

도시개발 패턴이 자연재해 피해에 미치는 영향: 경관지수를 이용하여*

The Impact of Urban Development Patterns on Natural Disaster Damages

강승원** · 이달별*** · 정주철****

Seungwon Kang · Dalbyul Lee · Juchul Jung

요약: 본 연구는 도시화가 자연재해 피해에 미치는 영향을 실증하기 위해 경관생태학적 접근을 시도하였다. 도시화가 경관변화를 통해 자연재해 피해를 증가시킨다는 점에 주목하여, 도시화에 의한 경관변화를 포착하는 경관지표가 자연재해에 미치는 영향을 공간 회귀분석을 통해 통계적으로 평가하였다. 연구 결과 시가화지역 패치의 크기, 개수, 면적지수와, 집합, 응집지수 등이 유의하게 나타났다. 이는 시가화지역의 개수가 많거나, 시가화지역 간 거리가 멀수록 자연재해 피해가 증가하는 것으로 해석될 수 있으며, 본 연구 결과를 보았을 때, 도심의 밀도를 높이는 고밀개발을 지향하면서 도시 외곽은 개발을 억제하여 보존하는 정책을 수립하여 자연재해 피해를 완화할 수 있도록 각 지자체의 노력이 필요하다.

핵심주제어: 도시화, 자연재해, 경관지수, 토지피복패턴, 공간회귀분석

Abstract: Using a landscape ecological approach, this study analyzed the impact of urbanization on damages caused by natural disasters. We used a spatial regression analysis, based on the theory that urbanization increases natural-hazard disaster damage by causing landscape changes in patches of built-up cover. Our analysis showed that the size, number, area index, and aggregate cohesion index of built-up cover were statistically significant with damages caused by natural disasters. Based on the results of this study, local governments should mitigate damages caused by natural disasters by establishing policies that suppress urban sprawl and by proposing more compact cities that increase the density of built-up areas.

Key Words: Urbanization, Natural Disasters, Landscape Index, Land Cover Patterns, Spatial Regression Analysis

* 본 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 성과입니다(NRF-2016R1D1A1B03935330).

** 주저자, 부산대학교 도시공학과 박사과정

*** 공동저자, 동의대학교 소방방재행정학과 조교수

**** 교신저자, 부산대학교 도시공학과 교수

I. 서론

본 연구의 목적은 도시화가 야기하는 개발패턴과 자연재해 피해 간의 관계를 분석하는 것이다. 도시화는 불투수면적을 증가시키거나 자연적 배수를 담당하는 토지를 감소시키는 토지형질의 변화를 야기하며(Lundgren, 1999), 이는 자연재해에 대한 노출의 증가로 이어진다. 그리고 이 과정에서 경관변화가 발생하게 된다. 경관생태학적으로 도시화는 서식지 파괴와 파편화를 유발하며, 모양(pattern)을 나타내는데, 이를 경관패턴(landscape pattern)이라 한다. 본 연구는 도시화가 특정 경관패턴을 나타내는 경관변화를 통해 자연재해에 노출된다는 것에 주목하였다. 최근 국내에서는 도시화로 인하여 토지피복이 지속적으로 변화하고 있다. 토지피복 변화추이를 보면 국내 시가화·건조지역은 1980년대 2,133 km²에서 2000년대 4,155 km²로 약 95% 증가한 반면, 농업지역은 23.6%에서 21.1%로, 초지는 3.8%에서 2.9%로, 습지는 0.9%에서 0.3%로 각각 감소하였다(환경부, 2014). 위와 같이 토지피복이 지속적으로 변화함에 따라 자연재해에 대한 노출은 증가하고 있다. 국내에서는 현재 도시화가 자연재해 피해에 미치는 영향을 실증하는 연구가 많이 진행되고 있으며(최충익, 2003, 2004, 2010; 김보경 등, 2011; 하경준 등, 2017; 이미연 등, 2016;), 도시화에 따른 토지피복의 변화 정도 및 패턴을 분석하는 연구 또한 상당히 진행되고 있다(이상범 등, 2007; 장병관 등, 2011; 임수진 등, 2016). 도시화는 특정 패턴을 나타내는 경관변화를 통해 자연재해에 노출되며, 이는 자연재해 피해로 이어지지만, 지금까지 자연재해에 대한 도시화의 영향을 연구한 국내 연구들은 경관패턴을 고려하지 않았으며, 도시화가 야기한 경관패턴을 측정하려 시도했던 국내 연구들은 이를 자연재해와 연결시키지 못했다. 지금과 같은 추세로 광범위하고 관리되지 않은 도시개발의 확산으로 인해 토지피복이 지속적으로 변화한다면, 국내 자연재해 피해는 더욱 증가할 것이다. 따라서 기존 선행연구들의 논의에서 추가로 도시화가 야기한 토지피복 패턴의 변화를 분석하여, 특정 토지피복의 어떠한 특징이 자연재해 피해를 증가시킨다는

것을 파악할 수 있다면 도시화에 따른 자연재해 피해를 저감시킬 수 있는 구체적인 방안을 마련할 수 있을 것이며, 본 연구는 이러한 추가논의에 대한 필요성의 인식에서 시작되었다.

II. 이론적 고찰 및 선행연구

1. 도시화가 자연재해 피해에 미치는 영향에 대한 고찰

도시화는 전 세계적인 추세이지만, 문제는 그 과정에서 여러 도시문제가 발생한다는 점이다. 도시화가 야기하는 문제점 중 하나로 자연재해 피해의 증가를 꼽을 수 있다. Lundgren(1999)은 도시화가 자연재해 피해에 미치는 영향을 두 가지 측면으로 설명하였다. 첫 번째로 도시화는 불투수면으로 뒤덮이는 토지표면의 비율을 증가시키면서 자연재해 피해에 영향을 미친다는 것이고, 두 번째는 자연적 배수기능을 가지는 토지피복을 감소시키면서 자연재해 피해에 영향을 미친다는 것이다. 본 연구에서는 도시화가 자연재해 피해에 영향을 미치는 두 가지 메커니즘 중 불투수면과 관련된 토지피복의 변화에 초점을 맞추고자 한다. 불투수면의 증가라는 메커니즘을 통해 도시화가 자연재해 피해에 영향을 미친다는 논의는 국내외 여러 연구에서 증명되고 있다. 최충익(2003)은 도시 내 불투수층 면적을 차지하는 대지·도로, 공장용지, 학교용지 등을 합하여 도시적 토지이용 면적이 도시의 자연재해 피해에 주는 영향에 대해 분석하였는데, 도시적 토지이용 면적이 1 ha 증가할 때, 자연재해 피해액은 평균적으로 75.9% 증가함을 확인하였다. 또한 하경준·정주철(2017)은 도시화와 강우량의 영향관계가 지수함수 관계라는 것에 주목하며, 불투수면적이 증가함에 따라 도시홍수 피해가 급격히 증가함을 확인하였다. 그밖에, 이미연·홍종호(2016)의 연구에서 불투수면적은 자연재해 총 피해액에 정의 방향으로 유의한 변수로 나타났으며, 불투수면적이 1% 증가할 때, 자연재해 총 피해액은 1.27% 증가함을 확인하였다. 마지막으로 Brody et al.(2008)의 연구

