

연구논문

GOSAT 기반의 동북아시아 CO₂ 분포도에 적용된 크리깅 기법의 비교평가

최진호* · 엄정섭**

경북대학교 공간정보학과*, 경북대학교 지리학과**
(2011년 8월 24일 접수, 2011년 11월 28일 승인)

Comparative Evaluation among Different Kriging Techniques applied to GOSAT CO₂ Map for North East Asia

Jin Ho Choi* · Jung-Sup Um**

Department of Spatial Information Science, Kyungpook National University*

Department of Geography, Kyungpook National University**

(Manuscript received 24 August 2011; accepted 28 November 2011)

Abstract

The GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) data provide new opportunities the most regionally complete and up-to-date assessment of CO₂. However, in practice, GOSAT records often suffer from missing data values mainly due to unfavorable meteorological condition in specific time periods of data acquisition. The aim of this research was to identify optimal spatial interpolation techniques to ensure the continuity of CO₂ from samples taken in the North East Asia. The accuracy among ordinary kriging (OK), universal kriging (UK) and simple kriging (SK) was compared based on the combined consideration of R² values, Root Mean Square Error (RMSE), Mean Error (ME) for variogram models. Cross validation for 1312 random sampling points indicate that the (UK) kriging is the best geostatistical method for spatial predictions of CO₂ in the East Asia region. The results from this study can be useful for selecting optimal kriging algorithm to produce CO₂ map of various landscapes. Also, data users may benefit from a statistical approach that would allow them to better understand the uncertainty and limitations of the GOSAT sample data.

Keywords : GOSAT, CO₂, Kriging, North East Asia

I. 서론

현재 이산화탄소 분포를 추정하기 위한 방법은 크게 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서 운영하고 있는 지상 감시소(250여개)의 데이터의 활용과 위성을 이용하여 온실가스를 측정하는 방식으로 구분할 수 있다. 그러나 지상관측소 자료의 경우 시·공간적 제약성으로 인해 전 지구적 규모의 감시 체계로 활용하기에는 많은 한계가 있으며, 원격탐사 데이터의 경우도 기상 상태에 따라 균등하게 분포하는 자료를 획득하지 못해 이산화탄소의 광역분포 특성을 적절히 표현하기에는 어려운 문제가 있다.

최근에는 이러한 문제점을 보완하기 위해 지구통계학적 분석방법을 통해 제한된 샘플자료로부터 전체적인 분포를 추정하는 방법이 사용되고 있으며, 이 중 대표적 방법으로 크리깅(Kriging) 내삽 방법이 응용되고 있다. 원격탐사자료 및 대기 환경 분야에서 크리깅은 산성비, 오존, 이산화탄소, 피복 등의 공간적인 변동성 분석 등에 적용되는 유용한 방법론으로 적용되고 있다(최선영, 2004; 조홍래·정종철, 2006; 김준현 등, 2011; Wang, 2007; Manthena *et al*; 2009). 이와 관련 대표적 연구는 박노옥·장동호(2009)이 지표환경 자료에 대한 공간적 분포 양상을 분석을 위해 원격탐사 자료와 크리깅 기법을 적용한 사례와 류희영 등(2008)이 원격탐사 자료로부터 도시의 피복 및 기본 범위를 크리깅기법을 통해 분석한 사례를 제시할 수 있다. 국외의 경우도 Tranchant and Vincent(2000)이 TOMS, SBUV, SAGE II 오존 데이터를 바탕으로 크리깅 기법을 응용한 사례와, Florio *et al*(2004), Coulibaly *et al*(2008)이 지구통계분석을 이용하여 AVHRR과 NOAA, IKONOS 데이터를 분석한 사례가 있다.

크리깅 기법에는 전통적인 단순 크리깅(Simple Kriging, SK), 정규 크리깅(Ordinary Kriging, OK), 일반 크리깅(Universal Kriging, UK) 등이 있다. 그러나 이러한 크리깅 기법의 다양성은 사용자 입장에서 분석하고자 하는 데이터에 따라 다양

하게 적용되는 장점이 있지만, 반대로 적절한 크리깅 방법론의 선택이 어려울 수 있는 단점이 내재되어 있다. 원격탐사 자료의 경우 관측 센서의 한계로 인해 탐지 한계를 벗어난 관측 값은 모두 임계치로 처리되거나, outlier가 자료에 포함될 수 있다. 그러므로 크리깅 방법에 따라 추정결과의 예측력과 신뢰성이 달라질 수 있어 데이터 특성을 파악하여 적용할 크리깅 방법을 선택하는 것이 매우 중요하다. 특히 이산화탄소와 같은 온실가스의 경우 토지의 이용 형태 및 산업 활동, 에너지 사용에 따라 지역별로 차이가 있으며, 지리적 위치에 따라 크게 영향을 받기 때문에 지역적인 분포를 가장 잘 반영할 수 있는 크리깅 기법을 선정이 필요하다.

Tomosada *et al*(2009)은 GOSAT(Greenhouse gases Observing SATellite) 측정 자료에 크리깅 분석을 적용하여 지구전체의 이산화탄소 분포추세를 분석하였는데 이는 본 연구와 가장 근접한 사례이다. 하지만 Tomosada *et al*(2009)의 연구는 전 지구차원에서 수행된 것이며 개별 크리깅 기법에 대한 비교평가에 주안점을 두지 않았다. 즉, 적용된 크리깅 기법에 따라 지역별로 변화 양상을 보이는 이산화탄소의 분포 특성을 평가하고 원래 데이터의 분포특성과 연계하여 상세한 단위지역별 스케일의 분포 분석은 수행되지 않았다. 데이터의 분포 특성에 대한 면밀한 분석과 크리깅 기법의 이론적 배경의 이해를 통해 파라미터 설정 값과 크리깅 기법의 종류의 적절한 선택이 필수적임에도 불구하고 이를 정량적으로 논의한 사례는 찾아보기 어렵다.

