

# 공간통계기법을 이용한 도로교통기반의 온실가스 관한 연구

## -대구광역시를 대상으로-

### A Study on Estimation of the Greenhouse Gas Emission from the Road Transportation Infrastructure Using the Geostatistical Analysis -A Case of the Daegu-

이상우\* · 이승욱\*\* · 이승엽\*\*\* · 홍원화\*\*\*\*

Sang Woo Lee · Seung Wook Lee · Seung Yeob Lee · Won Hwa Hong

**요약** 본 연구는 대구광역시의 주요도로를 대상으로 공간통계기법을 이용하여 도로교통 온실가스 배출량을 신뢰성 있게 예측하여 추정된 배출량으로 행정구별에 따라 도로교통에서 발생한 온실가스 배출량을 산정하는 것을 목적으로 하였다. 첫째, 주요도로의 교통량 관측지점에서 실시간으로 조사한 교통량을 이용하여 관측지점에서 발생한 온실가스 배출량을 산정하였다. 둘째, 일반 크리깅(Universal Kriging)기법을 이용하여 공간적 상관성에 의해 미 관측지점의 온실가스 배출량을 신뢰성 있게 추정하기 위해 적합한 베리오그램 모델링을 설정하였다. 이에 교차검증을 통하여 적합한 베리오그램 모델과 크리깅 기법의 타당성을 검증하였다. 셋째, 검증된 크리깅 기법으로 미 관측지점의 도로교통에서 발생한 온실가스 배출량을 예측하여 행정구별로 도로교통 온실가스 배출량을 추정하여 산정하였다. 그 결과, 도로교통 온실가스 배출량을 행정구별로 보면 북구가 약 291,878,020kgCO<sub>2</sub>eq/yr로 가장 많은 온실가스를 배출하는 것으로 나타났다.

**키워드** : 도로교통 온실가스 배출량, 공간통계기법, 일반크리깅, 베리오그램 모델링

**Abstract** This study was intended to reliably predict the traffic green house gas emission in Daegu with the use of spatial statistical technique and calculate the traffic green house gas emission of each administrative district on the basis of the accurately predicted emission. First, with the use of the traffic actually surveyed at a traffic observation point, and traffic green house gas emission was calculated. Secondly, on the basis of the calculation, and with the use of Universal Kriging technique, this researcher set a suitable variogram modeling to accurately and reliably predict the green house gas emission at non-observation point suitable through spatial correlation, and then performed cross validation to prove the validity of the proper variogram modeling and Kriging technique. Thirdly, with the use of the validated kriging technique, traffic green gas emission was visualized, and its distribution features were analyzed to predict and calculate the traffic green house gas emission of each administrative district. As a result, regarding the traffic green house gas emission of each administration, it was found that Bukgu had the highest green house gas emission of 291,878,020kgCO<sub>2</sub>eq/yr.

**Keywords** : Traffic Greenhouse Gas Emission, Geostatistical, Universal-Kriging, Variogram Modeling

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

전 세계적으로 지구온난화가 심화되어 급격한 기후

변화를 초래하였다. 이에 생태환경, 산업경제, 생활문화 등 다양하게 영향을 주었다. 이러한 기후변화의 영향으로 국내에서 배출되는 온실 가스는 전환부분 44.3%, 산업부분 27.3%, 수송부분 16.0%으로 온실가스종합정보센터의 2009년도 자료에 의해 알 수 있다.

† This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(NRF-2010-0023546)

\* Sang Woo Lee. Master's Student, Department of Spatial Information, Kyungpook National University. tessgg@hanmail.net

\*\* Seung Wook Lee. Doctor completion, Department of Spatial Information, Kyungpook National University 0309sw@gmail.com

\*\*\* Seung Yeob Lee. Professor, School of Architecture, Gyeongju University. sylee@kju.ac.kr (Corresponding author)

\*\*\*\* Won Hwa Hong. Professor, School of Architecture and Civil Engineering, Kyungpook National University. hongwh@knu.ac.kr

특히, 온실가스 배출량 중 수송부분이 상당한 비중을 차지하고 있다. 이는 산업의 발달과 더불어 수송량의 증가로 1990년부터 연평균 4.7%<sup>1)</sup>의 증가율로 세계 최고 수준으로 수송량이 증가하는 것으로 발표되었다[12].

이처럼 지속적으로 증가하는 수송부분의 온실가스 배출량 감축을 위해서 정부는 ‘저탄소 녹색성장’을 새로운 국가비전으로 제시하여 국가 온실가스 감축목표 설정을 통해 2020년 BAU(Business As Usual)대비 30% 감축으로 설정하였다. 특히, 교통·물류부문은 2020년 BAU 대비 33~37% 보다 적극적인 감축노력이 필요한 목표로 기후변화 대응을 실시하게 되었다.

우리나라는 저탄소 녹색성장 기본법(안)으로 지자체의 중요성을 인식하고 기후변화 대응정책에 활용하고 있다[4]. 이처럼 지자체를 중심으로 지역적 특색과 여건 등을 고려하여 교통부분 온실가스 배출량의 감축정책을 설정하고, 이를 위한 감축전략 수립에 중점을 두고 있다. 따라서 도로교통에서 발생하는 온실가스 배출량뿐만 아니라 배출량에 다양하게 영향을 주는 요인 등을 파악하여 온실가스의 배출량 저감정책에 기초자료로 제공하고, 온실가스 저감정책의 효과 분석 자료로 활용이 가능하다.