에서도 불투수면이 홍수피해에 상당히 기여하고 있는 것으로 나타났다. 위 선행연구들을 종합해보면, 불투수면적은 자연재해 피해에 상당히 영향을 미치고 있는 것으로 해석되어지며, 이를 통해 도시화는 토지피복을 변화시키는 과정에서, 불투수면의 증가를 통해 자연재해 피해를 증가시킨다는 본 장의 논의가 입증될 수 있음을 확인하였다.

2. 도시화 및 자연재해 피해에 대한 경관생태학적 접근

본 연구의 목적 달성을 위해서는 도시화가 야기하는 토지피복의 변화 양상을 파악해야 하며, 이는 경관생태학적으로 접근할 수 있다. 경관생태학은 인간과 자연을 연결시켜 토지변형과 단편화에 따른 생태계의 역동성을 강조하여 토지이용정책에 현실적인 대안을 제공하기 때문에(정흥락 등, 2003), 본 연구의 목적에 부합하는 접근법이라 여겨진다. 경관생태학에서 토지피복의 변화는 경관패턴을 통해 설명되어진다. 경관패턴은 경관요소의 병렬 또는 패치의 수와 크기, 면적, 주연부의 길이, 분산정도를 의미하며(Gardner et al., 1987), 경관지수(landscape index)를 통해 측정될 수 있다. 연구자는 경관지수를 통해 해당 지역 특정 토지피복의 분포와 면적, 기하학적 모양 등을 평가하여 시간에 따른 변화된 토지피복의 양상을 파악할 수 있고, 도시화의 정도를 측정할 수 있다(임수진·김감영, 2016).

최근 경관지수를 활용하여 여러 연구자들이 도시 확산에 관한 연구를 진행하였다(Ji et al., 2006; Furberg et al., 2008; Yue et al., 2013; Aithal et al., 2016; 임수진·김감영, 2016). 이들은 여러 경관지수를 계산하여 경관의 분절화 정도를 파악하였고, 이를 통해 도시 확산의 정도를 측정하려 하였다. Ji et al.(2006)은 도시의 토지변화패턴을 파악하기 위해 미국 캔자스시티(Kansas City)를 여러 구역으로 나누어 경관지수를 통해 패치밀도, 집합 정도를 계산하였고, 연구 결과 지수 값이 큰 구역일수록 스프롤 현상이 심하게 진행되고 있음을 확인하였다. Furberg et al.(2008)은 캐나다 토론토 지역의 토지피복변화, 특히 도시 스프롤 현상의 범위와 파편화의 정도를 패치의 개수나 크기, 패치 간 거리를 나타내는 지수들을 사용하여 측정하였

고, 연구 결과 해당 지역에서 스프롤 현상이 발생하였음을 확인하였다. Yue et al.(2013)는 중국 항저우시를 대상으로 최대패치지수와 다양성지수를 사용하여 스프롤 현상의 정도를 측정하였다. 연구 결과 항저우시 외곽지역에서 파편화가 상당히 진행되었음을 확인하였다. Aithal et al.(2016)은 인도 첸나이시를 대상으로 도시성장에 따른 스프롤 패턴이 도심과 외곽지역의 생태환경에 미치는 영향을 파악하기 위해 시가지지역의 패치개수, 패치밀도, 집합, 응집도 등을 나타내는 지수들을 사용하였다. 연구결과 도심에서 도시 외곽으로 갈수록 시가지지역 패치의 산발적 패턴이 나타나는 경향을 보였으며, 농지 및 산림지역 비율이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 임수진·김감영(2016)은 수도권 도시 스프롤 양상의 시공간적 변화 특성을 파악하고자, 패치유형별 면적, 다양성, 개수, 집합, 형태 등을 나타내는 지수들을 사용하였다. 연구결과 수도권의 스프롤 양상은 1980년대 말 이후부터 지속적으로 심화되기 시작하였으며, 권역별, 시군구별로 스프롤 현상이 상이하게 나타났음을 확인하였다. 정리하자면, 위 선행연구들은 도시 확산을 측정하기 위해 패치의 면적, 패치의 기하학적 복잡성, 패치유형 간 상이함의 정도, 패치유형이 군집된 정도, 패치유형의 구성 등의 공간 속성을 측정하려 시도하였으며, 이와 관련된 경관지수를 사용하였다.

위 논의의 선행연구들을 통해 경관지수를 이용한 도시 확산 정도의 측정이 가능함을 알 수 있었다. 위 연구들이 경관지수가 나타내는 경관패턴의 해석에만 집중한 반면 Brody et al.(2017)는 주로 공간구조를 파악하는데 그쳤던 선행연구들과 달리 자연재해 연구에 경관지수를 활용하였다. 이 연구는 오픈스페이스가 홍수피해 저감을 위한 토지이용 전략으로 사용될 수 있음을 검증하기 위해 걸프만 연안 오픈스페이스의 면적(Area), 모양의 복잡성(Shape), 집합(Aggregation)등의 공간속성을 파악할 수 있는 경관지수를 사용하였다. 분석 결과 오픈스페이스의 미개발된 자연발생 패치의 공간적 패턴이 홍수 손실에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 따라서 위 선행연구를 통해 경관지수를 이용하여 자연재해 피해 영향의 측정이 가능함을 알 수 있었다.

