재해예방형 도시계획 수립 지원을 위한 도시의 기후변화 재해 취약성 분석방법 연구

A Study on the Methods to Analyze Climate Change Driven Urban Disaster Vulnerability for Disaster Preventive Urban Planning

심우배* · 이병재** · 이찬희*** · 김재호***

Sim, Ou Bae · Lee, Byoung Jae · Lee, Chan Hee · Kim, Jae Ho

Abstract

Because of climate change, urban disaster is gradually becoming larger and diversified. In order to create a safe city against disaster, urban planning including land use, infrastructure, buildings planning should consider disaster vulnerable areas in the city. On December 15th, 2011, Ministry of Land, Infrastructure and Transport revised urban planning guideline and started the disaster vulnerability analysis institution. Since July 1st, 2012, newly established urban planning should conduct the disaster vulnerability analysis and reflect its results. Therefore, in this study, domestic and foreign examples of climate change disaster vulnerability analysis were examined and the indicators for the disaster vulnerability analysis were established. For the practical analysis, the disaster vulnerability analysis indicators about current and future vulnerability for heavy rain, heat wave, heavy snow, drought, strong winds, sea level rise were drawn. Urban comprehensive disaster vulnerability can be analyzed by overlapping the current and future disaster vulnerability analysis results.

Key words : Disaster Prevention, Urban Planning, Disaster Vulnerability, Climate Change

요 지

기후변화 영향으로 도시에서의 재해가 점차 대형화, 다양화되는 추세이다. 재해에 안전한 도시를 조성하기 위해 도시계획 수립단계부터 재해취약지역을 고려한 토지이용, 기반시설, 건축물 등의 계획 수립체계를 마련해야 한다. 국토교통부는 2011년 12월 15일 도시계획 수립지침을 개정하여 재해 취약성 분석을 도입하였다. 2012년 7월 이후 도시계획을 수립변경하는 과정에서 기후변화에 따른 재해 취약성 분석을 시행하고 이를 반영토록 하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 국내외 기후변화 재해 취약성 분석 사례를 고찰하고, 기후변화 재해 취약성 분석의 지표를 설정하였다. 실질적인 분석을 위한 재해 취약성 분석 지표는 폭우, 폭염, 폭설, 가뭄, 강풍, 해수면 상승에 대한 현재 및 미래 재해 취약성에 대해 분석 가능하도록 도출되었다. 현재 및 미래 재해 취약성 분석 결과를 중첩하여 도시 종합 재해 취약성을 분석할 수 있다.

핵심용어 : 재해예방, 도시계획, 재해 취약성, 기후변화

1. 서 론

최근 기후변화 영향으로 인구와 기반시설이 집중된 도시에서 재해가 점차 대형화, 다양화되는 추세이다. 국지성 집중폭우로 인해 피해 규모가 대형화되고, 폭염, 폭설, 가뭄, 강풍 등 다양한 도시재해가 일상화되고 있다. 지난 100년간(1912~2008년) 우리나라 6대 도시 평균기온은 1.7°C가 상승하고, 강수량은 19% 증가하였다. 2011년 7월 26일~28일 3

일 동안에는 서울의 연평균 강수량 1,451 mm의 약 40%에 해당하는 588가 집중되어 우면산 산사태, 강남 침수피해가 발생하였다.

재해에 안전한 도시 조성을 위해서는 도시계획 수립단계부터 재해취약지역을 고려한 도시계획 수립체계를 마련해야 한다. 이를 위해 기후변화에 따른 재해 취약성을 분석하여 재해예방형 도시계획체계를 구축하는 것이 필요하다.

국토교통부는 우면산 산사태, 강남역 주변 침수 등을 계기

*정회원. 국토연구원 국가도시방재연구센터장(E-mail: obsim@krihs.re.kr)

Member. Director, National Urban Disaster Prevention Research Center, Korea Research Institute For Human Settlements

**교신저자. 정회원. 국토연구원 책임연구원(Tel: +82-31-380-0211, Fax: 031-380-0483, E-mail: leebj@krihs.re.kr)

Corresponding Author. Member. Associate Research Fellow, Korea Research Institute For Human Settlements

***정회원. 국토연구원 연구원

Member. Assistant Research Fellow, Korea Research Institute For Human Settlements

Table 1. Disaster Vulnerability Analysis in Urban Planning Guideline

광역도시계획 수립지침	도시기본계획 수립지침	도시관리계획 수립지침
기후변화에 따른 재해 취약성 분석을 통해 광역계획권의 다양한 재해위험을 파악하고, 부문별 계획 수립시 반영하여 재해피해를 최소화하여야 한다.	기후변화에 따른 재해 취약성 분석을 통해 도시의 다양한 재해위험을 파악하여 부문별 계획 수립시 반영하고, 재해 취약성 저감방안을 제시하여야 한다.	기후변화 재해 취약성 분석을 수행한 후 수립하고, 취약성 분석 결과를 토지이용, 기반시설 배치계획 등 부문별 계획에 반영한다.

