

## System Dynamics-GIS 모델을 이용한 해수면 상승 침수 영향 분석\*

김지숙<sup>1</sup> · 김호용<sup>2\*</sup> · 이성호<sup>3</sup>

### Analysis on Inundation Impacts of Sea Level Rise Using System Dynamics-GIS Model\*

Ji-Sook KIM<sup>1</sup> · Ho-Yong KIM<sup>2\*</sup> · Sung-Ho LEE<sup>3</sup>

#### 요 약

본 연구는 기후변화로 인한 영향을 분석하기 위해 시간 흐름에 따른 변수들의 상호작용 및 동태적 변화를 모델링할 수 있는 SD와 공간적 변이를 나타내고 분석할 수 있는 GIS를 통합하여 시공간 통합모델을 구축하였다. 구축된 모델을 이용하여 부산광역시의 해안가에 위치한 A구에 대하여 IPCC의 해수면 상승 시나리오(Case 1) 및 최악의 경우인 태풍 해일고를 고려한(Case 2) 침수 영향을 시뮬레이션 하였고, 이를 통해 2100년까지 시간 단위별로 침수에 의한 피해 면적과 인구를 예상하였다. 또한 해수면 상승의 대응 방안으로 방어, 순응, 후퇴 대안의 시나리오를 설정하여 모델을 개선함으로써 각각의 대안으로 인한 결과와 그 의의를 살펴보았다. 두 가지 방법론의 결합으로 구축된 모델은 설정시점별 변수들의 변화 과정을 정량적으로 산출하여 공간적 변이뿐만 아니라 과정까지 분석 가능한 시너지 효과를 확인할 수 있었다. 결과뿐만 아니라 과정까지 분석 가능한 시공간 통합모델은 도시의 방재력 향상을 위한 정책결정과정에 도움이 될 것으로 사료된다.

주요어 : 시스템다이내믹스, 시공간통합모델, 해수면상승, 태풍해일고, 기후변화

#### ABSTRACT

In order to analyze the impacts of climate change, a time and space integrated model was developed in this study using system dynamics and GIS. The model built was used to carry out a simulation on the inundation impact on A-gu of Busan Metropolitan city

2015년 4월 19일 접수 Received on April 19, 2014 / 2015년 5월 26일 수정 Revised on May 26, 2015 / 2015년 6월 8일 심사완료 Accepted on June 8, 2015

\* 이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2013 R1A1A2011898). 또한 이 논문은 주저자의 박사학위논문의 일부를 수정·보완한 것임.

1 부산대학교 공간정보협동과정 Interdisciplinary Program of Geographic Information System, Pusan National University

2 동아대학교 도시계획공학과 Department of Urban Planning and Engineering, Dong-A University

3 부산대학교 도시공학과 Department of Urban Engineering, Pusan National University

\* Corresponding Author E-mail : hykim@dau.ac.kr

resulting from the sea level rise scenario of IPCC and storm surge, which is the worst case. Through this, the flooded area and population until 2100 were predicted. Also, the result and significance of each alternative was reviewed improving the model by establishing alternative scenarios of protection, accommodation and retreat as plans of reaction to sea level rise. The combination of system dynamics and GIS has advantages of how the diverse variables change until the target year can be traced and, accordingly, not only the results but also the processes of spatial change can be examined by calculating the value of change process at each time step. The synergy of this model presumed to be a foothold for solving problems which are becoming difficult to predict due to increase in uncertainty and complexity such as the support for decision making for urban resilience to natural disasters.

**KEYWORDS** : *System Dynamics, Space-Time Integrated Model, Sea Level Rise, Storm Surge, Climate Change*

## 서론

우리나라는 산지 지형이 발달하고 국토의 3면이 바다로 둘러싸여 있어 자연재해에 취약하며, 전반적으로 평균 기온 상승폭이 전 지구 평균기온 상승률보다 높은 것으로 알려져 있다(Busan Metropolitan City, 2012). 이에 따라 기후변화 대응을 위한 노력으로 2009년 「저탄소 녹색성장 기본법」을 제정하여 기후변화와 에너지·자원 문제의 해결 등을 위한 제도적 기반을 조성함으로써 저탄소 녹색성장을 위한 국가 정책의 기본 방향을 제시하였고, 여러 부문에 걸쳐 다양한 부처에서 기후 모니터링을 강화하고 예측 수단을 개발하는 등 다각적인 노력을 기울이고 있다. 그러나 이러한 노력들에도 불구하고 기후 변화 예측과 적응 대책에 있어서는 불확실성(Uncertainty)과 복잡성(Complexity)이 상존하여 근본적으로 자연재해에 대한 논의를 어렵게 만든다(Simonovic, 2011). 효고 프레임워크 채택 이후 재난 관리와 재해 위험성 감소의 주요 목표가 취약성의 감소에서 지역사회의 회복탄력성(Resilience) 구축으로 초점이 옮겨가고 있다는 점도 이를 시사한다(Mayunga, 2007).

한편, 자연재해의 성격은 기후변화 영향과 같

은 극단적인 재해를 일으키는 물리적 환경 시스템, 재해를 경험하는 인간과 지역사회, 그리고 그의 영향을 받는 인공적인 환경의 상호작용과 변화로 설명되는 복잡한 메커니즘으로 요약될 수 있다. 따라서 자연재해에 대한 피해를 예측하는 것은 동태적(dynamic)이고 학제적(interdisciplinary)인 접근방식을 요구하게 되었다. 하지만 불확실성과 복잡성의 증대로 인해 다양한 사회·경제·환경적 문제들의 예측과 대응이 어려워지고 있어 이러한 문제들의 원인과 해결방안을 모색하기 위해서는 한 시점에서 특정한 한 분야의 요인을 고려하기보다는 장기간에 걸쳐 요인들 간의 상호작용과 변화양상을 함께 다루어야 할 필요성이 있다.

