비구조적 접근을 통한 원자력발전소 주변지역 사고 피해 저감 방안 연구: 토지이용계획을 중심으로

Method for Mitigating Nuclear Power Plants Accident Damage in Nuclear Power Plant Areas through a Non-structural Approach: Focusing on Land Use Planning

하동오* · 정주철**

Ha, Dongoh*, and Jung, Juchul**

Abstract

Nuclear power plant accidents cause enormous damage. Safety probabilities for nuclear power plant accident prevention are being studied to enhance safety. However, research has been lacking due to damage reduction, not prevention of accidents. This study proposes land use planning, through a non-structured approach, as a way to mitigate damage. For this purpose, risk to the areas surrounding the nuclear power plant was analyzed. In this study, human casualties were set as the chief damage. We looked at population changes in areas surrounding nuclear power plants and used a Difference-in-differences analysis for this purpose. From the analysis results, land use planning scenarios were established to mitigate the damage from nuclear plant accidents, and a simulation was conducted to determine the reduction effect. The model was conducted on the basis of System Dynamics, and the scenario was constructed and simulated using a land use planning approach. From the simulation results, a policy proposal was also made regarding the land use planning method to mitigate damage to nuclear power plants.

Key words : Nuclear Power Plant Accidents, Land Use Planning, Mitigation Planning, System Dynamics

요 지

원자력발전소 사고는 막대한 피해를 발생시키는 재난·재해이다. 원자력발전소 사고로부터 안전성을 높이기 위하여 사고예방을 위한 안정성 증대 방안들이 연구되고 있다. 하지만 사고발생의 방지가 아닌 피해저감에 연구는 부족한 상황이었다. 본 연구에서는 피해저감을 위한 방안으로 비구조적 접근인 토지이용계획을 제안하고자 한다. 이를 위하여 국내 원자력발전소 주변지역의 위험성을 분석하였다. 인명피해를 핵심 피해로 설정하고 국내 원자력발전소 주변지역들에 대한 인구변화를 이중차분법(Difference-in-differences)을 통하여 살펴보았다. 분석 결과를 바탕으로 원자력발전소 사고의 피해를 저감하기 위한 토지이용계획 시나리오를 구축하고 시뮬레이션을 진행하여 저감효과를 시뮬레이션 하였다. 이를 위해 시스템 다이내믹스(System Dynamics)를 바탕으로 모델링 진행과 토지이용계획적 접근 방안을 적용한 시나리오 구축 및 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 원자력발전소 피해를 저감하기 위한 토지이용계획적 방안에 대해 정책적 제언을 실시하였다.

핵심용어 : 원자력발전소 사고, 토지이용계획, 저감계획, 시스템 다이내믹스

*정회원, 부산대학교 도시공학과 박사과정(E-mail: gkehddh@naver.com)

Member, Ph.D. Student, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University

**교신저자, 정회원, 부산대학교 도시공학과 교수(Tel: +82-51-510-3521, Fax: +82-51-513-9108, E-mail: jchung@pusan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University

1. 서론

과학기술의 정수인 원자력 발전기술은 압도적인 경제성을 바탕으로 차세대 에너지로 각광받아왔다. 또한 발전과정에서 발생하는 온실가스 배출량이 비교적 적어 친환경 에너지로도 주목받아 왔다(Lee, 2012). 하지만 이러한 아성은 1978년 체르노빌 원자력발전소 사고가 발생하면서 무너지기 시작하였다. 이후 1979년 쓰리마일 원자력발전소 사고, 2011년 후쿠시마 원자력발전소가 차례차례 발생하면서 막대한 피해와 함께 원자력발전소의 위험성이 대두되었다. 방사능 피폭이 가져오는 공포와 불안감이 본격적으로 부각되기 시작한 것이다.

한국수력원자력에 따르면 2019년 현재, 국내에는 23기의 원자력발전소가 가동 중에 있다. 원전안전운영 정보시스템에 따르면 국내 원자력발전소에서는 연간 크고 작은 사건·사고가 꾸준히 발생하고 있는 것으로 나타났다. 2019년을 기준으로 국내에서 발생한 역대 ‘원자력 사건’은 총 748건이었다. 다만 이중 고위험의 기준이 되는 4등급의 ‘사고(Accident)’ 이상의 ‘원자력 사건’들은 발생하지 않았다. 하지만 연평균 10건씩의 3등급 이하의 ‘원자력 사건’들이 꾸준히 발생하고 있으며 이는 원자력발전소의 안전성을 지속적으로 위협한다. 위험성이 낮은 ‘원자력 사건’이라도 연쇄적으로 발생한다면 큰 사고로 이어질 수 있기 때문이다. 또한 테러의 위협, 자연재해, 인간의 실수 등의 다양한 원인들로 원자력발전소 사고가 발생할 수 있기 때문에 원자력발전소 사고에 대한 대비는 반드시 필요하다.

2011년 발생한 후쿠시마 원자력 발전 사고는 국내 원자력 발전소 안전에 대한 고찰하는 계기가 되었다. 이후 원자력발전소 사고에 대비하기 위하여 관련법과 제도가 개정되었다. 또한 원자력발전소 사고와 관련된 연구들 역시 활발하게 진행되었다. 그러나 이러한 연구들의 대부분은 원자력발전소 사고의 발생을 원천적으로 방지하기 위한 구조적 연구에 치중되어있었다. 사고발생 자체를 방지하는 전략은 방재전략의 핵심적 축이다. 하지만 재난·재해를 완벽하게 방지하는 것은 불가능하다. 따라서 사고발생시의 피해를 저감하는 접근 역시 방재전략의 또 다른 핵심축이다. 사고 발생 시 피해를 저감하는 방법으로는 토지이용계획적 접근 등의 비구조적 접근이 있다. 하지만 이러한 접근전략에 대해서는 연구가 부족한 상황이었다.

재난·재해에 대한 토지이용계획적 접근은 재난·재해 발생 시 피해를 저감하기 위한 방안 중 하나로서 이미 세계 각국에서 다양하게 활용되고 있다(Burby et al., 2000). 원자력 발전소 사고 역시 도시에 막대한 피해를 가져오는 일종의 재난·재해이며 방재전략을 실시할 필요성이 있다. 특히 원자력발전소 사고가 가지는 위험성을 고려한다면 사고 발생 시의 피해를 저감하는 접근방법도 반드시 필요하다. 따라서 국내에서도 원자력발전소 사고를 대비하고 사고 발생 시

피해를 감소시키기 위해 토지이용계획적 접근이 필요하다.

본 연구에서는 토지이용 계획을 적용한 방안을 원자력발전소 사고 발생 시 피해를 저감하는 방안으로 제안하고자 한다. 이를 위하여 원자력발전소 주변지역의 인구변화를 분석하여 원자력발전소 사고 발생 시 예상되는 피해를 우선적으로 분석하였다. 본 연구에서는 원자력발전소 주변지역의 인구 변화를 시계열적으로 분석하기 위하여 이중차분법(Difference-in-differences)을 통하여 살펴보았다. 이를 통해 원자력발전소 주변의 위험성을 확인하였다. 또한 원자력발전소 사고 발생 시 예상되는 피해를 저감하기 위한 토지이용계획적 방법의 효과를 예측하기 위하여 시스템 다이내믹스(System Dynamics)를 바탕으로 모델링 진행과 토지이용계획적 접근 방안을 적용한 토지이용계획 시나리오 구축 및 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 원자력발전소 사고 피해저감을 위한 토지이용계획적 접근의 효과를 확인하고 이를 바탕으로 원자력발전소 사고 피해저감을 위한 토지이용계획적 접근과 관련된 정책들을 제안하였다.

