

퍼지모형과 GIS를 활용한 기후변화 홍수취약성 평가 - 서울시 사례를 중심으로 -

강정은¹ · 이명진^{1*}

Assessment of Flood Vulnerability to Climate Change Using Fuzzy Model and GIS in Seoul

Jung-Eun KANG¹ · Moungh-Jin LEE^{1*}

요 약

본 연구는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제시한 기후변화 취약성 개념을 서울시에 적용, 적정 홍수 취약성 지표 산정 및 퍼지모형을 활용하여 기후변화 분야 중 홍수취약성을 평가하고 GIS를 이용하여 취약성도를 작성하였다. 이를 위해 선행연구를 기반으로 지표를 도출하였다. 도출된 지표는 기후노출(일 최대 강수량, 일강수량 80mm 이상인 날 수), 민감도(침수지역, 경사, 지질, 고도, 하천으로부터의 거리, 지형, 토양 및 불투수면적) 및 적응능력(홍수조절능력, 자연녹지, 공원녹지) 등의 자료이며, 이를 GIS 기반의 공간데이터베이스로 구축하였다. 구축된 지표값들을 통합하기 위한 방법으로 퍼지모형을 활용했으며, 퍼지소속값 결정을 위해서는 빈도비를 활용하였다. 2010년 침수 발생 자료를 활용하여 항목들간의 상관관계 및 퍼지소속값을 산정하였으며, 2011년 침수 발생 지역으로 작성된 취약성도를 검증하였다. 분석결과 서울 지역 홍수피해에 크게 영향을 미치는 지표는 일강수량이 80mm이상인 날수, 하천과의 거리, 불투수층으로 나타났다. 서울의 경우, 최대강수량이 269mm 이상일 때 적응능력(유수지, 녹지)이 부족하고, 고도가 16~20m 정도이며 하천에서 50m이내에 인접한 지역, 농업용지에서 홍수취약성이 매우 높은 것으로 나타났다. 지역적으로 영등포구, 용산구, 마포구 등 한강 본류의 양안에 위치한 구들이 비교적 취약지역을 많이 포함하고 있는 것으로 나타났다. 본 연구는 기후변화 취약성 평가의 개념을 적용하고, 방법론으로 퍼지모형을 활용함으로써 기존의 취약성 평가기법을 개선하였으며 평가결과는 홍수예방정책에 대한 우선지역 선정과 의사결정의 주요한 근거로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 퍼지모형, 지리정보시스템, 홍수 취약성 평가, 기후변화

2012년 7월 14일 접수 Received on July 14, 2012 / 2012년 9월 7일 수정 Revised on September 7, 2012 / 2012년 9월 11일 심사완료 Accepted on September 11, 2012

1 한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터 Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute

* Corresponding Author E-mail : leemj@kei.re.kr

ABSTRACT

The goal of this study is to apply the IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) concept of vulnerability to climate change and verify the use of a combination of vulnerability index and fuzzy logic to flood vulnerability analysis and mapping in Seoul using GIS. In order to achieve this goal, this study identified indicators influencing floods based on literature review. We include indicators of exposure to climate(daily max rainfall, days of 80mm over), sensitivity(slope, geological, average DEM, impermeability layer, topography and drainage), and adaptive capacity(retarding basin and green-infra). Also, this research used fuzzy model for aggregating indicators, and utilized frequency ratio to decide fuzzy membership values. Results show that the number of days of precipitation above 80mm, the distance from river and impervious surface have comparatively strong influence on flood damage. Furthermore, when precipitation is over 269mm, areas with scarce flood mitigation capacities, industrial land use, elevation of 16~20m, within 50m distance from rivers are quite vulnerable to floods. Yeongdeungpo-gu, Yongsan-gu, Mapo-gu include comparatively large vulnerable areas. This study improved previous flood vulnerability assessment methodology by adopting fuzzy model. Also, vulnerability map provides meaningful information for decision makers regarding priority areas for implementing flood mitigation policies.

KEYWORDS : *Fuzzy Model, Geographic Information System (GIS), Flood Vulnerability Assessment, Climate Change*

서 론

인류 문명의 발전에 따른 온실가스 증가와 이로 인해 발생하는 지구 온난화 현상으로 전 지구 평균기온은 지난 100년 동안 꾸준히 상승하였고 현재는 상승속도가 보다 가속화되고 있다. 최근 기상청(2011)에서는 기존 시나리오(SRES)보다 현실적이고 상세한 신시나리오(RCP 8.5)를 활용하여 미래 기후변화를 전망하였으며 그 결과는 이전의 IPCC(2007) 전망보다 기후변화가 훨씬 악화될 것으로 예상했다. 전 지구적으로 2050년까지 기온은 2.3℃ 상승해서 평균기온은 16.4℃에 이를 전망이다. 전 지구 평균 강수량은 2050년까지 3.2% 증가할 것으로 전망된다. 우리나라는 전 지구 평균보다 기온상승폭이 커서 지난 100년간(+0.8℃) 증가량보다 약 3배(+3.2℃)

상승할 것으로 전망된다(국립기상연구소, 2011). 이와 함께 강수량도 증가할 것으로 예상되며 특히 지역별 격차는 더욱 심화될 것으로 예상된다. 우리나라의 집중호우 일수는 2010년 약 2.7에 비해 2020년에는 3.6일, 2050년에는 4.5일로 증가될 것으로 예상된다. 특히 남해안과 서울·경기지역의 강수량 증가폭은 더욱 클 것으로 전망되고 있다(국립기상연구소, 2011).

많은 사람들이 모여서 경제활동을 하면서 생활하는 도시(대한국토·도시계획학회, 2009)는 전세계 온실가스 배출량의 80%를 배출하여 기후변화의 원인을 제공하는 주요 장소(국토연구원, 2010)인 동시에 기후변화의 영향을 가장 크게 받는 공간이기도 하다. 인구집중과 개발밀도가 상당히 높은 도시지역은 폭우, 폭설, 가뭄 등의 이상기후 증가와 열섬, 열대야, 해수면 상승 등 다양한 기후변화의

영향으로 인명 및 재산피해 뿐 아니라 도시민의 건강, 경제, 생태계까지 다양한 피해를 경험하고 있다.

특히, 기후변화로 인한 집중강우와 태풍, 홍수 등은 수문학적 변화를 가져오고 기존 도시내 배수시설, 상하수시설의 용량에 압력을 가하게 된다. 또한 주차장, 건물, 도로 등의 불투수층의 급격한 증가로 인해 땅속으로 우수가 흡수되어 저장될 수 있는 능력이 상실되어 표면유출이 크게 증가하거나 유출이 하천에 도달하는 시간이 짧아져 홍수발생가능성이 크게 증가하게 된다. 불투수층에서의 유출수의 양과 흐름 속도의 증가는 강 하류나 취약지에 있는 건축물, 제방 등의 침식을 증가시키고 이들이 옮기는 엄청난 양의 폐기물은 각종 시설물, 기반시설에 영향을 미쳐 2차적인 피해를 야기할 수 있다(강정은 등, 2011). 강우는 도시의 오염물질을 포함하여 수질의 문제도 야기하게 된다. 도시홍수는 인간의 생명과 재산피해를 초래할 뿐 아니라 교통마비, 물공급 및 처리시설의 손상, 수인성 전염병의 확산 등의 문제를 가져온다.

60·70년대 급격한 산업화와 도시화를 거쳐 발전된 우리 도시들은 성장위주로 개발되어 안전과 방재의 개념이 도시개발에 충분히 반영되지 못해 재난·재해에 구조적으로 취약한 점이 많다(김현주, 2010). 특히, 최근의 기후변화 현상과 연계된 집중강우의 빈도·강도 증가로 도심지역 폭우재해가 대형화, 일상화되고 있으므로 이러한 도시홍수, 폭우에 대한 대처가 시급한 실정이다.

도시홍수를 예방하기 위해서는 녹지를 비롯한 투수면적을 확보하고, 홍수에 취약한 지역의 개발을 제한하는 비구조적 대책부터 우수·하수관거 증설, 저류시설, 펌프장 확보 등과 같은 구조적인 대책까지 다양한 정책들이 활용될 수 있다. 이러한 적응대책들에 대한 효과적인 의사결정을 위해서는 어떠한 곳이 피해가 많이 일어나고, 어디가 취약한지에 대한 정보가 반드시 필요하다. 이러한 취약성 평가 결과는 한정된 예산을 가장 효과적으로

활용할 수 있도록 정책의 결정과 우선지역 선정의 근거로 활용될 수 있다.

