

동북아시아에서 GOSAT CO₂와 MODIS 식생지수 분포의 상관성 분석[†]

Evaluating Cross-correlation of GOSAT CO₂ Concentration with MODIS NDVI Patterns in North-East Asia

최진호* 주승민** 엄정섭***
Jin Ho Choi Seung Min Joo Jung Sup Um

요약 본 연구는 동북아시아 지역의 이산화탄소 분포와 식생지수의 상관성 규명을 목적으로 한다. 이를 위해 지리가중치 분석기법을 활용하여 GOSAT 이산화탄소 측정자료와 MODIS 식생지수에 대해 다중공간회귀 분석을 시행하였다. 그 결과 이산화탄소와 식생지수 사이에는 전체적인 (-)의 상관관계가 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 공간적 자기상관성 측정을 위한 Global Morans'I 지수와 Anselin Local Morans'I 통계 분석 결과에서는 이산화탄소는 일정한 군집성을 보이며 분포하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 산림 파괴와 같은 개발 활동이 이산화탄소의 배출에 영향을 미쳐 일정한 군집을 형성하게 된 것으로 추정된다. 그러나 이산화탄소의 분포는 인위적 배출원과 식생의 호흡, 해양의 배출과 흡수 등의 다양한 요인과 결부되어 달라지기 때문에 이산화탄소 분포에 개입되는 다양한 변수와 상관성을 평가하는 후속연구가 필요할 것으로 사료된다.

키워드 : GOSAT, MODIS, 이산화탄소, 식생지수, 군집성

Abstract The purpose of this work is to investigate correlation between CO₂ concentration and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) in North East Asia. Geographically weighted regression techniques were used to evaluate the spatial relationships between GOSAT (Greenhouse Observing SATellite) CO₂ measurement and MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) vegetation index. The results reveals that CO₂ concentration to be negatively associated with NDVI. The analysis of Global Morans' I index and Anselin Local Morans' I showed spatial autocorrelation between the overall spatial pattern of CO₂ and NDVI. Ultimately, there were clustered patterns in both data sets. The results show that carbon dioxide concentration shows non-random distribution patterns in relation to NDVI clusters, which proves that intense development activities such as deforestation are influencing carbon dioxide emission across the area of analysis. However, as the concentration of carbon dioxide varies depending on a variety of factors such as artificial sources, plant respiration, and the absorption and discharge of the ocean, follow-up studies are required to evaluate the correlations among more related variables.

Keywords : GOSAT, MODIS, CO₂, NDVI, Clustering

1. 서론

현재 대기 중 이산화탄소 농도는 19C 산업혁명 이전 보다 약 35% 증가한 380ppm으로 증가한 상태이고, 평균기온은 약 0.74℃가 상승한 것으로 알려졌다[6]. IPCC는 이러한 기온 상승의 원인은 인간 활동에 의한

인위적 현상이며, 특히 인간에 의한 토지 이용과 개발의 영향이 현재의 이산화탄소 증가의 35% 이상을 차지할 만큼 상당한 비중을 차지하고 있는 것으로 발표하였다[12].

이러한 주장에 의하면 이산화탄소의 증가는 토지이용상태에 따라 달라질 수 있음을 의미한다. 즉 대규모

[†]This work was supported by the National Research Foundation of Korea Grant funded by the Korean Government (NRF-2011-327-B00861)

* Jin Ho Choi, Doctoral Student, Dept. of Spatial Information, Kyungpook National University. metalsea@knu.ac.kr

** SeungMin Joo, Doctoral Student, Dept. of Spatial Information, Kyungpook National University. jooseacool@knu.ac.kr

*** Jung-Sup Um, Professor, Dept. of Geography, Kyungpook National University, jsaecom@knu.ac.kr(Corresponding Author)

공업지역의 경우 화석연료의 사용으로 인해 대기 중 이산화탄소 농도가 높게 나타나지만 식생과 산림이 풍부한 지역의 경우 식생 자체에서 탄소를 흡수·저장하는 역할을 수행하여 대기 중 이산화탄소 농도가 상대적으로 낮게 유지될 수 있다. 따라서 산림이 풍부한 지역에 도시나 도로 건설과 같은 개발행위는 식생 및 토양이 저장하고 있던 이산화탄소를 대기 중으로 배출시켜 온실가스 농도를 증가시킬 수 있는 원인이 된다[4].

그러므로 토지이용의 변화를 정책적으로 규제하고 조절하기 위해서는 토지 이용에 따라 이산화탄소가 어떠한 상관관계를 가지고 배출되고 흡수되는지에 대한 현황파악이 매우 중요하다[10]. 토지이용 변화에 대한 이산화탄소 흡배출의 변화는 식생활력도(NDVI)에 대한 상관성 분석을 통해 파악할 수 있다. 특히 NDVI는 이산화탄소 농도와 반비례 관계가 성립하고 있어 토지 이용 변화에 따른 이산화탄소의 흡배출을 이해하기 위한 적절한 인자로 평가될 수 있다[9].

