

GIS 기반의 도시지역 침수 취약성 평가

– 창원시를 대상으로 –

송봉근¹ · 이택순^{2*} · 박경훈²

Assessment of Flooding Vulnerability Based on GIS in Urban Area

– Focused on Changwon City –

Bong-Geun SONG¹ · Taek-Soon LEE^{2*} · Kyung-Hun PARK²

요 약

본 연구는 경상남도 창원시를 대상으로 도시 침수문제를 개선하기 위해 GIS 분석을 활용하여 침수 취약성을 평가하였다. 평가 요인은 물순환 면적률과 표면 유출특성, 강우량 분포이며, GIS 프로그램을 활용하여 평가요인에 대한 정보 구축과 침수 취약성 평가를 분석하였다. 물순환 면적률과 표면 유출특성은 도시지역에서 취약하였다. 강우량 분포는 북쪽의 농촌지역에서 많았다. 침수 취약성 평가 결과 북쪽의 농업지역과 산림지역에서 낮았다. 반대로 도시지역은 불투수 재질로 포장되어 있어 취약성이 높았다. Hotspot 공간군집분석을 이용하여 침수 취약지역의 밀집도를 분석한 결과는 도시지역에서 매우 높은 밀집도를 보였다. 그리고 이들 지역은 대부분 하천의 하류에 위치해 있어 실제 침수가 빈번히 발생하는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구의 침수 취약성 평가는 도시 및 환경계획 차원에서 침수 피해를 예방하기 위해 투수성 포장재질의 조성 및 빗물관리 시설의 설치유치를 선정하는데 효율적인 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 침수 취약성, 지리정보시스템, 물순환 면적률, 빗물관리

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate flooding vulnerability considering spatial characteristics focused on Changwon-si, Gyeongsangnam-do. Assessment Factors are water cycle area ratio, surface runoff, and precipitation. And construction of assessment factors and vulnerability was analyzed by GIS program. Water cycle ratio and surface runoff were vulnerable in urban area. Precipitation was often distributed in

2014년 10월 3일 접수 Received on October 3, 2014 / 2014년 11월 24일 수정 Revised on November 24, 2014 /
2014년 12월 10일 심사완료 Accepted on December 10, 2014

1 국립생태원 생태보전연구본부 Bureau of Ecological Conservation Research, National Institute of Ecology

2 창원대학교 환경공학과 Dept. of Environmental Engineering, Changwon National University

* Corresponding Author E-mail : tslee@changwon.ac.kr

agriculture of the northern region. Results of flooding vulnerability were low in agriculture and forest of the northern region. In contrast, urban area was high because there has covered impervious land cover. Analytical results of flooding vulnerability density using hotspot spatial cluster analysis were high in urban area. And these areas were situated in down stream so flooding were generated. Therefore, flooding vulnerability assessment of this study can help for selecting construction sites of pervious land cover and rainwater management facilities in urban and environmental planning.

KEYWORDS : *Flooding Vulnerability, GIS, Water Cycle Ratio, Rainwater Management*

서론

최근 도시지역은 국지적 호우가 빈번히 발생하면서 홍수와 침수 등의 물환경 문제가 사회적으로 이슈화되고 있다(Suwon, 2011). 이러한 문제의 근본적인 원인은 도시화로 인한 콘크리트 및 아스팔트와 같은 불투수 포장재질의 면적이 증가하면서 자연적인 물순환의 왜곡을 야기했으며(Pouraghniaei, 2002), 빗물이 지하로 침투되는 양이 감소되고 지표면으로 유출되는 양이 증가하게 되어 도로변 침수와 주택침수 등이 발생하게 되었다(Michael and Keith, 2006). 이러한 물환경 문제를 개선하기 위해서는 도시지역의 지표면 공간특성에 따른 물순환 특성을 파악하여 침수가 발생할 수 있는 지역을 예측하고 도시 및 환경계획 차원에서 효율적인 개선 방안을 도출하는 것이 필요하다.

현재 국내·외에서는 도시지역의 침수문제를 개선하기 위해 다양한 연구들이 진행되고 있다. 먼저 국외의 연구들을 살펴보면, Lee *et al.* (2010)은 Goonja 지역의 토지이용 변화로 인한 도시의 물순환 특성을 분석하였으며, 불투수 면적율이 43%에서 84%로 증가되면서 증발산량이 29% 감소하였고, 표면 유출량은 41% 증가, 지하수함량이 74% 감소하는 등 전체적으로 물순환이 악화되는 것으로 나타났다. Filoso *et al.* (2004)은 토지이용의 변화로 인한 하천의 질소함량 특성을 수문학 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 분석하였다. Sharma *et al.* (2008)은

Canberra 지역을 대상으로 물 자원과 환경을 이용하여 다양한 물 서비스에 활용할 수 있는 효과에 대해 분석을 실시하였다. Venkatesh and Brattebø (2011)은 노르웨이의 Oslo를 대상으로 도시지역의 물순환과 폐수시스템의 유지 및 관리를 위해 필요한 에너지 소비량을 연구하였다. 국내의 연구들에서는 Choi (2007)은 도시개발차원에서 물순환체계를 구축하는데 있어 환경생태계획단계에서 생태적으로 다양한 기능을 수행할 수 있는 습지조성의 입지를 선정하고자 하였다. Gyeonggi Research Institute (2007)은 지속가능한 물순환체계를 유지위해 중요한 요소 중 하나인 도시녹지의 기능을 고찰하고, 도시녹지의 물순환 기능을 제고하기 위한 행정구역별 계획과 설계 방향을 검토 및 제안하고자 하였다. Chung *et al.* (2007)은 HSPF 모형을 이용하여 안양천 유역의 물순환 건진화를 위해 복개하천의 철거, 하수처리수 재이용, 지하수의 하천유지용수로의 이용 등의 여러 대안을 제안하였고, 각 대안에 대해 수량 및 BOD 부하량 측면에서 정량적으로 분석하여 투자우선순위를 산정하였다. Song *et al.* (2013)은 GIS 기반의 물순환 면적을 분석과 공간통계기법을 활용하여 도시지역의 물순환 특성을 공간적, 정량적으로 평가하고, 이를 토대로 공간계획 차원의 물순환성 개선, 도시침수 방지 등을 개선할 수 있는 방안을 마련하고자 하였다. Suwon (2011)와 Gyeongnam Green Environmental Center (2011)은 도시지역의 물순환 향상과 효율적인 빗물관리를 위해 물순환 면적률의 분석

과 다양한 빗물이용현황, 관리시설의 적용방안에 대해 알아보았다.