본 연구는 IPCC 4차 보고서에서 제시된 기후변화 취약성 개념에 기반을 두고 최근 수행된 취약성 분석에 대한 선행연구를 면밀히 살펴보고 기존의 국내 홍수취약성 분석법을 개선한 지표와 퍼지모형(fuzzy model)을 결합한 취약성 평가기법을 활용하여 사례지역인 서울시에 대한 취약성 평가를 수행하고 이를 검증하고자 한다.

이를 위해 연구는 다음의 과정을 거친다. 우선 선행연구 분석을 통해 기존의 취약성 분석의 개념과 취약성 분석 연구들을 살펴보고 본 연구에서 사용할 취약성 평가 방법론을 결정한다. 앞에서 언급되었듯이 본 연구는 지표와 퍼지모형을 결합한 취약성 분석 방법론을 제안하였다. 다음은 홍수 취약성 평가에 관한 선행연구를 살펴보고 취약성 지표를 도출한다. 사례지역인 서울시에 적용하기 위해 취약성 평가 지표에 대한 자료를 수집하고 GIS 분석을 위한 공간정보화 과정을 거친다. 확정된 지표에 대해 2010년 자료를 기반으로 GIS를 활용한 퍼지모형 분석을 실행하고 취약성도를 작성한다. 작성된 홍수 취약성도의 검증을 위해 2011년 침수지역 자료를 활용하여 검증을 실시하였다.

연구 이론

1. 기후변화 취약성 평가

기후변화 취약성(vulnerability)은 기후변동과 극한 사상을 포함한 기후변화의 역효과에 의한 시스템이 쉽게 피해를 입거나 대응하지 못하는 정도(IPCC, 2007)를 의미하며 취약성은 한 시스템이 기후변화에 노출(exposure)되어 있는 정도와 그 시스템의 민감도(sensitivity), 적응역량(adaptive capacity)의 함수이다(IPCC, 2007). 민감도는 기후변동이나 변화로 인해 한 시스템이 해롭거나 이로인한 영향을 받는 정도로 정의될 수 있으며

노출은 기후변화에 민감한 시스템의 요소가 기후와 접촉되어 있는 정도를 의미한다. 적응 능력은 기후변화(기후변동과 극한 상황 포함)에 적응, 잠재적인 위험을 완화, 기회로 활용할 수 있거나 결과에 대처할 수 있는 시스템의 능력을 포함하는 개념이다(IPCC, 2007).

기후변화 취약성 평가는 기후변화 영향에 대한 생물·물리학적 접근을 강조한 하향식 접근법과 기후변화에 대응하기 위한 적응능력이라는 사회·경제학적 접근을 강조한 상향식 접근법으로 크게 구분될 수 있다(Dessai and Hulme, 2003). 하향식 접근법은 주로 기후시나리오와 기후모델을 기반으로 기후변화에 대한 영향을 분석하여 물리적 취약성을 평가하는 모델링 방법으로 장기간의 기후변화 영향을 평가하거나 기후변화 영향의 생물리학적 측면과 특정 유형의 동적인 상호관계를 살펴보는 데는 유리하다. 그러나 인간의 상호작용과 지역의 적응능력을 반영하거나 지역단위의 사회, 경제, 정치, 환경적 여건을 반영하여 실

질적인 정책 수립에 활용하기에는 한계가 있다(Dessai and Hulme, 2003; 조경두와 장훈, 2010).

이에 반해 상향식 접근법은 지역에 기반을 둔 여러 지표들을 바탕으로 그 시스템의 적응능력을 평가하는 방법으로 지역특성을 반영할 수 있으며 이를 통해 취약성을 파악하는 방법으로 표현될 수 있다. 이러한 특성들 때문에 지표를 활용한 취약성 평가는 도시단위 및 지역단위 분석에 적합하며 정책적 활용도가 높은 편이라 가장 많이 활용되고 있는 방법이다(EU Environment Agency, 2010). 대표적으로 유가영과 김인에(2008)는 과거 자료를 기반으로 우리나라의 16개 광역자치단체의 취약성을 분석한 바 있으며 고재경과 김희선(2009)은 경기도 31개 시군을 대상으로 기후변화 취약성 지표와 지수를 산정하였다. 2010년 수립된 「국가기후변화적응대책(2011~2015)」의 광역지자체별 세부시행계획 작성을 위해 국립환경과학원과 환경부(2012)에서 제공한 기후

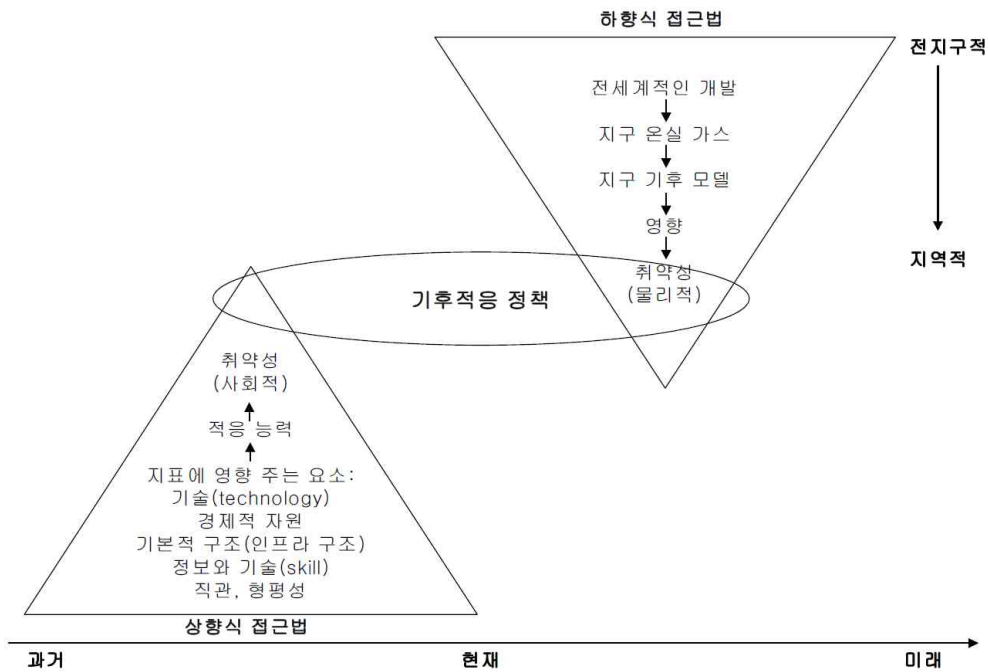


FIGURE 1. A climate change and vulnerability assessment framework

변화 취약성 평가는 건강, 농업, 재해 등 10개 부문에 대해 시군구별 취약성 평가를 실시하였다. 위의 연구들은 취약성 평가 지표를 구성함에 있어 IPCC의 취약성 개념에 준하여 취약성 지표를 노출, 민감도, 적응역량의 함수로 보고 부문별 지표를 도출하였다. 지표의 통합을 위해 유가영과 김인애(2008)의 연구는 지표간 가중치를 부여하지 않고 합을 계산하였고 국립환경과학원과 환경부(2012)의 지자체별 취약성 평가는 전문가 AHP 조사를 기반으로 지표별 가중치를 부여하여 최종 지수를 도출하고 있다. 현재까지 지표분석의 한계점은 이론적 기반의 부족과 지표 도출의 투명성 문제, 자료의 가용성 등과 함께 지표를 종합(aggregation)해서 취약성 지수로 만드는 방법론이 지적되고 있다(EU Environment Agency, 2010).

최근 유럽(Kropp *et al.*, 2009; EU Environmental Agency, 2010; Lissner *et al.*, 2011)을 중심으로 지표법의 유용성에 대해서는 인정하나 지표법을 활용함에 있어 기존 지표의 표준화, 통합방법에 수학적 근거(mathematical foundations)가 미약함을 지적하고 방법론의 개선을 위해 퍼지모형의 활용을 제안하고 있다. 특히 Lissner 등(2011)은 기후변화와 같은 복잡하고 불확실성이 높은 문제 해결을 위해서는 반정량적 개요 중심의 접근법(semi-quantitative synoptic approach)인 퍼지 모형의 유용성을 주장하고 GIS 기술과 Fuzzy 모형을 활용하여 독일 North Rhine-Westphalia 주의 396개 지자체에 대한 폭염 취약성을 평가하였다. 이 연구에서는 정성적인 특성들을 정량화하기 위해 지표가 도출되었고 퍼지알고리즘이 불확실성과 문맥중심의 불명확성을 제거하기 위해 사용되었다. 퍼지모형을 사용하면 시나리오 뿐 아니라 데이터에서 나오는 불확실성을 고려할 수 있으며 기후변화의 영향을 정의하는 원인과 결과의 관계에 대해 보다 명확하게 나타낼 수 있다.