그러나 현재 이산화탄소의 변화 메커니즘은 완벽히 파악된 것이 아니다. 이는 대기 중 이산화탄소 농도를 측정하고 운영하는 감시 시스템이 전 지구적으로 약 350여 곳에 불과하고 지역적으로 고정 관측지점에 설치되어 있기 때문에 공간적으로 독립된 위치와 속성을 가지고 있는 이산화탄소의 광범위한 관찰이나 변수를 고려하는데 한계가 있기 때문이다[5]. 또한, 국내의 연구결과도 안면도 지구대기감시 관측소 한 곳에서 조사된 이산화탄소 측정 자료만을 기준으로 했기에 연구 결과를 일반화하기에는 상당한 한계를 가지고 있다.

최근에는 발달된 원격탐사 기술을 통해 이산화탄소를 관측하여 기존 측정방식의 시공간적인 한계를 극복하는 방안이 제시되고 있으며[15], 대표적 활용 사례가 2009년 발사에 성공한 최초의 온실가스 측정 전용 위성인 GOSAT(Greenhouse gases Observing SATellite)이다.

현재 GOSAT은 현존 위성 시스템 중 이산화탄소 성분을 관측하는데 가장 진보한 것으로 평가되고 있으며, 이를 활용한 다양한 연구 사례를 통해 그 유용성이 인정되고 있다[1, 2, 3, 7, 13, 14]. 따라서 GOSAT 위성의 활용은 이산화탄소 농도와 토지 이용에 따른 상관관계 분석은 그 동안의 관측시스템에서 시공간적 한계로 인해 해석될 수 없었던 문제점을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 식생지수와 이산화탄소 분포의 상관성을 분석하고 이러한 상관성이 어떠한 성향을 나타내는지 확인하고자 한다.

2. 연구개관 및 분석방법

2.1 연구지역

한반도 전 지역을 포함한 동북아시아 지역을 연구 지역으로 선정하였다. 이는 이산화탄소 최대 배출국인 중국에서 배출된 이산화탄소가 국내에 영향을 미치고 있다는 연구 결과[2]에 따라 한반도의 이산화탄소 분포 양상과 이를 해석하기 위해서는 중국의 영향도 함께 고려해야 할 것으로 판단되었기 때문이다. 이에 따라 Fig. 1과 같이 북위 32-42°, 동경 11-135° 일대로 연구 지역을 설정하였다.

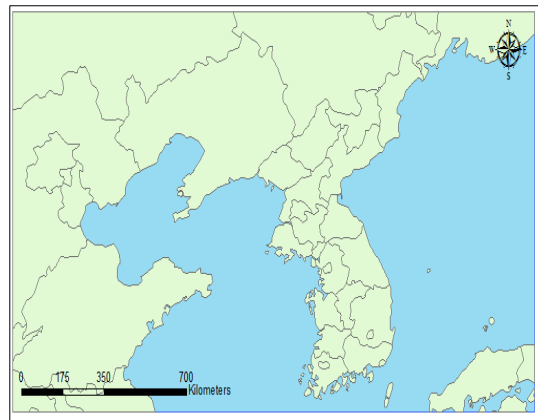


Figure 1. Experimental area

분석에 사용된 이산화탄소 자료는 2012년 한 해 동안 GOSAT 위성에서 측정된 이산화탄소 측정자료를 바탕으로 처리하였다. GOSAT 위성 측정 자료는 하루에 지구를 약 14회 돌며, 3일 후에 같은 지역을 평균 4ppmv(정밀도 1%)의 오차범위에서 측정하고 있어 기존의 이산화탄소 측정 자료의 시공간적 한계를 극복하는데 최적의 자료로 판단되었다[14]. NDVI 자료의 경우 GOSAT의 공간해상도를 고려하여 식생지수의 경우 동일시기의 MODIS MOD13A1을 연 평균화하여 사용하였다. 분석에 활용된 자료는 Table 1과 같다.

Table 1. Data sources

variables	data source
CO ₂ data	Level 3 XCO ₂
NDVI	MODIS MOD13A1

2.2 분석방법

2.2.1 데이터 구축 및 처리

GOSAT위성은 대기를 투과해 온 빛의 흡수 정도에 따라 이산화탄소 농도를 측정하기 때문에 측정 당시

기상상태가 양호할 경우 자료 취득이 용이하다. 그러나 측정 당시 기상상태가 불안정할 경우 관측 자료를 제거하는 동시에 오차 발생 문제로 자료의 복원과정에서 제외하고 있다. 따라서 2012년 GOSAT의 데이터의 경우도 Fig. 2와 같이 모든 시공간에서의 자료 획득은 불가능하다.