2. 선행연구 고찰

원자력발전소 사고 피해의 핵심 요인은 방사선 피폭이다. 특히 사고로 인하여 방사성물질들이 유출되면서 방사성 낙진을 형성하게 되며, 지속적인 방사선 피폭 피해를 발생시킨다. 여타 자연재해들이 단기간에 강력한 피해를 입히는 것과는 달리, 원자력발전소 사고는 단기적 피해와 함께 장기적으로도 지속적인 방사능 피해가 발생한다. 이 때문에 원자력발전소 사고가 발생할 경우 사고 주변지역에는 오랜 기간 접근이 통제된다. 실제로 2011년에 발생한 후쿠시마 원자력발전소 사고이후에도 후쿠시마 지역일대에서는 여전히 높은 방사선 수치를 보이고 있으며, 일부지역은 장기 귀한 곤란 구역으로 지정되어 피난민들이 고향으로 돌아가지 못하고 있다(Kang, 2018). 따라서 원자력발전소 사고라는 막대한 피해를 발생시키는 재난·재해에 대한 대비가 필요하다.

원자력발전소의 안전을 위협하는 요인은 다양하며 복잡적이다. Emergency Events Database (EM-DAT)에 따르면 2000년 이후 재난·재해의 발생빈도는 1980년대와 비교하여 약 세 배 가까이 늘었으며, 2천 억 달러 이상의 피해가 발생한 대형 재난·재해 역시 1990년대 이후 급증하고 있는 것으로 나타났다(Yoon, 2017). 재난·재해의 빈도와 피해의 증가는 원자력발전소 사고의 발생가능성을 높이게 된다. 2011년 후쿠시마 원자력발전소 사고의 원인은 매우 복잡적이었으나 자연재해인 지진해일이 핵심적 원인이었다. 국내 역시 매년 태풍, 홍수 등의 자연재해가 발생하고 있으며 2016년에는 지진 관측이례 가장 강력한 지진으로 기록된 진도 5.8의 강진이 경주에서 발생하기도 하였다. 국내 원자력 발전소 역시 자연재해에 완전하게 자유롭지 못하다.

후쿠시마 사고 이후 국내에서도 원자력발전소 사고에 대비하기 위한 노력들이 진행되었다. 원자력법을 원자력진흥법과 원자력안전법으로 분리하는 법령개정을 실시하였고 대통령 직속의 원자력안전위원회 역시 신설하였으며 한국 수력원자력 내에 안전기술본부 신설, 위기관리실, 후쿠시마 후속대책팀 등 안전 관련 조직을 대폭 강화하였다(Lee, 2012). 또한 International Atomic Energy Agency (IAEA)에서 정한 국제 권고 기준에 따라 원자력발전소를 중심으로 위험지역을 설정하여 원자력발전소 사고에 대비하고 있다. 국내에서는 원자력발전소를 기준으로 주변지역 전체를 ‘방사선 비상 계획구역(Emergency Planning Zone)’으로 명명하고 있다. 또한 원자력발전소로부터의 거리에 따라 반경 3~5 km에 해당하는 ‘예방적보호조치구역(Precautionary Action Zone)’과 반경 5~30 km에 해당하는 ‘긴급보호조치계획구역(Urgent Protective Action Zone)’으로 구분하고 있다(IAEA, 2002). 방사선 비상 계획구역과 예방적 보호조치 구역은 원자력 사고가 발생할 경우 직접적인 피해가 예상되는 구역이다. 이러한 기준을 바탕으로 각각의 원자력발전소는 발전소의 형태, 원자력발전소 주변의 인구동태, 지형 등을 고려하여 구역설정을 하도록 권고하고 있다. 또한 방사선 비상계획 구역의 전부 또는 일부를 관할하는 지방자치단체는 ‘지역 방사능 방재계획’을 수립하도록 법률이 개정되어 이에 원자력발전소 주변 지자체는 주민보호를 위한 연구용역 실시, 방사능 재난 대응 매뉴얼의 개정, 방사능 방재 연합훈련 등을 추진하고 있다(Nemoto and Piao, 2016). 하지만 방사선 비상 계획구역은 법정 규제가 아닌 권고사항에 해당하며 선정 기준과 운용의 목적이 주로 사고 발생 이후 비상대피 전략들에 초점을 두고 있다는 한계점을 가진다.

토지이용계획은 이러한 부분에서 법적 제도를 활용할 수 있는 기회를 제공한다. 토지이용계획이란 계획구역 내의 토지를 어떻게 이용할 것인가를 결정하는 계획으로서 용도지역 지구제와 같은 제도화된 방법을 사용할 수 있다. 이는 계획에 강제력을 제공한다. 역사적으로 도시를 재난·재해로부터 보호하기 위하여 토지 이용계획을 지속적으로 활용하여 왔다. 1936년 Giblet White에 의하여 미국 도시계획에 처음 제시된 이후(Jung, 2006), 토지이용계획을 활용한 재난·재해 대비에 대한 다양한 논의가 진행되어왔다(Berke et al., 1989; Burby et al., 2000).

과거에는 재해에 대한 접근방법 대부분이 공학적이고 기술적인 접근이었다. 이는 일종의 구조적 접근이었다. 하지만 이러한 구조적 접근은 위험지역 내에서 개발을 오히려 증가시키는 결과를 가져왔다(Burby, 1998). 실제로 댐과 제방 그리고 보험 등의 정책은 위험지역 내의 시민들에게 안전하다는 인식을 심어주어 개발을 촉진시켰다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 ‘재해완화계획(Hazard Mitigation Planning)’을 비롯한 제도적인 접근방법들이 활용되고 있다(Godschalk et al., 1998). 비구조적인 제도를 통하여 위험지역

자체의 개발을 막음으로서 재난·재해로부터의 피해를 사전에 예방하는 것이다.

재난·재해의 빈도가 높은 일본은 다양한 재난·재해에 대한 사전대책 및 대피·대응과 관련된 연구를 꾸준히하게 진행하여 왔다. 그러나 2011년 동일본 대지진 이후 재난·재해에 대한 완벽한 방재는 불가능하다고 판단하여 재난·재해대응 전략을 기존의 ‘방재(防災)’ 개념에서 ‘감재(減災)’ 개념으로 일부 수정하여 재난·재해발생 시 피해를 최소화할 수 있는 있도록 재난·재해대응체계를 수립하고 있다. 이는 방재정책의 방향이 기존의 사고발생 방지에서 사고발생 시 피해를 저감하는 형태로 변화하고 있다는 것을 보여준다.

토지이용계획은 일종의 비구조적 접근(Jung et al., 2007)으로서 재난·재해의 피해를 저감하기 위한 방법이기도 하다. 토지이용계획을 활용하면 장기간의 피해와 인명손실을 줄이는 데 대단히 효과적이며 비용절감의 효과 역시 낼 수 있다. 또한 개발억제를 통한 자연환경이 가지는 가치를 보존할 수 있다는 장점도 있다(Beatley, 1995). 이러한 장점들을 바탕으로 토지이용계획은 재난·재해로부터의 피해를 줄이는 유용한 도구로 활용된다(Jung, 2006). 전 세계적으로도 토지이용계획을 다양한 종류의 재난·재해 피해저감에 사용되고 있다(Fell et al., 2008; Osland, 2013).

토지이용계획은 계획의 목적을 달성하기 위해 규제수단, 계획수단, 개발수단, 유도수단 등 다양한 방법들을 활용한다. 특히 규제수단은 용도지역·지구제를 활용하여 위험지역의 개발을 억제할 수 있다. 재난·재해의 원천적인 발생을 봉쇄하기는 어렵다. 따라서 재난·재해가 발생할 경우 피해를 저감하는 방안이 필요한 것이다. 이를 위해서는 재난·재해로 인한 피해가 예상되는 지역의 개발을 억제할 필요가 있으며 토지이용계획은 위험지역의 개발을 억제할 수 있어 피해를 저감하는데 효과적이다(Burby and Dalton, 1994).