기후변화 취약성을 정량적으로 평가하는데 통일되고 합의된 방법론이 있는 것은 아니다.

그러나 지표의 표준화, 통합방법은 이해하기가 쉽고 과학적인 지식을 기반으로 결정될 필요가 있으며 최근 유럽을 중심으로 제안되고 있는 퍼지모형의 활용은 주목할 만하다.

따라서 본 연구는 지역단위의 평가에 유용하고 정책적 활용도가 높은 지표를 활용한 취약성 평가를 수행하며, 지표를 표준화하고 통합하는 방법으로 최근 유럽을 중심으로 그 활용이 강조되고 있으나 국내에서는 취약성 평가를 위해 활용된 적이 없는 퍼지모형을 활용하기로 결정하였다.

2. Fuzzy operator model

퍼지 이론은 현실세계에서 발생하는 다양한 분야의 모호성, 많은 불확실성 문제 등을 수학적, 정량적으로 표현하고자 하는 노력의 일환으로 제안되었다. 퍼지 개념은 1965년 Zadeh에 의하여 처음 소개되고 정립되었으며, 전통적인 집합이론을 재정립한 형태이다. 기존의 집합개념이 집합에 속하거나 속하지 않는 2가지 개념을 0과 1로 있다고 보았다면, 퍼지이론은 기존의 개념에서 간과되는 정보의 가치를 평가하고 충분히 고려하는 방법으로 이분법적 기준이 가지는 임계치의 불확실성(uncertainty)과 모호성(ambiguity)을 좀 더 사실적이면서 인간적으로 평가할 수 있다(임은선, 2009). 퍼지관계에서는 소속정도(degree of membership)에 따라 0과 1사이의 정수 또는 실수로 표현된다(Harris *et al.*, 2002).

퍼지 소속 값들을 가진 레이어 자료들은 퍼지 조합 함수(fuzzy combination operator)에 의해 하나의 퍼지 소속 값으로 통합될 수 있으며, 지구과학자료들의 통합을 위해 fuzzy and, fuzzy or, fuzzy algebraic sum, fuzzy algebraic product 및 fuzzy gamma operator 등 5개 퍼지 조합 함수들이 유효한 것으로 알려져 있다(Bonham-Center, 1994). Bonham-Center(1994)는 다수의 격자 형태 지도도 레이어들에 적용 가능하도록 5개 퍼지

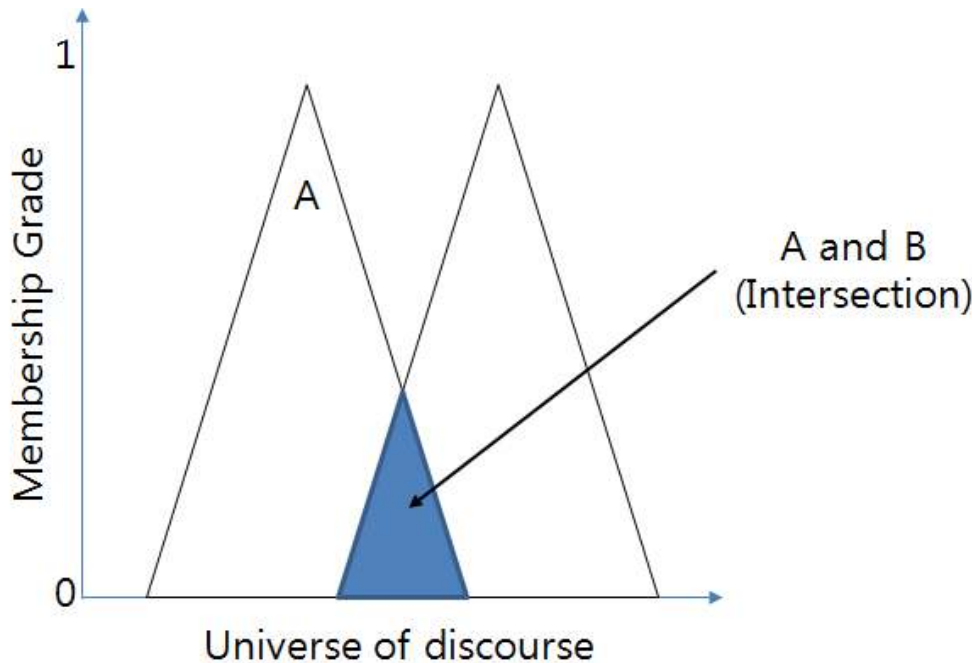


FIGURE 2. Fuzzy intersection(And)

조합 함수를 수학적으로 표현한 바 있다. 이 중 Harris *et al.*(2002)은 5개의 퍼지 조합 중 가장 일반적 활용성이 높은 “fuzzy intersections(and)”와 “fuzzy unions(or)” 함수에 대한 논의를 수행함으로써 fuzzy and operator와 fuzzy or operator에 대해 정리하였으며, 본 연구에서는 이중 “fuzzy and”를 적용하여 취약성 지도를 작성하였다.

$X \times Y$ 공간에 존재하는 두 개의 퍼지 집합 A와 B 사이의 fuzzy intersection은 “A AND B”로 표현될 수 있다. 다양한 fuzzy intersection operator 중에서 “MIN” 함수와 fuzzy algebraic product가 가장 일반적으로 이용되고 있다. “MIN” 함수는 fuzzy and operator와 동일하며, 식 (1) 및 그림 2와 같이 표현된다.

$$\mu = \text{MIN}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (1)$$

여기서 μ 는 하나의 값으로 통합된 특정 격

자에서의 퍼지 소속 값이며, μ_A 는 지도 레이어 A의 해당 격자에서의 퍼지 소속 값, μ_B 는 레이어 B의 해당 격자에서의 퍼지 소속 값이다. 이 함수는 결과 지도 데이터의 특성이 각 위치에서 퍼지 소속값의 최소값에 의해 결정되도록 한다.

3. 홍수취약성 지표 도출

대부분의 선행연구들은 IPCC(2007) 정의를 기반으로 기후노출, 민감도, 적응능력으로 구분하여 홍수취약성 지표를 도출하였다. 기후노출 지표들은 홍수 유발과 관련된 기후변수들로 일최대강수량(배덕효와 이문환, 2010; 손민우 등, 2011; 국립환경과학원과 환경부, 2012), 일강수량이 80mm이상일 날 수(건설기술연구원, 2009; 배덕효와 이문환, 2010; 국립환경과학원과 환경부, 2012), 지면유출량(손민우 등, 2011; 국립환경과학원과 환경부, 2012), 강우강도(환경부, 2010) 등이 고려되었다. 민감도는 홍수가 발생할 수 있도록 유

TABLE 1. Flood vulnerability indicators to climate change

대분야	분야	지표
기후노출	기후	일 최대 강수량
		일강수량 80mm이상인 날수
민감도	피해경험	침수지역
		경사
		지질
	자연지형적 요소	고도
		하천으로부터의 거리
		지형
		토양
개발요소	불투수면적	
	홍수조절능력(유수지)	
적응능력	적응능력	자연녹지
		공원녹지

도하는 자연·지형적, 개발관련 변수들(경사, 고도, 하천 인접성, 토양, 불투수면적), 홍수피해가 커질 수 있는 사회·경제적 변수들(인구 밀도, 자산밀도), 피해경험(침수면적, 홍수피해액)을 포함한다(건설기술연구원, 2009; 배덕효와 이문환, 2010; 명수정, 2011; 손민우 등, 2011; 국립환경과학원과 환경부, 2012; 이명진과 강정은, 2012). 적응능력은 홍수발생과 홍수피해를 예방 및 저감할 수 있는 능력으로 지역의 전반적인 역량을 나타내는 재정자립도, 지역총생산, 공무원 수의 지표들(명수정, 2011; 국립환경과학원과 환경부, 2012)과 홍수예방을 위한 구체적인 대책들인 하천개수율, 홍수조절능력(유수지 등), 저수지, 댐시설, 공원·녹지(도시재생사업단, 2010; 명수정, 2011; 국립환경과학원과 환경부, 2012; 이명진과 강정은, 2012) 등이 포함되어 있다.

