

## GWR을 활용한 NDVI와 지형·태양광도의 상관성 평가 : 금강산 지역을 사례로

### Exploring NDVI Gradient Varying Across Landform and Solar Intensity using GWR: a Case Study of Mt. Geumgang in North Korea

김준우\* · 엄정섭\*\*

Kim, Jun Woo · Um, Jung Sup

#### 요 旨

식생의 분포와 지형·태양광도의 상관성을 규명하는 것은 공간적 이질성을 내포하는 공간데이터의 분석이지만 기존의 많은 선형모델들은 이들 데이터가 갖는 공간적 특성을 고려하지 못하고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 금강산을 대상으로 식생분포를 정량적으로 나타내는 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)와 일사량, 일조시간, 고도, 경사에 대하여 지리가중회귀분석(GWR : Geographically Weighted Regression)을 실시하였다. GWR은 전역적 모형인 OLS(Ordinary Least Squares)에 비해 모형의 설명력과 적합성이 확연히 높아졌으며, 잔차의 공간적 자기상관성 또한 해소된 것으로 나타났다. OLS 분석결과는 NDVI에 미치는 지형·태양광도의 영향력을 연구지역에서 단일하게 추정하였으나, GWR은 각 인자가 NDVI에 미치는 영향력을 국지적으로 보다 세밀하게 추정하여 공간단위에 따른 각 인자의 영향력을 보다 확연히 나타내었다. 국지적 차원에서 추정된 NDVI와 지형·태양광도의 상관성은 식생분포를 조사하는 과정에서 보다 객관적이고 세밀한 분석을 위한 중요한 참고자료로 사용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : GWR, NDVI, 지형, 태양광도

#### Abstract

Ordinary least squares (OLS) regression is the primary statistical method in previous studies for vegetation distribution patterns in relation to landform. However, this global regression lacks the ability to uncover some local-specific relationships and spatial autocorrelation in model residuals. This study employed geographically weighted regression (GWR) to examine the spatially varying relationships between NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) patterns and changing trends of landform (elevation, slope) and solar intensity (insolation and duration of sunshine) in Mt Geum-gang of North-Korea. Results denoted that GWR was more powerful than OLS in interpreting relationships between NDVI patterns and landform/solar intensity, since GWR was characterized by higher adjusted R<sup>2</sup>, and reduced spatial autocorrelations in model residuals. Unlike OLS regression, GWR allowed the coefficients of explanatory variables to differ by locality by giving relatively more weight to NDVI patterns which are affected by local landform and solar factors. The strength of the regression relationships in the GWR increased significantly, by showing regression coefficient of higher than 70% (0.744) in the southern ridge of the experimental area. It is anticipated that this research output will serve to increase the scientific and objective vegetation monitoring in relation to landform and solar intensity by overcoming serious constraints suffered from the past non-GWR-based approach.

Keywords : GWR, NDVI, Landform, Solar Intensity

2013년 10월 11일 접수, 2013년 11월 22일 수정, 2013년 12월 9일 채택

\* 정회원 · 경북대학교 지리학과 석사과정(Regular Member, Master Student. Department of Geography, Kyungpook National University, skipper-tom@hanmail.net)

\*\* 교신저자 · 경북대학교 지리학과 교수(Corresponding author, Professor, Department of Geography, Kyungpook National University, jsaeom,@knu.ac.kr)

## 1. 서 론

기후변화의 심화로 대기 중 이산화탄소를 흡수하는 산림의 분포 특성 규명에 대한 관심이 더욱 높아지고 있으며, 이러한 산림분포를 정량적으로 표현할 수 있는 척도로 산림 녹지의 질을 대변하는 정규식생지수(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)가 사용되고 있다.

산림을 구성하는 식생군락은 고도, 경사, 사면방향, 수공간 등 주변 지형에 따라 뚜렷한 차이를 보인다(Shin, 2012; Kim et al, 2007; Yoon, 2003). 과거부터 식생지수를 이용하여 자연환경요인에 따른 식생분포의 상관성을 규명하기 위해 전역적 차원에서 독립변수와 종속변수의 관계를 추정하는 OLS(Ordinary Least Squares) 회귀모델을 활용하고 있다(Lee et al, 2012; Park et al, 2008; Song et al, 2007; Austin, 2007). 하지만 식생분포에 영향을 미치는 지형, 기후 등의 자연환경 요인들은 지표면에 연속적으로 분포하지만 식생 분포에 미치는 영향력은 연구대상 지역의 모든 곳에서 동일하게 나타나지 않는다. 또한 식생군락은 서로 연속적 상관관계를 유지하며 성장하여 극상의 상태에 이르므로(Kimmins, 1987), 공간적으로 인접한 지역에 유사한 분포를 보이며 군집을 이루는 공간적 자기상관성을 내포할 가능성이 크다(Choi and Suh, 2012; Anselin and Bera, 1998). 따라서 식생 분포와 주변 자연환경과의 상관성을 규명하는 것은 공간적 이질성을 내포하는 공간데이터의 분석이지만 기존의 선형모델들은 이들 데이터가 갖는 국지적 공간특성을 고려하지 못하고 있어 기후, 지형 등 주변 자연환경에 대한 산림 분포 특성에 관한 선행연구들은 회귀분석의 기본 가정을 준수하지 못하고 있다(Jo, 2009b; Kim, 2003; Griffith and Layne, 1999).

이러한 문제점을 극복하기 위해 공간단위에 따라 독립변수의 효과가 서로 다르다는 것을 전제로 상이한 위치에 존재하는 식생군락에 대해 서로 다른 회귀모형을 적용하여 공간적 변이를 설명하는 지리가중회귀분석(GWR : Geographically Weighted Regression)의 사용을 고려할 수 있다(Chung et al, 2011; Jo, 2009a). 국지적 차원에서 상수가 아닌 위치 함수로써 회귀계수를 추정하여 모든 공간단위에서 위치에 따라 독립변수의 효과가 달라지는 변동성을 설명할 수 있다.

