

토지이용균형모델을 이용한 기후변화에 따른 제주도 지역의 주거용 토지이용변화와 인구 밀도 예측*

유소민¹ · 이우균^{2*} · 야마가타 요시키³ · 임철희² · 송철호² · 최현아²

Analyzing Residential Land Use Change and Population Density Considering Climate Change Using Land Use Equilibrium Model in Jeju*

So-Min YOO¹ · Woo-Kyun LEE^{2*} · Yoshiki Yamagata³ · Chul-Hee Lim² ·
Chol-Ho SONG² · Hyun-Ah CHOI²

요 약

급격한 경제 성장과 인구 증가는 온실가스 배출량을 급증시키고 있으며 이는 기후변화를 가속화시키고 있다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 보고서는 온실가스가 2000년부터 2030년까지 최대 90%까지 증가할 것이라고 보고하고 있다. 이에 전 세계에서는 기후변화에 대한 피해를 줄이기 위해 기후변화 적응과 완화 대책 수립이 중요시되고 있으며, 우리나라에는 기후변화 대응 정책으로 '저탄소 녹색성장(Low Carbon Green Growth)'을 시행하였다. 지자체에서는 친환경적이며 지속가능한 발전을 위한 도시계획을 조성하기 위해 다양한 연구를 수행해왔다. 특히, 기후변화에 가장 크게 영향을 줄 수 있는 토지이용변화에 대한 연구가 활발하게 수행되어지고 있는 실정이다. 본 연구에서는 제주도를 대상으로 경제적, 지리적 특성을 기반한 토지이용 균형 모델을 적용하여 주거 토지이용변화와 인구 밀도를 예측하였다. 먼저, 주거부분의 토지이용변화를 보기 위해, 3가지 유형의 시나리오를 구축하였다. 시나리오는 현재와 동일한 환경을 갖는 Dispersion 시나리오, 기후변화 적응 대책을 반영한 Adaptation 시나리오, 기후변화 적응과 완화 대책을 동시에 반영한 Combined 시나리오이다. 그 결과, 전반적으로 Dispersion 시나리오에서 Combined 시나리오로 갈수록 주거면적과 인구밀도가 줄어들었다. 이후 주거면적과 인구밀도 결과를 통해 시나리오별 주거용 에너지 소비량과 예상 인명 피해액을 산정하였다. 그 결과, 전반적으로 Dispersion 시나리오에서 Combined 시나리오로 갈수록 에너지 소비량과 예상 인명 피해액은 줄

2015년 2월 13일 접수 Received on February 13, 2015 / 2015년 11월 17일 수정 Revised on November 17, 2015 / 2015년 11월 26일 심사완료 Accepted on November 26, 2015

* 본 연구는 환경부 「기후변화특성화대학원사업」과 「기후변화대응 환경기술개발사업(과제번호: 2014001310008)」 지원으로 수행되었음.

1 고려대학교 기후환경학과 Dept. of Climate Environment, Korea University

2 고려대학교 환경생태공학과 Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

3 일본 국립환경연구소 세계환경연구센터 Center of Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Japan

※ Corresponding Author E-mail : leewk@korea.ac.kr

어 들었다. 본 연구에서 제시한 토지이용균형모델을 적용하여 시나리오별 주거부분 토지이용과 인구 밀도 변화 파악은 향후 기후변화 안정성을 확보하고 완화할 수 있는 환경적 도시계획을 수립하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 토지이용변화, 토지이용균형모델, 완화, 적응, 시나리오

ABSTRACT

The greenhouse gas emission caused by rapid economic growth and population is increasing in Korea. Also, climate change from greenhouse gases emission is accelerated. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) report projects an increase of greenhouse gas emissions by 90% from the year 2000 to 2030(SRES, 2000). Within this context, establishing countermeasures on climate adaptation and mitigation is becoming increasingly important to reduce the negative effect of climate change at a global level. Along with global efforts to tackle climate change, Korean government has incorporated 'Low Carbon Green Growth' strategies into its national policy agenda. Local governments have also conducted a number of studies to devise plans for environmentally friendly and sustainable city development. In this paper, the land-use equilibrium model, which reflects economic and geographical characteristics, is used to analyze the change in residential land use and population density. The target area for study is Jeju island in Korea. With an application of land use equilibrium model, it derived three types of scenarios of the land use change: (1) dispersion scenario—reflecting present-day conditions (2) adaptation scenario—applying adaptation measures to climate change and (3) combined scenario—integrating both adaptation and mitigation measures in model to climate change. By applying dispersion to combined scenario, the general trend shows a downward shift in population density. Subsequently, energy consumption and expected cost associated with casualties were calculated on the basis of the findings of respective scenario. The results show a descending trend in energy consumption and expected casualty. Therefore, understanding for residential land use and population density of each scenario that analyzed land use equilibrium model in the study is expected to devise an environmental city plan for climate change stabilization and climate adaptation and mitigation.

KEYWORDS : *Land Use Change, Land Use Equilibrium Model, Mitigation, Adaptation, Scenario*

서론

오늘날 전 세계는 기후변화로 인해 홍수, 가뭄, 해수면 상승, 폭설 등 이상기후 증가로 인

한 재난/재해 피해가 심각해지고 있는 실정이다. 우리나라의 경우, 기상과 관련된 재해 중에서 호우, 태풍, 폭풍에 의한 재해가 80% 이상을 차지하고 있다(National Emergency Management, 2005). 또한 1912년에 비해

2010년은 기온이 1.8℃ 상승했으며, 연 강수량은 약 17% 증가했다. 이산화탄소 농도의 경우, 2010년은 1999년에 비해 2.12ppm/년 증가율을 나타냈다(Government of the Republic of Korea, 2011). IPCC 제 4차 보고서에서는 지금까지 배출한 온실가스로 인하여 전 세계는 물론 우리나라에서는 기후변화 가속화가 불가피한 상황이라고 보고하였다(IPCC, 2007). 이로 인해 세계적으로 기후변화 ‘적응과 완화’가 핵심적인 수단으로 중요시 되고 있다. 우리나라는 개발도상국 국가로 온실가스를 줄이는 의무감축목에 포함되어 있지 않지만 경제성장으로 인한 지속적인 온실가스를 배출함으로써 기후변화에 기여해 왔다. 또한, 기후변화로 인한 피해를 줄이고 향후 피해를 예방하기 위해 완화 및 적응 대책 수립에 대한 노력을 기울이고 있다.

대표적으로 우리나라는 2010년 ‘저탄소 녹색성장(Low Carbon Green Growth)’을 기본법으로 제정하였다. 저탄소 녹색성장은 친환경 기술 개발, 육성을 통한 산업경제 개발과 국민의 삶을 친환경적인 틀로 전환시켜 나가자는 요지로 만들어졌으며, 이에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다. 그 중에서 기후변화와 환경 훼손을 줄이고 지속가능한 발전을 이루는 도시계획 연구가 활발히 수행되고 있다.