기존의 많은 선행연구들이 주로 시군구 단위로 취약성 평가를 수행하여 거시적인 차원에서 지역별 비교에 초점을 두는데 반해 본 연구는 사례지역에 대한 면밀한 공간분석을 기반으로 한 물리적 취약성 분석인 점을 감안하여 시군 단위의 데이터(예: 재정자립도, 지역총생산, 공무원 수, 홍수피해액, 인구밀도, 하천개수율 등)는 제외하고, 데이터의 유무(댐, 저수지 시설은 사례지역의 특성상 포함시키기

어려움), 분석단위, 자료의 획득 가능성을 확인하여 다음 표 1과 같이 13개의 최종 지표가 도출되었다.

연구방법

1. 연구지역

연구지역은 서울특별시 전체를 선정하였다. 지리좌표는 위도 37° 30' 30" ~ 37° 40' 00" N, 경도 126° 50' 00" ~ 127° 10' 30" E 사이에 위치한다(그림 3). 서울시는 우리나라 전체인구의 20% 이상이 살고 있는 대도시로 1970년대의 서울시 평균기온이 11.9°C이었던 데 반해 2000년대는 12.9°C로 1°C 상승했으며 1970년대 6, 7, 8월 강수량에 비해 2000년대는 약 187.9mm가 증가하는 등 다양한 기후변화를 경험하고 있다(서울시, 2011). 또한 최근 10년 동안 704억 원가량의 자연재해 피해를 경험했으며 2010년에는 200억 원, 2011년에는 300억 원 이상의 피해가 발생하여 10년 전체 피해의 대부분을 차지하고 있다(서울시, 2012). 특히, 2010년 9월 21일에는 280.5mm의 집중호우가 발생하였으며, 1시간 최대 강우량은 108mm로 서울지역 9월 관측 사상 최고의 집중호우가 발생하였다. 전체 피해는 사망자 5명, 부상자 1명의 인명피해 및 160가구가 침수되고 교통이 마비되었다. 서울

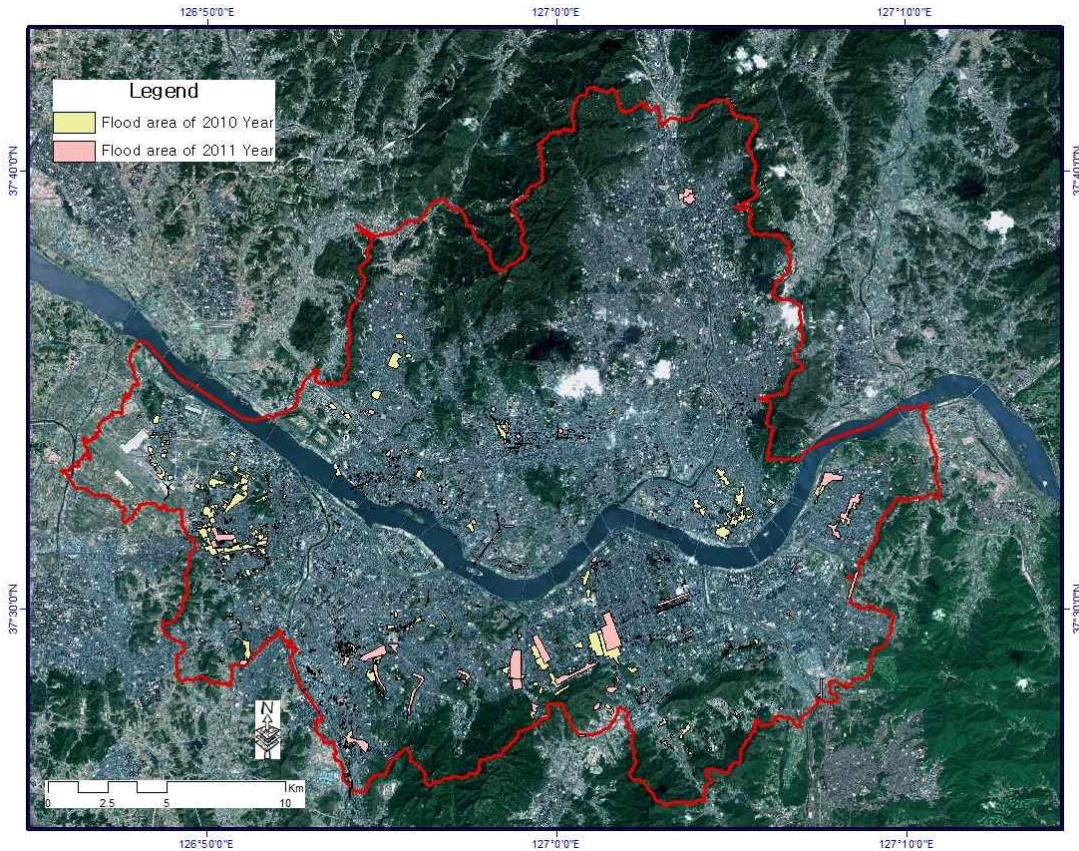


FIGURE 3. Map of study area and flooded locations

시 전역에서 2011년에도 유사한 침수피해가 발생하였다. 2011년 7월 27~29일 3일 동안 시간당 113mm의 집중호우가 발생해 강남을 중심으로 우면산 산사태와 같은 큰 피해가 발생했다.

서울과 같은 대도시는 국지적 지역 차이에 의해 지역별로 기후변화의 영향이 다르게 나타날 뿐 아니라 자연·지리적, 사회·경제적 민감도, 이미 수립된 홍수에방정책 등의 영향으로 그 피해 양상도 다르게 나타난다. 따라서 도시 전 지역에 대한 홍수 취약성을 합리적으로 평가해야하며, 취약성 평가를 기반으로 세부지역별 맞춤형 대책 마련이 절실하다고 할 수 있다.

2. 공간데이터베이스 구축 및 분석방법

선행연구를 기반으로 도출된 홍수 취약성 평가를 위해 기후노출, 민감도, 적응능력 지표에 대한 자료를 수집하여 GIS로 전환하여 공간 데이터베이스를 구축하였다(표 2, 그림 4 참조).

기존의 연구들은 홍수, 침수 피해경험을 지표로 포함시켜 과거 피해경험을 반영했지만 본 연구는 보다 직접적으로 침수피해를 반영하고 취약성 평가의 신뢰성을 높이기 위해 침수피해 경험과 지표별 항목간의 공간적 상관관계를 나타내는 빈도비를 활용하여 지표 데이터의 자료범위와 퍼지 소속값을 설정하였다(Lee, 2007; Pradhan *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2010). 빈도비 모델은 특정값의 범위내에

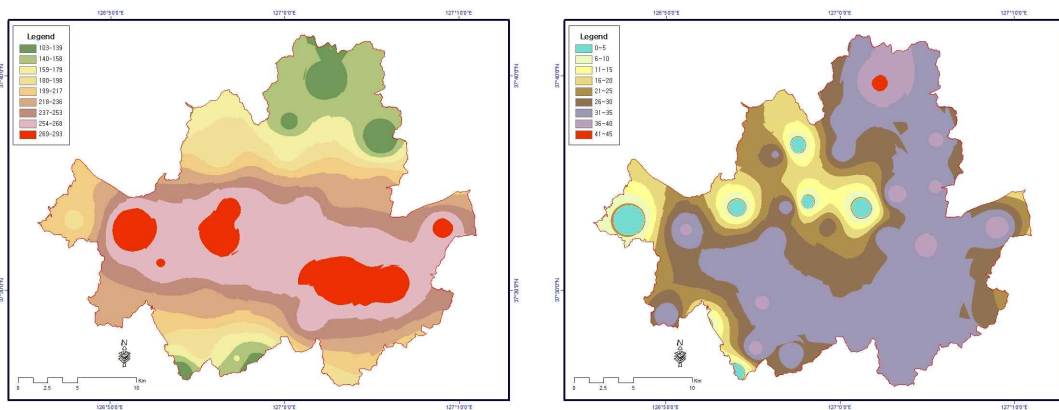
TABLE 2. Data type and scale of indicators for flood vulnerability assessment

Classification	Indicators	Data Type	Scale
홍수피해	침수지역	Polygon	1:1,000
기후노출	일 최대 강수량	Grid	1:25,000
	일 강수량 80mm 이상인 날의 수		
민감도	경사	Grid	1:25,000
	지질	Polygon	
	고도	Grid	
	하천 및 주변 10, 50 100m	Polygon	
	불투수층	Polygon	
	지형곡률 ¹⁾	Grid	
적응능력	토양 배수능력	Polygon	1:25,000
	유수지	Polygon	
	자연녹지	Polygon	
	공원녹지		

주 1 : 땅의 생김 모양이나 형세의 구부러진 정도를 의미하며, 지형이 평지, 오목 및 패인정도를 나타내며, DEM(Digital elevation model)을 바탕으로 계산한다.

