

연구논문

지리가중회귀모델을 이용한 도시홍수 피해지역의 지역적 공간특성 분석

심준석* · 김지숙** · 이성호***

강원발전연구원*, 부산대학교 지형정보협동과정**, 부산대학교 도시공학과***
(2013년 12월 12일 접수, 2014년 2월 4일 승인)

Local Analysis of the spatial characteristics of urban flooding areas using GWR

Jun-Seok Sim* · Ji-Sook Kim** · Sung-Ho Lee***

Research Institute for Gangwon*
Dept. of Geographic Information System, Pusan National University**
Dept. of Urban Engineering, Pusan National University***
(Manuscript received 12 December 2013; accepted 4 February 2014)

Abstract

In recent years, the frequency and scale of the natural disasters are growing rapidly due to the global climate change. In case of the urban flooding, high-density of population and infrastructure has caused the more intensive damages. In this study, we analyzed the spatial characteristics of urban flooding damage factors using GWR(Geographically Weighted Regression) for effective disaster prevention and then, classified the causes of the flood damage by spatial characteristics. The damage factors applied consists of natural variables such as the poor drainage area, the distance from the river, elevation and slope, and anthropogenic variables such as the impervious surface area, urbanized area, and infrastructure area, which are selected by literature review. This study carried out the comparative analysis between OLS(Ordinary Least Square) and GWR model for identifying spatial non-stationarity and spatial autocorrelation, and in the results, GWR model has higher explanation power than OLS model. As a result, it appears that there are some differences between each of the flood damage areas depending on the variables. We conclude that the establishment of disaster prevention plan for urban flooding area should reflect the spatial characteristics of the damaged areas. This study provides an improved understandings of the causes of urban flood damages, which can be diverse according to their own spatial characteristics.

Keywords : Geographically Weighted Regression, Urban Inundation, Regional Characteristics, Spatial non-stationarity

I. 서론

최근 기후변화를 유발하는 다양한 자연적 요인과 온실효과와 같은 인위적 요인들로 인해 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 자연재해의 규모와 피해발생빈도가 증가하고 있다. 특히 도시화율이 높은 우리나라의 경우 불투수층의 증가로 인해 풍수해 등의 자연재해에 대한 취약성이 증대됨에 따라 피해 정도가 심화되어가고 있는 실정이다.

도시지역은 무분별한 개발에 따른 저지대 및 지하공간의 취약성이 드러나 피해를 가중시키고 있으며, 복합적인 요인들이 대거 작용하여 기존 방재체계의 문제점을 드러내고 있다. 하지만 도시라는 공간적 특수성으로 인해 제한적인 방재계획이 수립되고 있으며, 이로 인해 재해 적응에 어려움을 겪고 있다. 이에 따라 도시 계획적 차원의 종합적이고 장기적인 방재계획의 필요성이 증가하고 있는 실정이다.

다수의 연구들(국립방재교육연구원 방재연구소, 2010; 강석진 등, 2008)에서 도시계획차원의 방재계획에 관한 연구를 수행하면서 사후처리와 정책적 제안을 바탕으로 한 구조적 방재계획 수립뿐만 아니라, 방재대책이 선진화될수록 인명피해와 2차 피해를 최소화하기 위해 반드시 구조적 대책과 병행 추진되어야 할 비구조적 대책의 중요성에 대해 언급하고 있다. 다양한 방재 대책들을 계획하고 실행함에 있어 도시지역이라는 특성으로 인한 내수 침수 피해를 사전에 예방하고 근본적 피해원인의 대책마련을 위해서는 지역별로 공간적인 특성을 고려한 연구가 수반되어야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 지리가중회귀 모델을 이용하여 도시홍수 피해액에 내재한 공간적 특성을 분석하고, 분석결과를 바탕으로 피해요인의 공간적 영향력과 침수지역의 피해특성을 고려하여 요인별 유형을 분류하고자 한다. 이러한 기초 연구를 진행함으로써 도시 홍수의 피해 유형별 관리계획 및 방재계획 수립시 지역적 특성을 반영한 의사결정지원이 가능할 것이다.

II. 선행연구

1. 도시홍수

도시홍수재해는 인명과 재산피해를 유발할 뿐만 아니라, 도시의 근간을 이루는 기반시설에도 영향을 미쳐 도시기능과 사회 시스템의 붕괴를 초래할 수 있다. 도시홍수의 위험성과 피해의 심각성을 강조하는 여러 연구에서 도시홍수가 갖는 특징과 원인을 파악함에 있어 개별적인 도시적 요소들을 고려해야 함을 강조하였다.

최충익(2003)은 도시의 토지이용 변화에 따른 자연재해 취약성에 미치는 영향에 대해 자연적 요소와 인문적 요소, 물리적 요소 등을 이용하여 정량적으로 분석한 결과, 도시화가 자연재해 피해를 증가시키는 요인으로 볼 수 있으며, 2004년의 연구(최충익, 2004b)에서는 도시홍수피해는 인구와 토지이용이 밀집한 곳에서 발생하기 때문에 일반적인 자연재해보다 더 위험할 수 있음을 시사하였다. 높은 인구밀도와 다양한 사회경제활동, 고도의 토지이용이 이루어지는 도시공간에서 침수가 발생할 경우, 인명과 재산 피해뿐만 아니라 교통마비, 물 공급 및 처리시설의 손상, 수인성 전염병의 확산 등 2차적인 피해가 발생할 우려가 있다.

국토연구원(2008)에서는 우리나라 도시침수피해 특성과 정책과제를 다음과 같이 제시하였는데, 첫째, 도시홍수재해는 인제적 성격이 강하고 피해가 급격하게 확산되므로 도시홍수의 특성과 도시여건을 고려하여 효율적인 접근이 필요함을 제시하였다. 둘째, 도시화로 인한 인구 및 기반시설의 집중과 도시개발에 따른 불투수면적의 증가, 지하공간의 개발 등 인위적 창출공간이 도시홍수피해를 가중시키는 것으로 분석하였다. 따라서 각 도시별 특성을 고려하여 도시홍수피해를 예방할 수 있도록 방재계획 및 정책적 제안이 이루어져야 한다고 강조하였다.