특히 친환경적 도시를 계획함에 있어, 택지개발, 경관구조 변화 등과 같이 기후변화 영향이 큰 토지이용변화가 중요한 요소로 작용되고 있다. Kim and Yeo(2005)는 지표온도를 결정짓는 요인과의 상관관계 분석을 통해, 토지이용에 따라 도시지역의 지표온도가 크게 영향을 받는다고 하였고, Jung *et al.*(2002)은 인간 활동으로 인한 무분별한 토지이용은 자연적으로 만들어진 경관의 모습을 해하는데 주요한 요인이라고 하였다. 이렇듯 토지이용은 토지를 목적과 기능에 맞게 유효하게 사용하는 것으로써 토지이용에 대한 변화가 급격하게 진행되면, 기후변화에 의한 취약성이 커지며 재난재해가 크게 증가할 수 있다(Park and Tak, 2013). 뿐만 아니라 토지이용변화는 기후변화에 영향을 크게 미치는 대표적인 인자로(U.S Environmental Protection Agency, 2009), 토지이용 변화에 따라 지표면의 온도가 변화하거나 대기 중의 오염물질이 달라질 수 있다(Byun *et al.*, 2009).

현재 도시화 지역에서는 개발 가속화로 인한 토지이용변화가 많이 일어나고 있으며, 토지이용은 총 이산화탄소 배출량 부문에서 큰 비중을 차지하고 있다. 또한 기후변화에 따라 도시 기반의 삶과 질에 대한 영향이 좌우되기 때문에 토지이용은 기후변화 관련해서 중요한 관계

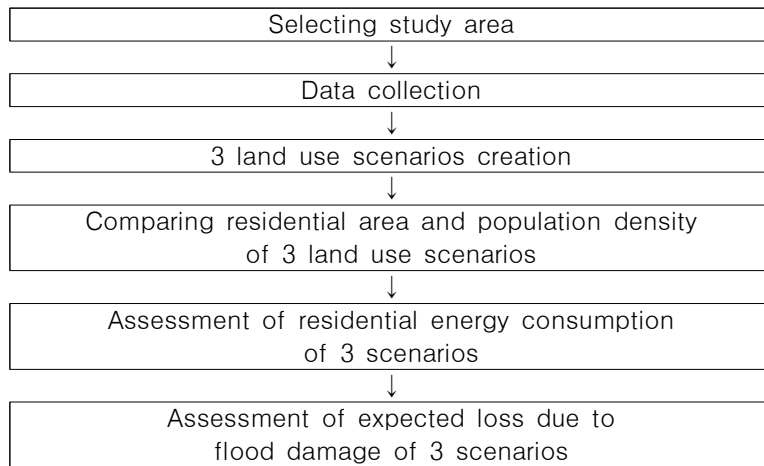


FIGURE 1. Flow chart of the study

를 가지고 있다고 볼 수 있다(IPCC, 2009). 2002년 국제자유도시로 지정된 제주도 역시 지속적인 관광지 개발로 인하여 경제가 성장하고 있다. 국가 통계청은 1971년에서 2000년까지의 전년대비 인구 증가율이 약 1.2%로 전국 평균 1.13%보다 높은 것으로 나타났고, 이로 인해 주택용지 수요가 증가하고 있는 실정이다. 또한 사업체 수와 인구 증가로 인한 자동차 이용률도 증가하고 있다. 이러한 요인은 제주도의 대기오염 및 도시 열섬현상을 증가시키는 중요한 역할에 더해지고 있다(Honam Regional Statistics Office, Jeju Office, 2009). 이에 제주도는 급격한 거주 인구 증가와 경제 성장으로 인해 기후변화로 인한 피해가 점차 증가되어갈 가능성이 높다. 본 연구에서는 일본에서 활용되고 있는 토지이용균형 모델을 우리나라에 시범적으로 적용하여 토지이용 시나리오 별 주거면적과 인구 밀도를 예측하고 기후변화 적응 및 완화 정책을 반영함에 따른 토지이용 변화를 알아본다(그림 1).

연구 자료 및 방법

1. 연구 대상지 및 범위

본 연구의 대상지는 제주도로써 지리적 위치로는 동경 126도 08분에서 126도 58분, 북위

33도 06분에서 34도 00분이다(그림 2). 제주도는 한국에서 인구가 가장 많은 큰 섬이며 총 면적은 1,848.5km²로 남한 면적의 1.83%에 해당하고 있다. 지형적 특성으로는 한라산을 중심으로 타원형을 이루고 있으며, 한라산을 기준으로 동서 사면은 약 3~5도, 남북사면은 5도 정도 경사를 이루고 있다(Meteorological Research Institute Korea Meteorological Administration, 2009).

제주도는 세계적인 관광휴양지로서 급상승한 인구증가 뿐 아니라 토지이용변화도 지속적으로 일어나고 있다. Jeju Special Self-Governing Province(2014)에서는 인구 증가율이 2006년에는 0.34%였지만 2013년에는 2.06%로 증가하였다고 보고하였다. 또한 토지거래현황에서 주거 면적이 2009년에는 1,251천m²에서 2013년에는 2,773천m²로 증가하는 반면, 자연환경보전지역은 2009년에 1,271천m²에서 2013년에는 1,234천m²로 감소한다고 보고하였으며 주택 보급률은 2009년 96%에서 2013년에는 108.2%로 증가하였다. 또한 제주도는 태풍의 길목으로 우리나라에서 태풍의 영향을 가장 먼저 받는 지역이다. 제주도과 같이 고도가 높은 산지가 존재할 경우, 태풍 강도와 진로가 급격하게 변할 수 있는 위험이 크다(Chang *et al.*, 1993). 지난 36년 간

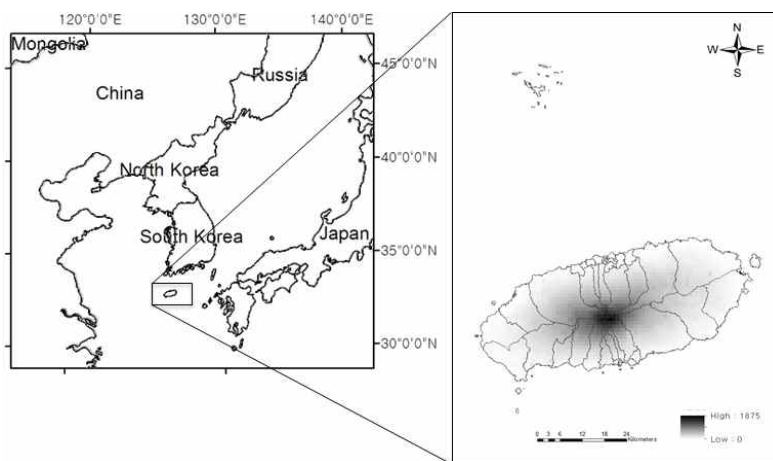


FIGURE 2. The study area and elevation of study area

(1970-2006) 발생한 풍수해는 총 94회이며, 이로 인한 재산피해는 약 2,091억 원과 177명 인명피해가 있었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2008). 기후변화로 인한 이상기후현상의 빈도와 강도의 증가로 인해 태풍 및 홍수 등의 빈도와 강도가 점차 높아지면서 제주도에서의 인명피해와 재난재해 피해 또한 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 앞에서 설명한 것과 같이 제주도는 향후 지속적으로 거주 인구와 인구 이동률이 증가할 것이며 이는 기후변화로 인한 취약 뿐 아니라 재난피해가 증가될 수 있다는 것을 의미하기도 한다. 이에 제주도에서는 인구와 주택보급 증가로 인한 토지이용변화를 어떻게 다룰 것인지에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 국토지리정보원에서 제공하는 우리나라 전체 읍면동 경계파일을 이용하였고, 연구에서 사용되어지는 지형적 특성을 나타내는 지표들이 1km 해상도를 갖는 점을 감안하여, 공간연산을 통해 1km 해상도를 갖는 래스터 구조로 통일하여 사용하였다. 제주도 지역의 총 격자 수는 1,897개이다.

