

## 인공신경망을 활용한 서울시 도시기반시설 침수위험지역 분석

강정은\* · 이명진\*\*

Kang, Jung Eun\*, Lee, Moun-Jin\*\*

### Analysis of Urban Infrastructure Risk Areas to Flooding using Neural Network in Seoul

#### ABSTRACT

This study analyzed urban infrastructure risk to flooding based on the possibility map of flooding calculated by neural network model focusing on Seoul. This study found that Gangnam-gu, Songpa-gu, Seocho-gu and Seodaemun-gu contained relatively large high-risk areas to flooding. Over 4.17km<sup>2</sup> of transportation facilities were located in high-risk area to flooding and Gangnam-gu included over 0.85km<sup>2</sup> of infrastructures exposed to high inundation risk. This study is meaningful in that it first applied the neural network modeling to flooding risk assesment and results of risk assesment can be incorporated into various planning process.

**Key words** : Risk assesment, Flooding, Neural network, Infrastructure, GIS, Seoul

#### 초록

본 연구는 서울시를 대상으로 인공신경망을 활용하여 침수발생가능성과 침수위험지역을 도출하고, 위험지역 내 도시기반시설 현황을 살펴보았다. 분석결과, 강남구, 송파구, 서초구, 서대문구 등에서 침수발생가능성이 높은 위험지역을 많이 포함하고 있었다. 교통시설의 4.17km<sup>2</sup> 이상이 위험지역에 분포하여 우선 관리시설로 나타났다, 강남구 지역은 침수위험이 높은 기반시설을 0.85km<sup>2</sup> 이상 포함하고 있었다. 본 연구는 인공신경망 모델을 침수발생가능성 분석에 활용하여 그 적용가능성을 확인하였으며, 평가결과는 다양한 계획과정에 반영될 수 있을 것이다.

**검색어** : 리스크 평가, 침수, 인공신경망, 기반시설, GIS, 서울

## 1. 서론

세계적으로 경제 불균형, 빈부의 격차, 전쟁, 테러 등 사회·경제적 리스크에 관심이 높았던 것에 비해 최근에는 기후변화, 극한기후와 관련된 자연재해 리스크에 대한 관심이 크게 높아지고 있다(OECD, 2009; WEF, 2013). 한반도의 경우 1990년대 후반 이후 강우일수는 감소하는 반면, 강우강도는 증가해 짧은 시간에 많은 비가 내리는 집중강우 현상이 잦아지고, 이러한 집중강우는 인구, 재산, 기반시설이 집중되어 있는 도시지역에서 큰 피해를 발생시키고 있다(National Institute of Meteorological Research, 2009).

선진국에서는 기후변화와 이에 따른 자연재해 증가에 대한 대응전략을 리스크 관리의 개념으로 접근하고자 하는 노력이 확산되고 있다. 이는 기후변화가 가지는 비교적 큰 불확실성에도 불구하고 그 위험이 상당하기 때문에 이에 대한 예방조치를 취하여야 한다는 것을 전제로 한다. 특히 영국, 호주, 미국 등의 국가에서는 국가차원에서 기후변화로 발생할 수 있는 리스크의 목록을 구축하고, 이를 평가하여 도출된 리스크의 우선순위를 정책수립과 연계하고 있다(Kang et al., 2012). 국내에서도 기후변화로 발생할 수 있는 리스크에

\* 정회원 · 부산대학교 도시공학과 조교수 (Pusan National University · [jekang@pusan.ac.kr](mailto:jekang@pusan.ac.kr))

\*\* 교신저자 · 한국환경·정책평가연구원 전문연구원 (Corresponding Author · Korea Environment Institute · [leemj@kei.re.kr](mailto:leemj@kei.re.kr))

Received February 11, 2015/ revised April 26, 2015/ accepted June 20, 2015

대한 목록화 작업이 최근 수행되었으며, KEI(2012)에 따르면 우리나라에서는 특히, 홍수, 태풍 등으로 인한 수해 발생 증가와 기상재해로 인한 기반시설의 피해 가능성이 물관리와 재난재해 분야의 핵심 리스크로 평가되었다. 이는 최근 거의 매년 서울, 부산 등 주요 도시에서 집중강우로 도로 등 기반시설의 침수피해가 발생하고 있고, 이로 인한 사회경제적 파급효과가 상당한 현실과 맞닿아 있다.

지금까지 도시홍수 및 침수에 대한 비교적 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 이들 연구들은 정성적 지표를 활용한 취약성 평가 연구(Bae and Lee, 2010; Jang and Kim, 2009; Ministry of Environment et al., 2010; Kim and Jang, 2009; Son et al., 2011), 기상현상과 연계하여 수리수문학적 모델링을 활용한 유출량 산정 및 위험지역 평가 연구(Lee et al., 2006; Lee, 2012), 공간통계학적 기법을 활용한 취약지역 평가 연구(Kang and Lee, 2012; Kim et al., 2013)로 구분될 수 있다. 지표를 활용한 선행연구들은 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)가 정하는 취약성 개념을 기반으로 기후노출, 민감도, 적응역량의 카테고리별 지표를 도출하여(Ministry of Environment et al., 2010; Bae and Lee, 2010) 설문조사나 기존 통계자료의 데이터를 활용하여 평가를 수행하였다. 일부 연구들(Bae and Lee, 2010; Kim and Jang, 2009)은 지표 중에 수리수문학적 모델링 결과를 포함시키기도 하였다. 이러한 선행연구들은 대체로 광역지자체 또는 사군구 단위로 평가하여 지자체별 상대적 비교를 가능하게 하였다. 그러나 평가결과를 공간 및 기반시설 계획과 연계시키기는 어려운 실정이다. 유출 또는 침수해석 모델링을 수행한 연구들은 GIS와 연계하여 위험지역에 대한 상세한 결과를 얻을 수 있는 장점이 있었다. 하지만, 입력변수가 한정되어 있고 비교적 좁은 대상지에 대한 결과를 도출하여 도시전반에 적용되어야 하는 도시기반시설 등의 공간계획에 활용되기에는 어려움이 있었다. 마지막으로, 홍수에 영향을 주는 요인을 지표처럼 도출하나 이를 통합할 때 정량적인 통계모형이나 확률분포 추정법을 사용하는 경우는 기존의 정성적 지표연구의 단점을 보완하고, 세밀한 공간정보로 표출될 수 있어 활용가치가 상당한편이다. 그러나, 지역회귀분석(Jang and Kim, 2009), 빈도비 활용(Lee and Kang, 2012), MaxEnt(Maximum Entropy Model)(Kim et al., 2013)등의 일부 방법론만이 활용되었으므로, 보다 다양한 모델이나 기법이 적용될 필요가 있다.