서 사건발생확률을 예측하는 방법으로 주어진 지표 데이터의 어떤 등급에서 사건이 가장 많이 발생했는지에 대한 빈도비를 계산하게 된다. 빈도비 계산을 위해 지표 데이터 가운데 연속형 자료들은 원자료 값이 잘 반영되도록 적절한 등급으로 분류되었다(Lee *et al.*, 2011). 또한 하천과 같은 선형의 자료를 간격별로 등급화 하였다(Lee *et al.*, 2011). 이후 각 요인의 등급별 빈도비는 선형 퍼지 소속 함수에 의해 퍼지 소속 값으로 변환되었다.

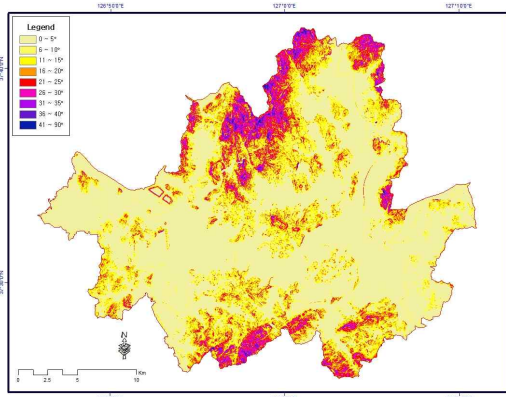
퍼지 소속 값은 퍼지 연산 함수를 통한 가중치를 계산하는 것으로 가중치의 범위는 [0, 1] 로 표준화된 가중치를 나타내게 되며, 표준화된 가중치 이상의 의미를 지니지 않는다. 그러나 일단 각 요인들의 등급별 가중치가 퍼지소속 함수로 변환되고 나면, 다양한 퍼지 조합 함수를 이용하여 모든 요인들을 쉽게 통합할 수 있다. 본 연구에서는 전술하였듯이 “fuzzy and” 방법을 적용하여 침수 취약성 평가도를 작성하였다.



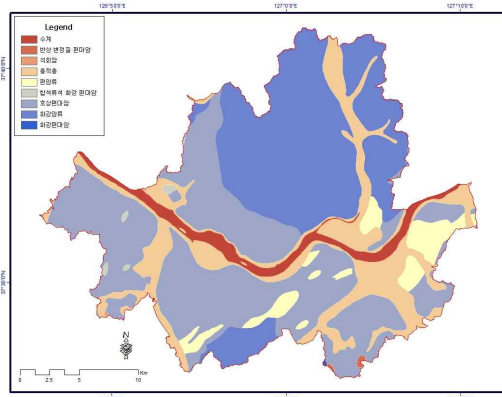
A. 일 최대 강수량

B. 일 강수량 80mm 이상인 날의 수

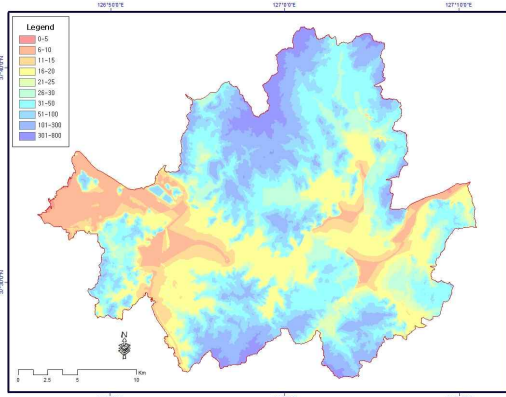
FIGURE 4. Data layer map of indicators



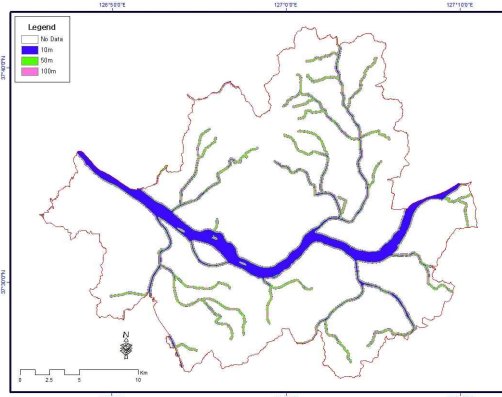
C. 경사



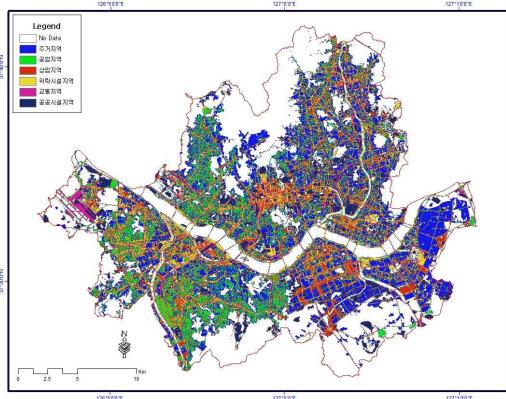
D. 지질



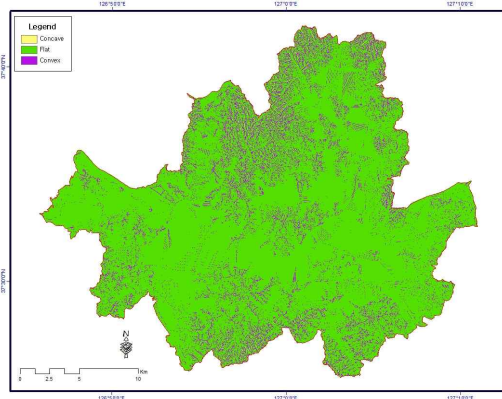
E. 고도



F. 하천 및 주변 10, 50 100m

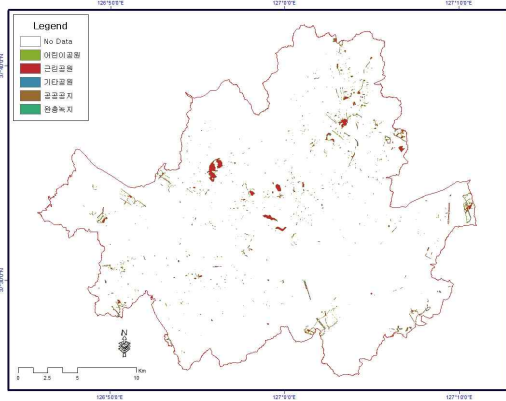


G. 불투수층

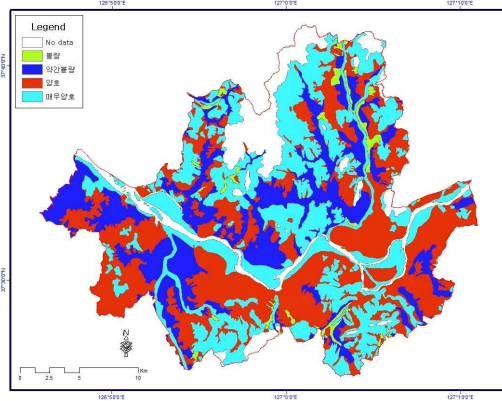


H. 지형곡률

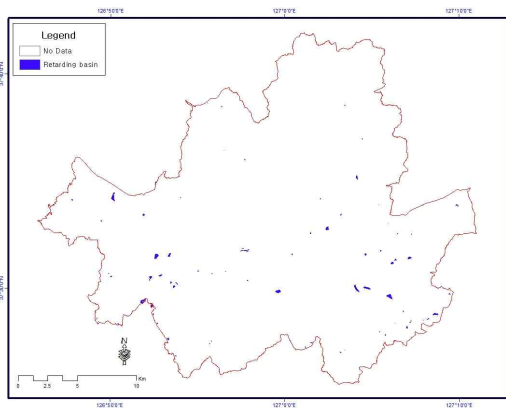
FIGURE 4. 계속



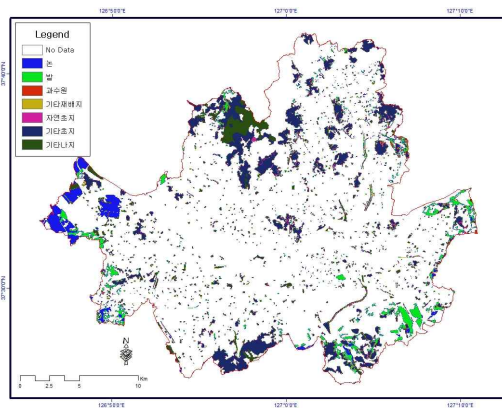
H. 공원녹지



I. 토양 배수



J. 유수지



K. 자연녹지

FIGURE 4. 계속

본 연구의 자료는 2010년을 기준으로 수집되었으며, 강수량을 포함하는 기후노출 자료는 기상청 홈페이지(www.kma.go.kr)를 활용하였다. 퍼지소속 값의 결정을 위해 활용된 침수피해 경험의 시점도 2010년이다. 2010년 연구지역 침수위치는 침수흔적도에서 추출하였으며, 전체 침수지역은 2,287곳이다. 서울지역은 2011년에도 침수가 발생하였으며, 전체 침수지역은 122곳이다. 본 연구에서는 2010년 발생한 침수지역 자료를 활용하여 취약성 분석을 실시하고, 작성된 결과의 정확성을 2011년 침수지역으로 검증하였다.

