

토지이용규제 완화가 해안 개발확산에 미치는 영향 : 파편화 지수와 기후변화 리스크를 중심으로

The Impact of Land Use Deregulation on Coastal Sprawl : Focusing on Fragmentation Index and Climate Risk

서세교* · 김혜인** · 강승원*** · 정주철****

Seo, Se-Gyo · Kim, Hye-In · Kang, Seung-Won · Jung, Ju-Chul

Abstract

Climate change has exacerbated extreme weather events, making coastal cities more susceptible to flooding, erosion, and related disasters. Since the mid-2000s, development pressures have been concentrated in coastal zones with high amenity and commercial value, resulting in high-density residential expansion on reclaimed land and within buffer zones designed for disaster mitigation. This study investigates how land-use deregulation affected development patterns and fragmentation in Busan, South Korea, from 2000 to 2023. Fragmentation indices were created on a 200×200 m grid framework (19,340 cells), and multiple regression and MANOVA analyses were used to assess the impacts of zoning changes on development density and disaster exposure. The results show that deregulation rate and area significantly increased patch number and density while decreasing average patch size, indicating increased fragmentation. Disaster exposure indicators, including population and impervious surface ratio, also increased with deregulation. The effects of deregulation were significantly stronger in coastal areas than in inland areas, indicating spatially uneven risk accumulation. These results show that deregulation facilitated urban expansion while also increasing vulnerability by concentrating high-density development in flood-prone areas. The study highlights the importance of land-use planning as a structural tool for addressing climate risks and guiding sustainable coastal development.

주제어 토지이용계획, 규제 완화, 기후변화, 파편화 지수, 연안 도시

Keywords Land Use Planning, Deregulation, Climate Change, Fragmentation Index, Coastal Cities

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

기후변화는 더 이상 특정 지역에 국한된 현상이 아니라, 전 지구적 차원에서 도시·농촌을 불문하고 광범위하게 영향을 미치는 과제로 부상하고 있다. 최근 들어 이상기후의 발생 시기와 공간적 분포는 점점 더 불확실해지고 있으며, 강도의 심화가 동반되면서

국제적으로 '극한기후(extreme climate)'라는 용어가 공식적으로 등장하기 시작하였다. 이러한 변화는 기후위험의 시공간적 범위와 규모가 단순·선형적 패턴에서 복합적·연쇄적 양상으로 전환되고 있음을 시사하며, 단일한 구조적 대응만으로는 위험을 효과적으로 관리하기 어려워지고 있음을 보여준다(Ranasinghe et al., 2021; Simpson et al., 2025).

이러한 인식의 확산에 따라, 최근의 기후변화 적응 전략은 기후위험이 허용 가능한 한계를 초과하여 대응이 필수적으로 요구

* Integrated Doctoral Candidate, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University (plan_ssg@pusan.ac.kr)

** Doctoral Student, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University (landscape8548@gmail.com)

*** Senior Research Scientist, Ocean Policy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology (seungwon@kiost.ac.kr)

**** Professor, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University (Corresponding Author: jchung@pusan.ac.kr)

되는 시점, 그리고 커뮤니티의 적응 역량을 제약하는 환경적·사회적 요인을 '적응의 한계(adaptation limits)'로 정의하고 이를 극복하기 위한 목표를 설정하는 방향으로 변화하고 있다(Cooley et al., 2023; Juhola et al., 2024). 이는 단기적 피해 경감에 머무르지 않고, 다층적·장기적 관점에서 위험을 관리하기 위한 종합적 적응 전략의 필요성을 시사한다.

특히 연안 도시는 해안과 직접 맞닿아 있는 지리적 특성상 기후변화에 대한 구조적 취약성이 높다. 따라서 재해 노출을 줄이고 회복력을 강화하기 위해서는 환경적 제약을 완화할 수 있는 공간 관리 수단의 도입이 필수적이다. 이와 관련하여, 도시 단위에서 가장 효과적이면서도 장기적 효용을 제공할 수 있는 수단으로 토지이용계획이 주목받고 있다(EEA, 2023; Effiong et al., 2024; Yinuo et al., 2025).

토지이용계획은 개발의 위치, 규모, 형태를 공간적으로 조정함으로써 위험지역의 노출을 줄이고, 공공성 강화 및 회복력 내재화를 동시에 실현할 수 있는 장점을 가진다. 실제로 과거 연안 지역은 주거 및 여가 공간으로서 고밀·고층 개발의 대상이 되었으나, 최근에는 계획적 관리를 통해 공공공간이자 완충지역(buffer zone)으로 전환하는 사례가 늘고 있다. 이는 위험지역 및 인접지역의 무분별한 개발이 재해 노출과 피해를 가중시킨다는 실증적 경험에 기반한 변화이다.

그러나 국내 연안 도시들의 대응은 여전히 피해 지역 해안에 방파제나 제방을 설치하는 등 구조적 수단에 편중되어 있다. 이는 단기적으로 피해 경감에는 기여할 수 있으나 기후위험의 근본적 완화에는 한계가 있다. 더불어, 지난 수십 년간 연안의 토지이용규제가 지속적으로 완화되면서 과거 내륙 중심이었던 개발 패턴이 점차 해안으로 확산되고, 이에 따라 재해위험이 증가하는 경향이 이어지고 있다.

이러한 맥락에서 본 연구의 주요 목적은 다음과 같다. 첫째, 토지이용규제 완화가 토지이용의 파편화와 개발확산에 미치는 영향을 실증적으로 분석한다. 둘째, 개발확산이 이루어진 지역이 현재의 재해노출 지역과 어떻게 중첩되는지 분석한다. 셋째, 이러한 영향이 해안지역과 내륙지역 간에 상이하게 나타나는지를 비교 분석함으로써, 공간적 맥락을 고려한 도시계획적 대응의 필요성을 제시한다.

단, 본 연구는 과거 시점에서 이루어진 규제 완화가 당시의 방재·기후정책 기준에 비해 적절했는지, 혹은 그 의사결정 자체가 문제였는지를 평가하려는 목적을 갖지 않는다. 오히려 기후위험에 대한 사회적·제도적 인식이 상대적으로 낮았던 시기에 이루어진 규제 완화와 개발의 누적된 결과가 현재 시점에서 어떤 위험노출 구조를 형성하고 있는지를 확인하는 데 초점을 둔다. 이러한 접근은 과거 정책결정의 정당성이 아니라, 그 결과가 오늘날의 연안공간 구조와 어떻게 결합해 있는지를 분석하는 것에 목적을 둔다.

II. 선행연구 및 이론적 고찰

1. 토지이용규제의 개념과 기능

토지이용규제(land use regulation)는 한정된 토지 자원의 이용 형태와 강도를 조정함으로써 사회적·경제적·환경적 목표를 달성하기 위한 제도적 장치이다. 일반적으로 국토계획, 도시계획, 환경계획 등 상위 계획체계 속에서 법·제도적 규범으로 구체화되며, 용도지역·용도지구·용도구역 지정을 통한 건폐율 및 용적률 규제, 개발행위허가제도 등 다양한 수단을 통해 실행된다(Nelson and Dawkins 2004; Alterman, 2011). 이러한 규제는 토지이용의 자유를 일정 부분 제한하지만, 그 목적은 공공의 안전, 환경 보전, 경제적 효율성, 사회적 형평성 등 공익을 극대화하는 데 있다(Berke and Godschalk, 2009).

특히 방재 부문에서는 위험지역의 개발을 사전에 억제하고 피해를 예방하는 데 그 핵심 가치가 있으며, 이러한 사전적 규제 및 방재적 토지의 확보는 장기적인 피해 저감 효과를 가지는 것으로 나타났다(Burby and Dalton, 1994).

반면, 방파제와 같은 구조적 대응은 단기적으로는 물리적 피해를 완화할 수 있으나, 보호 수준의 향상이 오히려 위험지대 내 추가 개발을 유인해 장기적으로 노출을 증대시키는 '레비 효과(levee effect)'를 초래할 수 있다(Kates et al., 2006; Di Baldassarre et al., 2013). 이러한 자기강화적 메커니즘은 [개발→보호→추가 개발→추가 보호]의 악순환을 형성하여 장기적으로 더 많은 사람들을 위험에 노출시키고, 결국 개발을 통한 이익보다 큰 사회적 비용이 발생할 수 있다.

이에 반해, 토지이용계획은 위험 발생 구조 자체를 변화시키는 사전적 접근이라는 점에서 지속적 효용이 크다. 계획적 규제를 통해 위험지역의 용도를 전환하거나 개발 강도를 조정하면, 단순히 피해를 줄이는 것을 넘어 공공성을 강화하고 회복력을 내재화할 수 있다(Burby et al., 2000; Godschalk, 2003).

연안 지역에서는 이러한 규제가 완충지 조성, 관리된 후퇴(managed retreat), 저영향 개발과 결합하여 공간구조를 전환하는 데 핵심 역할을 한다. 최근 논의되는 동적 적응형 정책 경로(Dynamic Adaptive Policy Pathways, DAPP)는 임계점과 결정 시점을 관리하면서 점진적으로 토지이용을 전환하고, 잠금효과(lock in)와 후속 비용을 최소화하는 방안을 제시한다(Haasnoot et al., 2013; Barnett and O'Neill, 2010).

2. 토지이용규제 완화와 그 영향

토지이용규제의 완화는 단순히 개발 허용량을 늘리는 행위에 그치지 않고 입지 선택의 제약조건을 완화시켜 개발의 공간 분포와 강도, 형태를 변화시킨다. 도시성장관리 관련 연구들은 규제

완화가 외연적 확산과 비연속적 개발, 토지이용의 파편화를 촉발하는 경향을 제시해왔다(Nelson and Duncan, 1995; Nelson and Dawkins, 2004; Ewing and Hamidi, 2015). 그 결과는 인프라 비용의 증대, 생태계 단절, 공공서비스 제공의 비효율을 매개로 위험관리 역량을 약화시키는 결과로 이어질 수 있다.

방재 부문에서는 규제 완화가 취약지역 개발의 유인을 높여 개발 입지와 위험지역이 중첩되는 경향이 나타날 수 있다는 점이 강조된다. 지방정부의 기본계획과 엄격한 토지이용계획의 조합으로 위험지 개발을 실질적으로 억제하는 것으로 나타났지만, 일부 무분별한 규제 완화는 위험지역의 개발 문턱을 낮추고 투자금 회수를 가속화하는 장치로 작동하였고(Burby and Dalton, 1994), 미래의 위험을 담보로 현재의 이익을 챙기는 개발이 성행하는 결과를 초래하였다(Brody et al., 2007; Ostriker and Russo, 2022).