선행연구들은 대체로 도시홍수나 침수 발생 자체에 초점을 맞추고 있으며, 기반시설을 고려한 침수피해나 위험지역 고찰에 대한 연구는 드문 실정이다. 기반시설에 초점을 둔 선행연구로 KEI(2010)은 기반시설별 위험도를 전문가 설문을 통해 평가하여 기반시설별 우선순위를 도출하였으나, 공간적으로 어떤 지역의, 어떤 시설이 위험한지에 대한 내용은 고려하지 않았다. 도시기반시설은

도시민에게 중요한 서비스를 제공할 뿐 아니라, 한번 설치되면 그 시설의 수명이 상당히 오랜 기간 지속된다는 점에서 설치 시 침수위험지역을 피하는 것은 중요한 사전 예방대책이 될 수 있다. 또한 침수피해 발생 시 그 피해 규모와 파급효과가 상당하므로 이미 설치된 기반시설은 침수피해 가능성을 함께 고려하여 이를 체계적으로 관리하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

도시기반시설 위험지역을 평가함에 있어 최근 강조되고 있는 리스크 평가 방법론이 유용하게 활용될 수 있다. 일반적으로 리스크는 사건의 발생가능성과 그 사건의 영향 또는 결과로 구성된다. 따라서 리스크 평가(Risk assessment)는 발생가능성과 결과의 크기의 곱으로 표시할 수 있다( $R=P \times D$ )(Korea Agency of Technology and Standards, 2008; KEI, 2012). UNDP(2004)는 리스크를 자연적 혹은 인위적 위해(hazard)와 취약성(vulnerability)의 상호작용의 결과로 발생하는 부정적 결과나 예상되는 손실로 정의하고 있다. 이 개념도 실제 리스크를 측정할 때는 위해(hazard)로 표시되는 부정적인 사건의 발생가능성(H: Probabilistic hazard)과 취약성(V: Vulnerability)으로 표시되는 리스크에 노출된 사회경제적 가치, 또는 인명, 재산 등에 대한 위해로 인한 영향(D: Potential damage)의 크기를 곱하는 방식( $R=H \times V=P \times D$ )으로 고려되므로 앞에서 언급된 사건의 발생가능성과 결과의 크기의 곱으로 평가하는 방식과 맥을 같이한다고 볼 수 있다(Marzocchi et al., 2012).

본 연구는 서울지역을 대상으로 도시 전 지역에 대한 침수 발생가능성(possibility, likelihood)을 인공신경망 모델과 GIS를 연계하여 평가검증하고, 이를 기반으로 침수발생가능성이 높은 위험지역을 도출한 후, 도시기반시설 입지와 연계하여 침수위험이 높은 기반시설의 공간적 분포를 분석하였다. 본 연구 수행을 통해 서울 지역 뿐 아니라 다른 도시에도 적용가능한 방법론을 수립하고, 기반시설의 침수위험을 정량적, 공간적으로 분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구지역

우리나라 인구의 30% 이상이 거주하는 서울시는 고도로 개발된 대도시이다. 서울시의 지난 50년간 연강수량의 추세를 살펴보면 매년 약 4mm씩 증가하는 것으로 조사되었으며, 연 강우시간은 매년 1.5시간 감소하는 반면 연속최대강우시간은 매년 0.08시간씩 증가하여 눈에 띄는 강우강도의 증가를 확인할 수 있다(Seoul Metropolitan Government, 2013). 또한 1960년대부터 도시개발이 본격화된 이후 불투수면적은 62년 7.8%에서 2010년 47.7%로 약 40%가 증가한 것으로 조사되었다(Seoul Metropolitan Government, 2013). 서울시는 기후변화와 연계한 기상요인의 변화 뿐 아니라, 불투수면적의 증가, 녹지면적 감소, 배수시설 부족, 지하공간 개발

등 다양한 원인이 복합적으로 작용하여 지속적인 도시홍수 및 침수피해를 경험하고 있다. 특히, 지난 2010년과 2011년에는 연이은 집중호우에 의한 침수피해가 발생하였는데, 2010년 9월 21일과 22일의 집중호우는 누적강우량이 강서구와 강남구가 293mm, 마포구 280mm 등 평균적으로 259.5mm의 강우량을 기록하여 광화문 주요 도로가 침수되는 등 피해를 경험했으며, 2011년에는 관악구에서 시간당 113mm의 강한 비로 14,000여 세대가 침수되고 곳곳에 도로가 침수되고 지하철역이 물에 잠기어 교통대란을 초래하였다(Seoul Metropolitan Government, 2011). 2010년과 2011년 침수피해는 2000년 들어 발생한 서울시의 침수피해 중 가장 큰 사건이었다.

서울시에는 총 59,088개의 도로가 85.01km<sup>2</sup>로 구성되어 있으며 그 외 철도 23개소 8.9km<sup>2</sup>, 유통시설 11개소 1.52km<sup>2</sup>, 수도 131개소 2.65km<sup>2</sup>, 전기공급설비 98개소, 0.58km<sup>2</sup>, 가스공급설비 19개소, 0.20km<sup>2</sup>, 열공급설비 16개소, 0.21km<sup>2</sup> 등 다양한 기반시설들이 도시전체를 망으로 연결시켜 서울시의 뼈대를 형성하고 있다(Seoul Metropolitan Government, 2012). 과거 많은 침수피해 경험에서도 나타났지만 도시지역의 기반시설 침수는 지역 경제활동과 시민의 삶에 작간접적으로 크게 영향을 미쳐 이에 대한 관리가 필요한 상황이며 지역별로 어떤 기반시설이 어느 정도의 리스크를 가지고 있는지를 파악하고 이를 도시공간계획 및 정책우선순위 결정에 반영할 필요가 있다.