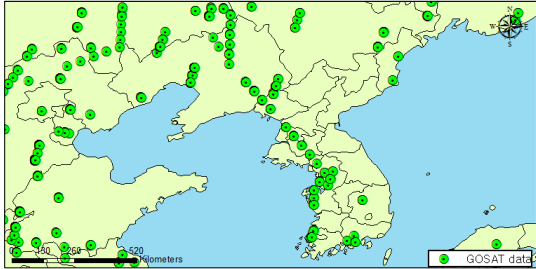


Figure 2. GOSAT CO₂ data distribution

따라서 결측된 이산화탄소 측정값을 복원하는 별도의 기법이 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 결측된 부분의 데이터를 생성하기 위해 측정된 이산화탄소 측정치를 내삽(interpolation)하여 이산화탄소 분포면(surface)을 생성하였다. GOSAT 자료의 내삽적용은 국내 뿐 만 아니라 국외의 연구에서 결측값 보정과 유동성 탐색 등 다양한 분야에서 활용되고 있다[2, 14]. 내삽에 적용되는 다양한 인자는 선행연구결과에 따라 일반크리깅(Universal Kriging)을 적용하였으며, 베리오그램 모델은 가우시안(Gaussian) 베리오그램을 적용하였다.

본 연구에서는 활용된 MODIS 데이터는 MODIS M OD13A1로서 한 달 단위로 작성된 NDVI자료이다. MODIS NDVI는 식생의 생물계절 모니터링에 많이 활용되고 있다[8]. 영상은 2012년 1월부터 12월까지 다운로드하였으며 보정계수를 적용하여 영상자료가 데이터 값으로 표현되도록 자료를 변환하여 분석에 사용하였다. NDVI자료의 합성에는 각 화소별 품질정보를 바탕으로 고품질 화소만을 기준으로 자료의 평균을 적용하는 방법으로 12개월을 합성하였으며, 해당 기간 중 자료가 존재하지 부분의 경우 결측처리 하였다.

2.2.2 이산화탄소와 NDVI 관계 분석 방법

일반적으로 이산화탄소와 같은 대기 구성 물질은 공간적으로 연속적인 형태로 존재하게 되며 지리적 여건에 따라서도 다양하게 변동 된다. 이러한 경우 종속변수와 독립변수 간의 관계가 모든 지역에서 동일하게 적용되지 않은 경우가 많다. 따라서 변수간의 관계를 전역적(global) 차원에서 추정하는 전통적 회귀

모델(OLS, Ordinary Least Square)은 동북아시아 지역의 이산화탄소와 NDVI와의 관계가 특정 지역에서는 잘 나타나지 않을 수 있다. 즉 이산화탄소와 같이 공간적으로 분포하는 인자들은 공간적으로 인접해있을수록 유사한 특성을 지니게 되는 공간적 자기상관성을 지니게 되기 때문에 어느 한 곳에 대한 현상을 바탕으로 전체를 설명하기 어려울 수 있다[3].

그러므로 이산화탄소 식생지수 간의 관계를 추정하는 회귀계수가 지역 간에 서로 다르다는 것을 전제하고 지역별로 국지적 회귀모델(locally regressed models)을 추정할 수 있는 GWR(Geographically Weighted Regression: 지리가중회귀모델)을 활용한 회귀계수 및 지역적 변동성 파악이 필요할 것으로 판단된다.

GWR은 국지적 차원에서 회귀계수를 추정하는 것으로, 변수들 간의 관계를 나타내는 회귀계수가 서로 다른 것을 전제하여 지역마다 서로 다른 회귀계수를 적용하여 지역에 따른 예외성 또는 국지적인 클러스터(hot spot)을 발견할 수 있다. GWR 분석 결과는 OLS에 비해 잔차가 작고 공간적 의존성이 낮은 장점이 있으며, 위치정보와 결합되기 때문에 시각적 분석을 가능하게 한다. GWR의 설명력은 R²값과 AIC(Akaike Information Criterion)으로 해석할 수 있으며, AIC는 절대량에 대한 의미가 아니라 AIC 값의 비교를 통해 더 나은 모형이라 평가하는 수치이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이산화탄소와 NDVI 분포 특성

GOSAT 위성을 이용하여 2012년도 동북아시아 지역의 이산화탄소 연평균 농도를 분석한 결과 Table 2와 같이 최소 380.52ppm에서 최고 403.4ppm으로 나타났다. 평균 농도는 392.28ppm으로 세계기상기구(WMO)에서 발표한 2012년도 전 세계 평균 이산화탄소 농도인 386.6ppm에 비해 약 5.68ppm 이상 높게 나타나고 있는 것으로 나타났다. 특히 Fig. 3과 같이 일부 지역에서는 13.73 ppm이상 차이가 발생할 정도로 지역적 편차가 큰 것으로 나타나고 있었다.