이러한 관점에서 공간적 상호작용을 분석하는 GIS와 시간적 변화양상을 분석하는 시스템 다이내믹스(System Dynamics, 이하 SD)는 기후 변화 예측과 적응 대책과정에서 유용하게 활용할 수 있다. 시간성을 포함한 공간 분석에 있어서 GIS의 공간적 의사결정지원시스템(SDSS: Spatial Decision Support Systems)은 실세계의 복잡하고 다양한 조건들을 만족시키는 대안들을 도출하고 이들을 보다 객관적이고 과학적으로 평가할 수 있는 유용한 도구로 평가받아 왔다. 또한, 변수들의 동태적 특성을 반영하여 모델의 구조에 초점을 맞추어 시간

흐름에 따른 시물레이션 예측이 가능한 기법인 SD는 1961년 Forrester의 선구적인 연구 이후 수많은 분야에 적용되어 그 효과성을 입증해왔다. 하지만, SD 모델 내부에서 공간적 변수들을 다루기 위하여 GIS를 활용하는 과정에서, GIS는 필요성과 효율성에도 불구하고 단순히 시각화에만 활용되는 한계를 보여 왔다.

본 연구는 이러한 한계를 개선하기 위한 시도로써, 기후변화로 인한 영향과 변화를 동태적인 시스템으로 보고, 시공간 변수들의 동태성을 함께 다룰 수 있도록 시공간 통합모델을 구축하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 다음과 같이 2개의 연구 목적을 설정하였다. 첫째, SD와 GIS를 통합한 시공간 통합모델을 구축한다. 이를 위해서 선행연구에서 구축되었던 시공간 모델들을 살펴보고, 특히 SD와 GIS가 통합된 사례와 기법들을 고찰하였다. 둘째, 구축된 시공간 통합모델을 이용하여 해수면 상승시의 침수 상황과 변수들의 변화를 시공간적 관점에서 고찰한다. 이를 위해 먼저 해수면 상승 시나리오에 따른 해수면의 변화와 이로 인한 영향을 예측하고, 몇 가지의 정책 대안들을 실험하여 어떠한 대응 정책이 효과가 있을 것인지 살펴 보았다.

본 연구에서는 기후변화로 인한 해수면 상승의 침수 영향을 시물레이션 하였다. 이는 우리나라의 지리적 특성 상 연안 지역의 재해 대응이 시급하다고 할 수 있으며, 동시에 해수면 상승의 특성으로 볼 때 장기간에 걸쳐 시공간의 변화 양상과 정책적 효과를 살펴볼 수 있기 때문이다.

## 이론적 고찰

### 1. 시스템 다이내믹스(SD) 방법론

SD는 산업시스템들의 행태를 연구하는 방식으로, 정책과 의사결정 구조, 그리고 시간지연 등이 어떻게 상호 연결되어 시스템의 성장과 안정성에 영향을 주는지 밝히는 것을 목적으로 Forrester(1961)의 「산업동태론(Industrial

Dynamics)」에서 처음 소개되었다. 사실 시스템 다이내믹스는 산업분야에 대한 응용으로 시작되어 지금까지도 산업체의 경영 전략, 조직, 재고 문제 등의 분야에서 적용되어 오랜 시간 동안 효과성을 검증받아왔고, 현재는 초창기에 예상되었던 특정 분야에 국한된 응용을 초월하여 다양한 분야의 연구자들에 의해 광범위한 이슈들에 활발히 적용되고 있다(Moon, 2007). 특히 국내외에서 복잡계(Complex System)에 대한 인식이 높아지면서 복잡계의 특징을 잘 반영하고 분석할 수 있는 분석방법론으로서 시스템 다이내믹스가 주목을 받게 되었다.

SD는 주어진 문제에 대하여 그와 관련된 변수들로 구성된 시스템을 정의하고 변수들 간의 관계를 정량적으로 연구하여 컴퓨터에 모델링한 후, 일련의 시물레이션을 통하여 시스템의 동적인 특성을 밝혀냄으로써 문제 해결을 돕는다(Kim, 2007). 또한 변화를 일으키는 변수들 간의 상호관계를 고려하여 변화패턴을 추정하며, 어떠한 변수의 동태적인 변화를 시스템 내의 다른 변수들과의 상호작용으로 파악함으로써 통합적인 시각에서 접근할 수 있다는 장점이 있다.

해외의 SD 연구는 개발자인 Forrester의 선구적인 연구 이후 다양한 분야에서 적용되어 활용성과 효과를 입증해 왔고, 따라서 SD의 활용뿐만 아니라 방법론 자체에 대한 비판이나 발전에 관한 연구들도 다수 이루어져 왔다. 그러나 국내의 연구는 전통적인 계량 분석에 비해 주관적이라는 비판에 의해 시스템 인과 지도를 분석하는 등의 질적 연구보다는 시물레이션을 바탕으로 하는 수량적 모델을 이용하는 경우가 대부분이다. 또한 해외에서는 SD를 다른 방법론과 함께 적용시켜 다양한 형태의 새로운 시스템 모델을 개발하는 연구들이 수행되어 왔지만, 국내에서는 타 방법론과의 연계에 있어 소극적인 것으로 나타났다. 그러나 비선형적, 동태적 행태를 보이는 문제를 다루기에 적합하고 모델개선이 용이하여 다양한 시나리오를 통해 정책 실험과 의사결정 지원이 가능하다는 점이 SD의 장점으로 언급되고 있으며, 이

에 따라 SD가 공간을 다루는 GIS와 결합될 때 시너지 효과를 예상하는 연구 결과도 있었다 (Elshorbagy *et al.*, 2005).

## 2. SD-GIS 통합모델

SD는 인과관계에 대한 이해를 강조하고 반복적이며 과학적으로 엄격한 모델링이라는 특징을 갖고 있지만, 공간으로의 확장을 위한 필요성과 오랜 노력에도 불구하고 공간적 변수를 다루기 위한 모델은 많지 않은 것으로 나타났다. SD를 공간화함으로써 공간상의 이질적인 시스템 구조를 시뮬레이션할 수 있고, 공간적 상호작용이 시스템 그 자체에 얼마나 영향을 미치는지도 고려할 수 있다. 따라서 SD에서의 공간은 사건이 발생하는 장소로서 바라보는 것이 아니라 그 구조적 변경이 동태적 과정에 필수적인 것으로 다루어져야 한다.

