, 산업화 이전 평균농도(278 ppm) 대비 1.5배 증가해 그 증가가 전지구와 유사하였다. 최근 10년 AMY의 증가율은 2.7 ppm yr^{-1}, 전지구는 2.4 ppm yr^{-1}로 나타나 2000년대 보다도 0.5 ppm씩 더 증가하는 것을 보였으며 1980년대와 비교하면, 약 0.9 ppm이 더 증가하는 것으로 나타나 그 증가세가 가파름을 보였다. 특히 ENSO 지수가 높을 때 AMY와 전지구가 함께 증가하였으며 2015/16년의 강한 El Niño 시 약 1 ppm씩 더 증가하는 양상이 나타나 생태 배출과 흡수의 변동을 잘 반영했음을 나타냈다.

마지막으로 2020년 코로나-19시 약 7%의 CO_2 배출량이 감소하였으나, 대기 중 농도는 2019년과 동일한 증가율을 나타냈다. AMY의 10년간 계절변동의 월별 표준편차는 약 ±2 ppm으로 배출량에 의한 감소가 이루어졌다고 하더라도 이를 넘어설 수 있는 농도의 감소는 관찰되지 않았다. 또한 한반도에서 관측되는 대기 중 CO_2는 화석연료뿐 아니라 생체소각에 의한 영향을 끊임없이 받고 있는 것으로 나타나, CO_2의 배출원을 정확히 파악하고, 대기 중 CO_2의 계절변동의 불확도(월별 표준편차, 1σ)를 넘어서는 파격적인 배출량 감소가 필요하다. 더불어 탄소저감에 대한 정책효과를 검증하는 것은 오로지 정확한 관측으로만 입증할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청 국립기상과학원『기상정보 활용 및 가치창출 지원연구(KMA2018-00522)』의 지원으로 수행되었습니다. 지난 20년간 안면도, 고산, 울릉도, 독도 관측소의 관측을 도와주셨던 직원 여러분들에게 특별한 감사를 드립니다.

REFERENCES

Bacastow, R. B., C. D. Keeling, and T. P. Whorf, 1985: Seasonal amplitude increase in atmospheric CO_2 concentration at Mauna Loa, Hawaii, 1959~1982. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **90**, 10529-10540, doi:10.1029/JD090iD06p10529.

Braswell, B. H., D. S. Schimel, E. Linder, and B. Moore, 1997: The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability. *Science*, **278**, 870-873, doi:10.1126/ science.278.5339.870.

Canadell, J. G., and Coauthors, 2007: Contributions to accelerating atmospheric CO_2 growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **104**, 18866-18870, doi: 10.1073/pnas.0702737104.

Chambers, S. D., and Coauthors, 2016: Towards a univer-

sal "Baseline" characterisation of air masses for high- and low-altitude observing stations using radon-222. *Aerosol Air Qual. Res.*, **16**, 885-899, doi:10.4209/aaqr.2015.06.0391.

Cho, C.-H., J.-S. Kim, and H.-J. Yoo, 2007: Atmospheric carbon dioxide variations at Korea GAW center from 1999 to 2006. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 359-365.

Czeplak, G., and C. Junge, 1974: Studies of interhemispheric exchange in the troposphere by a diffusion model. *Adv. Geophys*., **18**, 57-72.

Dlugokencky, E. J., J. W. Mund, A. M. Crotwell, M. J. Crotwell, and K. W. Thoning, 2021: Atmospheric Carbon Dioxide Dry Air Mole Fractions from the NOAA GML Carbon Cycle Cooperative Global Air Sampling Network, 1968-2020. Version: 2021-07-30, NOAA ESRL Global Monitoring Division [Available online at https://doi.org/10.15138/wkgj-f215].

Fang, S. X., P. P. Tans, M. Steinbacher, L. X. Zhou, and T. Luan, 2015: Comparison of the regional CO_2 mole fraction filtering approaches at a WMO/GAW regional station in China. *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 5301-5313, doi:10.5194/amt-8-5301-2015.

Hall, B. D., A. M. Crotwell, D. R. Kitzis, T. Mefford, B. R. Miller, M. F. Schibig, and P. P. Tans, 2021: Revision of the World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch (WMO/GAW) CO_2 calibration scale. *Atmos. Meas. Tech*., **14**, 3015-3032, doi:10.5194/amt-14-3015-2021.

Jones, C. D., M. Collins, P. M. Cox, and S. A. Spall, 2001:The carbon cycle response to ENSO: A coupled climate-carbon cycle model study. *J. Climate*, **14**, 4113-4129.

JCGM, 2012: International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM), 3rd edition. 2008 version with minor corrections, Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM200:2012, 91 pp [Available online at https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf].