이와 같이 국내·외적으로 도시지역의 침수 문제를 개선하기 위해 다수의 연구가 진행되고 있으며, 연구내용들은 대체로 토지피복변화에 따른 물순환 특성을 비교하거나 컴퓨터 시뮬레이션을 활용한 하천 모델링을 통해 도시 침수 발생지역을 예측하였다. 또한 빗물관리시설이나 물자원의 재이용 등을 통해 도시 침수 문제를 개선하기 위한 방안을 마련하고자 하였다. 하지만 도시지역의 침수지역을 개선하기 위한 방안을 마련하기 위해서는 우선적으로 도시지역에 분포하는 다양한 지표면의 공간특성을 고려하여 침수가 발생할 수 있는 지역을 도출하는 것이 필요하며, 이를 바탕으로 도시 및 환경계획 차원에서 침수지역 개선을 위한 시설물의 설치 및 예산 편성, 제도 및 정책 등의 대책 방안이 마련되어야 할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 경상남도 창원시를 대상으로 도시지역의 다양한 공간적 특성에 따라 발생할 수 있는 침수 취약성에 대해 평가를 실시하였으며, 물순환 면적률, 표면 유출특성, 그리고 강수량 분포의 평가요인에 대한 GIS 공간정보를 구축하고 공간통계분석을 통해 평가하였

다. 또한 침수 취약성 평가결과를 토대로 도시지역의 침수문제를 개선하기 위한 도시 및 환경계획 차원에서의 방안에 대해 알아보았다.

연구 방법

1. 연구대상지

본 연구의 대상지는 그림 1과 같이 경상남도 창원시로 설정하였다. 창원시는 우리나라의 동남단에 위치하여 남해안과 인접해 있으며, 의창구와 성산구, 마산합포구, 마산회원구, 진해구의 5개 구로 이루어져 있다. 인구는 약 100만 명 이상의 광역시 규모이며, 면적은 약 750km²이다. 연평균 강수량은 1,395mm로 여름철 장마기간인 6~8월 사이에 강우가 집중되어 있으며, 전형적인 해양성 기후를 띄고 있다(Changwon city homepage).

한편 창원시의 도시지역은 정병산과 천주산, 불모산, 장복산 등 해발고도 약 600m 정도의 산으로 둘러싸여있는 분지형태의 지형을 띄고 있으며, 아스팔트와 콘크리트 등의 불투수성 포장지역이 집약적으로 분포하고 있다(Lee *et al.*, 2010; Song and Park, 2011; Song *et al.*, 2013). 이러한 도시지역의 공간특성으로 인해

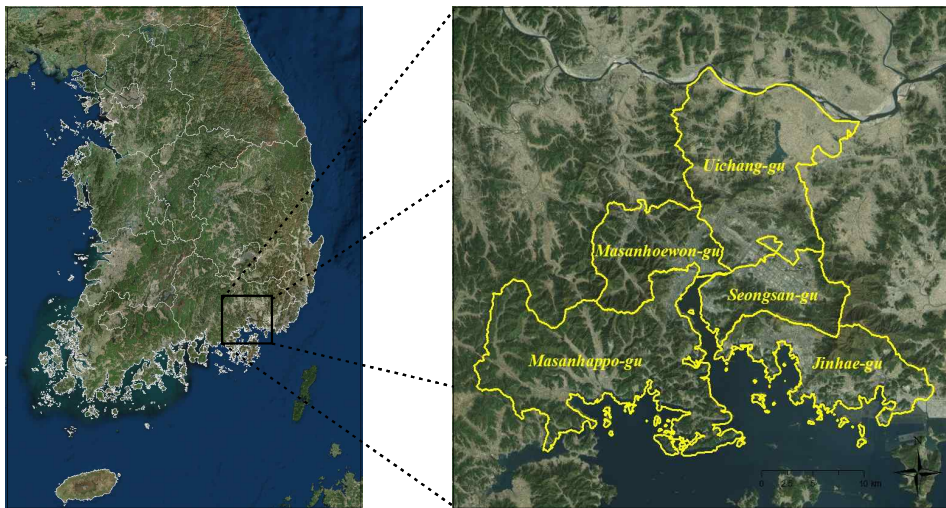


FIGURE 1. Study area

빗물의 지하침투, 증발산과 같은 자연적인 물순환 체계가 파괴되고 있으며, 도시홍수 및 침수 문제가 빈번히 발생하고 있다(Gyeongnam Green Environmental Center, 2011; Song *et al.*, 2013). 이렇듯 갈수록 악화되고 있는 도시지역의 침수문제 문제를 개선하기 위해 창원시는 빗물관리에 대한 필요성을 인식하고 있으며, 효율적으로 도시침수 문제 대책 마련을 위해 행정구역별로 빗물관리에 대한 기초적인 공간자료 구축이 필요한 실정이다.

2. 연구과정

본 연구는 그림 2와 같은 과정으로 진행하였다. 우선 환경부 중분류 토지피복도와 농업과학기술원의 1:25,000의 정밀토양도, 그리고 창원시 주변의 21개 기상측정 지점에서 강우량 자료를 획득하였다. 그리고 공간해상도 200m×200m의 Vector GRID를 제작하여 물순환 면적률과 표면유출 특성, 강우량 분포와 같은 침수 취약성 평가요인별로 공간정보를 구축하였다. 마지막으로 Vector GRID 내에 구축된 공간정보를 표준화하고 중첩하여 침수 취약성을 평가하였으며, GIS 프로그램의 Hot spot 분석

기법을 활용하여 침수 취약지역의 공간적인 밀집정도를 도출하여 도시지역의 침수지역을 개선하기 위한 방안에 대해 고찰하였다.

3. 침수 취약성 평가 요인 분석

1) 물순환 면적률

물순환 면적률은 기존의 물순환 체계 분석방법의 문제점을 개선하고자 환경부에서 제정한 생태면적률에 물관리 시설물의 기능 및 효과를 추가적으로 고려하여 새롭게 개발된 지표이다 (Song *et al.*, 2013). 물순환 면적률의 장점은 현재 상태의 물순환 현상을 수치를 통해 정량적으로 제시할 수 있으며, 물순환 체계의 개선을 위해 물 관리 시설 설치지역의 선정과 설치 기준, 적용 효과 등을 나타내는데 효율적인 지표이다(Suwon, 2011).