SD와 GIS를 통합하기 위한 초기의 연구들에서는 통합을 위한 소프트웨어의 한계에도 불구하고 꾸준히 모델을 개선하기 위한 노력이 이루어져왔다. Sklar and Costanza(1991)의 생태학 분야의 연구에서는 대부분 시간적 변화에 초점을 맞추어 공간상의 한 지점에 대해 시뮬레이션하고 나머지 지역이 동질적이라는 가정 하에 전 지역을 추론하는 기존 방식의 문제점을 제기하면서 공간적 측면이 더욱 명확하게 포함되어야 함을 강조하였다. Ford(1999)는 간단한 SD 모델을 공간적으로 좀 더 상세하게 적용하기 위해 그리드를 사용하였는데, 모델을

각 셀에 복제함으로써 모델의 복잡성이 증가하고, 그 과정이 상당히 어렵고 반복적이라는 점을 어려움으로 들었다. 대부분의 연구들이 시간과 공간 측면의 통합의 필요성을 언급하고 있지만 구체적인 실현 방법에 관해서는 연구 목적과 상황에 따라 조금씩 차이가 있다.

SD와 GIS를 연계한 선행연구들을 살펴보면 (표 1 참조), SD 모델링을 위한 소프트웨어인 Stella와 Vensim을 사용하여 시공간적 측면의 피드백이 중요하게 여겨지는 문제들을 모델링 하였는데, SD와 GIS의 연계와 통합으로 인한 이점과 잠재성은 의심의 여지가 없지만 구현 방법이 매우 까다롭고 복잡한 것으로 다루어진다. 과거에는 기술적 한계로 인해 실제 모델 개발과 적용이 제한적으로 이루어졌으나 데이터 베이스와 소프트웨어의 발달로 환경, 재해 등의 다양한 분야에서 적용이 이루어지고 있다.

## 모델 설계

### 1. 대상지 설정 및 데이터 구축

해수면 상승시의 침수 상황과 변수들의 변화를 시공간적 관점에서 고찰하기 위하여 해안에 위치하고 해안지역에 다양한 공간적 특성을 가지고 있는 지역에 대한 시뮬레이션이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 해안선이 길고 연안에 공업, 녹지, 상업 및 주거지역 등이 고루 분포하고 있어 해수면 상승으로 인한 침수 피해가 예상되는 지역으로 부산광역시의 A구를 연구

TABLE 1. Literatures on SD-GIS model

Integration methods	Literatures	Contents
Stella-GRASS	Ruth and Pieper (1994)	Modeling spatial dynamics of sea-level rise in a coastal area
	Deal <i>et al.</i> (2000)	A Dynamic Model of the spatial spread of Fox Rabies in Illinois
Stella-ArcView	Ahmad and Simonovic (2004)	Spatial system dynamics for simulation of water resources systems
Vensim-ArcView	Yeh <i>et al.</i> (2006)	Simulation of soil erosion and nutrient impact using and integrated system dynamis model in a watershed
Vensim-ArcGIS	Xu and Coors (2012)	Combining system dynamics model, GIS, and 3D visualization in sustainability assessment of urban residential development

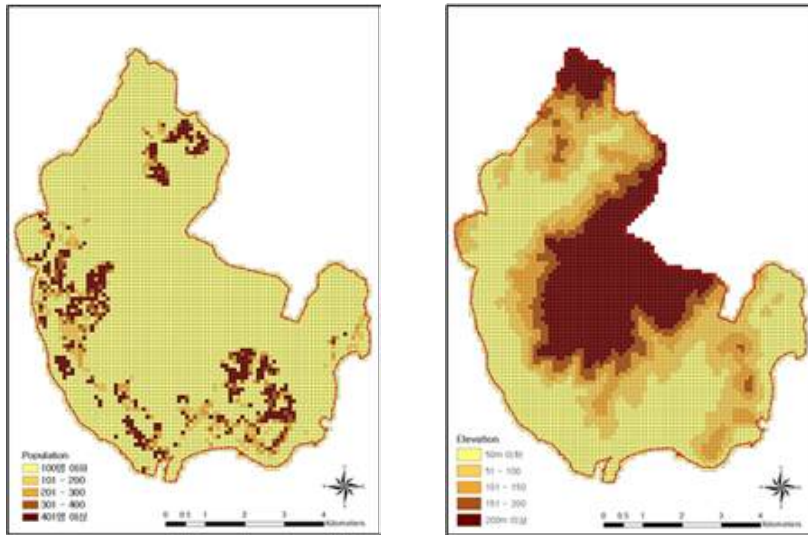


FIGURE 1. Population and elevation of 5,489 cells

대상지로 설정하였다.

분석에 사용할 데이터는 그리드 방식으로 처리함으로써 SD에서 GIS의 공간정보를 데이터베이스화하여 셀 전체의 입력과 출력이 용이하도록 구축하였다. 연구 대상지는 100m×100m 그리드 5,489개로 분할하여 분석 단위를 설정하였고, 분석에 사용하는 인구 정보와 표고 정보는 분석 단위의 공간해상도에 맞춰서 구축하였다. 구축된 인구 정보<sup>1)</sup>와 표고 정보의 현황은 그림 1과 같다.

## 2. SD-GIS 모델 설계

본 연구에서 구축하는 SD-GIS 모델은 크게 SD 모델과 GIS 모델로 구성되고 데이터 교환을 위해 Excel을 이용한 약결합(Loose coupling)을 통해 두 모델을 통합하였다(그림 2 참조). Excel과 MS Access를 이용하여 셀 별로 구축된 데이터베이스를 Vensim의 input 파일(\*.vdi)로 입력하여 시뮬레이션하고, 그 결과를 output 파일(\*.vdo)로 GIS에 입력하는 과정으로 모델링이 이루어진다.