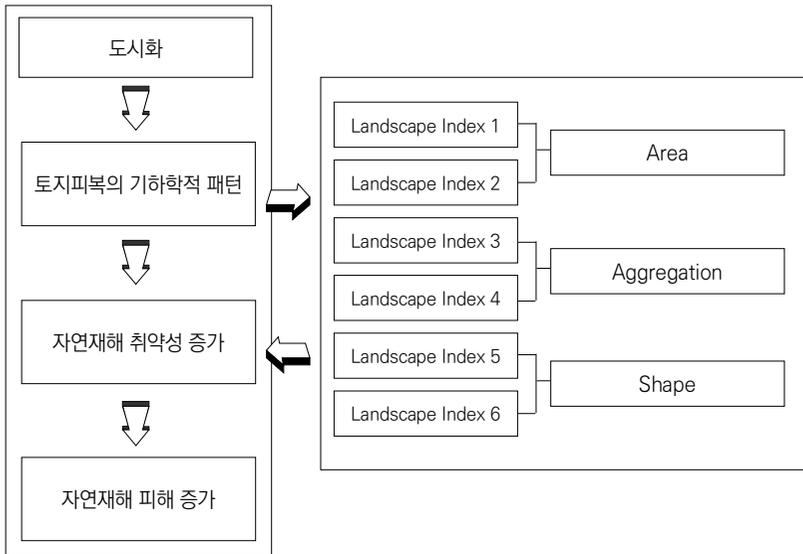
III. 연구가설 및 연구설계

1. 연구의 개념적 틀 및 연구가설

이론적 고찰 및 선행연구 분석을 통해 도출된 논의를 종합해보면 첫째 도시화는 불투수면을 증가시키거나 자연적 배수기능을 가지는 토지의 감소 등으로 토지피복을 변화시킴으로써 자연재해 피해를 발생시키며, 최근 국내에서 도시면적이 지속적으로 증가하는 추세에 있다. 둘째, 경관생태학적인 관점에서 도시화는 특정 모양(pattern)을 나타내는 경관변화를 야기한다. 이러한 모양은 경관지수를 통해 측정되어 질 수 있으며, 경관지수는 자연재해 피해 영향을 파악하는데 이용될 수 있다.

위 논의를 바탕으로, 본 연구에서는 <그림 1>과 같은 개념적 틀을 설정하였다.

<그림 1> 본 연구의 개념적 틀



“도시화는 자연재해에 대한 취약성을 증가시키는 기하학적인 개발패턴을 발생시키며, 이는 자연재해 피해의 증가로 이어진다.”

본 연구는 앞서 설정한 개념적 틀에서 제시되었듯이 도시화가 야기하는 시가화지역의 개발패턴이 자연재해 피해에 영향을 미침을 검증하는데 그 목적이 있다. 따라서 인간이 야기한 개발이 결국 자연재해에 대한 취약성을 가중시킨다는 점을 인식시키기 위한 개념적 틀을 검증하기 위해 연구가설1을 다음과 같이 설정하였다.

- 연구가설1:

“도시화가 야기한 시가화지역의 경관패턴은 자연재해 피해를 증가시킬 것이다.”

시가화지역의 개발패턴은 경관지수를 통해 측정되어질 수 있다. 본 연구에서는 사용될 경관지수를 여러 유형으로 나누고 각 유형에 따라 자연재해 피해가 어떻게 달라지는지 파악하고자 하였다. 경관지수 유형은 압축도시와 스프롤의 특징을 반영하여 도시의 형태, 집합, 모양의 복잡성으로 설정하였다. 압축도시는 도심의 밀도가 높은 형태로 나타나야 하며, 스프롤은 각 생활권 간 거리가 긴 형태를 나타낸다. 이를 반영하여, 시가화지역 패치의 면적, 크기 등을 나타내는 도시의 형태 유형과 시가화지역 패치의 개수, 밀도, 패치간 거리 등을 나타내는 도시의 집합유형을 설정하였다. 또한 스프롤은 비지적 개발(leapfrog development), 산발적 개발(scattered development)의 형태를 나타내는데, 이를 반영하기 위해 시가화지역 패치의 연속성, 형태 등을 나타내는 도시 모양의 복잡성 유형을 설정하였다. 본 연구는 압축도시와 스프롤의 특징을 반영한 각 경관지수 유형이 자연재해 피해에 영향을 미침을 증명하기 위해 연구가설1을 세분화 한 연구가설1-1, 연구가설1-2, 연구가설1-3를 추가로 설정하였다.

- 연구가설1-1:

“시가화지역의 면적과 크기가 증가할수록 자연재해 피해가 증가할 것이다.”

- 연구가설1-2:

“시가화지역의 개수, 밀도, 거리가 증가할수록 자연재해 피해가 증가할 것이다.”

- 연구가설1-3:

“시가화지역의 연속성이 크고 형태가 불규칙 할수록 자연재해 피해가 증가할 것이다.”

2. 연구설계

본 연구의 목적은 도시화가 야기한 개발패턴을 경관지수로 유형화하여, 각 개발유형이 자연재해 피해에 미치는 영향을 실증하는 것이다. 경관구조 요소들의 공간적 분포와 패턴은 해당 데이터의 위치정보와 속성정보가 지는 공간적 관계를 고려하여 통계적으로 계량화할 수 있다(이동근 등, 2011). 본 연구는 가설을 검증하기 위한 방법론으로 공간회귀분석을 사용하였다. 본 연구의 데이터와 같이 공간을 기반으로 하는 데이터들은 공간에 무작위로 분포하지 않고, 서로 상호의존적인 특징을 가진다. 이를 공간자기상관(spatial autocorrelation)이라고 하는데, 이는 전통적인 회귀분석으로는 통제되지 못하기 때문에 공간회귀분석 모델을 사용한다(김광구, 2003). 본 연구에서는 GeoDa 프로그램을 이용하여 공간회귀분석을 실시하였다. 공간회귀분석에 앞서 본 연구는 공간자기상관의 탐색을 위해 먼저 Moran's I 검증을 실시하였다. 공간회귀분석을 사용하기 위해서는 공간 데이터가 공간자기상관을 가지고 있다고 판명되어야 한다. 공간자기상관의 존재가 확인되었다면, 공간자기상관의 통제를 위해 공간가중치 매트릭스를 구축하여야 하며 본 연구는 퀸(queen) 인접 정의를 사용하여 공간가중치 행렬(spatial weights matrix)을 구축한 후 공간회귀모델을 사용하였다. 구축된 공간정보를 회귀 분석하기 위해서는 일반적으로 공간오차모델(spatial error model, SEM), 공간시차모델(spatial lag model, SLM)을 사용한다(장윤정 등, 2009). 본 연구에서는 Moran's I 검증 시 로버스트 라그랑지 승수검정(Robust LaGrange Multiplier test)을 실시하였으며, 검정결과 공간오차모델과 공간시차모델 중 적합하다고 판명된 모델을 사용

하였다.