연구 결과 및 검증

1. 분석 결과

Fuzzy 모델의 적용을 통해 계산된 퍼지 소속 값은 연구지역에서 발생한 2010년 침수위치와 각 항목간의 공간적 상관관계를 나타내며, 이를 통해 각 항목을 고려한 홍수 취약성도를 작성하고 홍수 취약지역을 예측할 수 있다. 또한 각 지표가 연구지역의 홍수로 인한 침수에 영향을 미치는 정도를 알 수 있다(표 3 참조). 이를 알아보기 위해 각 요인별로 퍼지 소속 값의 평균을 구하였다. 평균값이 가장 높은 항목은 일 강수량이 80mm 이상인

날 수로 0.70이며, 하천 및 주변 10, 50, 100m 항목이 0.63으로 높게 나타났다. 또한 불투수층도 침수피해에 비교적 크게 영향(0.55)을 미치는 것으로 나타나 기후 노출적 요소, 하천 인근의 지형적 요소, 불투수층과 같은 개발적 요소가 모두 침수피해에 영향을 미치는 것으로 보인다. 이에 비하여 경사는 0.27로 평균값이 가장 낮았다. 이를 통해 서울시의 2010년 홍수로 인한 침수피해는 일강수량이 80mm 이상인 날의 수와 하천 주변 입지 요소가 영향을 크게 미침을 알 수 있었으며, 서울특별시의 경사는 침수 피해에 직접적인 역할을 하지 않았음을 알 수 있었다(표 3의 fuzzy average 참조).

각 지표의 등급별 퍼지 소속 값을 면밀히 살펴보면 자료범위의 최고값인 1에 해당되는 등급은 일 최대 강수량 항목에서는 최고값인 “269~293mm” 등급, 일 강수량이 80mm

이상인 날 수 지표에서는 “26~30일” 등급, 경사지표에서는 “0~5°”, 고도 지표에서는 “16~20m”, 하천 지표에서는 하천에서 “50m 인접 지역”, 불투수층 지표에서는 “공업지역”, 지형 곡률 항목은 “평면지역” 및 토양 배수 항목은 “약간 불량” 지역이 홍수와 상관성이 높았다(표 3). 또한 우수지와 같은 홍수예방시설이 없는 지역, 우수나 강우의 침투 및 저류 공간으로 활용될 수 있는 자연녹지·공원녹지가 부족한 지역에서 홍수취약성이 큰 것으로 나타났다.

본 연구결과로 구축된 서울시 전체의 기후 변화 홍수 취약성도(그림 5)의 공간적 분포를 살펴보면, 전체적인 경향은 한강을 중심으로 본류 양안에 위치한 지역에서 취약한 지역의 높은 것을 알 수 있었다. 특히, 여의도 이남의 영등포구, 강동구 및 강남구 등이 속하는 강남지역이 노원구, 은평구등이 속하는 강북지

TABLE 3. Ratio of each factors calculated by fuzzy membership values

지표	등급	Occ.point	Pct. occ.	No. of pixels in domain	Pct.domain	Ratio	Fuzzy	Fuzzy Average
일최대강수량	103-139	15	0.72	243231	4.01	0.18	0.02	0.33
	140-158	28	1.34	607792	10.01	0.13	0	
	159-179	69	3.3	392908	6.47	0.51	0.18	
	180-198	96	4.6	495864	8.17	0.56	0.2	
	199-217	110	5.27	563460	9.28	0.57	0.2	
	218-236	368	17.62	807535	13.3	1.32	0.55	
	237-253	205	9.82	808131	13.31	0.74	0.28	
	254-268	768	36.78	1605037	26.44	1.39	0.58	
	269-293	429	20.55	545746	8.99	2.29	1	
일강수량이 80mm 이상인 날 수	0~5	49	2.35	121714	2.01	1.17	0.87	0.70
	6~10	72	3.45	177570	2.93	1.18	0.87	
	11~15	110	5.27	254388	4.19	1.26	0.93	
	16~20	188	9	478981	7.89	1.14	0.85	
	21~25	259	12.4	710522	11.71	1.06	0.79	
	26~30	565	27.06	1218416	20.07	1.35	1	
	31~35	786	37.64	2790083	45.97	0.82	0.61	
	36~40	59	2.83	303392	5	0.57	0.42	
41~45	0	0	14638	0.24	0	0		
경사	0~5°	1782	85.34	3770015	62.11	1.37	1	0.27
	6~10°	115	5.51	586178	9.66	0.57	0.42	
	11~15°	55	2.63	507557	8.36	0.32	0.23	
	16~20°	44	2.11	398611	6.57	0.32	0.23	
	21~25°	81	3.88	494655	8.15	0.48	0.35	
	26~30°	7	0.34	173099	2.85	0.12	0.09	
	31~35°	3	0.14	88208	1.45	0.1	0.07	
	36~40°	1	0.05	33667	0.55	0.09	0.06	
	41~90°	0	0	17714	0.29	0	0	

TABLE 3. 계속

지표	등급	Occ.point	Pct. occ.	No. of pixels in domain	Pct.domain	Ratio	Fuzzy	Fuzzy Average
지질	수계	17	0.81	258197	4.25	0.19	0.12	0.35
	반상 변정질 편마암	0	0	6595	0.11	0	0	
	석회암	0	0	1061	0.02	0	0	
	충적층	229	10.97	1083285	17.85	0.61	0.38	
	편암류	134	6.42	303291	5	1.28	0.79	
	함석류석 화강 편마암	6	0.29	20736	0.34	0.84	0.52	
	호상편마암	1362	65.23	2428763	40.01	1.63	1	
	화강암류	340	16.28	1966740	32.4	0.5	0.31	
고도	화강편마암	0	0	1044	0.02	0	0	0.45
	0-5	0	0	8430	0.14	0	0	
	6-10	74	3.54	489094	8.06	0.44	0.22	
	11-15	179	8.57	403484	6.65	1.29	0.64	
	16-20	701	33.57	1015155	16.72	2.01	1	
	21-25	163	7.81	361080	5.95	1.31	0.65	
	26-30	423	20.26	706376	11.64	1.74	0.87	
	31-50	413	19.78	1230145	20.27	0.98	0.49	
	51-100	113	5.41	896300	14.77	0.37	0.18	
하천	101-300	22	1.05	750673	12.37	0.09	0.04	0.63
	301-800	0	0	208967	3.44	0	0	
	No Data	1918	91.86	5289682	87.15	1.05	1	
	10	50	2.39	384501	6.33	0.38	0	
불투층위치	50	63	3.02	183258	3.02	1	0.92	0.55
	100	57	2.73	212271	3.5	0.78	0.6	
	No data	416	19.92	2434555	40.11	0.5	0	
	주거지역(110)	658	31.51	1779996	29.33	1.07	0.33	
	공업지역(120)	39	1.87	50322	0.83	2.25	1	
	상업지역(130)	371	17.77	521668	8.59	2.07	0.89	
	위락시설지역(140)	33	1.58	56468	0.93	1.7	0.68	
지형곡률	교통지역(150)	376	18.01	734043	12.09	1.49	0.57	0.35
	공공시설지역(160)	195	9.34	492660	8.12	1.15	0.37	
	Concave	307	14.7	1387043	22.85	0.64	0	
토양 배수	Flat	1463	70.07	3325972	54.8	1.28	1	0.46
	Convex	318	15.23	1356689	22.35	0.68	0.06	
	No data	12	0.57	634006	10.45	0.06	0	
	불량	24	1.15	118688	1.96	0.59	0.31	
유수지	약간불량	781	37.4	1270310	20.93	1.79	1	0.50
	양호	855	40.95	2122951	34.98	1.17	0.64	
	매우양호	416	19.92	1923788	31.69	0.63	0.33	
자연녹지	No Data	2088	100	6054729	99.75	1	1	0.36
	Retarding basin	0	0	14983	0.25	0	0	
	No Data	1967	94.2	5122219	84.39	1.12	1	
	논	5	0.24	99829	1.64	0.15	0.13	
	밭	16	0.77	144320	2.38	0.32	0.29	
	과수원	0	0	3745	0.06	0	0	
	기타채배지	0	0	1649	0.03	0	0	
	자연초지	1	0.05	5401	0.09	0.54	0.48	
공원녹지	기타초지	38	1.82	476247	7.85	0.23	0.21	0.53
	기타나지	61	2.92	216302	3.56	0.82	0.73	
	No Data	2080	99.62	6003737	98.91	1.01	1	
	어린이공원	1	0.05	5782	0.1	0.5	0.5	
	근린공원	2	0.1	40358	0.66	0.14	0.14	
	기타공원	0	0	651	0.01	0	0	
완충녹지	공공공지	3	0.14	8725	0.14	1	0.99	0.55
	완충녹지	2	0.1	10459	0.17	0.56	0.55	