기후의 비정상성에 관한 논의는 과거 데이터에 의존한 규제 수준이 미래의 기후를 과소평가할 수 있음을 지적한다(Milly et al., 2008). 이 관점에서 보면 일정 수준 이상의 위험이 존재하는 지역에서의 토지이용규제 완화는 단지 현재 기준에 따라 단지 더 많은 개발을 허용할 뿐만 아니라, 미래의 기후에 취약한 공간구조를 제도적으로 고착시키는 행위가 될 수 있다. 또한, 연안 맥락에서 규제 완화는 경관, 접근성 등 연안 자원과 결합할 때 해안선 근접 개발의 편중을 심화시키는 결과를 보여준다. 민간 개발, 공공 투자, 그리고 재난 상황에서의 복구지원 등 정책적 신호는 도덕적 해이(moral hazard)를 유발했고, 그 결과 민간 수요는 더 느슨한 규제하에서 위험지역으로 집중되었다(Kousky and Shabman, 2012; Hsiao, 2023; Patsch et al., 2023).

3. 재해 노출과 위험의 내재화

재해 노출은 재해위험이 발생했을 때 직접적인 영향을 받을 수 있는 인구, 자산, 사회기반시설 등이 어떤 공간에 위치해 있는지를 나타내는 개념이다(Cutter et al., 2008). 노출은 단순히 자연현상의 발생 여부가 아니라, '사람과 시설이 그곳에 얼마나, 어떻게 존재하느냐'에 따라 결정된다.

연안 도시의 취약성은 자연과 인공 환경의 복합적 결과로 결정되는 경우가 많다. 불투수 면적이 높은 고밀도 주거지, 산업단지, 상업지역이 해안선을 따라 밀집되어 있으며, 이들은 침수위험과 직결된 구조를 가진다(Sohn et al., 2020). 특히 개발압력이 높은 지역에서 규제 완화가 이뤄질 경우, 인구와 자산이 점점 더 위험지역으로 집중되는 현상이 나타난다(Breen et al., 2022). 이른바 '위험의 내재화'가 도시 구조에 축적되는 것이다. 최근 연구는 특히 인구와 기반시설이 고밀도로 입지한 공간일수록, 규제의 완화가 물리적 노출뿐 아니라 사회적 불평등까지 가중할 수 있음을 보여주고 있다(Shi and Varuzzo, 2020; Xu et al., 2021).

위험은 더 이상 기후와 환경 요인만으로 결정되지 않는다. 계획적이든 비계획적이든 개발의 유무와 방식은 위험을 증폭시키거나 저감할 수 있으며, 특히 위험지역에서는 토지의 완충능력을 상실시킬 가능성이 높다(Cutter et al., 2018). 이러한 관점에서 규제완화는 단순히 개발 허용 수준을 조정하는 것이 아니라, 위험을 도시 구조 내부에 축적시키는 경로로 작용할 수 있다.

4. 파편화의 개념과 개발확산과의 관계

토지이용의 파편화는 연속적이고 집약적인 토지이용이 더 작고 불연속적인 패치로 분절되는 현상을 의미한다. 경관생태학에서는 이를 토지이용 및 피복 변화의 질적 저하로 해석하며, 공간적 연속성의 감소, 경계 길이 증가, 코어 지역의 축소 등으로 측정한다(Jaeger and Schwick, 2014). 한편, 도시계획 부문의 연구에서는 파편화를 단순한 토지이용 혼합 또는 분절의 결과가 아니라, 기반 시설의 효율 저하와 도시의 외연적 확산을 매개하는 구조적 과정으로 간주하는 경우가 많았다(Irwin and Bockstael, 2007; Inostroza et al., 2013; Ewing and Hamidi, 2015; Canedoli et al., 2018).

이렇듯 토지이용규제 완화와 파편화는 밀접한 인과관계를 가지고 있는 것으로 확인되었다. 토지이용규제 완화가 소규모의 비연속적 개발을 허용하면 기존 토지이용의 분절화가 가속화된다는(Pendall, 1999). 이로 인해 고밀 개발과 저밀 개발 사이의 완충지대가 약화되면 토지이용의 공간 질서가 무너지고, 계획된 집적보다는 시장 주도의 산발적 입지 결정을 촉진하는 결과를 낳게 될 것이다(Jaeger et al., 2010).

토지이용의 파편화는 개발의 확산과도 밀접하게 연결된다. Ewing(1997)은 개발의 확산을 단순한 외연 확장뿐 아니라, 불연속적 개발, 밀도의 혼합, 자동차 의존성 등 복합적 특성을 지닌 현상으로 정의하며, 파편화가 그 구조적 전제임을 강조했다. Galster et al.(2001) 또한 개발확산의 여덟 가지 차원 중 '패치의 분절성'이 핵심 구성요소임을 실증적으로 제시하였다. 특히 규제 완화로 인한 파편화는 기반시설 연계성이 부족한 개발지를 양산해, 결과적으로 공공서비스 제공 비용을 증가시키고 생태계 연결성을 저하시킨다(Hasse and Lathrop, 2003).

연안 도시에서 파편화는 단순한 경관 변화 이상의 의미를 가진다. 연안은 시장성이 높은 환경적 요소가 집중되어 있어, 규제가 느슨해질 경우 산발적 개발이 빠르게 확산된다. 이는 방재적 토지 확보를 어렵게 만들고, 위험 완충 공간을 잠식함으로써 장래 재해 피해의 잠재성을 높인다(Barnett and O'Neill, 2013). 따라서 토지이용규제 완화가 파편화를 매개로 개발의 확산을 유발하는 메커니즘을 이해하는 것은, 연안 재해 위험관리와 기후변화 적응 전략 수립에 필수적이다.

5. 토지이용 파편화의 측정

토지이용 파편화는 개념적으로 공간의 분절성이 증가하는 현상을 의미하지만, 이러한 변화는 시각적 인상이나 단순 면적 증감만으로는 파악하기 어렵다고 지적되어 왔다(Haines-Young and Chopping, 1996; Uuemaa et al., 2009). 또한, 동일한 개발량이 발생하더라도 토지 패치의 배열 방식, 단위 공간의 구조, 공간적 연결성의 변화에 따라 상이한 공간 패턴이 나타날 수 있기 때문에, 개념적 수준에 머물지 않고 파편화 지수로 공간구조 변화를 분석하기 위한 정량적 지표를 함께 활용해 왔다(Uuemaa et al., 2009; Leitao and Ahern, 2002).

따라서, 파편화는 하나의 요인으로 설명되는 단일 현상이 아니라, 여러 공간적 변화가 동시에 나타나는 다차원적 과정으로 이해된다. 선행연구에 따르면 동일한 토지이용 변화라도 패치의 세분화 수준, 패치 간 거리와 연결성, 경계 구조의 복잡성, 토지이용 구성의 이질성 증가 등 서로 다른 양상으로 나타날 수 있으며, 사용하는 지표에 따라 민감하게 반응하는 특성이 달라질 수 있다(Hargis et al., 1998; Gustafson, 1998). 이러한 이유로 파편화는 단일 지표보다는 면적·밀도 계열 지표, 연결성 지표, 형태 지표, 다양성 지표 등 서로 다른 차원을 반영하는 지표군을 조합하여 분석하는 방식이 주로 활용되고 있다(Uuemaa et al., 2009; Haines-Young and Chopping, 1996).

경관생태학 분야에서는 패치의 크기와 개수, 경계 길이, 경계 밀도, 패치 간 거리, 군집도 등의 지표를 활용하여 경관 구조와 분절성을 계량화하는 방법이 제시되어 왔다(McGarigal and Marks, 1995). 초기에는 FRAGSTATS와 같은 도구를 통해 다양한 지표를 일괄적으로 산정함으로써, 경관 단위에서 분절 수준과 연결성, 이질성을 구조적으로 파악하려는 시도가 축적되어 왔으며, 이후 이러한 지표들을 조합해 파편화 패턴을 비교·분석하는 접근이 일반화되었다(Frazier and Kedron, 2017).

도시계획 분야에서는 파편화 지수를 활용하여 도시 공간의 구조적 특성과 변화 양상을 분석하려는 연구가 지속적으로 축적되어 왔다. 원격탐사 자료와 공간지표를 결합함으로써 도시 토지이용의 변화 양상과 공간구조를 계량적으로 파악하고, 패치의 크기·밀도·연결성 등을 통해 도시성장의 형태적 특성을 규명하려는 접근이 대표적이다(Herold et al., 2005; Aguilera et al., 2011). 최근에는 파편화 지수를 단순히 도시 확산의 양상을 설명하는 데 그치지 않고, 도시 구조의 공간적 특성을 정량적으로 도출하는 분석 도구로 활용되고 있다. 특히 패치 수, 패치 밀도, 형태 복잡도와 같은 지표는 도시 공간의 집적성과 분절성을 설명하는 핵심 변수로 활용되며, 이를 통해 도시 구조의 차이를 체계적으로 분석할 수 있다(Herold et al., 2005; Aguilera et al., 2011). 더 나아가 파편화 지수는 도시 환경 특성과의 연계 분석에서도 중요한 역할을 한다. 일부 연구는 파편화 구조의 차이가 지

표면 온도 분포나 열섬 강도와 유의한 연관성을 보인다는 점을 실증적으로 제시하고 있으며, 이는 도시 형태가 환경적 위협의 공간적 분포를 조절하는 요인으로 작용함을 의미한다(Li et al., 2013; Estoque et al., 2017).

일부 연구에서는 서로 다른 시점의 공간 데이터를 활용하여 파편화 수준의 시간적 변화를 분석하거나, 서로 다른 지역 간 지표를 비교함으로써 공간구조의 차이를 검토하였다. 예를 들어, 유효 패치 크기 지표를 활용해 교통 인프라와 도시 개발에 따른 경관 파편화의 장기 변화를 평가하거나, 다양한 공간지표를 활용하여 시간 변화에 따른 지역 간 비교 사례를 종합적으로 정리하는 등 시공간의 변화를 고려한 연구에도 파편화 지수가 활용되었다(Jaeger, 2000; Uuemaa et al., 2013). 이러한 연구 흐름은 파편화가 단일 시점의 상태가 아니라, 토지이용 변화나 정책 변화에 따라 공간구조가 어떻게 달라지는지를 추적하기 위한 분석 도구로 활용되어 왔음을 보여준다.

6. 이론적 고찰

선행연구 분석을 통해 [토지이용규제 완화→토지이용의 파편화 및 비연속적 개발→도시 스프롤 및 재해 노출]로 이어지는 이론적 메커니즘을 정립할 수 있었다. 그러나, 다수의 연구가 토지이용 변화가 파편화와 스프롤을 촉진할 수 있다는 점을 강조하면서도, 실제 도시 공간에서 규제 완화가 토지이용의 파편화나 개발확산으로 연결되는 과정을 실증적으로 검토하는 데에는 한계를 보였다. 또한 이들 연구는 대체로 내륙부 교외의 저밀도 주거지 확산, 자동차 의존성 증가와 같은 현상에 초점을 맞추었기 때문에 최근 두드러지고 있는 연안부 개발 편중 현상을 설명하는 것에는 제약이 있었다. 나아가 스프롤의 결과에 관해서도 주로 인프라 비용 증가, 생태계 단절, 공공서비스 비효율 등 도시관리 차원에서의 문제를 주로 다루고 있어 기후위험 및 재해 노출과 연계는 제한적이었다.