로 2011년 12월 15일, 광역도시계획, 도시기본계획, 도시관리계획 등 도시계획 수립지침을 개정하여 재해 취약성 분석을 도입하였다. 이는 도시계획을 수립·변경하는 과정에서 기후변화에 따른 재해 취약성 분석을 시행하고 이를 토지이용, 기반시설 등 각 부문별 계획에 반영토록 하는 것이다. 이에 따라 도시계획 수립단계부터 재해위험을 고려함으로써 재해 예방형 도시계획체계 구축을 위한 기반이 마련되었다. 재해 취약성 분석은 2012년 7월 이후 수립·변경되는 모든 도시계획을 대상으로 시행되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내외 기후변화 재해 취약성 분석 사례를 고찰하고, 기후변화 재해 취약성 분석의 지표를 설정하고자 한다. 또한, 재해 취약성 분석 지표는 기후변화 재해별 기후요소 및 도시 구성요소간의 영향관계, 기후변화 재해 영향에 대한 인과관계 검토, 선행연구지표 검토, 전문가 의견 수렴 등을 통해 도출되었다. 분석 지표는 폭우, 폭염, 폭설, 가뭄, 강풍, 해수면 상승 등 6개 재해에 대한 재해 취약성을 분석 가능하도록 도출되었다. 본 논문은 재해 취약성 분석 제도의 활성화를 위해 본 연구진이 수행한 기후변화 적응도시 조성방안 연구(2011년, 국토해양부)와 도시의 기후변화 재해 취약성 분석 발전방안 연구(2013년, 국토연구원)의 연구결과를 발췌 요약 및 수정하여 재해 취약성 분석 방법의 개념 및 절차, 방법론에 대한 설명을 제공하도록 작성되었다.

2. 도시의 기후변화 재해 취약성 분석 사례 및 시사점

2.1 국내 기후변화 재해 취약성 분석 사례

Yoo *et al.*(2008)은 취약성-탄력성 지표(VRI)를 이용하여 우리나라 16개 광역지자체의 취약성을 비교·분석하였다. 이 연구에서는 농업, 생태계, 건강, 재해 등의 종합적 고려를 시도하였다. 제시된 취약성 프로파일은 지역별 적응정책 방향성 제시와 정책적 도구로 활용될 수 있을 것으로 보인다. 그러나 과거자료를 기반으로 하여 미래 기후변화를 반영하는데 한계가 있다.

Go(2009)는 경기도 31개 시·군을 대상으로 기후노출, 민감도, 적응능력 지표를 활용하여 취약성 지수를 산정하였고, 생태계, 건강, 재해를 종합적으로 고려하였다. 그러나 여러 지자체의 상대적 취약성을 평가하는데 그친 한계가 있다.

National Institute of Environmental Research, Ministry of Environment(2010)에서는 건강, 농업, 재해 등 16개 부문에 대해 시·군·구 단위로 지표(민감도, 적응능력, 기후노출)를 활용하여 기후변화 영향평가 및 취약성을 분석할 수 있는 적응도구를 개발하였다. 현재 및 미래의 기후노출은 관

측치 자료를 사용하지 않고, 미래 기후변화 시나리오를 활용하였다. 그러나 개별 지자체 차원에서 지역특성을 고려한 취약성 평가를 하지 못하고 있으며, 대책 수립을 위해 취약지점에 대한 정보를 제공하지 못하고 있다.

기후변화 시나리오를 활용한 브레인스토밍 관련하여 Myoung *et al.*(2009)은 우리나라의 19개 사회기반시설에 대해 관련 전문가 대상 설문조사를 통해 기후변화에 대한 취약성 평가를 실시하였다. 그러나 지표 중심의 연구의 한계로 인해 지역의 재해특성과 공간분석 중심의 취약성 분석 결과는 제공하지 못하고 있다.

Sim *et al.*(2010)은 기후변화가 도시 구성요소(시민, 도시기반시설, 건축시설)에 미치는 영향을 인과관계 분석을 통해 도출하였다. 이는 재해 취약성 분석 결과를 바탕으로 도시계획적 대책을 수립하는데 활용될 수 있다.

2.2 국외 기후변화 재해 취약성 분석 사례

네덜란드의 로테르담은 다양한 기후변화 시나리오를 활용하여 해수면 상승에 의한 하천 주변 범람 분석을 실시하였다. 모델링 분석을 통해 실질적으로 취약한 지점을 파악하였다.

독일의 슈투트가르트는 대기오염의 정체현상과 열섬화 현상을 해결하기 위해 바람길 분석도를 작성하였다. 시뮬레이션을 통한 바람길 분석은 특정 지역의 풍해 취약성을 분석하는데 이용될 수 있다. 이 또한 과학적 모델링을 통해 재해취약지점을 찾고 지역특성을 고려한 대책이 수립 가능하도록 하고 있다.

독일 작센안할트 주는 지역기후모델 분석 결과를 토대로 수자원, 토양, 농업, 임업, 자연보호, 생태계, 포도농장의 7가지 조사 항목에 대한 취약성을 분석하였다. 과거 기반 분석 및 지역 경험치 조사를 통해 미래 시나리오 분석 및 평가의 객관성을 높였다.

Lissner *et al.*(2011)은 GIS 기술과 Fuzzy 방법을 활용하여 독일 North Rhine-Westphalia주의 396개 지자체에 대해 폭염 취약성 평가를 시행하였다. 민감도지표(불투수지역, 인구밀도, 65세 이상 인구)와 기후노출지표(Heat Wave Days)를 활용(적응능력지표 미고려)하여 평가 신뢰성을 높였다. 지표에 의한 방법을 통한 상대비교 뿐만 아니라 미래 기후변화 시나리오를 활용하여 기후변화 취약성을 평가하도록 하고 있다.