이에 관련하여 선행연구들로 도로수송부분에서 배출되는 온실가스인 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O를 지역단위의 배출량을 산정방법별로 비교하여 합리적인 온실가스 배출량 산정방법을 검토한 사례 Kim[11]와 유럽환경청(EEA)에서 개발한 COPERT VI모형을 이용하여 배출량 산정하여 지역단위의 감축시나리오를 작성하여 목적에 부합하는 방법론을 파악한 사례 Jang[6]가 있으며, 자료수집의 어려움을 극복하기 위하여 국가교통DB의 자료로 지역단위 도로교통 온실가스 배출량의 방법론을 제시한 사례 Ko[12] 등 다양하게 관련연구가 활발히 이루어지고 있다.

따라서 본 연구는 교통자료 수집의 한계를 보완할 수 있는 공간통계기법을 이용하여 미 관측지점의 온실가스 배출량을 신뢰성 있게 예측하여 도시 내 주요 도로에서 배출하는 온실가스 배출량을 추정하여 행정구별로 산정하는 것을 목적으로 하였다.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

영남내륙지역의 교통 중심지인 대구광역시는 2009년도 통계자료에 의하면 인구는 2,326,920명이며, 면적은 457.08km<sup>2</sup> 규모로 문화와 산업이 발달한 도시로

행정구역상 7개의 구와 1개의 군으로 이루어진 곳이다. 이에 본 연구에서는 도시의 주요도로의 특성을 반영하지 못하는 달성군을 연구범위에서 제외하였다.

대구광역시의 주요 교통체계는 관내를 구마고속도로가 통과하고 경부·중앙·88고속도로가 연결되는 교통의 요충지이며 앞으로 낙동강변도로도 건설될 예정이다. 또한 국도 5호선 및 지하철 1호선 및 2호선이 통과하고, 대구광역시의 동서 간 간선도로인 대서로와 앞산순환도로를 비롯한 간선도로가 발달한 교통의 요충지이다. 그러나 본 연구에서는 이면도로에 대한 교통량의 자료수집이 이루어지지 않아 교통량 통계자료가 없는 관계로 제외하였으며, 고속국도는 시도 간의 이동이 주요목적으로 차량의 주행속도나 도로주행 조건 등이 도시의 주요도로와 차이가 있어 연구범위에서 제외하였다.

따라서 본 연구는 대구광역시 교통국과 교통DB센터에서 매년 제공하는 주요도로의 실제 교통량을 조사한 교통통계자료 중에서 2009년도 자료를 이용하였다. 이에 68곳의 교통량 관측지점에서 관측한 교통량을 이용하여 온실가스 배출량을 산정하였다. 이를 바탕으로 미 관측지점의 온실가스 배출량을 추정하기 위해서 공간통계기법을 이용하였다. 먼저 68곳에서 산정한 온실가스 배출량 자료의 공분산과 공간분포를 반영하여 베리오그램 구성인자를 설정한 다음 작은 분리거리에서 강한 상관성을 나타내는 가우시안 모델을 적용하였다. 이에 교차검증을 통하여 베리오그램 모델링의 적합성을 평가하여 신뢰성 있게 예측의 정확성을 확인하였다. 검증된 공간통계기법으로 추정한 온실가스 배출량을 행정구별로 산정하는 연구를 진행하였다.

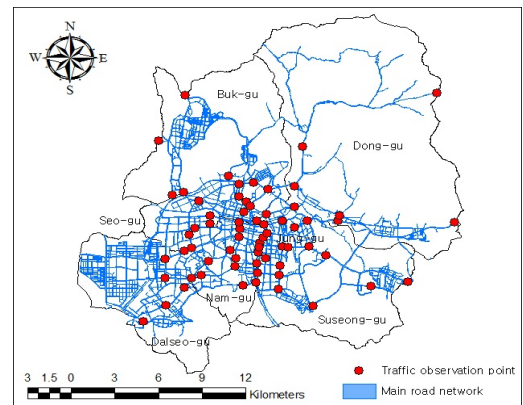


Figure 1. Dae-gu City Traffic observation point and Main road network

1) 녹색성장위원회, 2008년 교통부분 온실가스 배출량, 전년 대비

## 2. 베리오그램 모델링과 일반크리깅

### 2.1 베리오그램의 모델링

공간통계기법으로 미지의 값을 예측하기 위해서 먼저 데이터들의 공간적 상호관계와 연속성의 정도를 파악하여야 한다. 이에 대한 대표적인 척도의 종류로 상관그램, 공분산, 매도그램, 베리오그램 등이 있다 [5]. 이와 같이 다양한 종류의 척도를 나타내는 것 중에서 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 척도인 베리오그램(Variogram)을 이용하여 교통량 통계자료들의 공간적 상호관계와 연속성을 파악하였다. 다음과 같이 베리오그램을 계산하는 것은 Formula 1과 같다. 일정한 거리 h만큼 떨어진 두 데이터들 간의 차이를 제공한 것의 기댓값으로 나타낸다[2].

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

여기서 h는 지연거리(Lag Distance)로 두 자료 간에 떨어져 있는 거리를 의미하며, n은 지연거리만큼 떨어진 샘플자료 쌍의 개수를 나타낸다. Figure 2의 그래프에서 문턱값(Sill)은 분리거리가 증가하여 일정거리가 되면 자료들 간의 상관성이 없어지게 되어 일정값으로 나타나는 것이다. 이때 자료들 간의 상관성이 보이는 최대 분리거리를 상관거리(Range)라고 한다.