원자력발전소 사고 역시 재난·재해에 해당하기 때문에 토지이용계획을 적용하여 원자력발전소 사고의 피해 역시 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 원자력발전소 사고가 야기하는 피폭, 낙진 등의 장기적이고 심각한 피해로부터 규제수단 등을 활용하여 피해대상 자체를 줄인다면 피해를 저감할 수 있다. 실제로 토지이용계획을 통한 피해저감 방안을 원자력발전소에 적용한 예시로는 Pearlman and Waite (1984)의 연구가 있다. 쓰리마일 사고 이후 원자력발전소의 위험성을 인지하고 주변 지역 인구를 밀도를 줄임으로써 피해를 저감하자는 제안을 하였다. 이를 위해 토지이용계획 중 용도지역·지구제를 통한 개발 억제를 제시하였다. 이를 통해 저밀도 개발을 유도하고 ‘농업지역제(Agriculture Zoning)’를 통해 토지이용을 한정하고 ‘대규모 획지지역제(Large Lot Zoning)’를 통해 이를 보조하는 방식을 제안하였다(Pearlman and Waite, 1984). 이러한 연구는 원자력발전소 사고의 특수성과 위험성을 감안하여 위험 대상지역의 인구

그 자체를 줄이는 것이 피해저감의 효과적인 방법이라는 것에 출발한 것이다.

현재 국내의 원자력발전소 안전 증진에 관한 연구들은 주로 시설자체의 안전 강화와 발전소 설비 개량에 초점을 맞추고 있다(Lee and Choi, 2000; Vijayan et al., 2013). 하지만 토지이용계획과 같은 비구조적 접근을 통해 원자력발전소 사고 발생 시 주변지역의 피해를 저감하는 방안에 대한 접근은 부족한 상황이다. 국내에서도 원자력발전소 사고에 대비하고 안전성 증진을 위하여 ‘재해에 대한 회복력(Hazard Resilience)’ 측면의 강화가 강조되면서 피해경감을 위한 대비계획과 같은 비구조적 접근의 중요성이 대두되고 있다(Do, 2015).

선행연구들을 고찰하면서 원자력발전소 사고와 같은 재난·재해에 대비하기 위해서는 재난·재해 저감을 위한 비구조적 접근이필요함을 알 수 있었다. 특히 재난·재해의 피해저감 분야에서는 토지이용계획이 비구조적 접근방법으로 활용되고 있으며 피해저감에 효과적 방안임을 확인하였다. 그러나 원자력발전소 사고 발생 시 피해를 저감하는 방안으로 토지이용계획을 적용한 선행연구는 부족한 상황이었다. 따라서 본 연구에서는 원자력발전소 사고발생시 피해저감을 위하여 토지이용계획을 적용하는 연구를 진행하여 기존의 원자력발전소 안정성 강화 연구들과의 차별성을 나타내고자 한다.

3. 연구방법

3.1 이중차분법(Difference-in-differences)

원자력발전소 사고의 피해를 저감하기 위해서는 국내 원자력발전소 주변 지역에 대한 위험성을 우선적으로 살펴보아야 한다. 본 연구에서는 원자력발전소 사고의 위험성을 정의함에 있어 원자력발전소 사고의 핵심 피해인 인명피해를 중점으로 살펴보고자 한다. 특히 원자력발전소 사고의 경우 주거 인구에게 더 큰 피해를 미치는데 이는 원자력발전소 사고가 거주 공간 자체를 파괴하고 낙진으로 인하여 장기간 귀환하지 못하게 만드는 등의 경제·사회적 피해를 발생시키기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 원자력발전소 사고 발생 시 주요 피해 대상인 거주인구를 위험성을 파악할 요소로 설정하였다.

원자력발전소는 일종의 기피시설(Jin, 2011)로서 건설 이후 주변지역의 인구를 감소시킬 것으로 예상된다. 만약 원자력발전소 건설이 주변지역의 인구를 자연스럽게 감소시킨다면 원자력발전소 사고 발생 시 예상되는 피해도 감소할 것이다. 또한 인구 변화 추이에 따라 피해정도도 달라지기 때문 적합한 토지이용계획 역시 달라질 수밖에 없다.

원자력발전소 주변지역의 인구변화를 확인하기 위하여 원자력발전소 건설이전과 이후의 인구 변화를 이중차분법을 사용하여 분석하였다. 이중차분법은 특정 정책이나 사건

의 발생 이전과 이후의 자료를 사용하여 통제집단(Control Group)과 처치집단(Treatment Group)의 차분을 통하여 편향을 제거하고 순수한 처치효과를 파악하는 방법이다(Branas et al., 2011).

이중차분법에서 처치집단의 경우 사건의 발생 이후에는 사건에 따른 영향을 받지만 사건 발생 전에는 사건의 영향을 받지 않는다. 통제집단은 사건의 발생과 무관하기 때문에 모든 기간에서 사건의 영향을 받지 않는다. 이러한 개념을 바탕으로 이중차분법은 통제집단과 처치집단, 사건의 발생 이전과 이후라는 2개의 집단과 2개의 시간으로 나누어진다. 따라서 총 4개의 집단으로 구성되며 분석 대상 집단 간의 차이를 계산하여 처치와 영향력의 인과관계를 검증하게 된다(Moon, 2012).

본 연구에서는 국내에 건설된 고리, 월성, 한울, 한빛 4개의 원자력발전소를 대상으로 원자력발전소 건설과 주변지역의 인구변화에 대한 연구를 진행하였다. 통계청의 총조사 인구 자료를 활용하여 1966년부터 2017년까지의 변화를 살펴보고 각각의 원자력발전소 지역의 발전소 가동시작 년도를 기준으로 전후 인구변화를 분석하였다. 또한 위험에 가장 크게 노출되어있는 인구들을 대상으로 하기 위하여 IAEA에서 지정한 예방적 보호조치 구역의 기준을 바탕으로 원자력발전소 인근 5 km에 속하는 읍면동 단위의 지역과 해당지역을 제외한 전국 15개 시도를 비교하였다.

$$Y_i = \alpha + \beta_1 D_i + \beta_2 T_i + \beta_3 (D_i \cdot T_i) + \epsilon_i \quad (1)$$

본 연구에서 사용한 이중차분법 수식은 Eq. (1)과 같으며 Y_i 는 인구를 의미하는 종속변수이다. β_i 는 계수를 나타내며 D_i 는 통제집단과 처치집단을 구분하는 더미 변수이다. 본 연구에서는 처치집단을 원자력발전소 반경 5km에 속하는 지역 인구로 설정하였으며 통제집단은 그 외의 전국의 인구로 설정하였다. 변수는 통제집단을 0, 처치집단을 1로 설정하였다. T_i 는 시간더미변수로써 원자력발전소의 최초 가동년도를 기준으로 이전 년도는 0, 이후 년도는 1의 값을 가진다. $D_i \cdot T_i$ 는 D_i 와 T_i 의 상호작용항이며 β_3 값이 이중차분추정량으로써 처치에 대한 순수한 효과를 의미한다. ϵ_i 은 수식의 오차항에 해당한다. 본 연구에서는 이 수식을 바탕으로 각 원자력발전소 지역마다 이중차분법을 사용하여 분석을 실시하였다.

3.2 시스템 다이내믹스(System Dynamics)

토지이용계획적 방법의 효과를 예측하기 위하여 시뮬레이션을 진행하고자 하였다. 또한 도시가 가진 통태성을 반영하기 위하여 피드백 구조를 파악하여 시스템을 모델링 하고 이를 바탕으로 시뮬레이션을 진행하는 시스템다이내믹스를 연구방법으로 선택하였다.