## 2.2 분석과정

본 연구의 기반시설 침수위험지역 평가는 1)전체지역의 침수발생가능성 분석과 2)도시기반시설에의 영향을 고려한 위험지역 평가를 기본틀로 한다. 우선, 서울지역에 대한 침수발생가능성은

실제 도시침수 지역과 도시침수에 영향을 미치는 다양한 요소와의 관계를 기반으로 인공신경망 분석기법을 이용하여 분석되었다. 인공신경망 기법에 대해서는 2.4에서 보다 상세히 설명하였다. 기반시설에 대한 침수영향을 살펴보는 2단계에서는 우선, 1단계에서 셀(cell)별 지수의 형태로 도출되는 침수발생가능지수를 기반으로 지역을 구분하였다. 침수발생가능성 지수는 절대적인 확률값은 아니나 침수발생가능성을 나타내므로 이를 GIS 소프트웨어인 ArcGIS를 활용하여 등간격으로 5등분(매우 높음, 높음, 보통, 낮음, 매우 낮음)하고, 이 가운데 침수발생가능성이 매우 높은(0.8 이상) 지역을 침수위험지역으로 설정하였다. 이들 위험지역을 추출하여 기반시설의 위치를 중첩시켜 침수위험지역 내 포함된 기반시설을 도출하고, 이들 시설에 대한 유형별 현황 및 공간적 분포를 분석하였다(Fig. 1 참고). 최종 도출된 도시기반시설 침수위험지역은 서울시 전체에 대해 10×10m의 상세데이터이므로 각종 공간계획 수립을 위해 적용할 수 있으며, 본 연구에서는 도시기반시설 위험지역의 공간분포 특성 파악과 이해향상을 위해 지역별(구별) 자료로 정리하여 살펴보았다.

## 2.3 자료구축

침수지역 정보는 서울시의 침수흔적도로부터 획득된 자료를 활용하였는데, 2010년 침수지역, 2,287개소 공간정보는 인공신경망 훈련을 통해 침수 발생가능성을 계산하기 위해 사용되었다. 침수발생가능성 결과는 과거경험을 기반으로 계산된 예측치이므로 검증작업이 수행될 필요가 있으며, 검증자료는 동일한 공간에서 다른 시간에 발생한 사건이어야 한다(Lee et al., 2012). 따라서 본 연구에서는 예측에 대한 정확도 검증을 위해 2011년 도시침수 (122개소) 자료를 활용하여 검증을 수행하였다.

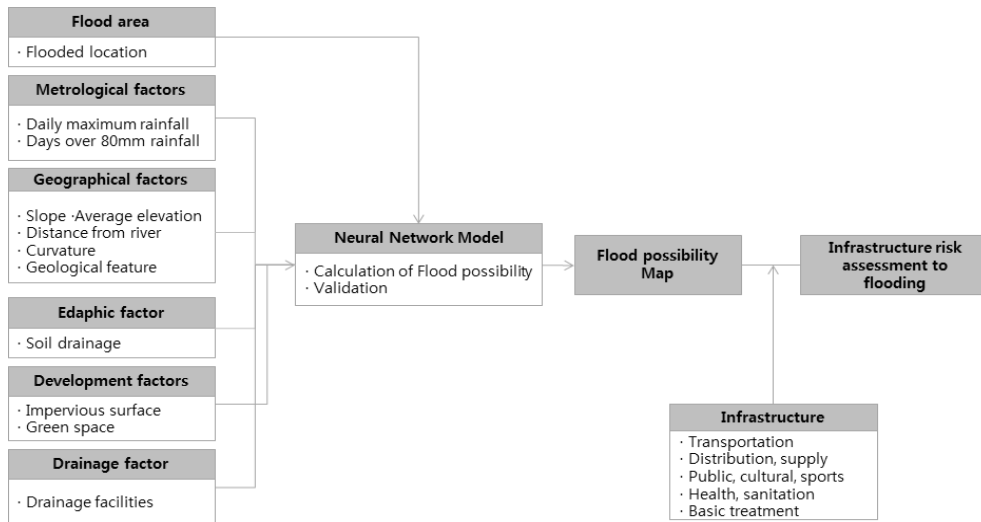


Fig. 1. Analysis Process

도시침수에 영향을 미치는 요인은 선행연구를 기반으로 정리된 변수들 가운데 사군구 단위보다 세밀한 공간정보의 획득이 가능하고, 침수에 관련성이 크다고 판단된 11개 변수들을 Table 1과 같이 도출하여 분석에 활용하였다. 도시침수 발생에 영향을 미치는 요인들은 대체로 자연적 요소, 사회적 요소, 시설요소로 구분할 수 있으며, 자연적인 요인에는 기상적 요소, 지형적 요소, 토양요소가 각각 일최대강수량, 집중강우일수, 경사도, 평균고도, 하천인접성, 토양배수, 지질특성, 지형곡률이 고려되었다. 사회적인 요인으로는 개발정도를 표현하기 위한 불투수도지이용, 투수지역인 녹지지역이 포함되었으며, 시설요소로 내수배제시설(유수지, 빗물펌프장 등)이 고려되었다.

도시기반시설은 도시의 뼈대를 형성하는 시설들로 인프라(infrastructure), 사회기반시설, 국가기반시설 등의 용어로 사용되기도 한다. 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 따르면 도시기반시설은 공간의 형성이나 주민의 생활에 있어 필수적인 시설로 당해 지역 뿐 아니라 사군 전체의 기능과 발전방향에 큰 영향을 주는 시설로 정의하고 있다. 이 법에 따르면 도시기반시설은 교통시설(도로, 철도, 항만, 공항, 주차장, 자동차 정류장 등), 공간시설(광장, 공원, 녹지, 유원지, 공공공지), 유통공급시설(유통업무설비, 수도공급시설, 전기공급설비, 가스공급설비, 열공급설비 등), 공공문화체육시설(학교, 운동장, 공공청사, 문화시설 등), 방재시설(하천, 유수지, 저수지, 방화설비 등), 보건위생시설(화장장, 공동묘지,

납골시설, 종합의료시설 등), 환경기초시설(하수도, 폐기물처리시설 등)의 7개로 분류되고 모두 53개 시설을 포함한다. 본 연구에서는 이러한 도시기반시설 가운데 저지대나 침수발생가능지에 설치되는 것이 오히려 도시지역 전체에 도움이 될 수 있는 녹지 등의 공간시설, 유수지 등의 방재시설은 제외하고, 교통시설, 유통·공급시설, 공공문화체육시설, 보건위생시설, 환경기초시설에 초점을 맞추고 도시기반시설들의 침수위험지역을 평가하였다. 도시기반시설의 공간정보는 한국토지정보시스템(KLIS)을 통해 수집되었다.

수집된 자료는 구축기관의 목적에 맞추어 폴리곤(Polygon) 및 그리드(Grid)와 다양한 축척으로 구축되어 있으나, 본 연구에서는 구축된 자료를 모두 10×10m 단위의 래스터 데이터로 변환하여 분석에 활용하였다. 현실 세계를 가상의 공간으로 표현하는 방법은 크게 두 가지이다. 첫째, 폴리곤과 같은 벡터 데이터를 활용하여 정밀한 가상의 공간을 만들 수 있다. 벡터 데이터는 상세한 결과물을 제공하고 저장공간을 적게 차지하는 장점이 있다. 둘째, 그리드 기반의 래스터로 구축하는 것이다. 정밀도는 떨어지지만 데이터를 효율적으로 사용하여 다양한 모델링 작업을 쉽게 수행할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구는 인공신경망 모델링을 위해서 모델링 작업을 쉽게 수행하고, 데이터를 효율적으로 사용가능한 래스터의 형태로 모든 입력자료를 변환하였으며, 정밀도는 공간해상도를 10m로 높이는 것으로 같음하였다.