2. 자료 수집 및 구성

본 연구에서는 모델에 필요한 지표를 선정하고, 선정된 지표에 대한 자료를 수집하였으며 이는 Yamagata *et al.*(2013)에서 사용되어진 지표를 따라 선정하였다. 지표는 모두 동일한 시점의 자료로 구성되어야기에 현재시점을 2010년을 기준으로 자료를 수집하였다. 지표는 주거지역을 선정할 때 영향을 미치는 것과 제주도 지역의 사회·경제적 특성을 반영하는 것으로 선정하였으며 이는 다음과 같다(표 1).

먼저, 사회·경제적 특성을 반영하는 지표로는 인구 수, 수입, 주택공시지가, 토지공시지가, 주거지역으로 선정하였고, 주거지역을 선정할 때 기준이 되는 지표로는 고도, 경사, 상업면적, 전체 면적, 학교밀도, 상업밀도, 홍수피해지역으로 선정하였다. 홍수피해지역 지표는 제주도가 기후변화에 따른 재해 중 홍수와 태풍에 의한

피해에 따른 손실이 가장 크며, 이러한 손실은 경제적으로 영향을 미칠 수 있는 부분이기에 홍수 피해 지역을 사회경제적 특성 지표로 선정하였다. 인구수, 수입, 상업밀도, 학교밀도 지표의 경우, 국가통계청에서 제공하는 읍면동 기반 통계자료를 사용하였고, 주택공시지가와 토지공시지가는 한국주고도와 경사 자료의 경우, 한국주택토지공사에서 제공하는 읍면동 기반 통계자료를 사용하였다. 고도와 경사 지표의 경우, 환경부에서 제공하는 수치지형도를 사용하였고 상업면적과 전체면적, 주거면적은 중분류 토지피복지료를 활용하였다. 선정되어진 지표들은 1km 격자를 가진 해상도로 통일하여 구축하였다. 본 연구에서 사용하는 모델은 각 지표들의 값을 그대로 반영할 수 있는 특징을 가지고 있어 특별히 표준화 과정을 수행하지 않았다. 홍수 피해 지역은 취약성 평가 값으로 사용하였다. 홍수에 의한 침수 취약성 평가를 위해 민감도, 적응능력, 기후노출 세 가지 기준에 대한 지표를 선정하였다(표 2)(Yoo *et al.*, 2013). 선정된 지표는 홍수에 의한 취약성을 수행한 Ministry of Environment(2013)에서 적용한 지표들로 선정하였다. 시나리오가 2040년을 기점으로 구축되기에 취약성도 미래(2040년)에 대한 평가를 수행하였다. 이를 위해 기후노출 지표의 경우, 기상청에서 제공하는 RCP 8.5 시나리오를 적용하였고, 65세 이상 인구수는 과거 10년 이상 자료를 가지고 추세를 이용하여 미래 값을 구축하였다. 저지대면적과 녹지율 지표는 과거자료가 부족하여 현재 값을 미래자료로 그대로 사용하였다.

식 (1)은 취약성 평가 방법으로써 IPCC 정의에 따라 적응능력, 기후노출, 민감도 3가지 기준을 사용하였으며, 본 연구에서는 기준 별 선정된 지표를 적용하여 취약성 평가를 실시하였다.

$$Vulnerability = \frac{Sensitivity \times Exposure}{Adaptation} \quad (1)$$

선정한 지표들은 서로 다른 단위로 범위로

TABLE 1. Selection of variables

Variables	Description	Form	Unit	Source
Population	Number of population	EupMyeonDong	Person	Korean Statistical Service
Income	Total income for industry group	EupMyeonDong	won	Korean Statistical Service
Land rent	Price of land rent	EupMyeonDong	won	Korea Land and Housing Corporation
Floor rent	Price of floor rent	EupMyeonDong	won	Korea Land and Housing Corporation
Elevation	Elevation per 1km area	1km raster	m	Ministry of Environment
Slope	Slope per 1km area	1km raster	°	Ministry of Environment
Residential	Residential area per 1km area	1km raster	m ²	Ministry of Environment
Commercial	Commercial area per 1km area	1km raster	m ²	Ministry of Environment
ln(area)	Natural logarithm of the zone area	1km raster	m ²	Ministry of Environment
Office density	Number of office / 1km total area	1km raster	-	Korean Statistical Service
School density	Number of school / 1km total area	1km raster	-	Korean Statistical Service
Flooded area	Vulnerability Assessment	1km raster	-	-

구성되어 있기에 이를 하나의 지수로 표현하기 위하여 표준화 과정을 실시하였다. 표준화 방법은 식 (2)와 같으며 기준 별로 중요도가 같다고 가정 하에 동일한 가중치를 부여했다(Oh *et al.*, 2012).

$$Dimension\ value = \frac{Actual\ Value - Minimum\ Value}{Maximum\ Value - Minimum\ Value} \quad (2)$$

본 연구 수행을 위해 선정된 모든 자료는 공간연산을 통해 1km 해상도를 갖는 래스터 형태로 변환하여 구축하였다. 그림 3은 현재(2010년)와 미래(2040년)의 홍수에 의한 침수 취약성 평가 결과를 나타낸 것이다. 현재

(2010년)취약성 결과는 홍수 피해 지역 구축할 자료로 사용되지만 미래(2040)년 취약성 결과는 토지이용 시나리오 마다 홍수 피해 위험이 큰 지역에서의 거주 인구와 주거면적 변화를 파악하는데 참고자료로 사용되기도 한다.

연구 방법

1. 토지이용균형모델

본 연구에서 적용한 토지이용균형모델은 토지이용모델 중 하나로 일본에서 개발되어 저탄소를 위한 토지이용연구에 활용되는 바 있다(Nakamichi *et al.*, 2013; Yamagata and Seya 2013; Seya *et al.*, 2014). 그림 4는 토

TABLE 2. Indicators selected by the vulnerability assessment

Sector	Criteria	Indicator	Indicator building method	Source
Flooding to flood	Climate exposure	Rainfall intensity	RCP 8.5 scenarios	National Statistical Office
		Precipitation > 80mm(day)	RCP 8.5 scenarios	National Statistical Office
	Sensitivity	Number of over 65 years(person)	Trends	Korean Statistical Service
		Lowland area(<10m)	The current value	Ministry of Environment
	Adaptability	Green coverage area ratio	The current value	Korean Statistical Service

