

# 홍수취약성과 홍수피해잠재능을 이용한 도시지역 평가비교

## Comparison of Assessments of Urban Areas Using the Flood Vulnerability and Potential Flood Damage Methods

김응석\* · 이승현\*\*

Kim, Eungseok\*, and Lee, Seunghyun\*\*

### Abstract

Recently, urban flood damage has rapidly increased due to climate change, rapid urbanization, and frequent guerrilla heavy rains. Therefore, a quantitative flood damage analysis technique is required for effective policy regarding flooding in urban areas. In this study, the flood vulnerability and potential flood damage (PFD) methods, which are representative methods for analyzing the degree of flood damage in urban areas, were applied. In addition, the results of each analysis method were compared and analyzed using the flood prevention capacity-damage (PCD) matrix technique, which intuitively shows that even if many existing flood protection facilities are built, flood damage can be large when there is insufficient management or heavy rainfall exceeding the design rainfall occurs. The two existing flood damage techniques estimated Seocho-gu to have low flood vulnerability due to high financial independence and many flood damage protection facilities. However, application of the PCD matrix resulted in classifying Seocho-gu as highly vulnerable to flooding. These conflicting results thus demonstrate that a more detailed review and analysis are necessary when establishing a flood protection policy.

**Key words :** Flood Vulnerability, Potential Flood Damage, PCD Matrix

### 요 지

최근 기후변화와 급격한 도시화, 빈번히 발생하는 게릴라성 집중호우로 인해 도시 홍수피해가 급증하고 있다. 따라서 도시지역의 홍수와 관련되어 효과적인 정책수립에 필요한 정량적인 홍수 피해분석 기법이 필요하다. 본 연구에서는 도시지역을 대상으로 홍수피해 정도를 분석하는 대표적인 방법인 홍수취약성 방법과 홍수피해잠재능(PFD) 방법을 적용 하였다. 또한, 홍수방어시설용량-피해(PCD) 매트릭스 기법을 이용하여 각 분석 방법별 결과를 비교 분석하였다. PCD 매트릭스 기법은 기존의 홍수방어 시설이 많이 건설되어 있어도 관리 미흡 또는 설계강우 이상의 호우가 발생시에는 홍수피해가 클 수 있다는 것을 직관적으로 보여주는 기법이다. 기존의 홍수피해 기법 2개를 적용한 결과에서는 서초구는 재정자립도가 높고 홍수피해 방어시설물이 많은 구축되어 있어서 홍수취약성이 낮은 것으로 산정되었다. 그러나 PCD 매트릭스를 적용한 결과에서 서초구는 홍수취약성이 높게 분류되었다. 따라서 이러한 상반된 결과에서 보듯이 홍수방어 정책 수립시에는 보다 세밀한 검토 및 분석이 필요할 것으로 판단되었다.

**핵심용어 :** 홍수취약성, 홍수피해잠재능, 홍수방어시설용량-피해 매트릭스

## 1. 서 론

최근 기후변화 등의 요인으로 세계적인 자연재난의 발생 빈도는 해가 갈수록 증가하고 있다. 특히 태풍 및 홍수로

인한 재난은 자연재난의 대부분을 차지하고 있으며 국내에서도 자연재난 중 태풍과 홍수피해 재난이 가장 빈번하게 발생하고 있다. 현재 우리나라의 경우 계절에 따른 강수 패턴의 변화가 크고, 짧은 시간 내 국지적이고 산발적인

\*정회원, 선문대학교 건설시스템안전공학과 교수(E-mail: hydro70@naver.com)

Member, Professor, Department of Civil Infrastructure Systems and Safety Engineering, Sunmoon University

\*\*교신저자, 정회원, 선문대학교 건설시스템안전공학과 교수(Tel: +82-41-530-2328, Fax: +82-41-530-2926, E-mail: shlee02@sunmoon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Infrastructure Systems and Safety Engineering, Sunmoon University

