

GOSAT과 안면도 지상 관측소에서 측정된 이산화탄소의 상관성 분석

Cross-Correlation Analysis between GOSAT and CO₂ Concentration Observed by the KGAWC Station

최진호* · 주승민** · 엄정섭***

Choi, Jin Ho · Joo, Seung Min · Um, Jung Sup

要 旨

GOSAT 위성 신호와 한반도 서해안에 위치한 안면도 지상관측소 이산화탄소 관측값을 비교평가하는 연구를 수행하였다. GOSAT과 안면도 지상관측소의 관측값의 상관관계를 보여주는 R² 값은 0.49로 비교적 강한 양의 상관관계가 나타나고 있었다. 계절별 상관 분석 결과에서 여름과 가을(R²=0.62)에 강한 양의 상관관계가 나타나는 반면 봄과 겨울(R²=0.37)에는 보통의 양의 상관관계가 나타나 여름과 겨울이 좀 더 계절적으로 높은 상관계수를 보이고 있었다. 분석 기간(2009.6-2012.12) 중 GOSAT 이산화탄소 관측값이 지상관측소에 비해 다소 낮게 나타나고 있어 (평균 -6.31ppm), GOSAT 위성신호가 이산화탄소 농도를 지상관측소 측정 결과에 비해 과소평가하고 있음이 확인되었다. 이러한 분석 결과는 안면도와 제주 고산에 한정되어 있는 한반도의 이산화탄소 지상관측소의 시공간적 한계성을 극복할 수 있는 대안으로 GOSAT 위성의 활용가능성을 판단할 수 있는 근거가 될 수 있을 것이다.

핵심용어 : GOSAT, 이산화탄소, 안면도 지상 관측소, 상관성 분석

Abstract

GOSAT satellite CO₂ signal in years (June, 2009–December 2012) were compared with ground-based measurement at Anmyeon-do Korea Global Atmosphere Watch Center (KGAWC), located on the west coast of the Korean Peninsula. The result reveals that GOSAT signature is closely associated with ground-based measurement(R²=0.49). Strong correlation occurred between summer and fall (R²=0.62) while weak relationship between satellite and ground-based measurement were identified in winter and spring (R²=0.37). Average CO₂ concentration of GOSAT were 6.31 ppm lower than the corresponding values obtained from ground-based measurements on the same date. It is anticipated that this research output could be used as a valuable reference in introducing GOSAT to confirm data quality assurance for area-wide carbon monitoring process in relation to Anmyeon-do KGAWC CO₂ Concentration data.

Keywords : GOSAT, CO₂, Anmyeon-do KGAWC, Cross-correlation

1. 서 론

20세기 이후 인류의 화석 연료 사용 증가로 대기 중 온실가스(GHG: Green House Gas) 농도는 폭발적으로 증가하였으며, 이로 인해 전 세계적인 기상이변 등 기후변화 현상이 속속 나타나고 있다. 특히 이산화탄소(CO₂)의 경우 본래 대기를 구성하는 기체이지만 화석 연료 사용 증가와 산림 파괴의 영향으로 지구온난화를

유발하는 가장 주요한 온실가스가 되었다. 이에 따라 이산화탄소의 발생(source)과 소멸(sink)에 대한 메커니즘을 규명하여 기후변화 대응책 마련을 위해 많은 연구가 수행되고 있다.