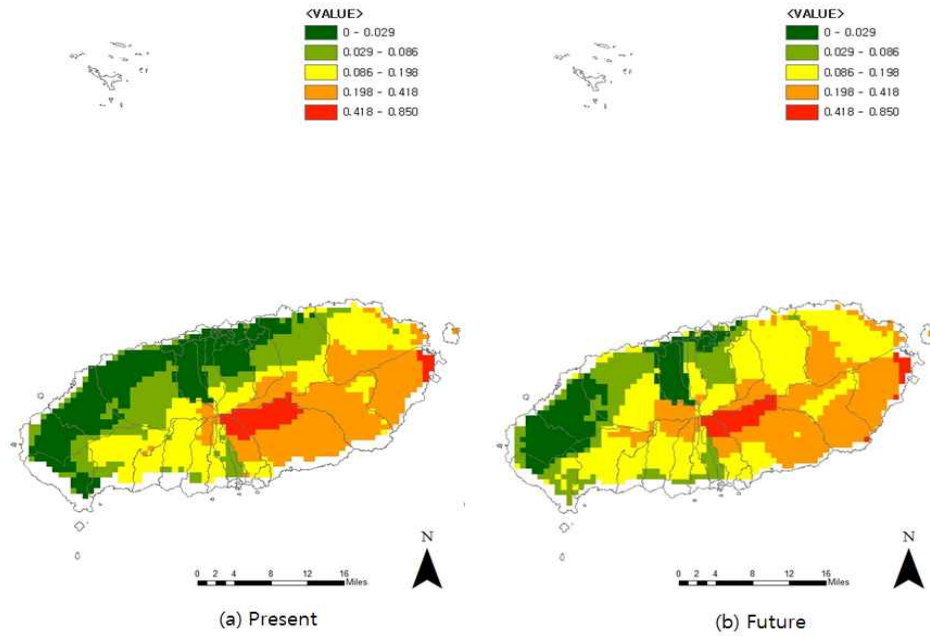


FIGURE 3. Vulnerability assessment for flooded area to heavy rain
(a) present (b) future

지이용균형 모델을 그림으로 표현한 것이며, 이 모델은 토지이용과 도시 경제적 이론을 통합한 모델로써 3가지 가정을 기반으로 있다 (Yamagata *et al.*, 2013). 첫째, 사회는 Household, Landlord, Developer 세 가지 유형으로 구성된다. 이는 경제주체의 행동분석을

통해 경제현상을 설명하는 미시경제학 원칙을 기반으로 이루어져 있다. 모델에서는 Household로 인하여 유용성이 극대화되고 Landlord와 Developer로 인하여 이익 극대화가 이루어진다. 두 번째, 적합한 토지이용은 수요와 공급이 균형을 이룰 때 발생한다. 이는 일반

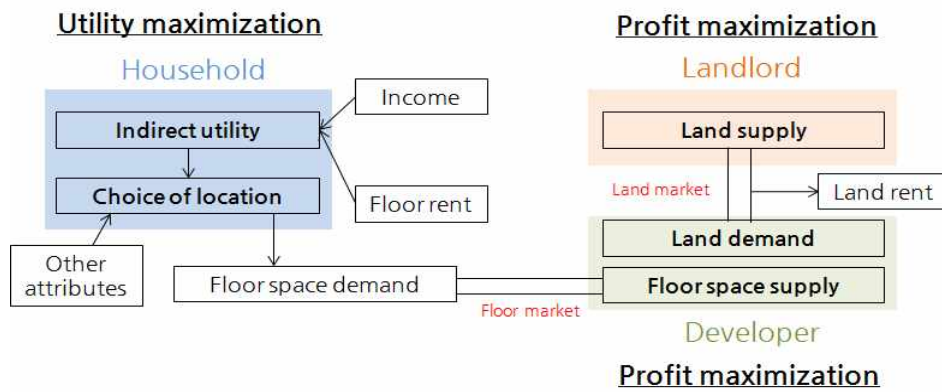


FIGURE 4. Structure of land use equilibrium model(Yamagata *et al.*, 2013)

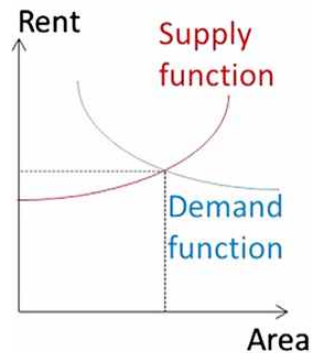


FIGURE 5. Graph of demanding and supplying(Yamagata *et al.*, 2013)

적인 경제 이론과 빗대어 설명할 수 있으며 그림 5와 같이 표현할 수 있다. 세 번째, 사람들은 간접적인 이익과 영역 별 특성에 따라 주거 지역을 선택한다. 본 연구에서 적용한 토지이용 균형 모델은 Dispersion, Adaptation, Combined와 같이 토지이용 시나리오를 만드는 데 적용되며 시나리오 별 인구 밀도, 주거 면적을 Output으로 얻을 수 있다. Output자료는 input자료와 동일한 해상도 별로 결과 값이 나오며, 이를 ArcGIS 프로그램을 이용하여 공간적 분포로 표현함으로써 시나리오 별 인구밀도와 주거면적 분포를 쉽게 비교할 수 있도록 하였다.

2. 시나리오 구축

본 연구에서는 시나리오 별 주거면적과 인구 밀도를 비교하기 위해, 3가지 유형의 시나리오를 구축하였다. 본 모델은 일본에서 개발되고 현재 활용되고 있는 모델이며 우리나라에 적용해보았을 때의 결과를 알아보기 위한 것으로 3가지 시나리오 유형과 그에 따른 가정을 그대로 반영하였다.

시나리오는 2040년을 기점으로 구축하였는데 이는 우리나라 국가 통계청에서 제시한 추계인구 시나리오에 따른 인구 증가율이 2040년까지만 제공하는 것으로 확인되었다.

Dispersion Scenario는 BAU(Business As Usual) 시나리오이며 다른 시나리오와 비교하

기 위해 현재 상태가 미래에도 그대로 유지된다는 것을 가정하고 있다. Adaptation Scenario는 기후변화 적응 시나리오로서 홍수 피해 위험지역에서는 가능한 주거 면적을 50%로 제한한다고 가정한다. 홍수 피해 위험정도는 '자료 수집 및 구성' 부분에서 제시한 취약성 평가 결과자료를 사용하였다. 홍수에 의한 침수 취약성 평가(그림 3)는 상대적으로 빨간색으로 갈수록 취약성이 크고 녹색으로 갈수록 취약성이 적은 것으로 나타난다. Combined Scenario는 기후변화 완화와 적응을 둘 다 만족시키는 시나리오로서 적응 대책으로 홍수 피해를 예방하는 것과 완화 대책으로 고밀도 도시계획 수립하는 것 두 가지 가정을 적용하였다. 고밀도 도시(Compact City)계획은 기후변화 완화 정책 중 하나로 지속가능한 도시 개발 뿐 아니라 환경보전을 추구하는 형태이다. 본 연구에서는 고밀도와 도시계획 가정을 세우기 위해 먼저 도시 중심지를 선정하였다. 도시 중심지는 일반적으로 대중교통으로 인하여 교통이 편리하고 고층건물을 밀집되는 곳을 의미한다. 하지만 제주도 지역은 버스 이외에 지하철과 기차 등과 같은 대중교통이 존재하지 않아 교통현황으로 인한 도시 중심지를 선정하기에는 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 도시 중심지를 상업지역과 주거지역이 겹치는 지역으로 기준을 정하였다. 상업지역과 주거지역은 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복지도를 활용하였으며, 상