실제 교통자료를 이용하여 계산된 베리오그램을 실험적 베리오그램이라 하며, 실험적 베리오그램의 특성을 잘 나타내고 교통자료를 수식적으로 나타낸 베리오그램을 이론적 베리오그램이라고 한다. 이론적

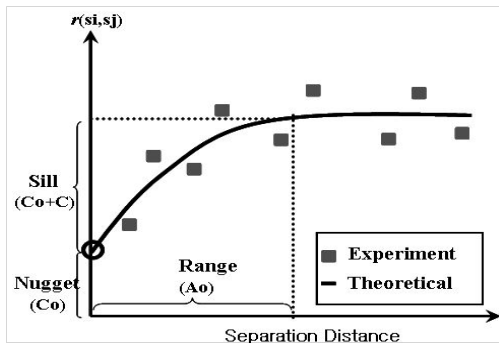


Figure 2. Configuration factor of Variogram

2) 여기서  $\gamma(h)$ 는 베리오그램의 반에 해당하는 값으로 반 베리오그램(Semivariogram)이지만 일반적으로 베리오그램이라고 혼용하여 불리서 본 연구에서도 혼용하여 사용하였다.

분리거리가 0이면 베리오그램 정의에 의하여 그 값이 0이지만, 실제 계산된 실험적 베리오그램을 이용하여 이론적 베리오그램을 찾아내는 경우는 분리거리 0에서도 베리오그램이 상수값을 나타내는데 이를 너깃(Nugget)이라 한다. 이는 짧은 분리거리의 불확실성을 나타낸다[16].

실험적 베리오그램을 가장 이상적으로 표현하는 이론적 베리오그램(Theoretical Variogram)의 선택을 통해 예측 값을 계산하는데 결과적으로 크리깅 기법의 예측에 영향을 준다. 따라서 연구자의 주관 개입을 최소화하는 객관적인 상수를 바탕으로 결정해야 한다. 이러한 이론적 베리오그램 모델은 문턱 값의 존재 유무와 주기성에 따라 여러 종류의 모델로 구분된다. 문턱 값을 가지는 경우에는 선형 모델(Linear Model), 구형 모델(Spherical Model), 지수 모델(Exponential Model), 가우시안 모델(Gaussian Model) 등이 있다. 이 중에서 연구에 적합한 교통자료의 공간적 상호관계를 가장 잘 묘사하는 모델을 선택하여야 한다[8].

### 2.2 일반 크리깅

크리깅 보간법은 적합한 이론적 베리오그램의 모델이 결정되면 크리깅 추적식으로부터 이용된 각 자료 값에 대한 가중치를 계산할 수 있는데, 이를 식으로 표현하면 Formula 2와 같다.

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (2)$$

- $z^*$ : 위치가 알려진 지점에서 크리깅을 이용한 예측치
- $z_i$ : 이미 그 위치와 값을 알고 있는 주위의 점
- $\lambda_i$ : 사용된 주위의 각 자료의 가중치
- $n$ : 크리깅 예측을 위해 사용된 자료의 총 개수

여기서 크리깅 가중치는 거리에 따른 함수이고 가중치를 결정하기 위해서 예측값과 참값 사이의 오차가 최소가 되도록 하며(Minimum variance) 많은 경우에 추정값이 편향되지 않도록(Unbiased) 결정해야 한다 [1]. 크리깅 기법에는 단순 크리깅, 정규 크리깅, 일반 크리깅, 구역 크리깅 등의 여러 종류가 있다. 이러한 각각의 크리깅 기법 유형에 따라 예측 정확성이 달라지므로 연구의 대상지역과 목적에 적합한 기법을 잘 선택하여야 한다.

다양한 크리깅 기법 중에서 일반 크리깅(Universal Kriging)기법은 이차 불변성을 만족하는 자료들에 대

하여 적용 가능한 크리깅 기법과는 달리 이차 정상성을 만족하는 조건으로 실제의 현장자료의 위치나 분포특성을 반영하여 미지의 값을 예측한다. 즉, 공간적으로 변화하거나 특정한 경향을 갖는 평균을 제거하지 않고 크리깅 가중치를 계산하는 기법이다[13]. 이러한 일반 크리깅 기법을 적용하기 위해서는 그 평균은 알 수 없지만 공간적으로 부드럽게 변화한다고 가정한다. 여기서 부드럽게 변화한다는 것은 간단한 함수들의 선형조합으로 그 변화하는 곡면을 기술할 수 있다는 의미이다[3].

따라서 본 연구에서는 공간적 분포특성을 잘 반영하여 예측하는 다양한 크리깅 기법 중에서 연구대상 지역의 예측 신뢰성이 높은 일반 크리깅 기법을 선택하여 연구를 수행하였다.