강상준과 정주철(2012)은 최근 수해 피해 자료를 이용하여 수해지 특성분석과 이를 반영한 토지이용 관리 방안을 제시하였다. 수해 피해지역의 공간적 분포에 대한 공간자기상관성 분석을 통하여 피해지역별로 각기 다른 관리방안이 필요함을 역설하였다.

도시홍수재해에 영향을 미치는 요인들은 공간적 특성을 내재하고 있어 이를 반영하지 않고 획일적 기준으로 홍수위험지역을 선정하거나 방어계획을 수립하는 것에는 문제가 있는 것으로 나타났다. 국토연구원(2008)에서는 도시계획 내의 방재계획이 더 실효성을 가지기 위해서는 도시특성, 기후변화특성, 재해특성 및 계획특성을 고려한 수립방안이 마련되어야 한다고 제시하였다.

이처럼 많은 연구자들이 도시홍수의 위험성을 지적하면서 도시홍수 피해는 자연적 요인뿐만 아니라 도시화로 인한 인위적 요인이 작용하고 있음을 증명하였다. 또한 인위적 요인은 각 지역별로 공간적 특성을 가짐으로써 이를 반영하는 관리방안의 필요성을 언급하였는데, 이는 재해가 발생하는 지점이 서로 다른 공간적 특성을 가지고 있기 때문이며, 또한 재해 특성 분석을 위하여 다루는 요인 역시 지역적 특성을 반영한 공간적 이질성과 상관성을 가지고 있기 때문이다. 즉, 개별적인 공간 단위의 위치에 따라 요인들의 영향력이 달라질 수 있고, 인접 지역의 경우에는 유사한 특성을 보이고 있어 공간적 영향력을 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 지역의 공간적 특성과 공간적 요인간의 상호연관성을 반영하기 위하여 공간적 종속성과 공간적 자기상관성을 효율적으로 다룰 수 있는 지리가중 회귀모형(GWR : Geographically Weighted Regression)을 이용하였다.

2. GWR 모델

GWR 모델의 핵심적 개념은 국지적 선형 회귀계수를 추정하기 위해 이웃하고 있는 관측값들에 대하여 거리조락에 따른 가중치를 산출하여 모델을 추정한다는 것이다. 특정 지역에 가까운 지역일수록 가중치를 많이 부여하고 멀리 떨어져 있는 지역일수록 가중치를 적게 부여하면서 해당 지역에 대한 회귀계수를 추정하는 방법이다.

GWR을 이용하여 자연재해를 다룬 사례는 거의 없지만, GWR을 전역적 회귀분석(OLS)과 비교함으로써 공간적인 특성을 다루는 데 있어 GWR이 통계적 설명력이 높음을 보여주는 연구는 다수 진행되어 왔

다. 서경천(2003)의 연구에서는 부산광역시 서부산권을 대상으로 토지가격에 내재한 공간적 변동성을 분석하였는데, 종속변수인 지가와 독립변수인 토지의 여러 가지 특성변수들의 관계가 공간상에서 항상 고정적이라고 가정하는 포괄적 모수 추정치의 가정을 대신하여, 공간적 특이성을 감안해 종속변수와 독립변수들의 관계가 공간상에서 비고정적이라는 점과 모수의 변동을 허용하기 위해 GWR 모델을 이용하였다. 허윤경, 이주영(2009)의 연구에서는 인구밀도, 고용밀도, 지가를 중심으로 울산 도시공간구조의 변화를 분석하면서 기존의 모수적 접근방법들이 변수들 간의 다중공선성 문제가 발생하고 밀도경사의 회복을 보이는 도시의 공간구조를 해석하기에 한계가 있음을 지적하고 LWR(Locally Weighted Regression)을 적용하였는데, 여기서 LWR은 가중치 행렬의 개념을 공간자기회귀(spatial autoregressive regression)로 확장하는 데 기원하여 GWR로 불리기도 한다.

전병운(2011)의 연구에서는 GWR을 사용하여 환경적 형평성과 도시 삶의 질 간의 관계는 공간상에서 상당히 변이적임을 제시하여 전역적인 모델보다 GWR을 통해서 이러한 공간적 변이를 더 잘 설명할 수 있음을 밝혔다. 또한 최돈정, 서용철(2012)은 장수를 설명하기 위한 환경생태학적 요인을 분석한 결과, GWR 모형이 OLS 모형보다 높은 모형 적합도를 가지고 특정 환경 변수가 가지는 효과에 대한 공간적 변동성을 설명할 수 있는 것으로 나타났다. 외국 사례로, A. C. L. Sa et al.(2011)은 사하라사막 이남의 아프리카 지역에서 발생하는 화재와 주변 환경과의 관계를 규명하기 위해 GWR을 이용하여 다양하고 복합적인 화재발생 결정요인들을 살펴보았는데, 회귀계수들의 공간적 변동이 주어진 상황에서는 전역적 모델보다 국지적 모델을 사용하는 것이 적절하며 회귀 계수들의 비고정성을 고찰할 필요가 있음을 역설하였다.

따라서 공간계획 수립 시 지역적 특성을 반영하기 위해서는 공간요인간의 상호연관성을 반드시 고려해야 한다. 도시홍수 피해는 복합적인 요인으로 발생하며, 해당 지역의 공간적 특성에 따라 피해규모나 양상이 달라질 수 있다. 이에 본 연구에서는 지역의 공

간적 특성을 반영하고, 공간적 요인 간의 상호연관성을 반영하는 방법론을 적용하여 도시홍수 피해지역의 공간적 특성을 분석하였다.

III. 변수 및 모델 설정

1. 대상지 설정

도시홍수 피해지역의 공간적 특성을 분석하기 위해 부산지역에 위치한 도시홍수 피해지역 중 내수침수에 의한 피해사례지역을 선정하였다. 부산시 재난안전대책본부(2010)의 자연재해 피해현황에 따르면, 부산광역시의 경우 최근 10년간 태풍 및 집중호우로 인한 침수피해가 대부분이며, 침수에 있어서도 외수로 인한 피해보다는 내수로 인한 피해가 더 큰 것으로 나타났다. 또한 침수피해가 나타난 62개의 지역 중에서 22개 지역은 반복적으로 피해가 발생한 것으로 나타나 피해의 원인 분석과 장기간의 예측을 통한 근본적 대책모색보다는 피해 복구에 치우친 방재계획의 기능과 역할에 한계가 있음을 시사하고 있다. 피해 면적은 과거보다 감소하였지만 도시화, 집중화로

인해 수해 밀도 및 피해규모는 점점 증가하고 있어 이에 대한 인식과 대책마련이 시급하다고 할 수 있다.