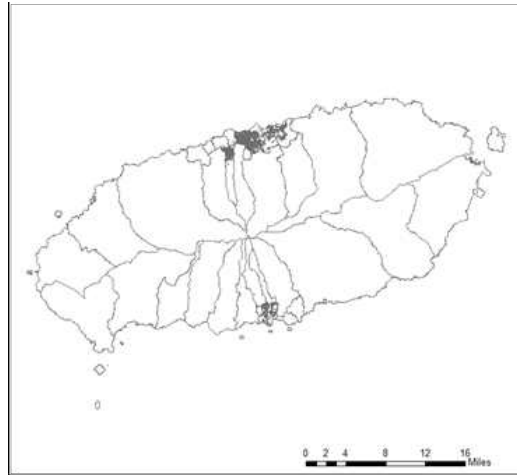


FIGURE 6. Map of city center

업지역과 주거지역이 겹치는 부분을 추출하였다(그림 6). 그 다음 도시 중심지 이외의 지역에서는 가능한 주거면적을 50%로 제한하였다. 홍수 피해 예방에 대한 가정은 Adaptation Scenario에서 제시한 가정과 동일하게 적용하였다.

3. 주거용 에너지 소비량 산출 및 인명 피해액 산출 방법

본 연구에서는 토지이용부문에서 사람들이 거주하는 주거용 토지가 어떻게 이용되고 변화

하는지에 따라 기후변화 완화 및 피해 정도 크기 비교를 위해 수행되어졌다. 이를 위해 각 시나리오 별 기후변화에 의한 피해 정도를 나타낼 수 있는 인명 피해액과 기후변화에 영향을 미치는 이산화탄소의 배출 정도를 대신하여 주거용 에너지 소비량 산출하였다.

에너지 소비량 산출 방법은 식 (3)과 같으며, 이는 Lee *et al.*(2010)에서 제시한 방법을 활용하였다. 총 면적을 토지이용 시나리오 별 총 주거 면적 값을 적용하였고, 연건평 별 가구 수는 시나리오 별 총 가구 수를 적용하였다. 연

$$Energy\ Consumption = Total\ Area \times \sum \frac{The\ Number\ of\ Households \times Average\ of\ Energy\ Consumption}{The\ Study\ Area} \quad (3)$$

Total area : Total residential area

The number of households : Total households

Average of energy consumption : $9536.4 \times 10^3 kcal$

The study area : Jeju area

$$P = P_i \times A \times Q_i \quad (4)$$

P : Damage life

P_i : Population density per expected flooded hazard area

A : Expected flooded hazard area

Q_i : 24,206

i = Injury

$$Unit\ life\ Damage = GDP\ per\ capita \times 14.0939 \quad (5)$$

건평 별 에너지 사용량은 에너지 총 조사보고서에서 제시된 제주지역 부문 가구당 평균 에너지 사용량 값인 $9536.4 \times 103\text{kcal}$ 대입하였다(Compiled by Korea Energy Economics Institute, 2011). 대상지 면적은 제주도 전체 면적 값을 적용하였다. 인명 피해액 산출 방법은 식 (4)와 같으며, 이는 Kim *et al.*(2002)에서 제시한 방법을 활용하였다. Pi에 예상 침수 피해 면적에 해당하는 인구 밀도 값을 적용하였고 A는 예상 침수 피해 지역면적 값을 적용하였다. Qi는 부상단위 피해액으로 사망단위의 피해액 10%로 계산하여 적용하였다(Kim *et al.*, 2002). 사망단위 피해액 산정은 식 (5)로 국가통계청에서 제공하는 1인당 GDP 자료를 사용하여 산출하였다. 그 결과 부상 단위 피해액은 24,206 달러로 나타났다.

결과 및 고찰

1. 주거 면적

토지이용균형모델을 이용하여 3가지 토지이용 시나리오 별 주거 면적 차이를 비교하였다. 시나리오 별 주거 면적 차이를 쉽게 비교하기 위해 주거 면적 결과를 Geometrical Interval 방법으로 등급을 나누었다. Geometrical Interval은 자료의 특성을 반영하여 최소의 변화까지도 분류하는 방법이다. 또한 등급분류 기준을 통일하여 시나리오 별 주거면적을 쉽게 비교할 수 있도록 하였다.

그림 7은 Dispersion, Adaptation, Combined 시나리오의 주거 면적 결과를 지도로 작성한 것이다. 지도를 보면, 각 시나리오 별 주거 면적은 전반적으로 줄어드는 것으로 나타났다. 주거 면적이 얼마만큼 줄어들었는지 수치로 표현하기 위해, 시나리오 별 총 주거 면적을 구했다(표 3). 현재와 동일한 Dispersion 시나리오

보다 적응 정책이 반영된 시나리오가 미세하지만 4.43km^2 만큼 줄어들었고, adaptation 시나리오보다 기후변화 적응과 완화 정책이 반영된 Combined 시나리오가 18.36km^2 만큼 줄어드는 것으로 나타났다.

먼저 Dispersion 시나리오 주거 면적 지도를 보면(그림 7a), 대체적으로 제주도 지역 해안가 부근에서 주거 면적이 높은 것으로 나타났다. 이는 제주도에서는 농림·어업에 종사하는 비율이 46%로 대부분이 어업에 종사하고 있어(Jeju Special Self-Governing Province, 2010) 해안가 부근에 제주도 주민들이 많이 거주하고 있기 때문인 것으로 사료된다. 특히, 제주도 북쪽에 위치한 외도동, 도두동, 이호동 지역과 남쪽에 위치한 중문, 대륜동, 서흥동 지역은 주거 면적이 가장 높게 나타났다. 이는 관광지가 가장 많이 분포되어 있으며, 이로 인해 관광객이 머물 수 있는 숙박시설이 많기 때문인 것으로 판단된다. 반면, 제주도 중심부는 주거 면적이 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는 제주도 중심부는 한라산이 위치하고 있어 주거 면적보다는 산지가 많이 존재하기 때문인 것으로 사료된다.

Adaptation 시나리오 주거 면적 지도를 보면(그림 7b), 대체적으로 해안가 부근에서 주거 면적이 높은 것으로 나타났지만 Dispersion 시나리오 보다는 주거 면적 값이 줄어든 것으로 나타났다. 특히, 제주도 남동쪽 지역이 Dispersion 시나리오일 때 보다 주거 면적이 크게 줄어들었다. 이는 그림 3과 비교해보면, 홍수 피해위험이 큰 지역으로써, 주거가능 면적을 50%로 제한한다는 정책을 반영하였기 때문인 것으로 사료된다. 반면, 관광지와 숙박시설이 많은 외도동, 도두동, 이호동, 중문동, 대륜동, 서흥동 지역에서는 여전히 주거지역 면적이 가장 높은 것으로 나타났다.