본 연구의 가설을 검증하기 위한 연구의 종속변수는 자연재해 피해이며, 독립변수는 시가화지역 토지피복의 경관패턴이다. 종속변수인 자연재해 피해 데이터는 행정안전부에서 제공하는 호우피해액을 사용하였다. 그 이유는 첫째, 자연재해 중 호우가 국내 대부분 지역에서 피해를 발생시켰고, 국내에서 가장 흔하게 발생하는 재해이기 때문이며, 둘째, 토지피복의 경관패턴과 가장 연관 있는 재해가 호우이기 때문이다. 오픈스페이스의 재해저감 효과를 파악하기 위해 경관지수를 사용한 Brody et al.(2017) 역시 여러 자연재해 중 홍수를 선택하였으며, 앞서 토지이용과 관련된 독립변수를 사용한 선행연구들 역시 수해에 미치는 영향을 살펴보았기 때문에(최충익, 2003, 2004, 2010; 김보경 등, 2011; 하경준·정주철, 2017; 이미연 등, 2016) 본 연구에서 자연재해 피해의 데이터를 호우피해액으로 선정하였다.

독립변수인 시가화지역의 경관패턴 데이터는 환경공간정보서비스에서 제공하는 대분류 토지피복지도를 가공한 후 FRAGSTATS를 이용하여 산출한 경관지수를 사용하였다. 환경공간정보서비스의 대분류 토지피복지도는 시가화·건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지(수변식생), 나지, 수역 등 총 7개의 토지피복유형을 포함하며, 각 토지피복 유형마다 고유 분류코드를 가지고 있다. 그중 사가화지역을 추출하여 사용하였다. 경관패턴을 분석하기 위한 FRAGSTATS의 경관지수는 도시화의 정도를 측정하기 위해 경관지수를 사용하였던 국내외 선행연구를 분석한 후, 대다수의 선행연구에서 널리 사용된 지수들을 선별하였다, 또한 본 연구의 가설 검증을 위해 적합한 지수를 추가로 선별하였다. 최종적으로 선별된 지수는 <표 1>과 같다.

〈표 1〉 최종 선별 경관지수

경관지수	선행연구	특징
Mean Patch Size(Area) 평균패치크기	1, 6	특정 토지피복 유형에 대한 평균 패치 크기
Number Patches(NP) 패치개수	1, 4, 5, 6	지역 내 주어진 토지피복 유형에 대한 패치 총 개수
Patch Density(PD) 패치밀도	1, 2, 6	NP/지역면적, 패치 수를 면적으로 나눈 값
Percent Landscape(PLAND) 면적백분율	1,	토지 피복 유형별 면적 점유율
Largest Patch Index(LPI) 최대패치지수	1, 2, 3, 5	큰 크기를 가진 패치의 백분율
Euclidean Nearest Neighbor(ENN) 유클리드최근접거리지수	1	동일 피복 유형의 한 패치에서 다른 패치까지의 최단 거리
Contiguity(CONTIG) 연속성지수	1	그리드 셀 패치 내에서의 셀의 공간적 연결성
Cohesion(COHESION) 응집지수	1,	해당 패치의 물리적 연결성
Aggregation Index(AI) 집합지수	2, 4	패치들이 인접하여 분포하는 정도
Class Area(CA) 패치유형면적지수	4, 6	특정 패치유형 총 면적
Shape Index(SHAPE) 형태지수	4, 6	패치유형 형태의 불규칙한 정도

1. Brody et al.(2017) 2. Ji et al.(2006) 3. Yue et al.(2013)

4. 임수진·김감영(2016) 5. Aithal et al.(2016) 6. Furberg and Ban(2008)

본 연구는 종속변수와 독립변수 사이에서 관계에 영향을 미치는 제 3의 변수를 확인하고 그 영향을 제거하기 위해 통제변수를 선별하였다. 종속변수와 독립변수 간 인과관계를 규명하고자 할 때 외재적 변수가 종속변수에 미치는 영향을 제거하지 못하면 독립변수와 종속변수간의 인과관계는 파악하기가 어렵고 이는 내적 타당성의 저하로 이어지기 때문이다(남궁근, 2013). 본 연구는 도시화와 자연재해 피해 간의 관계를 규명한 선행연구들을 분석하여, 선행연구들에서 재해 피해를 일으키는 위험요인으로 사용된 변수들 중 유의성이 높게 나타나거나 가중치가 높게 할당되었는지를 바탕으로 통제변수를 선별하였다. 본 연구에서 최종 선별된 통제변수

는 강우량, 인구밀도, 취약인구(5세 미만, 65세 이상), 재정자립도이다.

본 연구의 분석 단위는 시·군·구이며, 공간적 범위는 전국 시·군·구 260개(행정안전부 2019 지방자치단체 행정구역 현황 기준) 중 데이터의 한계와 방법론의 이유로 추려진 182개의 시·군·구이다. 독립변수를 위해 필요한 데이터인 대분류 토지피복도중 접경지역은 환경공간정보 보안관리 규정 제13조(공간정보의 공개 및 활용)에 의거하여 공개가 제한되어 있기 때문에 접경지역에 해당되는 시·군·구를 일차적으로 제거하였다. 또한 종속변수인 호우피해액 데이터를 제공하는 재해연보의 시·군·구 단위와 대분류 토지피복도 상의 시·군·구 단위가 서로 불일치하여, 단위를 일치시키는 작업으로 시·군·구가 이차적으로 제거되었다. 마지막으로 본 연구에서 사용되는 공간회귀분석은 서로 인접한 공간상의 데이터를 분석하는 모델이기 때문에 섬에 위치하거나 인접하지 않은 시·군·구를 추가로 제거하여 최종 182개의 시·군·구를 본 연구의 공간적 범위로 선정하였다. 본 연구의 시간적 범위는 전국단위로 제공된 대분류 토지피복도 중 가장 최신 데이터인 2000년대 말(2008~2010년)을 기준으로 하였고, 이에 맞추어 각 년도 별 통제변수의 데이터들을 평균하여 사용하였다.