이를 위해 부산광역시의 재난안전대책본부에서 제공하는 ‘최근 10년간 침수피해 발생지역현황’을 참고하여 연구대상지역을 선정하였다. 대상지역은 1999년부터 2008년까지 10년간의 내수침수가 발생한 30개 지역으로 공간적 분포는 Fig. 1과 같다.

2. 변수선정 및 자료의 구축

본 연구에서는 도시홍수 피해에 영향을 미치는 요인들을 선정하기 위해 관련 선행연구들을 고찰하였다. 대부분의 연구에서 자연적 요소, 인문적 요소, 사회적 요소 등으로 나누어 요인들을 살펴보고 있으며, 연구자들마다 약간의 차이는 있지만 피해지역이 도시지역라는 점을 고려하여 인구밀도와 토지이용, 불투수 면적 등을 포함하였음을 알 수 있다.

소방방재청(2011)의 연구에 따르면, 일반적으로 도시에서 홍수가 발생하였을 때 피해가 심화되는 원인으로는 국지성 집중호우의 증가, 하천변 저지대의 개발과 도시화로 인한 인구와 산업의 집중화, 도시개

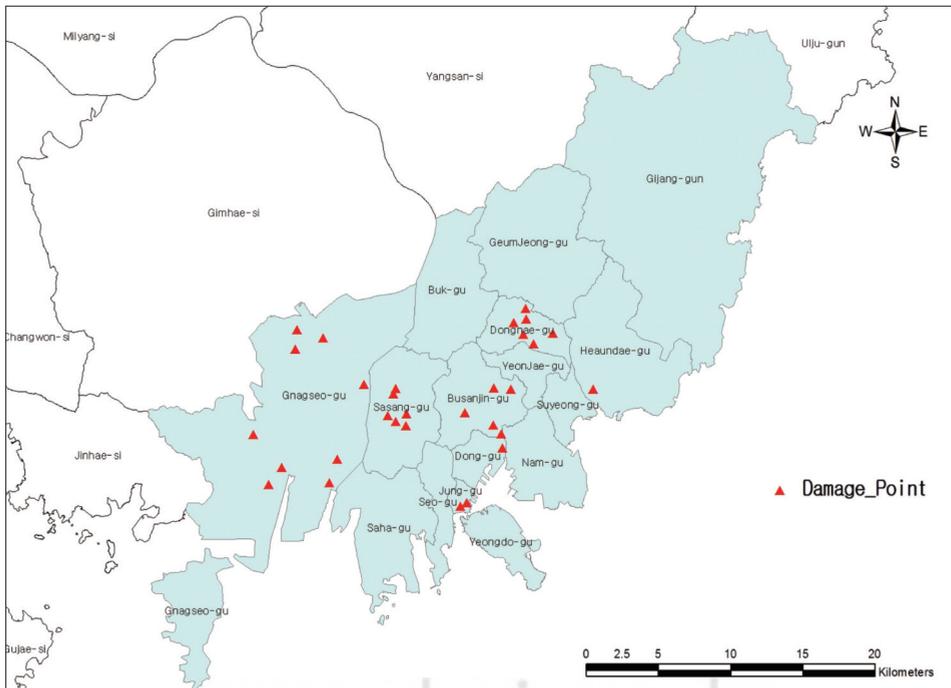


Fig. 1. Study area

Table 1. Summary of variables

Type			Variables(unit)
Dependent variable			Flood damage(won)
Control variables			Population density
			Average land values(won)
Independent variable	Natural factors	Geological features	Poor drainage area(m ²)
		Geographical features	Distance of the river(m)
			Mean elevation(m)
			Mean slope(degree)
	Artificial factors	Environmental factor	Impervious area(m ²)
		Social factors	Urbanization area(m ²)
			Infrastructure area(m ²)

발에 따른 불투수 면적의 증가, 방재시설의 용량 부족, 지하공간 활용 증대 등을 들 수 있다. 장대원(2010)은 1990년부터 2007년까지의 강우량과 피해액을 분석한 결과 기상학적 변동 폭에 비해 피해액은 더 큰 폭으로 증가한다는 점에 주목하여, ‘강우’라는 외적요소보다 도시화, 산업화, 집중화와 같은 피해요소의 집중이 피해규모에 더 큰 영향을 미친다는 점을 강조하였고, 최충익(2004a)은 홍수를 발생시키는 중요한 요소가 자연적 요소이긴 하지만 그 피해를 증가시키는 데에는 도시화 요소가 중요한 역할을 한다는 점을 지적하였다.

도시홍수 피해를 일으키는 여러 가지 원인들 중, 강우량과 같은 기상학적 요인들은 피해를 일으키는 외적 유발 요인으로써 본 연구에서는 이러한 요인을 제외하고, 도시라는 특성으로 인해 피해를 가중시키는 역할을 하는 도시공간의 내적 가중요인들을 중심으로 Table 1과 같이 변수를 선정하였다.

선행연구들을 살펴보면 많은 연구들이 종속변수 선정시 과거의 피해 자료를 근거로 하고 있는데, 대표적으로 UNDP(2004)의 Disaster risk index는 각 국가별 재해위험도를 전체 인구 중 재해로 인해 발생할 수 있는 사망자수로 규정하고 있다. 또한 장옥재와 김영오(2009)의 연구에서는 과거 홍수피해금액을 활용하여 홍수 피해위험도 평가방법을 제안하였다. 본 연구에서는 종속변수로 ‘도시내수침수피해액’을 선정하였다. 사용된 침수피해액은 소방방재청에서 2012년 7월에 고시한 「자연재해위험지구 관리지침」

의 피해액 산정기준을 참조하였는데, 1999년부터 2007년까지의 10년 간 내수침수 피해현황 자료에 나타난 주택, 건물, 가구, 인구의 피해 내용의 실제 피해액의 산정은 해당 구청 및 시청, 관련 정부기관의 정확한 산출 자료에 한계가 있어 피해액 산정기준에 의해 피해액을 추정하여 사용하였다.