Table 2. Basic statistics of processed CO₂

Count	605
Min(ppm)	380.52
Max(ppm)	403.4
Mean(ppm)	392.28
Median(ppm)	392.33
Std.Dev	3.6026
Skewness	-0.13574
Kurtosis	3.4644

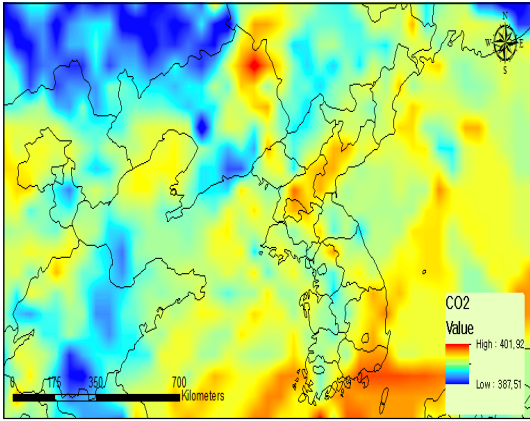


Figure 3. CO₂ distribution map

그러나 이러한 이산화탄소의 분포에 일반적 통계분석 결과는 이산화탄소의 공간상 분산 또는 집중 등에 공간패턴(spatial pattern)을 파악하기 어려우므로 이를 더욱 명확히 이해하기 위해 데이터의 전역적 자기상관성 측정을 위한 Moran's I 지수와 Anselin Local Moran's I 통계(LISA, Local Indicator of Spatial Association) 분석을 시행하였다. 먼저 전역적 통계량을 나타내는 Moran's I 분석 결과는 Fig. 4와 같이 모란 아이 지수가 약 0.44로 매우 유의한 수준으로 나타나 이산화탄소 분포가 공간적 자기 상관성이 상당 수준 존재하고 있는 것으로 나타났다. 즉 이는 이산화탄소가 높은 곳에는 주변 지역에서도 높은 농도를 보이며, 낮은 지역에서는 주변에서도 낮게 나타나고 있음을 의미하는 것으로 회귀계수 도출과정에서 국지적 편차의 고려가 필요함을 의미한다.

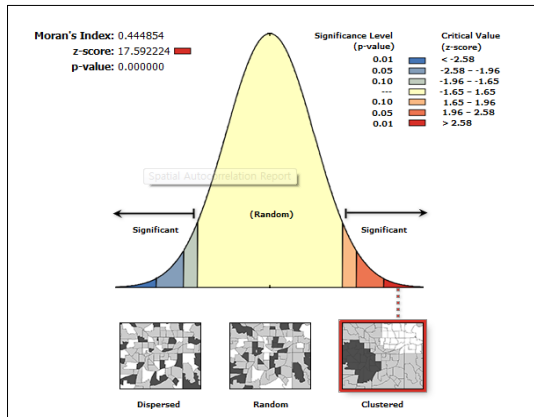


Figure 4. Global Moran's Index of CO₂

공간적 분포에 대한 국지적 분포를 측정하기 위한 LISA 분석 결과는 Fig. 5와 같이 통계적으로 유의미한

핫 스팟과 콜드 스팟이 분포하고 있는 것으로 나타나고 있었다. 즉 어느 한 지역을 기준으로 하여 높은 값 주변에 높은 값이 존재하는 H-H(High-High)유형과 낮은 값 주변에 낮은 값이 존재하는 L-L(Low-Low)유형이 공간적인 분포로 나타나고 있었다. H-H지역은 한반도 평안남도 일원과 경상남도 일대에서 강한 정적인 공간적 연관성을 보이면서 클러스터를 형성하고 있지만, 내몽골 지역과 중국 강소성 및 산둥성 지역 일대에서 이산화탄소 농도가 적은 L-L지역이 나타나고 있었다.

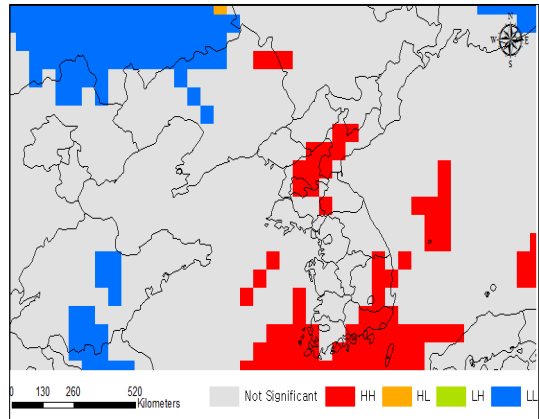


Figure 5. LISA map of CO₂

NDVI의 분포는 Fig. 6과 같이 -0.16-0.87 사이에서 분포하고 있었으며, 전체적인 평균은 0.46으로 나타나 상당 부분이 식생 지대를 이루고 있는 것으로 확인되었다.