IV. 연구변수의 공간적 특성 탐색

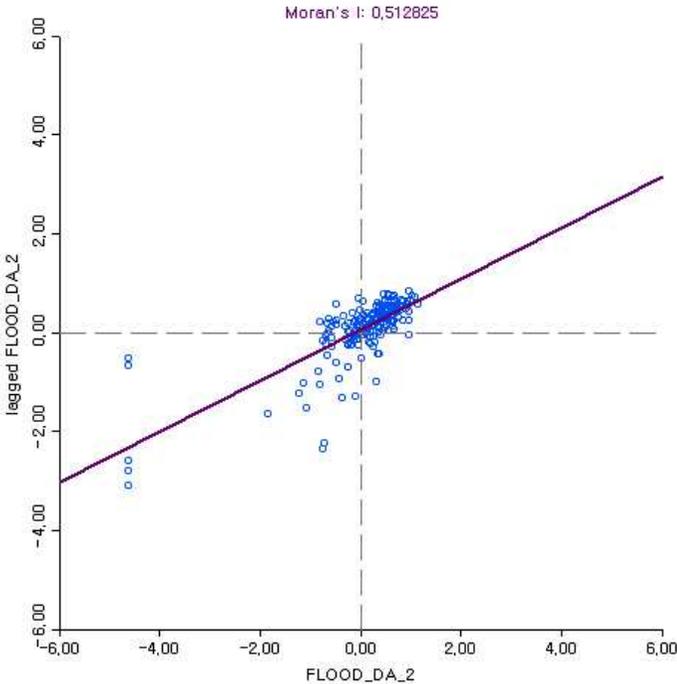
본 연구는 가설을 검증하기 위한 방법론으로 공간회귀분석을 사용하였다. 공간회귀분석과 같이 공간단위에 대한 공간자료의 분석에서 연구자는 공간적 의존성과 공간적 이질성에 대해 주의하여야 한다(LeSage, 1999). 공간적 의존성은 변수의 값이 공간단위들 간에 서로 관련되어 있는 것을 의미하며, 이러한 상호의존성 및 상호작용을 공간자기상관이라 한다. 공간회귀분석을 실시하기 위해서는 이러한 공간자기상관의 존재가 탐색되어야만 한다. 공간자료는 공간적 의존성을 가지기도 하지만 공간적 이질성을 가지기도 한다. 공간적 이질성은 변수의 값이 공간단위들 사이에 불

균등하게 분포되어 있는 것을 의미하며, 이는 공간단위들이 가지는 고유한 지리적 특성으로 인해 발생한다(이석환, 2014). 공간적 이질성은 회귀 분석에서 오차항의 공간적 이분산(heteroskedasticity)이나 회귀계수가 공간단위별로 변하는 문제를 발생시키기 때문에(이석환, 2014), 본 연구에서는 공간적 이질성 문제를 보정한 후 분석을 수행하였다.

1. 공간적 의존성 탐색

분석을 수행하기 전 공간적 의존성을 탐색하기 위해 Moran's I 통계량 검증으로 공간자기상관을 파악하고 국지공간자기상관지표(local Indicators of spatial association, LISA)를 통해 공간자기상관을 시각화하였다. Moran's I 통계량 검증 결과는 <그림 2>와 같다.

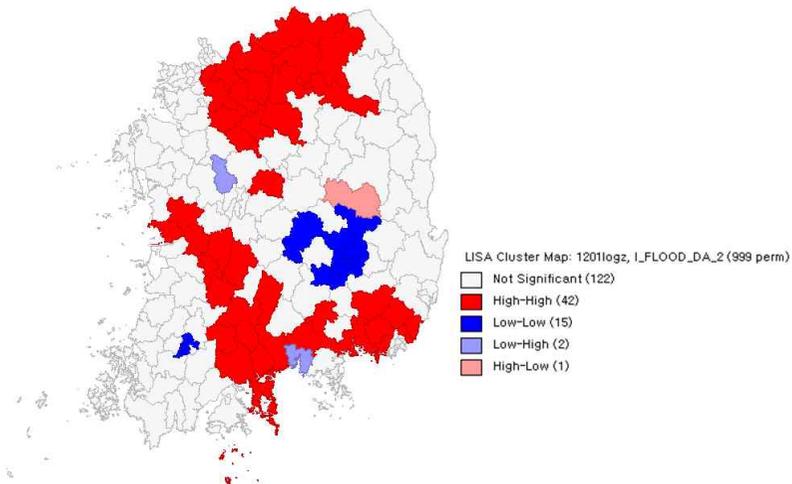
<그림 2> Moran's I 검증 결과



산출되는 Moran's I 계수는 -1인 부적 공간자기상관에서 +1인 정적 공간자기상관까지의 값을 가지는데, 0에 가까울수록 약한 공간적 자기 상관을 가지고 있다고 볼 수 있다(김광구, 2003). 본 연구의 종속변수인 2008년에서 2017년까지의 호우피해액의 평균은 Moran's I 지수가 0.5128로 나타나 강한 공간적 자기상관을 가지고 있는 것으로 나타났다.

공간자기상관 시각화를 위한 LISA군집도는 <그림 3>와 같다. LISA지수는 연구 대상지 내의 특정 지역들이 전체의 공간적 자기상관성에 얼마나 영향을 미치고 있는지에 대한 시각적 지표이며, LISA를 통해 변수의 공간 자기상관이 특정 지역에서 높게 나타나는 핫스팟(hot spot)을 찾을 수 있다(김광구, 2003). <그림 3>에서 빨간색으로 표시된 지역은 High-High 유형으로 높은 값을 가지는 지역이 군집해서 나타나며, 파란색으로 표시된 지역은 Low-Low 유형으로 낮은 값을 가지는 지역이 군집해서 나타난다. 하늘색으로 표시된 지역은 Low-High 유형으로 해당 지역은 낮은 값을 가지나 주변 지역이 높은 값을 가짐을 나타내며, 마지막으로 분홍색으로 표시된 지역은 High-Low 유형으로 해당 지역은 높은 값을 가지나 주변 지역이 낮은 값을 가짐을 나타낸다.

<그림 3> LISA 분석 결과



2. 공간적 이질성의 보정

공간적 이질성은 오차항의 공간적 이분산(heteroskedasticity) 교정을 통해 보정하였다. 본 연구에서는 변수의 로그 변환을 통해 이분산을 교정하였다. 로그 변환은 이분산 교정을 위해 실증 계량경제학에서 널리 쓰이는 방법 중 하나로 그 이유는 로그 변환으로 인해 변수들의 측정단위가 축소됨으로써 두 값 사이의 차이를 10배에서 2배로 줄이기 때문이다 (Gujarati, 2009). 종속변수와 독립변수들 간의 산점도를 보았을 때 비선형 관계에 있음을 확인하였고, 추후 연구결과 해석의 편의를 위해 본 연구에서는 이중로그모형을 선택하여 로그변환을 수행하였다.