Table 1. Data for Analysis

Risk assessment	Category	Classification	Variable	Data type	Scale
Possibility	Flood occurrence	Flood occurrence	Flooded location(2010)	Polygon	1:1,000
			Flooded location(2011)	Polygon	1:1,000
	Natural factor	Meteological factors	Daily maximum rainfall	Grid	1:1,000
			Days over 80mm rainfall	Grid	1:1,000
		Geographical factors	Slope	Grid	1:5,000
			Average elevation	Grid	1:5,000
			Distance from river	Polygon	1:5000
			Curvature	Grid	1:5,000
			Geological feature	Grid	1:5,000
	Edaphic factor	Soil drainage	Polygon	1:2,5000	
	Social factor	Development factor	Impervious surface	Polygon	1:1,000
Green space			Polygon	1:1,000	
Facility factor	Drainage factor	Drainage facilities	Polygon	1:1,000	
Impact	Infrastructure	Infrastructure	Transportation facilities	Polygon	1:1,000
			Distribution-supply facilities	Polygon	1:1,000
			Public-cultural-sports facilities	Polygon	1:1,000
			Health-sanitation facilities	Polygon	1:1,000
			Basic treatment facilities	Polygon	1:1,000

## 2.4 인공신경망 기법

인공신경망이란 인간 두뇌의 작용을 모델링 기법으로 모사한 것으로 두뇌의 가장 기본이 되는 신경세포들 간의 연산과정을 모델링한 것이다. 다시 말해, 인간 뇌 구조와 신경 세포들의 역할과 공간적 인지능력의 이해를 바탕으로 뇌가 수행하는 연산 기능의 원리를 컴퓨터 언어(Matlab, C, Fortran 등)를 이용하여 프로그래밍으로 구현한 시스템이라고 할 수 있다. 인공신경망은 발생하는 최종 결과와 결과에 영향을 주는 입력 데이터로부터의 반복적인 학습과정을 거쳐 데이터에 숨어 있는 패턴을 찾아내는 모델링 기법으로 계층구조를 가지고 있는 입력 데이터와 최종 발생 결과를 수많은 프로세싱 과정을 거쳐 최종 결과를 예측하게 된다. 인공신경망의 분석 패턴은 데이터의 숨어 있는 패턴을 가중치로 분석하고, 조절하는 과정이며, 이러한 전체 과정을 학습이라고 한다. 학습 수행을 위해서는 일정 기준이 필요하다. 본 연구에서는 발생하는 최종 결과인 침수가 발생한 지역을 학습에 필요한 기준지역으로 설정하고, 이 지역에 대한 침수(결과) 정보와 침수에 영향을 미치는 지역의 특징을 입력데이터로 하여 공간정보를 구축하였다. 이러한 입력정보와 결과와의 관계를 인공신경망을 통하여 연속적으로 피드백하여 침수와 침수발생지역의 특징을 평가하고 입력 데이터의 가중치를 조절하였다. 신경회로망의 여러 기능 중 본 연구에 사용된 특징 추출 기능은 신경회로망이 저장하고 있는 서로 다른 정보의 현저한 특징을 신경망 자체가 통계적으로 추출해 낼 수 있는 기능이다.

인공신경망은 처리 노드라고 하는 기본요소로 구성된다. 여러 개의 노드가 각각 층별로 구성되고, 층별 구조에 따라서 단층퍼셉트론 또는 다층퍼셉트론으로 구분될 수 있다. 본 연구서는 침수가 발생한 지역, 침수에 영향을 주는 입력 데이터 및 향후 침수가

발생하는 취약지역으로 총 3개의 층으로 구성될 수 있으므로 다층퍼셉트론이 적용되었다. 일반적으로 다층퍼셉트론은 3개 이상의 층으로 이루어지는데, 정보가 인가되는 층을 입력층(Input layer), 처리된 정보가 나타나는 층을 출력층(Output layer), 입력층과 출력층 사이의 모든 중간층을 은닉층(Hidden layer)이라고 하며, 은닉층은 여러 개로 구성될 수 있다. 층별로 구성되어 있는 노드들의 출력은 층간 가중치를 통하여 확대 또는 감소 다른 층의 노드로 전달된다. 본 연구에서 사용된 인공신경망프로그램은 Hines et al.(1997)에 의해 MATLAB으로 개발된 역전파 인공신경망 프로그램을 기초로 하여 침수분석에 적합하도록 수정 및 보완하여 사용하였다(Fig. 2).

## 3. 분석결과

### 3.1 인공신경망 모델을 활용한 침수발생가능성 분석

본 연구는 인공신경망 모델 중 다층퍼셉트론 오류 역전파 알고리즘을 활용하여 침수발생가능성을 분석하였다. 오류 역전파 알고리즘의 첫 번째 작업은 훈련지역과 과정을 선정하는 것이다. 훈련과정은 침수가 발생한 지역과 발생하지 않은 지역을 신경망에 정확히 인지시키는 작업으로써 이를 통하여 인공신경망은 출력층에 대한 결과 즉, 침수와 관련된 각 요인별 가중치를 계산하게 된다. Paola and Schowengerdt(1995)은 인공신경망의 효율적 훈련을 위해서는 훈련지역의 숫자가 많은 것보다 대표하는 지역을 정확히 선정하는 것이 중요하다고 하였다. 본 연구에서는 2010년에 실제 서울시 전체에서 발생한 지역(총 2,287곳)으로 트레이닝 하였다. 또한 인공신경망의 추론능력 향상을 위하여 시그모이드 함수를 적용하여 본 연구에서 선정한 침수에 영향을 준 입력 데이터 11개에