Moran's I 분석 결과는 Fig. 7에서와 같이 모란 아이 지수가 약 0.39로 매우 유의한 수준으로 나타났으며, 이에 따라 지역에 따라 NDVI 역시 국지적 편차를 고려해야 되는 것으로 나타났다.

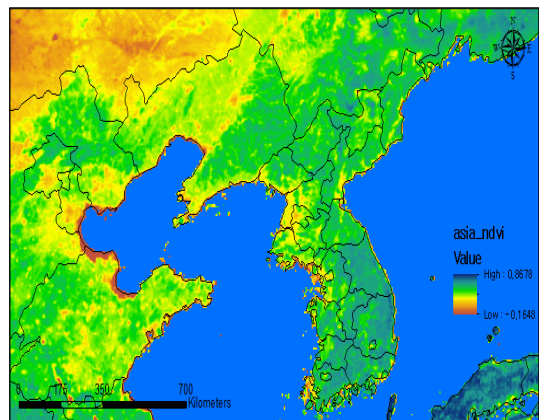


Figure 6. NDVI distribution map

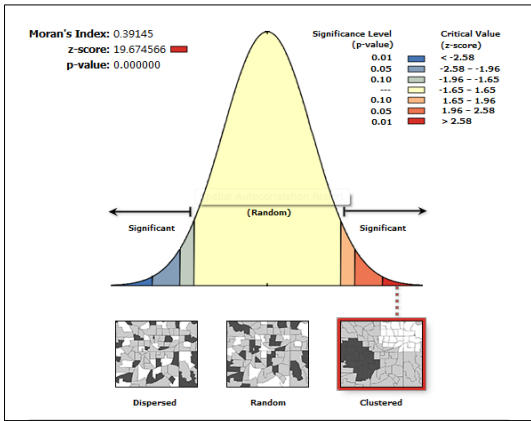


Figure 7. Global Moran's Index of NDVI

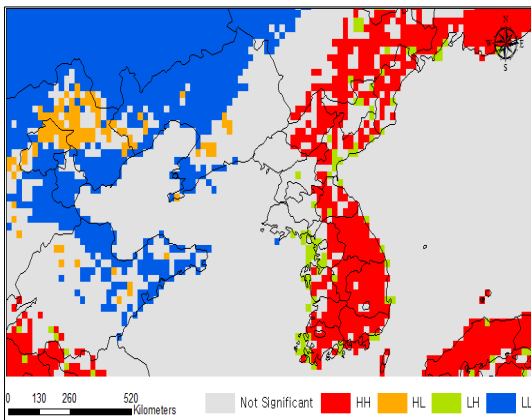


Figure 8. LISA map of NDVI

NDVI에 대한 공간적 분포 특성 파악을 위한 LISA 분석결과에서는 한반도 동북부 및 일본지역에서 H-H 지역이 주로 분포하는 반면, 중국 북부와 서부 해안 지역에서는 낮은 상태로 나타나고 있음이 확인되었다 (Fig. 8).

3.2 이산화탄소와 NDVI 분포의 상관성 분석

이산화탄소의 분포와 식생지수에 관계 분석을 위해 먼저 OLS 통계분석을 적용한 결과 $R^2=0.59$, 수정된 $R^2=0.58$ 로 식생지수가 이산화탄소의 총 분산을 약 58% 설명하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 OLS 모델의 잔차의 분포가 정규성을 가지는지에 대한 의미를 나타내는 Jarque-Bera값이 $p=0.0000$ 으로 유의미한 것으로 나타나 잔차의 분포가 정규성 가정을 준수하고 있다고 볼 수 없다.

또한, Koenker 통계량에 대한 검정결과가 $p=0.0338$ 로 통계적 매우 유의미하게 나타나고 있어 종속변수와 설명변수의 관계가 비고정성(non-stationary)이 있는 것으로 나타났다. 이는 종속변수와 설명변수 간의 관계가 고정된 것이 아니라 지역에 따라 공간적 이질성을 가지고 있음을 의미하기 때문에 이러한 특성을 반영할 수 있는 GWR 모델을 적용하여야 함을 의미한다.

이와 같이 OLS 모델 진단 절차를 통해 GWR 모델을 적용하였다. 가중치를 부여하는 방법으로는 Adaptive kernel 방법을 사용하였으며 표본점으로 50개 근린점을 사용하는 동시에 AICc 방식을 적용하였다.