도시는 하나의 거대한 시스템으로서 다수의 하위시스템으로 구성되어 있으며 각 시스템들은 상호작용을 통해 동태

성을 가지며 이 과정에서 복잡성을 나타내면서 변화한다(Choi, 2003). 시스템 다이내믹스는 이러한 시스템의 동태성을 파악하기 위하여 Jay W. Forrester에 의해 1961년 최초로 소개된 이후 도시, 경제, 산업 등의 다양한 분야에서 활용되어 왔다. 시스템의 동태성이 가진 원인시간, 구성 요소들 간의 피드백 그리고 시간지연을 모델화하는데 적합한 프로그램인 시스템 다이내믹스는 구성요소간의 비선형적 가정을 가지고 접근한다(Kwak and Yu, 2016). 이를 통해 주어진 문제와 미래의 변화와 관련된 다양한 변수들로 구성된 시스템을 변수간의 관계설정을 통하여 모델링을 진행한다. 그 후 시스템 다이내믹스는 구축한 모델을 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션 과정을 거쳐 모델링한 시스템의 동태적 특성을 밝혀낸다(Kim et al., 2007).

실제로 도시를 하나의 시스템으로 보고 동태성을 파악하기 위한 다양한 시도들이 있어왔다. 최초의 도시동태 모형은 도시를 산업, 주택, 인구분야로 나누어서 다양한 변수들 간의 상호관계를 분석하고 이를 통해 모형을 구축하였다(Forrester, 1970). 이후에 소득 계층에 따라 인구 유입을 야기하는 도시 매력도를 핵심으로 하는 새로운 'URBAN 1' 모형을 제시하기도 하였다(Alfeld, 1995). 이러한 최초의 모형들을 바탕으로 다양한 연구자들에 의하여 연구 목적에 맞는 모델의 변형들이 지속되어왔다. 국내에서는 시스템 다이내믹스 기법을 이용하여 서울시 도시동태성 분석에 사용하였으며 도시 개발을 위한 개발전략 수립을 위해서도 사용되어 왔다(Choi, 2003; Lee et al., 2007; Park et al., 2011).

본 연구에서는 앞서 살펴본 모델들을 바탕으로 원자력발전소 사고 발생 시 예상되는 피해를 저감하기 위한 토지이용계획 시나리오를 적용한 모델 구축을 진행하였으며 VENTANA SYSTEM Inc의 Vensim®을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

4. 연구결과

4.1 국내 원자력발전소 주변 지역 분석

국내 4개의 원자력발전소 지역에 대한 이중차분분석을

실행한 결과를 살펴보면 우선 고리 원자력발전소의 이중차분분석 결과는 Table 1과 같았다. 모든 원자력발전소 주변 지역들에서 상호작용항을 나타내는 DID값이 95% 수준에서 유의한 것으로 나타났으며 계수의 경우 음수 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 원자력발전소가 가동된 이후 원자력발전소 주변지역의 인구는 원자력발전소로 인하여 감소한 것으로 해석할 수 있다. 이는 원자력발전소가 기피시설로서 주변지역의 인구를 감소시킨다는 기존 연구결과를 뒷받침하는 결과다.

하지만 원자력발전소 주변 지역의 실제적인 인구변화 추이를 나타내는 그래프를 살펴보면 연구결과와 다른 부분을 확인할 수 있다. Fig. 1은 원자력발전소 반경 5 km에 인접하고 있는 지역의 인구변화를 그래프로 나타낸 것이다. 국내 원자력발전소들 모두 가동년도를 기준으로 인구가 감소하기 시작하는 것으로 나타나고 있다. 하지만 고리 원자력발전소의 경우 2005년부터 인구 감소추세가 둔화되기 시작하여 2010년을 기준으로 다시 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 추세가 지속될 경우 여타 원자력발전소와 달리 고리 원자력발전소 주변지역의 인구는 상승할 것으로 예상된다. 이는 원자력발전소 사고 발생 시 피해를 증대시키는 결과를 초래할 수 있다.

이러한 인구증가 추세의 원인을 살펴보기 위하여 문헌조사를 실시하였다. 부산광역시 자료에 따르면 2001년 6월 고리 원자력발전소 인근지역에 개발제한구역을 해제가 결정되었다. 하지만 당시 부산시는 개발제한구역 해제 지역에서의 급격한 개발을 방지하기 위하여 3년간 개발 행위를 제한하기로 하였다. 3년이 지난 2005년부터 본격적인 도시관리 계획이 수립되면서 개발이 시작되었다. 또한 2005년 당시 고리 원자력발전소가 위치한 부산광역시 기장군 일광면 일대에 신도시 개발계획이 추진되면서 개발에 대한 압력이 증가했을 것으로 판단된다. 개발압력이 증가하면서 고리 원자력발전소 인근지역이 점차 개발이 진행되었고 이로 인하여 인구가 증가한 것으로 해석된다.

실제로 고리 원자력발전소 주변지역의 개발 여부를 파악하기 위하여 고리 원자력발전소 주변지역의 시가화 면적

Table 1. Analysis Results on the DID (Difference in differences) Model

Variable	DID ($D \cdot T$)			
	Kori Nuclear Power Plant Area	Wolseong Nuclear Power Plant Area	Hanbit Nuclear Power Plant Area	Hanul Nuclear Power Plant Area
Coeff.	-751863.3	-679498.6	-636159.5	-676988.9
Robust Std.Err	3102545.2	310580.3	316753.7	334146.4
t-value	-2.42	-2.19	-2.01	-2.03
P-value	0.016	0.03	0.046	0.044
95% Conf.	-1362927	-1291222	-1260172	-1335577
Interval	-140799.7	-67775.11	-12147.06	-18400.95

Fig. 1. Graph of Population Change in Areas Around Nuclear Power Plants

변화를 분석해보았다. 도시의 개발은 도시화로 대변되며 시가화면적의 증가는 곧 개발을 의미하기 때문에 시가화면적의 변화를 분석하였다. 시가화 면적은 시가화 건조지역으로서 주거시설, 상업 및 공업시설 및 교통시설 등의 건조물을 포함하고 있다.

이를 위하여 환경공간정보서비스에서 제공하는 대분류

토지피복지도를 가공하여 시가화 면적에 대한 변화를 분석하였다. ESRI사의 ArcGIS 10.2를 사용하여 고리 원자력발전소 주변 반경 30 km 변화를 분석한 결과는 Fig. 2와 Table 2와 같다.

분석 결과 원자력발전소 반경 30 km에 해당하는 주변지역의 시가화 면적은 지속적으로 증가하고 있는 것으로 나타났

Fig. 2. Change of Developed Area around Kori Nuclear Power Plant (A radius of 30 km)

Table 2. Change of Developed Area around Kori Nuclear Power Plant

SITE	Developed Area (km ²)			The rate of increase for 20years
	1980's	1990's	2000's	
Area within a radius of 5 km of the Kori Nuclear Power Plant	2.179497	2.325705	6.221146	+ 285.4%
Area between 5 km and 30 km radius of the Kori Nuclear Power Plant	139.6979	174.1478	256.7934	+ 183.8%

다. 특히 반경 5 km 내부의 시가화 면적은 20년간 약 285.4% 증가하였으며 이는 30 km 이내의 시가화 면적 증가율인 183.8%를 넘어서는 비율이다. 특히 2000년대에 들어와 급격하게 증가한 시가화면적은 앞서 살펴본 개발압력에 따른 결과로 해석할 수 있다.