Keeling, C. D., and R. Revelle, 1985: Effects of El Niño/Southern Oscillation on the atmospheric content of carbon dioxide. *Meteoritics*, **20**, 437-450.

_____, T. P. Whorf, M. Wahlen, and J. van der Plicht, 1995: Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, **375**, 666-670.

Kim, J.-S., J.-S. Kug, J.-H. Yoon, and S.-J. Jeong, 2016: Increased atmospheric CO_2 growth rate during El Niño driven by reduced terrestrial productivity in the CMIP5 ESMs. *J. Climate*, **29**, 8783-8805, doi:10.1175/JCLI-D-14-00672.1.

KMA, 2021: Report of global atmosphere watch 2020. Korea Meteorological Administration, 411 pp (in Korean).

Lee, H., S.-O. Han, S.-B. Ryoo, J.-S. Lee, and G.-W. Lee, 2019: The measurement of atmospheric CO_2 at KMA GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 2149-2163, doi:10.5194/acp-19-2149-2019.

_____, and Coauthors, 2020: Observations of atmospheric $^{14}CO_2$ at Anmyeondo GAW station, South Korea: implications for fossil fuel CO_2 and emission ratios. *Atmos. Chem. Phys*., **20**, 12033-12045, doi:10.5194/acp-20-12033-2020.

_____, J. Lee, B. Hall, E. Dlugokencky, S. Kim, and Y.-H. Kim, 2021: Inter-comparison activities of the WMO/GAW World Calibration Centre for SF_6: A strategy for the high precision atmospheric measurements. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **37**, 512-522, doi:10.5572/KOSAE.2021.37.3.512 (in Korean with English abstract).

Le Quéré, C., and Coauthors, 2015: Global carbon budget 2015. *Earth Syst. Sci. Data*, **7**, 349-396, doi:10.5194/essd-7-349-2015.

_____, and Coauthors, 2020: Temporary reduction in daily global CO_2 emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nat. Clim. Change*., **10**, 647-653, doi:10.1038/s41558-020-0797-x.

Lowe, D. C., P. R. Guenther, and C. D. Keeling, 1979: The concentration of atmospheric carbon dioxide at Baring Head, New Zealand. *Tellus*, **31**, 58-67, doi:10.1111/j.2153-3490.1979.tb00882.x.

Masarie, K. A., and P. P. Tans, 1995: Extension and integration of atmospheric carbon dioxide data into a globally consistent measurement record. *J. Geophys. Res. Atmos*., **100**, 11593-11610.

Myhre, G., and Coauthors, 2013: Anthropogenic and natural radiative forcing. In T. F. Stocker et al. Eds., *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 659-740.

Pales, J. C., and C. D. Keeling, 1965: The concentration of atmospheric carbon dioxide in Hawaii. *J. Geophys. Res*., **70**, 6053-6076.

Peterson, J. T., W. D. Komhyr, T. B. Harris, and L. S. Waterman, 1982: Atmospheric carbon dioxide measurements at Barrow, Alaska, 1973~1979. *Tellus*, **34**, 166-175, doi:10.1111/j.2153-3490.1982.tb01804.x.

Sirignano, C., R. E. M. Neubert, C. Rödenbeck, and H. A. J. Meijer, 2010: Atmospheric oxygen and carbon dioxide observations from two European coastal stations 2000~2005: continental influence, trend changes and APO climatology. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 1599-1615, doi:10.5194/acp-10-1599-2010.

Sepúlveda, E., and Coauthors, 2014: Tropospheric CH_4 signals as observed by NDACC FTIR at globally distributed sites and comparison to GAW surface in situ measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, **7**, 2337-2360, doi:10.5194/amt-7-2337-2014.

Thoning, K. W., P. P. Tans, and W. D. Komhyr, 1989: Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory: 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974~1985. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **94**, 8549-8565, doi:10.1029/JD094iD06p08549.

Rayner, P. J., and R. M. Law, 1999: The interannual variability of the global carbon cycle. *Tellus B*, **51**, 210-212, doi:10.1034/ j.1600-0889.1999.t01-1-00007.x.

Yuan, Y., and Coauthors, 2018: Adaptive selection of diurnal minimum variation: a statistical strategy to obtain representative atmospheric CO_2 data and its application to European elevated mountain stations. *Atmos. Meas. Tech.*, **11**, 1501-1514, doi:10.5194/amt-11-1501-2018.

WDCGG, 2020: WMO WDCGG data summary. WDCGG No. 44, World Data Centre for Greenhouse Gases, 95 pp.

WMO, 2020: 20th WMO/IAEA meeting on carbon dioxide, other greenhouse gases and related measurement techniques (GGMT-2019). GAW Rep. No. 255, World Meteorological Organization, 140 pp.