미국 메릴랜드 주에서는 해수면 상승에 따른 미래 침수에 상지역을 선정하기 위해, Worcester County 사례분석 실시 후 Maryland 전 지역으로 확대해서 적용할 계획이다. 해수면 상승을 고려하기 위해 3 가지 기후변화 시나리오(Steady State, Average Accelerate rate(IPCC 평균값), Max rate(IPCC

최대값+최대지반침하))를 적용하였다. 이 또한 모델링 분석을 적극 활용한 사례로 볼 수 있다.

미국 환경청은 뉴욕시 기후변화 취약성 분석을 위해 기후변화 시나리오를 이용하여 미래를 전망하고 지역 이해관계자의 브레인스토밍을 통해 취약성을 분석하였다.

미국 연방교통국은 사회기반시설 기후변화 취약성 평가를 위해 3단계의 분석과정을 거쳤다. 1단계는 현 상태의 취약성 평가이며, 2단계는 미래 기후변화 예측이고, 3단계는 기후변화에 따른 미래 취약성 추정이다. 이 연구는 전문가 브레인스토밍을 적극 활용하여 취약성 평가체계를 구축하였다.

Blakely(2007)는 홍수, 해수면 상승, 열파, 폭풍우 등 도시의 적응대책 연구가 필요한 분야를 선정하고, 분야별 위험을 평가하여 미래 위험점수를 산정하였다. 전문가에 의한 델파이 기법을 활용하여 0-25점까지 부여하는 정량화 방안을 제시하였다.

CSIRO *et al.*(2007)은 호주 빅토리아주 기반시설 기후변화 취약성 분석을 위해 최악의 기상시나리오를 기준으로 2030년과 2070년을 예측하고, 현재상태에서 취약성 분석을 실시하였다. 현 상태에서 기반시설의 기후변화 위험도에 따른 기준을 설정하여 기반시설 취약성 분석을 실시하였다. 이 연구에서는 위험 평가 매트릭스를 통해 위험정도를 평가하도록 하고 있다.

The Sheltair Group(2003)은 캐나다 밴쿠버 도시시스템의 기후변화 취약성 분석을 위해 영향 다이어그램(*influence diagrams*)을 만들어 13개 도시시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 시스템 마다 기후변화가 미치는 영향과 각 지점에서 영향을 줄이기 위한 적응전략에 대한 2개의 다이어그램을 제시하였다.

2.3 시사점

국내 사례를 분석한 결과 공간범위를 고려한 체계적이고 다양한 기후변화 취약성 평가가 미흡한 것으로 파악되었다. 국내 선행연구는 여러 지자체의 상대적인 취약성을 평가하는 것이 대부분이다. 적응은 주로 지역차원에서 기후변화의 부정적 영향을 최소화하는 것이 중요하나, 개별 지자체(도시) 차원에서의 지역특성을 고려한 취약성 평가 사례는 미흡한 실정이다. 여러 지자체 대상의 적응능력 지표는 지역특성을 고려하지 못하여 개별 도시 적응력 제고로 연결되지 못하고 있다. 또한, 대부분의 연구가 과거 통계자료에 기반한 취약성 분석이며, 미래 기후변화 영향을 고려한 취약성 평가가 이루어지지 못하고 있다. 지표 중심의 연구가 대부분이고, 모델링 및 기후변화 시나리오 활용 사례가 미흡한 것으로 파악되었다. 그리고, 최근 기후변화에 따라 재해위험이 크게 증가되고 있으나, 재해 중심의 연구가 미흡한 것으로 분석되었다. 농업, 수산업, 생태계, 건강, 재해 등 여러 부문에 걸친 연구가 진행되어 재해 비중이 상대적으로 작고, 다양한 기후변화 재해를 고려하지 못하고 있다. 연구결과가 종합지표 중심으로 제시되어 재해별 기후변화 취약성 지표가 빈약한 것이 문제점으로 드러났다.

국외 사례를 통해 개별 도시를 중심으로 지역특성을 고려

한 다양한 기후변화 취약성 평가방법을 활용할 필요가 있음이 조사되었다. 개별도시의 지역특성을 고려하여 해당지역에 큰 영향을 미치는 재해 중심으로 취약성 평가가 이루어지고 있으며, 지역 이해관계자(주민, 공무원, 전문가 등)의 브레인스토밍을 통해 지역특성을 반영한 기후변화 취약성을 평가하고 있었다. 특히, 브레인스토밍 방법은 도시기반시설 기후변화 취약성 평가에 적극 활용될 수 있다. 지표에 의한 방법을 포함하여 모델링, 브레인스토밍, 인과관계 분석 등 다양한 취약성 평가방법을 활용할 필요 있음이 조사되었다. 또한, 기후변화 취약성 평가 시 대부분 미래에 대한 기후변화 취약성 평가를 시행하고 있었다. 아직까지 불확실성을 많이 내포하고 있음에도 불구하고 기후변화 시나리오를 적극 활용하여 미래 기후변화 영향에 대한 취약성 평가를 실시할 필요성이 파악되었다.