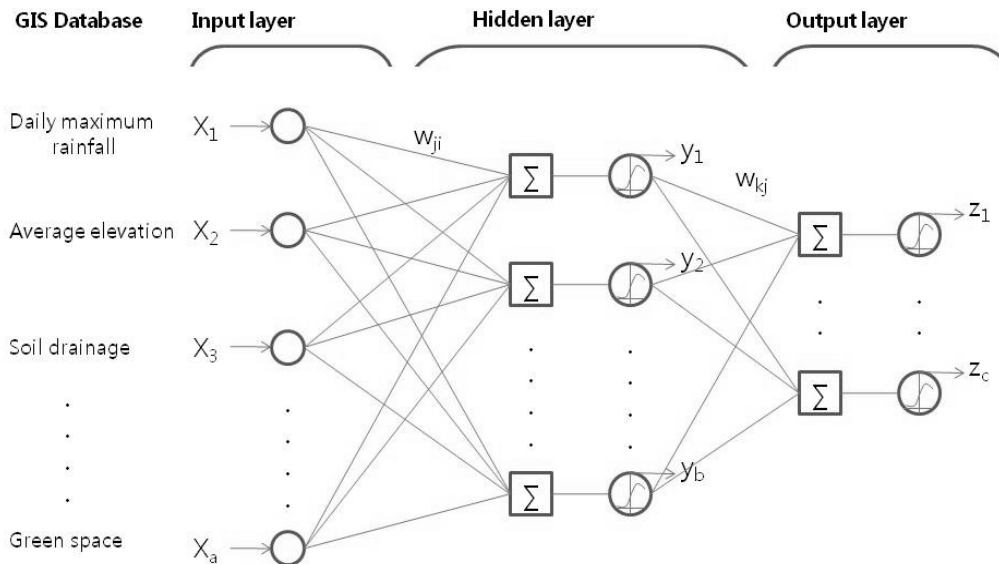


Fig. 2. Three Layer Backpropagation Neural Networks

적용하여 입력 데이터 항목값을 0.1에서 0.9 사이의 값을 갖도록 정규화하였다. 본 연구에 적용된 오류 역전파 알고리즘에 의해 기대되는 침수 발생 가능성값은 0.9가 되고, 예상되는 침수 취약지역의 값과 실제 침수 발생 지역의 값 사이의 오차를 0.1까지 줄여 나가기 위해 반복적인 오류 역전파 알고리즘 훈련을 통하여 가중치를 결정하였다. 가중치 계산을 위한 인공신경망 구조는 11(Input layer)×24(Hidden layer)×1(Output layer)로 설정하였다. 목표 오차에 도달하기 전의 최대반복횟수는 5,000번, 학습율은 0.01로 설정하여 요인들의 상대적 가중치를 계산하였다. 훈련지역을 무작위로 10회 선정하여 계산한 요인별 상대적 가중치는 Table 2와 같다. 본 가중치는 녹지공간을 1로 보았을 때, 다른 요인들이 침수에 미치는 가중치를 상대적으로 계산한 것으로 지표면이 평평하지 않고 패이거나 옅은 정도를 나타내는 지형곡률, 불투수 토지이용, 경사도, 일일 최고 강우량 등이 가중치가 높게 나타났다. 가중치 결과는 해당지역에서 어떤 요인들이 도시침수에 실질적으로 더

크게 영향을 미쳤는지를 상대적으로 비교할 수 있게 하여 지역특성과 침수간의 관계를 이해하는 데 도움을 준다. 본 연구 분석 결과에 의하면 서울지역은 평지가 아닌 지역, 불투수층이 많은 지역, 경사가 급하고, 일최대강수량이 많았던 지역에서 침수발생가능성이 높아진다고 할 수 있다. 이러한 요인들의 상대적 가중치를 각 요인에 부여하여 도출된 침수발생가능성 지수를 적용하여 침수발생가능성도를 작성하였다(Fig. 3).

본 연구에서 인공신경망 모델을 이용하여 도출된 침수발생가능성도는 추정값에 해당되므로 이에 대한 검증이 필요하다. 본 연구는 정량적인 검증을 위해 AUC(Area Under the Curve) 방법을 이용하였다. AUC는 가능성도에서 얻어진 지수값을 등면적당 검증용 침수가 발생한 곳의 위치와의 비율값으로 표현하는데, AUC의 면적이 높다는 것은 예측의 정확도가 높음을 의미한다. Fig. 4에서 보여주듯 2010년 서울시 침수지역 자료를 활용하여 작성한 침수발생가능성도는 2011년 발생한 침수자료를 활용하여 검증한 결과,

Table 2. Weight of Each Variable Calculated by Neural Network

	Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average	S.D	Weight
1	Daily maximum rainfall	0.1151	0.0928	0.1112	0.0991	0.1173	0.0996	0.0925	0.0857	0.0985	0.0956	0.1007	0.0104	1.4611
2	Days over 80mm rainfall	0.0742	0.0876	0.0728	0.0787	0.0891	0.0861	0.0894	0.0665	0.0742	0.0893	0.0808	0.0085	1.1717
3	Slope	0.1049	0.1033	0.1109	0.1185	0.0848	0.1027	0.1121	0.1051	0.0938	0.0851	0.1021	0.0112	1.4811
4	Average elevation	0.0724	0.0932	0.0719	0.0911	0.0972	0.0987	0.0810	0.0776	0.0902	0.1001	0.0873	0.0108	1.2667
5	Distance from river	0.0953	0.0705	0.0852	0.0943	0.0724	0.0798	0.0891	0.0865	0.0948	0.0991	0.0867	0.0099	1.2574
6	Curvature	0.1014	0.1157	0.1128	0.0999	0.0917	0.1039	0.1090	0.1079	0.1164	0.0832	0.1042	0.0106	1.5111
7	Geological feature	0.1013	0.0811	0.0972	0.0803	0.0959	0.1056	0.0871	0.1145	0.0902	0.0696	0.0923	0.0133	1.3384
8	Soil drainage	0.0958	0.0777	0.0833	0.0962	0.1164	0.0648	0.0794	0.0972	0.0843	0.1081	0.0903	0.0154	1.3099
9	Impervious surface	0.0930	0.1107	0.0958	0.1073	0.1044	0.0909	0.0925	0.0979	0.1201	0.1171	0.1030	0.0106	1.4934
10	Green space	0.0628	0.0796	0.0752	0.0667	0.0550	0.0730	0.0673	0.0748	0.0685	0.0666	0.0690	0.0071	1.0000
11	Drainage facilities	0.0838	0.0878	0.0838	0.0680	0.0759	0.0949	0.1007	0.0864	0.0690	0.0861	0.0836	0.0104	1.2131