온실가스 감시 위성을 활용하여 이산화탄소의 배출과 흡수원을 추적하는 것이 그 대표적인 사례이다(Zhang, 2010). 2002년 5월 발사된 Aqua 위성은 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 센서를 탑재하고 대기

Received: 2014.04.01, accepted: 2016.06.03

* 정희원 · 경북대학교 공간정보학과 박사과정(Member, Dept. of Spatial Information, Kyungpook National University, metalsea@knu.ac.kr)

** 정희원 · 경북대학교 공간정보학과 박사과정(Member, Dept. of Spatial Information, Kyungpook National University, jooseacool@knu.ac.kr)

*** 교신저자 · 경북대학교 지리학과 교수(Corresponding author, Dept. of Geography, Kyungpook National University, jsaem@knu.ac.kr)

중 이산화탄소 농도 산출 알고리즘을 통해 대기 중 이산화탄소 농도변화 연구에 활용되고 있다. 2002년 발사된 ENVISAT 위성은 SCIAMACHY(SCannig Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY) 센서를 통해 대류권 중-상층의 CO₂ 등 다양한 온실기체를 감시하고 있다(Buchwitz et al, 2005). 2009년에는 온실가스만을 관측하기 위해 GOSAT(Greenhouse Gases Observing SATellite)이 발사되었으며, GOSAT을 활용하여 이산화탄소의 분포 및 흡수 메카니즘 규명을 위한 연구도 활발히 진행되고 있다(Yoshida et al, 2011).

온실가스 측정 위성은 단기간에 광역적인 이산화탄소의 분포 정보를 제공하여 온실가스의 분포 메카니즘 규명을 위한 정량적인 정보를 제공하고 있기 때문에 기존 지상관측의 시·공간적 한계점을 극복할 수 있는 유일한 대안으로 받아들여지고 있으며 그 활용 가능성은 더욱 커질 것으로 보고 있다. 그러나 온실가스 위성의 활용과정에서 온실가스 측정 데이터의 정확도에 대해 많은 의구심이 제기되고 있으며 지역별 또는 국가별 측정 데이터간 많은 차이를 보이고 있어 위성을 활용하기 위해서는 검증과정이 필수적인 요소로 지적되고 있다(Parker et al., 2011).

온실가스 위성의 신호특성과 오차 평가는 각 나라와 지역별로 매우 활발히 진행되고 있다. Hong et al (2013)은 일본 쓰쿠바(Tsukuba)와 사가현(Saga)의 TCCON(Total Carbon Column Observing Network) 이산화탄소 데이터와 GOSAT 측정 데이터를 비교하여 R²=0.65 수준의 상관성이 있음을 보고하였으며, Qu et al(2013)은 중국 왈리구안(Waliguan)과 루린(Lulin)의 WMO 지상관측소의 이산화탄소 관측정보와 GOSAT 데이터를 비교하여 상당한 상관성이 있다고 보고하고 있다. Gavrilov et al(2013)은 러시아 상트페트르부르크(saint-petersburg) 지역의 메탄 농도 관측치와 GOSAT의 메탄 농도와 비교하여 위성신호가 현지조사결과와 유사한 관측결과를 나타나고 있음을 보고하였다. 이렇듯 현재까지 아시아를 비롯한 여러 국가에서는 온실가스 위성을 활용을 위해 지상관측 결과와 비교치를 제시하고 그 활용과정에서 고려되어야 할 오차범위를 제시하고 있다.

우리나라는 현재 충남 태안의 안면도와 제주도 고산 지역에서 온실가스 관측소(지구대기감시소)를 운영 중에 있다. 그러나 2개의 지점을 바탕으로 한반도 전 지역에 대한 이산화탄소에 대한 특성을 이해하고 분석하기에는 많은 한계가 있다. 따라서 광역적인 온실가스의 분포실태를 파악하기 위해서는 온실가스 위성의 활용

이 반드시 필요할 것으로 판단된다. GOSAT 위성 신호와 지상관측소 측정값과 상관관계 분석은 그 동안의 관측시스템에서 시공간적 한계로 인해 해석될 수 없었던 문제점을 개선할 수 있을 것으로 보인다. 이에 본 연구에서는 위성과 지상데이터의 상관성을 분석하고 이러한 상관성이 어떠한 성향을 나타내는지 확인하고자 한다. 본 연구의 결과는 우리나라에서 본격적으로 온실가스 위성을 활용하기 전에 온실가스 위성의 활용과정에서 고려되어야 할 오차범위 등을 설정하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 데이터 취득