GIS의 기능은 공간 데이터를 구축하고 분석하여 공간 변수를 SD의 변수로 입력될 수 있도록

하는 것으로, 셀 단위로 다루어지는 변수들은 데이터베이스로 만들어져 SD의 공간변수들에 대한 입력값으로 사용된다. 또한 SD에서 분석된 결과는 지도화 및 공간분석을 위해 다시 데이터베이스를 통해 GIS로 연결된다. SD 모델은 SD-GIS 모델에서 주도적인 역할을 하며 시간에 따른 해수면 상승과 그로 인한 침수 면적 및 인구에 대한 영향을 시뮬레이션한다. 모델의 시간적 범위는 2010년부터 2100년까지로 설정하였고 1년 단위로 분석하고 10년 단위로 저장하도록 설정하였다.

변수들의 시간적 변화를 모델링하는 SD 모델은 크게 세 부분으로 나누어지는데(그림 3 참조), 첫째, 침수 모델에서는 해수면 상승률과 초기 해수면을 반영하여 침수 여부를 판단한다. 여기서, 해수면 상승으로 인한 침수 산정 방법으로는 Bucket fill 방식을 사용하였다. 이는 해수면 상승과 조석 등의 특정 해수면 높이를 산정하고 고도가 이 높이 아래에 있는 육역은 범람지역으로 평가하는 기법으로 범람 계산시에 필요한 수력학적인 과정은 고려하지 않으며, 범람 평가 기법 중 가장 간단하면서 해안에 인접한 범람을 평가하는 데에는 합리적인 방법으로 평가되고 있다(Cho *et al.*, 2010). 둘째, 취약

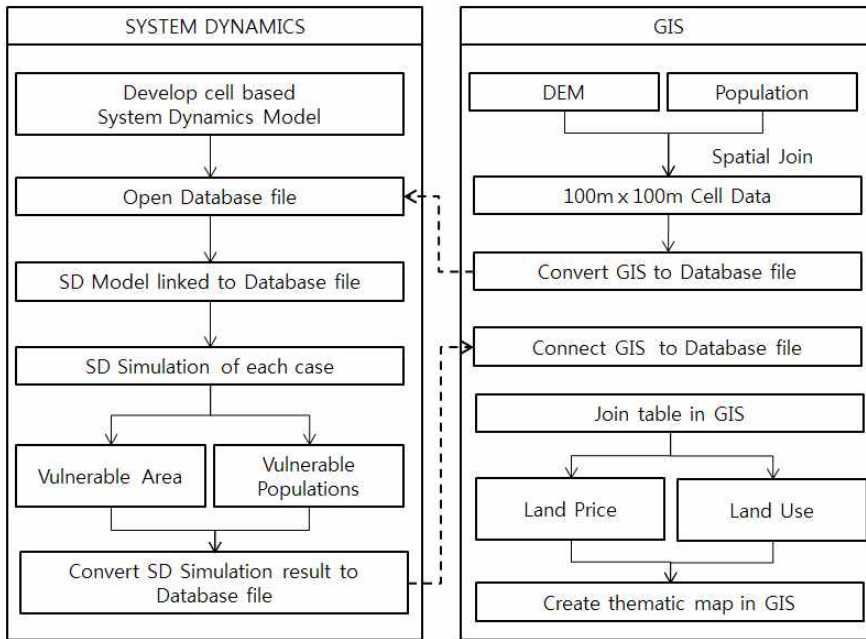


FIGURE 2. SD-GIS model architecture

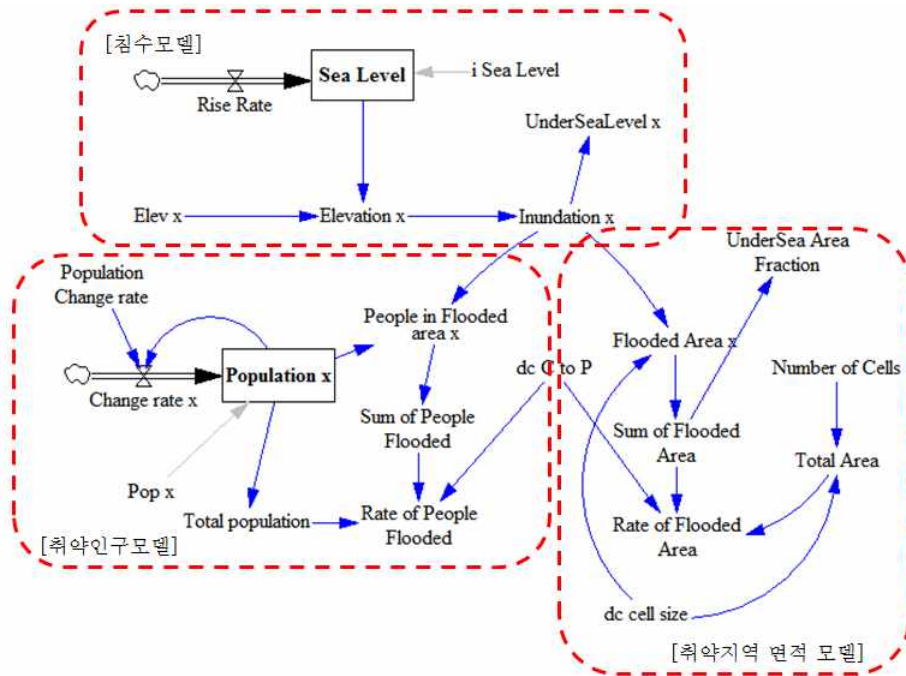


FIGURE 3. Stock and flow diagram

인구 모델에서는 침수로 판단된 셀들의 인구를 비율로 산출하게 된다. 마지막으로 취약지역 면적 모델에서는 침수로 판단된 셀들의 비율이 계산되도록 하였다. 저량변수(level variable)<sup>2)</sup>인 인구(population)는 2000년부터 2013년까지의 해운대구의 평균 인구변화율(population change rate)을 반영하여 계산되도록 하였고, 해수면(sea level) 변수는 시간 흐름에 따라 해수면 상승률(rise rate)에 의해 해수면이 증가하는 것을 반영하도록 하였다. 해수면 상승률은 Case 1과 Case 2로 나누어 두 개의 값을 적용하였는데, Case 1은 IPCC의 제5차 기후변화평가보고서(Stocker *et al.*, 2013) 예측치 중 최악의 경우를 가정하여 RCP 8.5 시나리오의 예측치(2100년 기준 0.82m)를 반영하였다. Case 2에서는 극한 사상에 의한 해수면의 급격한 변동<sup>3)</sup>을 고려하기 위한 것으로 선행연구들(Busan Metropolitan City, 2012)을 참조하여 2100년 기준 3.36m에 RCP 8.5 시나리오 값을 반영한 4.18m를 적용하였다.