TABLE 3. Total residential area of land use scenarios

Land use scenarios	Dispersion (BAU)	Adaptation (AD.)	Combined (AD.+MIT.)
Total residential area(km^2)	213.80	209.37	191.01

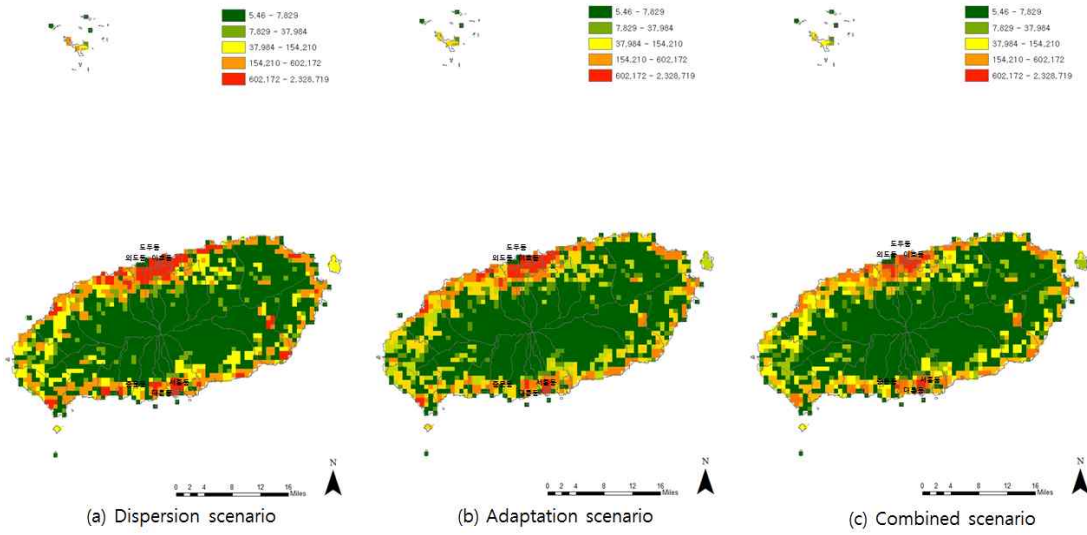


FIGURE 7. Results for residential area of each land use scenarios

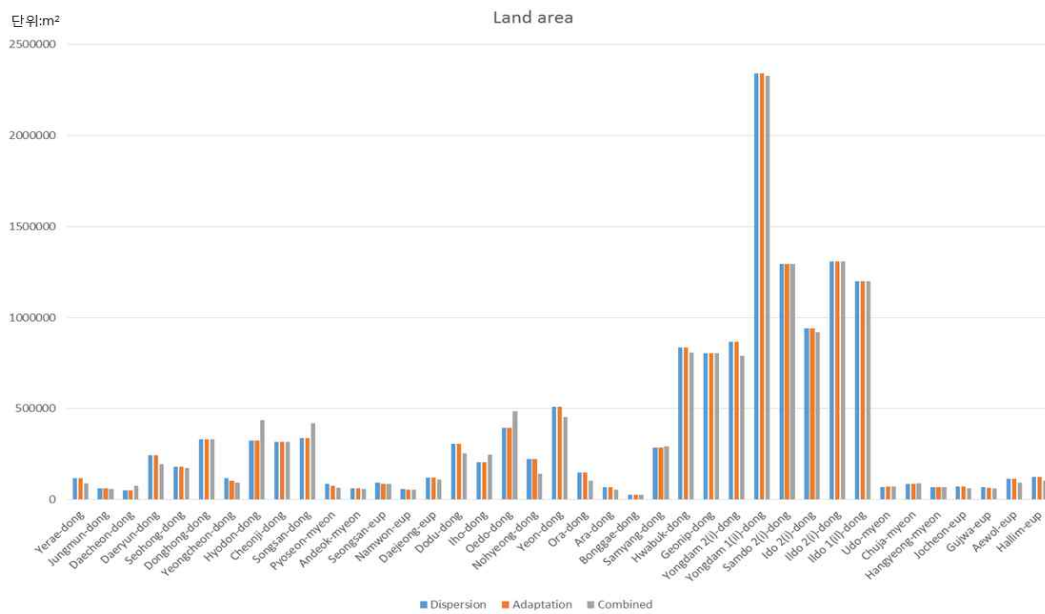


FIGURE 8. Graph for residential area of each land use scenarios

Combined 시나리오 주거 면적 지도를 보면 (그림 7c), 앞에서 제시한 두 시나리오와 같은 경향을 보였지만, 대체적으로 주거 면적이 줄어

든 것으로 나타났다. 특히, 제주도 북서쪽 지역이 Adaptation 시나리오일 때보다 주거 면적이 가장 많이 줄어든 것으로 나타났다. 이는 그림

6과 비교해보면, 북서쪽 지역이 도시 중심지가 아닌 곳으로써, 주거가능 면적을 50%로 제한한다는 정책을 추가 반영하였기 때문인 것으로 사료된다. 이에 도시 중심지인 외도동, 도두동, 이호동 지역과 중문, 대륜동, 서흥동 지역에서는 두 시나리오에서보다 주거 면적 값이 가장 높게 나타났다(그림 8).

2. 인구 밀도

토지이용균형모델을 이용하여 3가지 토지이용 시나리오 별 인구 밀도 차이를 비교하였다. 모델을 이용하여 시나리오를 구축할 때, 현재(2010년)보다 2.02% 인구가 증가한다는 것을 반영하였고 이는 국가통계청에서 제공하는 미래 추계 인구 증가율이다.

시나리오 별 인구 밀도 차이를 쉽게 비교하기 위해 Adaptation, Combined 시나리오에 Dispersion 시나리오로 나누어 표현하였다(그림 9). 먼저, Adaptation/Dispersion 시나리오 지도를 보면(그림 9a), 제주도 남동쪽 지역에서 인구 밀도가 낮게 나타났다. 2040년 취약성 평가 지도를 보면(그림 3b), 제주도 남동쪽 지역

이 홍수 피해 위험 정도가 큰 지역으로 이는 주거가능 지역을 50%로 제한하자는 정책이 반영되었기 때문인 것으로 사료된다. 다음으로 Combined/Dispersion 시나리오 지도를 보면(그림 9b), 전반적으로 Adaptation/Dispersion 시나리오 보다 인구 밀도가 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 Combined 시나리오에서 도시 중심지로 인구를 집중시키기 위해 도시 중심지가 아닌 곳에 주거가능 면적을 50% 제한한다는 대책을 추가적으로 반영하였기 때문인 것으로 사료된다. 반면, 중문동과 외도동은 인구 밀도가 가장 높게 나타났다. 이는 기후변화 영향 피해가 적고 인간 활동하기에 편리한 곳으로 중문동과 외도동으로 삼았으며, 이를 통해서 거주하는 사람들이 향후 중문동과 외도동으로 이동을 한다면 기후변화에 대한 영향 피해를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