2009년 6월부터 2012년 12월까지의 안면도 지구대기감시 관측소의 이산화탄소 측정 데이터와 GOSAT XCO₂ 데이터가 활용되었다. 안면도 지구대기 관측소의 이산화탄소 측정 데이터는 WMO WDCGG(World Data Centre for Greenhouse Gases, <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/>)에서 취득하였다. 충남 태안군 안면읍 해안관광로(위도 36°32', 경도 126°19', 해발고도 45.7m)에 위치한(Figure 1), 안면도 지구대기 관측소는 1998년 6월 지역급 관측소로 승인받았고 온실가스를 포함한 에어로졸, 반응가스, 성층권 오존 및 자외선 등 37종의 기후변화감시요소를 관측하고 있으며 관측자료는 WMO GAW(Global Atmosphere Watch)의 국제 활동 및 세계자료센터와 공유되고 있다. 특히 센터는 주변 수십 km 이내에 대규모 도시나 산업시설 등의 오염원이 적어 비교적 청정대기를 유지하고 있어 한반도의 배경대기의 온실가스 관측을 위한 매우 중요한 자료를 제공할 수 있다.

GOSAT은 이산화탄소와 메탄 가스의 감시 목적으로 제작된 최초의 온실관측 전용위성으로 일본항공우주국(Japan Aerospace Exploration Agency)과 일본 환경청(Japan's Ministry of the Environment), 일본 국립환경연구소(National Institute for Environmental Studies)가 협동하여 2009년 1월에 발사하여 운용 중에 있다. GOSAT은 약 666km의 상공에서 태양동기궤도로 이동하며, 모든 관측지역에서 현지시각 약 13시에 측정하고, 3일 동안에 전 지구관측이 이루어진다(Yokota et al, 2009). 센서는 열/근적외선의 탄소 감시용 TANSO-FTS(Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation Fourier Transform Spectrometer)와 구름과 에어로졸 측정을 위한 TANSO-CAI(Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation Cloud and Aerosol Imager)으로 구성되어 있다. TANSO-FTS

는 4개의 고분해능 밴드(0.76 μ m, 1.6 μ m, 2.0 μ m, 5.5~14.3 μ m)를 활용하여 지표와 대기에서 방출되는 열적외선과 단파장 적외선을 감지한다(Table 1). TANSO-CAI는 4개의 밴드가 근자외선에서 근적외선 범위(0.39 μ m, 0.67 μ m, 0.87 μ m, 1.6 μ m)에서 과 에어로솔의 광학적 효과를 감지하여 TANSO-FTS에서 관측된 온실가스의 신호 특성을 보정하는 역할을 한다(Kuze et al, 2006).

GOSAT의 온실가스 측정데이터는 일본항공우주국의 지구 감시연구 센터에 수집되어 Level 1 데이터로 생산되며, 고유의 신호 알고리즘 해석 과정을 거쳐 온실가스의 컬럼농도(지표면 위의 단위면적당 대기 중 온실가스의 총량)을 산출하는 Level 2로 가공된다. 본 연구에서는 2010년부터 개정 및 공개되고 있는 Level 2 데이터를 활용하였다. 안면도 지상관측소와 GOSAT 데이터와의 비교과정에서는 GOSAT Level 2 데이터와 지상관측소의 일별 데이터를 비교하였다. GOSAT 데이터의 경우 구름이 존재하는 관측 픽셀이 복원과정에서 제거되기 때문에 지상관측소와의 동일한 관측 범위의 데이터를 확보하는 데 어려움이 있다. 본 연구에서

Table 1. Sensor Specification of GOSAT

Spectral Resolution	0.75~14.3 μ m
Spatial Resolution	10.5km
Target Gas	CO ₂ , CH ₄

는 선행연구의 결과를 참조하여 안면도 지상 관측소에서 반경 500km 이내의 픽셀은 동일 범위의 데이터로 처리하여 비교하였다(Qu et al, 2013).