이러한 개발압력은 향후에도 지속적으로 유지될 것으로 예상된다. '2030 부산시 도시기본계획'에 따르면 고리 원자력발전소가 위치한 기장군은 부산내 부도심으로 설정되어 있다. 주로 주거기능을 중심으로 개발이 예정되어 있다. 이에 따라 지속적인 주택 개발이 진행될 것으로 예상된다. 특히 최근 8년간 공업지역의 급격한 증가로 주변지역의 노동자들의 필요에 따른 주거단지 건설과 같은 개발압력이 증가될 것으로 예상된다. 또한 향후 지속적인 산업단지 사업이 추진 중에 있으며 이로 인하여 계속해서 기장군에 개발이 진행될 예정이다. 또한 2020년까지 일광신도시 개발이 지속될 예정에 있으며 고리 원자력발전소 인근인 기장군 기장을 남부에는 110만평에 해당하는 대규모 크기의 오시리아관광단지가 개발될 예정이다. 오시리아관광단지와 같은 거대한 사업이 완성될 경우 주변지역의 막대한 개발압력이 가해질 것으로 예상된다. 따라서 향후 지속적인 개발압력이 가해질 경우 고리 원자력발전소 주변지역에서 그린벨트가 해제된 2001년 이후의 추세를 유지할 것으로 판단된다.

고리 원자력발전소 주변의 인구의 증가와 시가화 면적의 지속적 증가는 원자력발전소 사고 발생 시 인명 피해의 증가로 이어질 수 있다. 특히 11개의 원자력발전소가 고리·월성 원자력발전소 지대에 밀집되어 있다. 향후 계획된 신 고리 5, 6호기 개발까지 완료될 경우 13개의 가동 원자력발전소가 한 지역에 위치하게 된다. 또한 폐로에 들어간 고리1호기와 2호기를 포함하면 총 15개의 원자력발전소가 한 지역에 밀집하는 것이다. 만약 이 지역에서 사고가 발생할 경우 연쇄적인 원자력발전소 사고로 이어질 가능성이 매우 크다. 따라서 고리 원자력발전소 주변지역에 대해 사고발생시 피해를 저감하기 위한 방안을 적용할 필요가 있다.

원자력발전소는 기피시설로 주변지역의 인구를 감소시키는 것으로 연구결과 나타났다. 하지만 고리 원자력발전소 주변지역은 개발이 진행됨에 따라 인구가 증가하기 시작하는 것을 확인하였다. 고리 원자력발전소 주변의 개발이 지속되면 고리 원자력발전소에서 사고가 발생할 경우 예상되는 피해는 점차 증가할 것으로 예상된다. 또한 고리 원자력발전소는 부산등 대도시에 인접해 있어 원자력발전소 사고 발생 시 큰 피해가 예상된다. 따라서 고리 원자력발전소 지역에 대해서는 사고 발생 시 피해를 저감하는 대책이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 토지이용계획을 고리 원자력발전소 주변지역에 적용하고자 한다.

4.2 시뮬레이션 모델 및 시나리오 구축

국내 원자력발전소 주변지역의 변화를 분석한 결과를

바탕으로 고리 원자력발전소 주변지역을 시뮬레이션 모델로 설정하였다. 고리 원자력발전소를 대상으로 사고발생 시 피해저감을 위해 토지이용계획을 통해 개발억제를 진행하는 모델링 구축 및 시뮬레이션을 실시하여 그 효과를 예측하고자 한다. 이를 위해 시스템다이내믹스 방법을 바탕으로 연구를 진행하였다.

모델의 공간적 범위는 고리 원자력발전소 주변 반경 5 km인 '예방적 보호조치 구역'으로 설정하였다. 모델의 시간적 범위의 설정에 있어서는 시뮬레이션의 시작 시점으로 연구 당해인 2019년도를 설정하였으며 시뮬레이션 종료시점은 2040년까지로 설정하였다. 2040년은 신 고리 1호기의 원자력발전소 수명연한으로서 신규로 건설된 신 고리 2호기, 신 고리3호기, 신 월성1호기, 신 월성2호기를 제외한 모든 원자력발전소의 수명연한이 다하게 되는 시점이다. 이에 원자력발전소 사고의 위험성이 매우 높아질 것으로 예상되는 시점이기 때문에 시뮬레이션 종료시점으로 설정하였다. 또한 시뮬레이션은 1년 단위로 진행되며 이를 통해 향후 20년간의 변화를 추정해보고자 하였다.

모델의 파라미터(Parameter)값은 선행연구를 참고하여 구축한 후 Vensim 프로그램에서 지원하는 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)을 진행하여 민감도 분석을 통해 파라미터 값을 결정하였다. 또한 최근 약 20년간의 변화를 향후에도 유지할 것으로 예상하였기에 2000년부터 2018년까지 자료를 통해 추세를 설정하였고 실측 가능한 변수들을 기준으로 연도별 통계청(2000~2018) 자료와 모델 내부의 시뮬레이션 값의 비교를 진행하는 캘리브레이션(Calibration) 과정을 진행하여 모델의 현실성을 높이고자 하였다.

시스템다이내믹스를 활용하기 위해서는 컴퓨터 시뮬레이션 과정이 필요하다. 이를 위해서 컴퓨터 모델 방정식인 저장·유량도(Stock·Flow Diagram)를 작성하여야 한다. 이는 컴퓨터 시뮬레이션이 가능한 형태로 만드는 모델구축 과정이다. 본 연구에서는 원자력발전소 사고 발생 시 인구를 주요 피해대상으로 보고 인구변화로 그 피해를 예측하고자 한다. 이를 위해 도시의 인구를 중심으로 시스템을 설계하여 모델을 구축하고자 하였다. 모델을 구성하는 주요 시스템은 시스템다이내믹스를 활용한 도시연구들을 분석하여 공통적으로 사용한 인구, 주택, 경제 세 가지 하위시스템으로 설정하였고(Choi, 2003; Chae et al., 2016) 특히 시스템다이내믹스 연구에 주로 사용되는 Urban 1모형(Alfeld, 1995)을 기반으로 모델을 구축하였다. 이에 주요 하위시스템 및 변수는 Table 3과 같다. 이를 바탕으로 시스템 다이내믹스 구축한 모델의 저장·유량도는 Fig. 3과 같다.

또한 토지이용계획을 적용하기 위하여 시나리오 구축 역시 진행하였다. 이를 위해 선행연구에서 살펴본 Pearlman and Waite (1984)의 연구에서 제시한 방법을 바탕으로 토지 이용계획 시나리오를 구성하고자 하였다. 본 연구는 토지이

Table 3. Main Variables for System Configuration

System	Main variables	Source
Population	Population, Number of households, Number of households, Birth population, Birth rate, Death population, Transfer population, Transfer rate, Average number of households	National Statistical Office (each year), Busan Statistical Yearbook (each year), Gijang-gun Radiation Emergency Information
Housing	Number of houses, Average housing area, Land supply area, Floor area ratio, Occupancy rate, Home ownership rate, Green area, Residential area	National Statistical Office (each year), Busan Statistical Yearbook (each year), National Spatial Information Portal (2019)
Economy	Number of businesses, GRDP, Number of employees, Number of new companies	National Statistical Office (each year), Busan Statistical Yearbook (each year)

Fig. 3. Stock · Flow Diagram in the Area Around the Kori Nuclear Power Plan

용계획을 통해 고리 원자력발전소 주변지역의 인구증가를 관리하여 사고 발생 시의 피해를 저감하는 것이 목적이다. 따라서 토지이용 계획을 통해 주거지에 대한 규제를 진행하고자 한다. 이는 일종의 개발억제 방법이다. 기존 건설 지역에 대한 규제는 실행에 어려움이 나타날 수밖에 없기 때문에 본 연구에서는 신규 주택건설과정에서 용적률과 건폐율을 제한하는 방법을 사용하여 신규 주택을 감소시키고 이를 통해 인구를 감소시키는 토지이용계획 시나리오를 작성하고자 한다. 이러한 방안은 일종의 Down Zoning 방법이다.

현재 고리 원자력발전소 주변지역의 주거지역의 대부분은 1종 일반주거지이다. 국토의 계획 및 이용에 관한 법률 시행령을 살펴보면 제1종 일반주거지역의 건폐율은 최대 60%이며 용적률은 최대 200%로 설정되어 있다. 이를 Down Zoning 할 경우 제1종 전용주거지역과 제2종 전용주거지역으로 설정 가능하다. 본 연구에서는 비교적 규제 강도가

약한 제2종 전용주거지역으로 토지이용계획을 통해 Down Zoning 하는 토지이용계획 시나리오를 구성하였다. 제2종 전용주거지역은 최대 50%의 건폐율과 최대 150%의 용적률로 설정되어 있다.