지형·태양광도<sup>1)</sup>는 식생분포에 결정적인 영향을 주는 변수이지만(Hong et al, 2012; Park and Seo, 2001; Kim, 1991), 식생에 대한 정량적 표현이 가능한 NDVI를 활용하여 식생분포와 지형·태양광도의 상관성을 분

석하기 위해 지리가중회귀분석을 활용한 사례는 확인되지 않는다. 특정지역을 대상으로 하는 해외의 일부 연구에서 NDVI와 자연환경인자와의 상관관계를 규명하기 위해 지리가중회귀분석을 시도한 사례가 확인되지만 주변 환경요인에 따른 변수의 사용이 지역적으로 상이하(Gao et al, 2012; Propastin et al, 2008; Yuan and Roy, 2007).

따라서 본 연구에서는 NDVI로 대변되는 산림분포와 산림분포에 영향을 미치는 지형·태양광도에 대하여 지리가중회귀분석을 이용하여 상관성을 규명하였다. 산림식생의 공간적 분포 양상을 분석하고, 식생분포의 공간적 자기상관성을 고려하여 식생 분포와 이에 영향을 주는 다양한 인자들과의 상관성을 보다 국지적인 차원에서 파악하였다.

## 2. 연구지역 및 데이터 취득

### 2.1 연구지역 설정

산림분포와 지형·태양광도의 상관관계를 정확하게 파악하기 위해서는 산림의 인위적인 변화를 초래할 수 있는 인문환경의 개입이 최소화된 지역을 선정하여야 한다. 또한 연구지역 내에서 고도, 경사 등 지형요인의 차이가 확연히 드러나야 산림분포에 대한 지형·태양광도의 인과관계를 보다 명확히 파악할 수 있다(Shin, 2006). 따라서 본 연구에서는 휴전선과 인접하여 원시 식생구조를 잘 보존하고 있으며, 해발고도가 높은 산악 지대이므로 대상지 내에서 지형요인의 편차가 확연히 나타날 것으로 판단되는 한반도 중부지방의 금강산을 연구대상 지역으로 선정하였다. 금강산 지역은 온대남부 식물분포구와 온대중부 식물분포구가 바뀌는 접이적인 지역으로 한반도 중부지방의 산악 식물대를 대표하고 있으며, 식생량이 풍부하여 국제기구에서 수행하는 각종 산림보존 사업 시행시 한반도에서 최우선 순위에 꼽히는 지역에 속한다(Choi and Um, 2012).

금강산은 행정구역상으로 북강원도의 고성군, 금강군 그리고 통천군의 일부에 걸쳐 있으며 면적이 약 530 km<sup>2</sup>에 달하는 넓은 지역이므로, 금강산의 모든 지역에 대하여 분석을 실시하는 것은 데이터의 처리에서 많은 시간과 노력이 소요되어 연구지역의 대표성을 갖는 표본 지역을 선정하였다. 금강산은 최고봉인 비로봉을 중심으로 동쪽은 내금강, 서쪽은 외금강으로 구분되는데, 최남단인 신금강은 오래전부터 전나무와 소나무로 구성된 원시림을 이루었지만 휴전선에 면해 있어 사람들의 통행이 적으며 깊은 협곡이 발달하여 천연식생 분포를 잘 반영할 것으로 사료된다. 산림생태계는 산지에서

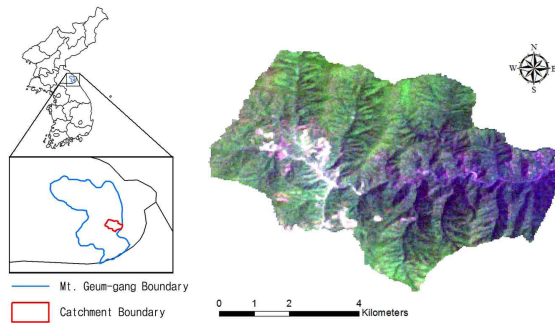


Figure 1. Location map of experimental site presented by a Landsat ETM+ satellite image (acquired in June 2010)

하천수가 모이는 지형적 경계인 유역(drainage area)에 따라 생태적으로 매우 유사한 특성을 나타내며(ICIMOD, 2011), UN-REDD(United Nations programme on Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation)와 같은 국제적인 산림 보존 사업을 위한 산림 분포 파악에서 분수계(watershed)에 따라 경계를 설정하는 것이 가장 높은 신뢰도를 가지는 접근 방법이다(World bank Group, 2011) 본 연구에서는 금강산 지역에 대한 고해상도 영상관독을 실시하고 ArcGIS의 수문분석 기능을 통해 천연 산림이 비교적 잘 보존된 것으로 판단되는 남강 상류의 동서 7.9km, 남북 6.8km, 면적 31.563 km<sup>2</sup>의 소유역을 최종 연구대상지로 선정하였다(Fig. 1).

## 2.2 데이터 취득

금강산은 비접근 지역이므로 식생분포 특성 파악을 위한 데이터 취득상의 한계를 내포하고 있으며, 소유역 범위에서 취득된 각 변수의 공간정보는 신뢰성을 장담하기 어렵다.

GIS(Geographic Information System)를 이용한 공간분석은 공간정보와 속성정보의 결합으로 공간적 변이와 유형을 쉽게 포착할 수 있으며(Anselin et al, 1993), 공간객체의 시·공간적 분석을 통해 고도, 경사 등 지형특성이나 계절별 태양광도 변화를 정량적으로 평가할 수 있어 지리적으로 접근이 곤란한 지역의 자료 수집이 가능하다(Um, 2009).