3. 분석 결과

구름에 의해 데이터복원에서 제외된 경우를 제외한 103일의 이산화탄소 관측값의 분석 결과 지상관측소의 경우 평균 397.20ppm, GOSAT 평균 390.89ppm으로 GOSAT의 관측 수치가 -6.31ppm 정도 낮게 나타났으며, 표준편차의 경우 역시 안면도 지상관측소가 7.32ppm, GOSAT 5.33ppm으로 나타났다(Table 2). 이러한 경향은 다양한 이유로 설명되고 있지만 대표적으로 GOSAT의 이산화탄소 농도치(양적정보)를 구현하는 원 데이터(Level 1)의 방사휘도(radiance spectra)에 관련된 질적 문제와 데이터를 처리하는 과정에서 참조되는 일사량(solar irradiance)의 영향으로 판단되었다(GOSAT Project Office 2010).

반면 월별 이산화탄소의 변화량에서는 각각 0.33%와 0.30%로 두 관측 값의 변화특성은 유사하게 나타나고 있었다.

Fig. 2는 안면도 지상관측소와 GOSAT 이산화탄소 측정치의 차이를 히스토그램을 나타낸 것으로 최대 차이는 -24.48ppm, 최소 차이는 0.08ppm으로 나타났다. 각 관측 값의 차이 분석 결과에서 중간값은 -6.54ppm이며, 왜도(skewness)는 0.0009, 첨도(kurtosis)는 3.74로 나타났다. 이러한 수치로 볼 때 오차의 분포는 정규분포에 가까운 상태로 나타나고 있으나 그 차이는 일정한 수준이 유지되고 있음을 알 수 있다. 또한 GOSAT 위성의 관측값이 지상관측 결과에 비해 과소평가되고 있다는 것이 확인된다.

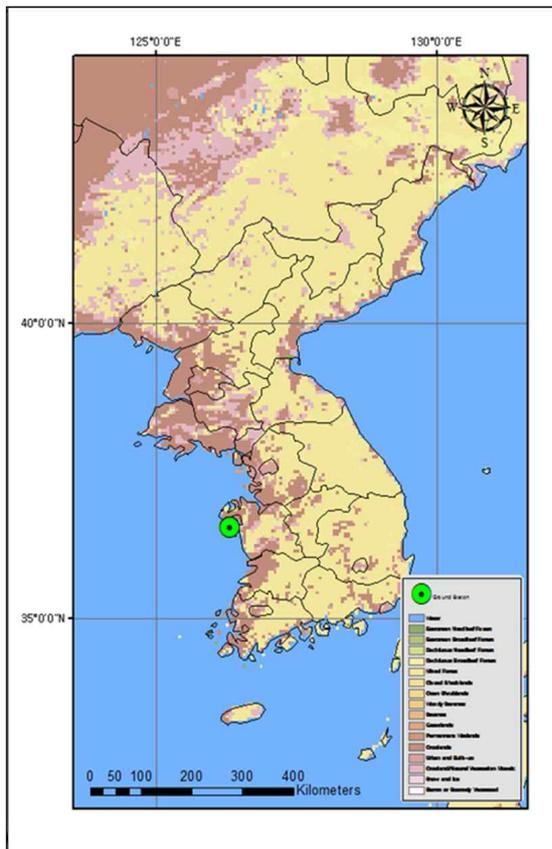


Figure 1. Location of Anmyeon-do Korea Global Atmosphere Watch Center (KGAWC)

Table 2. Comparison between GOSAT signal and Ground measurements

	Anmyeon	GOSAT
N	103	103
Mean Value	397.20ppm	390.89ppm
StDEV	7.32ppm	5.33ppm
Monthly changing trends	0.33 %	0.30 %