### 시뮬레이션 및 결과

#### 1. 해수면 상승으로 인한 침수 영향 시뮬레이션

2100년까지 침수지역 면적 및 비율, 침수지역 인가와 비율을 살펴본 결과(그림 4 참조), 해수면 상승만을 고려한 Case 1(그래프에서

‘1’로 표기)의 경우는 침수에 의한 영향이 나타나긴 하지만 시간 흐름에 따라 2100년까지 완만히 증가하는 것으로 보이는 반면, Case 2(그래프에서 ‘2’로 표기)의 경우는 그보다 훨씬 두드러지는 증가를 보인다. 이러한 비교를 통해 기후변화로 인한 해수면 상승의 영향은 비교적 완만하게 진행되나, 태풍 해일고를 함께 고려한다면 그 영향이 급격히 증가함을 알 수 있다.

이는 지도로 표현한 시뮬레이션 결과를 통해서도 확인할 수 있는데(그림 5 참조), 2100년 기준으로 Case 1에 비해 Case 2의 침수 면적이 눈에 띄게 증가하는 것을 나타낸다. 또한 대상지에서 지리적으로는 강과 해안이 접하는 만지역과 해수욕장에 있어서 면적이 크게 확장되는 것으로 나타났다.

태풍 해일고를 가정한 Case 2는 해수면 상승의 영향을 받는 면적에 있어서 2050년에 이미 Case 1의 2100년 결과보다 더 큰 영향을 받게 되는 것으로 나타나, 점진적으로 진행되는 해수면 상승보다 훨씬 더 큰 피해를 가져올 수 있을 것으로 보인다. 인구는 2100년 기준으로 Case 2에서 기후변화로 인한 해수면 상승의 영향만 고려한 Case 1보다 69.7% 증가하였다. 인구 또한 Case 2에서 2050년에 이미 Case 1의 2100년 기준 피해 인구보다 더 많은 인구가 영향을 받는 것으로 나타났다. 기후변화로

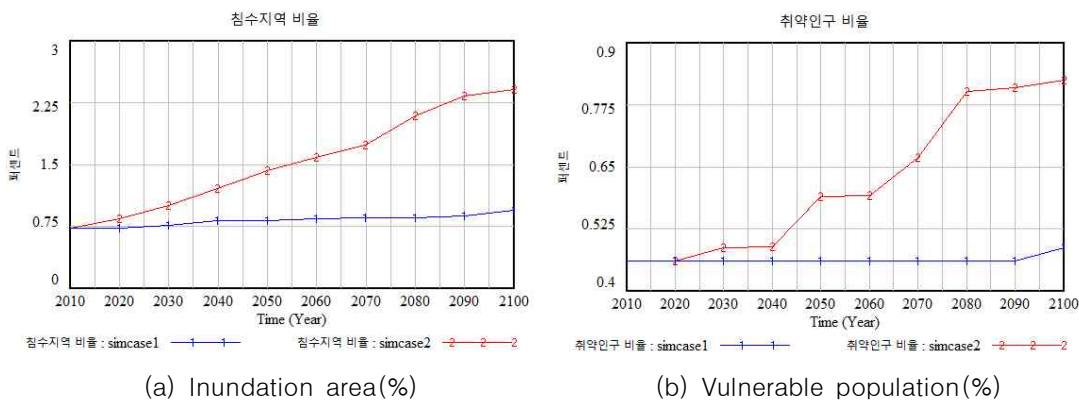


FIGURE 4. Simulation results of sea-level rise(SD graphs)

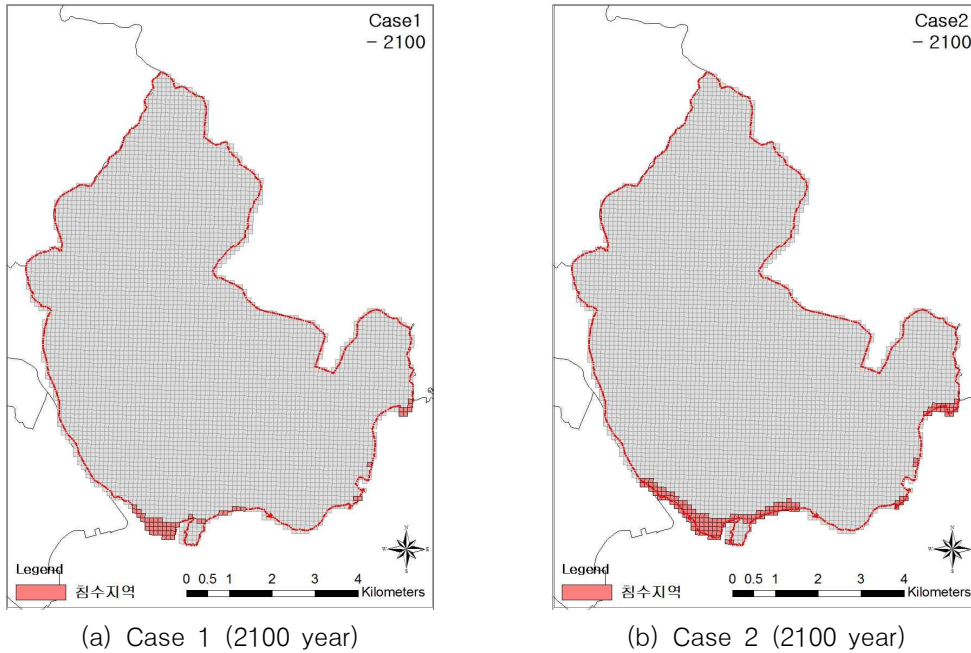


FIGURE 5. Simulation results: inundation area(GIS map)

인한 해수면 상승은 진행 속도에 있어서 적응 기간을 어느 정도 확보하여 대응할 수 있을 것으로 보이나, 슈퍼태풍과 같은 극단적인 상황은 발생시기와 규모에 있어 예측 자체가 어려운 사건이므로 이에 대한 철저한 대비가 필요할 것이다.