3. 재해 취약성 분석의 개념 및 절차

3.1 기후변화 재해 취약성 분석의 개념

도시의 기후변화 재해 취약성 분석 대상재해는 폭우(홍수·산사태), 폭염, 폭설, 강풍, 가뭄, 해수면상승의 6개 재해로 구분한다.

도시 기후변화 재해 취약성 분석은 IPCC(2007) 기후변화 취약성 분석의 골격을 유지하면서 기후노출(*Exposure*)과 도시민감도(*Sensitivity*)를 고려하며, 지자체 내 최소 공간범위(인구센서스조사의 집계구, 보통 읍면동의 1/23 정도)에 대한 상대평가를 통해 재해취약지역 도출한다. 기후노출(*Exposure*)은 기후변화 재해를 유발하는 기온, 강수량 등과 같은 기후적 요소에 의한 영향을 나타내고, 도시민감도(*Sensitivity*)는 기후변화 재해에 따른 도시의 물리적 취약특성과 도시구성요소의 부정적 영향을 의미한다. 기후노출 및 도시민감도에 따른 잠재적 재해취약성을 상쇄시키는 합리적인 적응능력지표를 도출하는 것은 현실적으로 어려워 재해 영향을 왜곡시킬 우려가 있으므로 안전을 측면에서 본 연구에서는 고려하지 않았다. 재해 취약성은 I~IV 등급으로 등급화하고, I 등급이 재해에 가장 취약한 지역이며, 재해취약지역은 I, II 등급 지역을 의미한다.

3.2 기후변화 재해 취약성 분석의 구조

본 연구에서는 도시의 기후변화 재해 취약성을 현재 취약

Fig. 1. Concept of Urban Climate Change Disaster Vulnerability Analysis (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011)

Fig. 2. Structure of Urban Climate Change Disaster Vulnerability Analysis (Sim, 2013)

성, 미래 취약성, 종합 재해 취약성으로 구분하였다. 현재 취약성(Present Vulnerability)은 과거부터 현재(보통 30년)까지의 기상 관측치에 의한 현재 기후노출(Present Exposure)과 현재의 잠재취약지역과 도시취약구성요소를 중첩한 도시민감도(Present Sensitivity)로 나타낸다. 미래 취약성(Future Vulnerability)은 기후변화 시나리오(RCP 기반 시나리오)에 의한 미래 기후노출(Future Exposure)과 미래의 도시개발 전망 등을 반영한 도시민감도(Future Sensitivity)로 나타낸다. 도시 종합 재해 취약성(Total Disaster Vulnerability)은 현재 취약성과 미래 취약성을 고려하고 현장조사 및 전문가 등의 의견수렴 결과 최종 확정된 재해 취약성으로 나타낸다. 여기서 중첩이란 재해 취약성 분석지표값(기후노출, 도시민감도 등)의 표준화를 통해 최종 재해 취약성지수를 계산하는 일련의 과정을 의미한다.

3.3 기후변화 재해 취약성 분석의 절차

기후변화 재해 취약성 분석의 절차는 다음과 같은 순서를 따른다.

(1) 지자체 재해 피해현황 분석

재해피해액, 인명피해 등 지자체 재해 피해현황 조사 및 특성분석, 연도별 추이분석 등을 통해 지자체의 재해발생특성 및 여건을 파악한다. 재해피해액 등의 자료가 없는 재해에 대해서는 기상특보 발효횟수, 운반 및 제한급수 등 간접지표 자료를 활용하여 재해현황 조사 및 특성분석을 실시한다.

(2) 취약성 분석 대상 재해유형 선정

지자체 재해 피해현황 분석 결과, 지역의 이해관계자(관련 공무원, 주민), 전문가의 의견수렴을 통해 지자체의 분석대상 재해유형을 선정한다. 폭우재해는 우리나라 기상특성을 고려할 때 매년 전국적으로 발생하므로 모든 지자체에서 분석대상 재해로 선정하고, 해수면상승은 해안을 포함하는 지자체에서는 반드시 분석대상 재해로 선정하는 것을 권고한다.

(3) 대상재해별, 지표별 관련 DB 구축

대상재해 유형별 취약성 분석지표에 대해 지자체, 관련 DB 생산·관리기관 등의 협조를 통해 DB를 구축한다.

(4) 도시 기후변화 재해 취약성 분석

현재 기후노출 및 도시민감도 분석결과를 중첩 및 등급화

Fig. 3. Procedure of Urban Climate Change Disaster Vulnerability Analysis (Sim, 2013)

하여 현재의 재해취약지역을 도출한다. 미래 기후노출 및 도시민감도 분석결과를 중첩 및 등급화하여 미래의 새로운 예상 재해취약지역을 도출한다. 현재 취약성 분석 결과와 미래의 예상 재해취약지역을 중첩하여 종합 재해 취약성(안)을 제시한다.

(5) 도시 종합 재해 취약성

현장조사 및 공간분석, 지역 이해관계자(관련 공무원, 전문가, 주민 등)의 의견 등을 수렴하여 종합 재해 취약성(안)에 나타난 재해취약성 등급조정 과정을 거쳐 지자체의 도시 종합 재해 취약성을 확정한다.

(6) 도시계획 수립방향 제시

재해취약지역 및 주변지역에 대한 현장여건, 지역특성 등을 고려한 토지이용계획, 기반시설계획, 방재계획 등 도시계획의 부문별 계획의 대응방향을 제시한다. 재해 취약성 등급을 고려하여 토지이용 제한, 도시계획시설 설치 제한, 건축물 설치 제한, 도시계획시설 및 건축물 활용, 방재시설(하천, 하수도 등) 강화 등을 제시한다.