따라서 본 연구에서 GOSAT 자료를 이용한 이산화탄소 분포 특성을 분석하는 과정에서 최적의 크리깅 기법을 추적하기 위해 각 크리깅 기법의 예측 능력을 비교하고자 하였다. 이를 위해 세계 최초의 온실 가스 측정 위성인 GOSAT에서 측정된 동북아시아 지역의 이산화탄소 원격탐사자료에 대해 다양한 크리깅 기법을 적용한 사례 연구를 수행하였다. 자료 값의 분포특성을 파악하기 위해 자료의 구간별 예측 오차를 검증하고, 예측 능력을 비교하고자 교차 검증(Cross Validation)을 수행하였다. 이를

통해 사례연구지역의 이산화탄소 분포 특성을 표현하는 데 적절한 크리깅 기법을 제시하였다.

II. 이론적 고찰

1. GOSAT

GOSAT은 CO₂와 CH₄의 전 지구적 분포 데이터를 얻기 위해 2009년 1월 23일 일본 우주항공 연구개발 기구인 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)와 일본 국립환경연구소(National Institute of Environmental Studies, NIES)가 발사한 최초의 온실가스측정 위성이다. GOSAT의 전체 무게는 약 1.75ton 이며, 수명은 약 5년이다. GOSAT은 태양동기 궤도 위성으로 666km 고도에서 10km의 공간해상도의 데이터를 취득하고 있다. 주기해상도는 하루에 지구를 약 14회 정도 돌며 측정하게 되며, 3일 후에 같은 지역을 평균 약 1%(4ppmv)의 오차범위에서는 측정하게 된다(Kuze *et al.*, 2009). GOSAT 위성에 대한 자세한 사양은 Table 1과 같다.

GOSAT에는 TANSO-FTS(Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation-Fourier Transform Spectrometer)와 TANSO-

Table 1. Major Specifications of GOSAT

Characteristics	Value
Orbit	Polar sun-synchronous
Altitude	666km
Spatial Resolution	10.5*10.5km
Period of Revolution	14.66 orbits/day
Repeat Coverage	3 days

-CAI(Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation-Cloud and Aerosol Imager)의 두 개의 센서가 장착되어 있다. TANSO-FTS 서로 다른 4개의 관측 파장 영역을 가지고 있으며, Band 1은 O₂, Band 2,3은 CO₂, CH₄, Band 3는 CO₂, H₂O를 분석할 수 있다(Table 2). TANSO-CAI는 에어로졸의 종류와 광학두께를 유도하는 센서로 지구 대기의 주요 구성 성분에 의한 흡수에 영향을 받지 않는 4개의 관측밴드로 구성되어 있으며, 주로 근적외선 범위에서 구름을 감지하고 에어로졸의 광학적 효과를 감지하여 TANSO-FTS에서 관측된 CO₂, CH₄의 신호를 보정하는데 사용된다(Kuze *et al.*, 2006).

GOSAT은 Aqua 위성의 AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)와 MetOp 위성의 IASA(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)에 비해 뛰어난 공간해상도 및 정확도를 가지고 있다. 그러나 GOSAT은 대기를 투과해 온 빛의 흡수 정도에 따라 이산화탄소 농도를 측정하고 있기 때문에 측정 당시 구름이 존재하는 경우 관측 자료를 모두 제거하게 되고, 이로 인해 전체 관측 자료의 10% 정도 자료만 복원되어 사용된다. 따라서 GOSAT 자료를 통한 이산화탄소의 공간적 관측 범위는 상당히 제한적이게 된다. GOSAT의 효과적인 활용을 위해서는 한정된 자료를 바탕으로 측정치가 존재하지 않은 지역에 대해 온실가스 정보를 추정하는 공간보간에 대한 연구가 필수적이다.

2. Kriging 기법간 비교평가

크리깅 분석은 공간상 분포하는 자료의 위치정보

Table 2. Specifications of the TANSO-FTS

Pointing mirror	2-axis pointing mirror			
	Cross track(± 35 deg.), Along track(± 20 deg.)			
Scan	IFOV<10.5km, 790km(Scan width)			
FOV				
Spectral band	Band 1 SWIR	Band 2 SWIR	Band 3 SWIR	Band 4 TIR
Bandwidth (μm)	0.758~0.775	1.56~1.72	1.92~2.08	5.56~14.3
Targeted gases	O ₂	CO ₂ -CH ₄	CO ₂ -H ₂ O	CO ₂ -CH ₄
Time necessary for single scanning(sec)	4.0, 2.0 or 1.0 (depending on the scanning mode being used)			

를 바탕으로 각 자료간의 거리와 베리오그램(variogram)을 통해 계산하게 된다. 따라서 크리깅 기법을 적용하기 위해서는 가장 먼저 분석 자료들의 공간적 상호관계와 연속성을 파악해야 한다. 여기서 데이터의 공간적 상호관계를 파악하는 대표적인 방법을 베리오그램이라 하며, 이는 공분산과 매도그램과 같이 일정한 거리에 있는 자료들의 공간적 유사성을 나타내는 척도이다. 이는 식 (1)과 같으며 이는 일정거리 h만큼 떨어진 두 데이터들 간의 차이를 제공한 것의 기댓값으로 나타낸다(김호웅, 2010).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad \text{Formula (1)}$$

여기서 h는 지연거리(lag distance)로 두 자료간에 떨어져 있는 거리를 의미하며, n은 지연거리만큼 떨어진 샘플 자료 쌍의 개수를 나타낸다. 분리 거리가 증가하여 일정한 거리가 되면 자료간의 상관성이 없는 일정한 상태의 베리오그램 값을 나타내는데 이 값을 문턱 값(sill)이라고 하며, 이때 자료들이 상관관계를 보이는 최대 분리거리를 상관거리(range)라 한다. 이론상 분리거리가 0이면 베리오그램의 정의에 의하여 그 값은 0이 되어야 한다. 하지만, 실제 계산된 실험적 베리오그램을 이용하여 이론적 베리오그램을 찾아내는 경우에는 분리거리가 0에서도 베리오그램이 0이 아닌 상수 값을 나타내는 경우가 있는데, 이를 너깃(nugget)이라 한다. 너깃의 값은 주어진 자료가 짧은 분리거리에서 나타내는 데이터의 불확실성을 의미한다(Fig 1).