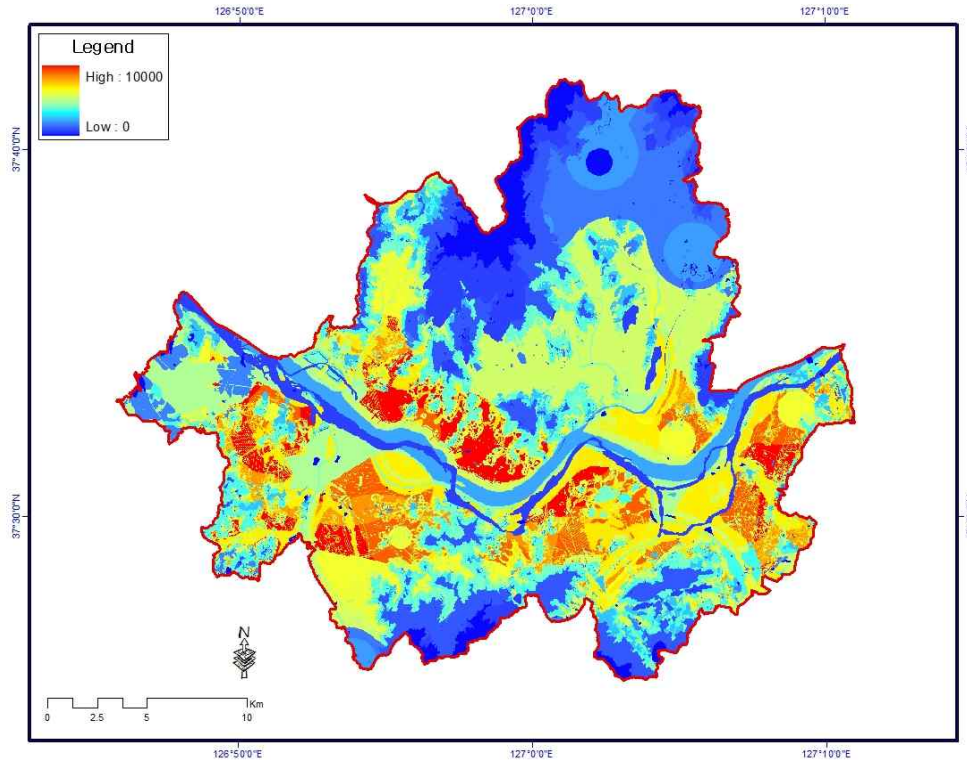


FIGURE 5. Predictive flood vulnerability assessment map based on fuzzy membership "fuzzy and" model

역에 비하여 상대적 취약성이 높은 것으로 분석되었다.

2. 검증

본 연구에서 기후변화 취약성 평가 개념을 적용하고, fuzzy 모델을 이용하여 도출된 홍수취약성도는 추정(assessment) 값에 해당되므로 검증이 필요하다. 연구결과를 검증하는 방법으로 2010년 발생한 침수피해 관련 항목을 바탕으로 홍수 취약성도에서 상위 피해 지역으로 추정되는 지역에 실제 2011년 침수피해 지역이 얼마나 포함되는지 검증하였다. 이를 위해 Success Rate Curve(SRC) 방법을 이용하였다. SRC는 가능성도에서 얻어진 가능지수 값을 등면적당 검증용 침수가 된 위치와의 비율값으로 표현하였다. 그 결과 홍수취

약성의 SRC는 그림 5와 같다. SRC는 취약성도에서 얻어진 예측 지수 값을 등면적당 침수피해가 발생한 곳의 비율값으로 표현하였다. 그 결과, 빈도비 모델을 통한 홍수취약성도의 검증은 그림 5이다. 그림 5에서 그래프의 X축에는 침수피해 취약성 및 위험지수가 높은 지역을 상위 퍼센트로 나열한 값이고, Y축은 침수피해가 위치한 하위 퍼센트 값을 나타낸 것이다. 예를 들어, X축의 값이 1%일 때 Y축의 값이 100%라면 침수피해 취약성도 및 위험도에서 이들의 가능성이 높게 나타난 1%의 픽셀 안에 침수피해의 위치가 모두 속한다는 것을 의미하며 또한 이들의 예측이 올바르게 되었음을 의미한다. 보다 정량적인 검증을 위해 AUC(Area Under the Curve)방법을 이용하였다. AUC 방법은 SRC 방법을 개선한 것으로, SRC 방법에 의한 결과검증 곡선의

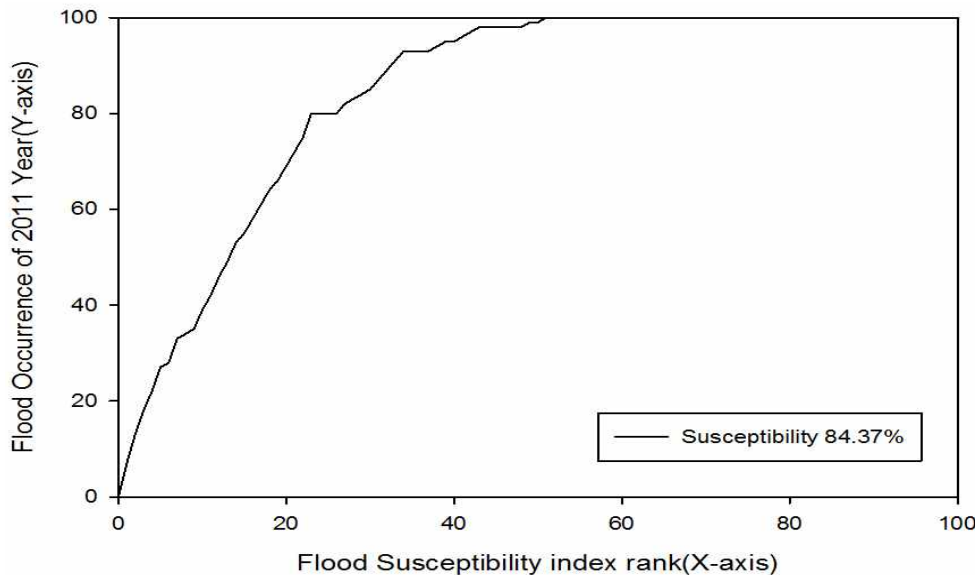


FIGURE 6. Illustration of cumulative frequency diagram showing rank (%) of predictive flooded index (x-axis) occurring in cumulative percent of flood occurrence (y-axis)

면적을 구하는 것으로써 X축과 Y축을 1:1로 곱하면 그 SRC 아래의 면적을 구할 수 있고 이 면적이 넓을수록 더 정확한 취약성이 된다. 본 연구를 통하여 구축된 취약성도의 검증은 84.37%의 정확성을 나타내는 것으로 분석되었다.

결론 및 토의

본 연구는 서울을 사례지역으로 기후변화 취약성 평가 개념을 적용한 홍수취약성 평가를 위해 지표와 퍼지모형을 결합한 모형을 활용해보았다. 선행연구를 기반으로 홍수취약성에 영향을 미치는 지표를 도출하고 이 지표값들을 통합하기 위한 방법으로 퍼지모형을 활용했으며 퍼지소속값 결정을 위해 빈도비를 사용하였다.

기존의 기후변화 취약성 평가 연구들이 실제 피해 경험이나 추세를 제대로 반영하지 못했을 뿐 아니라 지표들의 통합방법에 수학적 근거가 미약했다는 점에서 이를 개선한 지표

와 퍼지모형, 빈도비를 결합한 형태의 취약성 평가기법은 기존의 취약성 평가기법을 개선하고 홍수취약성을 평가하는데 상당히 효과적인 방법으로 사료된다.