NDVI 값과 지형정보는 위성영상과 수치지도를 통해 추출하였다. 국토지리정보원에서 2012년에 제작하여 공급하는 북한의 1:25000 DXF(Drawing Exchange Format)포맷 파일의 수치지도에서 등고선을 추출하여 TIN(Triangulated Irregular Network)으로 변환시킨 후 표고점으로부터 수치고도모델(DEM, Digital Elevation

Model)을 구축하였다. DEM 자료를 기본으로 해당지역의 고도, 경사에 관한 래스터(Raster) 형태의 지도를 제작하였으며, 일사량과 일조시간은 ArcGIS의 Solar Radiation Analysis 기능을 통해 하지·춘추분·동지로 구분하여 취득한 후 NDVI를 추출한 위성영상의 취득 시기와 가장 근접한 하지의 일사량과 일조시간에 대한 레이어(Layer)를 제작하였다. 모든 래스터 레이어는 지리가중회귀분석을 위해 위성영상의 픽셀 크기와 동일한 30×30m의 벡터형태의 데이터로 변환하였으며, 연산의 간소화를 위해 동일한 속성 값을 가지는 폴리곤(polygon)은 통합하였다.

개별 변수 레이어를 구축한 후 태양광도·지형변수가 산림분포에 미치는 영향을 정밀하게 추정하기 위해 종속변수 레이어와 독립변수 레이어들을 공간정보가 일치하는 단일 레이어로 중첩하였다. 각 변수별로 도출된 가중치에 의거하여 다중회귀분석을 실시하여 변수간의 다중공선성을 진단하고 모형의 부합도를 평가한 후 지리가중회귀분석을 실시하였다. 영상처리를 통한 NDVI의 추출에는 ERDAS Imagine 9.2 소프트웨어가 사용되었으며, 연구과정에서 데이터의 가공을 위해 Auto CAD MAP 2000i, ArcGIS 10.1 등의 소프트웨어를 사용하였다.

## 3. 독립변수 선정과 NDVI, 지형·태양광도의 추출

### 3.1 독립변수의 선정

회귀분석에서 독립변수의 선정은 다양한 변수를 적용한 회귀분석의 실시를 통해 오차가 발생하거나 다중공선성의 문제가 발생할 수 있는 변수를 소거하는 것이 일반적이지만, 이러한 방법은 독립변수 선정을 위한 공간정보의 구축에 많은 시간과 노력이 소요되므로 먼저 산림 식생의 분포에 영향을 미치는 변수를 추출하기 위해 선행연구를 토대로 이론적 고찰을 실시하였다. 지리가중회귀분석을 위해서는 소유역에 적용하기 적합한 신뢰성 있는 공간데이터의 취득이 필수적이므로 식생 분포에 직접적인 영향을 미치며 정확한 공간 데이터의 취득이 가능한 지형적 요인에 우선순위를 두고 독립변수를 선정하였다.

일반적으로 동일 산지 내에서 식생의 분포에 큰 영향을 미치는 지형적 요인은 고도와 경사, 사면향이며(Park et al, 2001), 사면향은 경사면의 방향이 남향이나 동향인 지역일수록 태양광도의 영향을 많이 받아 식생의 성장에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 일조시간과 일사량을 포괄하는 개념인 태양광도는 사

면의 방향이나 경사 등의 지형요소에 따라 그 값이 크게 달라질 수 있지만(Jee et al, 2011, Kim et al, 2010; Shin et al, 2004; Schulz et al, 2011), 일부 선행연구에서는 사면향이 NDVI에 미치는 영향력이 크지 않은 것으로 나타났다(Kim, 2008; Sung and Jung, 2003). 태양에너지가 대기를 통과하면서 미세먼지와 구름 등에 의해 반사, 흡수되는 등 장애물을 통과하고 지표에 도달된 에너지가 일사량이며, 일조시간은 구름, 먼지 등의 장애요인을 고려하지 않고 하루 혹은 정해진 기간 동안 햇빛이 지상에 비추진 시간을 측정하기 때문에 일사량과 일조시간은 전혀 다른 의미를 가지고 있다(Um, 2009; Yun, 2009). 중위도에 속하며 식생 성장에 풍부한 강수량을 확보하고 있는 한반도에서는 기온이 식생 분포에 영향을 미치는 주요 인자가 되며(Sung and Jung, 2003), 기온은 일사량과 일조시간에 직접적인 영향을 받는 변수이다(Choi and Yun, 2009; Lee et al, 1995; Lee et al, 1991). 특정지역의 식생 분포는 다양한 요인이 복합적으로 작용하여 결정되며 이러한 요인들은 서로서로 영향을 미치므로, 정확한 공간정보를 가진 데이터의 취득이 가능한 일사량과 일조시간을 기온과 사면향을 포괄하는 변수로 선정하였다.

본 연구에서는 다양한 선행연구에서 식생의 분포에 큰 영향을 미치는 것으로 규명된 고도와 경사, 그리고 식생분포에 직접적으로 영향을 미치며 기후적 요인을 포함하지만 지형적 요인에 의해 결정되는 일사량과 일조시간을 최종 변수로 선정하였다. 너무 많은 변수를 설정하여 다중공선성을 유발하기보다 산림분포에 영향을 미치는 핵심 요인을 반영하여 가시적이고 객관적인 평가를 실시하고자 하였다.