집중호우가 내리는 경우가 빈번히 발생되고 있으며, 특히 여름철의 강수량의 경우 연 강수량의 60~70%에 해당된다. 특히 도시지역의 홍수피해는 대부분 도로와 주차장 등 불투수층의 증가에 기인하며, 증가된 불투수 면적으로 인해 우수가 지표로 침투하는 능력이 저하되어 침투 유출량이 증가하고, 침투유출 발생시간이 짧아져 홍수로 인한 도시의 재해에 대한 높은 취약성이 높아지고 있다(NEMA, 2007; Kim et al., 2011; Yoon, 2012). 이러한 높은 홍수 취약성에 의해 도로 및 하천의 유실과 농경지 등의 심각한 재산피해와 인명피해가 매년 발생되기 때문에 이에 대한 적절한 구조적 및 비구조적인 대책을 수립할 필요가 있다. 홍수에 대한 방어는 하천의 특징에 따라 결정되는 것으로 동일한 하천이라도 하천의 상류와 하류, 하천의 좌안 우안의 제내지 특징에 따라서 홍수방어대책이 필요하다. 따라서 도시홍수의 취약성 평가와 홍수피해잠재능 산정과 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다.

홍수피해 취약성 평가와 관련된 연구사례는 Multi-Model Ensemble 기법을 이용한 분석, 기후변화 RCP 시나리오에 따른 조건별 분석, 도시지역 하수구역 분구 구분에 따른 분석, 도시 행정구역별 공간적 특성 분석 등 다양한 형태의 연구가 수행되었다(Lee, 2011; Song, 2012; Kim, 2013; Park, 2013). Kim et al. (2014)은 서울시 행정구역별 취약성 평가를 위해 노출, 민감, 적응성 요소를 포함한 취약성-탄력성 지수 분석과 홍수방어시설용량 대비 피해 분석을 위해 매트릭스 분석을 수행하여 자치구별 취약성 우선순위를 산정하였다. Shin et al. (2019)은 홍수취약성 평가를 위해 필요한 자료의 분석을 통계적 기법 중 하나인 군집분석과 주성분 분석을 적용하여 한강유역 도시지역을 대상으로 적용하였다. Lee et al. (2020)은 취약성 평가 기법의 노출, 적응, 민감도의 세부지표 선정에 개관적으로 분석하기 위해 엔트로피 방법과 유클리드 방법을 이용하여 서울시 자치구별 취약성 평가를 수행하였다.

하천의 좌안 및 우안의 제내지 특성, 하천의 상류 및 하류 주변의 행정구역의 특성을 고려할 수 있는 홍수방어 대책기법 중 하나인 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD)은 구조적, 비구조적 대책에 따른 하천의 홍수에 대한 위험성을 판단할 수 있는 치수안전도 평가 기법이다. 이와 관련되어 연구 사례를 살펴보면 Kim and Kim (2003)는 수정 홍수피해잠재능(수정 PFD)을 도입하여 유역의 위험성을 나타내는 지표를 산정하여 제시하였고, Ahn et al. (2006)은 도시하천 유역종합치수 계획 수립에 필요한 치수단위구역별 홍수피해잠재능 산정을 위해 기존의 평가항목 9개에서 추가로 3개 항목(불투수면적비, 유역평균경사, 우수관로 설치비율)을 추가하여 총 12개 항목을 이용하여 홍수피해잠재능을 산정하였다. Kim et al. (2015)은 홍수피해잠재능 분석에서 필요한 하천 유역의 특성 자료의 가중치 산정을 위해 설문조사를 바탕으로 하는 AHP기법을 적용하여 만경강 유역의

홍수피해잠재능을 산정하였다. Kim (2020)은 홍수피해잠재능의 개선을 위해 홍수범람지역의 공간적 범위 표준화를 제시하고 이를 바탕으로 하천별, 행정구역별 특성을 반영할 수 있는 홍수피해잠재능의 수정 기법을 제시하였다. 또한 국외 연구 결과의 경우, DEFRA (2006)에서는 과거의 홍수 침수심과 유속을 이용하여 발생한 사망자의 수를 분석한 후 홍수 위험도를 평가하였으며, UNDP (2004)는 국가별 재해 위험도를 전체 인구 중에서 재해로 인한 발생할 수 있는 사망자 수의 비를 표현하는 DRI (Disaster Risk Index)를 통해 평가하였다. GSPI (2005)는 2005년 발생한 미국의 허리케인 카트리나(Katrina)를 과거의 허리케인들과 비교한 결과 문제점을 지적하고, 홍수뿐만 아니라 통합적인 수자원 관리를 위해서 사회적, 물리적 인프라를 제시하였다. 또한 미공병단에서는 하천에서 위험도를 고려한 홍수피해를 경감시키기 위하여 제방높이에 따른 위험도를 분석하여 홍수 대안을 선정하도록 하였다(USACE, 1996).