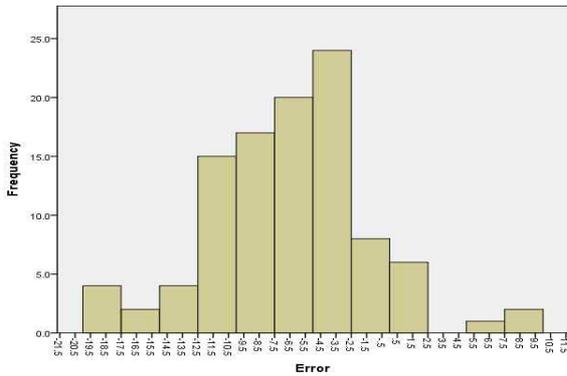


Figure 2. Histogram of signaldifference between GOSAT and Ground measurement

Fig. 3은 GOSAT과 안면도 지상관측소의 시기별 이산화탄소 관측치를 비교한 것으로 2009년부터 2012년 도까지 꾸준히 이산화탄소 농도치가 증가하고 있음을 확인할 수 있으며, 특히 계절별로 이산화탄소의 농도 변화 사이클이 분명하게 나타나고 있었다. 이러한 사이클은 주로 봄(3,4,5월)과 겨울(12,1,2월)에는 이산화탄소가 증가하고, 여름(6,7,8월)과 가을(9,10,11월)에는 낮아지는 특성을 보이고 있었다. 이러한 변화는 겨울과 봄에는 식생의 광합성 작용이 적어 이산화탄소의 흡수가 떨어지고 난방을 위한 화석연료의 사용으로 인해 배출되는 이산화탄소가 상당 부분 작용하고 있는 것으로 판단된다(Liu et al, 2011). 또한 겨울과 봄은 우리나라

의 계절적 영향으로 북서풍이 주요 풍계를 이루고 있어 중국에서 배출되는 이산화탄소가 우리나라의 상당부분 영향을 주어 이산화탄소의 농도가 더욱 높아진 결과로 판단된다(Choi and Um, 2012). 이러한 계절적 사이클과 관련하여 이산화탄소의 흡수는 식생의 광합성과 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다(Choi and Um, 2013). 각각의 관측값을 비교하며 식생이 자라기 시작 하 4~5월을 기점으로 이산화탄소 농도가 급격히 낮아 지고 이러한 경향은 6월~8월을 기점으로 정점을 나타 나고 있다. 이러한 특성을 고려할 때 식생의 호흡은 이산화탄소의 흡수와 분명한 관계가 있음을 알 수 있고 향후 이산화탄소 농도 감축을 위해서는 이산화탄소 흡수원으로서 식생의 역할을 더욱 강조해야 될 것으로 판 단된다(shim et al, 2013).

Fig. 4는 GOSAT과 안면도 지상관측소의 상관분석 결과를 나타내는 것으로 상관계수(R^2)는 0.49로 나타나 고 있어 비교적 강한 양의 상관관계가 나타나고 있었으 며 회귀 기울기는 0.51로 나타났다. 이는 GOSAT과 안 면도 지상관측소의 관측값은 상당히 밀접한 관계를 가 지는 것으로 볼 수 있으며 이에 따라 한반도 이산화탄 소 관측과 함께 안면도와 제주도 고산에 한정되어 있는 한반도의 이산화탄소 관측소의 시공간적 한계성을 극 복할 수 있는 대안으로 제시될 수 있을 것으로 판단된 다.