그 결과 GWR 모델을 사용할 결과가 결정계수 및 AIC 값 모두 개선된 것으로 나타났다. OLS의 경우 결정계수가 0.58이었으나 GWR 모델의 경우 0.72로 높아져 총 분산의 72%를 설명하고 있을 정도로 향상된 모델로 추정되었으며, AIC 값의 경우 OLS 43.77이던 것이 지리가중회귀모델에서는 38.12로 5.65의 차이가 나타났다. 이러한 AIC 지수는 절대량에서는 의미가 없으나 그 값이 낮으면 더 나은 모형이라 평가할 수 있다.

Fig. 9는 각 지역별로 추정된 결정계수와 변수에 대한 회귀계수를 단계구분도로 나타낸 것이다.

지역별 모델의 설명력을 나타내는 R^2 를 살펴보면

Table 3. Results of OLS & GWR

	OLS	GWR			
		Mean	Max	Min	Std
NDVI	-0.0003	0.00016	0.00033	-0.00006	0.00008
Local R-squared		0.50896	0.72153	0.10229	0.05036
R-squared	0.59	0.78			
Adjusted R-squared	0.58	0.72			
AIC	43.77	38.12			
Morans'I Index	0.125	-0.031			
Koenker statistics	4.501	Neighbors		50	
Jarque-Bera statistic	32.778	Bandwidth methods		AICc	
		Kernel type		Adaptive	

[a] $p<0.001$

[b] Prob(>chi-squared), (1) degrees of freedom: 0.0338*

[c] Prob(>chi-squared), (2) degrees of freedom: 0.0000*

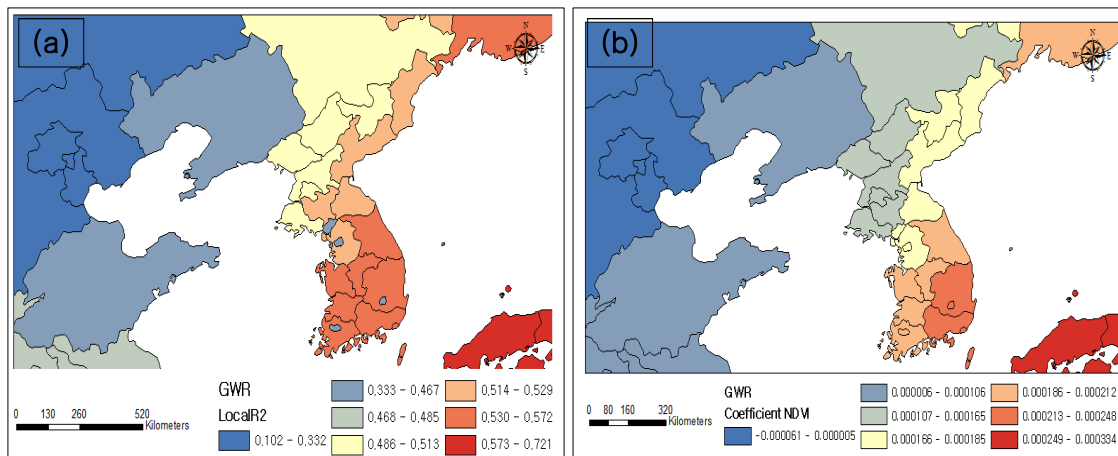


Figure 9. Local R² and NDVI coefficient distribution map (a) local R² (b) NDVI coefficient

0.102-0.721로 지역에 따라 결정계수의 차이는 약 5.2 배나 차이가 나고 이어 설명변수들의 영향력이 상당히 다르게 적용되고 있음을 알 수 있다. 따라서 이산화탄소와 NDVI와의 관계는 각 지역마다 상당히 차이가 나는 공간적 이질성을 보이는 변수라 볼 수 있다. 결정계수의 분포를 살펴보면 남한의 서울, 대구, 광주, 대도시를 제외한 대부분 지역과 일본 남부 일대에서 국지적 설명이 높은 것으로 분석되었고, 중국 북서부의 내몽골, 허베이성, 베이징, 천진 지방에서 국지적 모델의 설명력이 상당히 낮게 나타나고 있었다(Fig. 9-a).

NDVI에 대한 회귀계수의 분포를 전역적 모델에서 추정된 회귀계수는 -0.0003으로 나타난 반면, 국지적 모델에서 추정된 회귀계수는 일본 및 우리나라의 경상남도, 경상북도 지역의 경우 0.000249-0.000334를 나타내는 데 비해 중국 북서부 지역의 경우 -0.000061-0.000005로 상당히 낮게 나타나고 있다. 이러한 수치는 우리나라 남부지역 및 일본 지역의 경우 NDVI 지수가 높은 지역이면 이산화탄소가 농도가 낮게 나타나는 반면 중국 북서부 지역에서는 NDVI 지수가 높아도 이산화탄소가 농도가 높게 나타나고 있음을

의미한다.