따라서 본 연구에서는 현재까지 개발된 다양한 홍수피해 정도를 평가 및 분석 할 수 있는 방법 중 대표적인 방법 중 하나인 홍수취약성 평가기법과, 도시하천의 치수단위 구역별 홍수피해를 평가할 수 있는 홍수피해잠재능 평가기법을 서울시 행정 구역별 자료를 이용하여 2가지 방법을 적용하고 결과를 비교 분석 하였다. 홍수취약성 지수는 Kim et al. (2014)가 제시한 동일한 방법으로 산정하고, 홍수피해잠재능 지수는 MCT (2001)의 방법으로 산정하여 2가지 방법의 비교를 위해서 홍수방어시설용량-피해(PCD) 매트릭스 기법을 적용하여 분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD)

홍수피해잠재능은 개념상 특정 치수단위구역의 홍수에 대한 잠재적인홍수피해의 취약정도를 나타내는 지수이다. PFD의 정의로는 수문요소뿐만 아니라 사회·경제적인 요소까지 포괄하여 특정 치수 단위구역의 홍수에 대한 잠재적인 피해 취약성을 나타내는 지수이다. 또한 MCT (2001)에서 제시한 PFD와 Kim and Kim (2003)가 일부 요소항목을 수정한 PFD구분 할 수 있으며, 본 연구에서는 MCT (2001)에서 제시한 PFD를 이용하여 산정하였다.

MCT (2001)는 홍수피해에 영향을 미치는 요소를 크게 2가지로 잠재성과, 위험성으로 구분하여 방법을 제시하였다. 잠재성의 경우는 인구, 자산, 도시화율, 사회기반시설 4개 인자를 통해 산정하고 있으며 위험성은 홍수피해금액, 확률강우량, 내수방어능력, 외수방어능력, 댐 및 저수지 홍수조절능력 이상 5개 인자로 구성되며 Table 1과 같다.

잠재성( $F_{PO}$ ) 요소는 인구( $F_{PD}$ ), 자산( $F_{PF}$ ), 도시화율( $F_{RUB}$ ), 사회기반시설( $F_{SOC}$ )의 합으로 Eq. (1)와 같이 나타낼 수 있으며, 위험성요소( $F_{RI}$ )는 홍수피해액( $F_{FD}$ ), 확률강우량( $F_{PR}$ ),

**Table 1.** Complementary PFD

Element		Details
Potential ( $F_{PO}$ )		Population ( $F_{PD}$ ), asset ( $F_{PF}$ ), urbanization rate ( $F_{RUB}$ ), importance SOC facility ( $F_{SOC}$ )
Risk ( $F_{RI}$ )	(Damage) Possibility	Cost of the flood damage ( $F_{FD}$ ), probable rainfall ( $F_{PR}$ )
	Defensive vulnerability	Defensive vulnerability of external water ( $F_{EW}$ ), Defensive vulnerability of internal water ( $F_{PUMP}$ ), Dam and reservoir ( $F_{DAM}$ )

외수방어능력( $F_{EW}$ ), 내수방어능력( $F_{PUMP}$ ), 댐 및 저수지 홍수조절능력( $F_{DAM}$ )의 합으로 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다. 마지막으로 최종 PFD는 잠재성 요소와 위험요의 곱으로 Eq. (3)과 같이 나타 낼 수 있다. 여기서  $\beta_1 \sim \beta_9$ 는 계수적 가중치 값이며,  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 는 요소별 지수적 가중치 값이다.