또한 용도지역에 대한 영향을 살펴보면 특히 일반상업지역의 피해가 두드러진다. 이는 대상지의 특성상 해수면 상승에 취약한 연안의 저

지대 부근이 대부분 일반상업지역으로 지정되어 있어 취약지역 면적의 증가와 함께 일반상업지역의 피해가 반영된 것이다. 이러한 결과를 고려하면 예측할 수 없는 극단적인 태풍에 대한 대응을 위해 해수욕장의 유동인구와 저지대 부근의 상업지역 및 배후의 거주 인구에 대한 대책이 마련되어야 할 것으로 보인다.

TABLE 2. Prediction values of inundation

Categories	Case 1(%)		Case 2(%)	
	Year.2050	Year.2100	Year.2050	Year.2100
Inundation area	0.82	0.95	1.42	2.53
Vulnerable population	0.46	0.49	0.59	0.82
Damage of property(land price)	2.44	2.74	3.54	6.08
Type1 general residential zone	0.01	0.02	0.02	0.03
Type2 general residential zone	-	-	0.00	0.00
Land use				
General commercial zone	0.33	0.37	0.54	0.96
Natural green area zone	0.07	0.07	0.11	0.26
Others	0.42	0.49	0.75	1.15
Total	0.82	0.95	1.42	2.41



## 2. 해수면 상승 대응방안 시나리오에 의한 시물레이션

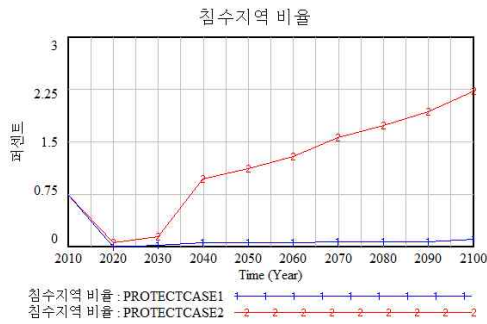
해수면 상승에 대한 대응방안은 방어(Protection), 순응(Accommodation), 후퇴(Retreat) 등 세 가지의 방안을 설정<sup>4)</sup>하여 시물레이션 하였다. 방어 기법의 모델링을 위해 해안을 따라 방파벽과 같은 방재 구조물을 설치한다고 가정하였고, 순응 기법은 flood-proofing의 일종으로 펠로티의 적용을 가정하였으며, 후퇴 기법은 인구의 set-back을 가정하였다. 이를 위해서 위에서 구축된 SD-GIS 모델의 변수 수식을 수정하였는데, 방어 기법의 적용을 위해 해안과 접한 셀들의 초기 표고를 조절하였고, 순응 기법의 적용을 위해서는 이전의 시물레이션에서 침수에 취약한 것으로 나타난 셀들의 표고를 1m 증가시키도록 모델을 수정하였다. 마지막으로 후퇴 기법을 적용하기 위

해 대상지 인구의 set-back을 가정하여 부산시의 인구감소 추세를 적용하여 모델을 수정하였다. 침수영향 시물레이션과 마찬가지로 해수면 상승 시나리오에 의한 시물레이션(Case 1)과 태풍 해일고까지 함께 고려한 시물레이션(Case 2)을 실행하였고, 각각의 결과를 고찰하였다(그림 6 참조).

어떠한 대안도 적용되지 않은 경우(No action)와 세 가지의 해수면 상승 대응 방안이 적용된 경우의 시물레이션 결과(표 3 참조), 2100년으로 기준으로 판단할 때, 방어, 순응, 후퇴 대안 모두 해수면 상승으로 인한 영향을 감소시키는 것으로 나타났다. 기후변화로 인한 해수면 상승(Case 1)은 2100년까지 서서히 영향을 미치는 것으로 나타나 방어와 순응 방안이 어느 정도 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단되고, 해수면 상승의 시간적 흐름에 따라 취약한 지역이 증가하더라도 방파벽을 보완하



(a) Protection: Vulnerable population(%)



(b) Protection: Inundation area(%)



(c) Accommodation: Vulnerable population(%)



(d) Accommodation: Inundation area(%)

FIGURE 6. Simulation results of adaptation scenarios(SD graphs)

TABLE 3. Simulation results of adaptation scenarios(2100 year)

	No action		Protection		Accommodation		Retreat	
	Case1	Case2	Case1	Case2	Case1	Case2	Case1	Case2
Inundation area(%)	0.95	2.53	0.109	2.22	0.11	2.15	0.95	2.53
Vulnerable population(%)	0.49	0.82	0.001	0.81	0.001	0.81	0.49	0.82

거나 건물 표고를 조정할 수 있는 기간을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 Case 2 시나리오를 적용하면 여전히 침수 영향을 받는 지역과 인구가 높게 나타나며, 본 연구에서 가정한 해수면 상승고 이상의 파고가 예측할 수 없는 상황에서 갑자기 발생한다면 더욱 큰 피해를 예상할 수 있을 것이다. 비교를 위해 적용 셀만 차이를 두어 1m씩 초기 표고값을 상승시킨 방어와 순응 방안을 비교하면, 2100년의 Case 2에서 피해 면적과 인구에 두드러질 만큼 큰 차이가 발생하진 않지만, 순응 방안을 적용할 때 취약 인구나 침수 면적이 약간 더 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 방어 기법을 적용하였을 때보다 순응 기법을 적용하였을 때, 취약한 면적이 감소함에도 불구하고 취약 인구에는 변함이 없는 것으로 나타나, 연안 저지대의 인구 밀집 지역에 대한 대책이 강구되어야 할 것으로 보인다.