계산된 베리오그램은 이를 가장 이상적으로 표현

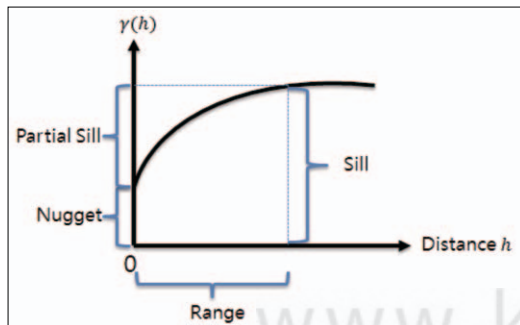


Fig 1. Theoretical variogram

하는 이론적 베리오그램(theoretical variogram)의 선택을 통해 예측 값을 계산하게 되는데 이는 최종적인 크리깅 기법의 예측 값에 영향을 주기 때문에 연구자 주관의 개입을 최소로 하는 상수를 바탕으로 결정해야 한다. 이러한 이론적 베리오그램 모델은 문턱 값의 존재 유무에 따라 여러 가지 모델로 구분되어 진다. 문턱 값을 갖는 경우에는 구형 모델(Spherical Model), 지수형 모델(Exponential Model), 가우스 모델(Gaussian Model)이 적용될 수 있으며, 여기서 구형 모델은 일반적으로 가장 많이 사용되는 함수모델로, 3차 다항식 형태로 표현되며 상관거리에서 베리오그램 값이 문턱 값과 일치하는 특징이 있다. 지수형 모델은 문턱 값에 근사하게 보간되며, 주로 수문학 자료에 널리 이용된다. 가우스 모델은 작은 분리거리에서 강한 자료들의 강한 상관성이 나타나거나 연속성이 강하게 나타날 경우에 사용된다(우광성, 2008).

크리깅 분석은 이러한 베리오그램의 유형 이외에도 전제하고 있는 가정에 따라 서로 다른 유형으로 구분된다. 심플 크리깅의 경우 특정 위치에서 지역화된 변수에 대한 추정 값이 전체 지역에 대한 평균 값과 같다고 가정하는 방법이며, 정규 크리깅은 오차분산을 최소화 하는 가중선형조합에 의한 방법이다. 일반 크리깅은 추정하고자 하는 지역의 국지적인 평균값은 각 지역 내에서 완만하게 변화하고 있음을 전제하는 것으로, 가중치를 계산할 때 자료 분포의 공간적 불변성을 제거하지 않는다. 크리깅 기법의 경우 분석 자료의 공간적 상관관계와 이를 대표할 수 있는 이론적 베리오그램의 선정, 그리고 이를 분석하기 위해 서로 다른 가정을 바탕으로 하는 크리깅 기법 유형의 선택에 따라 예측 정확성이 달라지기 때문에 반드시 이에 따른 결과 값을 비교하는 절차가 필요하다.

III. 데이터 취득

1. 연구지역

동북아시아지역은 최근 계절별 온도 증가율의 뚜

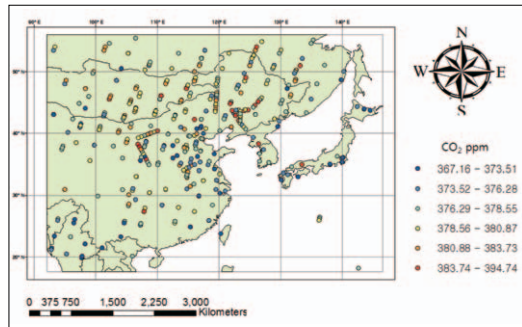


Fig 2. Location of the study area and sampling site

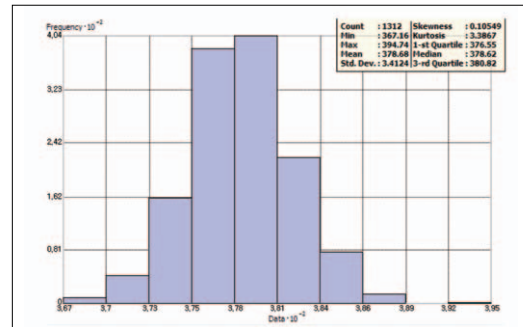


Fig 3. Histograms for CO₂

몇한 차이를 보이는 동시에 그 상승폭도 매우 커, 전 세계적으로 가장 온난화가 두드러진 지역 중 한 곳이다(Lal and Harasawa, 2001). 우리나라의 기후변화 적응과 대응을 위한 대책 마련을 위해서 주변국으로부터 이동해 오는 온실가스의 광역적인 분포를 면밀히 검토할 필요성이 있는 지역이다. 더불어 이 지역은 다양한 유형의 자연지형과 기후대가 분포하여 이산화탄소의 국지적 변화 양상이 다르게 나타나 GOSAT 데이터에 대한 크리깅 연구의 최적지라고 판단된다(심창섭, 2010).

따라서 본 연구의 공간적 범위는 한반도, 일본, 중국, 타이완, 몽골, 러시아 극동 지역과 시베리아 지역을 일부 포함하도록 하여 위도 18~56°N, 93~147°E으로 설정하였다. 연구의 시간적 범위는 계절적으로 비교적 흐린 날이 적어 데이터 확보가 용이한 가을철(9,10,11월)에 주안점을 두었으며, 최근자료를 활용하고자 2010년 측정된 FTS Level 2B 이산화탄소 데이터를 활용하였다. 분석에 사용된 데이터 포인트 수는 1312개로 측정 포인트의 위치와 이산화탄소 농도는 Fig 2에 제시되어 있다.