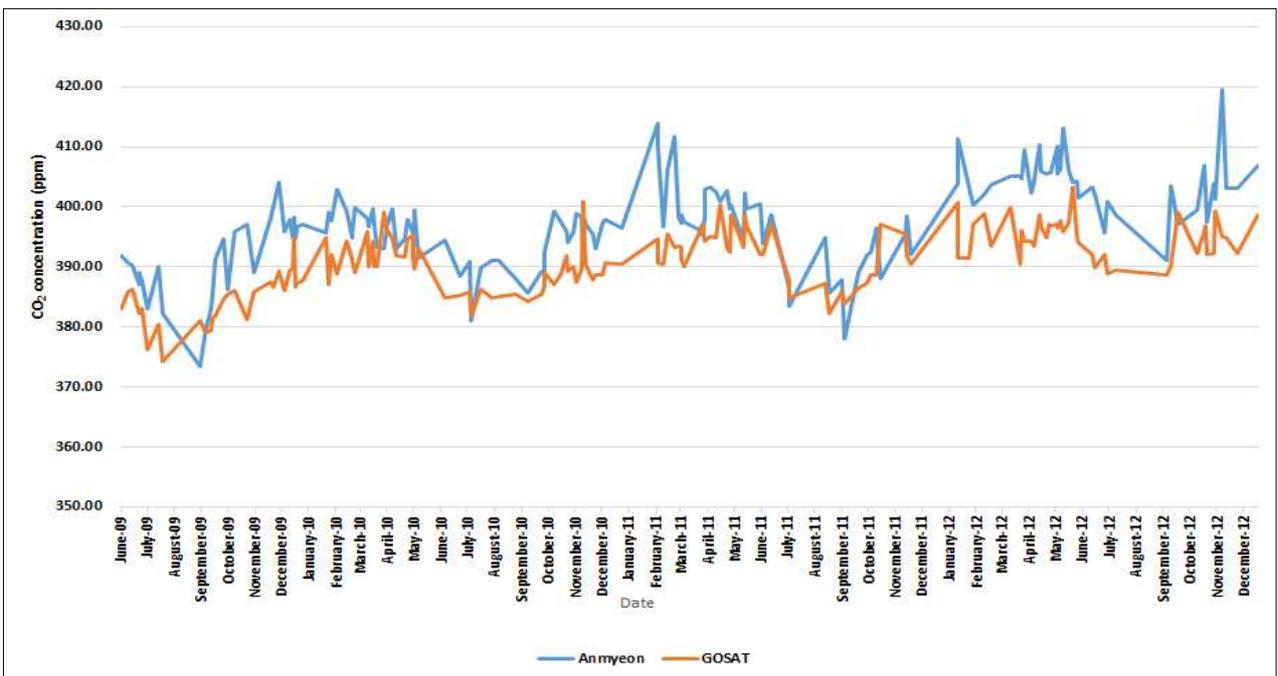


Figure 3. Temporal CO₂ concentration comparison of GOSAT and Anmyeon

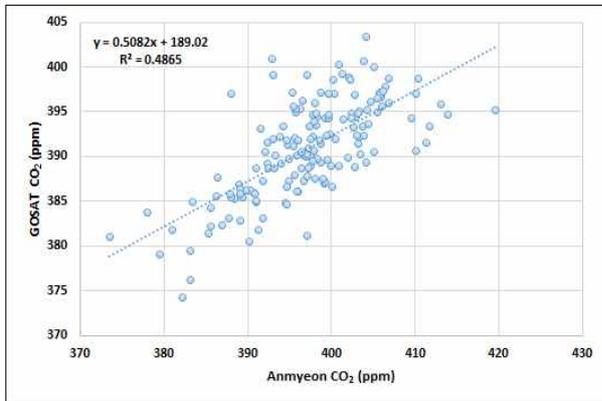


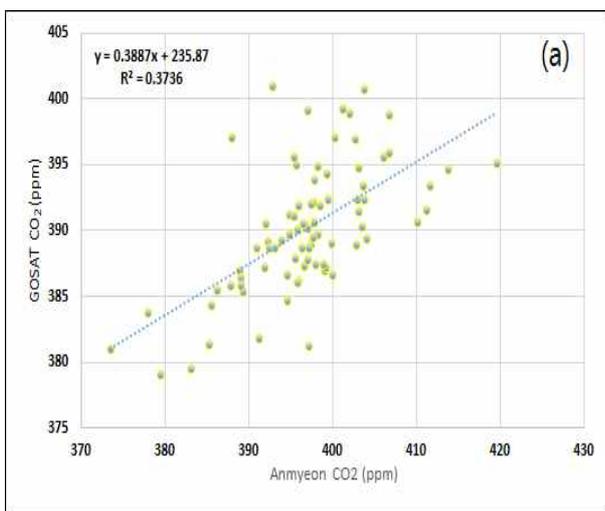
Figure 4. Correlation between GOSAT and Ground measurement

GOSAT과 안면도 지상관측소의 계절에 따른 상관분석 결과는 Fig. 5와 같다. 계절별 상관관계의 차이는 여름과 가을($R^2 = 0.62$)으로 강한 양의 상관관계가 나타나는 반면 봄과 겨울($R^2=0.37$)에는 보통의 양의 상관관계가 나타나 여름과 겨울이 좀 더 계절적으로 높은 상관계수를 보이고 있었다. 이러한 계절적 차이는 에어로솔의 영향으로 인해 발생하고 있는 것으로 판단된다. Hong et al(2013)은 봄과 겨울에는 아시아 대륙에서 발원되는 황사와 먼지 구름 등이 계절풍에 따라 한반도를 비롯한 일본에 영향을 미치고 이에 따라 GOSAT의 이산화탄소 측정값에 대한 오차가 발생하는 것으로 보고 있다. 따라서 GOSAT의 이산화탄소 관측값 활용 과정에 이와 같은 계절적 영향 역시 충분히 고려되어야 할 것이다.

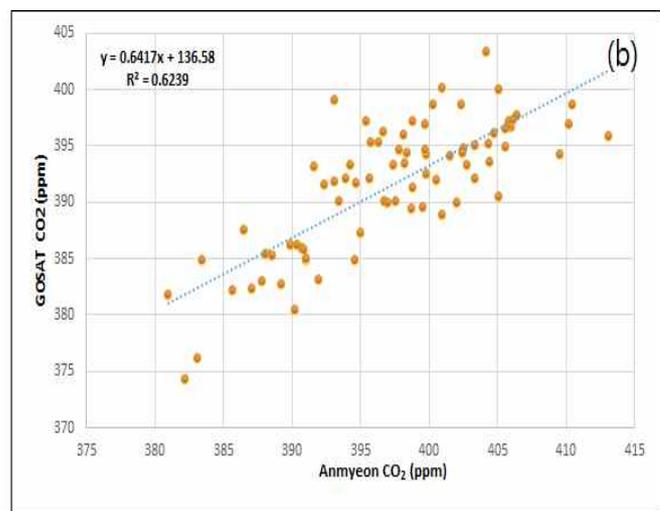