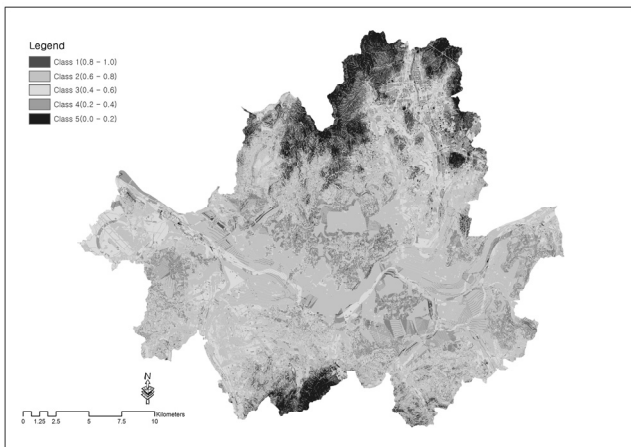


Fig. 3. Map of Seoul Flood Possibility Using Artificial Neural Network Model

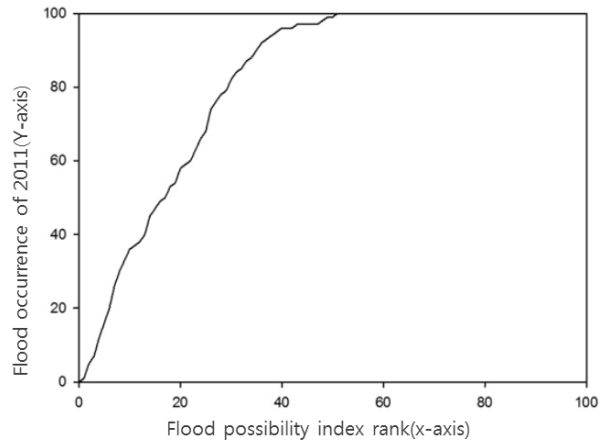


Fig. 4. AUC(Area Under the Curve) of Flood Possibility



Fig. 5. Urban Infrastructures in High Flood Risk Zones

81.92%의 비교적 높은 정확도를 나타내고 있었다. 따라서 인공신경망 모델링을 통한 결과의 신뢰도가 상당히 높은 수준임을 알 수 있다.

### 3.2 기반시설 침수위험지역 분석

본 연구는 서울시 침수발생가능성도와 도시기반시설 공간데이터를 이용하여 세 측면에서 분석하였다. 우선, 침수발생가능성을 기반으로 한 침수위험지역의 분포특성을 지역별(구별)로 살펴보았다. 둘째, 침수위험지역과 도시기반시설을 중첩시켜 최종적으로 도출된 위험지역 내 기반시설의 분포(Fig. 5)를 유형별, 지역별(구별)로 분석하였다. 이러한 분석을 통해 어떤 기반시설들이 위험지역에 많이 분포하고 있는지, 어떤 지역에 침수위험이 높은 기반시설들이 많이 입지하고 있는지에 대한 논의가 가능하다.

Table 3의 Columns 2~5는 침수발생가능성이 매우 높은 위험지

Table 3. Infrastructure in High Flood Risk Zone by Gu

Name	Area of high risk zone, m <sup>2</sup> (A)	Rank of A	Ratio (A/Total area)	Rank of ratio	Area of infra, m <sup>2</sup> (B)	Area of infra in high risk zone, m <sup>2</sup> (C)	Rank of C	Ratio (D=C/B)	Rank of Ratio
Jongno-gu	1,723,700	7	7.21%	9	3,531,900	437,500	6	12.39%	3
Jung-gu	1,406,100	9	14.00%	1	2,720,000	370,900	9	13.64%	2
Yongsan-gu	2,099,300	5	9.90%	4	4,254,900	430,300	7	10.11%	6
Seongdong-gu	1,391,200	10	8.40%	5	4,671,900	343,800	11	7.36%	9
Gwangjin-gu	1,020,000	13	5.76%	11	3,311,400	203,400	13	6.14%	12
Dongdaemun-gu	175,500	19	1.21%	18	3,867,900	54,800	18	1.42%	17
Jungnang-gu	119,000	21	0.66%	19	2,954,100	29,300	20	0.99%	19
Seongbuk-gu	659,000	16	2.70%	16	5,021,500	204,500	12	4.07%	15
Gangbuk-gu	10,300	24	0.04%	24	1,963,200	1,300	24	0.07%	24
Dobong-gu	700	25	0.01%	25	3,054,500	300	25	0.01%	25
Nowon-gu	17,600	23	0.05%	23	6,858,900	6,000	22	0.09%	23
Eunpyeong-gu	873,900	14	2.79%	15	3,417,600	143,000	16	4.18%	14
Seodaemun-gu	2,335,400	4	13.38%	2	4,473,700	780,100	4	17.44%	1
Mapo-gu	1,675,000	8	6.80%	10	7,038,400	783,400	3	11.13%	5
Yangcheon-gu	1,332,300	12	7.47%	8	5,050,500	369,100	10	7.31%	10
Gangseo-gu	1,345,300	11	3.14%	14	14,725,000	146,900	15	1.00%	18
Guro-gu	501,200	17	2.53%	17	5,530,900	136,800	17	2.47%	16
Geumchoen-gu	23,100	22	0.18%	22	2,234,200	2,800	23	0.13%	22
Yeongdeungpo-gu	125,900	20	0.58%	21	3,830,800	14,900	21	0.39%	21
Dongjakgu	818,100	15	4.70%	13	3,402,800	174,200	14	5.12%	13
Gwanak-gu	188,900	18	0.63%	20	7,052,600	41,800	19	0.59%	20
Seocho-gu	2,341,300	3	4.89%	12	7,993,700	621,400	5	7.77%	8
Gangnam-gu	4,258,900	1	11.08%	3	7,502,400	854,100	1	11.38%	4
Songpa-gu	2,533,900	2	7.53%	7	11,220,800	783,700	2	6.98%	11
Gangdong-gu	2,089,000	6	8.20%	6	4,726,800	418,900	8	8.86%	7
Mean	1,162,584		4.95%		5,216,416	294,128		5.64%	

Table 4. Infrastructure in High Flood Risk Zone by Type

Type	Total Infra area, m <sup>2</sup> (A)	Area of Infra in high risk flood zone, m <sup>2</sup> (B)	Ratio (B/A)
Transportation facilities	79,140,400	4,175,700	5.28%
Distribution-supply facilities	6,818,700	386,000	5.66%
Public-cultural-sports facilities	39,448,800	2,393,400	6.07%
Health-sanitation facilities	900,000	53,000	5.89%
Basic treatment facilities	5,968,100	564,300	9.46%
Sum	132,276,000	7,572,400	5.72%