본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해, 토지이용규제 완화가 실제로 토지의 파편화 및 개발확산을 유발하는지 정량적으로 분석하고, 더 나아가 재해위험에 대한 영향을 규명하고자 한다. 또한 기존의 개발확산에 관한 연구는 주로 내륙부 도시 외곽에 한정되어 있으나, 본 연구에서는 기후변화 및 최근에 증가하는 연안 개발 경향을 반영하여 해안과 내륙 공간에 따른 차이를 도출하고자 한다.

III. 연구의 설계

1. 연구가설 설정

토지이용규제, 토지이용의 파편화, 재해 노출에 관한 선행연구

분석 및 이론적 고찰을 통해 다음과 같은 연구가설을 설정하였다.

- H1 : 토지이용규제의 완화는 토지이용 파편화를 매개로 개발 확산을 촉진할 것이다.
- H2 : 토지이용규제 완화로 인한 연안부 개발확산은 재해 노출을 증가시킬 것이다.
- H3 : 이러한 경향은 내륙지역에 비해 해안지역에서 더 강하게 나타날 것이다.

본 연구에서는 토지이용규제 완화와 관련하여 축적되어 온 여러 조각의 이론들을 연안 도시 사례를 통해 실증적으로 분석함으로써 위의 가설을 검증하고, 기후변화 시대의 리스크관리 수단으로써 토지이용계획이 지니는 중요성을 규명하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 데이터

본 연구의 공간적 범위는 부산광역시를 대상으로 한다. 부산광역시는 연안 도시에서 토지이용규제 변화가 공간구조와 위험 노출에 미치는 영향을 살펴보기 위한 대표적 사례로서 다음과 같은 이유로 사례지역으로 선정하였다. 첫째, 부산은 해안-산지-도심이 접합되는 복합 지형과 높은 도시화 수준으로 인해 개발 수요가 지속적으로 발생해 왔으며, 이 과정에서 용도지역 변경, 지구단위계획 조정, 용적률 인센티브 등 다양한 형태의 규제 완화가 이루어진 도시이다. 둘째, 부산 해안은 관광·상업·항만 기능이 밀집된 지역으로, 규제 완화 이후 개발수요가 집중되는 전형적 패턴을 보여 왔다. 이는 연안 도시의 [규제 완화→고밀도 개발→파편적 확산]이라는 구조적 메커니즘을 관찰하기 위한 적합한 환경을 제공한다. 셋째, 부산은 최근 20여 년간 태풍 및 집중호우에 의한 반복적 침수 사례가 명확하게 확인된 지역으로, 토지이용규제 변화와 기후위험 노출 간의 관계를 실증적으로 확인할 수 있는 자료 접근성 및 시계열 안정성을 보유하고 있다. 이러한 맥락에서 부산은 특정 도시 특수성에 한정된 사례라기보다, 규제변화와

개발 압력, 그리고 기후위험이 동시에 작동하는 전형적 연안 도시 사례로서 의미를 갖는다.

연구 자료를 수집하는 시간적 범위는 2000년부터 2023년을 대상으로 한다. 이 기간은 해안을 중심으로 신도시 및 고밀도의 주상복합 개발이 본격화된 시기로, 연안의 토지이용규제 완화와 개발확산 및 재해 노출 간의 구조적 관계를 탐색하기에 적절할 것으로 판단하였다. 본 연구의 가설 검증은 2000년과 2023년 두 시점의 상태를 비교하여 토지이용규제 완화로 인한 영향을 분석하는 방법으로 이루어진다. 단, 이러한 영향이 발생하게 된 제도적·공간적 배경을 정량화하기 위해,¹⁾ 2000년에서 2023년 기간 동안 도시된 규제 완화 고시문과 필지 및 건축물 단위의 개발밀도 변화 데이터를 수집하고 분석 단위별로 누적하여 규제 완화율, 규제 완화 건수, 규제 완화 면적을 산정하였다.

또한, 본 연구에서는 필지별 개발밀도 변화, 지구단위계획, 용적률 인센티브 등을 반영하기 위하여, 일반적으로 하나의 블록을 포함할 수 있는 200m×200m 크기의 격자를 분석 단위로 설정하였다. 이에 따라 19,340개의 격자에 대해 데이터를 구축하였으며, 활용한 자료는 <표 1>에 제시하였다.

2000년부터 2023년까지 수집된 데이터를 바탕으로 부산광역시의 토지이용규제 완화에 따른 개발밀도 변화율을 분석한 결과는 <그림 1>과 같다. 내륙지역에서는 주로 단지 단위의 고밀 개발이 확인된 반면, 해안지역에서는 소도시 규모의 개발이 집중적으로 나타났다. 이를 2023년의 개발밀도를 제시한 <그림 2>와 비교해보면, 내륙의 핵심지역은 대부분 2000년대 이전에 개발되어 뚜렷한 밀도변화 없이 유지되고 있는 반면, 해안지역은 2000년대 이후의 신규 개발을 통해 새로운 핵심지역을 형성하고 있음을 확인할 수 있다.

종속변수는 두 가지로 구분된다. 첫 번째 종속변수인 파편화 지수는 환경공간정보서비스에서 제공하는 5m 해상도의 중분류 토지피복지도(2004년, 2023년)를 기반으로 구축하였다. 중분류 토지피복지도는 자연공간에 비해 도시공간 유형이 보다 세분화된 분류 체계를 갖고 있어, 도시공간 변화 분석을 목적으로 할 때

Table 1. Variables and data sources used in the analysis

Type	Variable	Description	Source
Independent variable	Deregulation_Rate	Ratio of deregulated area within each 200 m grid	MOLIT Local Government
	Deregulation_Area	Sum of deregulated area within grid	
	Deregulation_Count	Number of deregulation actions within grid	
Dependent variable	Fragmentation index (NP, PD, AREA, CONTIG, CONTAG, SHAPE, FRAC, PERI)	Computed using FRAGSTATS based on built-up raster layer	MOE
	Hazard exposure (POP, IMP)	Population assigned to grids with residential buildings (POP) Impervious surface ratio (IMP)	MOE MOIS SGIS

Note: MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport); MOE (Ministry of Environment); MOIS (Ministry of the Interior and Safety); SGIS (Statistical Geographic Information Service)

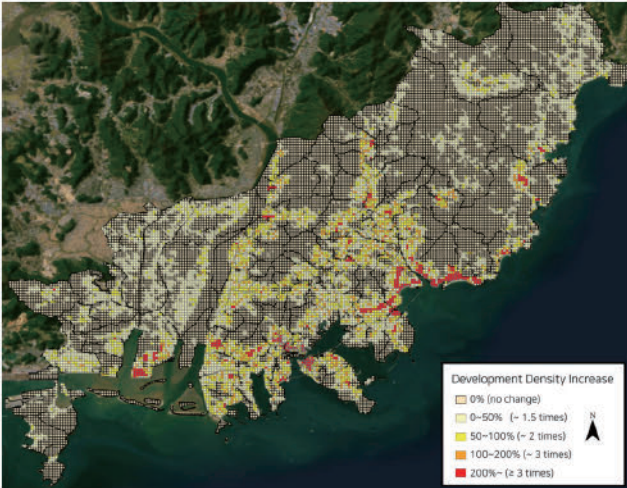


Figure 1. Development density increase rate (2000-2023)

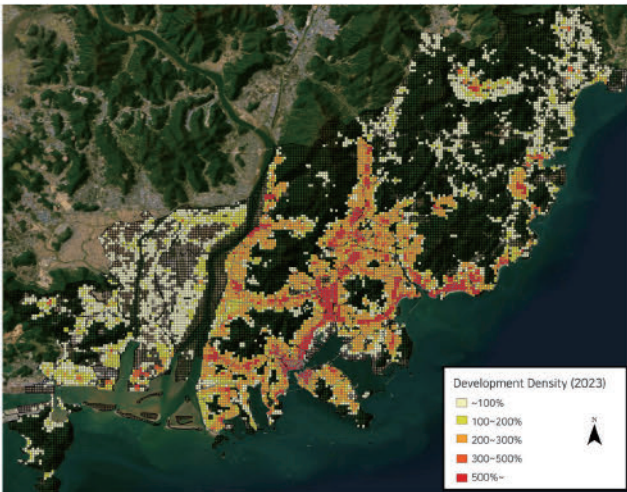


Figure 2. Development density (2023)

일반적으로 경관 지수 분석에 활용되는 대분류 토지피복도보다 높은 데이터 적합성을 제공한다.

데이터 구축 과정에서는 먼저 녹지, 습지, 농지 등 일정 규모 이상의 개발이 제한된 공간을 사전에 제외하기 위해 <표 2>의 정수형 분류 체계를 기준으로 시가화(built-up) 범주만을 추출한 후 래스터 형식으로 변환하였다. 이는 본 연구가 생태계 단위의 경관 파편화가 아닌, 규제 완화로 인한 도시공간 구조 변화를 관찰하는 데 목적을 두기 때문이다. 이와 같은 전처리 방식은 도시형 파편화와 생태경관형 파편화를 구분함으로써 도시공간 변화 신호가 희석될 가능성을 최소화하려는 기존 연구의 접근과도 일치한다(Irwin and Bockstael, 2007; Jaeger et al., 2010).

래스터 변환 시 해상도는 원본과 동일한 5m를 유지하였으며, 이는 해상도 변경으로 발생할 수 있는 경계 단순화 및 공간정보 왜곡을 방지하기 위함이다. 최종 구축된 래스터 데이터는 FRAGSTATS 4.3을 활용하여 지표별 파편화 지수로 산정하였다.

파편화 지수의 종류는 선행연구에서 보편적으로 활용한 패치 크기, 패치 개수, 고립도, 연결성, 형상 복잡성 등 핵심 공간구조

Table 2. Land-cover reclassification for fragmentation and impervious analysis

Land cover classes		Reclassified category	
Level-1 code	Level-2 code		
Built-up	100	Residential 110	Impervious
		Industrial 120	Impervious
		Commercial 130	Impervious
		Recreational 140	Impervious
		Transportation 150	Impervious
		Public facilities 160	Impervious
Agriculture	200	Rice fields 210	Pervious
		Crop fields 220	Pervious
		Green house 230	Impervious
		Orchard 240	Pervious
		Others 250	Pervious
	Forest	300	Broadleaved 310
		Coniferous 320	Pervious
		Mixed 330	Pervious
Grassland	400	Natural 410	Pervious
		Artificial 420	Pervious
Wetland	500	Inland 510	Pervious
		Coastal 520	Pervious
Bare ground	600	Natural 610	Pervious
		Artificial 620	Pervious
Water	700	Inland 710	Water
		Coastal 720	Water

특성을 고려하여 선정하였으며, 모든 지수는 시가화 범주에 해당하는 토지피복을 추출하여 산정되었다(표 3). 해당 지표들은 불연속적 개발 및 공간 구조 변화에 민감하게 반응하며, 규제 완화가 매개하는 도시 파편화 현상을 포착하는 데 특히 유효한 것으로 검증된 바 있다(Jaeger and Schwick, 2014; Canedoli et al., 2018).