이러한 지역적 영향력을 보다 자세히 살펴보면 Table 4와 같이 지역별 영향력이 달리 나타나고 있었다. 먼저 회귀계수와 식생의 활력도가 높은 일본의 주고쿠, 시코쿠, 긴키 지방에서 NDVI가 높게 나타날수록 이산화탄소의 농도가 낮게 나타나고 있는 것은 그 지역의 식생의 이산화탄소 흡수가 원활하고 그 영향력 역시 크다는 것을 의미 한다. 반면 내몽골, 허북성, 베이징, 톈진 지방에서는 식생지수가 높아도 이산화탄소가 높게 나타나고 있어 식생이 이산화탄소를 흡수할 수 있는 범위를 초과하고 있는 상태인 것을 알 수 있다. 특히 이러한 점은 한국과 일본에 비해 화석연료 등의 사용에 따른 이산화탄소 배출이 많은 영향과 무관하지 않을 것으로 판단된다.

따라서 향후 이산화탄소의 효과적인 포집과 감소를 위해서는 중국지역에서는 수목 식재 등의 방법을 통한 식생지수 활력도를 높여 이산화탄소를 흡수하는 방법보다는 화석연료 등의 사용을 줄여 이산화탄소 배출을 감소시키는 것이 보다 효과적일 수 있으며, 일본지역에서는 식생 활력도를 보다 증대시키는 방안이 보다 효율적임을 의미한다. 또한 우리나라의 경우

Table 4. Regional summary of Local R²

Regression	Region
↑ high	Chugoku, Shikoku, Kinki
	Gyeongsangnam-do, Gyeongsangbuk-do, Daegu, Busan,
	Jeollanam-do, Jeollabuk-do, Gwangju, Cholla-bukdo, Chungcheongnam-do, Chungcheongbuk-do, Daejeon, Gangwon-do
	Seoul, Gyeonggi-do, Gaeseong-si, Hamgyeongnam-do, Hamgyeongbuk-do Yanggang-do
	Hwanghaenam-do, Hwanghaebuk-do, Pyeongyang, Pyeongannam-do, Pyeonganbuk-do, Jilin
	Liaoning, Shandong, Jiangsu, Henan
↓ low	Nei Mongol, Hebei, Beijing, Tianjin

경상남·북도 지역에서는 식생활률도와 식생량의 증대와 함께 이산화탄소 배출량의 감소를 동시에 진행하는 방법이 필요한 것을 의미한다.

4. 결론

이산화탄소의 분포와 그 영향력에 대한 이해는 이산화탄소의 특성상 대기 중 잔존 시간이 길고 전 지구적 대기운동의 영향으로 광범위하게 이동 및 분산되기 때문에 광역적 스케일의 정량적 수치모의에 많은 한계가 있었다. 또한 이산화탄소는 약 350여 곳에 불과한 고정 관측지점에서 측정되어 있기 때문에 공간적으로 독립된 위치와 속성을 가지고 있는 이산화탄소의 광범위한 관찰이나 변수를 고려하기에 어려움이 있었다.

이러한 점 때문에 그 동안 이산화탄소의 대기 중 배출과 그 영향력이 큰 토지 이용과의 상관성을 연구하거나 그 영향력을 논의하기 위한 방법론이 마땅하지 않았다.

본 연구는 이러한 한계점을 극복하고자 온실가스 측정 위성을 활용하여 이산화탄소 농도와 토지 이용에 따른 관계 분석을 지리공간회귀분석에 의거 그 영향력을 규명한 연구이다. 이를 통해 광범위한 자료를 지리가중회귀분석으로 처리할 수 있었으며 이는 전체적으로 (-)의 상관관계가 나타나고 있음을 알 수 있었다. 그러나 전역적 자기상관성 측정을 위한 Moran's I 지수와 Anselin Local Moran's I 통계 분석 결과에서 이산화탄소는 일정한 군집성을 보이면서 분포하고 있는 공간적 자기상관성을 보여 모든 지역에서 (-)의 상관관계가 도출된다고 볼 수 없는 것으로 나타났다.

본 연구에서 나타난 식생지수와 이산화탄소 농도의 관계 분석에서는 지역에 따라 변화하는 식생지수의 영향력을 파악할 수 있었다. 특히 식생지수 즉, 식생에 의한 탄소의 흡수의 영향력은 중국과 일본, 한반도 지역에 따라 달리 나타나고 있었다. 특히 중국의 경우 식생 활력도 증대를 통한 결과 보다는 이산화의 탄소 발생을 줄이는 배출 저감 방법이 효과적이며, 일본에서는 식생 활력도 증대를 통한 방법이 보다 효과적일 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 식생 활력도와 식생량의 증대가 필요한 곳과 인위적 탄소 배출량을 저감해야 될 곳에 대한 우선순위를 부여하는 등 올바른 방향을 제시하는데 유용한 자료로 활용될 수 있으리라 사료된다.