3. 예상 주거용 에너지 소비량과 인명 피해액

시나리오 별 기후변화 적응과 온화에 미치는 영향 차이를 알아보기 위해 앞에서 나온 결과를 통해 예상 주거용 에너지 소비량과 예상 인

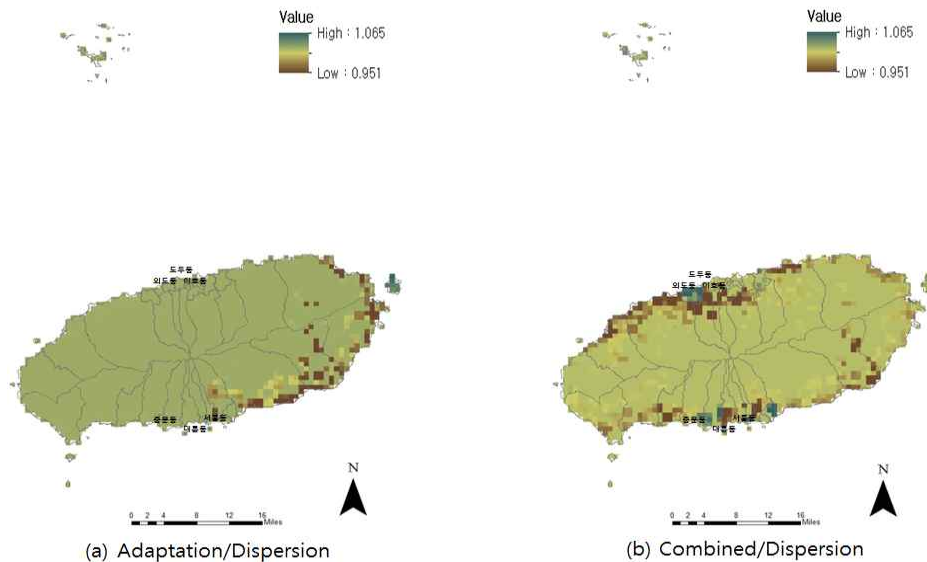


FIGURE 9. Results for population density of land use scenarios

TABLE 4. Results for residential energy consumption and damage life

Factors	Scenarios	Dispersion	Adaptation	Combined
Residential energy consumption(twh)		82,574	80,863	74,121
Damage of human(\$)		5395.52	5388.26	5380.99

명 피해액을 산출하였다.

먼저, 계산 방법으로는 ‘연구 방법-3.주거용 에너지 소비량 산출 및 인명 피해액 산출 방법’에서 기술한 식을 적용하였다. 주거용 에너지 소비량과 인명 피해액 산출한 결과는 다음과 같다(표 4). 전반적으로 인명 피해액과 주거용 에너지 소비량은 Dispersion 시나리오에서 Combined 시나리오로 갈수록 줄어드는 것으로 나타났다. 특히 인명 피해액의 경우, 시나리오 별 인구 밀도를 보면, 거주하는 사람들이 도시 중심지나 홍수 피해가 낮은 지역으로 이동함으로써 홍수 피해 위험지역에서의 인구 밀도가 줄어드는 것으로 사료된다.

4. 고찰

현재 토지이용변화는 기후변화에 영향을 미치는 인자로서 기후변화 적응 및 완화 대책자료로 사용되어지고 있다.

우리나라에서는 토지이용과 이에 따른 적응 대책을 수립하기 위한 다양한 연구와 시범사업이 진행되고 있다. 특히 토지이용연구를 통해 정책적으로 완화 및 적응 대책을 수립하기 위해서는 모든 대상지가 동일하게 적용이 되어야 하며, 지역마다 지닌 특성의 차이를 반영될 수 있도록 하는 것이 중요하지만 기존에 수행했던 연구와 사업 적용은 대상지가 국한되어 있는 한계를 지니고 있다(Park *et al.*, 2010). 즉, 사업에 적용되는 대상지가 제한되며, 지역마다 지닌 특성의 차이를 고려하지 못하여 구체적인 정책 마련까지 미치지 못하는 것이다.

하지만 본 연구에서는 대상지의 사회·경제적 지표와 지리적 자료를 이용한 토지이용균형 모델을 적용함으로써 이러한 단점을 보완할 수 있다. 뿐만 아니라 1km 해상도로 자료를 구축함으로써 기존에 읍면동 단위로 구축하여 모델

을 돌린 결과보다 고해상도로 각 지리적 위치마다 주거용 토지이용변화와 인구이동 변화가 예측가능하다. 예를 들어, 시나리오 별 주거 면적 결과(그림 7)를 보면 Dispersion 시나리오보다 Adaptation 시나리오에서 홍수피해위험이 큰 지역에서는 주거용 토지이용이 줄어드는 것으로 나타났다. 시나리오 별 인구 밀도 결과(그림 9)를 보면 Dispersion 시나리오보다 Combined 시나리오에서 침수 피해 위험지역이 큰 곳에서의 인구밀도가 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 환경에 쉽게 노출이 되는 사람들의 이동 현황과 주거용 토지이용이 환경적 도시계획에 있어 중요하게 나타난다. 그리고 본 연구에 수행되어진 토지이용균형 모델은 매크로 프로그램을 이용함으로써 산정과정이 간단하고 다른 모델에 비하여 적은 시간이 소요된다. 또한 실제 자료 값을 적용함으로써 결과의 정확성과 현실성이 적지 않은 것으로 판단된다. 본 연구가 지닌 한계점도 있다. 본 연구에서는 제주도 전체를 1km 해상도로 평가하였지만, 모든 자료를 1km 해상도로 구축하는 데 어려움이 있었다. 또한 자료의 종류가 다양하지 않아 적은 자료를 가지고 모델을 돌렸을 때, 결과 차이가 미세하게 나타났으며, 제주 지역에서는 메트로가 존재하지 않아 도시 중심지를 기준 짓는 것에 대한 한계가 있었다. 향후 연구에서는 지하철, KTX와 같은 대중교통 지리적 현황 자료를 반영한다면 미세한 인구 이동 및 정확성이 높은 토지이용변화를 파악할 수 있다.

본 연구에서 우리나라와 환경이 비슷한 일본에서 수행되어지고 있는 토지이용균형 모델을 시범적으로 적용해 본 것은 토지이용변화 및 인구 이동을 예측하는데 의의가 있다고 본다.

결론

본 연구에서는 일본에서 활용되고 있는 토지이용균형모델을 이용하여 3가지 토지이용 시나리오를 구축하고 주거 면적과 인구 밀도를 도출하였다. 또한 완화와 적응대책이 수립된 토지이용에 따라 기후변화로 인한 피해 정도의 변화를 알아보기 위해, 시나리오 별 주거 면적 결과를 통해 주거용 에너지 소비량과 인구 밀도 결과를 통해 예상 인명 피해액을 산출하였다.

본 연구에서 제시된 방법으로 연구한 결과, Dispersion 시나리오 총 주거 면적은 213.80km²로 나타났으며 Adaptation 시나리오는 209.37km², Combined 시나리오는 191.01km²로 전반적으로 주거 면적이 줄어드는 것으로 나타났다. 인구 밀도는 Dispersion 시나리오에서 0.2229, Adaptation 시나리오는 0.2226, Combined 시나리오에서는 0.2223으로 전반적으로 인구 밀도도 줄어드는 것으로 나타났다. 시나리오 별 주거용 에너지 사용량과 예상 인명 피해액을 산출한 결과, 전반적으로 Dispersion 시나리오보다 Combined 시나리오로 갈수록 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 현재와 동일한 환경을 가정한 Dispersion 시나리오보다 기후변화 대응 대책을 반영한 시나리오일수록 홍수 피해 위험 지역에서의 주거 면적이 줄어들고, 거주 인구가 줄어들었기 때문인 것으로 나타났다. 즉, 인구 이동과 주거용 토지이용 변화가 환경적 도시계획에 있어서 중요한 작용을 하며 이에 대한 구체적인 수립이 이루어진다면 기후변화 적응 및 완화에 대한 피해를 효과적으로 줄일 수 있을 것이라고 시사한다.