2. 데이터의 통계적 특성

크리깅 기법은 자료의 공간적 분포특성과 내재하는 자료간의 구조적 관계를 기반으로 하여 미 지점에 대한 값을 예측하기 때문에 예측 정확도의 향상을 위해서는 자료의 경험적 분포패턴 즉, 자료의 구조와 특징을 파악하기 위해 탐색적 공간자료 분석(exploratory spatial data analysis)을 통해 자료

의 특성과 구조를 파악해야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 히스토그램(Histogram), 분위수 대조도(Quantile-Quantile plot, Q-Q Plot), 경향분석(Trend analysis)을 실시하였다.

먼저 전체적인 데이터의 분포 특성을 알아보기 위해 실시한 히스토그램 분석(Fig 3)에서 평균값(Mean) 378.68ppm, 중간값(Median) 378.62ppm, 왜도(Skewness) 0.11, 첨도(Kurtosis) 3.39으로 분석되었다. 이는 자료의 분포가 완벽한 정규분포는 아니지만 정규분포와 근접하고 있으며 왜도 0, 첨도 3 상태에서 크게 벗어나지 않아 대체로 정규분포를 따르는 것으로 판단된다.

자료의 누적분포와 표준 정규분포간의 차이를 판정하기 하기 위해 실시한 분위수 대조도 분석에서는 자료의 쌍들이 대체로 기울기가 1인 직선 축에 가까운 선형성을 보였으나 최대·최소값 주변에서 다소 선형성이 벗어나는 것으로 나타났다. 그러나 그 차이가 크리깅 기법의 예측 능력에 영향을 미칠만큼 크지 않아 히스토그램 분석결과와 마찬가지로 자료의 분포가 유사정규분포로 판단된다(Fig 4).

일반적으로 자연 상태에 분포하는 자료는 일정한 방향성을 띠는데 이는 크리깅 기법을 적용하는 과정에서 공간 보간의 신뢰도를 저해하는 요인으로 작용한다. 따라서 크리깅 기법을 적용하기 이전에 방향성을 제거하기 위해 수행되는 통계분석이 3차원 경향분석이다(Fig 5). 3차원 경향분석 결과는 대체로 동-서(x축), 남-북(y축) 모두 투영된 산점도의 경향선이 유사한 형태를 보이는 동시에 중간지점에

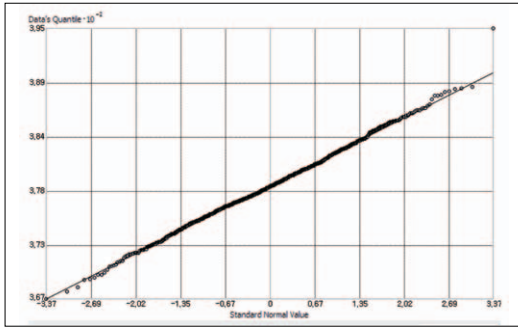


Fig 4. Q-Q plot graphs for CO₂

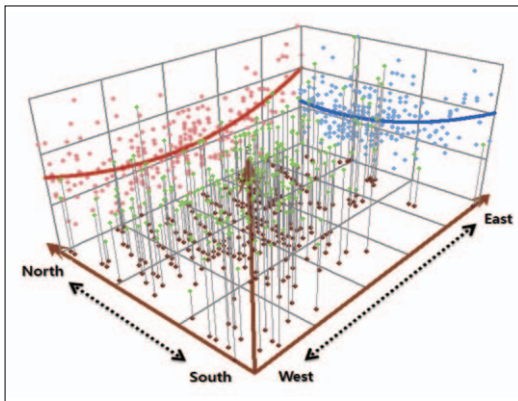


Fig 5. Trend analysis of CO₂

서 낮아지다가 각각 동과 남쪽 방향에서 증가함을 알 수 있었다. 또한 경향선의 기울기가 2차 곡선에 가까워 자료의 분포가 일정한 경향성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 따라서 이러한 경향성을 제거하여 지역적 변수에 영향을 미치는 영향을 최소화하여 크리깅을 적용하였다.

IV. 결과 고찰 및 시사점

1. 베리오그램 분석 결과

크리깅 분석을 통해 미 측정 지점의 이산화탄소 값을 예측하기 위해서는 자료간의 공분산 값이 활용되는데, 이는 자료들의 베리오그램 모델링 결과로부터 얻어진다. 따라서 측정된 지점 이외의 값을 신뢰할 수 있는 수준으로 추정하기 위해서는 베리오그램 인자 및 적절한 베리오그램 모델을 선택해

Table 3. Variogram model and parameters

	Variogram	Nugget	Sill	nugget/sill ratio (%)
Simple Kriging	Gaussian	5.05	7.68	65.8
Ordinary Kriging	Gaussian	4.96	8.46	58.6
Universal Kriging	Gaussian	6.77	11.63	58.2

야 한다.

일반적으로 베리오그램의 분포는 분리거리(Lag Distance) 길이와 개수에 따라 베리오그램 모델 및 모델을 구성하는 너깃, 상관거리, 문턱 값의 매개변수를 변화시키기 때문에 분리거리의 길이와 개수의 선택이 매우 중요한 작업이다. 일반적으로 분리거리의 길이와 개수의 선택은 샘플 데이터가 규칙적인 격자망에 위치하고 있으면 격자간 거리를 최적의 분리거리로 설정하지만, 샘플 데이터가 불규칙적으로 분포할 경우 이웃한 점들 간의 평균거리를 분리거리로 설정하는 방식에 설정하게 된다(Issac and Sivastava, 1989). 따라서 본 연구에서는 이산화탄소의 측정 자료가 불규칙적으로 분포하기 때문에 인접한 점들의 평균거리를 분리거리로 설정하여 약 6.86km로 분리거리로 설정하였다. 크리깅 수행 시 최대 탐색 반경은 각 베리오그램의 상관거리를 고려하여 최대 71.38km로 설정하고 최대 사용 자료(number of lags)의 개수는 12개로 설정하였다.