독립변수는 자연적 요인과 인위적 요인으로 나누어 선정하였다. 자연적 요인 중 지질적 특성을 고려한 배수불량지 변수는 대부분의 수해가 단기간의 집중호우로 인한 배수불량에 따른다(최충익, 2004b)는 점에서 독립변수로 선정하였으며, 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 토양도를 바탕으로 재가공하여 배포하는 자료를 사용하였다.

지형적 요소로써 하천과의 거리가 내수 침수에 영향을 줄 것으로 예상되어 독립변수로 선정하였고 수치지도 2.0에서 제공하는 하천데이터 중 국가하천 및 도시하천을 추출하여 피해지역과의 거리를 GIS로 분석하여 계산하였다. 이와 더불어 저지대일수록 내수로 인한 피해에 취약하다는 점에서 지형적 특성 분석을 위해 ‘평균표고’, ‘평균경사’ 변수를 추가하였다.

인위적 요인은 환경적 요소와 사회적 요소로 나누어 변수를 선정하였는데, 환경적 요인을 고려하여 도시화에 의한 불투수면의 증가가 내수침수 피해를 가중시킬 수 있다는 점에서 ‘불투수 용지 면적’을 추가하였다. ‘불투수 용지 면적’ 변수는 부산발전연구원에서 구축한 도시생태현황도를 활용하여 불투수 용지를 추출한 후, 피해지역과의 중첩분석을 통해서 면적

을 산정하였다.

도시공간에서 피해를 가중시킬 수 있는 원인으로 인구 및 경제활동의 집중을 살펴보기 위하여 '시가화 면적' 변수를 선정하였으며, 토지 피복도를 이용하여 피해지역과 중첩분석을 통해 면적을 산정하였다. 또한 최근 도시내수침수 피해에 있어서 피해면적은 감소하나 피해액은 증가하는 특성을 반영하여 '도시기반시설 면적' 변수를 포함시켰으며, 이를 위해 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에서 정의하는 도시계획시설을 선정하여 분석에 사용하였다. 도시기반시설 변수는 KGIS 지도를 이용하여 해당 면적을 추출한 후 분석에 이용하였다.

통제변수로 '인구밀도' 변수와 '평균지가' 변수를 이용하였으며, 본 연구의 대상지인 부산시 센서스 데이터의 속성자료를 추출하여 사용하였다.

3. 모델 설정

GWR은 전역적 모수가 아닌 국지적 모수가 추정 되도록 전통적인 회귀모델을 확장한 모델이다. 즉, 다중선형회귀분석에 좌표를 부여함으로써 모형을 지역적인 구조로 확장한 것으로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$y_i = \beta_0(ui, vi) + \sum_k \beta_k(ui, vi) x_k + \varepsilon_i \quad (1)$$

식(1)에서 (ui, vi) 는 공간상에서 존재하는 i 번째 침수지역이 위치한 지점의 좌표를 의미하며, $\beta_k(ui, vi)$ 는 지점 i 에서의 연속함수 $\beta_k(u, v)$ 를 나타낸다. 즉 연속함수 $\beta_k(ui, vi)$ 를 점 i 에서 현실화한 것이며 위의 GWR 수식은 관련성의 공간적 변이를 인식하고 이를 측정할 수 있게 해준다.

식(1)은 암묵적으로 지점 i 에 근접한 침수지역이 지점 i 로부터 보다 멀리 위치한 침수지역보다 $\beta_k(ui, vi)$ 의 추정에서 보다 많은 영향을 가지는 것을 가정한다. 즉, 특정 자료에 대한 가중치는 일정하지 않고 i 에 의해 변하기 위해서, 관찰 자료는 지점 i 와의 근접성에 따라 가중하도록 WLS(Weighted Least Squares)방식을 이용한다.

$$\hat{\beta}(ui, vi) = (X^T W(ui, vi) X)^{-1} X^T W(ui, vi) \quad (2)$$

식(2)는 β 의 추정치를 의미하며 다음과 같은 행렬을 나타낸다.

$$W(ui, vi) = \begin{pmatrix} W_{i1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & W_{ik} \end{pmatrix} \quad (3)$$

가중치행렬 $W(ui, vi)$ 에서 각 W_{ij} 값은 회귀분석의 중심점 i 에서 j 번째 위치한 점에 대한 가중치이며, 회귀지점에서 멀어질수록 낮아지는 차별적인 가중치가 적용되며 이는 모형에서 데이터들 간 거리가 고려된다. 여기서 W_{ij} 는 단조감소함수로 정의할 수 있다.

$$W_{ij} = \exp(-\gamma d_{ij}^2) \quad (4)$$

는 회귀분석 중심점 i 에서 j 번째 위치한 관측치가 지 거리이며, γ 는 Kernel bandwidth이다. 만일 i 와 j 가 동일한 공간에 위치한 경우 가중치는 1이 되고, 다른 위치의 자료는 거리가 증가함에 따라 가중치가 가우시안 곡선만큼 감소한다. 즉 i 로부터 멀어질수록 가중치는 0에 가까워진다. 이는 가중치를 적용하는 기초가 되며 연구지역을 분할하는 기준이 된다.

커널의 타입은 한 지역에서 다른 지역까지의 거리(d)와 대역폭(θ : bandwidth)에 따라 달라지며, 대역폭의 고정 여부에 따라 고정 커널(fixed kernel)과 적응적 커널(adaptive kernel)로 구분된다. 고정커널 방식은 모든 지역에 동일한 대역폭을 적용하고 적응 커널 방식은 자료의 밀집성형에 따라 상이한 대역폭을 적용하는 방식이다. GWR의 분석결과는 가중치 함수보다는 대역폭에 대해 상대적으로 민감하다. 따라서 적절한 대역폭을 결정하는 것이 분석과정에서 필수적이라고 할 수 있다. 정확한 대역폭을 알지 못할 경우 적응적 커널을 사용하여야 하며, 본 연구에서는 최적의 대역폭을 계산하여 적용한 적응적 커널을 사용하였다. 또한, 가중치를 부여하는 방법에 따라 가우시안 함수(Gaussian function)와 바이스퀘어 함수(Bisquare function)가 있으며, 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 가우시안 함수를 적용하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. GWR 모델의 적합도 분석

회귀분석에 선행되는 변수 간 다중공선성을 살펴

Table 2. Results of Multicollinearity test

Variable	VIF
Distance of the river	2.49
Infrastructure area	1.95
Poor drainage area	3.25
Urbanization area	1.49
Impervious area	3.68
Mean elevation	1.16
Mean slope	1.08