두 번째 종속변수로 재해 노출 지수는 침수지역 내 인구와 불투수면적의 변화로 측정하였다. 침수지역 인구는 재해에 노출될 잠재 인구 집단의 규모를 직접적으로 반영하며, 불투수 면적은 강우 시 유출수 증가와 침수 가능성을 설명하는 핵심 요인이다. 이 두 변수는 선행연구에서도 재해 노출의 대표적 지표로 반복적으로 활용되어 왔으며, 소규모 공간 단위 및 장기간 비교가 가능하다는 점에서 본 연구의 분석 목적과도 부합한다(Cutter et al., 2000; Fekete, 2009).

침수지역의 공간 범위는 행정안전부에서 제공하는 침수흔적도를 누적하여 구축하였다. 인구 데이터는 침수지역 내 거주 인구의 변화를 반영하기 위해 구축하였고, 세분화된 분석의 공간 단위로 인해 발생하는 가공오차를 줄이기 위해 주거가 가능한 건물

Table 3. Definitions, interpretations, and value ranges of fragmentation indices

Category	Index	Definition	Interpretation	Value range
Size & Number	NP (Number of patches)	Total number of built-up patches	Higher NP → more fragmented	≥0
	PD (Patch density)	Number of patches per unit area	Higher PD → finer-grained fragmentation	≥0
	AREA (Mean patch size)	Average area of built-up patches	Smaller AREA → prevalence of small-scale development	≥0
Isolation & Connectivity	CONTIG (Contiguity index)	Spatial connectedness of cells	Higher CONTIG → more spatially contiguous patches	0~1
	CONTAG (Contagion index)	Degree of adjacency	Higher CONTAG → more aggregated spatial pattern	0~100
Complexity & Shape	SHAPE (Area weighted mean shape)	Average complexity of patch shapes	Higher SHAPE → more irregular patch shape	≥1
	FRAC (Fractal dimension index)	Shape complexity across scales	Higher FRAC → more complex patch geometry	1~2
	PERI (Mean perimeter-to-area ratio)	Ratio of patch perimeter to area	Higher PERI → more complex edges relative to area	>0

이 존재하지 않는 격자를 제외한 후, 집계구 인구 데이터를 잔존한 인접 격자에 반영하였다.

불투수면적 또한 환경공간정보서비스에서 제공하는 중분류 토지피복지도(2004년, 2023년)를 기반으로 구축하였으며, 해당 자료는 Landsat TM(2000)과 ETM+(2022) 영상 등 원시자료를 통합하여 제작된 구축된 지도이다. 해당 지도는 5m 수준의 해상도로 도시공간의 미시적 변화와 토지피복 유형을 비교적 정확하게 반영할 수 있는 장점이 있다.

불투수면적을 산정하는 과정에서는 <표 2>에서 제시한 분류 체계를 적용하여, 중분류 토지피복지도에 포함된 모든 토지피복 유형을 불투수, 투수, 수역의 세 범주로 재분류하였다. 그 이후 200m 격자 체계를 중첩하고, 각 격자 안에서 불투수로 재분류된 토지피복 유형의 면적을 합산한 뒤 격자 전체 면적으로 나누어 격자별 불투수면적 비율을 계산하였다. 투수성 포장재와 같이 세부적인 재료 특성에 따라 투수 여부가 달라질 수 있는 유형은 토지피복 지도에서 별도의 범주로 구분되어 있지 않기 때문에, 토지피복 분류 체계가 제공하는 범위 내에서 인공 피복 여부를 기준으로 일관되게 처리하였다.

본 연구에서 사용된 원자료는 변수별로 수십만 개의 개별 객체로 구성되어 있고, 자료의 형식 또한 상이하여 원자료 수준의 기술통계를 제시하는 것은 적절하지 않다. 이에 본 연구에서는 실제로 분석에 활용되는 격자 단위 변수를 중심으로 기술통계량을 제시하였다(표 4). 일부 변수는 고도 비대칭 분포와 높은 첨도가 나타났으며, 이는 도시 개발 특성 및 규제 완화의 공간적 편중에 기인하는 구조적 특징으로 해석된다. 이러한 분포를 보정하기 위해 세 가지 변수(Deregulation_Area, AREA, POP)에 대해서는 값이 0인 격자를 감안하여 $\log(x+1)$ 변환을 적용하였다.

3. 연구 방법론

본 연구는 앞서 제시한 세 가지 연구가설을 검증하기 위해 다중회귀분석 기반의 정량적 분석 절차를 적용하였다. H1과 H2 검증을 위해 두 차례의 회귀모형을 구축하였으며, 분석 단위는 부산광역시 전역을 200m×200m 격자로 구획한 19,340개의 공간 단위로 설정하였다. 다만, 2023년 기준 개발이 법적으로 엄격히 제한되어 있어 도시적 토지이용 변화가 발생할 수 없는 구역은 분석 목적에 부합하지 않는 영역으로 판단하여 제외하였다. 각 격자에서는 2000년부터 2023년까지 누적된 토지이용규제 완화율, 완화건수, 완화 면적을 독립변수로 설정하였으며, 첫 번째 회귀모형에서는 파편화 지수를, 두 번째 회귀모형에서는 재해 노출 지수를 종속변수로 지정하였다.

다중회귀분석의 타당성을 검증하기 위해 두 모형에 대해 Jarque-Bera 검정값, 왜도, 첨도를 기반으로 잔차의 정규성을 평가하였다(표 5). 두 모형 모두 p-value가 0.05 이상을 나타냈으며, 왜도와 첨도 또한 통상적 기준 범위 내에서 안정적인 값으로 확인되었다(Kline and Santor, 1999; George, 2010). 이에 따라 두 회귀모형의 잔차는 정규성 가정을 위반하지 않은 것으로 판단하였고, 분석 결과의 통계적 해석은 유효한 것으로 간주된다. 정규성 검증 결과 두 모형 모두 통계적 가정을 만족하는 것으로 확인됨에 따라, 이후 단계에서는 회귀분석 결과를 중심으로 토지이용규제 완화가 개발확산과 재해 노출에 미치는 영향을 해석하였다.

파편화 지수에서 built-up 유형이 존재하지 않는 격자를 결측값으로 처리하지 않고 0으로 부여하였다. 이는 해당 격자가 측정 불능(missing)이 아니라, 도시적 개발이 발생하지 않은 '파편화

Table 4. Descriptive statistics of variables (200 m×200 m grid)

Variable (n=19,340)	Description	Mean	Std. Dev.	Min	Max	Skewness	Kurtosis
Deregulation_Area	Area of deregulation (m ²)	1,483	4,872	0	40,000	6.351	29.477
Deregulation_Rate	Deregulated proportion of grid	0.043	0.122	0	1	2.864	6.233
Deregulation_Count	Number of deregulation cases	0.073	0.416	0	6	4.872	5.387
NP	Number of patch	6.874	3.220	1	24	0.373	2.890
PD	Patch density	0.183	0.133	0.01	0.725	0.677	3.876
AREA	Mean patch size	1,425	2,923	58	40,000	5.087	19.812
CONTIG	Contiguity index	0.424	0.211	0.038	0.982	0.593	4.016
CONTAG	Contagion index	48.13	13.27	10.81	80.164	-0.088	3.169
SHAPE	Area weighted mean shape index	1.352	0.538	1	5.853	1.121	4.895
FRAC	Area weighted mean fractal dimension	1.092	0.054	1.083	1.418	0.249	3.121
PERI	Mean perimeter-to-area ratio	0.076	0.049	0.011	0.264	3.426	5.933
POP	Population in hazardous area	2.164	88.314	0	4,816	8.314	78.523
IMP	Impervious surface ratio (%)	38.142	24.180	0	100	0.728	3.644

Note: Variables exhibiting substantial non-normal distribution due to strong right-skewness and high kurtosis. [Deregulation_Area, AREA, POP] were log-transformed using a natural logarithmic form of log (x+1)

Table 5. Normality diagnostics for regression residuals

Category	Model 1 (Fragmentation)	Model 2 (Hazard exposure)
Sample size	19,340	19,340
Jarque-Bera statistic	2.840	3.122
p-value	0.091	0.078
Skewness	0.120	0.153
Kurtosis	3.083	3.116
Normality decision	No significant deviation from normality	No significant deviation from normality

가 존재하지 않는 상태'를 의미하는 유효한 관측값으로 간주되기 때문이다. 이러한 처리 방식은 분석 대상 공간 전체에서 해석의 일관성을 유지하고, 회귀계수의 해석 과정에서 토지이용 변화가 발생하지 않은 격자를 적절히 비교 대상으로 포함하기 위한 목적을 가진다.

H3에 대해서는 해안지역과 내륙지역 간의 차이를 검정하기 위해 다변량분산분석(MANOVA)를 실시하였다. MANOVA는 분산분석(ANOVA)를 확장한 기법으로, 종속변수가 2개 이상일 때 집단 간 평균 차이를 동시에 검정할 수 있다. 본 연구에서는 해안 지역 여부를 독립변수로, 파편화지수와 재해노출지수를 종속변수로 설정하였다. 해안지역과 내륙지역은 해안선으로부터 1km 범위를 버퍼(buffer)영역으로 지정하여 구분하였다.²⁾ 이 기준은 한국의 연안 육역에 대한 정의와 유럽환경청(EEA)의 연안대(coastal zone) 및 EU 연안 지표체계 연구 등에서 표준 분석 단위로 활용된 기준에 근거하였다(EEA, 2006; DEDUCE Project, 2007; 국토교통부, 2010; 최영국 외, 2012).

분석의 절차는 다음과 같다. 첫째, 파편화 지수 및 재해노출 지수를 대상으로 정규성 검정을 실시한다. 둘째, 정규성 검정을 통과

한 지수들에 대해 다중회귀분석을 실시하고, 토지이용계획 완화가 토지이용의 파편화 및 재해노출에 미치는 영향을 확인한다. 셋째, 다중회귀분석에서 유의하게 나타난 변수에 대해 MANOVA 분석을 실시한다. 본 연구는 해당 과정을 통해 토지이용규제 완화의 영향이 공간에 따라 상이하게 나타나는지를 규명하고, 토지이용의 지속가능성과 방재 측면에서 공간적 맥락 고려의 필요성을 도출하고자 하였다.