### 3.2 NDVI와 지형·태양광도의 추출

위성영상의 지표면 분광특성인 Band 3과 Band 4의 DN(Digital Number)값에 의해 추정되는 NDVI는 단위가 없는 -1~1 사이의 값으로 눈, 암반, 물, 나지 등의 비식생 지역은 0 이하의 값으로 표현되어 진다. 식생은 0 이상의 양수 값을 가지며 식생 활력도가 높으며 식생 분포가 많은 지역일수록 1에 가까운 값으로 나타난다. 2010년 6월 5일 촬영된 Landsat ETM+ 영상으로 금강산 지역 NDVI를 추출한 결과 연구지역의 NDVI는 0~0.75 사이의 값을 가지는 것으로 나타나 전체적으로 풍부한 식생분포를 가지고 있는 것으로 나타났다. 이것은 연구지역의 선정시 식생이 풍부한 원시림을 대상으로 하였으며, 고해상도 영상의 판독결과 연구지역에는 암석과 나지 등이 일부 존재하는 것으로 파악되었지만 분석에 사용한 영상의 공간 해상도가 30m이므로 추출된

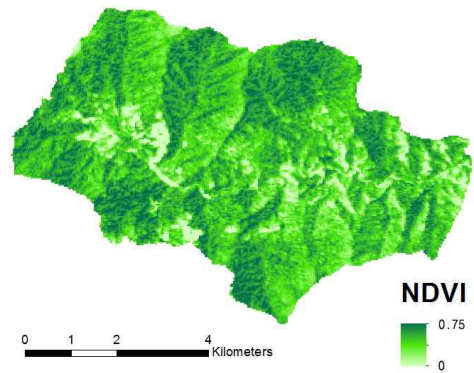


Figure 2. NDVI map of experimental area

NDVI는 0이상의 값을 가지는 것으로 판단된다(Fig. 2).

종속변수인 NDVI가 공간적 의존성을 가지는 경우 OLS(Ordinary least squares)를 실시하면 회귀계수의 통계적 유의성 검증(significance test)과 예측오차(prediction error)의 정확성을 신뢰할 수 없게 된다. 연구 대상지역에 대해 취득된 NDVI 분포도에서 육안을 통해서도 NDVI 값의 군집성이 확연히 드러나고 있다(Fig. 2).

추가적인 분석결과 NDVI의 공간적 자기상관성을 정량적으로 나타내는 Global Moran's I 값은 0.522, z-score 24.838로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. Moran's I 값은 단일 값으로 연구지역의 전반적인 군집 경향을 나타내므로 금강산 지역의 NDVI가 다양한 요인에 의해 공간적으로 군집을 이루고 있는 것을 의미한다. 따라서 지형·태양광도와와의 상관성을 도출하는 식생 분포 특성의 추정에서 공간적 이질성을 고려한 상관관계의 추정이 필요하다.

식생 분포 추정에 있어서 지형변수인 연구지역의 고도는 423m에서 1278m의 분포를 가지는 것으로 나타났다, 소유역의 특성을 토대로 선정된 연구지역의 특성을 잘 나타내고 있었다. 경사도는 0도에서 88.6도의 분포를 나타내어 연구지역의 동쪽에 해당하는 부분이 비교적 경사도가 높은 것으로 나타났으며 고도가 낮은 골짜기와 가장 높은 고도인 능선을 이루는 부분은 비교적 완만한 경사를 나타내었다. 하루 중 지표면에 도달하는 태양복사에너지의 양을 나타내는 일사량은  $0.05306 \text{ W}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 에서  $16348.1 \text{ W}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 의 범위를 가져 분수계의 동쪽과 남쪽사면이 높은 수치를 나타내었으며, 하루 중 일조시간은 0.12에서 14.7 시간으로 나타나 산지고도에 따른 음영 효과를 잘 반영하여 분수계의 북서쪽 사면이 낮은 값을 나타내었다(Fig. 3).



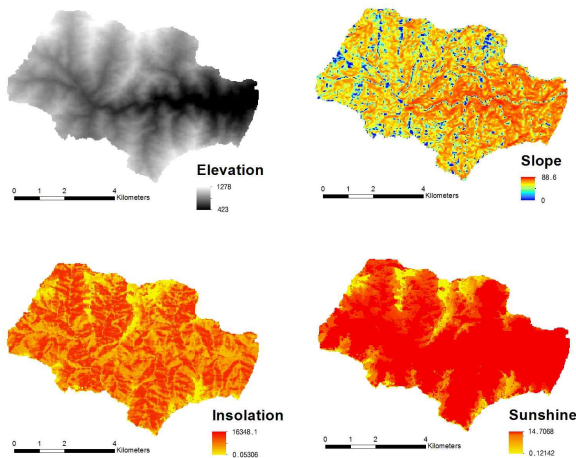


Figure 3. Landform and solar intensity map

#### 4. OLS와 GWR의 비교

##### 4.1 OLS

변수의 전반적인 영향력과 설명력을 파악하기 위해 지리가중회귀분석의 시행에 앞서 OLS를 실시하였다. 독립변수간의 다중공선성(multicollinearity)이 발생하면 추정된 특정 회귀계수가 통계적으로 유의하지 않을 수 있지만, 본 연구에 사용된 독립변수들의 분산팽창계수(VIF : Variance Inflation Factor)는 1.161, 1.162, 1.011, 1.012로 나타나 다중공선성의 문제가 없는 것으로 파악된다.

OLS의 설명력은 0.046으로 나타나 비교적 낮은 값을 나타내었으며, 회귀계수는 일사량 0.084, 일조시간 0.087, 고도 0.219, 경사 0.012 값을 나타내어 일사량, 일조시간이 증가하고 고도가 높을수록 NDVI 값도 높아지는 것으로 나타났다. 경사는 NDVI에 통계적으로 유의미하게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(Table 1).