보기 위해 본 연구에서는 VIF(Variance Influence Factor: 분산팽창계수)를 이용하였다. 일반적으로는 VIF가 10 이상일 경우에 다중공선성을 의심할 수 있다고 판단하는데, Table 2의 다중공선성 분석 결과를 살펴보면, 선정된 변수들 간에 다중공선성 문제가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

GWR 모델은 기본적으로 선형회귀모델의 형태를 취하고 있어 모델의 적용에 앞서 일반회귀분석(OLS) 모델의 산출된 결과를 토대로 적합도를 검토해야 한다. OLS와 GWR 모델의 적합도 분석결과인 Table 3을 살펴보면, GWR 모델의 $R^2_{adj.}$ 가 0.803로 나타나 OLS모델($R^2_{adj.}=0.777$)보다 개선된 것을 알 수 있다. 분석된 OLS 모델이 기본가정을 준수하고 있는가를 판단하기 위해 오차의 정규성, 등분산성, 공간적자기상관성을 살펴보았는데, Jarque-Bera 통계량이 99% 유의수준에서 유의미하게 나타나 오차의 정규성 가정을 준수하고 있지 않은 것으로 나타났다.

Koenker(Breusch-Pagan) 통계량은 등분산성에 대한 판정 기준이 되는데 검정결과 99% 유의 수준에서 매우 유의하게 나타나 종속변수와 설명변수간의 관계가 이분산성이 있음을 판정할 수 있다. 이는 종속변수와 설명변수 간의 지역적 관계에 따라 달라지

는 공간적 이질성(Spatial heterogeneity)을 가지고 있음을 의미한다. BP 통계가 유의미하게 나타나면 GWR 모델을 적용하는 것이 바람직하다(이희연, 심재현, 2011).

다음으로 Moran's I 값을 살펴보면 0.277로 매우 유의하게 나타나 공간적 자기상관성이 존재하는 것으로 나타났다. 일반적으로 AICc(corrected Akaike Information Criterion)값의 차이가 4보다 작은 경우 두 모델은 사실상 차이가 없는 것으로 판정하는데 (Fotheringham *et al.*, 2002), 본 연구에서는 GWR 모델이 1406.700로 OLS보다 약 31 작게 나타나 모형이 개선된 것으로 나타났다.

이러한 결과를 종합해보면 OLS 모델에서 종속변수와 독립변수 간의 공간적 이질성이 나타났고, 오차의 정규성 가정을 위배하고 있으며, 공간적 자기상관성이 존재하는 것으로 나타나 본 연구에서 OLS 모델은 적합하지 않은 것으로 나타났다. 또한 OLS 모델의 결과보다 GWR 모델에서 $R^2_{adj.}$ 는 향상되고 AICc는 줄어들어 GWR이 적합하다는 것을 알 수 있다.

2. 공간적 특성 분석 결과

GWR 모델 분석 결과를 토대로 독립변수별로 도시내수침수 피해지역의 공간구조에 영향을 미치는 특성을 분석하였다. 분석결과는 센서스 단위로 국지적 수준으로 나타나 전체지역에 대해 동일하게 적용할 수 없으므로, Table 4와 같이 설명변수의 최대값 및 최소값, 평균값으로 나타냈으며, 분석결과를 지도화하여 참조함으로써 공간구조 특성을 분석하였다.

GWR 모델에서 추정된 각 설명변수들의 회귀계수에 대한 분포도인 Fig. 2를 살펴보면 중앙동과 광복

Table 3. Comparison of the results of OLS model and GWR model

Variable	OLS	GWR			
R-squared	0.784	0.817			
Adjusted R-squared	0.777	0.803			
AICc	1437.974	1406.700			
Moran's Index	0.277**	0.246**			
Koenker Statistic	95.300**	Neighbors	250	Effective Number	21.294
Jarque-Bera Statistic	22407.627**				

** P < 0.01 Significance

Table 4. Estimation of the GWR model coefficients

Variables	Minimum value	Maximum value	Average value	Standard deviation
Intercept	-0.06691	2.22807	0.30683	0.53689
Distance of the River	-0.00042	0.00026	-0.00014	0.00012
Infrastructure area	-0.00004	0.00003	-0.00001	0.00002
Poor drainage area	-0.00012	0.00007	0.00002	0.00006
Urbanization area	-0.00005	0.00012	0.00002	0.00004
Impervious area	-0.00004	0.00017	0.00003	0.00006
Mean elevation	-0.20183	0.04225	-0.00471	0.05048
Mean slope	-0.16852	0.06463	-0.03617	0.03883
Local R ²	0.75321	0.96713	0.85219	0.06645

동이 위치한 중구는 지역별 설명력(local)이 93%이상으로 높게 나타났다. 분석대상지역에서 설명력이 가장 높은 지역은 96.7%로 나타났고, 낮은 지역은 75.3%로 독립변수들의 영향력이 약 21.4% 정도 차이가 나타나 지역마다 다른 영향력이 작용하고 있음을 시사하고 있다.

먼저 ‘하천과의 거리’ 변수를 살펴보면 대부분 피해 지역에 음(-)의 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이는 피해지역이 하천과의 거리가 멀어질수록 피해액이 감소하는 것을 의미한다. 특히 강서구의 피해지역은 그 영향력이 큰 것으로 분석되었는데 이는 낙동강과 인접해 있기 때문인 것으로 판단된다.