분리거리 설정을 통해 나타난 측정 자료의 공간적 상관관계는 이를 가장 이상적으로 표현할 수 있는 이론적 베리오그램을 결정한다. GOSAT 이산화탄소 농도 베리오그램은 문턱 값까지 증가하다가 일정 거리 이상에서는 그 값이 일정하게 나타났으며, 비교적 짧은 분리거리에서 베리오그램 값이 서서히 변하는 양상을 보여주었다. 따라서 짧은 분리거리에서 자료들의 상관성이 크거나 연속성이 강할 경우 자료의 특성을 반영할 수 있는 가우시안 모델을 적용하였다(최종근, 2002). 이론적 베리오그램 분석 결과를 살펴보면 각 크리깅 기법 베리오그램은 동일한 가우시안 모델과 상관거리를 가지지만, 너깃 값과 문턱 값은 서로 다르게 나타났다(Table 3). 특히 문턱 값(Sill)에 대한 너깃(Nugget)의 비율

인 상대너깃효과(relative nugget effect)은 심플 크리깅 (Simple Kriging) 약 65.8%, 정규 크리깅 (Ordinary Kriging) 약 58.6%, 일반크리깅 (Universal Kriging) 약 58.2%로 전체적으로 58~65%으로 분석되었다. 이러한 너깃과 문턱값의 비는 그 값이 클수록 분석 자료의 변동성이 증가하여 인접한 거리에 있는 자료들의 값과 차이가 클 가능성이 높아지고, 작을수록 거리에 따라 점진적 변화를 의미한다. 상대너깃 효과가 크다는 것은 공간적 상관성의 연속성이 떨어지고 잡음 효과가 크게 나타나 이산화탄소의 공간 추정 과정에서 생산된 정보의 신뢰성에 한계를 가진다는 것이다. 이는 주어진 자료의 불확실성이 커지는 것을 나타내기 때문에 심플 크리깅과 정규 크리깅은 일반 크리깅에 비해 거리에 따른 자료 값의 점진적 변화양상의 반영 정도가 낮을 것으로 판단된다. 상대적 너깃 효과가 작은 일반 크리깅은 이산화탄소 자료의 연속성과 상대적으로 높은 수치의 이산화탄소가 관측되는 곳에서 추정치를 주변의 값들과의 강한 상관성을 통해 예측이 가능하여 여타의 크리깅 기법에 비해 향상된 예측 결과를 도출할 것으로 판단된다.

2. 예측 능력 비교

본 논문에서는 크리깅으로 추정된 값의 정확성을 평가하기 위하여 leave-one-out 기반의 교차검증을 수행하였다. 교차 분석은 크리깅 분석 시 적용된 베리오그램 모델과 크리깅 기법의 적합성을 판정하기 위해 예측된 자료를 이용하여 본래의 자료 값을 다시 예측하는 타당성 검증 방법이다. 이는 일시적으로 1개의 이산화탄소 자료를 제거한 후에, 나머지 자료들을 이용하여 그 위치에서의 값을 동일한 크리깅 기법으로 추정하고, 이러한 과정을 모든 샘플링 위치에서 반복하여 이 값과 원 자료의 값을 비교하여 추정 오차를 계산하는 방법이다(Isaaks and Srivastava, 1989).

추정 오차를 정량적으로 평가하기 위해 각 포인 특별 오차 값에 대한 상수 값을 정리하였으며, 실측 값과 산점도에 대한 회귀선(R^2)을 함께 제시하여 적

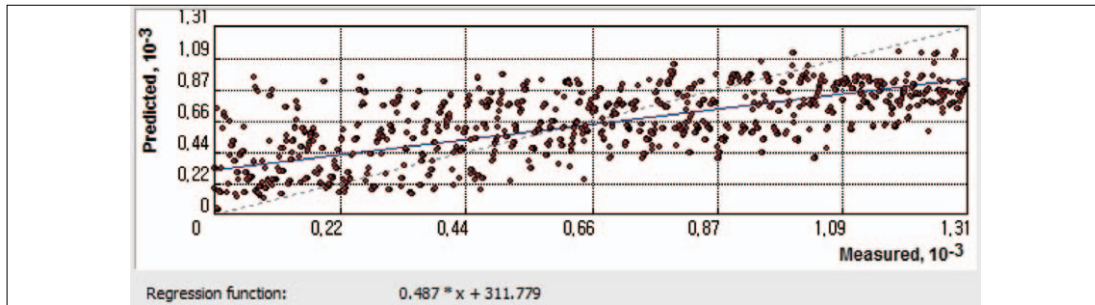
Table 4. Cross validation for Kriging

	Variogram	ME	RMSE	R^2
Simple Kriging	Gaussian	-0.113	4.86	0.487
Ordinary Kriging	Gaussian	0.048	2.28	0.569
Universal Kriging	Gaussian	0.019	1.07	0.628

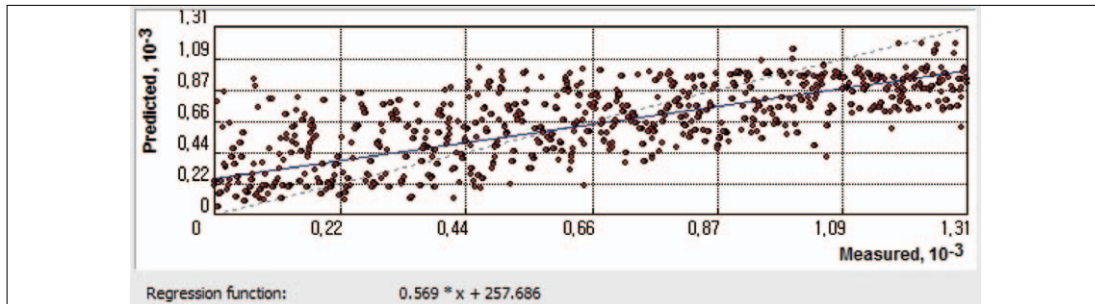
용된 크리깅 기법의 적절성을 분석하였다. 상수로 제시된 평균 오차(Mean Error : ME)는 예측된 자료 값의 과추정 혹은 저추정 양상의 척도로 예측력의 편향정도를 파악할 수 있으며, 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error : RMSE)는 추정 값의 정확성을 평가한다. 회귀선 모형은 선형 회귀선을 나타내는 최소자승 모델에 대한 적합성을 나타내는 것으로, 회귀계수가 1.00인 직선에 가까울수록 크리깅 기법의 타당성이 높은 것으로 판단할 수 있다.