4. 재해 취약성 분석지표 도출

4.1 분석지표 도출방법

재해 취약성 분석 지표는 기후변화 재해별 기후요소 및 도시 구성요소간의 영향관계, 기후변화 재해 영향에 대한 인과관계 검토 결과 등을 연계하여 '기후노출 및 도시민감도 영향지표'를 도출하였다. 영향지표는 기후변화 재해별 영향을 미치는 기후요소 및 도시 구성요소에 대해 앞서 검토한 기후변화 재해가 도시 구성요소에 미치는 영향에 대한 인과관계 검토 결과를 토대로 도출하였다.

기후변화 재해별 영향지표에 대해 일반적으로 유추할 수 있는 '기후노출 및 도시민감도 1차 분석지표'를 도출하고, 선행연구지표 검토, 전문가 의견수렴 등을 통해 취약성 분석을

Table 2. Indicators in Preceding Research (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011)

재해	구분	지표(요인)	출처
홍수	노출	<ul style="list-style-type: none"> · 일강수량 80mm이상 일수 · 일강수량 80mm이상인 날의 평균 · 일강수량 80mm이상인 날의 최고값 · 일최대강수량(mm) · 5일 최대강수량(mm) · 강수강도(연간총강수량/총강수일수) · 극한 습윤일(일강수량이 기준기간*의 일강수량 99% 이상인 날, 날의 연간 총 강수량) · 연강수량, 여름철강수량 · 강수강도변화 · 여름철 강수량 · 상대습도 	<ul style="list-style-type: none"> · ③,(b),(d),(e) · ③,(a) · ③,(a) · ①,③,(a),(b),(d),(e) · ① · ①,(b),(d),(e) · ① · (e) · (d),(e) · (d),(e) · (d),(e)
	민감도	<ul style="list-style-type: none"> · 총인구, 인구밀도 · 독거노인비율(%) · 홍수취약지역(홍수범람구역/전체면적, 하천부지점용면적/전체면적) · 5m이하 저지대 면적 · 5m이하 저지대 가구 · 경사도, 경사의 길이, 경사의 위치, 사면의 형태 · 토심, 토양, 임상 · 산불발생여부 · 경사지로부터 마을까지의 거리, 문화재보호지역 유무 · 최근 10년간 홍수 피해액/인구 · 제방사용면적/국토이용면적(%) · 불투수면 비율 · 평균고도 · 지역 평균 경사도(deg) 	<ul style="list-style-type: none"> · (d),(e) · (a) · (b) · ③ · ③ · (d),(e) · (d),(e) · (d),(e) · (d) · (d),(e) · ③,(a) · (d),(e) · (d),(e) · ③
가뭄	노출	<ul style="list-style-type: none"> · 연속 무강수일수 평균(일) · 연속 무강수일수 최대(일) · 겨울, 봄 강수량, 강수일수 · 연강수량(mm) · 일강수량 1 mm 이상 일수 · 연 맑은날의 수 · 토양수 저장능력 · 태양복사에너지 · 표준화된 강수지수 	<ul style="list-style-type: none"> · (b),(c),(d),(e) · ①,③,(a),(b),(c),(d),(e) · (d),(e) · (c) · (c) · (j) · (k) · (k) · (j)
가뭄	민감도	<ul style="list-style-type: none"> · 총인구, 인구밀도 · 깨끗한 물에 접근할 수 없는 인구수 · 1인당 지하수 함양, 1인당 수자원량 · 수자원 재이용율, 물사용량 · 지하수, 하천수 이용량 · 공업용수, 농업용수, 생활용수 · 상수도인구(%) · 하수도보급률(%) · 상수도 급수량(1일1인급수량(L)) · 저수율(%) (1월-12월, 3월-10월, 4월-6월 저수율 평균) · 단위면적 당 저수용량 · 가뭄취약지역 비율(경작지면적/전체면적) · 식생분포, 수분함량, 지하수위, 토양 · 국토면적당 산림축적(km³/km²) · 농경지 면적 · 단위면적당 용수 수요량(톤/km²) · 농부비율 · 관개수로 존재여부 · 75세 이상 노인, 6세 미만 어린이 비율 · 지자체 지하관정의 수 · 지표수 공급수원 존재 여부 · 경사 · 토지이용 · 동물농장의 수 · 표준화된 식생지수 	<ul style="list-style-type: none"> · (d),(e) · (h) · (i) · (h) · (d),(e) · (d),(e) · ③,(a),(d),(e) · ③,(a) · ③,(a) · ③,(a) · (d),(e) · (b) · (d),(e) · (d) · (d),(e) · (c) · (j) · (j),(k) · (j) · (j) · (j) · (k) · (k) · (j) · (j)