물순환 면적률의 분석방법은 그림 3와 같이 지표면의 토지피복특성과 물관리 시설의 설치 여부, 그리고 지하수 이용량의 총 3단계를 거쳐 계산되며, 증발과 침투, 유출저감에 대한 항목으로 가중치를 적용하여 분석하게 된다. 우선 1단계인 토지피복특성을 고려한 방법을 살펴보면, 토지피복자료는 그림 4의 2007년에 제작된

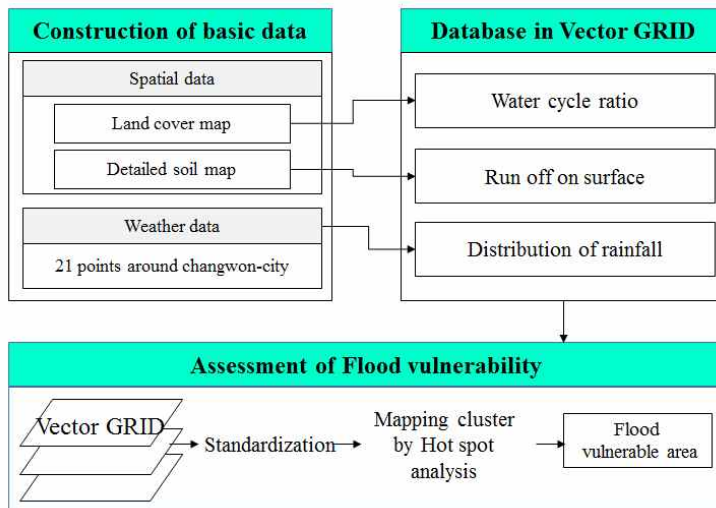


FIGURE 2. Study process

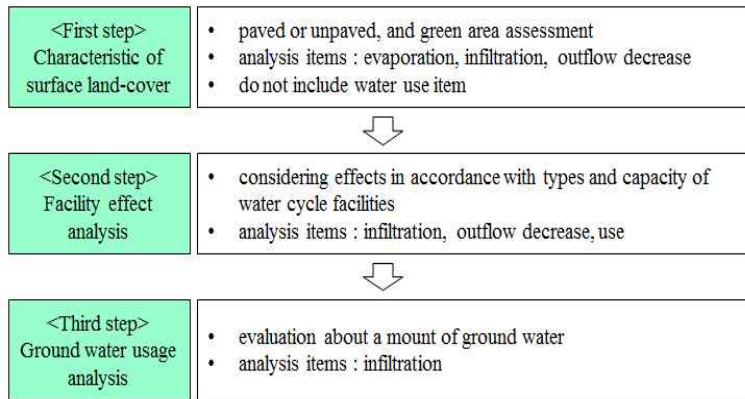


FIGURE 3. Analytical process of water cycle area ratio(Suwon-si, 2011; Song *et al.* 2013)

TABLE 1. Water cycle weight about land-cover types

Land cover type	Attribution of land-cover	Evaporation (A)	Infiltration (B)	Outflow decrease(C)	Weight (A+B+C)
Natural vegetation	Forest, Farmland, paddy, field, orchard etc	50	40	30	120
Paved area	Asphalt	10	0	0	10
	Concrete	10	0	0	10
	Sidewalk brick	10	10	3.8	23.8
Barren	barren	25	40	20.6	85.6
Roof	General	10	0	0	10
	Green roof (under 20cm)	45	15	18.8	78.8
	Green roof (over 20cm)	45	20	20.6	85.6
Artificial ground vegetation	under 90cm	45	25	22.5	92.5
	over 90cm	45	30	24.4	99.4
Pond	pervious	40	50	30	120
	impervious	65	15	26.3	106.3

Source: Suwon(2011), Gyeongnam Green Environment Center(2013), Song *et al.*(2013)

환경부 중분류 토지피복도를 이용하였고, 표 1과 같은 물순환 가중치를 적용하기 위해 토지피복재질의 재분류를 실시하였다. 그리고 공간해상도 200×200m의 Vector GRID를 단위공간으로 설정하여 면적률을 산출한 후, 최종적으로 물순환 면적률을 분석하였다. Vector GRID 공간해상도의 결정은 도시의 일정 공간단위를 결정함에 있어 GRID의 크기는 수백m가 적당하다는 연구 결과를 근거로 200m로 설정하였다

(Song and Park, 2011). 물순환 가중치는 토지피복재질별로 빗물의 증발과 침투, 이용, 유출저감의 4가지 측면을 고려하여 산정되며 (Song *et al.*, 2013), 자연녹지는 토지피복도에서 산림과 논, 밭 등을 고려하였고, 콘크리트는 주거와 공업, 상업지역과 같은 시가화 지역을, 아스팔트는 교통지역, 나대지는 나지, 90cm 이하의 인공녹지는 골프장, 기타초지, 수면 투수는 하천을 선정하여 분석하였다. 지붕과

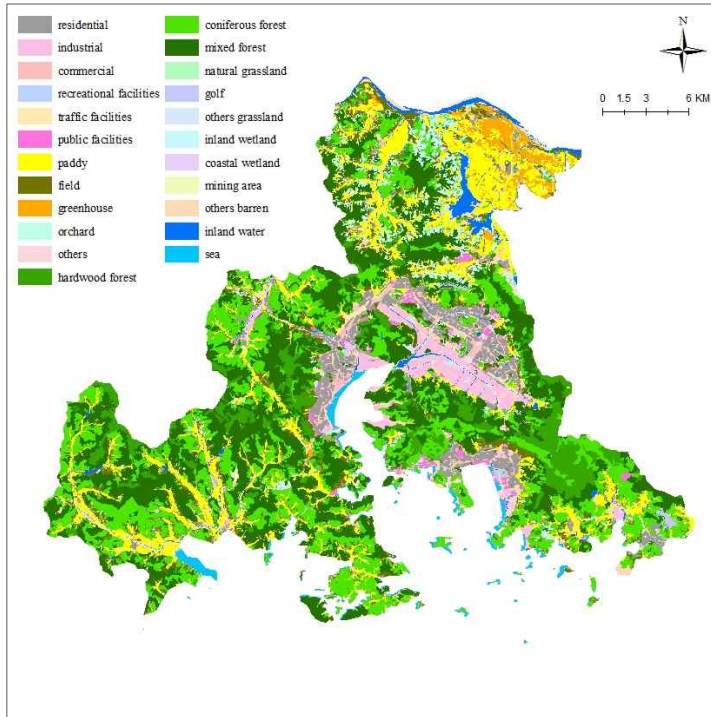


FIGURE 4. Land cover map

인공녹지 등은 자료구축의 한계로 인해 본 연구에서 제외하였다.

한편, 2단계인 물관리 시설의 설치 여부에 대한 분석은 빗물 저장조, 우수녹지, 침투 트렌치, 침투박스와 같은 물관리 시설이 설치되어 빗물의 유출저감, 이용, 침투의 용도로 활용되는 특성을 반영하며(Gyeongnam Green Environmental Center, 2011), 건물 단위로 물관리 시설의 설치에 대한 자료가 구축되어 있다. 3단계인 지하수 이용량은 창원시의 경우 1년에 약 5천만 톤의 지하수를 이용하고 있는 것으로 나타났다. 하지만 도시의 공간특성을 고려하기 위해 Vector GRID를 공간단위로 분석한 본 연구에서 적용하기에 자료 구축에 한계가 있어 물순환 면적을 분석에서 제외하였다.