Table 4는 교차 검증을 통해 계산된 ME, RMSE 및 참값과 예측 값에 대한 선형상관계수를 나타낸다. 추정결과의 편향 정도를 파악할 수 있는 ME의 경우, 심플 크리깅은 참값을 저추정 하는 것으로 나타났다. 반면 정규 크리깅과 일반 크리깅은 다소 참값을 과추정 하는 것으로 나타났으나, 일반 크리깅이 가장 0에 가까워 편향 정도가 약한 것으로 나타났다. 추정치의 오차크기와 정확성을 나타내는 RMSE의 경우 심플 크리깅 4.86, 정규 크리깅 2.28, 일반 크리깅 1.07으로 추정치의 오차는 일반 크리깅이 가장 작게 나타났다.

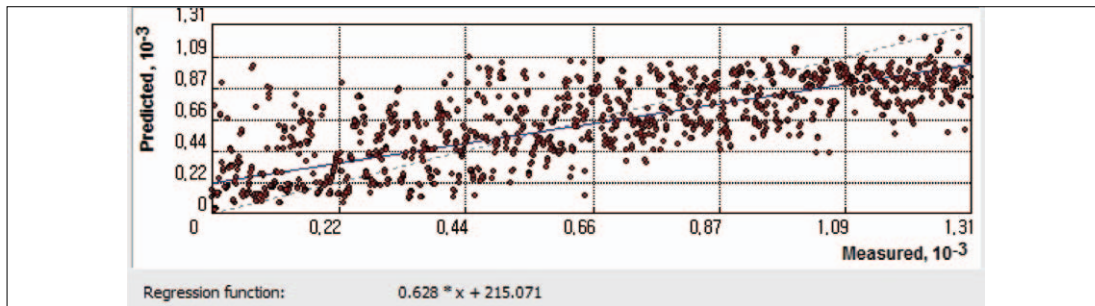
예측 값과 참값의 선형상관계수는 Fig 6에서 보는 것과 같이 (a)의 심플 크리깅 0.487, (b)의 정규 크리깅 0.569, (c)의 일반 크리깅 0.628을 보여 일반 크리깅의 추정결과가 기울기가 1인 직선에 가장 가까워 신뢰성이 가장 크고, 심플 크리깅이 가장 낮은 것으로 나타났다. 크리깅의 일반적인 추정 경향인 smoothing effect에서도 심플 크리깅이 가장 크고, 다음으로 정규 크리깅, 일반 크리깅 순으로 나타났다. GOSAT에서 측정된 동북아시아지역의 전체적인 이산화탄소 자료는 국지적인 지역에 따라 상대적인 차이가 있다. 국지적인 경향성을 반영하는 크리깅 기법을 적용하기 위해서는 교차검증의 각종 지표에서 가장 신뢰로운 결과를 나타내며 국



(b)



(b)



(c)

Fig 6. Regression function for prediction by Kriging a: Simple Kriging, b: Ordinary Kriging, c: Universal Kriging

지적인 보간에서 비교우위를 가진 일반 크리깅이 적절할 것으로 판단된다.

3. 추정결과의 분포 특성

크리깅 기법에 가장 큰 장점 중 하나는 연구지역에 분포하고 있는 자료들의 특징을 가시적으로 표현할 수 있는 것이다. 이에 본 연구에서는 GOSAT으로 측정된 이산화탄소 분포 자료를 크리깅 분석 기법을 통해 시각화하고 이를 바탕으로 추정결과에 대한 분포특성과 각 크리깅 기법 별로 어떠한 추정 결과를 나타내었는지 고찰하였다. Fig 7, 8, 9는 이

산화탄소 측정 자료를 심플 크리깅, 정규 크리깅, 일반 크리깅을 이용하여 추정된 동북아시아지역의 이산화탄소 분포도로 이에 따른 이산화탄소의 분포 특성을 살펴보면 전체적으로 심플 크리깅, 정규 크리깅, 일반 크리깅 모두 몽골지역에서 전체 지역 대비 낮은 수치의 이산화탄소 농도를 보이고, 일본지역과 한반도 북부, 타이완 등의 지역에서 높은 수치의 이산화탄소 농도를 보이고 있었다. 이산화탄소의 지역적 분포 특성은 몽골지역 및 중국 북동부 지역에서는 동서방향으로 낮은 수치의 이산화탄소가 나타나고 있으며, 한반도 주변과 일본에서는 북서향과 남동향으로 집중되어 나타나 이는 동북아시아

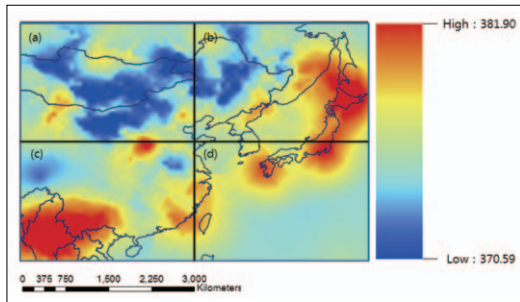


Fig 7. Prediction map by Simple Kriging

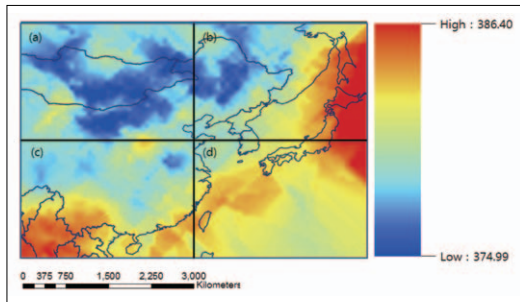


Fig 8. Prediction map by Ordinary Kriging

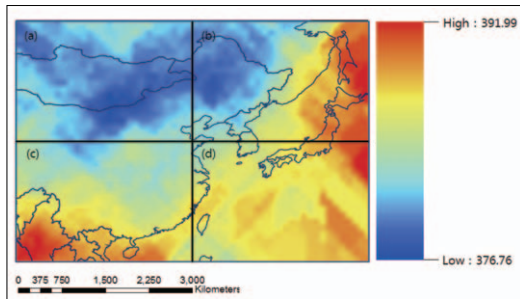


Fig 9. Prediction map by Universal Kriging

지역의 이산화탄소 분포가 지역적 계절풍과 관련하여 일정한 방향성을 가지고 분포하고 있음을 알 수 있다 (김경렬, 2010).