4. 결론

GOSAT과 안면도 지상관측소의 관측값의 상관관계를 보여주는 R^2 값은 0.49으로 비교적 강한 양의 상관관계가 나타나고 있다. 이러한 분석 결과는 안면도와 제주 고산에 한정되어 있는 한반도의 이산화탄소 관측소의 시공간적 한계성을 극복할 수 있는 대안으로 GOSAT 위성의 활용가능성을 충분히 전제할 수 있을 것으로 판단된다.

계절별 상관 분석 결과에서 여름과 가을에 강한 양의 상관관계($R^2 = 0.62$)가 나타나는 반면 봄과 겨울에는 보통의 양의 상관관계($R^2=0.37$)가 나타나 여름과 겨울이 좀 더 계절적으로 높은 상관계수를 보이고 있었다. 이러한 계절적 차이는 봄과 겨울의 황사와 같은 에어로솔의 영향으로 인해 발생하고 있기 때문에 향후 GOSAT 위성의 활용과정에서 에어로솔의 영향이 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다. 더불어 데이터 분석 기간(2009.6-2012.12) 중 GOSAT 이산화탄소 관측값이 지상관측소에 비해 평균 6.31ppm 낮게 나타나 GOSAT의 과소추정 경향이 나타나고 있음이 확인되었다. 그러나 각 관측 값의 오차 분석 결과가 대체로 정규 분포성을 보이고 있어 향후 위성의 활용과 관련된 후속 연구를 통해 보정 알고리즘을 적용하면 위성을 통한 이산화탄소의 정보 취득에 보다 효과적일 것으로 기대된다.