또한 본 연구에서는 이분산 교정 표준오차를 사용하여 이분산을 교정하였다. 이중로그모형으로 변수들을 치환하여 Koenker-Bassett 이분산 검정을 하였고, 그 결과 이분산이 다소 교정되었으나, 몇몇 변수들이 유의성 0.05를 넘지 못하였다. 따라서 이분산의 문제를 해결하기 위해 교정 표준오차를 추가로 사용하였다. Gujarati(2009)는 모분산(σ_i^2)을 알 수 없을 때 이분산의 교정 방안으로 White의 이분산 교정 표준오차(robust standard errors)를 소개하고 있다. 이분산이 존재하더라도 OLS추정량의 분산과 공분산에 대한 일치추정량은 구할 수 있으며, White가 개발한 추정치를 통해 모수에 대해 점근적으로 유효한 통계적 추론을 이끌어낼 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 Geoda Space를 이용하여 공간시차모델 분석에는 White 표준오차를 사용하였고, 공간오차모델 분석에는 Kelejian-Prucha HET 표준오차를 사용하였다.

V. 분석 결과

1. 공간회귀모델 분석식

본 연구의 독립변수로 사용된 경관지수들은 수량화되는 동일하거나 유

사한 구조를 측정하기 때문에 통계적으로 상관관계가 높게 나타나는 경우가 많다(Brody et al., 2017). 따라서 독립변수 간 강한 상관관계가 나타나는 다중공선성 문제가 내포되어 있을 가능성이 높다. 경관지수를 독립변수로 사용하였던 Brody et al.(2017)는 다중공선성 문제를 해결하기 위해 공통의 통제 변수들의 세트에 각각의 경관지수를 분리하여 분석식을 구축하였으며, 본 연구 역시 동일한 방법을 사용하였다.

본 연구에서는 Moran's I 검증을 통해 공간자기상관을 확인한 후, 구축된 공간정보를 회귀 분석하기 위해 로버스트 라그랑지 승수검정을 통해 공간회귀모델의 적합도를 파악하였다. 각 분석식마다 검정을 실시하여 공간오차모델과 공간시차모델 중 더 적합하다고 판명된 모델을 사용하였다. 공간시차모델은 공간자기상관을 통제하고자 종속변수를 변수화하여 새로운 설명변수로 회귀모형에 투입하였으며, 식1과 같이 분석식을 설계하였다. 공간오차모델은 공간자기상관을 통제하고자 공간가중행렬을 오차항에 적용하였으며, 식2와 같이 분석식을 설계하였다.

〈그림 4〉 본 연구의 분석식

$$FloodDamage = WFloodDamage + \beta X + \mu \quad (\text{식1})$$

$$\mu = \mu + \epsilon$$

$$FloodDamage_i = \beta X_i + \mu_i \quad (\text{식2})$$

$$\mu_i = \rho W\mu_i + \epsilon$$

2. 분석 결과

〈표 2〉 공간회귀 분석 결과

Type	Variable	Coefficient	z-Statistic
AREA (형태유형)	Class Area(CA)	0.010	0.158
	Largest Patch Index(LPI)	-0.751***	-4.304
	Mean Patch Size(Area)	-0.643***	-3.903
	Percent Landscape(PLAND)	-0.755***	-4.751
AGGREGATION (집합유형)	Number Patches(NP)	0.549***	3.721
	Patch Density(PD)	0.047	1.221
	Euclidean Nearest Neighbor(ENN)	0.087	0.918
	Aggregation Index(AI)	-0.287**	-3.110
SHAPE (모양의 복잡성 유형)	Contiguity(CONTIG)	-0.072	-1.259
	Cohesion(COHESION)	-0.280**	-3.196
	Shape Index(SHAPE)	-0.087**	-2.897

* p < 0.1

** p < 0.01

*** p < 0.001

연구결과는 경관지수의 유형 별로 해석하고자 한다. 먼저 형태 유형은 CA (패치유형면적지수), LPI(최대패치지수), AREA(평균패치크기지수), PLAND (면적백분율지수)가 해당되며, CA는 해당 분석식에서 유의하게 나타나지 않았다. 큰 크기를 가진 패치의 백분율을 의미하는 LPI는 부의 방향으로 유의하게 나타났으며, 분석식은 LPI지수가 1% 증가할 때 호우피해액이 0.75% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 큰 크기를 가진 시가지지역이 증가할수록 호우피해액이 감소하는 것으로 해석할 수 있다. 특정 토지피복 유형에 대한 평균 패치 크기를 의미하는 AREA는 부의 방향으로 유의하게 나타났으며, 분석식은 AREA지수가 1% 증가할 때 호우피해액이 0.64% 감소하는 것으로 나타났다. 다음으로 해당 토지피복의 면적 점유율을 의미하는 PLAND 역시 부의 방향으로 유의하게 나타났으며, 분석식은 PLAND지수가 1% 증가할 때 호우피해액이 0.75% 감소하는 것으로 나타났다. 형태 유형의 분석결과를 보았을 때 시가지지역의 크기나 면적을 나타내는 지수들은 호우피해액과 반대되는 경향을 보임을 확인할 수 있다. 이는 시가지지역의 크기나 면적이 클수록 호

우피해액이 증가할 것이라는 본 연구의 세부가설1-1과 반대되는 결과이다. 시가화지역의 크기나 면적이 크다는 것은 대도시를 의미한다. 대都市는 보통 중소도시보다 도시인프라가 잘 구축되어 있으며, 배수시스템 역시 중소도시보다 잘 구축되어 있을 확률이 높기 때문에, 시가화지역의 크기나 면적이 증가할수록 호우피해액이 감소한다는 결과가 나온 것으로 사료된다.

집합유형은 NP(패치개수지수), PD(패치밀도지수), ENN(유클리드최근접거리지수), AI(집합지수)가 해당되며, PD, ENN은 해당 분석식에서 유의하게 나타나지 않았다. NP지수는 정의 방향으로 유의하게 나타났으며, 분석식은 NP지수가 1% 증가할 때, 호우피해액이 0.55% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 시가화지역의 개수가 많을수록 호우피해액이 증가하는 것으로 해석할 수 있다. AI지수는 부의 방향으로 유의하게 나타났으며, 분석식은 AI지수가 1% 증가할 때, 호우피해액이 0.28% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 시가화지역이 서로 인접하여 위치할수록 호우피해액이 증가하는 것으로 해석할 수 있다. AI지수는 응집도를 나타내기 때문에, 스프롤의 양상을 파악할 수 있는 지수이다. 이 지수의 결과 값을 보았을 때, 스프롤 현상이 나타날수록 호우피해액이 증가하는 것으로 해석할 수 있어 본 연구에서 매우 중요한 의미를 지닌다. 또한 AI지수와 NP지수를 통합하여 해석해 보았을 때 시가화지역의 개수가 더 많고, 더 산발적으로 나타날수록 호우피해가 증가한다는 의미로 해석할 수 있는데, 이는 스프롤이 자연재해 피해를 증가시킨다는 선행연구의 논의와 일치한다.