1) 잠재성 요소( $F_{PO}$ )

$$F_{PO} = \beta_1 F_{PD} + \beta_2 F_{PF} + \beta_3 F_{RUB} + \beta_4 F_{SOC} \quad (1)$$

2) 위험성 요소( $F_{RI}$ )

$$F_{RI} = \beta_5 F_{FD} + \beta_6 F_{PR} + \beta_7 F_{EW} + \beta_8 F_{DAM} + \beta_9 F_{PUMP} \quad (2)$$

3) 홍수피해잠재능 지수(PFD Index)

$$PFD = F_{PO}^{\alpha_1} \times F_{RI}^{\alpha_2} \quad (3)$$

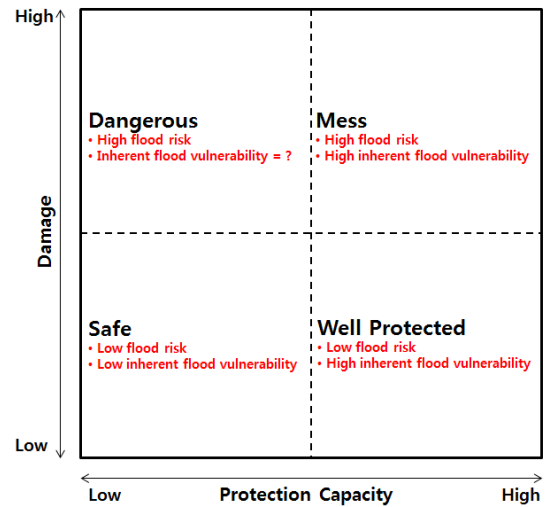
## 2.2 홍수취약성 지수(Flood Vulnerability Indicator)

일반적인 취약성 평가 기법은 안보, 재난 및 재해 등의 연구 분야에서 먼저 적용되었다. 또한 이상 기후에 따른 세계적인 재난의 정도를 정량적으로 평가하기 위해 OECD의 PSR체계를 바탕으로 IPCC (2001)에서는 기후변화의 취약성을 노출, 민감도, 적응능력의 함수로 표현하여 활용되었다.

본 연구에서는 기존의 평가기법에서 많이 사용하는 민감도와 적응능력 2개 함수로 구성된 취약성-탄력성 지수(Vulnerability-Resilience Indicator; VRI)를 개선하여, 노출도, 민감도, 적응능력을 고려한 기법을 적용하였다(Moss et al., 2001; Yoo and Kim, 2008). 또한 각 함수에 필요한 인자들의 단위를 표준화는 T-score 방법을 적용하였으며, 인자들의 가중치는 엔트로피 기법으로 계산하여 산정하였다(Kim et al., 2014).

## 2.3 홍수방어시설용량-피해 매트릭스(Flood Protection Capacity and Damage matrix, PCD Matrix)

미국 기업의 경영전략을 위한 도구로 1970년 초에 보스턴 컨설팅그룹(Boston Consulting Group)에 개발한 기법을 바탕으로 본 연구에서는 Kim et al. (2014)이 제안한 홍수방어시설용량-피해 매트릭스 기법을 적용하였다. PCD 매트릭스의



**Fig. 1.** Flood Protection and Damage Matrix

X축은 홍수방어시설과 관련된 대책으로 주로 구조적 대책을 의미하며, Y축은 과거의 피해지역의 단위면적당 피해금액을 이용하여 홍수방어시설용량 대비 피해액을 매트릭스로 Fig. 1과 같이 나타 낼 수 있다.

Fig. 1에서 1사분면(mess)은 홍수방어시설이 많으나 홍수 피해가 크게 발생하는 지역, 2사분면(dangerous)은 홍수방어 시설이 적으며 홍수피해가 크게 발생하는 지역, 3사분면(safe)은 홍수방시설이 적으며 홍수피해도 작은 지역, 마지막 4사분면(well protected)은 홍수 피해규모가 상대적으로 낮아서 홍수위험은 낮지만 홍수방어 시설이 정상작동 하지 않을 경우 큰 홍수 피해가 유발 될 수 있는 지역을 나타내고 있다. PCD 매트릭스의 X축인 상대적인 홍수방어시설의 크기 산정과 Y축인 과거 발생한 홍수 피해액 산정은 Kim et al. (2014)의 연구에서 제안한 수식과 동일한 방법으로 적용하여 산정하였다.