IV. 분석 결과

1. 가설 1과 2의 검증: 파편화 지수 및 재해노출

다중회귀분석 결과, 토지이용규제 완화는 대부분의 파편화 지수에서 통계적으로 유의한 영향을 보였으며, 파편화와 공간구조 변화를 통해 개발확산 및 재해 노출을 매개하는 방향성이 확인되었다(표 6).

먼저, NP(패치개수지수)에서는 규제 완화율과 규제 완화 면적이 모두 정(+)의 계수를 보이며, 규제가 완화될수록 새로운 개발

Table 6. Results of multiple regression analysis

Type	Variable	Coefficient (beta)	t statistic	R ²	Adj. R ²	F statistic
Fragmentation index	NP (Number of patches)					
	Deregulation_Rate	0.387 ***	3.422	0.212	0.202	1,456.3
	Deregulation_Count	-0.142 **	-2.281			
	Deregulation_Area	0.367 ***	3.544			
	PD (Patch density)					
	Deregulation_Rate	0.573 ***	4.883	0.271	0.261	1,982.7
	Deregulation_Count	-0.376 ***	-3.983			
	Deregulation_Area	0.377 ***	4.061			
	AREA (Mean patch size)					
	Deregulation_Rate	-0.488 ***	-4.792	0.309	0.298	2,347.9
	Deregulation_Count	0.354 ***	3.479			
	Deregulation_Area	-0.451 ***	-4.977			
	CONTIG (Contiguity index)					
	Deregulation_Rate	-0.332 ***	-3.386	0.092	0.082	567.4
	Deregulation_Count	-0.189 **	-2.033			
	Deregulation_Area	-0.179 **	-1.896			
	CONTAG (Contagion index)					
	Deregulation_Rate	-0.183 ***	-1.978	0.131	0.121	793.2
	Deregulation_Count	-0.323 ***	-3.618			
	Deregulation_Area	0.288 **	3.006			
	SHAPE (Area weighted mean shape index)					
Deregulation_Rate	-0.096 **	-1.383	0.010	0.003	47.8	
Deregulation_Count	0.139	1.516				
Deregulation_Area	0.084	1.298				
FRAC (Fractal dimension index)						
Deregulation_Rate	0.272 **	2.052	0.028	0.019	121.6	
Deregulation_Count	-0.184	-1.597				
Deregulation_Area	-0.232	-2.041				
PERI (Mean perimeter-to-area ratio)						
Deregulation_Rate	0.196 **	2.316	0.183	0.172	1,118.4	
Deregulation_Count	0.418 **	4.377				
Deregulation_Area	0.344 **	3.833				
Hazard exposure	POP (Population in flooded area)					
	Deregulation_Rate	0.364 **	3.761	0.264	0.253	1,946.5
	Deregulation_Count	0.410 ***	4.066			
	Deregulation_Area	0.513 ***	4.712			
	IMP (Impervious surface ratio)					
	Deregulation_Rate	0.463 ***	4.681	0.301	0.290	2,338.7
Deregulation_Count	0.339 ***	2.101				
Deregulation_Area	0.442 ***	4.769				

*p<0.1; **p<0.01; ***p<0.001

패치가 증가하는 경향을 나타냈다. 반면, 규제 완화 건수는 음(-)의 값을 보여, 다수의 규제 완화가 오히려 기존 패치를 합병하거나 대규모 단위 개발로 이어져 패치 수를 줄이는 경향을 반영하는 패턴이 나타났다.

PD(패치 밀도 지수)에서도 규제 완화율과 규제 완화 면적은 일관되게 정(+)의 방향으로 유의하였으며, 이는 규제 완화가 시가화 패치를 보다 미세하고 조각난 형태로 확산시키는 경향을 나타낸다. 반면, 규제 완화 건수는 부(-)의 영향을 보였으며, 완화 건수가 많아질수록 소규모 파편보다는 대규모 단위의 개발이 이루어져 패치 밀도의 증가를 억제하는 경향으로 해석된다.

AREA(평균 패치크기 지수)에서는 규제 완화율과 규제 완화 면적이 모두 부(-)의 방향으로 유의하게 나타나, 값이 증가할수록 패치의 평균 규모가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 규제 완화가 진행될수록 소규모 단위의 개발이 증가함을 시사한다. 반면, 규제 완화 건수는 AREA 지수에 정의 영향을 보여, 규제 완화 건수가 많아질수록 개별 패치의 규모가 확대되는 경향이 있음을 보여준다.

위의 세 지수(NP, PD, AREA)는 토지이용규제 완화가 패치 특성에 미치는 영향을 서로 다른 방식으로 설명한다. <표 7>에서는 각 지수의 계산식과 함께, 규제 완화 면적과 규제 완화 건수가 실제로 도시의 공간구조에 어떠한 영향을 미치는지 개념적으로 도식화하였다. 첫 번째 모식도는 규제 완화 면적이 증가할 경우를 나타낸 것으로, 주변 지역에는 다수의 소규모 개발 패치가 분포하는 경향이 뚜렷하다. 이는 새로운 개발이 산발적으로 이루어지면서 파편화가 심화되는 양상으로, NP와 PD의 증가는 동시에 AREA의 감소와 연결된다. 즉, 개발이 소규모 단위로 확산되면서 패치의 수와 밀도가 증가하고, 평균 크기는 축소되는 현상을 의미한다.

두 번째 모식도는 규제 완화 건수가 증가할 경우를 표현한 것으로,

이때는 소수의 대규모 개발 패치가 형성되는 양상이 나타난다. 이는 다수의 규제 완화가 기존 패치를 병합하거나 대규모 단위로 개발을 집중시키는 방식으로 작용함을 보여준다. 이 경우 NP와 PD는 오히려 감소하고, AREA는 증가하는 방향으로 나타난다. 즉, 패치 수와 밀도는 줄어들지만 평균 패치 크기는 커지면서, 공간구조가 집적된 형태로 변화하는 것이다. 따라서 세 지수는 규제 완화의 특성(면적 중심인지, 건수 중심인지)에 따라 서로 다른 개발 패턴을 반영하며, 이를 통해 토지이용 규제 완화가 공간구조에 미치는 영향을 다차원적으로 해석할 수 있다.

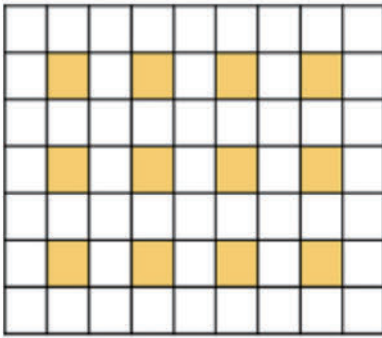
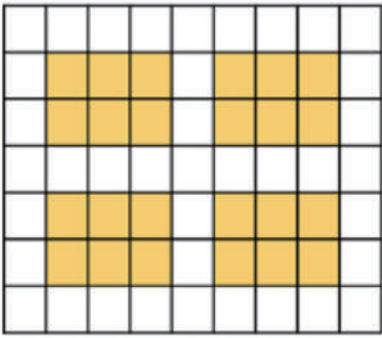
CONTIG(연속성지수)의 경우, 규제 완화율과 건수가 각각 음의 영향을 미쳐 규제가 완화될수록 패치 간 공간적 연속성이 낮아지는 것으로 나타났으며, 이는 다수의 개발 허용이 토지이용 구조의 분절화를 심화시킬 수 있음을 의미한다. 다만 규제 완화 면적 변수의 경우, 통계적으로는 유의하지 않은 수준이었다.

CONTAG(집중도 지수)에서는 규제 완화율과 규제 완화 건수가 음(-)의 방향으로 나타났으며, 이는 공간 패턴의 균질성과 집적도가 약화되고 분절화된 개발 형태가 강화되는 경향과 연관된다. 반면, 규제 완화 면적은 정(+)의 값을 보여, 단일 규모의 완화가 더 집적된 개발로 이어질 가능성을 시사하며 다른 변수들과 구분되는 결과를 보였다.

SHAPE(형태지수)의 경우, 규제 완화율만이 음(-)의 계수 방향성을 보였으나, 규제 완화 건수와 면적은 통계적으로 유의하지 않은 결과를 나타냈다. 다만 해당 모형의 설명력이 매우 제한적이라는 점을 고려할 때, 이러한 결과는 규제 완화와 도시 경계 형태 간의 뚜렷한 관계를 확인하기보다는, 약한 연관 가능성을 시사하는 수준으로 해석하는 것이 타당하다.

FRAC(프랙탈 지수)의 경우, 규제 완화율이 통계적으로 유의한 계수를 보였으나, 완화 건수 및 면적은 유의하지 않은 결과를

Table 7. Fragmentation indices: formulas and conceptual effects of land use deregulation

NP (Number of patches)	PD (Patch density)	AREA (Mean patch size)
$NP = n_i$ $n_i = \text{number of patches}$	$PD = \frac{n_i}{A}$ $n_i = \text{number of patches}$ $A = \text{total landscape area (m}^2\text{)}$	$AREA = a_{ij} \left(\frac{1}{10,000} \right)$ $a_{ij} = \text{area (m}^2\text{) of patch } ij$
		
Impact of Deregulation_Area		Impact of Deregulation_Count

나타냈다. 그러나 FRAC 모형 역시 설명력이 매우 낮은 수준에 머물러 있어, 본 결과는 규제 완화율과 토지피복 형태의 복잡성 간에 제한적인 통계적 연관이 존재할 가능성을 보여주는 것으로 해석된다. 즉, 규제 완화율이 형태적 복잡성 변화에 일정 부분 관련될 수는 있으나, 그 영향력은 제한적이며 다른 요인들의 영향을 함께 고려할 필요가 있다.

PERI(경계비율 지수)에서는 세 규제 변수 모두 정(+)으로 나타나, 규제 완화가 면적 대비 경계 길이가 더 길고 복잡한 개발 패턴을 강화하는 데 일관된 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

재해노출 지표 중 POP(침수지역 내 인구)은 규제 완화율, 건수, 면적에서 모두 정(+)의 방향으로 유의하게 나타났으며, 이는 규제 완화가 진행될수록 침수에 노출되는 인구가 증가하는 경향을 의미한다. IMP(불투수면적 비율) 역시 규제 완화율, 건수, 면적에서 모두 정(+)의 영향을 보이며, 규제 완화가 불투수면적을 확대하여 재해위험을 심화시키는 경향을 뚜렷하게 나타냈다.