역의 면적(A), 순위, 전체면적에 대한 비율 및 순위를 나타낸다. 침수가능성이 매우 높은 위험지역의 면적을 살펴보면 강남구가 압도적으로 많아, 약 4.26km<sup>2</sup>가 침수 발생가능성이 매우 높은 위험지역으로 나타났고, 송파구, 서초구, 서대문구, 용산구, 강동구도 2km<sup>2</sup> 이상의 면적을 나타내고 있다. 침수위험지역의 전체면적에 대한 비율을 살펴보면 중구가 가장 높아 전체의 14%가 침수에 대한 위험지역으로 나타났다. 이는 전체 면적이 다른 지역에 비해 상대적으로 적지만 이에 비해 위험지역은 1.4km<sup>2</sup>이상을 포함하고 있는 특징이 반영된 결과이다. 중구 외에도 서대문구는 13.38%, 강남구는 11.08%, 용산구 9.9%, 성동구 8.4%의 침수위험지역을 포함한 것으로 나타났다(Fig. 5, Table 3 참고). 이러한 위험지역의 분포결과는 서울지역에서도 특히, 인구나 재산이 집중되어 있을 뿐 아니라 고도로 개발된 지역에서 침수가능성이 더욱 큰 것으로 나타나고 있다. 이는 이들 지역에서 침수 발생 시 다른 지역보다 훨씬 큰 인적, 물적 피해와 파급효과를 가져올 수 있다는 것을 의미하므로 보다 적극적으로 침수에 대한 대책과 관리가 요구된다고 할 수 있다.

Table 4은 기반시설의 시설유형별 전체면적(A)과 침수위험지역 내 위치한 기반시설 유형별 면적(B) 및 비율을 나타낸다. 본 연구에 포함된 5개 기반시설 전체 면적 중 약 5.72%인 7.57km<sup>2</sup>가 침수위험 지역에 입지하고 있는 것으로 나타났다. 특히, 폐기물처리시설, 수질오염방지시설, 폐차장을 포함한 환경기초시설이 침수위험지역에 위치하는 비율이 9.46%로 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 학교, 운동장, 공공청사 등 공공문화체육시설 가운데 6.7%가 위험지역 내 입지하고 있으며, 유통, 공급시설의 5.66%, 교통시설의 5.28%도 위험지역 내 위치하고 있어 우선적으로 관리해야 하는 기반시설로 분류될 수 있었다. 교통시설은 비율은 상대적으로 낮게 나타났으나 절대적 시설면적은 4.17km<sup>2</sup> 이상으로 위험지역에 포함된 전체 기반시설의 약 55.14%를 차지하고 있으므로 침수위험지역 내 교통시설에 대한 침수예방 대책이 각별히 주의를 기울일 필요가 있겠다. 공공문화체육시설도 2.39km<sup>2</sup> 이상이 위험지역에 위치하고 있으므로 입지와 연계한 침수관리 정책이 필요하다고 할 수 있다.

마지막으로, 침수위험지역 내 기반시설의 현황은 구별 도시기반 시설 면적(B), 구별 위험지역 내 기반시설 면적(C) 및 순위, 기반시설 면적 대비 위험지역 내 기반시설 면적 비율(D=(C/B)\*100)을 통해 살펴보았다(Table 3, Columns 6-10). 교통, 유통공급, 공공문화체육, 보건위생, 환경기초의 5개 도시기반시설은 강서구(14.75km<sup>2</sup>)와 송파구(11.22km<sup>2</sup>)에서의 설치면적이 가장 넓은 것으로 나타났으나, 설치된 기반시설 가운데 침수위험지역 내 분포 여부를 살펴보면 강남구가 가장 많은 0.85km<sup>2</sup> 이상의 도시기반시설이 침수 위험지역에 분포하고 있는 것으로 나타났다. 강남구 외에도 송파구와 마포구, 서대문구가 0.7km<sup>2</sup> 이상의 기반시설이 침수위험지역에 입지하고 있어, 이들에 대한 우선적인 관리가 필요한 것으로 나타났다. 마지막으로 기반시설 중에서 위험지역에 분포한 기반시설의 면적을 비율로 계산한 결과, 서대문구가 17.44%로 가장 높았고, 중구가 13.64%, 종로구가 12.39%, 강남구가 11.38%, 마포구가 11.13%, 용산구가 10.11%로 나타났다.

정리하면, 구별 침수위험지역 면적과 위험지역 내 기반시설 면적은 강남구, 송파구, 서초구 등에서 높게 나타나고 있으며, 전체 면적에 대한 위험지역 비중 및 기반시설 가운데 위험지역 내 위치한 기반시설의 비중은 중구, 서대문구, 강남구 등에서 높게 나타나고 있다. Table 3의 평균값이 보여주는 것처럼, 구별 평균 침수위험지역 면적은 4.95%인데 반해 이들 위험지역 내 기반시설의 면적 비율은 약 5.64%로 기반시설의 침수위험이 일반적인 지역 전반의 침수위험보다도 높은 수준임을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 인공신경망 모델과 GIS를 활용하여 서울시를 대상으로 침수발생가능성을 분석하고, 이를 기반으로 기반시설에 대한 침수위험을 시설별, 지역별로 분석하였다. 이로써 중요도와 파급효과 측면에서 우선적으로 다뤄질 필요가 있는 도시기반시설에 초점을 맞춘 연구를 수행하였다는 점에서 의의가 있다. 또한 인공신경망 모델은 데이터의 반복적 학습과정을 거쳐 데이터에 숨어있는 패턴을 찾아내는 모델링 기법으로 다양한 분야에서 활용되고 있으나



본 연구는 이를 침수리스크 평가에 처음으로 적용하였다. 적용 및 검증 과정을 통해 그 적용가능성이 높게 판단되었으며 추후 보다 다양한 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구의 인공지능망 모델을 활용한 침수발생가능성 분석결과, 서울시의 경우 지형적 특성, 불투수층 여부, 일최대강수량 등이 도시침수에 상대적으로 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 침수발생가능성이 매우 높아 우선적으로 관리가 필요한 위험지역은 강남구에서 가장 많이 나타났으며, 송파구, 서초구, 서대문구 등도 상당히 많은 지역이 위험지역으로 나타났다. 침수발생가능성이 매우 높은 위험지역과 기반시설 데이터를 중첩시켜 도출한 기반시설 침수위험지역 분석결과에 따르면, 고려된 5개 기반시설들은 해당시설 면적의 약 5.28~9.46% 가량이 위험지역에 위치해 있어 이들 시설에 대한 침수위험관리가 필요한 것으로 나타났다. 비율로는 환경기초시설이 전체 시설의 9.46%가 침수위험지역에 위치한 것으로 나타났으며, 면적으로는 교통시설의 4.17km<sup>2</sup> 이상이 침수위험지역에 분포한 것으로 나타났다. 도시기반시설은 시설별 관리주체가 상이하어 통합적인 관리가 어렵지만, 기존에 실행되어 온 시설별 노후화와 연계한 관리에 공간적인 입지와 연계한 위험관리를 추가하여 종합적인 대책 마련 및 관리가 필요한 것으로 보인다.