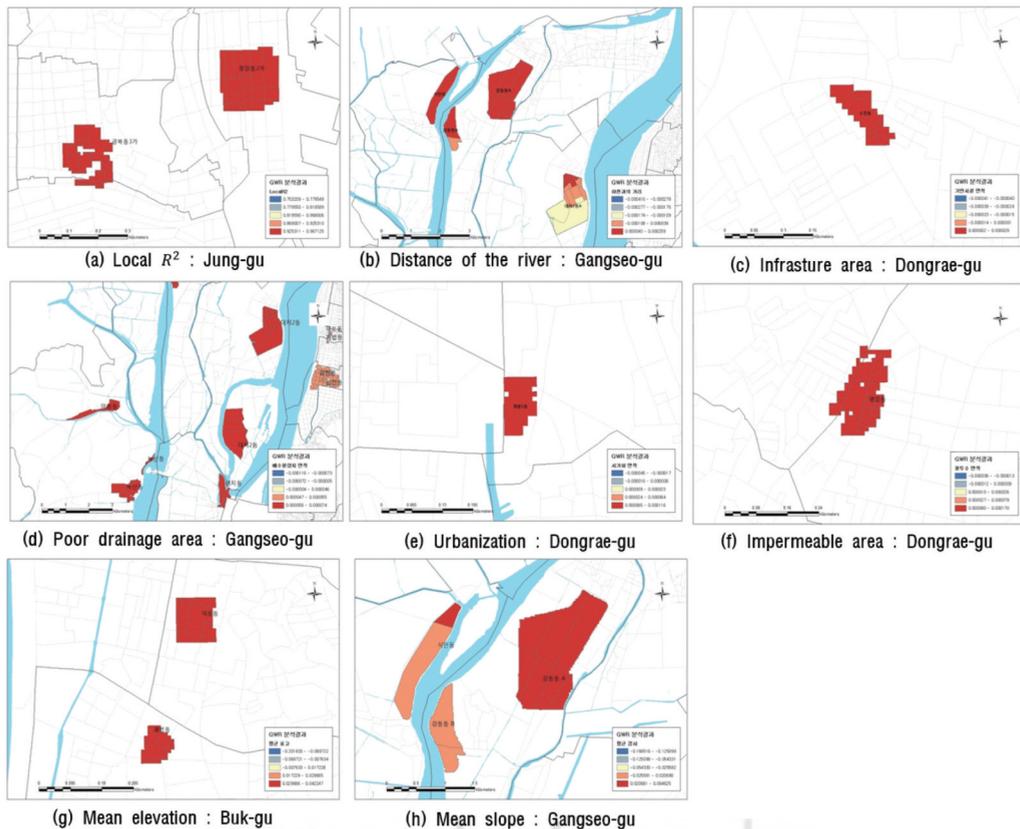


Fig. 2. The distribution of the GWR coefficients

‘도시기반시설 면적’도 음(-)의 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 피해지역 중 동래구 수안동 지역이 영향력이 가장 큰 것으로 나타났으며, 부산진구, 동구, 해운대구 피해지역에서도 영향력이 있는 것으로 나타났다. 하지만 평균 및 최대계수의 값이 설명변수 중 가장 작은 값을 나타내고 있으며, 이는 기반시설이 다른 변수들과 비교하여 종속변인인 피해액에 가장 작은 영향을 미치는 것으로 분석된다.

다음으로 ‘배수불량지 면적’은 피해지역 내에서 그 면적이 넓을수록 피해액을 증가시키는 양(+)의 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 특히, 강서구 식만동 지역에 미치는 영향이 크게 나타났는데, 해당지역은 주로 논농사 위주의 토지이용으로 타 지역보다 지대가 낮고, 과거 낙동강의 범람이 잦아 토양층이 우수를 흡수하지 못하여 피해가 가중되는 것으로 판단된다.

‘시가화 면적’ 변수가 피해지역의 도시내수침수 피해액에 미치는 영향을 분석한 결과, 동래구 명륜1동 피해지역에서 영향력이 큰 것으로 나타났다. 또한 부산진구와 동구, 중구의 피해지역에서 피해액을 가중시키는 영향을 미치는 것으로 나타났다. 강서구 지역은 행정적으로 부산시에 속하지만 토지이용을 살펴보면 시가화 면적이 작은 지역이다. 기존 선행연구의 결과와 같이, 집중적인 토지이용이 이루어지는 도시지역이 다른 지역보다 피해밀도가 높고 피해액도 증가한다는 것을 알 수 있다.

‘불투수 용지 면적’은 대부분 지역에서 양(+)의 영향을 나타내고 있으며, 특히 동래구 명장 1동의 피해 지역에서 영향력이 큰 것으로 분석되었다. 그리고 대부분의 도심 지역에서 불투수지 면적이 높을수록 도시내수침수 피해액을 증가시키는 요인으로 나타났다.

‘평균 표고’ 변수는 음(-)의 영향력을 미치는 것으로 표고가 낮을수록 피해액이 커지는 것으로 분석되었다. 특히 사상구의 덕포 1동 피해지역의 영향력이 큰 것으로 나타났으며 낙동강과 인접한 사상구 피해 지역과 강서구의 피해지역에서 영향력이 큰 것으로 분석되었다.

마지막으로 ‘평균 경사’ 변수는 음(-)의 영향력을 미치는 것으로 나타났으며, 특히 강서구의 강동동 피해지역에서 그 영향력이 큰 것으로 나타났다. 강서구

대부분 지역이 경사가 낮은 평탄한 지형으로 경사가 낮을수록 피해액이 가중되는 것으로 분석되었다.

결과를 종합해보면, 모든 독립변수 계수의 최소값이 (-)로 나타났고, 최대값이 (+)로 나타났으며, 각 변수의 계수값과 평균·표준편차가 다르게 분석되어 도시내수침수 변수들마다 피해지역에 미치는 영향이 차이가 나타났다. 또한, 같은 변수라도 대상지역에 따라 피해액에 미치는 영향이 서로 다르게 나타나는 공간적 특성을 보이고 있다. 이러한 결과는 공간적이질성에 의한 것으로 지역마다 각각 다른 피해요인에 의해 내수침수 피해가 가중되는 것을 의미한다. 따라서 이러한 국지적 계수값을 해석하여 피해지역을 유형화할 수 있다.

3. 피해지역의 요인별 분류

분석 결과를 바탕으로 지역별 피해를 가중시키는 요인들에 효과적으로 대응할 수 있도록 도시내수침수 지역별 특성을 고려하여 유형을 분류하였다. 먼저 도시홍수 피해지역의 공간적 특성 분석에 포함되는 위험요인을 자연적 요인과 인위적 요인으로 구분하였다. 자연적 요인에는 ‘하천과의 거리’와 ‘배수불량지 면적’, ‘평균 표고’, ‘평균 경사’가 주요인자이며, 인위적 요인에는 ‘기반시설 면적’, ‘시가화 면적’, ‘불투수용지 면적’을 주요인자로 선정하여 유형을 분류하였다.