전체적인 추정치의 분포를 구분하여 살펴보고자 연구지역을 a, b, c, d 네 개의 구역으로 구분하였다. 분석에 사용된 이산화탄소 자료가 적었던 (d) 구역은 각각의 크리깅 기법에 따라 이산화탄소의 가장 큰 추정치 차이를 보였는데, 심플 크리깅의 경우 Fig 7-(d)에서 볼 수 있듯이 분석에 사용된 이산화탄소의 평균 수치인 378.68ppm에 가깝게 추정하고 있었다. 정규 크리깅의 경우에는 추정하고자 하

는 지점의 측정치를 내삽(interpolation)에 사용된 인접한 12개의 평균값에 가깝게 추정하는 경향으로 인해, 일부 지역에서 나타나는 특정 경향이나 자료의 평균이 변화하는 경우에는 이를 반영하지 못하는 것으로 나타났다(Fig 8-d). 일반 크리깅의 경우에는 Fig 9-(d)에서 볼 수 있듯이 다른 크리깅 기법에 비해 비교적 높은 수치로 추정하는 것으로 나타났다. 이러한 추정결과는 일반 크리깅의 경우 인접한 자료의 경향성에 의해 미측정 지점의 값을 예측하기 때문인 것으로 사료되며, 또한 Fig 7-(c)에서 추정치를 낮게 측정하는 양상도 이와 같은 이유인 것으로 판단된다.

각 기법들의 추정결과의 범위는 심플 크리깅은 370.59-381.90ppm, 정규 크리깅 374.99-386.40ppm, 일반 크리깅 376.76-391.99ppm으로 심플 크리깅의 추정결과가 실제 분석 자료보다 가장 작게 추정되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 정규 크리깅과 일반 크리깅은 비교적 유사한 신뢰성과 자료 추정 범위를 보이는 반면, 심플 크리깅은 다른 크리깅 기법에 비해 신뢰성이 떨어짐을 확인할 수 있다. 그러나 각 크리깅 기법 모두 자료의 추정에 있어 최소값은 크게, 최대값은 작게 계산하는 smoothing effect가 나타나 극한값을 정확하게 추정하지 못하는 점이 관찰된다.

심플 크리깅의 경우 분석에 사용된 자료에 전체 자료의 평균에 가깝게 추정함으로써 추정 범위와 신뢰성이 가장 떨어지는 결과를 나타내며, 정규 크리깅과 일반 크리깅 경우 국지영역의 특성을 반영하여 비교적 높은 신뢰 수준의 추정결과를 보이나, 정규 크리깅의 경우 추정하고자 하는 곳의 인접 자료의 특성만을 고려하기 때문에 일반적인 범위에서 벗어난 자료를 추정하지 못해 일반 크리깅에 비해 신뢰수준이 다소 떨어지는 것으로 나타난다. 따라서 동북아시아지역에서 측정된 이산화탄소 자료는 베리오그램 분석 결과 일정한 방향성을 가지고 있는 것으로 확인 된다(Fig 5). 방향성을 반영하는 일반 크리깅이 2차 정상성 가정에 따라 미측정 지점의 값과 원자료가 상관거리 이상으로 멀리 떨어져 있

을 때 공간적 추세가 일정하다고 전제하는 정규 크리깅에 비해 합당한 기법인 것으로 판단된다.

V. 결 론

크리깅 기법은 그 종류에 따라 추정에 사용되는 함수와 가정이 달라 추정결과가 서로 다르게 나타날 수 있다. 연구목적과 분석 자료의 특성에 맞는 적절한 크리깅 기법의 선택해야 한다. GOSAT 위성에 취득된 동북아시아 지역의 이산화탄소 분포를 추정하기 위해 크리깅 기법간 결과의 신뢰도를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

먼저 미 측정 지점의 이산화탄소 값을 예측하기 위해 필요한 자료간의 공분산값을 구하기 위해 자료들의 베리오그램을 모델링한 결과 이산화탄소 자료의 계산된 베리오그램은 문턱 값까지 증가하다가 일정 거리 이상에서는 그 값이 일정하게 나타나며, 비교적 짧은 분리지거리에서 베리오그램 값이 서서히 변하는 양상을 띠는 것으로 나타나 이를 대표할 수 있는 가우시안 모델이 가장 적절한 베리오그램 모델로 확인된다. 크리깅 분석을 통해 추정된 값의 정확성을 평가하기 위해 시행한 leave-one-out 기반의 교차검증에서는 일반 크리깅이 추정치의 편향 정도, 예측 오차의 크기 및 참값과 추정 값의 상관성 측면에서 가장 우수하며, 다음으로 정규 크리깅, 심플 크리깅의 순으로 나타나는 것으로 분석되었다.