2) 표면 유출 특성

본 연구에서 표면 유출 특성의 분석은 강우 시에 빗물이 지하로 침투되지 않고 표면으로

유출되는 특성을 고려하고자 하였으며, USDA(United States Department of Agriculture)의 NRCS(Natural Resources Conservation Service)에서 개발된 유출곡선지수(Runoff curve number) 자료를 활용하였다. 유출곡선지수는 강우 시에 직접적으로 유출되는 빗물의 양을 결정하기 위해 고안된 방법으로 소유역을 대상으로 표면유출에 대한 경험적인 분석에 의해 개발되었다(United States Department of Agriculture, 1986). 본래 유출곡선지수는 강우시 빗물이 표면에서 유출량되는 양을 산정하기 위해 활용되고, 강우시 지표면에서 빗물이 머물러있는 양을 산출하는데도 이용이 된다(Lee *et al.*, 2011). 따라서 본 연구에서는 강우량에 대한 자료를 활용하지 않았지만, 동일한 강우가 내린 상황을 가정하여 지표면에서 빗물이 유출되는 특성을 파악하고자 지표면의 공간을 고려하여 유출곡선지수를 분석하였다.

TABLE 2. Classification of NRCS soil types according to soil properties

Class	Properties of soil	
	Composition of soil	Drainage
A	Infiltration : very high Penetration ratio : over 7.62mm/h	very good
B	Infiltration : high Penetration ratio : 3.81~7.62mm/h	good
C	Infiltration : low Penetration ratio : 1.27~3.81mm/h	bad
D	Infiltration : very low Penetration ratio : under 1.27mm/h	very bad

Source : National Institute of Agricultural Science and Technology(2006)

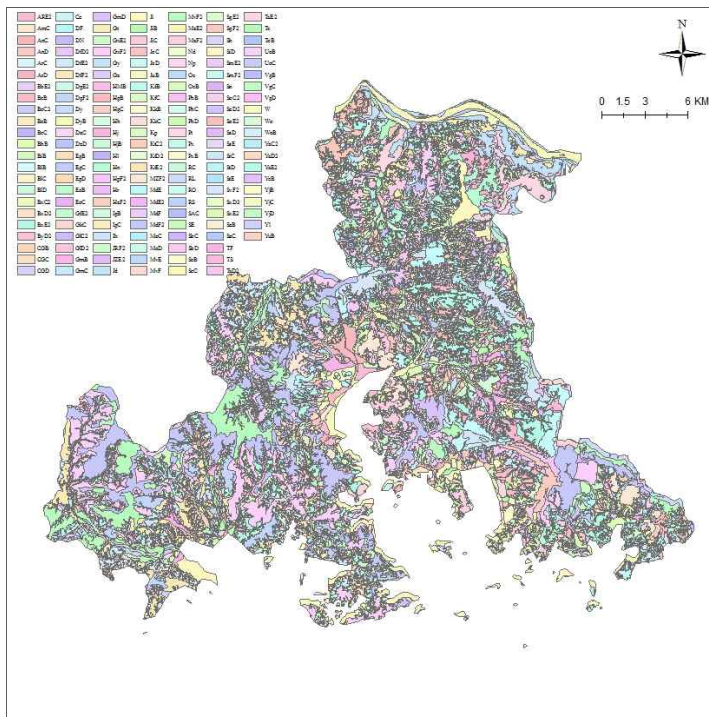


FIGURE 5. Detailed soil map

유출곡선지수 분석은 환경부 중분류 토지피복도와 농업과학기술원에서 제공하는 정밀토양도(그림 5)를 이용하였으며, 분석방법은 우선 정밀토양도의 토양속성을 NRCS의 수문학적 토양특성 분류를 위해 표 2와 같이 토양의 침투능을 기준으로 4개의 토양형으로 재분류하였다(National Institute of Science and

Technology Agricultural, 2006). 그리고 NRCS의 수문학적 토양형과 토지피복도를 바탕으로 유출곡선지수를 산정하였는데, 본 연구에서는 건설교통부에서 제공하는 표 3의 토지피복특성에 따른 유출곡선지수 산정 기준을 바탕으로 분석하였다(Lee *et al.*, 2011). 분석된 유출곡선지수는 GIS 프로그램을 이용하여 공간

TABLE 3. Runoff Curved Number according to Soil characteristics

Land cover		Runoff Curved Number				
big class	medium division	A	B	C	D	
Urbanization	100	residential area	77	85	90	92
		industrial area	81	88	91	93
		commercial area	81	88	91	93
		recreational area	68	79	86	89
		traffic facilities area	98	98	98	98
		public facilities area	81	88	91	93
Agriculture	200	paddy	67	78	85	89
		field	63	75	83	87
		greenhouse	63	75	83	87
		orchard	63	75	83	87
		others	81	88	91	93
Forest	300	hardwood forest	45	66	77	78
		coniferous forest	45	66	77	78
		mixed forest	45	66	77	78
Grassland	400	natural grassland	30	58	71	78
		golf facilities	68	79	86	89
		others	30	58	71	78
Wetland	500	inland wetland	100	100	100	100
		coastal wetland	100	100	100	100
Barren	600	mining area	81	88	91	93
		others	98	98	98	98
Water	700	inland water	100	100	100	100
		sea	100	100	100	100

Source: Lee *et al.*(2011)

해상도 200×200m의 Raster 자료 기반으로 변환하였고, Zonal statistic 기능을 통해 각 Vector GRID 내에 유출곡선지수에 대한 정보를 구축하였다.

3) 강우량 분포

강우량 분포 분석은 창원시 및 인근에 분포하는 국토해양부의 수문조사지점과 창원시 재난안전대책본부의 기상관측지점의 57개 강우량 관측소에서 1999년부터 2008년까지 약 10년간의 관측자료 중 여름철 강우가 집중되는 6월과 8월 사이의 강우량 자료를 활용하였다. 그리고 미 관측지점의 강우량 예측을 위해 ArcGIS의 공간내삽법(Spatial Interpolation Method)의 하나로 공간적으로 인접한 지점 사이의 값은 공통된 위치요인으로 인하여 유사성을 갖고,

두 지점 사이의 거리가 증가할수록 이러한 유사성은 상대적으로 감소하는 방법인 IDW (Inverse Distance Weighted) 기법을 이용하였다(Cho and Jeong 2006; Lee *et al.*, 2011). 분석결과와 공간해상도는 Vector GRID와 동일한 200m×200m로 하였으며, 6월에서 8월에 대한 각각의 강우량 분포 결과를 중첩 분석하여 평균 강우량 분포를 분석하였다. 도출된 결과는 표면 유출 특성 분석과 마찬가지로 Zonal Statistic 기능을 통해 Vector GRID 내에 정보를 구축하였다.