또 다른 토지이용계획을 활용하는 방안으로는 지역·지구제를 통해 녹지를 확보하는 방안이 있다. 이는 기존의 주거지역에 대해 매입 등의 방법을 통해 녹지를 확보함과 동시에 거주가능 지역을 줄여 인구를 적절히 관리하는 방안이다. 이러한 접근은 신규주택에 대한 규제보다 비교적 강도가 높은 방안으로 많은 예산이 예상되나 ‘2030 부산시 도시기본계획’과 ‘2030년 울산도시기본계획’을 살펴보면 추가적인 공원 면적 증가에 대한 계획이 세워져 있다는 점을 고려하여 실행이 가능할 것으로 판단하였다. 또한 일반적으로는 도시의 외연적 확장과정에서 주로 자연녹지지역이 개발에 이용되어졌다. 본 연구의 모델 역시 기본적으로 개발압력이 발생할

경우 추가로 자연녹지지역의 용도변경을 통해 주택개발이 될 것으로 상정하였다. 하지만 원자력발전소는 사고발생의 위험성을 가지고 있기 때문에 인구를 적절하게 관리하여야 하며 이를 위해 보다 강력한 규제가 필요하다고 판단하였다. 이에 개발 압력이 나타나더라도 토지이용계획 아래에서 정해진 용도지역의 지정목적에 최대한 유지하는 방안을 마지막 토지이용계획 시나리오로 설정하였다. 이는 주택개발 가능 용지를 제한하는 방안이다. 이에 신규주택은 기존 주거지역과 용도 미지정 지역에서만 개발이 가능하며 재건축 위주의 개발이 가능하도록 토지이용계획 시나리오를 구성하였다.

토지이용계획 시나리오는 다음 Table 4와 같이 4가지 토지이용계획 시나리오로 구분하였다. 용적률과 건폐율의 하향은 토지이용계획을 통한 개발억제의 핵심으로서 본 연구에서 원자력발전소 주변지역의 인구를 감소시키기 위해 모든 토지이용계획 시나리오에 기본적으로 포함하였다.

Table 4. Land Use Planning Scenarios

Types of Land Use Planning Scenarios	Floor area ratio and building/closing rate are down	Increasing green area	Restrictions on zoning change
Basic Model	X	X	X
Scenario 1	O	X	X
Scenario 2	O	O	X
Scenario 3	O	X	O
Scenario 4	O	O	O

토지이용계획 시나리오 1은 신규 주택 건설과정에서 대상지역에 대해 Down Zoning을 실시하여 용적률·건폐

율을 제한하는 시나리오다. 토지이용계획 시나리오 2는 Down Zoning과 함께 기존 주거지역에 대해 일부분을 공원 및 녹지로 변화시키는 시나리오다. 이를 통해 신규 주택 건설을 위한 가용 면적을 줄이는 것이 목표이며 원자력발전소에 가까운 지역부터 점차 공원 및 녹지를 구축하여 주거 인구를 줄여 완충지역을 설정하는 것이다. 공원 조성을 위한 녹지면적의 경우 2019년부터 2040년까지 연평균 0.022 km²를 조성하는 방법으로 하여 총 약 0.457 km²를 조성하고자 한다. 이는 ‘2030 부산시 도시기본계획’이 상정하고 있는 공원목표를 바탕으로 면적 비율을 추산하여 결정하였다. 시나리오 3은 시나리오 1의 강화 형태로서 비교적 높은 강도의 토지이용계획을 실현하는 시나리오다. 신규 주택건설을 위한 주변지역의 용도지역 변경을 엄격히 금해 기존 주거지역에서의 재개발만 가능하게 하는 것이다. 시나리오 4는 시나리오 3에 공원 및 녹지를 확보하는 방안으로 본 연구에서 제시하는 가장 강력한 토지이용계획 시나리오다. 이러한 시나리오들을 앞서 설정한 모형을 통하여 시뮬레이션 분석을 실시하였다.

4.3 시뮬레이션 결과 분석

시스템 다이내믹스 방법을 사용하여 고리 원자력발전소 반경 5 km 이내의 인구수와 주택수를 중심으로 분석하였다. Fig. 4는 토지이용계획 시나리오를 적용한 고리 원자력발전소 반경 5 km 이내의 인구수와 주택수변화를 나타낸다.

기본 모형의 경우 2019년을 기준으로 과거 19년간의 변화 추이가 지속될 경우 지속적 인구 상승으로 2040년에는 3만 명에 달하게 될 것으로 나타났다. 또한 인구 증가와 함께 주택수 역시 꾸준히 증가하여 1만여 채를 돌파하는 것으로 예상되어졌다. 이러한 변화는 출산율의 지속적 감소에도

(a) Population

(b) House

Fig. 4. Graphs Within a 5 km Radius of Kori Nuclear Power Plant with Land Use Planning Scenarios

불구하고 지속적인 전입인구의 증가의 영향으로 해석할 수 있다. 과거 지속적인 전입인구의 증가로 인하여 인구가 증가했던 만큼 추후 출생률 감소에 대한 고려를 했음에도 불구하고 지속적 인구증가로 이어진 원인으로 보인다. 지속적 인구증가는 원자력발전소 사고발생시 피해를 증가시키게 된다. 인구의 증가는 초기 피폭단계에는 물론 인구대피 시간도 증가시키기 때문에 지속적 인구증가는 경계해야 한다. 토지이용계획을 적용한 시나리오를 적용한 결과를 살펴보면 4가지 토지이용계획 시나리오 모두 기본모형과 달리 인구 증가 현상이 둔화되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 용적률과 건폐율을 제한하여 신규주택건설을 억제함으로써 인구 증가를 억제할 수 있다는 것을 의미한다. 가장 인구증가 폭을 크게 감소시킨 것은 세 가지 방안들을 모두 적용한 토지이용계획 시나리오4에 해당했으며 2040년 기준 23,000명으로 예상되어졌다. 이러한 인구의 변화는 원자력발전소 사고 발생 시 피해를 감소시키게 된다.

시뮬레이션 결과 중 특이사항은 토지이용계획 시나리오2의 결과가 토지이용계획 시나리오1의 결과보다 인구증가 억제력이 더 약한 것으로 나타난 것이다. 이는 녹지면적 확보라는 추가적인 정책이 인구감소에 영향이 없다는 것으로 해석할 수도 있다. 하지만 토지이용계획 시나리오3과 4를 비교하였을 때 토지이용계획 시나리오4가 더 인구증가 억제력이 강하다는 것을 고려했을 때 기존 주거지역내 녹지를 조성하더라도 신규주거지 건설이 불가능하도록 용도지역 변경을 제한하지 않을 경우 오히려 더 많은 인구가 유입된다는 것으로 해석된다. 이에 용도지역의 변경제한과 녹지면적 확보는 동시에 진행되어야 함을 알 수 있었다.

주택수 역시 토지이용계획 시나리오 2가 토지이용계획 시나리오 1보다 더 많은 감소효과를 나타냈다. 이는 용도지역 변경을 제한하는 것이 녹지 조성에 있어서 반드시 필요하다는 것으로 해석할 수 있다. 본 연구에서 실시한 시뮬레이션 결과들을 종합하면 토지이용계획적 접근을 실시할 경우 주택수 감소로 인한 인구감소가 일어나는 것을 확인하였다.