### 3. 도로교통 온실가스 배출량 산정을 이용한 베리오그램 모델링

#### 3.1 관측지점에서 발생한 온실가스 배출량 산정

전 세계적으로 교통부문 온실가스 배출량 산정방법론은 수집한 자료의 정확성에 따라 IPCC G/L가 제시한 3가지 방법(Tier 1, Tier 2, Tier 3)으로 구분한다. 국가 및 지역별로 보유하고 있는 기초자료의 종류와 형태 등을 고려하여 적절한 방법을 선택하여 온실가스 배출량을 산정하도록 한다. 만약, 자료가 미흡할 경우 IPCC G/L에서 제공하는 자료를 활용하도록 권고하고 있다[12]. 이 중에서 Tier 3은 실제 교통량에 입각하여 차량의 활동도의 결과를 반영하여 산정하는 방법론이다. 이에 실측자료를 반영하기 때문에 시공간적 배출분배에 적합하고 차종별 연비기술을 반영시킨 가장 합리적인 방법론이다[11]. 따라서 본 연구에서는 대구광역시의 교통국과 대구교통DB센터에서 실제 측정된 교통량 자료를 바탕으로 교통량 관측지점의 온실가스 배출량을 산정하였다. 이와 관련한 배출량 산정식은 Formula 3와 같다.

$$Emission = \sum_{a,b} [Car_{a,b} \cdot 365 \cdot EF_{a,b}] \quad (3)$$

따라서, 배출량(kg)은 차량운행량(대)에 365일과 배출계수(EF, kg/km)를 곱하여 산정한다. 이때 모든 차량종류(a: 승용차, 승합차, 화물차 등), 연료종류(b: 휘발유, 경유, LPG 등)를 고려하여 동일한 조건을 만족하는 배출계수를 선정하여 곱한 후 합산한다[9]. 본 연구에서는 도로에서 실제 운행 중에 배출한 온실가

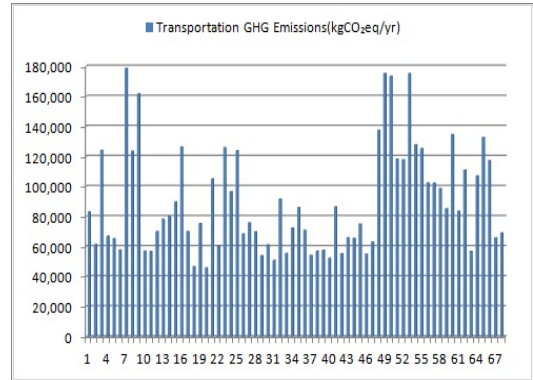


Figure 3. The Transportation GHG Emissions Calculation results of the observation point

스 배출량을 산정하는 것으로 등록대수를 대신하여 교통량 관측지점에서 관측한 교통량인 운행대수로 대체하였다.

대구광역시의 도로별/차종별 주행거리의 자료에 의해서 관측지점에 대한 주행거리에 대한 정보를 알 수 있으나 미 관측지점에 대한 주행거리를 파악하는 것이 어려웠다. 이를 보완하기 위해서 주행거리는 공간 통계기법을 이용하여 국지적인 포인트 자료를 기반으로 전역적인 결과로 산출되어 실제 주행거리를 포인트 자료화 하였다. 배출계수는 국내에서는 공식적으로 지정한 배출계수가 없어서 국립환경과학원에서 발간한 “자동차의 온실가스 배출량조사”에 나온 배출계수를 이용하였다[14]. 이 배출계수는 평균주행속도의 함수이어서 대구광역시 교통DB에서 제공한 “주요도로 구간별 차량속도 조사”에서 조사한 도로구간별 차량속도를 양방향 평균 속도를 적용하여 계산하였다. 이러한 산정방법으로 68곳의 교통량 관측지점에서 배출하는 온실가스를 산정한 결과 Figure 3와 같다.

Figure 3에 교통량 관측지점 68곳의 온실가스 배출량을 산정한 결과를 보면 북구지역과 서구지역을 연결하는 팔달교에서 168, 130kgCO<sub>2</sub>eq/yr으로 가장 많이 온실가스가 배출되는 것으로 나타난다.

#### 3.2 도로교통 온실가스 배출량의 통계적 특성분석

본 연구에 적합한 크리깅 기법을 이용하기 위해서 먼저 탐색적 공간자료 분석(Exploratory Spatial Data Analysis)을 통하여 자료의 구조와 특성들을 파악해야 할 필요가 있다. 이는 자료들 간의 구조관계와 공간적 분포특성들을 바탕으로 미 관측지점의 온실가스 배출량을 신뢰성 있게 예측하는데 있어서 정확도를 향상

시하기 위해서이다. 따라서 본 연구에서는 히스토그램 분석(Histogram), 분위수대조도 분석(Q-Q plot), 경향 분석(Trendy Analysis)으로 자료들의 특성을 파악하였다.

먼저 전체적으로 관측지점의 온실가스 배출량의 분포 특성을 알아보기 위해 실시한 히스토그램 분석 Figure 4에서 평균값(Mean) 83,836kgCO<sub>2</sub>eq/yr, 중간값(Median) 82,568kgCO<sub>2</sub>eq/yr, 비대칭분포(Skewed Distribution)의 정도를 나타내는 왜도(Skewness) 0.10, 분포의 분산이 작고 뾰족하게 분포한 정도를 나타내는 첨도(Kurtosis) 2.70으로 분석되었다. 이는 정규분포의 기준으로 보는 왜도 0과 첨도 3에서 크게 벗어나지 않는 것으로 보아 완벽한 정규분포는 아니지만 유사한 정규분포를 따르는 것으로 판단된다.

히스토그램 분석으로 자료의 전체적인 분포특성을 알 수 있지만 분포의 미세한 특성 차이를 더 정확하게 파악하기 위해서 분위수대조도 분석을 하였다.