모양의 복잡성 유형은 CONTIG(연속성지수), COHESION(응집지수), SHAPE(형태지수)가 해당되며, CONTIG는 해당 분석식에서 유의하게 나타나지 않았다. COHESION지수는 부의 방향으로 유의하게 나타났으며, 분석식은 COHESION지수가 1% 증가할 때, 호우피해액이 0.28% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 시가화지역 간 연결성이 감소할수록 호우피해액이 증가하는 것으로 해석할 수 있다. 시가화지역 간의 연결성이 낮다는 것은 시가화지역이 서로 멀리 떨어져 있음을 의미하므로 이 지수 역시 AI지수와 마찬가지로 스프롤을 나타내는 지수로 볼 수 있으며, 또한 스프롤이

자연재해 피해를 가중시킨다는 선행연구의 논의와 일치하는 결과로 볼 수 있다. SHAPE지수는 부의 방향으로 유의하게 나타났으며, 분석식은 SHAPE지수가 1% 증가할 때, 호우피해액이 0.087% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 시가화지역의 형태가 불규칙하게 나타날수록 호우피해가 감소하는 것으로 해석할 수 있으나, 그 정도는 다른 지수들에 비해서 약하다.

VI. 결론

본 연구는 도시화와 자연재해 피해 간의 관계를 이해하고, 개발패턴 유형에 따라 자연재해 피해의 영향을 파악하는데 있어 유의한 결과를 산출하였지만, 다음과 같은 한계를 가지고 있다. 첫째, 데이터의 한계로 인해 연구의 공간적 범위가 축소되었다. 대분류 토지피복도가 보안상의 문제로 서울·경기 및 강원 일부지역을 제외하고 제공되었기 때문에 재해피해액이 높게 측정된 서울 및 강원의 일부지역을 본 연구의 공간적 범위에 포함시킬 수 없었다. 또한 본 연구에서 사용된 공간회귀분석은 서로 인접한 공간상의 데이터를 분석하는 모델이기 때문에 섬에 위치하거나 인접하지 않은 지역을 제외하였다. 둘째, 독립변수의 데이터로 사용된 토지피복의 시간적 범위는 2008년~2010년이지만 종속변수 데이터로 사용된 호우피해액은 2008년에서 2017년까지의 데이터를 평균하여 사용하였다. 3개년도의 호우피해액 데이터를 평균하여 사용할 경우 피해액이 0인 표본이 많아져서 정규분포에서 멀어지고, 이분산의 문제가 발생하기 때문에, 10개년도를 평균하여 사용하였다. 또한 이분산의 문제를 보완하기 위해 추가로 로그변환과 표준오차 방법을 사용하였다. 향후 경관지수가 자연재해 피해에 미치는 영향과 관련된 연구는 이러한 한계점을 보완하여 연구를 진행해나가야 할 것이다.

연구결과를 종합해보면 시가화지역이 많은 개수로 산발되어 나타나는 개발형태는 자연재해 피해를 증가시킨다는 결론을 도출할 수 있다. 이는

압축도시와는 반대로, 스프롤 현상과는 비슷한 패턴을 가지면서 도시화가 진행될수록 자연재해 피해가 증가하는 것으로 해석되어진다. 우리나라는 1960년대 이후 서울과 수도권을 중심으로 지속적으로 도시가 외곽으로 확산되었고, 부산을 비롯한 지방의 대도시 역시 도시 확산이 상당히 진행되었다. 도시 확산은 여러 도시 문제를 일으키며, 본 연구의 결과를 보았을 때, 특히 자연재해 피해를 야기하고 있음을 입증할 수 있기 때문에 무질서한 도시개발을 억제하는 노력이 필요하다. 본 연구의 세부 연구가설들에 대한 결론을 보았을 때, “도시화가 야기한 시가지지역의 경관패턴은 자연재해 피해를 증가시킬 것이다.”의 연구가설 1은 입증 가능하다고 판단되며, 이에 따르면 도시화는 토지피복의 변화를 통해 자연재해 피해를 증가시키는 경관패턴을 야기한다. 토지이용은 경관유형을 결정하고 기능을 변화시킴으로써 환경의 질과 자원공급, 지속성에 영향을 주기 때문에 도시기본계획에서부터 개발 확산을 억제하는 토지이용의 내용이 수록되어야 한다. 구체적으로 시가지지역의 패치 개수가 자연재해 피해를 증가시킨다는 연구결과를 보았을 때, 차후 진행되어질 개발은 감소되어야 한다. 또한 시가지지역의 거리지수가 자연재해 피해를 증가시키고, 집합지수, 응집지수가 자연재해 피해를 감소시킨다는 연구결과를 보았을 때, 도심의 밀도를 높이는 고밀 압축개발을 지향하면서 도시 외곽은 개발을 억제하여 보존하는 정책을 수립할 필요가 있다. 스마트성장과 뉴어바니즘에서 제시하고 있는 고밀압축, 오픈스페이스 보존과 같은 원칙들을 준수하면서 도시공간을 관리해 나간다면, 자연재해 피해는 점차 완화될 것이라 예상된다. Andres Duany와 Elisabeth Plater-Zyberk에 의해 고안된 스마트 코드(smart code)를 도시에 적용시키는 것도 자연재해 피해를 완화시키는 방안이 될 수 있다. 이는 도시를 하나의 연속체로 보고, 도심에서 외곽까지 도시 밀도가 점차 줄어드는 설계지침 코드를 적용시키는 도시설계 이론이다(Duanly and Talen, 2002). 각 코드가 설정된 섹터마다 용도와 용적률을 다르게 수립하되, 도심에는 용적률을 높이고, 외곽에는 용적률을 낮추는 방식을 적용할 수 있으며, 이를 통해 도심의 고밀개발을 지향하

면서 도시외곽은 보존하는 압축도시를 추구할 수 있다. 본 연구의 결과에 따라 위와 같은 방안을 통해 압축도시를 실현함으로써 자연재해 피해를 완화할 수 있도록 각 지자체의 노력이 필요하다.