Table 2. Continued

재해	구분	지표(요인)	출처
폭염	노출	· 일최고기온 33°C 이상 일수 · 일최고기온 33°C 이상인 날의 평균, 최고값 · 일최저기온 25°C 이상 일수 · 일최저기온 25°C 이상인 날의 평균, 최고값 · 열파지속지수(일최고기온이 평년 일평균 대비 5°C 초과한 날이 5일 초과하여 지속되는 기간의 최대값) · 일열파지수가 연속 40.5 이상 일수 최대(일) · 일최고기온 · 상대습도, 체감온도, 불쾌지수 · 강수량	· ③,(a),(b) · ③,(a) · ①,③,(a),(b) · ③,(a) · (b) · ③ · ③,(d),(e) · (d),(e) · (d),(e)
	민감도	· 독거노인비율(%) · 총사망자수 · 열사병발생률 · 호흡기 및 심혈관계 질병발생률	· (a) · (d),(e) · (d),(e) · (d),(e)
폭설	노출	· 적설량	· ③
강풍	노출	· 최대풍속 14m/s 이상 일수	· ③
해수면 상승	노출	· 해수면상승속도(mm/yr), 해수면상승률, 해수면 변화 · 평균조석 · 연안수온변화 · 평균 파동	· ③,(b),(f),(g) · (f),(g) · (e) · (f)
	민감도	· 해수면상승으로 홍수위험이 있는 인구수 · 해안선 100km 내 거주인구(%) · 인구밀도 · 지형 · 침식률 · 연안경사 · 해안선길이(m) · 연안침수 취약지역 비율(표고 1m 이하 면적/전체 면적) · 제방사용면적/국토이용면적(%) · 연안표고	· (h) · (i) · (i) · (f) · (f) · (f) · (a),(i) · (b) · (a) · (g)

① 기후극한지수(기상청).

③ 국립환경과학원 환경부. 2010. GIS 기반 기후변화 적응 도구.

(a) 유가영 외. 2008. 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안 연구. 한국환경정책·평가연구원.

(b) 고재경. 2009. 경기도 기후변화 취약성 평가 연구. 경기개발연구원.

(c) 한화진 외. 2007. 기후변화 영향 평가 및 적응 시스템 구축(III). 한국환경정책·평가연구원.

(d) 이동근 외. 2011. 기후변화 취약성 평가 표준화 방법론 개발.

(e) (사)한국기후변화학회. 2011. 지자체 중심 기후변화 부문별 취약성 평가 연구.

(f) 미국 USGS 개발 CVI 산정기준/(d).

(g) IPCC 표준 방법론(Bucket_fill Method) (1990)/(d).

(h) Moss *et al.*, 2001. "Vulnerability to Climate Change: A Quantitative Approach". Prepared for the US Department of Energy.(i) Brooks *et al.*, 2005. "The Determinants of Vulnerability and Adaptive Capacity at the National Level and the Implications for Adaptation". Global Environmental Change, 15(2), pp.151-153.

(j) Novi Sad. 2010. "Vulnerability Assessment to Droughts for the Province of Vojvodina". Serbia.

(k) DMCESEE. 2010. "Assessing and Mapping Drought Vulnerability in Agricultural Systems-A case Study for Slovenia".

위한 이상적인 '기후노출 및 도시민감도 2차 분석지표'를 도출하였다.

현재 사용되고 있는 지표와 국내·외 기후변화 재해 취약성 분석 관련 선행연구(기상청 기후극한지수, 국립환경과학원, 환경정책평가연구원, 경기개발연구원, 한국기후변화학회, 미국 USGS, IPCC, 미국 Department of Energy 등) 등에서 제시한 지표(Table 2)를 중심으로 검토하고, 전문가 회의를 통해 이상적인 지표를 도출하였다.

도출된 2차 분석지표에 대해 통계자료의 활용성, 계량화 가능성을 검토하고, 관련 전문가 의견수렴을 통해 최종지표(여

러도시)를 선정하였다. 여러도시에 대한 취약성 분석은 통계자료 기반의 도시간 상대평가로, 도출된 2차 분석지표 중에서 통계자료의 활용 및 계량화가 가능한 지표위주로 검토하였다. 도출된 지표의 적정성 등을 관련 전문가 의견수렴을 통해 최종 분석지표를 선정하였다.

최종지표(여러도시)와 2차 분석지표를 연계하고 위치특성을 고려하여 위치기반의 개별도시 분석지표를 도출하였다. 기후변화 재해 유형별 도시내 취약한 지역 및 대상 파악이 가능한 위치기반 지표를 중심으로 하였다. 도출된 최종지표는 Table 3과 4와 같다.

Table 3. Current Exposure and Sensitivity Analysis Indicator(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011; Sim, 2013)