본 연구는 우리나라의 수도이고, 최근 집중강우로 인한 홍수침수피해가 큰 서울시를 대상으로 취약성 평가를 수행한 결과, 홍수피해에 영향을 크게 미치는 지표는 일 강수량이 80mm 이상인 날의 수, 하천과의 거리, 불투수층으로 나타났으며 영향이 낮은 항목은 경사도이다. 각 지표의 등급별 최고값을 기반으로 서울시 홍수 취약성을 예측하면 홍수에 대한 적응능력(홍수조절능력(유수지) 및 자연/공원 녹지등)이 없는 지역에서 최대강수량이 269mm 이상, 공업용지, 고도가 16~20m 정도 및 하천에서 50m 이내로 인접한 지역에서 침수 취약성 높은 것으로 분석되었다. 이러한 항목을 퍼지로 분석하여 작성된 최종 홍수 취약성도의 지역별 분포를 살펴보면 영등포구 및 용산구, 마포구 등과 같이 한강 본류를 중

심으로 양안에 위치한 '구' 들이 비교적 넓은 면적의 취약지역을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 또한 주요 건물 및 기능이 밀집한 부도심지의 역할을 수행하는 영등포 및 강남구와 같은 일부지역은 취약성이 높아서 홍수가 발생할 경우 그 피해가 타 지역에 비하여 많을 것으로 우려된다.

본 연구의 결과는 유럽을 중심으로 기존의 홍수취약성 평가 기법을 개선하고자 퍼지모형을 제안한 노력들을 보다 개선된 형태로 국내에 적용해 본 첫 번째 연구이며 기존 지표법의 통합방법을 개선했을 뿐 아니라, 과거 피해경험을 빈도비를 활용하여 효과적으로 반영하였다는 점에서 의의가 높다고 판단된다. 또한 이러한 취약성 평가결과는 향후 기후변화의 심화와 함께 우려되는 홍수, 침수 피해에 대한 정책 수립 및 정책우선순위 결정을 위한 주요 자료로 활용될 수 있을 것이다.

그럼에도 불구하고, 본 연구는 몇 가지 한계를 가지고 있다. 첫째, 다양한 시계열 홍수 피해 분석의 부족이다. 우선적으로 정확한 침수 위치를 시계열로 파악 및 정보 획득이 어려우며 기존의 대부분의 과거자료는 정확한 도면이 아닌, 단순 주소 기반으로 조사되어 공간 분석에 활용하기 어려움이 있다. 둘째 홍수에 대한 주요 처리능력, 다시 말해 하수·우수처리시설, 배수능력에 대한 부분은 고려하지 못했다. 도심지역 홍수피해에 상하수도 시설의 유무, 처리시설은 굉장히 중요한 역할을 하지만 데이터 획득의 어려움, 이들 시설의 처리능력(관경 및 배수 능력 등)에 대한 공간적 구현 및 가치평가의 어려움 때문에 본 연구에서는 포함하지 못했으며 차후 연구에서 반영하고자 한다.

추후 이러한 한계점에 대한 보완을 위한 지속적인 연구가 이루어질 필요가 있으며 홍수 취약성 평가결과를 기반으로 현재의 기반시설 및 도시계획 사업에 대한 평가와 의사결정에 반영하는 노력도 함께 이루어질 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국환경정책·평가연구원의 2012년도 기본연구과제 “기후변화 적응형 도시구현을 위한 그린인프라 전략 수립(RE2012-11)”의 지원으로 수행되었습니다.

KAGIS

참고문헌

- 강정은, 이명진, 구유성, 조광우, 이재욱. 2011. 기후변화 적응형 도시 리뉴얼 전략수립: 그린인프라의 방재효과 및 적용방안. 한국환경정책·평가연구원.
- 건설기술연구원. 2009. 이상기후에 대비한 GIS 기반의 홍수방어 의사결정 시스템 개발 연구.
- 고재경, 김희선. 2009. 경기도 기후변화 취약성 평가 연구. 경기개발연구원.
- 국립기상연구소. 2011. IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011.
- 국립환경과학원, 환경부. 2012. 지자체 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위한 기후변화 부문별 취약성 지도.
- 국토연구원. 2010. 도시경쟁력과 기후변화. 라미아 카말차우이, 알렉시스 로버트 엮음, 국토연구원 옮김, 2010 KRIHS 번역총서.
- 기상청. 2011. 지역기후변화정보 어떻게 활용해야하나.
- 김현주. 2010. 방재를 고려한 도시계획. 방재연구 12(4):15-24.
- 대한국토·도시계획학회. 2009. 도시계획론. 보성각, 서울.
- 도시재생사업단. 2010. 도시자연재해 안전기술 개발.
- 명수정. 2011. 공간분석을 활용한 기후변화 취

- 약성 평가. 물과 미래 44(2):57-62.
- 백경혜, 이명진, 강병진. GIS를 활용한 KMA-RCM의 규모 상세화 기법 개발 및 검증. 한국지리정보학회지 14:136-149.
- 배덕효, 이문환. 2010. 기후변화에 따른 홍수 취약성 평가와 사례분석. 국토 344:20-31.
- 서울시. 2011. 서울특별시 기후변화 적응대책 세부시행계획(2012~2016).
- 서울시. 2012. 서울통계.
- 손민우, 성진영, 정은성, 전경수. 2011. 기후변화를 고려한 홍수취약성 지표의 개발. 한국수자원학회논문집 44(3):231-248.
- 오현주. 2010. GIS와 인공지능망을 이용한 금-은 광물 부존지치 선정 및 검증. 한국지리정보학회지 13:1-13.
- 유가영, 김인애. 2008. 기후변화 취약성 평가 지표의 개발 및 도입방안. 한국환경정책·평가연구원. 85쪽.
- 이명진, 강정은. 2012. 빈도비 모델과 GIS를 이용한 침수 취약지역 예측 기법 개발 및 검증. 한국지리정보학회지 15(2):88-102.
- 이명진, 이정호. 2011. GIS를 이용한 기후변화 연동 지하수 함양량 산정 모델 개발 및 검증. 한국지리정보학회지 14:36-51.
- 임은선. 2009. 퍼지이론: 언어변수를 이용하여 상황에 유연한 입지분석하기(국토연구원 편, '알기쉬운 국토연구 방법론', 349-360쪽).
- 조경두, 장훈. 2010. 인천지역 기후변화 실태 분석 및 적응대책 도입을 위한 기초연구. 인천발전연구원.
- 환경부. 2010. 서울특별시 기후변화 영향평가 및 적응대책 세부시행계획 수립: 건강 및 재난분야.
- Bonham-Carter, G.F. 1994. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS, Pergamon, Oxford.
- Choi, J.K., K.D. Kim, S. Lee and J.S. Won. 2010. Application of a fuzzy operator to susceptibility estimations of coal mine subsidence in Taebaek City, Korea. Environmental Earth Science 59:1009-1022.
- Dessai, S. and M. Hulme. 2003. Does climate policy need probabilities? Tyndall Center for Climate Change Research. UK.
- EU Environment Agency. 2010. Urban regions: vulnerabilities, vulnerability assessments by indicators and adaptation options for climate change impacts-scoping study. ETC/ACC Technical Paper.
- Harris, C., X. Hong and Q. Gan. 2002. Adaptive Modelling, Estimation, and Fusion from Data: A Neurofuzzy Approach. Springer, New York.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability.
- Kropp, J.P., A. Holsten, T. Lissner, O. Roithmeier, F. Hattermann, S. Huang, J. Rock, F. Wechsung, A. Luttger, S. Pompe, I. Kuhn, L. Costa et al. 2009. Klimawandel in Nordrhein-Westfalen-regionale Abschag der Anfalligkeit ausgewahlter sektoren.
- Lee, S. 2007. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. Environ Geol 52:615-623.
- Lee, M.M., J.W. Lee, H.J. Oh, J.S. Won and S. Lee. 2011. Ensemble-based landslide susceptibility maps in Jinbu area, Korea. Environmental Earth Sciences doi:10.1007/s12665-011-

- 1477–y.
- Lissner, T.K., A. Holsten, C. Walther and J.P. Kropp. 2011. Toward sectoral and standardised vulnerability assessments: The example of heatwave impacts on human health. *Climate Change*. *Climate Change* 112:687–708.
- Pradhan, B., S. Lee and M.F. Buchroithner. 2009. Use of geospatial data and fuzzy algebraic operators to landslide–hazard mapping. *Appl Geomat* 1:3–15.
- Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy sets. *Inform. Contr.* 8:338–353. [KAGIS](#)