■ 참고문헌 ■

- 김광구, 2003, “공간자기상관(spatial autocorrelation)의 탐색과 공간회귀분석(spatial regression)의 활용,” 『정책분석평가학회보』, 13(1), pp.273-306.
- 김보경·장태원·장남·양동민, 2011, “기후변화를 고려한 도시홍수 위험요인 도출,” 『한국위기관리논집』, 7(1), pp.125-142.
- 남궁근, 2013, 『행정조사방법론』, 서울: 법문사.
- 이동근·오규식·김희주, 2011, “공간자기상관분석을 통한 시계열적 경관구조의 변화 분석-남양주지역을 대상으로,” 『한국환경복원녹화기술학회지』, 14(3), pp.1-14.
- 이미연·홍중호, 2016, “패널모형을 이용한 자연재해 피해의 결정요인에 관한 고찰,” 『한국방재학회 논문집』, 16(4), pp.247-257.
- 이상범·정주철·김태형, 2007, 『생태축 분석을 위한 경관생태학적 방법론 연구』, (KEI 연구보고서; 2007 RE-17), 서울: 한국환경정책·평가연구원.
- 이석환, 2014, “공간의존성에 대한 이해와 공간회귀분석의 활용,” 『한국정책과학학회보』, 18(3), pp.39-79.
- 임수진·김갑영, 2016, “수도권 스프롤 양상의 시공간적변화: 공간구조 기반 접근,” 『한국지역지리학회지』, 22(3), pp.628-642.
- 장병관·황국용, 2011, “도시화에 따른 경관다양성의 시공간적 패턴 연구,” 『지역사회연구』, 19(4), pp.167-179.
- 장윤정·이승일, 2009, “서울의 창조산업 분포특성과 도시상업활력의 공간회귀분석,” 『국토계획』, 44(6), pp.51-64.
- 정홍락·이현우·노태호·권영한·유현석·박소현, 2003, 『경관생태학적 환경영향평가기법에 관한 연구』, (연구보고서; 2003-RE-23), 서울: 한국환경정책·평가연구원.
- 최충익, 2003, “도시적 토지이용의 변화가 도시의 자연재해 취약성에 미치는 영향에 관한 연구,” 『국토계획』, 38(2), pp.35-48.
- _____, 2004, “패널모형에 의한 도시지역 수해결정요인 분석,” 『국토계획』, 39(7), pp.49-67.
- _____, 2010, “도시화가 자연재해를 늘리는가?-경기도 사례를 중심으로,” 『환경정책연구』, 9(3), pp.3-27.
- 하경준·정주철, 2017, “도시화와 강우량이 도시홍수 피해에 미치는 영향에 관한 연구,”

- 『국토계획』, 52(4), pp.237-252.
- 행정안전부, 2012, 『홍수취약성지수기반 평가 시스템 개발』, (홍수해 취약성 평가시스템 개발; 2 주요연구: 2012-12-02), 서울: 행정안전부 국립방재연구원.
- 환경부, 2014, 『통계로 본 국토자연환경』, 세종: 환경부.
- Aithal, B. H. and T. V. Ramachandra, 2016, "Visualization of urban growth pattern in Chennai using geoinformatics and spatial metrics," *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44(4), pp.617-633.
- Brody, S. D., S. Zahran, W. E. Highfield, H. Grover, and A. Vedlitz, 2008, "Identifying the impact of the built environment on flood damage in Texas," *Disasters*, 32(1), pp.1-18, DOI: 10.1111/j.1467-7717.2007.01024.x.
- Brody, S. D., W. E. Highfield, R. Blessing, T. Makino, and C. C. Shepard, 2017, "Evaluating the effects of open space configurations in reducing flood damage along the Gulf of Mexico coast," *Landscape and Urban Planning*, 167, pp.225-231, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.07.003.
- Duany, A. and E. Talen, 2002, "Transect planning," *American Planning Association, Journal of the American Planning Association*, 68(3), pp.245-266.
- Furberg, D. and Y. Ban, 2008, "Satellite monitoring of urban sprawl and assessing the impact of land cover changes in the Greater Toronto Area," *The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress Beijing*, 37(B8), pp.131-136.
- Gardner, R. H., B. T. Milne, M. G. Turnei, and R. V. O'Neill, 1987, "Neutral models for the analysis of broad-scale landscape pattern," *Landscape Ecology*, 1(1), pp.19-28.
- Gujarati, D. N., 2009, *Basic econometrics*, New York: McGraw-Hill Education.
- Ji, W., J. Ma, R. W. Twibell, and K. Underhill, 2006, "Characterizing urban sprawl using multi-stage remote sensing images and landscape metrics," *Computers, Environment and Urban Systems*, 30(6), pp.861-879, DOI: 10.1016/j.compenurbysys.2005.09.002.
- LeSage, J. P., 1999, *The theory and practice of spatial econometrics*, Ohio: University of Toledo.
- Lundgren, L. W., 1999, *Environmental geology*, New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- Yue, W., Y. Liu, and P. Fan, 2013, "Measuring urban sprawl and its drivers in large Chinese cities: The case of Hangzhou," *Land Use Policy*, 31, pp.358-370, DOI: 10.1016/j.landusepol.2012.07.018.
- 행정안전부, 2019, "2019 지방자치단체 행정구역 및 인구현황." <https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/commonSelectBoardArticle.do?jsessionid=hSL6TZdrSBfzAOX9w85F>

Ws5F.node10?bbsId=BBSMSTR_00000000055&nttd=72337, [2019.12.20]

강승원: 부산대학교 도시공학 석사학위를 취득하고 현재 부산대학교 도시공학과 박사과정에 재학중이다. 주요관심분야는 토지이용계획, 기후변화, GIS공간분석, 연안관리 등이다(allan92@naver.com).

이달별: Georgia Institute of Technology, Atlanta에서 도시 및 지역계획 박사학위를 취득하였으며 현재 동의대학교 소방방재행정학과 조교수로 재직 중이다. 주요 관심분야는 토지이용계획, 환경계획 및 정책, 도시방재정책, 사회영향평가 등이다(moon@deu.ac.kr).

정주철: The University of Texas at Austin에서 도시 및 지역계획 박사학위를 취득하였으며, 현재 부산대학교 도시공학과 교수로 재직 중이다. 주요 관심분야는 토지이용계획, 환경계획 및 정책, 스마트 성장관리정책 등이다(jjung@pusan.ac.kr).

투 고 일: 2019년 11월 18일
심 사 일: 2019년 12월 03일
게재확정일: 2019년 12월 09일