구별로 기반시설 침수위험지역을 살펴보면, 강남구 지역 내 기반시설 중 0.85km<sup>2</sup> 이상이 침수위험지역에 포함된 것으로 나타났으며, 이외에도 송파구, 마포구, 서대문구에서도 기반시설의 상당한 면적이 침수위험지역에 위치한 것으로 나타났다. 이들 지역은 대체로 고도로 개발되어 있을 뿐 아니라 많은 재산과 시설이 입지해 있어, 만약 이 지역에서 기반시설 침수가 발생한다면 다른 지역에서 발생한 것보다 파괴피해가 훨씬 클 것으로 예상되므로 침수 관련 정책결정 시 이들 지역 내 시설을 우선 관리대상으로 고려하고 정책우선순위 결정에 반영해야 할 것으로 판단된다. 앞서도 언급하였듯이 기후변화로 인한 침수 및 수해 발생 증가와 이러한 재해로 인한 기반시설 피해는 국내에서도 핵심적인 리스크로 평가받고 있으므로 신규 기반시설계획 시 침수위험에 대한 평가결과가 반영될 필요가 있다.

본 연구는 리스크 평가 개념을 기반으로 기반시설에 대한 침수위험지역을 평가하고, 분석을 위해 인공지능망 모델을 활용하였다는 점에서 의의가 있으나, 리스크 평가를 입지적인 노출의 측면으로 단순화하여 실질적 손실이나 피해규모의 도출 등이 어려웠고, GIS 래스터기반의 분석으로 면적값의 정확도에는 한계가 존재한다. 본 연구는 도시 전역에 대한 침수위험지역 및 위험지역 내 기반시설의 유형별, 지역별 분포에 초점을 맞추어 수행되었으나, 추후연구에서는 시설의 유형별 위험요소 및 특징에 대한 보다 상세한 분석연구가 진행될 필요가 있다. 또한 차후 연구를 통하여

보다 다양한 시기의 침수자료를 통한 결과의 검증이 필요한 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Bae, D. H. and Lee, M. H. (2010). "Flood vulnerability assessment and case studies of climate-change." *Journal of Korea Research Institute for Human Settlements*, Vol. 344, pp. 20-31 (in Korean).
- Hines, J. W., Tsoukalas, L. H. and Uhrig, R. E. (1997). *Fuzzy and neural approaches in engineering*, John Wiley and Sons, New York, N.Y.
- Jang, O. J. and Kim, Y. O. (2009). "Flood risk estimation using regional regression analysis." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 4, pp. 71-80 (in Korean).
- Kang, J. E. and Lee, M. J. (2012). "Assessment of flood vulnerability to climate change using fuzzy model and GIS in Seoul." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 15, No. 3, pp. 119-136 (in Korean).
- Kang, J. E., Lee, J. Y., Kim, Y. S. and Oh, N. H. (2012). *Development of risk assessment system for business sector adaptation*, Korea Environment Institute (in Korean).
- Kim, B. S. and Jang, D. W. (2009). "Development of flood protection decision-making system based on GIS." *Magazine of Korea water resources association*, Vol. 42. No. 10, pp. 43-50 (in Korean).
- Kim, H. M., Lee, D. G. and Park, C. (2013). "A study on selection for vulnerable area of urban flooding adaptable capacity using MaxEnt in Seoul." *Journal of Korea Planners Association*, Vol. 48, No. 4, pp. 205-217 (in Korean).
- Korea Environment Institute (KEI) (2010). *Assessing vulnerability to climate change of the physical infrastructure and developing adaptation measures in Korea II*, No. 2010-13 (in Korean).
- Korea Environment Institute (KEI) (2012). *Evaluation of climate change adaptation capacity for the national risk management*, No. 2012-02 (in Korean).
- Korean Agency for Technology and Standards (2008). *Societal security - Guideline for incident preparedness and operational continuity management*, KS A ISO PAS 22399:2008 (in Korean).
- Lee, C. H., Han, G. Y. and Kim, J. S. (2006). "Development of urban flood analysis model adopting the unstructured computational grid." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 5, pp. 511-517 (in Korean).
- Lee, G. S. (2012). "The evaluation of flood risk area of Jeonju river using GIS and cadastral map." *Journal of The Korean Cadastre Information Association*, Vol. 14, No. 2, pp. 1-14 (in Korean).
- Lee, M. J. and Kang, J. E. (2012). "Predictive flooded area

- susceptibility and verification using GIS and frequency ratio.” *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 15, No. 2, pp. 86-102 (in Korean).
- Lee, M. J., Lee, S. R. and Jeon, S. W. (2012). “Landslide hazard mapping and verification using probability rainfall and artificial neural networks.” *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 15, No. 2, pp. 57-70 (in Korean).
- Marzocchi, W., Garcia-Aristizabal, A., Gasparini, P., Mastellone, M. L. and Ruocco, A. D. (2012). “Basic principles of multi-risk assessment: A Case Study in Italy.” *Natural Hazards*, Vol. 62, No. 3, pp. 551-573.
- Ministry of Environment, Korea Environment Institute, National Climate Change Adaptation Center (2010). *Seoul climate-change impact assessment and adaptation strategies : Health and Disaster Sectors* (in Korean).
- National Institute of Meteorological Research (2009). *Understanding climate-change II* (in Korean).
- OECD (2009). *OECD studies in risk management-innovation in country risk management*.
- Paola, J. D. and Schowengerdt, R. A. (1995). “A review and analysis of backpropagation neural networks for classification of remotely-sensed multi-spectral imagery.” *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 16, No. 16, pp. 3033-3058.
- Seoul Metropolitan Government (2011). *Disaster risk assessment and application plan of Seoul* (in Korean).
- Seoul Metropolitan Government (2012). *Urban planning facilities decision status of Seoul* (in Korean).
- Seoul Metropolitan Government (2013). *Rainwater management master plan of Seoul* (in Korean).
- Son, M. W., Sung, J. Y., Chung, E. S. and Jun, K. S. (2011). “Development of flood vulnerability index considering climate change.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 3, pp. 231-248 (in Korean).
- United Nations Development Programme (2004). *Reducing disaster risk - A challenge for development*, A global report, UNDP-Bureau for Crisis Prevention and Recovery (BRCP), New York, N.Y.
- World Economic Forum (2013). *Global Risk 2013*.