## 결론

본 연구에서는 시간 흐름에 따른 변수들의 상호작용 및 동태적 변화를 모델링할 수 있는 SD와 공간적 변이를 나타내고 분석할 수 있는 GIS를 통합하여 시공간 통합모델을 구축하였다. 모델은 공간 분석 기능을 이용하여 도출된 GIS의 변수들이 SD 내부에서 동태적 모델링을 거쳐 다시 GIS에서 결합되고 분석될 수 있도록 데이터베이스 교환 방식의 약결합을 이용하여 구축하였다.

구축된 모델을 이용하여 연구대상지에 대하여 IPCC의 해수면 상승 시나리오(Case 1) 및 최악의 경우인 태풍 해일고를 고려한(Case 2) 침수 영향을 시뮬레이션 하였고, 이를 통해

2100년까지 시간 단위별로 침수에 의한 피해 면적과 인구를 예상하였다. 또한 해수면 상승의 대응 방안으로 방어, 순응, 후퇴 대안의 시나리오를 설정하여 모델을 개선함으로써 각각의 대안으로 인한 결과와 그 의의를 살펴보았다.

이와 같은 결과를 통해 본 연구에서 구축한 시공간 통합모델의 효과를 고찰하면, 공간변수를 SD에서 다룰 수 있게 함으로써 시간 흐름별로 변수들의 동태적 변화를 살펴볼 수 있었고, 이를 다시 GIS 환경에 결합하여 공간적 특성까지 살펴볼 수 있었다. SD를 적용함으로써 시간적인 흐름을 반영할 수 있다는 이점은 단순히 목표 시점의 결과를 산출해내는 것보다 목표 시점까지의 과정을 살펴볼 수 있다는 점에서 큰 의의를 갖는다. 즉 SD와 GIS의 결합으로 인해 2100년까지의 변화를 살펴봄에 있어서 다양한 변수들이 목표 년도까지 어떻게 변화해 가는가를 추적할 수 있고, 따라서 설정 시점별로 변화 과정 수치를 산출하여 공간적 변이의 결과뿐만 아니라 과정까지 살펴봄으로써 두 가지 방법론의 결합으로 인한 시너지 효과를 확인할 수 있었다.

SD의 관점에서 본다면 그 동안 다루지기 힘들었던 공간 변수들을 모델 안에서 처리함으로써 공간적, 비공간적 변수들의 상호작용을 반영할 수 있었고, 이를 GIS와 연계함으로써 설정 시점과 목표 시점마다의 시각화와 또 다른 공간분석을 위한 기초자료로서의 잠재력을 보여줄 수 있었다. 뿐만 아니라 모델 내부에서 변수를 수정함으로써 다양한 정책의 실험이 유연하게 이루어진다는 점도 시스템 다이내믹스의 장점이라고 할 수 있으며, 이를 GIS와 연계함으로써 시각적으로 효과를 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 시공간 통합모델 구축의 필요성에 주목하여 변수 및 구조를 단순화하였으나, 향후 대용량의 다양한 변수들을 처리할 수 있도록 데이터베이스 측면이 보완되고 해수면 상승으로 인한 침수에 영향을 줄 수 있는 광범위한 변수들을 고려할 수 있다면 더욱 정교한 모델이 구축될 것으로 보인다. SD와 GIS의 시너지 효과를 활용하여 불확실성과 복잡성의 증대로 인해 점점 예측이 어려워지고 시간적 변화 과정뿐만 아니라 공간상의 변화 양상이 중요하게 다루어지는 문제들, 즉 도시의 성장과 쇠퇴, 교통, 환경, 기후변화로 인한 영향 등의 학제적인 분야에서 다양한 분야의 의견을 수렴하여 문제 해결에 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

#### KAGIS

### 주

- 1) 인구 정보는 BIZ-GIS(www.biz-gis)에서 제공하는 2005년 주거 인구 데이터를 활용하였다.
- 2) 저장(Level) 변수는 시간에 따라 값이 누적되는 형태를 갖게 되며, 유량(Rate) 변수에 의해 유입(Inflow)과 유출(Outflow)의 증감이 일어난다. 예를 들어, 그림 3의 침수모델에서는 유량변수인 "Rise Rate"가 시간 흐름에 따라 "i Sea Level"이라는 초기값(constant)을 갖고 있는 저장변수 "Sea Level"을 변화시킨다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.  $Sea\ Level = \int Rise\ Rate\ dt + i\ Sea\ Level$ . 이 외에도 SD 모델에서 사용되는 변수는 변수들 간의 관계를 좀 더 명확화하기 위해 사용되는 보조변수(auxiliary variable)와 상수(constant) 등이 있다.
- 3) 연안지역에 영향을 주는 것은 점진적인 해수면 상승보다 극단적인 태풍 해일로 인한 급격한 해수면 변동이라고 볼 수 있다(Yook *et al.*, 2011). 특히 한반도와 같이 조석, 태풍 및 폭풍해일 등의 동적 영향이

큰 지역에서는 지구 온난화에 의한 해수면의 정적 상승만을 고려하는 방법보다는 태풍 및 조석 효과를 동시에 고려하는 것이 적절하다고 보는 견해(Cho *et al.*, 2002)가 있으며, 이에 따라 해수면 상승과 태풍 해일고의 영향을 함께 시뮬레이션하는 연구도 다수 수행되었다(Maeng and Jang, 2011; Hong *et al.*, 2013).

- 4) 해수면 상승에 대한 적응 수단의 선택과 시기는 영향을 받을 지역의 특성에 따라 차이가 있고 이에 따라 적응대책에 대한 다수의 방식들이 개발되어 다양한 접근방식이 제시되어 왔으나 IPCC CZMS(Coastal Zone Management Subgroup, 1990)에서 제시한 후퇴, 순응, 방어의 세 가지 방식이 일반적으로 광범위하게 적용된다.