본 연구는 2012년 한 해 동안 수행된 이산화탄소 자료와 비교적 소규모 지역에 국한하였기 때문에 이를 일반화하기에는 다소 한계가 따를 것으로 판단된다.

다. 또한 본 연구에서 이산화탄소 농도의 대리변수로 사용한 식생지수의 한계 때문에 전 지구적인 결과 해석에는 한계점이 있으며, 현재까지 GOSAT 위성의 특성상 관측값이 모두 동일한 장소와 시간에 획득되지 못해 결측값이 발생하고 있어 지역에 따라 이를 설명할 수 있는 요소가 부족한 점도 연구의 한계로 지적된다. 특히 동아시아지역의 이산화탄소 관련 연구에서 지적된 것과 같이 중국에서 불어오는 이산화탄소의 영향을 고려하지 못한 점은 향후 연구를 통해 보완 및 개선되어야 할 것이다[11].

References

- [1] Butz, A. S; Guerlet, O; Hasekamp, D; Schepers, A; Galli, I; Aben, C; Frankenberg, J; M. Hartmann; H. Tran; A. Kuze; G. Keppel-Aleks; G. Toon; D. Wunch; P. Wennberg; N. Deutscher; D. Griffith; R. Macatangay; J. Messerschmidt; J. Notholts; T. Warneke. 2011, Toward Accurate CO₂ and CH₄ Observations from GOSAT, Geophysical Research Letter, 38(14):1-6.
- [2] Choi J. H; Um J. S. 2012, Comparative Evaluation for Seasonal CO₂ Flows tracked by GOSAT in North-east Asia, Journal of Korea Spatial Information Society, 20(5):1-13.
- [3] Choi J. H; Um J. S. 2013, Analysis of CO₂ Distribution properties using GOSAT : A Case Study of North-East Asia, Journal of the Korean Society for Geospatial Information System, 21(2):85-92.
- [4] Foley, J. A; DeFries, R; Asner, G. P; Barford, C; Bonan, G; Carpenter, S. R; Chapin, F. S; Coe, M. T; Daily, G. C; Gibbs, H. K; Helkowski, J. H; Holloway, T; Howard, E. A; Kucharik, C. J; Monfreda, C; Patz, J. A; Prentice, I. C; Ramankutty, N; Snyde, P. K. 2005, Global Consequences of Land Use, Science, 309(5734): 570-574.
- [5] Houghton, R. A; Hackler, J. L; Lawrence. K. T. 1999, The U.S. Carbon Budget: Contribution from Land Use Change, Science, 285(5427): 574-578.
- [6] IPCC, 2000, Land Use, Land-Use Change and Forestry, A special Report of the IPCC, Cambridge University Press, 377.

- [7] Jacques, G; B. Henry. 2011, Measurement of Greenhouse Gases with the GOSAT-TANSO Instrument, APCAS Conference on Environmental Monitoring, 1-23.
- [8] Jung M. H; Lee S. H; Chang E. M; Hong S. W. 2012, Monitoring Forest Vegetation Change based on change of MODIS NDVI time series Pattern, Journal of Korea Spatial Information Society, 20(4):47-55.
- [9] Lim, C; Kafatos, M; Magonigal, P. 2004, Correlation between Atmospheric CO2 Concentration and Vegetation Greenness in North America: CO2 fertilization effect, Climate Research, 28: 11-22.
- [10] Schulp, C. J; Nabuurs, G. J; Verburg, P. H. 2008, Future Carbon Sequestration in Europe : Effects of Land Use Change, Agriculture, Eco-systems and Environment, 127(3):251-264.
- [11] Song K. B; Youn Y. H; Kim K. H. 2000, Short-term Variability of Carbon Dioxide within and across the Korean Peninsula: Case Study during 1995-1997, Journal of Korean Earth Science Society, 21(5): 623-634.
- [12] Turner, II; Lambin, B. L; Reenberg, A. 2007, Land Change Science Special Feature, the Emergence of Land Change Science for Global Environmental Change and Sustainability, Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(52): 20666-20671.
- [13] Qu, Y; Zhang, C; Wang, D; Tian, P; Bai, W; Zhang, X; Zhang, P; Dai, H; Wu, Q. 2013, Comparison of Atmospheric CO2 Observed by GOSAT and Two Ground Stations in China, International Journal of Remote Sensing, 34(11); :3938-3946.
- [14] Yang, L; Xiufeng, W; Meng, G; Hiroshi, T. 2011, Mapping the FTS SWIR L2 product of XCO2 and XCH4 data from the GOSAT by Kriging Method - A Case Study in East Asia, International Journal of Remote Sensing, 33(10), : 3004-3025.
- [15] Zhang, C. M. 2010, Interference Imaging Spectrometer Technology, Beijing, Science Press. 1-200.

논문접수 : 2013.08.30

수정일 : 2013.10.14

심사완료 : 2013.10.25