GWR 분석결과 변수마다 국지적 수준에서 영향력이 다르게 나타나므로 지역에 영향을 많이 미치는 변수의 공간적 관계를 도출하기 위하여 변수별 지역의 회귀계수 분포를 분석하였다. 여기서 각 변수별 높은 계수 값이 나타나는 지역이 각 변수별 영향력이 큰 것으로 분석할 수 있으며, 이를 해석할 수 있는 최대 계수(Highest coefficient)값을 나타내는 지역은 Table 5와 같다. 강서구의 강동동 지역은 ‘하천과의 거리’ 변수와 ‘평균 경사’ 변수의 영향력이 큰 지역으로 나타났다. 또한 강서구의 식만동 지역은 ‘배수불량지 면적’ 변수의 영향이 큰 것으로 나타났고, 사상구의 덕포 1동 지역은 ‘평균 표고’ 변수의 영향력이 큰 것으로 나타났다. 즉, 자연적 요인인 ‘하천과의 거리’

Table 5. Damaged areas of highest coefficients

Variables	Highest coefficients	Damaged Areas	Gu
Distance of the river	0.00026	Gangdong-dong	Gangseo-gu
Infrastructure area	0.00003	Suan-dong	Dongrae-gu
Poor drainage area	0.00007	Sikman-dong	Gangseo-gu
Urbanization area	0.00012	Myeongnyun 1-dong	Dongrae-gu
Impervious area	0.00017	Myeonggiang 1-dong	Dongrae-gu
Mean elevation	0.04225	Deokpo 1-dong	Sasang-gu
Mean slope	0.06463	Gangdong-dong	Gangseo-gu

Table 6. The classification of damaged area

Risk factors	Variables	Impacted damage area	Influence
Natural factors	Distance of the river, Poor drainage area, Mean elevation, Mean slope	Gangseo-gu, Sasang-gu	++
Artificial factors	Infrastructure area, Urbanization area, Impervious area	Dong-gu, Dongrae-gu, Jin-gu, Haeundae-gu	++
		Jung-gu	+

와 '배수불량지 면적', '평균 표고', '평균 경사' 요인에 공통적으로 강서구와 사상구의 피해지역이 피해가 큰 것으로 나타났으며 다른 지역에서는 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다.

동래구의 명륜동 지역은 '시가화 면적' 변수와 '불투수지 면적' 변수의 영향력이 큰 지역으로 나타났다. 또한 동래구의 수안동 지역은 '기반시설 면적' 변수의 영향이 큰 것으로 나타났다. '기반시설 면적' 요인에 의한 피해지역은 동래구와 부산진구, 동구, 해운대구가 영향력이 크게 나타났으며, '시가화 면적' 요인에 의해서는 사상구 일부와 동래구, 부산진구, 동구, 중구가 영향력이 높게 나타났다. '불투수지 면적' 요인에 의해서는 부산진구, 동구, 동래구, 해운대구에서 영향력이 높게 나타났다.

이러한 위험요인으로 볼 때 강서구와 사상구는 자연적 요인에 의해 자연재해 피해액이 증가하는 것으로 분석되었으며, 동구와 동래구, 부산진구, 중구, 해운대구는 인위적 요인에 의한 피해액이 증가하는 것으로 나타났다. 이를 정리하면 Table 6과 같다.

V. 결론

본 연구는 도시홍수재해 피해지역의 효율적인 방재계획을 수립하기 위해 홍수피해의 지역적 공간 영향력을 분석하여 지역별 도시홍수의 재해 유형을 분

류하고자 하였다. 홍수 피해액에 내재한 공간적 특성을 분석하기 위한 목적으로 GWR 모형을 사용하였고, 이를 통해 도시홍수재해 위험요인이 피해지역별로 각각 다른 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 자연적 위험요인이 피해액을 가중시키는 피해지역으로 강서구가 나타났고, 인위적 위험요인이 피해액을 가중시키는 피해지역은 동구, 동래구, 부산진구, 중구, 해운대구로 분석되었다.

본 연구에서 수행된 분석결과에 기초하여 현 방재계획이나 풍수해저감종합계획의 수립이 효율적으로 이루어지기 위해서는 다음과 같은 개선 사항이 필요하다. 첫째, 도시홍수 위험요인이 피해지역별로 다른 영향을 미치는 공간적 특성을 반영하여 방재계획을 수립하는 것이 필요하다. 즉, 피해지역에 대해 공간적 영향력 분석을 바탕으로 다방면의 위험요인을 고려하여 가장 효과적인 대응방안 및 방재계획을 수립해야 한다. 자연적 요인으로 인한 내수침수의 피해가 예상되는 하천 부근이나 저지대 지역에는 지반고 상승, 배수 펌프장 시설 확충 등의 구조적인 대책뿐만 아니라 인구 및 시설이 밀집되지 않도록 토지이용계획을 수립하고 하천변에 완충지대를 조성함으로써 방재녹지축으로 기능할 수 있도록 하는 비구조적 대책도 요구되며 개발을 제한하거나 재해위험을 감안한 방재계획을 수립해야 할 것이다. 또한 도시지역에

서 상승침수의 우려가 있거나 인구 및 시설의 입지 제한이 필요한 곳은 시가화용지로의 사용을 지양하는 등의 도시계획적 수법으로 방재력을 강화하는 방법을 도모해야 할 것이다. 침수로 이어지는 집중호우나 태풍과 같은 풍수해는 불규칙적으로 발생하면서 꾸준히 피해를 발생시키므로 사후대책보다는 방지를 위한 방재 인프라 정비 등 선방재계획으로 도시 자체가 갖는 방재력을 강화해야 할 필요가 있다.