(a) winter and spring



(b) summer and Fall

Figure 5. Seasonal correlation between CO₂ observation by GOSAT and Anmyeon

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2011-327-B00861)

References

1. Buchwitz, M., Beek, R. D., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Warneke, T., Notholt, J., and Schulz, A., 2005, Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: initial comparison with chemistry and transport models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol.5, No.4, pp. 941–962.
2. Choi, J and Um, J., 2012, Comparative Evaluation for seasonal CO₂ flows tracked by GOSAT in Northeast Asia, *Korea Spatial Information Society*, Vol.20, No.5, pp. 1–13.
3. Choi, J and Um, J., 2–13. Analysis of CO₂ Distribution Properties Using GOSAT : a Case Study of North–East Asia, *The Korean Society for Geospatial Information System* Vol.21, No.2, pp. 83–90.
4. Gavrillov, N. M., Makarova, M. V., Poberovskii, A. V. and Timofeyev, Y. M., 2013, Comparisons of CH₄ satellite GOSAT and ground–based FTIR measurements near Saint–Petersburg (59.9° N, 29.8° E). *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 6(4). pp. 7041–7062.
5. GOSAT Project Office, 2010, Summary of the GOSAT Level 2 data product validation activity, pp. 1–28.
6. Hong, H., Lee, H., Jung, Y., Kim, W. and Kim, J., 2013, Comparison of carbon dioxide volume mixing ratios measured by GOSAT TANSO–FTS and TCCON over two sites in East Asia, *Korea Journal of Remote Sensing*, Vol.29, No.6, pp. 657–662.
7. Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., and Hamazaki, T., 2009, Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier–transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring. *Applied Optics*, Vol.48, No.35, pp. 6716–6733.
8. Liu, Y., Wang, X., Guo, M., and Tani, H., 2012, Mapping the FTS SWIR L2 product of XCO₂ and XCH₄ data from the GOSAT by the Kriging method—a case study in East Asia. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.33, No.10, pp. 3004–3025.
9. Parker, R., Boesch, H., Cogan, A., Fraser, A., Feng, L., Palmer, P. I. and Wunch, D., 2011, Methane observations from the Greenhouse Gases Observing SATellite: Comparison to ground-based TCCON data and model calculations. *Geophysical Research Letters*, Vol.38, No.15, pp.807–812.
10. Qu, Y., Zhang, C., Wang, D., Tian, P., Bai, W., Zhang, X., and Wu, Q., 2013, Comparison of atmospheric CO₂ observed by GOSAT and two ground stations in China. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.34, No.11, pp. 3938–3946.
11. Shim, C., Lee, J., and Wang, Y., 2013, Effect of continental sources and sinks on the seasonal and latitudinal gradient of atmospheric carbon dioxide over East Asia. *Atmospheric Environment*, Vol.79, pp. 853–860.
12. Yoshida, Y., Ota, Y., Eguchi, N., Kikuchi, N., Nobuta, K., Tran, H., and Yokota, T., 2011, Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short–wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite. *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol.4, No.4, pp. 717–734.
13. Yokota, T., Yoshida, Y., Eguchi, N., Ota, Y., Tanaka, T., Watanabe, H., and Maksyutov, S. 2009, Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First preliminary results. *Sola*, No.5, 160–163.
14. Zhang, C. M., 2010, Interferometric imaging spectrometer technology, Science press, pp.1–200.