종합하면, 규제 완화율과 규제 완화 면적은 공간 파편화, 경계 복잡화 및 불투수면적 증가로 이어지는 경향이 뚜렷했으며, 규제 완화 건수는 일부 파편화 지수에서 상반된 형태를 보였으나 재해노출 변수에서는 일관된 정(+)의 결과를 나타냈다. 이는 본 연구의 가설1과 가설2 “토지이용규제의 완화는 토지이용 파편화를 매개로 개발확산을 촉진하며, 이는 재해 노출을 증가시킨다.”를 지

지하는 결과이다.

2. 가설 3의 검증: 해안지역 유무

다중회귀분석 결과 유의하게 나타난 파편화 지수(NP, PD, AREA, CONTIG, CONTAG, PERI)와 재해노출 지수(POP, IMP)를 대상으로 해안지역 유무에 따른 차이를 검정하기 위해 MANOVA 분석을 수행하였다. 분석에 앞서 각 종속변수의 등분산성을 확인하기 위해 Levene 검정을 실시한 결과, 모든 변수에서 유의확률이 0.05 이상으로 나타나 집단 간 분산 차이가 통계적으로 유의하지 않았으며, 따라서 등분산 가정이 충족되는 것으로 확인되었다(표 8).

본 연구에서는 도시공간 구조의 파편화 양상과 재해노출 수준이 서로 다른 차원의 지표임을 고려하여 두 가지 범주로 나누어 MANOVA를 수행하였다. 첫 번째 분석에서는 파편화 지수(NP, PD, AREA, CONTIG, CONTAG, PERI)를 종속변수로 설정하고, 해안선에서 1km 이내의 해안지역과 내륙지역을 구분하여 집단 간 차이를 검증하였다. 분석 결과, 모든 다변량 검정 통계량에서 $p < 0.01$ 의 수준으로 유의하게 나타나, 해안지역과 내륙지역 사이에는 파편화 지수 전반에 걸쳐 통계적으로 유의한 차이가 존재함이 확인되었다(표 9).

Table 8. Results of Levene's test for equality of error variances

Dependant Variable	F statistic	p-value	Homogeneity assumption
NP (Number of patches)	0.96	0.32	Not violated
PD (Patch density)	0.84	0.42	Not violated
AREA (Mean patch size)	1.11	0.32	Not violated
CONTIG (Contiguity index)	0.87	0.37	Not violated
CONTAG (Contagion index)	1.12	0.28	Not violated
PERI (Mean perimeter-to-area ratio)	1.07	0.30	Not violated
POP (Population in hazardous area)	1.01	0.32	Not violated
IMP (Impervious surface ratio)	0.72	0.44	Not violated

Table 9. MANOVA results for fragmentation and hazard exposure indices by coastal area

Dependent variable set	Effect	Value	F statistic (df1, df2)	p-value
Fragmentation indices (NP, PD, AREA, CONTIG, CONTAG, PERI)	Coastal area	Pillai's trace=0.212	F(6, 19,333)=4.215	0.002**
		Wilks' lambda=0.661	F(6, 19,333)=4.322	0.001**
		Hotelling's trace=0.251	F(6, 19,333)=4.287	0.001**
		Roy's largest root=0.233	F(6, 19,333)=5.021	0.002**
Disaster exposure indices (POP, IMP)	Coastal area	Pillai's trace=0.231	F(2, 19,335)=4.037	0.002**
		Wilks' lambda=0.764	F(2, 19,335)=4.362	0.002**
		Hotelling's trace=0.253	F(2, 19,335)=4.555	0.002**
		Roy's Largest root=0.206	F(2, 19,335)=5.087	0.002**

**p<0.01

그러나, MANOVA는 전체 종속변수 집합의 차이만을 보여줄 뿐 구체적으로 어떤 지표에서 집단 간 차이가 발생하는지는 알 수 없다. 이에 본 연구에서는 개별 지표별 차이를 확인하기 위해 사후 단변량 ANOVA를 실시하였다. 그 결과, CONTAG를 제외한 모든 파편화 지수에서 집단 간 차이가 유의하게 나타났다(표 10). 그중에서도 NP와 PD는 해안지역에서 유의하게 높은 평균값을 보여 해안지역의 패치 수와 패치 밀도가 상대적으로 크다는 점을 보여주었다. 반면 AREA와 CONTIG는 해안지역에서 유의하게 낮은 값을 보여 패치의 평균 크기가 작고 패치 간 연속성이 약화되는 경향이 뚜렷함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 해안지역에서의 개발이 내륙지역에 비해 더 파편적이고 불연속적인 공간 패턴을 보이며, 이는 토지이용규제 완화가 공간구조의 단절을 심화시키는 방향으로 작용했음을 시사한다. PERI의 경우, 해안지역에서 유의하게 더 높은 것으로 나타나 해안지역의 개발 패턴이 내륙에 비해 불규칙하고 미시적으로 단절된 구조를 보였고, CONTAG의 경우 본 연구의 유의수준 설정 기준에 미치지 않아 통계적으로 유의한 차이가 있다고 보기 어려웠다. 그러나 효과 크기가 일정 수준(partial $\eta^2=0.008$) 존재한다는 점에서, 해안지역의 공간 연속성이 일부 약화되는 경향이 존재할 가능성은 해석적으로 고려될 수 있다.

두 번째 MANOVA에서는 재해노출 지수(POP, IMP)를 종속변수로 설정하여 동일한 방식으로 집단 간 차이를 검증하였다. 분석 결과, 모든 다변량 검정 통계량에서 $p<0.01$ 수준으로 유의하게 나타나 해안지역과 내륙지역 간 재해노출 수준에도 뚜렷한 차이가 존재하는 것으로 확인되었다(표 9). 재해노출 지수에 대한 사후 단변량 ANOVA 결과, POP과 IMP 모두 해안지역에서 유의하게 높은 값을 보여주었다(표 11). 이는 해안지역에 집중된 개발로 인해 더 많은 인구와 불투수면적이 누적되어 재해 발생 시

위험이 내륙보다 크게 나타날 수 있음을 보여준다. 이 결과는 해안지역이 개발 과정에서 공간구조뿐만 아니라 높은 재해노출 특성까지 변화시키고 있음을 알 수 있다.

종합적으로 볼 때, 파편화 지수와 재해노출 지수 모두에서 해안지역과 내륙지역 간 유의한 차이가 확인되었으며, 이는 본 연구의 가설3 “해안지역과 내륙지역 간에는 파편화 및 재해노출 수준에서 차이가 존재할 것이다”를 지지하는 결과이다. 더 나아가 해안이 내륙과 상이한 공간적 특성을 지니는 동시에 기후변화에 민감한 지역임을 보여주는 결과로, 토지이용계획을 통한 연안 도시의 개발관리와 방재적 토지의 선제 확보의 중요성을 시사한다.

V. 결론

최근 극한기후는 기존에 예상할 수 있었던 시기와 장소를 벗어나 발생하며 막대한 피해를 초래하고 있으며, 이러한 양상은 단순한 대응의 범위를 넘어서는 수준에 이르고 있다. 재난은 잠재적 위험 환경에 사람이 거주할 때 현실화되며, 인구와 자원이 존재하지 않는다면 재난으로 규정되기 어렵다. 이러한 관점에서 기후변화 시대의 지속가능한 도시는 단순히 물리적 피해를 줄이는 대응을 넘어, 위험에 노출된 인구와 자산을 줄이고 도시 공간구조를 회복탄력적으로 관리하는 전략을 필요로 한다.

토지이용계획은 개발의 양상을 결정짓는 핵심 제도로서, 도시의 공간구조와 재해 노출에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 도시계획은 개발 효율성을 넘어 기후위험 관리의 근본적 수단으로 인식되어야 하며, 본 연구는 이러한 논의에 학문적·실천적 근거를 제공하고자 수행되었다. 분석 결과, 규제 완화율과 면적은 NP(패치개수지수)와 PD(패치밀도지수)를 유의하게 증가시켜 신규 패치의 생성과 공간적 세분화를 촉진하였다. 이는 규제 완화

Table 10. Follow-up univariate ANOVAs for fragmentation indices by coastal area

Dependent variable	F (1, 19,338)	p-value	Partial η^2
NP (Number of patches)	7.41	0.006**	0.011
PD (Patch density)	9.84	0.001**	0.014
AREA (Mean patch size)	11.68	<0.001***	0.015
CONTIG (Contiguity index)	4.38	0.035	0.007
CONTAG (Contagion index)	5.82	0.016	0.008
PERI (Mean perimeter-to-area ratio)	8.41	0.004**	0.011

** $p<0.01$; *** $p<0.001$

Table 11. Follow-up univariate ANOVAs for hazard exposure indices by coastal area

Dependent variable	F (1, 19,338)	p-value	Partial η^2
POP (Population in hazardous area)	14.42	<0.001***	0.019
IMP (Impervious surface ratio)	16.70	<0.001***	0.022

*** $p<0.001$

가 누적적 소규모 개발을 통해 파편화를 심화시킨다는 점을 보여 준다. 동시에 AREA(평균패치크기지수)는 감소하여 평균 패치 규모가 축소되었으며, 이는 대규모 단일 개발보다는 소규모 개발의 누적적 공간구조 변화를 주도했음을 시사한다.

규제 완화 건수는 NP와 PD에 부(-)의 영향을, AREA에는 정(+)의 영향을 주어 다수의 제도적 완화가 오히려 대규모 개발 단위를 형성하거나 기존 패치를 통합하는 방향으로 작용했으나, 그 효과는 제한적이었다. CONTIG(연속성지수)와 CONTAG(집중도지수)도 규제 완화율이 높을수록 감소해 공간적 연속성이 약화되는 모습을 보였으며, FRAC(프랙탈지수)와 PERI(경계 비율지수)는 규제 완화율에서 양(+)의 효과를 보여 토지피복 형태의 복잡성이 심화되는 경향을 보였다. 또한 규제 완화율과 면적이 높은 격자에서는 파편화 지수와 POP(위험지역인구)와 IMP(불투수면적) 지표가 일관되게 높은 증가폭을 보였으며, 이러한 경향은 동일한 연안 지역 내에서도 규제 완화가 허용된 구역으로 개발과 위험이 집중되는 효과가 존재함을 의미한다. 즉, 규제 완화가 연안 도시의 개발과 재해노출 구조를 형성하는 데 핵심적인 매개요인으로 작동해 왔음을 확인할 수 있다.

본 연구는 토지이용규제 완화가 도시의 공간구조를 어떻게 변화시키며, 이러한 변화가 개발확산과 재해 노출로 이어지는지를 실증적으로 규명했다는 점에서 의의를 가진다. 특히 기존 연구가 물리적 취약성이나 구조적 대응에 초점을 맞춘 것과 달리, 파편화 지수와 재해노출 지표를 통합적으로 활용하여 제도 변화가 도시의 취약성에 미치는 구조적 함의를 밝혀냈다는 점에서 차별점을 가진다. 이러한 결과는 도시계획이 단순한 개발관리 수단을 넘어 기후위험 관리의 핵심적 제도임을 확인시켜주며, 연안 도시의 지속가능성과 안전성을 위한 정책적 논의에도 중요한 기초를 제공한다.