### REFERENCES

- Ahmad, S. and S.P. Simonovic. 2004. Spatial system dynamics: new approach for simulation of water resources systems. *Journal of Computing in Civil Engineering* 18(4):331-340.
- Busan Metropolitan City. 2012. Climate change sectoral adaptation strategy in Busan metropolitan city. p.45 (부산광역시. 2012. 부산광역시 기후변화 적응대책 세부시행계획. 45쪽).
- Cho, K.W., J.E. Kang, W.J. Yang, S.Y. Kong, H.M. Lee and H. Nobuoka. 2010. Vulnerability assessment of the Korean coast due to sea-level rise and appropriate response strategies II -evaluation of coastal inundation and its responses. Korea Environment Institute. p.65 (조광우, 강정은, 양원준, 공성용, 이해미, H. Nobuoka. 2010. 해수면 상승에 따른 취약성 분석 및 효과적인 대응정책 수립 II -연안역 범람평가 및 대응방향. 한국환경

- 정책·평가연구원. 65쪽).
- Cho, K.W., J.H. Kim, H.C. Jung, N. Mimura and R.J. Nicholls. 2002. Sea level rise and its possible impact near the Korea due to global warming II. Korea Environment Institute. p.38 (조광우, 김지혜, 정휘철, N. Mimura, R.J. Nicholls. 2002. 지구온난화에 따른 한반도 주변의 해수면 변화와 그 영향에 관한 연구 II. 한국환경정책·평가연구원. 38쪽).
- Deal, B., C. Farello, M. Lancaster, T. Kompare and B. Hannon. 2000. A dynamic model of the spatial spread of an infectious disease: the case of fox rabies in illinois. Environmental Modeling and Assessment 5(1):47-62.
- Elsorbagy, A., A. Jutla. L. Barbour and J. Kells. 2005. System dynamics approach to assess the sustainability of reclamation of disturbed watershed. Canadian Journal of Civil Engineering 32:144-158.
- Ford, F.A. 1999. Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Models of Environmental System. Island Press. pp.364-370.
- Hong, S.K., Y.H. Kang and H.S. Lee. 2013. A study on flooding prevention scheme due to sea level rise at Young-do coast in Busan. Journal of Navigation and Port Research 37(4):409-418 (홍성기, 강영훈, 이한석. 2013. 부산 영도 해안의 해수면 상승에 따른 침수대책 연구. 한국항해항만학회지 37(4):409-418).
- Kang, J.E and M.J. Lee. 2012. Assessment of flood vulnerability to climate change using fuzzy model and GIS in Seoul. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 15(3):119-136 (강정은, 이명진. 2012. 퍼지모형과 GIS를 활용한 기후변화 홍수취약성 평가 : 서울시 사례를 중심으로. 한국지리정보학회지 15(3):119-136).
- Kim, J.S, H.Y. Kim and S.H. Lee. 2014. A review on improvements of climate change vulnerability analysis methods : focusing on sea level rise disasters. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 17(1):50-60 (김지숙, 김호용, 이성호. 2014. 도시 기후변화 재해취약성분석 방법의 개선방안 검토 : 해수면상승 재해를 중심으로. 한국지리정보학회지 17(1):50-60).
- Kim, K.C., G.Y. Jeong and S.W. Kim. 2007. System Dynamics Using Vensim. Seoul Economics & Management. p.2 (김기찬, 정관용, 김성원. 2007. Vensim을 활용한 System Dynamics(역). 서울경제경영. 2쪽).
- Maeng, D.H. and D.H. Jang. 2011. Evaluation of inundation damages on the fluctuation of inundation height due to climate change in Haeundae area. Journal of the Korean Geomorphological Association 18(4):141-152 (맹다혜, 장동호. 2011. 해운대 지역의 기후변화에 의한 해일고 변동에 따른 침수피해 평가. 한국지형학회지 18(4):141-152).
- Mayunga, J.S. 2007. Understanding and Applying the Concept of Community Resilience: A Capital-based Approach. Summer Academy for Social Vulnerability and Resilience Building. pp.1-16.
- Moon, T.H. 2007. Sustainable Urban from the Aspect of System Thinking. Jipmoondang. p.55 (문태훈. 2007. 시스템 사고로 본 지속가능한 도시. 집문당. 55쪽).

- Ruth, M. and F. Pieper. 1994. Modeling spatial dynamics of sea-level rise in a coastal area. *System Dynamics Review* 10(4):375-389.
- Simonovic, S.P. 2011. *Systems Approach to Management of Disasters: Methods and Applications*. Wiley. pp.21-27.
- Skalar, F.H. and R.C. Costanza. 1991. The development of dynamic spatial models for landscape ecology: a review and prognosis. In: Turner, M.G. and Gardner, R.H. (Eds.). *Quantitative Methods in Landscape Ecology: the Analysis and Interpretation of Landscape Heterogeneity*. Springer-Verlag. 536pp.
- Song, B.G, T.S. Lee and K.H. Park. 2014. Assessment of flooding vulnerability based on GIS in urban area : focused on Changwon city. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 17(4):129-143 (송봉근, 이택순, 박경훈. 2014. GIS 기반의 도시지역 침수 취약성 평가 : 창원시를 대상으로. *한국지리정보학회지* 17(4):129-143).
- Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). 2013. *Summary for Policymakers*. In: IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge Univ. Press. p.22.
- Xu, Z. and V. Coors. 2012. Combining system dynamics model, GIS, and 3D visualization in sustainability assessment of urban residential development. *Building and Environment* 47:272-287.
- Yeh, S., C. Wang and H. Yu. 2006. Simulation of soil erosion and nutrient impact using an integrated system dynamics model in a watershed in Taiwan. *Environment Modelling & Software* 21:937-948.
- Yook, K.H., J.H. Jung and Y.S. An. 2011. A study on the coastal vulnerability assessment model to sea level rise. Korea Maritime Institute. p.21 (육근형, 정지호, 안용성. 2011. 해수면 상승에 따른 연안 취약성 평가 모형 연구. 한국해양수산개발원. 21쪽). **KAGIS**