다음 Figure 5의 분위수대조도를 산출하는 방법은 먼저 주어진 자료를 올림차순으로 정렬한 다음 정렬된 자료를 바탕으로 p번째 자료에 대하여 경험적 누적확률값  $(p-0.5)/n$ 을 할당한다. 그런 다음 각 누적확률값에 해당하는 표준정규분포의 분위수를 찾고 정렬된 자료와 앞선 과정에서 찾은 분위수를 직교좌표에 그

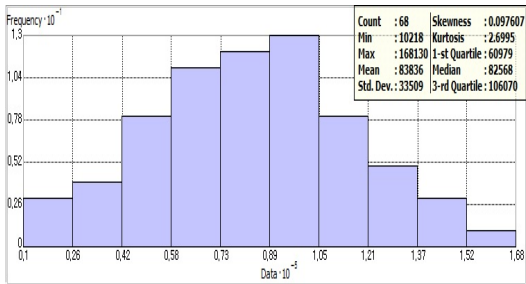


Figure 4. Histogram of the GHG emissions of transportation

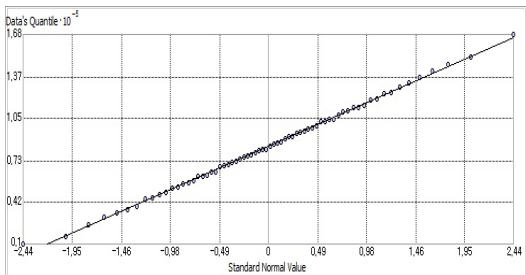


Figure 5. Q-Q plot of the GHG emissions of transportation

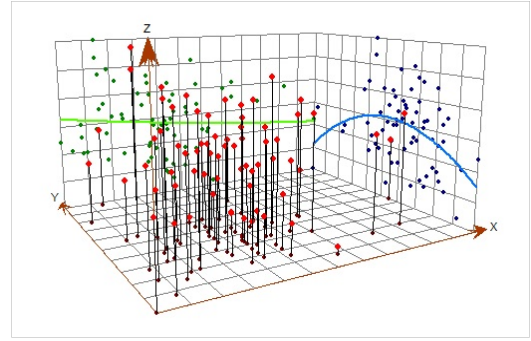


Figure 6. Trendy analysis of the GHG emissions of transportation

려서 나타나게 된다.

Figure 5는 표준정규분포와 자료의 누적분포간의 차이를 분석해 보면 선형 직교좌표에서 기울기가 1인 직선 축에 가까운 선형으로 보이지만 최대·최소값 주변 중에서 최소값 근처에 있는 점이 선형에서 다소 벗어나 있는 것을 제외하면 대체로 선형을 중심으로 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 자료의 분포가 대체적으로 정규분포에 있는 것으로 판단된다.

3차원 경향분석은 크리깅 기법을 사용하기 이전에 공간 보간의 정확한 예측을 위한 모델링을 저해하는 요인으로 방향성을 제거하기 위해 수행되는 통계분석이다. Figure 6의 결과를 분석하면 X축의 동-서와 Y축의 남-북 모두 투영된 산점도의 경향선의 형태를 나타내고 있다. X축의 동-서는 동쪽으로 갈수록 점차 줄어드는 경향을 보이며, Y축 남-북은 중간지점이 높게 나타나며 양끝 쪽으로 점차 줄어드는 경향을 나타내고 있다. 이는 자료의 분포가 일정한 경향을 가지고 있음을 알 수 있다.

따라서 크리깅 기법을 이용하기 전에 지역변수 (Regional Variables)에 영향을 최소화하기 위해서 불변의 광역적인 경향성을 적절하게 제거하였다. 그 다음 연구에 적용하여 정확한 예측을 하고자 하였다.

### 3.3 도로교통 온실가스 배출량의 베리오그램 모델링

크리깅 분석기법을 통하여 공간적 상관성에 의하여 미 관측지점의 도로교통 온실가스 배출량을 정확하고 신뢰성 있게 예측하기 하여야 한다. 이를 위해서 공간 자료들 간의 공분산 값을 바탕으로 베리오그램 모델링을 통하여 온실가스 배출량의 예측결과가 도출된다. 따라서 미 관측 지점의 온실가스 배출량을 신뢰할

수 있게 추정하기 위해서 적절한 베리오그램 인자를 설정하고 연구에 적합한 베리오그램 모델을 선택해야 한다.

베리오그램을 구성하는 인자들의 적합한 설정을 하기 위해서 베리오그램 모델 및 모델을 구성하는 너깃(Nugget), 상관거리(Range), 문턱 값(Sill)의 매개변수를 변화시키는 분리거리(Lag Distance) 길이와 개수의 설정이 가장 중요한 작업이다. 일반적으로 분리거리의 길이와 개수의 선택은 샘플 데이터가 규칙적인 격자망에 위치하고 있으면 격자간 거리를 최적의 분리거리로 설정되지만, 샘플 데이터가 불규칙적으로 분포할 경우 이웃한 점들 간의 평균거리를 분리거리로 설정하는 방식에 의해서 설정하게 된다[5].

따라서 본 연구에서는 도로교통 온실가스 배출량의 자료가 불규칙적으로 분포하기 때문에 이웃한 점들 간의 평균거리로 설정하여 약 1,158m를 분리거리로 설정하였고, 크리깅 기법 분석 시 최대 반경거리는 16,240m로 설정하였다. 분리거리별 개수(Number of Lags)는 분리거리와 개수의 곱이 관측지점의 범위가 최대거리를 초과하지 않으면서 동시에 최대거리의 절반을 초과하는 범위를 만족하기 위해서 14개로 설정하였다[7]. 이러한 분리거리 설정을 통해 나타나는 자료의 공간적 상관관계를 가장 이상적으로 표현하는 이론적 베리오그램(Theoretical Variogram)을 결정한다.