구분	폭우	폭염	폭설	가뭄	강풍	해수면상승
현재 기후노출	·연평균 80mm/일 이상 강수일 수 ·연평균 시간 ·최대강수량	·연평균 일최고기온 33°C 이상 일수 ·연평균 열대야 (일최저기온 25°C 이상) 일수	·연평균 최심신적설량 ·연평균 적설량	·연평균 일최고기온 ·연평균 최대무강수지속일 수	·연평균 일최대풍속 14m/s 이상 일수 ·연평균 순간풍속 20m/s 이상 일수	·연평균 조위상승률 ·연평균 해수온상승률
현재 도시민감도	잠재취약지역	·최근10년간 피해지역 ·방재지구 ·자연재해위험개선지구 ·산사태취약지역 (산사태위험지역) ·주요 하천변 저지대 (계획홍수위보다 낮은 지역) ·풍수해저감종합 계획*의 위험지구	·최근10년간 피해지역 ·도시고온지역	·최근10년간 피해지역 ·광역 및 지방상수도 미급수지역	·최근10년간 피해지역 ·해안변 500m 지역	·최근10년간 피해지역 ·해안변 10m (EL) 이하 저지대지역
	시민**	·집계구 내 65세 이상 노인 및 5세 미만 어린이 인구수	·집계구 내 65세 이상 노인 및 5세 미만 어린이 인구수	·광역 및 지방상수도 미급수인구수	·집계구 내 65세 이상 노인 및 5세 미만 어린이 인구수	·집계구 내 65세 이상 노인 및 5세 미만 어린이 인구수
도시취약구성요소	도로	·집계구 내 도로 ·지하도로	·집계구 내 도로	·집계구 내 도로 ·고가도로 및 입체 교차로	-	·집계구 내 도로
	철도	·집계구 내 철도	-	·집계구 내 철도	-	-
	항만	-	-	-	·집계구 내 항만	·집계구 내 항만
	공항	-	-	·집계구 내 공항	·집계구 내 공항	-
	수도공급설비	·집계구 내 수도공급설비	-	-	-	-
	전기공급설비	-	-	-	·집계구 내 전기공급설비	-
	가스공급설비	-	-	-	-	-
	열공급 설비	-	-	-	-	-
	방송통신시설	-	-	-	·집계구 내 방송통신시설	-
	공동구	·집계구 내 공동구	-	-	-	-
	유류저장 및 송유설비	·집계구 내 유류저장 및 송유설비	-	-	-	-
	하수도	·집계구 내 하수도	-	-	-	-
	수질오염방지시설	·집계구 내 수질오염방지시설	-	-	-	·집계구 내 수질오염방지시설
건축물	·집계구 내 단독주택, 반지하주택	·보육시설 ·요양시설 ·경로당 ·장애인보호 시설 ·노숙자쉼터	·노후단독 건축물 ·비닐하우스 ·축사	-	·고층아파트 ·대형건축물 ·대형광고물	·집계구 내 단독주택, 반지하주택

주1) 풍수해저감종합계획이 수립되지 않은 지자체는 제외

주2) 시민의 어린이는 6세 미만의 미취학아동을 의미하나, 자료구축을 위해 5세 미만 어린이 인구수 지표로 대응

Table 4. Future Exposure and Sensitivity Analysis Indicator (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011; Sim, 2013)

구분	폭우	폭염	폭설	가뭄	강풍	해수면 상승
미래 기후 노출	· 연평균 80mm/일 이상 강수 일수 · 연평균 시간 최대 강수량	· 연평균 일최고기온 33°C 이상 일수 · 연평균 열대야 (일최저 기온 25°C 이상) 일수	· 연평균 최심신적설 량 · 연평균 적설량	· 연평균 일최고기온 · 연평균 최대 무강수 지속 일수	· 연평균 일최대풍속 14m/s 이상 일수	· 연평균 해수온상 승률
미래 도시 민감도	· 최근 10년간시가 화지역 · 최근 10년간인구 증가 지역 · 도시 개발 사업 진 행/ 예정 지구	· 최근 10년간시가화지역 · 최근 10년간인구 증가 지역 · 도시 개발 사업 진행/ 예 정 지구	· 최근 10년간시가화 지역 · 최근 10년간인구 증 가 지역 · 도시 개발 사업 진행 / 예정 지구	· 최근 10년간시가화 지역 · 최근 10년간인구 증 가 지역 · 도시 개발 사업 진행 / 예정 지구	· 최근 10년간시가화 지역 · 최근 10년간인구 증가 지역 · 도시 개발 사업 진 행/ 예정 지구	· 최근 10년간시가 화지역 · 최근 10년간인구 증가 지역 · 도시 개발 사업 진행/ 예정 지구

4.2 현재 및 미래 재해 취약성 분석지표

현재 기후노출 지표는 기후변화 재해에 지배적인 영향을 주는 기후요소를 도출하였다. 기상관측소별 과거부터 현재까지의 장기간 기상관측자료(기온, 강수량 등) DB를 구축한다 (Table 3).

현재 도시민감도 지표는 잠재취약지역, 도시취약구성요소로 구성되어 있으며, 재해유형별 취약한 지역 및 대상 파악이 가능한 위치기반의 지표 위주로 선정하였다. 잠재취약지역 지표는 재해 유형별 최근 10년간 피해발생지역, 법정 재해 취약지구(자연재해위험개선지구, 방재지구, 산사태취약지역, 붕괴위험지역 등)와 같이 물리적으로 재해 피해 발생 가능성이 높은 지역의 위치(도면), 면적 자료 사용한다. 도시취약구성요소는 시민, 도시기반시설, 건축물 등 도시의 구조적인 재해 취약특성을 나타내는 지표로 구성한다. 시민 분석지표는 집계구 내 기후변화에 상대적으로 취약한 재해약자(65세 이상 노인 및 5세 미만 어린이) 인구수 자료를 사용한다. 도시기반시설 분석지표는 집계구 내 재해유형별로 선정된 취약 기반시설(도로, 철도 등)의 위치(도면), 면적, 연장 등의 자료 사용한다. 건축물 분석지표는 재해유형별로 선정된 취약 건축물(단독주택, 반지하주택 등)의 위치(도면), 면적 자료 사용한다 (Table 3).