NDVI와 지형·태양광도의 OLS 분석을 통해 산출된 잔차의 공간적 분포에서 잔차의 공간적 자기상관성이 확연히 드러났다. 잔차의 공간적 자기상관성이 가시적으로 확인되었으나 이를 정량적으로 검증하기 위해 Moran's I 지수를 산출하였다. 표준화된 잔차에 대해 산출된 Moran's I 값은 0.229, z-score는 39.17로, OLS를 통해 추정된 잔차는 공간적으로 군집성을 이루어 회귀분석의 기본 가정을 위배하는 것으로 나타났다(Fig. 4).

독립변수와 종속변수 사이에 비고정성의 관계(non-stationary)를 평가하는 Koenker (BP) 값 또한 246.965로 유의미하게 나타났다. 이는 독립변수가 특정 지역에서 종속변수에 중요한 영향을 미치지 않지만 다른 지역에서

Table 1. OLS regression of NDVI vs landform and solar intensity

	Coefficients	standard error	VIF
constant	4.911*	0.212	
Insolation	0.084*	0.028	1.161
Sunshine	0.086*	0.017	1.162
Elevation	0.219*	0.018	1.011
Slope	0.011	0.018	1.012
R <sup>2</sup> adj.	0.046122		
AICc	AICc(Akaike's Information Criterion) =21472.760		
Koenker (BP)	246.965*		
Jarque-Bera	906.303*		
Spatial autocorrelation	Moran's I =0.229** z-score =39.170720**		

\* p<0.05, \*\* p<0.01, VIF: Variance Inflation Factor

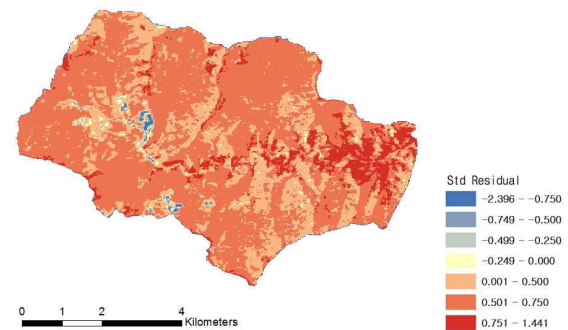


Figure 4. spatial distribution of standardized residuals in OLS

는 그 변수가 종속변수에 미치는 영향력이 약할 수 있음을 의미하므로 공간단위에 따른 이질성이 존재함을 의미한다. 또한 OLS 모델의 적합도 검증을 위해 오차항의 비정규성을 판단하는 Jarque-Bera 값은 906.3으로 통계적으로 유의미하게 나타나 잔차의 분포가 정규성을 가지지 않는 것으로 나타났다. OLS로 추정된 NDVI와 독립변수와의 상관성은 모형의 설명력이 낮으며, 잔차가 공간적으로 독립된 것이 아니므로 각 회귀계수가 나타내는 영향력은 NDVI와 지형·태양광도의 상관성 추정에서 큰 의미를 부여하기 힘들 것으로 판단된다.

##### 4.2 GWR

NDVI의 공간적 자기상관성을 분석한 결과 공간적으로 군집을 이루는 것으로 나타났다. 따라서 모형의 신뢰도를 높이고 NDVI와 지형·태양광도의 상관성을 보

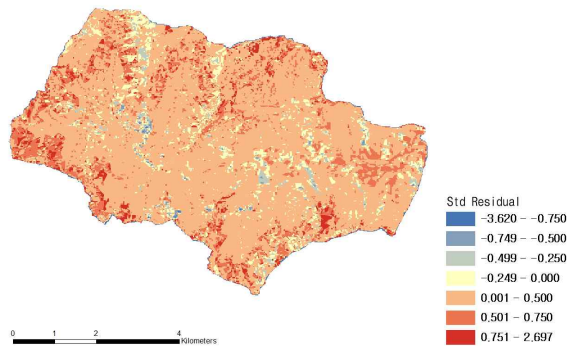


Figure 5. spatial distribution of standardized residuals in GWR

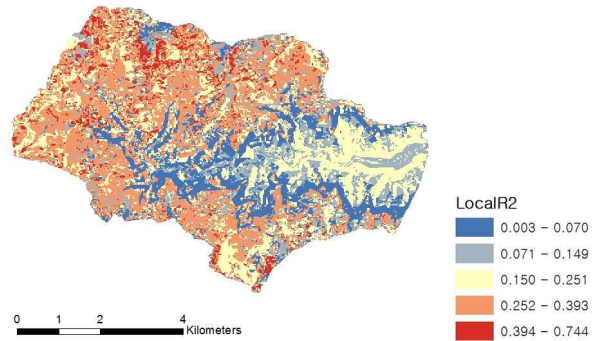


Figure 6. Local R<sup>2</sup> distribution map in GWR

다 국지적인 공간단위에서 추정하기 위해 지리가중회귀분석을 실시하였다. 지리가중회귀분석을 통해 산출된 표준화된 잔차의 공간적 자기상관성을 나타내는 Moran's I 값은 0.108, z-score 는 18.556으로 나타났다. 이것은 전역적 차원(Moran's I =0.229, z-score =39.17)에서 산출된 Moran's I와 z-score에 비해 모두 낮아진 것으로 GWR이 OLS에서 발생하는 잔차의 공간적 자기상관성을 일정부분 해소하여 모형의 개선이 이루어졌음을 의미한다(Fig. 5).

두 모형에서 산출된 값의 차이를 통해 모형의 적합성을 평가할 수 있는 지표인 AICc(Akaike's Information Criterion)는 GWR의 AICc 값이 OLS에 비해 낮아지고 그 차이가 4보다 큰 경우 모형이 개선된 것으로 간주한다(Charlton and Fotheringham, 2008; 2009; Jo, 2009a). 두 모형의 AICc 값이 OLS에서 21472.7로 나타났으나 GWR에서 20785.7로 나타나 GWR의 모형 적합성이 OLS에 비해 크게 향상된 것으로 나타났다(Table 2).