도로교통 온실가스 배출량 베리오그램은 문턱 값까지 증가하다가 상관거리 이상에서는 그 값이 대체로 일정하게 나타났다. 그리고 전체거리 중에서 약 1/3의 비교적 작은 분리거리에서 베리오그램 값이 서서히 변하는 경향을 보여주었다. 따라서 문턱 값이 존재할 경우에 적용 가능한 모델들로 선형모델, 구형모델, 지수모델, 가우시안모델, 너깃모델이 있다. 여러 종류의 모델 중에서 가우시안(Gaussian)모델은 작은 분리거리에서 자료들의 강한 상관성을 나타내거나 또는 연속성이 강할 경우에 적용하는 모델이다[3]. 본 연구에서는 각 모델을 적용하여 모델별로 오차율을 비교해 본 결과 약 2%이내로 차이가 크지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 자료특성을 잘 반영하는 것으

로 판단되는 가우시안모델을 선택하여 Table 1과 같이 베리오그램 모델 및 모델 구성인자와 변수를 설정하여 연구를 진행하였다 .

## 4. 도로교통 온실가스 배출량의 교차검증을 통한 배출량 산정

### 4.1 도로교통 온실가스 배출량의 교차검증

도로교통 온실가스 예측 배출량을 일반 크리깅(Universal Kriging, UK)기법을 이용하여 추정한 값의 정확성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 Leave-one-out기반의 교차검증(Cross Validation)을 수행하였다. 교차검증은 크리깅 방법의 타당성을 검증하는 것으로 크리깅 기법의 적합성을 알아보고, 베리오그램 구성 인자들의 설정이 적절한지에 대한 검증방법이다. 이는 임의로 특정 샘플 위치의 자료를 제거한 후에, 나머지 시공간 자료 값들을 이용하여 값이 제거된 위치의 값을 추정하는 방식을 모든 샘플 위치에서 반복함으로써 모든 샘플 위치에서의 예측값을 얻게 된다[15]. 이러한 방법으로 도로교통에서 배출하는 온실가스 배출량의 추정 오차(Prediction Error)를 객관적으로 평가하기 위해서 정량적으로 각 관측지점 별 오차 값에 대하여 Table 2와 같이 정리하였다.

Table 2에 제시된 평균오차(Mean Error)는 예측력의 편향정도를 나타내는 것으로 부호에 관계없이 나타나는 모든 오차의 평균치이다. 특히 평균 오차와 평균 표준오차(Mean Standardized)는 모두 0에 가까울수록 정확도가 높으며, 평균 제곱근 표준오차(Root Mean Square Standardized)는 평균 제곱근 오차(Root Mean Square)로 나눈 값으로 1에 가까워야 정확도가 높다[10].

이러한 기준으로 Table 2의 추정오차 값들을 분석하면 편향의 정도를 알 수 있는 평균오차의 경우 -0.117로 저추정 하는 경향으로 나타났으나 0에 가까워 비교적 편향의 정도가 약한 것으로 볼 수 있다. 평균 표준오차는 전체 평균에서 각 표본들의 평균의 떨어진 정도를 나타내는 척도로 -0.0054의 값을 가지므로 0에 가까워 정확도가 높다고 볼 수 있다. 또한 데이터의 변동성을 평가하는 평균 제곱근 표준오차의 경우 1보

Table 1. GHG emissions variogram modeling of transportation

	Variogram	Lag Size	Number of Lag	Partial Sill	Nugget
Universal Kriging	Gaussian	1158	14	627,336	695,911

Table 2. Cross validation of the universal kriging

	Variogram	ME	RMSE	MS	RMS
Universal Kriging	Gaussian	-0.117	1.56	-0.0054	1.181

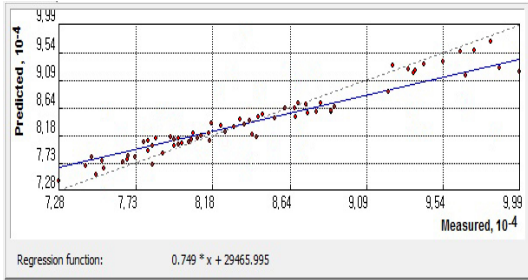


Figure 7. Predictive power regression model using universal kriging

다 크게 나타나서 예측모델의 데이터 셋의 변동성을 과소평가한 것으로 볼 수 있다[10]. 추정 오차크기와 정확도를 나타내는 평균 제곱근 오차는 1에 가깝게 나타나 정확성이 높다고 판단된다.

다음은 Figure 7와 같이 산점도에 대한 회귀선( $R^2$ )으로 참값과 예측값을 비교하여 크리깅 기법의 적절성을 분석하였다. 선형 회귀선은 회귀선의 기울기가 1인 직선상에 벗어난 정도를 보고 평가하는 것으로 회귀계수가 1에 가깝고, 산점도가 기울기 1인 직선주위에 고르게 분포하면 연구에 적용한 크리깅 기법의 타당성이 높다고 판단할 수 있다.

따라서 Figure 7을 분석하면 선형회귀계수가 0.749로 1.00에 가깝게 나타나며, 산점도의 분포는 두 직선이 교차하는 지점을 중심으로 선 가까이 고루 분포하고 있어서 추정결과의 신뢰성이 크며, 본 연구에 적용된 일반 크리깅 기법이 연구수행에 적합하게 선택되어 연구를 수행했다고 판단된다.