5. 결론 및 정책적 제언

본 연구에서는 막대한 피해를 야기하는 원자력발전소 사고 피해를 저감하기 위하여 토지이용계획을 활용한 방안을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 우선 국내 원자력발전소들을 대상으로 사고발생시 예상되는 피해규모를 분석하기 위해 이중차분법을 통하여 주변지역의 인구변화를 살펴보았다. 분석결과 고리 원자력발전소를 제외한 전 지역에서는 지속적인 인구감소현상이 발생했으며 이는 원자력발전소로 인한 자연스러운 인구감소 현상으로 해석되었다. 하지만 고리 원자력발전소는 그린벨트 해제와 같은 개발압력으로 인하여 인구가 증가하는 추세였으며 최근 20년 동안 많은 개발이 진행되고 있었다. 이러한 개발추세가 유지될 경우

지속적인 인구 상승이 예상되는 상황이었다. 이는 원자력발전소 사고가 발생할 경우 피해규모도 커진다는 것을 의미한다. 따라서 사고 발생 시의 피해저감을 위한 대책이 강구되어야 하며 토지이용계획은 하나의 방안이 될 수 있음을 확인하였다.

토지이용계획을 통해 원자력발전소 주변지역의 피해저감 효과를 확인하기 위해 시나리오와 모델을 구축하여 시스템 다이내믹스를 통한 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과 토지이용계획을 통한 용적률·건폐율 제한, 녹지조성을 통한 신규주택건설을 제한하는 방안 그리고 용도지역변경을 금지하여 추가 주택 건설을 규제하는 방법들이 미래의 원자력발전소 사고 피해를 저감하는 효과가 있음을 확인하였다. 또한 용도지역 변경을 금지하는 방안과 녹지 조성방안은 동시에 실현되어야 하며 복합적인 방법일수록 그 효과가 증가한다는 것을 확인할 수 있었다.

국토의 계획 및 이용에 관한 법률에서는 방재 및 안전에 관한 사항을 명시하고 있으며 이를 바탕으로 재난·재해로부터 도시와 시민들을 보호하기 위하여 방재계획을 수립하고 있다. 원자력발전소 사고역시 재난·재해이며 이에 대비가 필요하다. 이를 위하여 기존의 구조적 접근방법과 함께 비구조적 접근방법을 함께 활용하는 복합적인 전략이 필요하다. 토지이용계획은 비구조적 접근으로서 사고 발생 시 피해저감 효과를 기대할 수 있는 정책이다. 이를 위해 Table 5와 같은 정책제안을 하고자 한다.

Table 5. Policy Proposal Contents

Number	Proposal policy name	Proposal policy content
1	Risk Zoning Policy	Limit floor space and the building-to-land ratio. New building restrictions.
2	Greenbelt Retention Policy	Optional land expropriation and purchase process through legal basis.
3	Creating Buffer Zones Policy	Establishing a buffer zone based on legal basis.
4	Information provision policy	It continuously provides information on nuclear power to local residents and also participates in the disaster prevention planning process.

토지이용계획을 통한 저감전략의 핵심은 원자력발전소의 위험성을 인식하고 일종의 위험지역 지구제(Risk Zoning)와 같은 정책을 실시하는 것이다. 본 연구에서도 용도지역에 대한 변경금지라는 방안을 시뮬레이션을 통해 진행하였는데 이를 실행하기 위해서는 법적 근거가 필요하다. 따라서 원자력발전소 주변지역의 특수성을 이해하고 새로운 형태의 지역·지구로의 설정이 필요하다. 예를 들어 예방적보호

조치구역을 토지이용계획에 포함시켜 용도지역·지구제를 통해 용적률, 건폐율을 제한하고 신규 건축 제한을 통해 개발밀도와 인구밀도를 모두 줄이는 점진적 규제를 진행할 수 있다. 원자력발전소가 가진 위험성을 고려하고 시민들의 인식들에 대해서도 고려하였을 때 합법적 규제가 가능할 것으로 사료된다. 이를 통해 위험지역의 인구와 건축물을 감소시켜야 한다. 이러한 규제의 효과는 대규모 재난·재해에만 적용되는 것이 아니다. 가장 낮은 등급의 원자력 비상인 청색비상 수준의 방사선누출이 발생하더라도 인명 및 재산 피해를 최소화할 수 있다. 또한 더 높은 등급의 사고가 발생할 경우에는 급성피폭의 위험성을 저감시킬 수 있다. 동시에 긴급보호조치 계획지역의 소개 및 대피상황에서도 줄어든 인공로 인해 비상 계획(Emergency Plan)에 의거한 대피시간도 줄어든 것이다. 원활한 대피는 재난·재해의 피해를 저감시킬 수 있다.

이외에도 본 연구에서 시뮬레이션을 진행한 녹지지역 확보방안을 확대하여 토지이용계획을 통한 토지수용방식을 원자력발전소에 응용하는 것도 가능하다. 이를 도입할 경우 원자력발전소 주변의 주요 위험지역인 예방적보호조치구역에 대한 수용 및 매입이라는 방법을 실행할 수 있다. 하지만 토지 수용 및 매입의 경우 많은 예산과 지역주민의 협조가 필요하며 상당한 시간이 예상된다. 또한 고리 원자력발전소와 같이 개발이 진행되거나 완료된 지역에 대해서는 비용 및 시간의 문제로 수용방식의 정책의 실현 가능성은 떨어질 수밖에 없다. 따라서 고리 발전소와 같이 이미 주변 지역에 대도시가 존재하고 있으며 개발이 완료된 지역의 경우 새로운 접근 방법이 필요하다. 이를 위해 취약지역 분석을 통한 선택적 수용 또는 매입의 방법이 대안이 될 수도 있다.

이와 함께 완충지대 조성 역시 고려할 수 있다. 원자력안전법 제9장 89조 1항에서는 ‘국가가 원자로 및 관계시설, 핵연료주기시설 또는 방사성폐기물관리시설등의 설치하는 때에는 방사선에 따른 인체·물체 및 공공의 재난·재해를 방어하기 위하여 일정 범위의 제한구역을 설정할 수 있다.’라는 조항을 통해서 제한구역을 설정할 수 있는 법적 근거를 제시하고 있다. 그리고 그 범위는 동법 5항을 통해 대통령령으로 정하는 바에 따른다고 기재되어 있다. 또한 이렇게 정한 제한구역의 경우 일반인의 출입과 거주가 제한된다. 대통령령을 살펴보면 ‘대통령령으로 정하는 범위’란 원자로 및 관계시설, 핵연료주기시설 또는 방사성폐기물관리시설등의 중심으로부터 반경 8 km까지의 범위를 말한다.’라고 서술되어있다. 이를 통해서 8 km 내부에 위치하는 예방적 보호조치계획구역에 대한 완충지대 설정을 위한 법적 근거를 마련할 수 있다. 이 조항들을 바탕으로 원자력발전소 주변 반경 5 km 지역에 대한 완충지대 설정할 수 있다. 이는 토지 수용 및 매입의 과정을 보조하는 도구로써 활용될 수 있다. 또한 토지이용계획을 통한 위험지역 지구제의 근거

조항이 될 수 있다.

토지이용계획을 통한 미래의 피해규모를 줄이는 것은 원자력발전소 폐로과정과 그 이후에도 필요한 조치이다. 현재 원자력발전소들은 공통적으로 고준위 폐기물 처리 문제를 가지고 있다. 사용 후 핵연료와 같은 고준위 폐기물에 대한 적합한 저장장소를 마련하지 못하고 있기 때문이다. 현재는 사용 후 핵연료는 각 원자력발전소의 수조에 임시로 저장되어 있다(Kim and Ha, 2012). 이러한 문제 때문에 원자력발전소의 발전수명이 만료된다면 원자력발전소가 그대로 고준위 폐기물 저장장소가 될 것으로 예상된다. 이는 발전을 멈춘 원자력발전소 주변이 미래에도 방사능 유출 사고 등의 위험을 가진 지역으로 남게 되는 것을 의미한다. 또한 고준위 폐기물의 저장소 문제를 제외하더라도 원자력발전소의 해체 과정은 오랜 시간이 소요되는 작업이라는 점을 고려한다면 원자력발전소 주변지역은 지속적인 위험 지역으로 남을 수밖에 없다.