둘째, 자연재해의 공간적 영향력을 감안했을 때 행정구역 경계는 실로 무의미할 수 있다. 자연재해의 영향 범위는 행정구역별로 다르게 나타나는 것이 아니라 국지적인 지역 특성의 영향을 크게 받기 때문에 공간적 특성을 고려하지 않는 일반적인 통계모델로 영향력을 추정하는 경우 행정구역별로 집계된 데이터를 사용함으로써 현실을 반영하는 데 한계가 존재할 수밖에 없다. 따라서 GWR과 같이 인접한 공간적 특성을 고려하여 서로 다르게 분포하는 지역적 공간 특성을 반영할 수 있는 모델의 적용이 필요하겠다. GWR은 변수들 간의 관계를 추정하는 회귀계수가 지역 간에 서로 다르다는 전제 하에 국지적 차원에서 회귀계수를 추정하므로 공간적 위치에 따른 차이를 고려함으로써 자연재해와 같이 해당 지역의 공간적 특성을 반영해야 하는 경우 추정의 정확도를 높일 수 있다는 점에서 자연재해 연구 활용에 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

하지만 본 연구는 다양한 재해위험요인을 고려하지 못하고 도시홍수재해에 관련한 결과만 도출하여 피해지역에 대한 다양한 공간적 특성을 고려하지 못한 한계가 있다. 앞으로 다양한 재해를 활용한 공간적 특성 분석이 이루어져야 할 것이고, 다양한 위험요인을 고려함으로써 더 신뢰도가 높은 결과 값을 도출하여 방재계획에 반영되어야 할 것으로 판단된다. 부산광역시시의 경우 개항과 한국전쟁 이후 급격한 인구유입으로 인하여 도시 공간구조를 고려하지 않은 채 도시화가 이루어졌으며, 이로 인하여 녹지의 질적, 양적 부족으로 시민 생활환경의 질 저하와 인공적 시설물에 대한 과다 투자로 자연재해에 대한 도시 방재 대책이 미비한 것으로 지적되고 있다(부산광역시, 2030 부산도시 기본계획 보고서). 이러한 특성과

더불어 해양도시라는 지리적 환경을 감안한 위험요인 변수들을 추가하여 태풍이나 해수면 상승 등 해안 지역에 취약한 자연재해에 대하여도 자세한 분석이 보완되어야 할 것이다.

또한 침수지역의 공간적 특성을 분석하기 위하여 사용된 변수들에도 한계가 존재한다. 예를 들어, 도시 홍수피해의 경우 배수시설의 조건 등이 매우 중요한 요소이나 명확한 공간적 연관관계를 규명하지 못하여 다른 변수로 대체한 한계가 있다. 따라서 보다 정확한 공간적 영향력을 도출하기 위해서는 지역적 특성을 반영할 수 있는 다양한 변수를 모델에 적용하여 지역적 공간특성을 분석하여야 공간 정책적 시사점을 밝힐 수 있을 것으로 사료된다.

그럼에도 불구하고, 본 연구는 향후 도시홍수재해에 관한 방재계획 수립에 주요한 위험요인들을 정량적으로 분석하여 그 영향력을 도출하였고, 이를 통해 자연재해의 효과적 대응방안을 세우기 위해서는 지역별 위험요인의 공간적 특성을 반영해야 한다는 기초자료를 제공했다는 점에서 의의가 있다고 하겠다.

사 사

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A1A2004197).

참고문헌

- 강상준, 정주철, 2012, 수해지 분포 특성에 관한 연구: 경기도 사례를 중심으로, 대한토목학회 논문집, 32(5D), 507-517.
- 강석진, 박정은, 이경훈, 2008, 홍수피해저감 및 예방을 위한 비구조적 대책과 지구단위계획간 연계방안 연구, 대한국토·도시계획학회 추계학술대회 논문집, 1019-1027.
- 강정은, 이명, 2012, 퍼지모형과 GIS를 활용한 기후변화 홍수 취약성 평가-서울시 사례를 중심으로, 한국지리정보학회지 15(3), 119-136.
- 국립방재교육연구원 방재연구소, 2010, 도시 내수

- 침수해석기법의 방재활용 방안.
- 김보경, 장대원, 장남, 양동민, 2011, 기후변화를 고려한 도시홍수 위험요인 도출, 한국위기관리논집, 7(1), 125-142.
- 서경천, 2003, 부동산 가격 추정에 있어서 비모수적 헤도닉 방법을 도입한 공간적 변동성 측정: 부산광역시 서부산권을 중심으로, 한국지역개발학회지, 15(2), 183-204.
- 소방방재청, 2011, 도시홍수 위험성 평가 및 통합관리방안 개발, 자연재해저감기술개발사업단 연구보고서.
- 심우배, 왕광익, 이범현, 이문원, 문채, 2008, 재해에 안전한 도시조성을 위한 방재도시계획 수립방안 연구, 국토연구원 연구보고서.
- 여창진, 서근순, 송재우, 2011, GIS를 이용한 도시홍수에 대한 지역안전도 평가, 한국지리정보학회지, 14(3), 68-77.
- 이희연, 심재현, 2011, GIS 지리정보학, 법문사, 404-430.
- 장대원, 2010, 홍수방어대안 선정을 위한 위험관리지수의 개발 및 적용, 인하대학교 박사 학위논문.
- 장옥재, 김영오, 2009, 지역회귀분석을 이용한 홍수피해위험도 산정, 한국방재학회논문집, 9(4), 71-80.
- 전병운, 2011, 환경적 형평성과 도시 삶의 질의 공간적 관계에 대한 탐색, 한국지리정보학회지, 14(3), 223-235.
- 최돈정, 서용철, 2012, 장수의 환경생태학적 요인에 관한 지리가중회귀분석, 한국지형공간정보학회지, 20(3), 57-63.
- 최충익, 2003, 도시적 토지이용의 변화가 도시의 자연재해 취약성에 미치는 영향에 관한 연구: 경기도를 사례로, 국토계획, 38(2), 35-48.
- 최충익, 2004a, 패널모형에 의한 도시지역 수해결정요인 분석, 국토계획, 39(7), 49-67.
- 최충익, 2004b, 도시화에 따른 수해 취약성에 관한 실증분석: 경기도 패널데이터를 활용하여, 국토연구, 42, 17-37.
- 허윤경, 이주영, 2009, 울산의 도시공간구조 변화 분석: 1995-2005 인구밀도 · 고용밀도 · 지가를 중심으로, 국토계획, 44(2), 111-121.
- Brunsdon, C., Fotheringham, A. and Charlton, M., 1996, Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity, *Geographical Analysis*, 8(4), 281-297.
- Fotheringham, A. S., Brunsdon, C. and Charlton, M., 2002, *Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships*, England: Wiley.
- Sa, A. C., Pereira, J. M., Charlton, M., Mota, B., Barbosa, P. M., and Fotheringham, A. S., 2011, The pyrogeography of sub-Saharan Africa: a study of the spatial non-stationarity of fire-environment relationships using GWR, *Journal of geographical system*, 13, .227-248.
- 부산광역시청: <http://www.busan.go.kr>
- 부산시 재난안전대책본부: <http://www.bangjae.busan.go.kr>