따라서 본 연구에서 이용한 공간통계기법이 도로교통에서 발생하는 온실가스 배출량을 정확하게 예측하였으며 신뢰성 있게 추정된 온실가스 배출량으로 행정구별로 산정할 있게 되었다.

#### 4.2 도로교통 온실가스 추정 배출량의 분포 특성

크리깅 기법의 좋은 점 중에서 도시 내 주요도로에서 배출하는 온실가스 량을 가시화를 하여 공간적 분포특징을 쉽게 파악할 수 있는 것이다. 본 연구에서는 주요도로의 교통량 관측지점에서 관측한 교통량으로 산정한 온실가스 배출량을 일반 크리깅 기법을 이용하여 신뢰성 있게 추정한 결과를 분석하였다. 다음의 Figure 8을 보면 전체적으로 북구의 매천대교와 팔달대교로 서구의 신천대로로 연결되는 도로를 중심으로 가장 많은 온실가스 배출량을 배출하는 것으로 보인다. 또한, 동구와 수성구가 접하는 곳인 범어네거리와

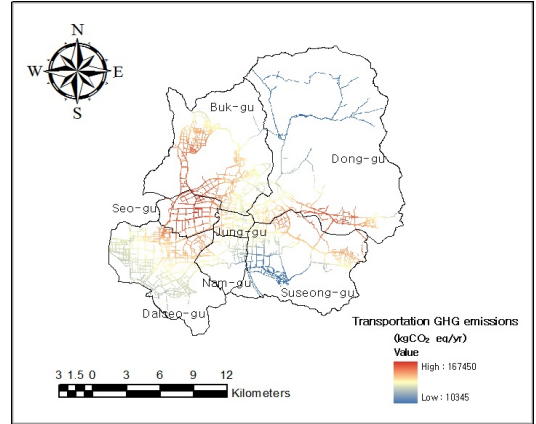


Figure 8. Distribution map of the GHG emissions of transportation of Dae-gu city

동대구네거리에서도 온실가스 배출량이 도시 내에서 많이 배출하는 것으로 나타난다.

반면에 시경계 지점의 동구의 청통방면과 수성구의 청도방면은 온실가스 배출량이 낮은 것으로 나타났다. 전반적으로 도시의 중심지역인 중구를 중심으로 온실가스 배출량의 평균값인 88,898kgCO<sub>2</sub>eq/yr으로 고르게 분포하는 것을 볼 수 있다.

일반 크리깅 기법으로 온실가스 배출량을 추정한 결과를 실측 산정값과 비교하면 온실가스 추정 결과값인 10,345~167,450kgCO<sub>2</sub>eq/yr의 범위를 가지며, 실측 산정값은 10,218~168,130kgCO<sub>2</sub>eq/yr으로 최대값보다 조금 작게, 최소값은 조금 크게 나타났다. 이는 크리깅 기법분석의 일반적인 추정경향인 Smoothing Effect가 나타난 것으로 극한값을 정확하게 추정하지 못하는 것으로 판단되다[2]. 도시의 중심 지역인 중구를 중심으로 도시 전반이 평균값인 88,898kgCO<sub>2</sub>eq/yr으로 온실가스 배출량이 고르게 분포하는 특징을 보인다.

#### 4.3 행정구별에 따른 도로교통 온실가스 추정 배출량 산정

일반 크리깅 기법으로 대구광역시의 주요도로에서 발생하는 온실가스 배출량을 신뢰성 있게 예측하여 행정구별로 추정된 온실가스 배출량을 산정하였다. 도로교통 온실가스 배출량의 추정한 결과는 Table 3과 같다.

북구지역의 온실가스 배출량이 약 291,878,020kg CO<sub>2</sub>eq/yr로 가장 많이 배출하는 것으로 나타났으며, 중구 지역은 약 44,493,300kgCO<sub>2</sub>eq/yr으로 가장 작게

Table 3. Calculation of the estimated GHG emissions of transportation administrative distinction

Classification	Road area (km <sup>2</sup> )	GHG emissions (kgCO <sub>2</sub> eq/yr)	GHG emissions of per road area (kgCO <sub>2</sub> eq/km <sup>2</sup> yr)
Jung-gu	1.25	44,493,300	35,594,640
dong-gu	4.17	170,280,990	40,834,769
Seo-gu	1.98	87,469,800	44,176,667
Nam-gu	1.24	40,789,800	32,895,000
Buk-gu	5.78	291,878,020	50,497,927
Suseong-gu	4.97	211,664,000	42,588,330
Dalseo-gu	7.14	289,736,000	40,579,272
Total	26.5	1,136,311,910	42,879,695

배출하는 것으로 나타난다. 대구광역시의 주요 도로에서 실제 차량운행으로 인하여 배출되는 온실가스의 총량은 약 1,136,311,910kgCO<sub>2</sub>eq/yr으로 산정되었다. 객관적으로 행정구별로 배출되는 온실가스의 양을 비교하기 위해서 해당 행정구의 온실가스 배출량을 도로면적으로 나누면 도로면적 당 온실가스 배출량을 알 수 있게 된다.

다음 Table 3은 앞서 설명한 방법으로 산정한 결과로 북구지역의 단위면적당 약 50,497,927kgCO<sub>2</sub>eq/km<sup>2</sup>yr와 서구지역의 약 44,176,667kgCO<sub>2</sub>eq/km<sup>2</sup>yr으로 가장 많은 온실가스를 배출하는 것으로 나타났다. 대구광역시의 주요도로에서 배출하는 온실가스 양은 전체적으로 단위면적당 약 42,879,695kgCO<sub>2</sub>eq/km<sup>2</sup>yr으로 산정되었다.