4. 침수 취약성 평가

침수 취약성 평가는 Vector GRID 내에 구축된 공간 정보인 물순환 면적률과 표면 유출

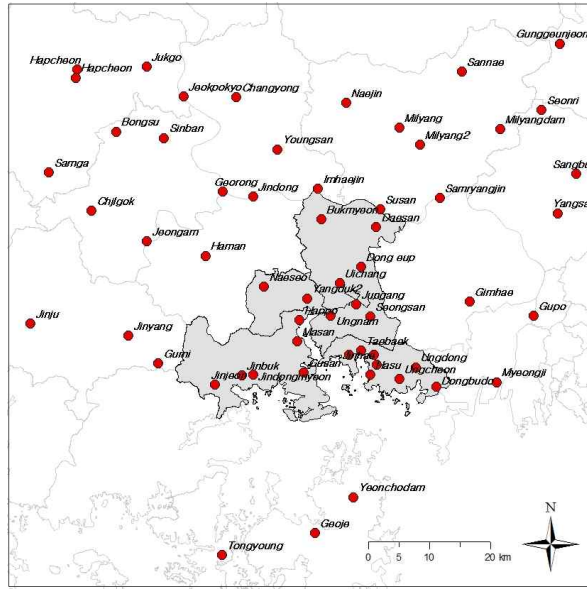


FIGURE 6. Distribution of weather observation point around changwon-city

특성, 그리고 강우량 정보를 활용하여 표준화 작업과 Hot spot 공간통계 분석기법을 통해 분석하였다. 표준화 방법은 식 (1)과 식 (2)를 이용하였으며, 평가요인의 분석치가 높을수록 홍수 취약성 평가에 긍정적인 영향을 미치는 요인인 물순환 면적률과 토양 침투 특성은 식 (1)을, 부정적인 영향을 미치는 강우량은 식 (2)를 활용하였다.

$$\text{standardization} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

$$\text{standardization} = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

여기서, X_{\max} 는 분석치의 최대값, X_{\min} 는 분석치의 최소값, X 는 분석치이다.

각 평가 요인별로 도출된 표준화 결과는 중첩분석을 통해 평균값을 산출하여 침수 취약성을 평가하였다. 또한 침수 취약지역의 공간적 밀집정도를 분석하기 위해 ArcGIS 프로그램의

공간군집분석(Spatial clustering analysis)의 일종인 Hotspot 분석을 실시하였다. Hotspot 분석은 공간적 사상의 집단을 유형화하는 것으로 분석결과에서 도출되는 G_i^* Zscore이 0에 근접하면 공간적 속성 값이 전체 지역의 평균값에 가깝거나 높고 낮은 값들이 이질적으로 분포하며, 높으면 높은 속성 값의 군집을, 낮으면 낮은 속성 값의 군집이 형성된다(Song, 2014). 따라서 본 연구에서는 Hot spot 분석을 통해 Zscore 값이 낮은 지역을 홍수 취약지역으로 추출하였으며, 도시지역의 여름철 홍수 피해를 저감하기 위한 방안에 대해 알아보았다.

결과 및 고찰

1. 침수 취약성 요인별 분석 결과

침수 취약성 평가를 위한 요인별 분석결과 중 우선 물순환 면적률에 대한 결과는 다음과 같다. 물순환성이 양호한 지역(물순환 면적률 80 이상)은 식생과 논, 밭 등 투수성 포장 재질인 도시외곽의 산림 및 농업지역인 것으로

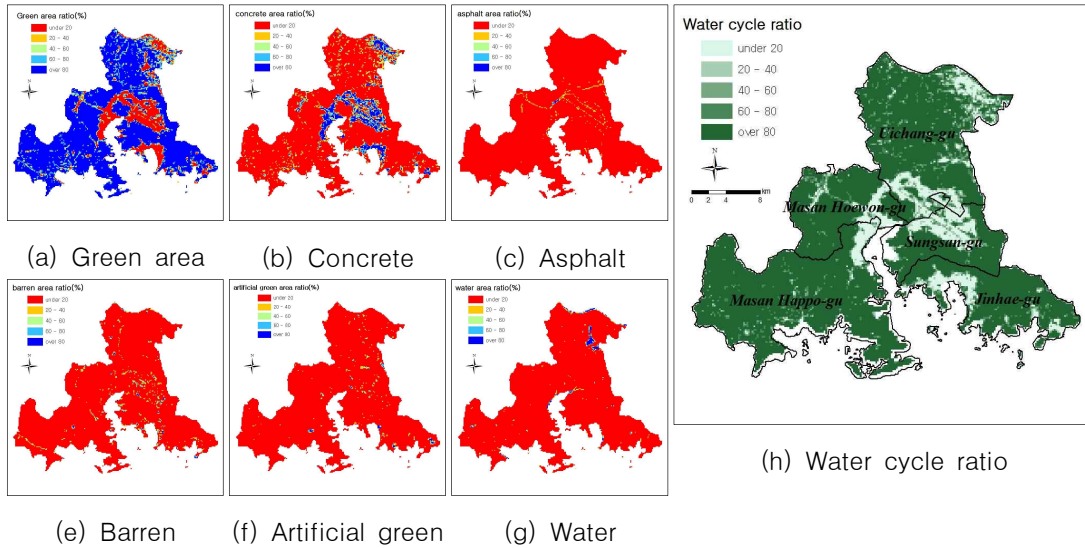


FIGURE 7. Distribution of Water cycle ratio

확인되었다. 반면에 도시지역은 아스팔트 및 콘크리트와 같은 불투수성 재질로 포장되어 있기 때문에 대부분 물순환 면적률이 20이하로 분석되었다. 또한 의창구의 대규모 시설농경지역은 하우스 재배지가 위치해 있어 물순환성이 다른 농경지역에 비해 취약하였다. 한편, 도시지역 주변에는 일부 녹지공원이 위치하여 물순환성이 양호한 지역이 분포하고 있지만, 한정된 공간에 밀집되어 있는 공간분포 특성을 지니고

있다(그림 7).