본 연구에서 도출된 공간적 변화 패턴은 부산이라는 사례를 통해 관찰되었으나, 그 방향성은 연안 도시가 공통적으로 직면하는 개발 압력과 기후위험 구조와 밀접하게 연관된다. 특히 해안 접근성과 수변 개발 수요가 결합되는 지역에서는 규제 완화가 소규모의 산발적 개발을 촉진하며, 이는 패치 개수 증가, 패치 면적 축소, 연속성 약화와 같은 전형적 파편화 메커니즘으로 이어질 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 사례에서 나타난 결과는 규제 완화가 개발 자체의 문제라기보다, 그 방식과 속도, 그리고 누적적 공간효과가 관리되지 않을 때 도시의 회복력 저하를 초래할 수 있음을 보여준다. 따라서 연안 도시에서는 규제 완화 조치가 단기 개발수요 대응을 넘어, 장기적 토지이용 구조의 안정성, 기후위험의 적응, 기반시설 수용 능력을 함께 고려하는 방향으로 설계될 필요가 있다. 이러한 관점에서 본 연구의 결과는 부산을 넘어서, 유사한 환경적 조건을 가진 연안 도시 전반에 적용가능한 시사점을 제공한다.

다만 본 연구는 몇 가지 한계를 가진다. 급격한 연안개발과 반

복적인 재해 피해가 공존하는 사례지역으로써 국내에서는 부산광역시로 한정되어 있어 일반화에는 제약이 있으며, 연구 기간 또한 2000년에서 2023년으로 제한된다. 이는 토지이용계획 변화와 건축물 자료가 해당 시기부터 구축되기 시작했기 때문으로, 장기적 추세를 충분히 반영하지 못하는 제약을 수반한다. 또한 본 연구가 활용한 지표들은 공간구조와 위험을 설명하는 데 유용하지만, 조밀한 공간 단위 분석에 치중함으로써 사회경제적 취약성이나 제도적 대응 역량을 포함하지 못했다는 점에서 한계가 있다. 아울러 본 연구는 관찰자료 기반의 공간분석으로, 규제 완화가 특정 개발을 직접적으로 유발했다는 인과를 확인하기 위한 목적은 아니며, 연안의 인프라와 입지 매력도 등 다른 요인들과 복합적으로 작용했을 가능성이 있다. 따라서 분석 결과는 규제 완화와 개발과 위험 노출의 공간적 연계를 보여주는 사례적 접근으로 해석되어야 한다.

이러한 한계를 보완하기 위해서는 여전히 아날로그 방식에 의존하고 있는 계획 데이터의 구축과 보존 체계가 우선적으로 개선될 필요가 있다. 데이터 인프라가 안정적으로 확보된다면, 향후 연구에서는 다양한 도시 맥락을 비교하고 사회·제도적 요인을 통합하며, 기후변화 시나리오를 적용한 예측 모형을 활용할 수 있을 것이다. 이는 토지이용계획 변화가 미래의 위험과 회복력에 미치는 영향을 보다 명확하게 규명할 수 있게 할 것이다. 궁극적으로, 이러한 후속 연구의 축적은 도시계획과 기후위험 관리의 통합적 접근을 발전시키고, 연안 도시의 지속가능성과 안전성을 강화하는 데 기여할 것으로 기대된다.

주1. 본 연구에서 사용한 토지이용계획 변수는 2000-2023년 동안 부산광역시에서 발생한 토지이용규제 완화 결정만을 선별하여 구축하였으며, 각 결정은 공간 단위(격자)와 결정 시점, 규제 완화의 내용(용도지역 상향, 용도지구 해제, 완화, 용적률 상향 등)을 포함하는 데이터베이스로 정리하였다. 이 가운데 개발 밀도를 상향하는 방향으로 적용한 건만을 규제 완화 사례로 포함하였고, 단순 정비, 조성이나 용적률 인센티브 등을 반영하기 위해 건축물 통합 정보를 교차 검증하여 개별 건축물의 개발밀도와 해당하는 토지의 밀도 중 높은 값을 반영하였다. 이후 이러한 규제 완화 폴리곤을 200m×200m 격자와 겹쳐 각 격자별로 다음의 세 가지 지표를 산정하였다.

(1) 완화 건수(Deregulation_Count)

각 격자에 대해 분석 기간 동안 해당 격자와 공간적으로 교차한 규제 완화 결정의 수를 누적 합산하였다. 하나의 규제 완화 폴리곤이 여러 격자에 걸쳐 있을 경우, 그 폴리곤이 교차하는 격자마다 1건으로 계산하였다. 반대로, 동일 격자 내에서 서로 다른 시점에 여러 차례 규제 완화가 반복된 경우에는 각 결정을 별도의 건으로 집계하여, 해당 격자에서 시행된 규제 완화의 누적 빈도를 나타내도록 하였다.

(2) 완화 면적(Deregulation_Area)

각 격자에서 규제 완화가 실제로 적용된 공간적 범위를 나타내는 지표로, 분석 기간 동안 격자와 교차하는 규제 완화 폴리곤의 총면적(m^2)을 합산하여 산정하였다. 이때 동일 격자 내에서 서로 다른 시점의 규제 완화 구역이 중복되는 경우, 중복 면적은 공간적으로 합집합을 취하여 중복 면적이 이중 계산되지 않도록 처리하였다.

(3) 완화율(Deregulation_Rate)

각 격자에서 규제 완화가 얼마나 큰 폭으로 개발밀도를 상향시켰는지를 나타내는 지표로, 개별 규제 완화 구역에서 발생한 개발밀도 상향분을 기준으로 산정하였다. 한 격자 안에 포함되는 각 규제 완화 폴리곤마다 상향 전 개발밀도와 상향 후 개발밀도의 차이를 계산하여 상향 폭을 도출하였다. 예를 들어 용적률이 200%에서 600%로 상향된 경우, 해당 폴리곤의 상향 폭은 400%로 정의된다. 이후 격자 내에서 서로 다른 완화 폴리곤이 차지하는 면적 비율을 적용하여, 격자 전체에서 평균적으로 개발밀도가 얼마나 완화되었는지를 계산하였다. 즉, 격자 단위 규제 완화율은 각 완화 구역의 상향 폭을 그 구역이 격자에서 차지하는 면적 비율로 가중한 면적 가중 평균값이다. 이 값은 동일한 상향 폭이라도 적용 면적이 작으면 격자 전체 완화율에 미치는 영향이 제한되고, 반대로 적용 면적이 넓을수록 격자 전체 완화율이 크게 나타나도록 설계된 지표이다.

주2. 유럽환경청(EEA)과 EU의 DEDUCE 프로젝트에서는 연안 육역을 해안선으로부터 일정 거리 이내의 육상 공간으로 정의하고, 해당 범위를 연안 개발, 토지피복 변화, 인구 및 기반시설 노출을 평가하는 핵심 분석 단위로 활용해 왔다. 특히 DEDUCE Project(2007)의 연안 지표체계에서는 해안선으로부터 1km 이내의 육역을 'coastal zone'의 핵심 범위로 설정하여, 연안부 토지이용 변화와 시가화 정도를 비교·분석하는 기준으로 제시하고 있다. 이러한 접근은 연안 개발 압력과 위험 노출이 해안선 인접 지역에서 가장 집중적으로 나타난다는 경험적 근거에 기반한다. 단, 국내 문헌에서는 연안 육역의 범위를 특정 거리로 정량화하기보다는, 해안과의 상호작용과 관리 필요성을 기준으로 개념적으로 정의하는 경향이 있다. 본 연구에서는 이러한 국내 정책·연구의 개념적 정의를 수용하되, 국제적으로 활용되어 온 표준 분석 기준에 따라 해안선으로부터 1km 범위를 연안 육역으로 설정하였다.

인용문헌
References

1. 국토교통부, 2010. 「연안통합관리 정책정보」, 세종. Ministry of Land, Infracstructure and Transport (MOLIT), 2010. *Coastal Integrated Management Policy Information*, Sejong.
2. 최영국·엄기철·박중순·조원철·최지연·이문숙·정지호·백경진, 2012. 「지속가능한 연안국토 관리 방향 및 정책과제」, 국토연구원. Choi, Y.G., Eom, K.C., Park, J.S., Cho, W.C., Choi, J.Y., Lee, M.S., Jung, J.H., and Baek, K.J., 2012. *Policies for Sustainable Management of Coastal Areas in Korea*, KRIHS.
3. Aguilera, E., Valenzuela, L.M., and Botequilha-Leitão, A., 2011. "Landscape Metrics in the Analysis of Urban Land Use Patterns: A Case Study in a Spanish Metropolitan Area", *Landscape and Urban Planning*, 99(3-4): 226-238.
4. Alterman, R., 2011. "Land-Use Regulations and Property Values: The 'Windfalls Capture' Idea Revisited", in *The Oxford Handbook of Urban Economics and Planning*, edited by Brooks, N., Donaghy, K., and Knaap, G., Oxford Handbooks.
5. Barnett, J. and O'Neill, S., 2010. "Maladaptation", *Global Environmental Change*, 20: 211-213.
6. Barnett, J. and O'Neill, S., 2013. "Minimising the Risk of Maladaptation: A Framework for Analysis", in *Climate Adaptation Futures*, edited by Palutikof, J., Boulter, S.L., Ash, A.J., Smith, M.S., Parry, M., Waschka, M., and Guitart, D., 87-93, New Jer-

sey: Wiley-Blackwell.