미래 기후노출 지표는 기후변화 재해에 지배적인 영향을 주는 기후요소 중에서 기후변화 시나리오를 활용하여 구축이 가능한 지표를 도출한다. 대상지역 및 주변지역의 기후변화 시나리오(RCP, SRES 등)를 활용한 미래의 기상예측자료(기온, 강수량 등) DB를 구축한다. 기후변화 시나리오를 활용한 미래의 기상예측은 도시계획 수립주기를 고려하여 향후 약 20~30년 자료를 구축한다(Table 4).

미래 도시민감도 지표는 미래 인구, 도시개발 전망이 가능한 지표를 선정한다. 최근 10년간 시가화지역은 토지피복 분류가 시가화 · 건조지역으로 변경된 지역의 위치(도면), 면적 자료를 사용한다. 최근 10년간 인구증가지역은 지역별로 인구가 증가한 지역의 위치(도면), 면적 자료를 사용한다. 도시개발사업 진행 · 예정지구는 현재 진행 중인 도시개발 현황 및 향후 도시개발사업 계획(도시 및 주거환경정비기본계획 등)에 대한 위치(도면), 면적 자료를 사용한다(Table 4).

5. 결 론

국토교통부의 도시계획 수립 · 변경시 재해 취약성 분석의 도입으로 재해예방형 도시계획체계의 기반이 마련되었으나, 제도 초기인점을 감안하고 예산확보 등 아직 준비가 부족한 지자체를 위하여 본격시행에 앞서 완충기간을 두고 일시적인 운영방안 마련이 필요하다. 먼저, 재해 취약성 분석의 당초 취지를 훼손하지 않는 범위 내에서 간략한 분석방법 및 절차, 품셈의 제시가 필요하다.

한편, 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」의 개정을 통해 도시계획수립지침에 규정된 재해 취약성 분석 제도를 법률에 규정함으로써 위상을 제고하고, 기술지원체계 등을 마련해야 한다. 도시계획 수립시마다 분석하는 것 대신에 도시기본계획의 기초조사의 하나로서, 매 5년 단위로 분석을 실시하게 한다. 분석결과는 도시기본계획은 물론 도시관리계획 수립 시 반영토록 한다. 이와 같이 별도의 5년 단위 재해 취약성 분석은 도시차원의 일관성 있는 재해 환경 변화를 고려할 수 있으며, 도시계획 수립자의 업무부담을 경감시킬 수 있다. 한편, 시행령 개정을 통해 지자체의 재해 취약성 분석기술을 지원하고, 컨설팅 체계를 마련하여 효과적인 재해저감 도시계획 수립을 지원해야 한다.

또한, 재해 취약성 분석을 관련 법률, 제도와 연계하도록 한다. 재해 취약성 분석 결과를 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 의한 방재지구와 연계하여 재해취약지역을 방재지구로 지정하면 「도시 및 주거환경정비법」의 정비계획 수립대상지역으로 우선 지정하여 주거환경정비사업, 주택재개발사업 등을 추진함으로써 도시정비를 통해 재해위험을 해소하도록 할 수 있다.

기후변화 영향에 따라 대형화, 다양화 되고 있는 최근 재해추세를 볼 때, 재해 취약성 분석을 통한 도시계획은 다양한 재해에 통합적으로 대응하고, 대형화된 재해 위험을 분산하여 재해에 안전한 도시를 조성하는데 이바지할 것으로 기대한다.

References

Blakely (2007) Urban Planning for Climate Change. *Lincoln Institute of Land Policy Working Paper*, pp.1-25.

- CSIRO et al. (2007) *Infrastructure and climate change risk assessment for Victoria*.
- Go, J. (2009) *Gyeonggi-do Climate Change Vulnerability Evaluation Study*. Gyeonggi Research Institute.
- IPCC. Working Group II (2007) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, The 4th Assessment Report.
- Lissner, T. Holsten, A. Walther, C., and Kropp, J.P. (2011) *A Sectoral and Standardised Vulnerability Assessment: The example of heatwave impact on human health*. Potsdam Institute for Climate Impact Research.
- Maryland Department of Natural Resources & U.S. Geological Survey. (2006).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013) *Extensive Urban Planning Guideline, Urban Planning Guideline, Urban Management Planning Guideline*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011) *Climate Change Adapting City Construction Plan Study(First Year)*.
- Myung, S. et al. (2009) *Urban Infrastructure Vulnerability Analysis and Responding Plan for Strengthening Climate Change Adaptation Capacity*. Korea Environment Institute.
- National Institute of Environmental Research, Ministry of Environment Press. (2010) *GIS based Climate Change Adaptation Tool*.
- Sim, O. (2013) *A Study on Improving the Methods to Analyze Urban Disaster Vulnerability due to Climate Change*. Korea Research Institute for Human Settlements.
- Sim, O. et al. (2010) *Resilient Urban Areas Against Climate Change : A Synergistic Approach to Urban Hazard Mitigation(I)*. Korea Research Institute for Human Settlements.
- The Sheltair Group (2003) *Climate Change Impacts and Adaptation Strategies for Urban Systems in Greater Vancouver*.
- Yoo, G. et al. (2008) *Climate Change Vulnerability Evaluation Indicators Development and Introducing Plan*. Korea Environment Institute.

© Received September 11, 2013

© Revised September 11, 2013

© Accepted October 25, 2013