다음으로 유출곡선지수를 토대로 표면 유출 특성을 분석한 결과를 살펴보면, 표면으로 유출되는 빗물의 양이 많은 지역은 주로 불투수성 재질로 포장된 도시지역으로 분석되었고, 일부 하천지역과 대규모 시설농경지가 위치한 지역에서도 표면 유출이 많은 것으로 나타났다. 반면에 산림지역은 침투가 잘되는 것으로 확인되었다. 분포 패턴을 보면, 물순환 면적률과 유사

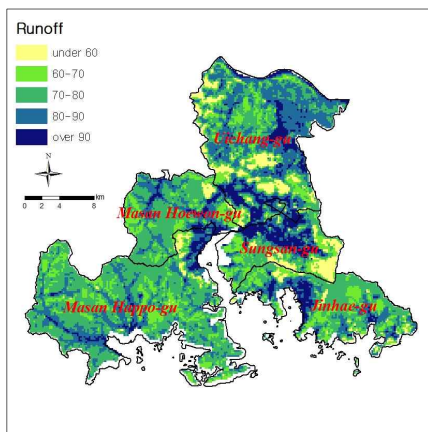


FIGURE 8. Characteristics of runoff

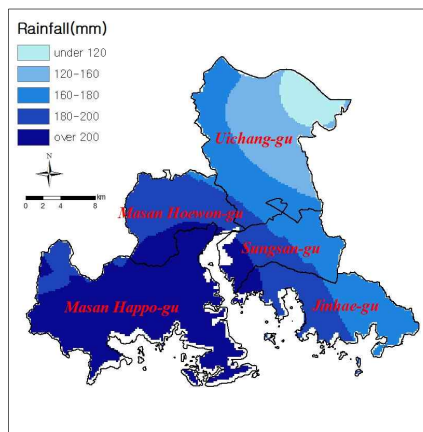


FIGURE 9. Distribution of rainfall

하게 도시지역의 한정된 공간에 밀집된 분포를 보이고 있다(그림 8).

강수량 분포를 분석한 결과, 여름철 창원지역의 대부분의 평균 강수량은 약 100mm 이상으로 나타났으며, 창원시의 북동쪽에 위치하는 지역일수록 강수량이 120mm 이하로 비교적 적은 양을 보였고, 마산합포구 및 마산만과 인접한 일대에서 강수량이 평균 200mm 이상 많은 비가 내리는 것으로 분석되어 지역적으로 강수량 편차가 큰 것으로 나타났다(그림 9). 이러한 이유는 마산합포구는 산간지역이 많아 국지성 강우가 빈번히 발생되기 때문으로 판단되며, 반면에 북동쪽의 대규모 시설농경지역은 대부분 지형이 평탄지이고 내륙에 가깝기 때문에 바다와 인접한 지역보다 상대적으로 강수량이 적은 것으로 사료된다.

따라서 침수 취약성 요인에 대한 결과를 통해 창원시는 아스팔트와 콘크리트로 구성된 시가화 지역이 고밀도로 분포하고 있어 물순환성과 표면 유출 특성이 취약한 지역이 넓게 분포하는 것으로 나타났으며, 여름철 강수량 또한 약 160~200mm의 많은 양의 강우가 발생하기

때문에 집중 호우 시에 하천 범람 및 홍수가 발생할 가능성이 높을 것으로 사료된다.

2. 침수 취약성 평가 결과

Vector GRID 내에 구축된 침수 취약성 평가 요인인 물순환 면적률과 표면 유출특성, 강우량의 공간정보를 토대로 각 요인별 표준화 및 중첩분석을 통해 종합적인 침수 취약성을 평가한 결과는 그림 10과 같다. 평가결과에서 지수가 0에 가까울수록 침수 취약성이 높은 지역이고, 반대로 1에 가까울수록 취약성이 낮은 지역이다. 창원시 북쪽의 의창구 일대는 침수 취약성이 비교적 낮은 것으로 분석되었으며, 평균 강수량도 적고 산림과 농경지 등의 투수성 포장재질이 대부분 피복되어 있어 침투성과 물순환성이 양호하기 때문으로 나타났다. 그리고 비슷한 토지피복형태를 지닌 마산합포구와 마산회원구, 진해구의 도시외곽의 산림지역은 의창구 일대보다 비교적 침수 취약성이 높았으며, 특히 산의 계곡부 지역에서 취약성 지수가 매우 낮은 것으로 확인되었다. 이 일대는 강수량이 많고 침투성이 약한 비닐하우스 등이 다수