7. Berke, P. and Godschalk, D., 2009. "Searching for the Good Plan: A Meta-Analysis of Plan Quality Studies", *Journal of Planning Literature*, 23(3): 227-240.
8. Breen, M.J., Kebede, A.S., and König, C.S., 2022. "The Safe Development Paradox in Flood Risk Management: A Critical Review", *Sustainability*, 14(24): 16955.
9. Brody, S.D., Zahran, S., Maghelal, P., Grover, H., and Highfield, W.E., 2007. "The Rising Costs of Floods: Examining the Impact of Planning and Development Decisions on Property Damage in Florida", *Journal of the American Planning Association*, 73(3): 330-345.
10. Burby, R.J. and Dalton, L.C., 1994. "Plans Can Matter! The Role of Land Use Plans and State Planning Mandates in Limiting the Development of Hazardous Areas", *Public Administration Review*, 54(3): 229-238.
11. Burby, R.J., Deyle, R.E., Godschalk, D.R., and Olshansky, R.B., 2000. "Creating Hazard Resilient Communities through Land-Use Planning", *Natural Hazards Review*, 1(2): 99-106.
12. Canedoli, C., Crocco, F., Comolli, R., and Padoa-Schioppa, E., 2018. "Landscape Fragmentation and Urban Sprawl in the Urban Region of Milan", *Landscape Research*, 43(5): 632-651.
13. Cooley, S., Schoeman, D., Bopp, L., Boyd, P., Donner, S., Kiessling, W., and Simmons, C.T., 2023. "Oceans and Coastal Ecosystems and Their Services", in *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 379-550, Cambridge University Press.
14. Cutter, S.L., Mitchell, J.T., and Scott, M.S., 2000. "Revealing the Vulnerability of People and Places: A Case Study of Georgetown County, South Carolina", *Annals of the Association of American Geographers*, 90(4): 713-737.
15. Cutter, S.L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., and Webb, J., 2008. "A Place-Based Model for Understanding Community Resilience to Natural Disasters", *Global Environmental Change*, 18(4): 598-606.
16. Cutter, S.L., Emrich, C.T., Gall, M., and Reeves, R., 2018. "Flash Flood Risk and the Paradox of Urban Development", *Natural Hazards Review*, 19(1): 05017005.
17. Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, J.L., and Blöschl, G., 2013. "Socio-Hydrology: Conceptualising Human-Flood Interactions", *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8): 3295-3303.
18. EEA (European Environment Agency), 2006. *The Changing Faces of Europe's Coastal Areas (EEA Report No. 6/2006)*, Copenhagen: European Environment Agency.
19. EEA (European Environment Agency), 2023. *Assessing the Costs and Benefits of Climate Change Adaptation (Briefing no. 23/2022)*, Copenhagen: European Environment Agency.
20. Effiong, C., Ngang, E., and Ekott, I., 2024. "Land Use Planning and Climate Change Adaptation in River-Dependent Communities in Nigeria", *Environmental Development*, 49: 100970.

21. Estoque, R.C., Murayama, Y., and Myint, S.W., 2017. "Effects of Landscape Composition and Pattern on Land Surface Temperature: An Urban Heat Island Study in the Megacities of Southeast Asia", *Science of the Total Environment*, 577: 349-359.
22. Ewing, R., 1997. "Is Los Angeles-Style Sprawl Desirable?", *Journal of the American Planning Association*, 63(1): 107-126.
23. Fekete, A., 2009. "Validation of a Social Vulnerability Index in Context to River-floods in Germany", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2): 393-403.
24. Frazier, A.E. and Kedron, P., 2017. "Landscape Metrics: Past Progress and Future Directions", *Current Landscape Ecology Reports*, 2(3): 63-72.
25. Galster, G., Hanson, R., Ratcliffe, M.R., Wolman, H., Coleman, S., and Freihage, J., 2001. "Wrestling Sprawl to the Ground: Defining and Measuring an Elusive Concept", *Housing Policy Debate*, 12(4): 681-717.
26. George, D., 2010. *SPSS for Windows Step by Step: A Simple Study Guide and Reference, 17.0 Update (10/e)*, Boston: Pearson.
27. Godschalk, D.R., 2003. "Urban Hazard Mitigation: Creating Resilient Cities", *Natural Hazards Review*, 4(3): 136-143.
28. Gustafson, E.J., 1998. "Quantifying Landscape Spatial Pattern: What Is the State of the Art?", *Ecosystems*, 1(2): 143-156.
29. Haasnoot, M., Kwakkel, J.H., Walker, W.E., and ter Maat, J., 2013. "Dynamic Adaptive Policy Pathways: A Method for Crafting Robust Decisions for a Deeply Uncertain World", *Global Environmental Change*, 23(2): 485-498.
30. Haines-Young, R. and Chopping, M., 1996. "Quantifying Landscape Structure: A Review of Landscape Indices and Their Application to Forested Landscapes", *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 20(4): 418-445.
31. Hargis, C.D., Bissonette, J.A., and David, J.L., 1998. "The Behavior of Landscape Metrics Commonly Used in the Study of Habitat Fragmentation", *Landscape Ecology*, 13(3): 167-186.
32. Hasse, J.E. and Lathrop, R.G., 2003. "Land Resource Impact Indicators of Urban Sprawl", *Applied Geography*, 23(2-3): 159-175.
33. Herold, M., Couclelis, H., and Clarke, K.C., 2005. "The Role of Spatial Metrics in the Analysis and Modeling of Urban Land Use Change", *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(4): 369-399.
34. Inostroza, L., Baur, R., and Csaplovics, E., 2013. "Urban Sprawl and Fragmentation in Latin America: A Dynamic Quantification and Characterization of Spatial Patterns", *Journal of Environmental Management*, 115: 87-97.
35. Irwin, E.G. and Bockstael, N.E., 2007. "The Evolution of Urban Sprawl: Evidence of Spatial Heterogeneity and Increasing Land Fragmentation", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52): 20672-20677.
36. Jaeger, J.A., 2000. "Landscape Division, Splitting Index, and Effective Mesh Size: New Measures of Landscape Fragmentation", *Landscape Ecology*, 15(2): 115-130.
37. Jaeger, J.A. and Schwick, C., 2014. "Improving the Measurement of Urban Sprawl: Weighted Urban Proliferation (WUP) and Its Application to Switzerland", *Ecological Indicators*, 38: 294-308.
38. Jaeger, J.A., Bertiller, R., Schwick, C., and Kienast, F., 2010. "Suitability Criteria for Measures of Urban Sprawl", *Ecological Indicators*, 10(2): 397-406.
39. Juhola, S., Bouwer, L.M., Huggel, C., Mechler, R., Muccione, V., and Wallimann-Helmer, I., 2024. "A New Dynamic Framework Is Required to Assess Adaptation Limits", *Global Environmental Change*, 87: 102884.
40. Kates, R.W., Colten, C.E., Laska, S., and Leatherman, S.P., 2006. "Reconstruction of New Orleans after Hurricane Katrina: A Research Perspective", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(40): 14653-14660.
41. Kline, R.B. and Santor, D.A., 1999. "Principles & Practice of Structural Equation Modelling", *Canadian Psychology*, 40(4): 381.
42. Kousky, C. and Shabman, L., 2012. *The Realities of Federal Disaster Aid (RFF Issue Brief)*, Washington, DC: Resources for the Future.
43. Leitao, A.B. and Ahern, J., 2002. "Applying Landscape Ecological Concepts and Metrics in Sustainable Landscape Planning", *Landscape and Urban Planning*, 59(2): 65-93.
44. Li, X., Zhou, W., and Ouyang, Z., 2013. "Relationship between Land Surface Temperature and Spatial Pattern of Greenspace: What are The Effects of Spatial Resolution?", *Landscape and Urban Planning*, 114: 1-8.
45. McGarigal, K. and Marks, B.J., 1995. *Fragstats: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure*, USA: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
46. Milly, P.C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P., and Stouffer, R.J., 2008. "Stationarity Is Dead: Whither Water Management?", *Science*, 319(5863): 573-574.
47. Nelson, A.C. and Dawkins, C.J., 2004. *Urban Containment in the United States: History, Models and Techniques for Regional and Metropolitan Growth Management*, American Planning Association.
48. Nelson, A.C. and Duncan, J.B., 1995. *Growth Management Principles and Practices*, University of Chicago Press.
49. Patsch, K., Jenkins, S., and King, P., 2023. "All According to Plan: Maldevelopment, Moral Hazard, Federal Aid, and Climate Change Adaptation on Dauphin Island, Alabama, USA", *Ocean and Coastal Management*, 233: 106451.
50. Pendall, R., 1999. "Do Land-use Controls Cause Sprawl", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 26(4): 555-571.
51. Ranasinghe, R., Ruane, A.C., Vautard, R., Arnell, N., Coppola, E., Cruz, F.A., and Zaaboul, R., 2021. "Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment", in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Inter-*

governmental Panel on Climate Change, edited by Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B., 1767–1926, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

52. Shi, L. and Varuzzo, A.M., 2020. “Surging Seas, Rising Fiscal Stress: Exploring Municipal Fiscal Vulnerability to Climate Change”, *Cities*, 100: 102658.

53. Simpson, N.P., Sparkes, E., de Ruiter, M., Trogrlić, R.Š., Passos, M.V., Schlumberger, J., and Hochrainer-Stigler, S., 2025. “Advances in Complex Climate Change Risk Assessment for Adaptation”, *npj Climate Action*, 4(1): 74.

54. Sohn, W., Kim, J.H., Li, M.H., Brown, R.D., and Jaber, F.H., 2020. “How Does Increasing Impervious Surfaces Affect Urban Flooding in Response to Climate Variability?”, *Ecological Indicators*, 118: 106774.

55. Uuemaa, E., Antrop, M., Roosaare, J., Marja, R., and Mander, Ü., 2009. “Landscape Metrics and Indices: An Overview of Their Use in Landscape Research”, *Living Reviews in Landscape Research*, 3(1): 1-28.

56. Uuemaa, E., Mander, Ü., and Marja, R., 2013. “Trends in the Use of Landscape Spatial Metrics as Landscape Indicators: A Review”, *Ecological Indicators*, 28: 100-106.

57. Xu, L., Cui, S., Wang, X., Tang, J., Nitivattananon, V., Ding, S., and Nguyen, M.N., 2021. “Dynamic Risk of Coastal Flood and Driving Factors: Integrating Local Sea Level Rise and Spatially Explicit Urban Growth”, *Journal of Cleaner Production*, 321: 129039.

58. Yinuo, Z., Sarabi, S., and Qi, H., 2025. “Toward Climate Resilient Land-Use Planning: Indicators for Adaptation and Mitigation”, *Environmental and Sustainability Indicators*, 27: 100819.

59. DEDUCE Project, 2007. “Indicator Fact Sheet 02: Built-Up Land in Coastal Zones”, <https://www.vliz.be/projects/deduce/IFS/IFS02.pdf>

60. Ewing, R. and Hamidi, S., 2015. “Urban Sprawl Leads to More Fatal Crashes, While Denser Areas Experience Higher Rates of Accidents Which Cause Injuries”, *USApp – American Politics and Policy*, <http://blogs.lse.ac.uk/usappblog/2015/02/27/urban-sprawl-leads-to-more-fatal-crashes-while-denser-areas-experience-higher-rates-of-accidents-which-cause-injuries/>

61. Hsiao, A., 2023. “Sea Level Rise and Urban Adaptation in Jakarta”, https://allanhsiao.com/files/Hsiao_jakarta.pdf

62. Ostriker, A. and Russo, A., 2022. “The Effects of Floodplain Regulation on Housing Markets”, https://ostriker.github.io/papers/Ostriker-Russo_floodplain-regulations.pdf

Date Received	2025-09-12
Reviewed(1 st)	2025-11-16
Date Revised	2025-12-15
Reviewed(2 nd)	2025-12-29
Date Accepted	2025-12-29
Final Received	2025-12-29