본 연구에서 제시한 토지이용균형모델을 적용하여 시나리오 별 주거용 토지이용과 인구 밀도 변화 파악은 향후 기후변화 안정성을 확보하고 대응 계획을 수립하는데 실질적으로 효과가 있을 것으로 기대된다. **KAGIS**

REFERENCES

Byun, H.S., Y.B. Song and B.H. Han. 2009.

Landuse planning method considering urban greenery and urban climate. Journal of Korea Planners Association 44(4):37-49 (변혜선, 송영배, 한봉호. 2009. 도시녹지와 도시기후를 고려한 토지이용계획 기법. 대한국토도시계획학회지 44(4):37-49).

Chang, C.P., T.C. Yen and J.M. Chen. 1993. Effects of terrain in the surface structure of typhoons over Taiwan. Monthly Weather Review 121:1734-1752.

Compiled by Korea Energy Economics Institute. 2011. Energy consumption survey (에너지 경제연구원. 2011. 에너지 총 조사보고서).

Environmental Protection Agency(EPA). 2009. Land-Use Scenarios: National-Scale Housing -Density Scenarios Consistent with Climate Change Storylines, Global Change Research Program, National Center for Environmental Assessment, Washington, DC; EPA/600/R-08/076F, Available from: National Technical Information Service, Springfield, VA.

Government of the Republic of Korea. 2011. Third national report republic of Korea in accordance with the united nations framework convention on climate change (대한민국정부. 2011. 기후변화 협약에 따른 제3차 대한민국 국가보고서).

Honam Regional Statistics Office, Jeju Office. 2009. Jeju's yesterday and today according to statistics (호남지방통계청 제주사무소. 2009. 통계로 본 제주의 어제와 오늘).

IPCC. 2007. Climate change 2007: synthesis

- report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. Geneva, Switzerland 104pp.
- IPCC. 2009. Competitive Cities and Climate Change.
- Jeju Special Self-Governing Province. 2008. Jeju Damage from Storm and Flood Whitepaper (제주특별자치도. 2008. 제주 풍수해 백서).
- Jeju Special Self-Governing Province. 2010. Jeju Statistical Yearbook (제주특별자치도. 2010. 제주통계연보).
- Jeju Special Self-Governing Province. 2014. Jeju Statistical Yearbook (제주특별자치도. 2014. 제주통계연보).
- Jung, S.G., J.H. OH and K.H. Park. 2002. The analysis of landscape structure due to the landcover change - case study in Kyongsan city -. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 5(3):9-18 (정성관, 오정학, 박경훈. 2002. 토지이용변화에 따른 경산시의 경관구조 분석. 한국지리정보학회지 5(3):9-18).
- Kim, C. and S.K. Kim. 2002. A study on the damage estimation in flooded area using GIS. Nation Prevent of Disaster Institute 4(4):23-33 (김철, 김석규. 2002. GIS를 이용한 침수지역 분석 및 피해액 산정연구. 국립방재연구원 4(4):23-33).
- Kim, J.I. and C.H. Yeo. 2005. The relationship among land use, vegetation and surface temperature in urban areas - the case of Deagu city-. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 8(2):21-30 (김재익, 여창환. 2005. 도시지역 지표온도와 토지이용 및 식생상태와의 상관관계에 관한 연구 : 대구광역시의 경우. 한국지리정보학회지 8(2):21-30).
- Lee, D.K. and C. Park. 2010. CO2 emission variation estimation method on development site level and its application. Journal of Korea Planners Association 45(6):209-219 (이동근, 박찬. 2010. 개발대상지의 이산화탄소 배출 변화량 산정 방법 개발 및 적용. 국토계획 45(6):209-219).
- Meteorological Research Institute Korea Meteorological Administration. 2009. The study on the regional characteristics of climate change in Jeju island (국립기상연구소. 2009. 제주도 기후변화 경향 및 기후특성에 관한 연구).
- Ministry of Environment. 2013. Development of integrated climate change vulnerability assessment framework considering socio-economic scenarios. 610pp (환경부. 2013. 사회·경제 시나리오를 고려한 기후변화 통합 취약성 평가체계 개발. 610쪽).
- Nakamichi, K., Y. Yamagata and H. Seya. 2013. CO₂ emissions evaluation considering introduction of EVs and PVs under land-use scenarios for climate change mitigation and adaptation - focusing on the change of emission factor after the Tohoku earthquake -. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies 10:1025-1044.
- National Emergency Management. 2010. Disaster Yearbook (소방방재청. 2005. 재해연보).
- Oh, S.H., W.K. Lee, S.J. Yoo, J.Y. Byun, S.M. P, H.B. Kwak, G.S. Choi, M.I. Kim,

- R.S. Jung and K.J. Nam. Vulnerability assessment and prioritization by sectors for planning climate change adaptation strategy : case study of Gangwon province. *Climate Change Research* 3(4):245-257 (오수현, 이우균, 유성진, 변정연, 박선민, 곽한빈, 최계선, 김문일, 정래선, 남기준. 2012. 기후변화 적응대책 수립 지원을 위한 취약성 평가 부문별 우선순위 선정 방안연구 -강원도 사례를 중심으로-. 한국기후변화학회지 3(4):245-257).
- Park, J.C. and J.Y. Kim. 2010. Urban planning measurements in pursuit of a low-carbon green city -case analyses of basic planning elements and spatial urban structures in Korea and Japan-. The Korea Regional Development Association. 22(1):17-52 (박종철, 김정연. 저탄소 녹색도시 조성을 위한 계획요소와 공간구조 측면의 도시계획 수립방안: 일본과 한국 사례분석 및 적용. 한국지역개발학회지 22(1):17-52).
- Park, S.Y. and H.M. Tak. 2013. Land use changes and climate patterns in Southeast Korea. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 16(2):47-64 (박선엽, 탁한명. 2013. 우리나라 동남부 지역의 토지 이용과 기후 패턴 변화 분석. 한국지리정보학회지 16(2):47-64).
- Seya, H., Y. Yamagata and K. Nakamichi. 2014. Spatially Explicit Land use and Energy Scenario of Tokyo using Household Level Microdata. *Green Energy for Sustainable Development* pp.1-8.
- SRES. 2000. IPCC special report emissions scenarios.
- Yamagata, Y. and H. Seya. 2013. Simulating a future smart city: an integrated land use-energy model. *Applied Energy* 112: 1466-1474.
- Yamagata, Y., H. Seya and N. Kumiko. 2013. Creation of future urban environmental scenarios using a geographically explicit land-use model: a case study of Tokyo. *Annals of GIS* 19(3):153-168.
- Yoo, S.M., W.K. Lee, Y.R. Chae, H.B Kwak, M.I. Kim and R.S. Jung. 2013. The influence of weighting value derived by the regression equation on the result of vulnerability assessment. *Climate Change Research* 4(4):331-348 (유소민, 이우균, 채여라, 곽한빈, 김문일, 정래선. 2013. 회귀식에 의해 도출된 가중치가 취약성 평가에 미치는 영향. 한국기후변화학회지 4(4):331-348). [KAGIS](#)