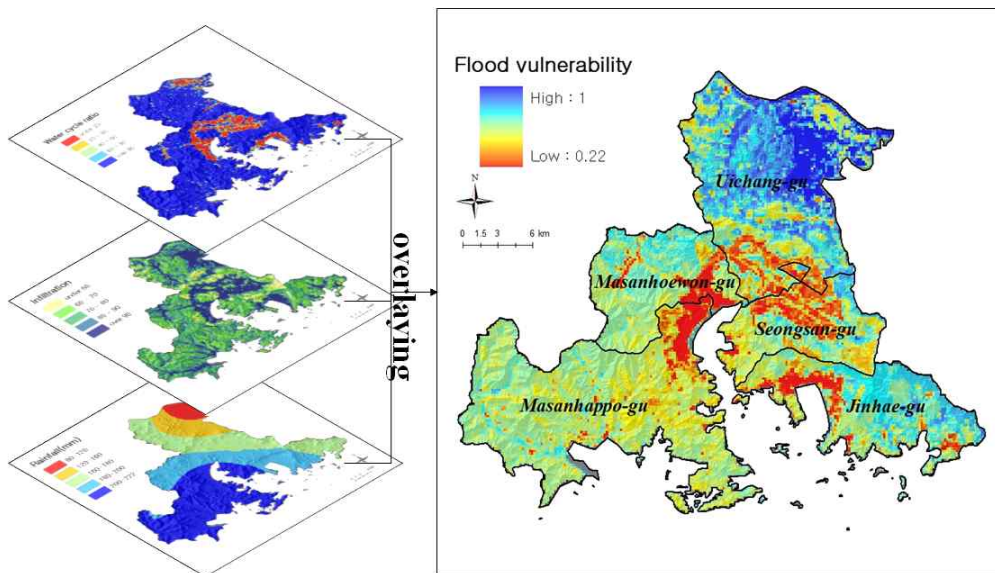


FIGURE 10. Results of flood vulnerability assessment

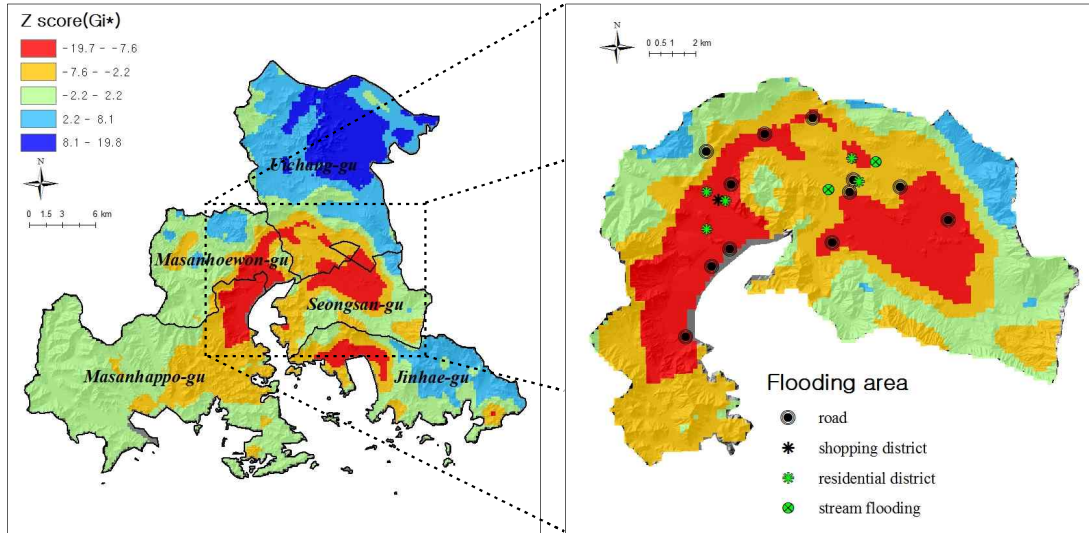


FIGURE 11. Hotspot area of flooding vulnerability and flooding area in urban area(<http://bangjae.changwon.go.kr>)

분포하고 있으며, 계곡 기저부에 위치하고 있어 집중 호우 시 홍수에 의한 피해가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 그림 11는 침수 취약성 평가 지수를 활용하여 Hotspot 공간통계분석을 실시한 결과이다. 성산구 및 의창구와 마산회원구 및 마산합포구 중 마산만에 인접한 도시지역에서 침수 취약지역이 집중적으로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 창원시 재난안전대책본부(<http://bangjae.changwon.ac.kr>)에서 제공하는 창원시 도시지역의 침수취약 구역과 비교한 결과, 본 연구에서 분석된 침수 취약성이 집중된 지역에서 도로 및 상가, 주택 침수와 하천 범람이 빈번히 발생하는 것으로 확인되었다. 이들 지역은 주변에 산악 지형으로 둘러싸여 있는 분지형태의 지형을 지니고 있으며, 강우 시에 계곡부에 물이 모여들어 마산만으로 빠져나가는 하천 형태를 띠고 있다(Song *et al.*, 2013). 그리고 하천의 하류지역에 위치하고 있는 침수 취약성이 집중된 지역은 아스팔트 및 콘크리트와 같은 불투수성의 토지피복재질이 대부분이어서 빗물의 침투성이 낮기 때문에 하천상류지역으로부터 유입되는 빗물이 불어나 침수 및 하천 홍수

가 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 도출된 침수 취약성 평가를 바탕으로 도시 및 환경계획 차원에서 침수 및 홍수를 예방할 수 있는 적절한 대책 방안이 필요할 것으로 보인다.

도시 및 환경계획 차원에서 침수 및 홍수를 예방하기 위한 방안으로는 아스팔트 및 콘크리트와 같은 불투수성 포장 재질 대신 투수성 포장재질로 교체하거나 빗물 침투시설 또는 저장시설 등 하천으로 유입되거나 표면으로 유출되는 빗물의 양을 감소하는 빗물이용시설을 설치하는 것 등이 있다(Gyeongnam Green Environmental Center, 2011). 앞서 언급된 것처럼 창원시 도시지역은 주변의 산악지역으로 둘러싸여 있는 분지형태의 지형적 특성을 지니고 있으며, 하천의 하류지역에 위치해 있다. 따라서 하천의 상류지역에서부터 빗물의 침투율을 높일 수 있도록 투수성 포장 재질 및 주차시설의 설치, 녹지공원 조성 등의 방안이 있으며, 각 가정이나 공공시설기관, 상업시설 등에 빗물 저장시설을 설치하여 하천으로 유입되는 빗물의 양을 감소시킬 수도 있다. 이렇듯 침수 취약성을 예방하기 위한 방안은 침수취약지역 주변의 하천의 흐름

과 토지이용 및 토지피복재질과 같은 주변의 공간특성을 충분히 고려하여 적절한 시설물을 조성함으로써 효율성을 극대화 할 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서 분석된 침수 취약성 평가 결과는 앞으로 도시지역의 홍수 및 침수지역을 사전에 예방하기 위해 도시 및 환경계획 차원에서 공간개선 및 시설물을 적절한 지역에 조성할 수 있는 기초적인 자료가 될 것으로 판단되며, 정책 및 제도적 기반을 마련하는데 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

결 론

본 연구는 경상남도 창원시를 대상으로 도시지역의 홍수 문제를 도시 및 환경계획 차원에서 개선방안을 마련하고자 물순환 면적률과 표면 유출특성, 여름철 평균 강우량을 Vector GRID에 공간정보로 구축하고, 공간통계분석을 통해 도시지역의 침수 취약성 평가를 실시하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

먼저 물순환 면적률을 분석한 결과, 물순환성이 양호한 지역은 도시외곽의 산림 및 농업지역인 것으로 나타났으며, 비닐하우스의 시설농경지역과 도시지역은 물순환 면적률이 매우 낮았다. 표면유출 특성은 도시지역과 하천 및 호수지역에서 표면 유출이 많은 것으로 분석되었고, 반면에 표면유출이 적은 지역은 산림 및 농경지역으로 확인되었다. 여름철 평균 강우량 분포를 분석한 결과는 창원시의 북동쪽의 내륙지역에 위치할수록 강우량이 평균 120mm 이하로 적었고, 마산만과 인접한 해안지역에서 강우량이 평균 200mm로 분석되었다. 이를 토대로 도시지역의 침수 취약성 평가를 실시한 결과, 강우량과 표면유출이 적고 물순환성이 양호한 창원시 북쪽의 의창구 일대는 침수 취약성이 비교적 낮은 것으로 분석되었다. 반면에 도시지역은 침수 취약성이 높은 것으로 나타났는데, GIS 공간통계분석기법인 Hotspot 분석을 활용하여 취약지역의 공간 집중도를 도출한 결과 침수 취약지역이 밀집되게 분포하고 있어 창원

시 도시지역은 침수 취약성에 대한 공간 집중도가 높은 지역이 폭 넓게 나타나는 것으로 확인되었다. 또한 도시지역 주변은 고도 약 600m의 산으로 둘러싸인 분지형태의 지형을 띄고 있어 강우 시에 빗물이 도시지역으로 모여들어 하천 하류지역으로 갈수록 침수피해가 빈번히 발생하는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 도출된 침수 취약성 평가 결과는 투수성 포장재질의 조성지역과 빗물침투시설, 빗물저장시설이 필요한 지역을 설정하는 등 앞으로 도시 및 환경계획차원에서 침수 피해를 예방하는데 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한 최근 이상기후 현상으로 인해 집중호우가 증가되고 있는 시점에서 정부 및 지자체 차원에서 다양한 정책 및 제도를 마련하는데 기초적인 자료가 될 것으로 생각된다.