Table 2. GWR regression of NDVI vs landform and solar intensity

	Min	Median	Max
Constant	-0.526	5.569	10.613
Insolation	-0.468	0.509	0.551
Duration of sunshine	-0.398	0.458	0.518
Elevation	-0.829	1.013	1.198
Slope	-0.486	0.399	0.313
Local R <sup>2</sup>	0.0029	0.37	0.744
R <sup>2</sup> adj.	0.227		
AICc	20785.66		
spatial autocorrelation	Moran's I =0.108* z score =18.55*		
* p<0.01			

지리가중회귀분석을 통해 추론된 모형의 설명력을 나타내는 수정된 결정계수(R<sup>2</sup>adj)는 0.227로 그리 높지 않은 값이지만 OLS에서 도출된 모형의 설명력에 비해 대폭 향상된 결과를 나타내었으며, GWR은 회귀선이 개별 지역 간의 세부적인 차이를 반영하는 지역결정계수를 도출한다. GWR을 통한 지역결정계수는 0.002에서 0.744의 범위를 보여 특정지역에서 지형·태양광도가 NDVI로 대변되는 금강산 소유역의 식생분포를 잘 설명하고 있는 것으로 나타났다. 연구지역의 북쪽과 남쪽의 산등성이에 해당하는 부분이 0.394에서 0.744의 비교적 높은 설명력을 보였으며, 능선에서 골짜기로 이어지는 지역들이 가장 낮은 설명력을 나타내었다(Fig. 6).

종속변수에 미치는 개별변수의 영향력을 보다 명확히 확인하기 위해 각 변수의 회귀계수를 분석하였다. 회귀계수의 추정치에서 일사량은 -0.468에서 0.551의 분포를 나타내었으며, 일조시간은 -0.398에서 0.518의 범위를 나타내었다. 고도에 대한 회귀계수는 -0.829에서 1.198의 분포를 나타내었으나 소유역 대부분의 지역에서 양(+)의 값을 나타내어 고도가 높아질수록 NDVI 값도 증가하는 것으로 나타났다. 높은 고도인 소유역의 서쪽 경계부로 갈수록 NDVI 값이 확연히 높아지는 것으로 나타났다. 이것은 금강산의 전반적인 식생 분포가 해발 300~400m 아래는 소나무 단순림, 해발 300~800m는 소나무와 참나무류의 혼성림, 그 위로는 활엽수림을 이루어 고도가 높아질수록 점차 열면적이 넓어지는 활엽수림으로 변해가는 것을 반영하는 것으로 판단된다. 일사량과 일조시간은 고도가 낮은 소유역의 동쪽에서는 일사량, 일조시간이 증가할수록 NDVI 값 또한 높아지는 것으로 나타났으며, 고도가 높아질수록 점차 음(-)으로 변하는 것으로 나타나 고도가 낮은 소유역의 동쪽 부분이 일사량, 일조시간에 따른 NDVI가 정(+)의 상관관계에 있음을 나타내었다(Fig. 7).

OLS 분석결과와는 NDVI에 미치는 지형·태양광도의

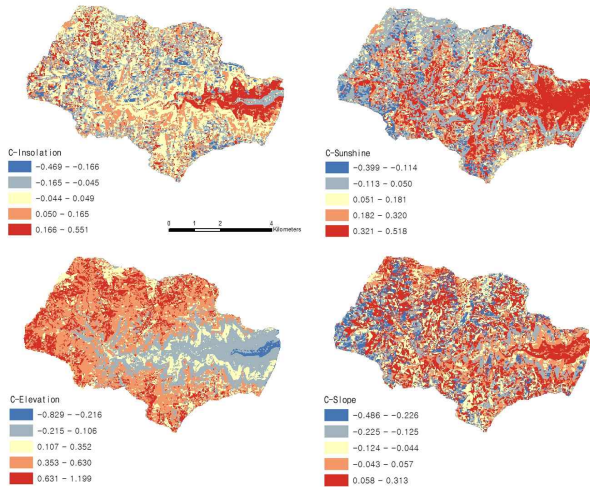


Figure 7. Coefficients of explanatory variables in GWR

영향력을 연구지역에서 단일하게 추정하였으나, GWR 분석결과 각 인자가 NDVI에 미치는 영향력을 국지적으로 보다 세밀하게 추정하여 지역별로 각 인자의 영향력을 차이가 파악될 수 있었다.

분수계에 따라 구분된 금강산 소유역에서 도출된 지역결정계수가 유역의 위계에서 소유역(27~260 km<sup>2</sup>)의 규모를 가지는 연구지역 내에서도 확연한 차이를 보이므로 유역의 위계 중 가장 좁은 범위를 의미하는 집수구역(0.13-1.3 km<sup>2</sup>) 수준에서의 식생분포 추정이 지형·태양광도와 식생분포의 상관관계를 보다 명확히 규명할 수 있는 방법일 것으로 판단된다. 또한 식생에 따라 분포 환경의 차이가 존재하므로 단순히 식생분포를 정량적으로 나타내는 NDVI 보다 수종과 영급, 경급 등으로 세분화하여 분류할 때 식생분포와 지형·태양광도의 상관관계를 보다 상세히 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

### 5. 결 론

본 연구의 결과 NDVI로 대변되는 식생의 분포는 지표면에 공간적으로 군집된 패턴으로 분포하는 것으로 나타났으며, OLS를 통한 NDVI와 지형·태양광도의 상관성에 대한 전역적 추정은 낮은 설명력을 보였다. 분석 결과의 잔차 또한 공간적 자기상관성을 가지는 것으로 나타나 회귀분석의 기본 가정을 위배하는 것으로 나타났다. 공간적 자기상관성의 문제를 해소하고 국지적 차원의 추정이 가능한 GWR 분석결과 모형의 설명력은 대폭 향상된 것으로 나타났으며, 특정지역에 대해서는 70% 이상의 설명력을 보였다. 국지적 분석은 모형의 적합성이 OLS에 비해 크게 향상 되었으며, 잔차의 공간적 자기상관성 또한 전역적 추정에 비해 개선된 것

으로 나타났다.