시각화된 이산화탄소 분포에서는 적용된 크리깅 기법 모두 작은 값에서는 과추정하고, 큰 값에서는 저추정하는 smoothing effect가 나타났다. 심플 크리깅의 경우 smoothing effect가 가장 크게 나타났다. 평균 수치인 378.68ppm에 가깝게 추정하여 전반적 예측 능력이 떨어지는 것으로 분석되었다. 정규 크리깅과 일반 크리깅은 심플 크리깅에 비해 비교적 높은 수준의 신뢰성을 보였으나, 정규 크리깅은 미측정 지점의 값과 원자료가 상관거리 이상으로 멀리 떨어져 있을 때 공간적 추세가 일정하다고 전제하는 특성으로 인해, 일부지역에서 나타나는 특정 경향이나 자료의 평균이 변화하는 경

우에는 이를 반영하지 못하는 것으로 나타났다.

따라서 GOSAT 원격탐사 자료를 통해 이산화탄소의 분포를 추정하기 위한 가장 적절한 크리깅 기법은 교차검증 결과 가장 신뢰성이 높고, 편향된 추정치의 범위가 작은 정규 크리깅으로 분석되었다. 즉, 동북아시아지역에서 측정된 이산화탄소 자료는 일정한 방향성을 가지고 있어 이산화탄소가 관측되는 곳에서 추정치를 주변의 값들과의 강한 상관성을 통해 예측을 수행하는 일반 크리깅이 여타의 크리깅 기법에 비해 효과적인 추정이 가능한 것으로 판단된다.

일반 크리깅은 주위자료의 공간적 경향성이 갖는 평균을 제거하지 않고 가중치를 결정하기 때문에 측정 자료의 밀도가 낮은 지역에서는 잡음효과가 나타날 수 있다. 따라서 보다 정확한 추정 값을 획득하기 위해서는 미측정지점에 대한 추가적 자료 수집과 이를 활용한 추정 값들의 분포특성 및 신뢰성 평가가 시행되어야 하며, 장기간의 데이터를 바탕으로 통합적인 분석이 필요할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 사용된 크리깅 기법은 이산화탄소의 유동이 고려되지 않고, 등방성 데이터라는 가정을 바탕으로 하였기 때문에 보다 신뢰성을 높이기 위해서는 추후에 자료의 이방성이 고려된 연구도 추가되어야 할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음 (NRF-2011-327-B00861).

참고문헌

- 김경렬, 2010, 고산을 중심으로 하는 동북아시아 온실기체 감시 및 진단연구, 서울대학교.
 김준현 · 최진호 · 김충실, 2010, GIS를 활용한 이산화탄소 농도 보간 정확도 비교평가, 한국환경영향평가학회지, 19(6), 647-656.

- 김호용, 2010, 공간통계기법을 이용한 도시 교통량 예측의 정확성 향상, 한국지리정보학회지, 13(4), 138-147.
- 류희영 · 이기원 · 권병두, 2008, 도시원격탐사에서 베리오그램을 이용한 최적의 분석범위 구역화, 대한원격탐사학회지, 24(2), 107-115.
- 박노욱 · 장동호, 2009, 지표환경 주제도 작성을 위한 크리깅 기법과 원격 탐사 자료의 통합 및 불확실 분석 : 입도분포지도 사례 연구, 대한지리학회지, 44(2), 395-409.
- 심창섭, 2010, 대기 중 이산화탄소 분포에 대한 이해 : 위성관측과 GEOS-Chem 결과를 중심으로, 한국환경정책 · 평가연구원.
- 우광성 · 박진환 · 이희정, 2008, 베리오그램 모델 변화에 따른 정규 크리깅 보간법의 민감도 분석, 한국전산구조공학회논문집, 21(3), 295-304.
- 조홍래 · 정종철, 2006, 강우자료에 대한 공간보간 기법의 적용, 한국GIS학회지, 14(6), 29-41.
- 최선영, 2004, GIS의 통계적 공간분석을 이용한 해수침투 분포 양상 파악, 전남대학교 석사학위 청구논문.
- 최종근, 2007, 지구통계학, 시그마프레스.
- Coulibaly L., Migolet P., Adegbedi H.G., Fournier R., and Hervet E., 2008, Mapping aboveground forest biomass from IKONOS satellite image and multi-source geospatial data using neural networks and a kriging interpolation, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2008, 298-301.
- Florio E. N., Lele S. R., Chang Y.C., Sterner R. and Glass G. E., 2004, Integrating AVHRR satellite data and NOAA ground observations to predict surface air temperature: a statistical approach, International Journal of Remote Sensing, 25(15), 2979-2994.
- Isaaks E. H. and Srivastava R. M, 1989, Applied Geostatistics, Oxford University Press, New York.
- Kuze A., Urabe T., Suto H., Kaneko Y. and Hamazaki T., 2006, The Instrumentation and the BBM test results of thermal and near-infrared sensor for carbon observation(TANSO) on GOSAT, Infrared Spaceborne Remote Sensing XIV, 6297.
- 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, 63(10), 6716-6733.
- Lal M. and Harasawa H., 2001, Future climate change scenarios for ASIA as inferred from selected coupled atmosphere-ocean global climate models, Journal of the Meteorological Society of Japan, (79), 219-227.
- Manthena D., Pual S. M. and Kumar A., 2009, Interpolation of radon concentrations using GIS-based kriging and cokriging techniques, Environmental Progress and Sustainable Energy, 28(4), 487-492.
- Tomosada M., Kanefuji K., Matsumoto Y. and Tsubaki H., 2008, Application of the spatial statistics to the retrieved CO₂ column abundances derived from GOSAT data, 4th WSEAS International Conference on REMOTE SENSING, 67-73.
- Tomosada M., Kanefuji K., Matsumoto Y. and Tsubaki H., 2009, A prediction method of the global distribution map of CO₂ column abundance retrieved from GOSAT observation derived from

- ordinary kriging, ICROS-SICE International Joint Conference, 4869-4873.
- Tranchant B. J. S. and Vincent A. P., 2000, Statistical interpolation of ozone measurements from satellite Data(TOMS, SBUV and SAGE II) using the Kriging Method, *Annales Geophysicae*, 18, 666-678.
- Wang X., 2007, Spatial and temporal patterns of land values based on the kriging and GIS method, *CHONGQING JIANHU University Journal*, 29(1), 101-105.

최종원고채택 11. 11. 30