한편, 본 연구는 토지피복특성과 토양유형 등의 공간자료를 바탕으로 물순환 면적률과 표면 유출 특성을 분석하였고, 이와 더불어 강우량 관측 자료를 활용하여 GIS 공간분석을 통해 도시지역의 침수 취약성을 평가하였다. 향후에는 창원시에 설치된 빗물이용 및 침수, 관리시설, 그리고 지하수 이용량에 대한 조사 자료를 활용하여 물순환 면적률에 대한 추가적인 분석 및 보완이 필요할 것으로 사료된다. 또한 본 연구의 결과와 더불어 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 모델링 분석을 추가적으로 실시하여 도시 및 환경계획 차원에서 보다 진보된 침수 취약지역의 개선방안을 마련할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2013~2014년도 창원대학교 연구비의 지원을 받아 수행된 연구임. **KAGIS**

REFERENCES

- Cho, H.L. and J.C. Jeong. 2006. Application of spatial interpolation to rainfall data. The Journal of GIS Association of

- Korea 14(1):29-41 (조홍래, 정중철. 2006. 강우자료에 대한 공간보간 기법의 적용. 한국GIS학회지 14(1):29-41).
- Choi, H.S. 2007. A study on selecting sites for wetland restoration and creation at watershed level for a water-circulating eco-city: focusing on the application of an environmental and ecological plan. Ph.D. Dissertation. Seoul National University (최희선. 2007. 물순환형 생태도시를 위한 유역차원의 습지조성 입지선정에 관한 연구-환경생태계획 적용방안을 중심으로. 서울대학교 대학원 박사학위논문).
- Chung, E.S., J.S. Lee, K.S. Lee, S.U. Kim and K.T. Kim. 2007. Effectiveness analysis of alternatives to rehabilitate the distorted hydrologic cycle in the Anyangcheon watershed using HSPF. Journal of Korean Society on Water Quality 23(6):973-984 (정은성, 이준석, 이길성, 김상욱, 김경태. 2007. HSPF 모형을 이용한 안양천 유역의 물순환 건전화 대안기술 효과분석. 수질보전 한국물환경학회지 23(6):973-984).
- Filoso, S., J. Vallino, C. Hopkinson, E. Rastetter and L. Claessens. 2004. Modeling nitrogen transport in the Ipswich river basin, Massachusetts, using a hydrological simulation program in fortran(HSPF). Journal of the American Water Resources Association 40(5):1365-1384.
- Gyeonggi Research Institute. 2007. Improving the function of urban green space for stormwater management. Gyeonggi Research Institute Report (경기개발연구원. 2007. 물순환을 고려한 도시 녹지 기능 제고 방안. 경기개발연구원 기본연구 보고서).
- Gyeongnam Green Environmental Center. 2011. Development of master plan of rainwater management in Changwon city. Research Report of Gyeongnam Green Environment Center (경남녹색환경지원센터. 2011. 창원시 빗물관리 기본계획 수립, 경남녹색환경지원센터 연구보고서).
- Lee, J.H., G.J. Park, C.S. Yoo, S.D. Kim and J.Y. Yoon. 2010. Effects of land use change and water reuse options on urban water cycle. Journal of Environmental Sciences 22(6):923-928.
- Lee, T.S., B.G. Song, C.B. Han and K.H. Park. 2011. Analysis of the GIS-based water cycle system for effective rainwater management of Gyeongsangnam-do. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 14(2):82-95 (이택순, 송봉근, 한치복, 박경훈. 2011. 경상남도의 효율적 빗물관리를 위한 GIS 기반 물순환 체계 분석. 한국지리정보학회지 14(2):82-95).
- Lee, W.S., S.G. Jung, K.H. Park and K.T. Kim. 2010. Analysis of urban thermal environment for environment-friendly spatial plan. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 13(1):142-154 (이우성, 정성관, 박경훈, 김경태. 2010. 친환경적 공간계획을 위한 도시의 열환경 분석. 한국지리정보학회지 13(1):142-154).
- Michael, D.W. and A.G. Keith. 2006. The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Penasquitos creek, California. Landscape and Urban Planning 74(2):125-138.

- National Institute of Agricultural Science and Technology. 2006. Classification of hydrologic soil group for using runoff curve number. Report of National Institute of Agricultural Science and Technology (농업과학기술원. 2006. 유출곡선 지수의 활용을 위한 수문학적 토양군 분류. 농업과학기술원 보고서).
- Pouraghniaei, M.J. 2002. Effects of urbanization on quality and quantity of water in the watershed. MSc of Watershed Management, Natural Resources Research Center of Semana, Semnan Province, Iran.
- Seoul. 2004. Water cycle master plan in Seoul. Research Report of Seoul (서울시. 2004. 서울시 물순환기본계획 연구. 서울시 연구보고서).
- Sharma, A.K., S. Gray, C. Diaper, P. Liston and C. Howe. 2008. Assessing integrated water management options for urban developments - Canberra case study. *Urban Water Journal* 5(2):147-159.
- Song, B.G. 2014. Development of environmental planning methodology for mitigation of climate change and heat island effect in urban area. Ph.D. Dissertation. Changwon National University (송봉근. 2014. 기후변화 및 도시열섬 개선을 위한 환경계획기법 개발. 창원대학교 대학원 박사학위논문).
- Song, B.G. and K.H. Park. 2011. The classification of spatial patterns considering formation parameters of urban climate - the case of Changwon city, South Korea -. *Journal of Environmental Impact Assessment* 20(3):299-311 (송봉근, 박경훈. 2011. 도시기후 형성 요소를 고려한 공간유형 분류-창원시를 대상으로-. *환경영향평가학회지* 20(3):299-311).
- Song, B.G., K.H. Park and T.S. Lee. 2013. An assessment of urban water cycle in Changwon-si using GIS-based water cycle area ratio. *Journal of Environmental Impact Assessment* 22(5):397-408 (송봉근, 박경훈, 이택순. 2013. GIS 기반의 물순환 면적률을 활용한 창원시 도심지역의 물순환성 평가. *환경영향평가학회지* 22(5):397-408).
- Suwon. 2011. Water cycle master plan in Suwon. Research Report of Suwon (수원시. 2011. 수원시 물순환 관리 기본계획. 수원시 연구보고서).
- United States Department of Agriculture. 1986. Urban hydrology for small watersheds. Technical Release 55 of United States Departments of Agriculture.
- Venkatesh, G. and H. Brattebø. 2011. Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services: case study of Oslo (Norway). *Energy* 36:792-800.
- Changwon City Disaster and Safety Countermeasures Headquarters. <http://bangjae.changwon.go.kr>.
- Changwon City Homepage. <http://www.changwon.go.kr>. 