이러한 방안들 이외에도 지역주민들에게 지속적으로 원자력 발전과 관련된 정보를 제공하고 방재계획 과정에도 참여시켜야 한다. 이 역시 비구조적 접근방법으로서 특히 방사선 비상 발생 시 주민대처 요령, 구역별 주민 대피경로 계획, 인근의 학교나 마을회관 등을 활용한 소개 방법, 주민 수용계획, 경계구역 통제센터 설치·운영계획 수립은 반드시 필요하다. 향후 원자력발전소 주변의 도시계획 및 토지이용계획에는 이러한 내용을 포함할 수 있도록 법적 개정을 위한 노력이 진행되어야 한다.

현재 국내에서는 23개의 원자력발전소가 지속적으로 가동되고 있다. 시민들은 여전히 원자력발전소와 함께 살아가고 있는 것이다. 따라서 현존하는 원자력발전소에 대한 안전성 확보는 도시안전에 위한 필수적인 노력이다. 원자력발전소 사고에 대비하기 위하여 토지이용계획이란 비구조적 접근방법을 활용함으로써 도시의 안전성을 확보하는 것은 훌륭한 방재전략이 될 것이다. 이를 통해 원자력 발전소 사고로부터 보다 안전한 도시를 구축할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 주저자의 부산대학교 석사학위논문을 바탕으로 수정 보완하여 작성되었습니다.

References

- Alfeld, L.E. (1995). *Urban dynamics – the first fifty years. System Dynamics Review*, Vol. 11, No. 3, pp. 199-217.
- Beatley, T. (1995). *Promoting sustainable land use: Mitigating natural hazards through land use planning*. Insurance Institute for Property Loss Reduction, pp. 31-36.
- Berke, P., Beatley, T., and Wilhite, S. (1989). *Influences*

- on local adoption of planning measures for earthquake hazard mitigation. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, Vol. 7, No. 1, pp. 33-56.
- Branas, C.C., Cheney, R.A., MacDonald, J.M., Tam, V.W., Jackson, T.D., and Ten Have, T.R. (2011). A difference-in-differences analysis of health, safety, and greening vacant urban space. *American Journal of Epidemiology*, Vol. 174, No. 11, pp. 1296-1306.
- Burby, R.J. (Ed.). (1998). *Cooperating with nature: Confronting natural hazards with land use planning for sustainable communities*. Washington D.C., USA: Joseph Henry Press.
- Burby, R.J., and Dalton, L. (1994). Plan can matter! The role of land use plans and state planning mandates in limiting the development of hazardous areas. *Public Administration Review*, Vol. 54, No. 3, pp. 229-238.
- Burby, R.J., Deyle, R.E., Godschalk, D.R., Olshansky, R.B. (2000). Creating hazard resilient communities through land-use planning. *Natural Hazards Review*, Vol. 1, No. 2, pp. 99-106.
- Chae, Y.R., Moon, T.H., Kim, D.H., Lee, D.S., Jung, S.Y., and Lee, K.T. (2016). *Development system dynamics model for strengthening climate change Responding Capability*. Business Report, Korea Environment Institute (KEI).
- Choi, N.H. (2003). A system dynamics approach in analyzing the dynamics of Seoul Metropolitan and finding policy leverages: Causal loop structures and system behaviors. *Korean Public Administration Review*, Vol. 37, No. 4, pp. 329-358.
- Do, M.S. (2015). Disaster response and infrastructure asset management to enhance city resilience. *Planning and Policy*, Korea Research Institute for Human Settlements, Vol. 400, pp. 25-33.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., and Savage, W.Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, Vol. 102, No. 3-4, pp. 99-111.
- Forrester, J.W. (1970). Urban dynamics. *IMR; Industrial Management Review*, Vol. 11, No. 3, p. 67.
- Godschalk, D., Beatley, T., Berke, P., Brower, D., and Kaiser, E.J. (1998). *Natural hazard mitigation: Recasting disaster policy and planning*. Washington D.C., USA: Island Press.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2002). *Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency*. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 7, IAEA Vienna International Centre, Vienna, Austria.
- Jin, S.H. (2011). The prospect and change of Korean nuclear policy after the Fukushima accident. Critical Review of History, *The Institute For Korean Historical Studies*, No. 96, pp. 140-166.
- Jung, J.C. (2006). The effectiveness of land use planning in hazard mitigation: The experience in the 1994 Northridge earthquake. *The Korea Spatial Planning Review*, Korea Research Institute for Human Settlements, Vol. 49, pp. 93-108.
- Jung, J.C., Lee, S.B., Sakong, H., Lee, J.H., and Lee, D.B. (2007). A study on the sustainable natural disaster mitigation policy: Focusing on the land use planning and management measures for reducing flood damage. Basic Research Report, Korea Environment Institute (KEI).
- Kang, C.S. (2018). Greenpeace “Seven years of Fukushima Accident, Residents return area also contaminated” (March 1, 2018). *JoongAng Ilbo*.
- Kim, K.C., Jung, K.Y., Choi, J., Kim, H.S., and Kim, S.W. (2007). *System Dynamics using Vensim®*. Seoul: Seoul Economic Management Publishing House.
- Kim, Y.K., and Ha, T.H. (2012). *Problem and improvement plan for accident response plan of the southeastern nuclear power plant*. Policy Focus 2012-23, Gyeongnam Institute, pp. 1-30.
- Kwak, S.M., and Yu, J.K. (2016). *System dynamics modeling and simulation: Utilization of Vensim®*. Seongnam: Book Korea.
- Lee, M.H., Kim, Y.S., Kim, M.S., and Hong, S.H. (2007). Dynamic analysis on the construction of the innovative city. *Korean System Dynamics Review*, Vol. 8, No. 2, pp. 141-173.
- Lee, N.H., and Choi, K.W. (2000). Structural considerations of safety in nuclear power facilities. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 12, No. 2, pp. 11-16.
- Lee, T.H. (2012). Current status and prospect of nuclear power generation in Korea. *Orbis Sapientiae*, Vol. 12, pp. 104-120.
- Moon, J.H. (2012). *The impact of public housing on neighborhood land prices*. Ph.D. dissertation, Pusan National University.
- Nemoto, M., and Piao, Y.H. (2016). Strategy to enhance resident protection against nuclear accident based

- on community: Focused on community activities for disaster prevention within 10 kilometers of nuclear power plant in Japan. *The Journal of Korean Policy Studies*, Vol. 16, No. 2, pp. 1-20.
- Osland, A.C. (2013). Using land-use planning tools to mitigate hazards: Hazardous liquid and natural gas transmission pipelines. *Journal of Planning Education and Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 141-159.
- Park, M.S., Kim, Y.J., and Lee, H.S. (2011). Korean self-sufficient city definition and urban development policy analysis - Using system dynamics. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, Vol. 27, No. 7, pp. 161-171.
- Pearlman, K., and Waite, N. (1984). Controlling land use and population growth near nuclear power plants. *Journal of Urban and Contemporary Law*, The School of Law Washington University, Vol. 27, pp. 9-69.
- Vijayan, P.K., Kamble, M.T., Nayak, A.K., Vaze, K.K., and Sinha, R.K. (2013). Safety features in nuclear power plants to eliminate the need of emergency planning in public domain. *Sadhana*, Vol. 38, No. 5, pp. 925-943.
- Yoon, D. K. (2017) A study on the disaster types and preparation measures of urban core facilities. *Planning and Policy*, Korea Research Institute for Human Settlements, Vol. 430, pp. 6-12.

Received	September 4, 2019
Revised	September 23, 2019
Accepted	October 4, 2019