식생의 분포는 다양한 기준에 따라 상이하게 공간상에 표현되어 진다. 하지만 국지적으로 추정된 각 인자의 회귀계수의 추정치에서 NDVI는 소유역 전반에 걸쳐 고도와 높은 정(+)의 상관성을 가지며, 일사량과 일조시간은 소유역내에서도 NDVI에 미치는 영향력이 상이한 것으로 나타났다. 국지적 차원에서 추정된 NDVI와 지형·태양광도의 상관성은 기존의 회귀분석에 비해 각 변수의 영향력을 보다 명확히 나타내므로 향후 다양한 기준에 의해 세분화된 식생분포와 자연환경요인과의 상관관계 추정과 식생분포 파악을 위한 대상지역 선정에서 보다 세밀한 분석을 위한 참고자료로 활용될 수 있을 것이다. 2)

### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011000042)

### References

1. Anselin, L. and Bera, A. K., 1998, Spatial dependence in linear regression models with an introduction to spatial econometrics, in Aman Ullah and David Giles(eds.), Handbook of applied economic statistics, New York, pp.237-289.
2. Anselin, L., Hudak, S. and Dodson, R., 1993, Spatial data analysis and GIS: interfacing GIS and econometric software, National center for geographic information and analysis, Santa Barbara, CA, pp.1-106.
3. Austin, M., 2007, Species distribution models and ecological theory: a critical assessment and some

1) 본 연구에서는 일조시간과 일사량을 포괄하는 개념으로 태양광도라는 용어를 사용하고 있다. 태양광도는 단위 시간 동안 태양이 뿜는 에너지의 총량을 의미하며 지상에서는 단위면적에 가해지는 태양에너지로 정의되며 1m<sup>2</sup>에 도달한 태양광 에너지의 강도로 측정된다. 일사량과 일조시간은 전혀 다른 의미를 가지고 있다. 일사량은 태양 에너지가 지상으로 도착했을 때 에너지의 양을 의미한다. 태양에너지가 대기를 통과하면서 미세먼지와 구름 등에 의해 반사, 흡수되는 등 장애물을 통과하고 지표에 도달된 에너지가 일사량이며 대표적 측정단위는 kcal/m<sup>2</sup>이다. 하지만 일조시간은 구름, 먼지 등의 장애요인을 고려하지 않고 하루 동안 또는 정해진 기간 동안 햇빛이 지상에 비췌졌는가를 측정하기 때문에 일조시간의 단위는 시간이다.

- possible new approaches, *Ecological modelling*, Vol.200, pp.1-19.
4. Charlton, M. and Fotheringham, A. S., 2008, Geographically weighted regression: a tutorial on using GWR in ArcGIS9.3. [http://ncg.nuim.ie/ncg/GWR/GWR\\_Tutorial.pdf](http://ncg.nuim.ie/ncg/GWR/GWR_Tutorial.pdf). pp.1-27.
  5. Charlton, M. and Fotheringham, A. S., 2009, Geographically weighted regression: white paper. [http://ncg.nhim.ie/ncg/GWR/GWR\\_WhitePaper.pdf](http://ncg.nhim.ie/ncg/GWR/GWR_WhitePaper.pdf). pp.1-17.
  6. Choi, D. J. and Suh, Y. C., 2012, Geographically weighted regression on the environmental-ecological factors of human longevity, *The Korean society for geo-spatial information system*, Vol.20, No.3, pp.57-63.
  7. Choi, J. H. and Um, J. S., 2012, Application of satellite image to evaluate UN-REDD registration potential of North Korea : a case study of Mt. Geumgang, *The Korean society for geo-spatial information system*, Vol.20, No.4, p.79.
  8. Choi, M. H. and Yun, J. I., 2009, On recent variations in solar radiation and daily maximum temperature in summer, *Korean agricultural and forest meteorology*, Vol.11, No.4, p.189.
  9. Chung, K. S., Kim, S. W. and Lee, S. Y., 2011, Busan housing market dynamics modeling, *Korean journal of policy analysis and evaluation*, Vol.21, No.4, pp.117-144.
  10. Gao, J., Li, S., Zhao, Z. and Cai, Y., 2012, Investigating spatial variation in the relationships between NDVI and environmental factors at multi-scales: a case study of Guizhou karst plateau China, *International journal of remote sensing*, Vol.33, No.7, pp.2112-2129.
  11. Griffith, D. A. and Layne, L. J., 1999, *A casebook for spatial statistical data analysis: a compilation of analyses of different thematic data set*, Oxford university press, p.524.
  12. Hong, S. Y., Hui, J. N., Ahn, J. B., Lee, J. M., Min, B. K., Lee, C. K., Kim, Y. H., Lee, K. D., Kim, S. H., Kim, G. Y. and Shim, K. M., 2012, Estimating rice yield using MODIS NDVI and meteorological data in Korea, *The Korean society of remote sensing*, Vol.28, No.5, pp.509-520.
  13. ICIMOD(International Centre for Integrated Mountain Development), 2011, *A monitoring report on forest carbon stocks changes in REDD project sites (Ludikhola, Kayarkhola and Charnawati)*, pp.1-35.
  14. Jee, J. B., Zo, S. I., Lee, K. T. and Choi, Y. J., 2011, Distribution of photovoltaic energy including topography effect, *Korean earth science society*, Vol.32, No.2, pp.190-199.
  15. Jo, D. G., 2009a, A spatial analysis of sociodemographic correlates of health related quality of life, *Korean journal of population studies*, Vol.32, No.3, pp.1-20.
  16. Jo, D. G., 2009b, GIS and geographically weighted regression in the survey research of small areas, *Survey research*, Vol.10, No.3, pp.1-19.
  17. Kim, B. W., Kang, I. J. and Han, K. B., 2010, Insolation modeling using climate and geo-spatial elements, *The Korean society for geo-spatial information system*, Vol.18, No.4, pp.79-86.
  18. Kim, C. M., 1991, *Studies on analysis of forest distribution and characteristics in Gumo-san provincial park using landsat thematic mapper data and digital terrain model*, Doctoral dissertation, Seoul national university, p.68.
  19. Kim, G. G., 2003, *Exploration of spatial autocorrelation and application of spatial regression*, *Korean journal of policy analysis and evaluation*, Vol.13, No.1, pp.273-306.
  20. Kim, T. M., Song, C. C., Lee, W. K., Son, Y. H., Bae, S. W. and Kim, C. S., 2007, *Up-scaling vegetation carbon storage distribution map of Pinus densiflora stands from plot to landscape level using GIS/RS*, *Korea spatial information society, 2007 Korea spatial information society academic conference*, pp.221-225.
  21. Kim, Y. P., 2008, *A study on distribution characteristic of NDVI according to the topographic position*, *Korea institute of forest recreation*, Vol.12, No.4, pp.47-54.
  22. Kimmins, J. P., 1987, *Forest ecology*, Macumilan publishing company, p.530.
  23. Lee, C. B., Lee, M. Y. and Choi, J. C., 1991, *A solar irradiance and air temperature simulation model for the slope of Mt. Halla in Chejudo*, *Environmental research*, Vol.8, p.118.
  24. Lee, J. T., Yoon, S. H. and Park, M. E., 1995, *Relationships between seasonal duration of sunshine and air temperature in Korea*, *Korean journal of environmental agriculture*, Vol.14, No.2, p.155.
  25. Lee, S. H., Kim, H. J. and Yun, C. W., 2012, *Correlation analysis between forest community structure and environment factor in Mt. Guryong*,