## 5. 결 론

본 연구는 급격한 기후변화에 대응하여 정부의 대책 수립에 활용할 수 있는 지역단위별 도로부분 온실가스 배출량 산정에서 효율적인 배출량 산정을 제시하고자 하였다.

첫째, 대구광역시 교통국과 교통DB센터에서 제공하는 교통량 관측지점 68곳의 실제 교통량을 이용하여 온실가스 배출량을 산정하였다. 이를 위해서 공간통계기법을 이용하여 연평균주행거리를 포인트 자료화하여 도로교통의 온실가스 배출량을 산정하기 위한 예측으로 베리오그램 모델링을 설정하였다.

둘째, 일반 크리깅 분석을 통한 온실가스 배출량 추정값의 정확성을 Leave-one-out기반의 교차검증을 이용하여 추정치의 편향정도, 참값과 예측값의 상관성 측면에서 적합성을 평가하여 베리오그램 구성인자와 모델의 적절성을 검증하였다.

셋째, 정확성이 검증된 일반 크리깅 기법으로 도로부분의 온실가스 배출량을 추정한 결과 행정구별로 온실가스 배출량의 분포특성을 가시화를 하였으며 전체적으로는 약 1,136,311,910kgCO<sub>2</sub>eq/yr으로 산정되었다.

하지만 본 연구에서 교통량 관측지점이 행정구역 대부분이 경계에 있어서 교통량의 흐름파악이 어려워 중복되게 교통량 계산이 될 우려가 있으므로 예측의 정확성을 더 높일 수 있는 행동동 단위로 연구를 진행하지 못한 한계가 있었다. 또한 자료수집 및 관측지점의 제한으로 이면도로와 고속국도의 온실가스 배출량을 산정하지 못하였다. 향후 충분한 관측지점 및 자료수집을 바탕으로 보다 정확한 추정 값으로 산정하기 위해서 미 관측지점에 대한 추가적 자료 수집으로 추정 값들의 분포특성과 신뢰성 검증이 시행되어야 하며, 교통량에 영향을 주는 여러 인자들을 바탕으로 종합적인 분석이 필요할 것으로 사료된다. 끝으로 기후변화에 효과적으로 대응하기 위해 지자체별 온실가스 배출량을 산정으로 분포특성을 파악하는데 유용하게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- [1] Bae, M. S. 2008, A Runoff Analysis by Kriging Method for the Nam River Dam Basin, Gyeongsang National University Master of Science thesis.
- [2] Choi, J. H; Um, J. S. 2011, Comparative Evaluation among Different Kriging Technique applied to GOSAT CO<sub>2</sub>Map for North East Asia, Journal of Environmental Impact Assessment, 20(6):879-890.
- [3] Choi, J. K. 2007, Geostatistics, Sigma Press.
- [4] Environmental Management Corporation, 2009,



- Greenhouse gas emissions calculation guidelines of the municipality for the 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories application.
- [5] Isaaks E. H; Srivastava R. M. 1989. An Introduction to Applied Geostatistics, New York : Oxford University Press.
- [6] Jang, S. W. 2011. Comparison of Greenhouse Gas Emissions from Road Transportation, Kyungsoong University Master of Science thesis.
- [7] Johnston, K; Ver Hoef; Krivoruch, J. M; Lucas, N. 2001, Using ArcGIS Spatial Analyst, ESRI Press.
- [8] Journel, A. G; C. J. Huijbregts. 1978. Mining Geostatistics, London : Academic Press.
- [9] Kim, D. S. 2009, Studies on the development of management plans for reducing emission of greenhouse gases and ambient PM<sub>10</sub> in Anyang City, Kyonggi Regional Environmental Technology Development Center.
- [10] Kim, H. Y. 2010, A Study on the Improvement of the Accuracy of Photovoltaic facility Location Using the Geostatistical Analysis, Journal of The Korean Association of Geographic Information Studies, 13(2):146-156.
- [11] Kim, K. D; Ko, H. G; Lee, T. J; Kim, D. S. 2011, Comparison of Greenhouse Gas Emissions from Road Transportation of Local Government by Calculation Method, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27(4):405-415.
- [12] Ko, G. H. 2012, Method of Calculating Regional Road Transport Greenhouse Gas Emissions Inventory using KTDB, Dongui University Master of Science thesis.
- [13] Lee, H. J. 2009, Prediction of Geochemical Characteristics for Groundwaters in Boseong Area using GIS, Chonnam National University Engineering Doctoral thesis.
- [14] Motor Vehicle Emission Research. 2000, An Investigation of greenhouse gas emission form automobiles, National Institute of Environment Research.
- [15] Park, N. W. 2011, Time-series Mapping and Uncertainty Modeling of Environmental Variables: A Case Study of PM<sub>10</sub> Concentration Mapping, Journal of Korea Earth Science Society, 32(3): 249-264.
- [16] Yoo, H. Y; Lee, K. W; Kwon, B. D. 2008, The Optimized Analysis Zone Districting Using Variogram in Urban Remote Sensing, Korean Journal of Remote Sensing, 24(2):107-115.

---

논문접수 : 2012.08.13

수정일 : 2013.12.24

심사완료 : 2014.02.20