- Gyeongsangbuk-do province, Korean forest society, Vol.101, No.3, pp.526-537.
26. Park, I. H. and Seo, Y. G., 2001, Forest structure in relation to slope aspect and altitude in valley forests at Kyeryongsan national park, Korean society of environment & ecology, Vol.14, No.4, pp.296-302.
  27. Park, M. H., Lee, J. S. and Park J. I., 2008, A relationship analysis among land surface temperature and NDVI in Hampyeong bay using landsat TM/ETM+ satellite images, Korean association of cadastre information, Vol.10, No.2, pp.107-115.
  28. Park, Y. S., Lee, M. J., Song, H. G. and Lee, G. S., 2001, An analysis of vegetation structure and vegetation-environment relationships with DCCA in the valley part of Kyeryongsan national park, Korean forest society, Vol.90, No.3, pp.249-256.
  29. Propastin, P., Kappas, M. and Erasmi, S., 2008, Application of geographically weighted regression to investigate the impact of scale on prediction uncertainty by modelling relationship between vegetation and climate, International journal of spatial data infrastructures research, Vol.3, pp.73-94.
  30. Schulz, J. J., Cayuela, L., Rey-Benayas, J. M. and Schröder, B., 2011, Factors influencing vegetation cover change in Mediterranean Central Chile (1975-2008), Applied vegetation science, Vol.14, No.4, p.575.
  31. Shin, J. H., 2012, Simulation map of potential natural vegetation and actual vegetation distribution using high-resolution images and geographic information system : focused on the Bukhansan national park, Doctoral dissertation, Kongju national university, p.167.
  32. Shin, K. H., 2006, Analysis of spatial relationship between environmental factors and vegetation distribution using DEM : in Jiri-mountain national park, The Korean geomorphological association, Vol.13, No.1, pp.85-95.
  33. Shin, S. H., Ha, K. J., Kim, J. H., Oh, H. M. and Jo, M. H., 2004, Estimation of local surface temperature from EBM with the use of GRID/GIS and remote sensed data, The Korean society of remote sensing, Vol.20, No.2, p.103-116.
  34. Song, H. K., So, S. K., Kim, M. Y., Park, J. M., Lee, S. H. and Park, G. S., 2007, Vegetation-environment relationships in forest community of Ulleung Island, Korean society of environment & ecology, Vol.21, No.1, p.82-92.
  35. Sung, C. J. and Jung, J. C., 2003, A study on change of NDVI according to the terrain element, The Korean association of geographic information studies, Vol.6, No.2, pp.92-100.
  36. Um, J. S., 2009, Evaluating explanatory power of solar intensity as determining factor of housing density in intermontane basin, The Korean association of regional geography, Vol.15, No.6, pp.689-706.
  37. World Bank Group, 2011, Estimating the opportunity costs of REDD+ : a training manual, version 1.3, Washington D.C, p.262.
  38. Yoon, J. H., 2003, Characteristics and change prediction of spatial distribution of pinus densiflora stands in Korea : emphasis on impacts of topography, climate, and soil factors, Doctoral dissertation, Korea university, p.144.
  39. Yuan, F., Roy, S. S., 2007, Analysis of the relationship between NDVI And climate variables in Minnesota using geographically weighted regression and spatial interpolation, proceedings of the annual conference, American society for photogrammetry and remote sensing, Vol.2, pp.784-789.
  40. Yun, J. I., 2009, A simple method using a topography correction coefficient for estimating daily distribution of solar irradiance in complex terrain, Korean journal of agricultural and forest meteorology, Vol.11, No.1, pp.13-18.