## 3. 적용 및 결과

### 3.1 대상지역

본 연구의 대상지역은 Kim et al. (2014)의 동일한 지역 및 자료인 서울시의 25개 행정자치구(Fig. 2)를 대상으로

하였으며, 분석에 필요한 주요 자료인 자지구별 빗물펌프장의 세부 현황 자료는 Table 2에 나타내었다. 서울시는 2014년 현재 빗물펌프장의 수는 111개이고, 빗물펌프장이 포함하는 유역면적은 총 26,671 ha이다. 서울시는 총 25개의 행정구역으로 구분되나 빗물펌프장을 가지고 있는 “구”는 총 20개이며, 나머지 5개의 “구”인 강북구, 도봉구, 서대문구, 종로구, 중구에는 빗물펌프장이 존재하지 않아 연구 대상에서 제외하였다.

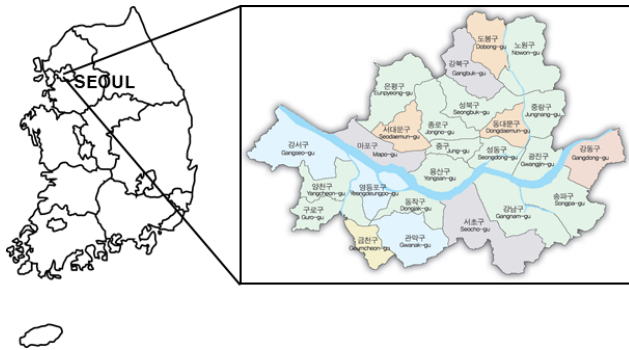


Fig. 2. Administrative Districts in Seoul

### 3.2 취약성 및 PFD 산정

홍수 취약성 평가를 위해서 필요한 인자는 Kim et al. (2014)가 수행한 방법과 동일하게 기존 문헌 조사를 바탕으로 노출은 주택침수세대, 피해인구, 피해액, 민감도는 인구 밀도, 비 녹지면적, 주택밀도, 적응도는 하수관거길이, 재정 자립도, 1인당 소방공무원 수 등 총 9개 인자를 선정하였다(Go and Kim, 2009; Park et al., 2010; Baeck et al., 2011; Hwang and Byung, 2011). 또한, 항목별 가중치 산정은 엔트로피 방법에 의해 산정하여 Table 3에 나타내었다.

두 번째 방법으로 PFD 지수를 산정하였다. PFD 지수를 산정하는데 있어서 세부인자 선정 및 가중계수 산정이 중요하다. 세부인자의 경우 MCT (2001)에서 제시한 인자를 사용하였다. PFD 지수를 구성하는 각 요소의 경우 단위와 분포범위가 서로 다르기 때문에 이들 모두를 고려하여 종합화시킨 무차원지수가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 무차원지수를 산정하기 위해서 대표적인 표준화 방법인 T-Score 방법을 적용하였다. 요소항목에서 지수적 가중값  $\alpha_i$ 는 잠재성 요소와 위험성 요소를 각각 독립적인 요소로 보아 “0.5”씩 동등한 값을 부여하였다. 세부요소별 계수적 가중값  $\beta_i$ 는 본 연구대상지역을 고려하여 다음과 같이 산정하였다. 잠재성 요소의

Table 2. Detention Ponds and Pumping Stations in Seoul

Administrative District	# of Pumping Stations	Basin Area of Detention Pond (ha)	Pump Capacity (HP)	Pumping Capacity (m <sup>3</sup> /min)	Area of Detention Pond (m <sup>2</sup> )	Volume of Detention Pond (m <sup>3</sup> )
Gangnam	1	557.0	12	3,120	84,216	216,000
Gangdong	3	1,610.8	35	11,419	102,240	321,600
Gangseo	6	1,872.1	39	12,875	184,805	398,600
Gwanak	1	101.4	5	1,000	0	0
Gwangjin	5	814.6	37	7,405	33,746	74,800
Guro	8	6,189.2	76	24,274	183,813	350,630
Geumcheon	5	304.8	29	4,352	38,279	70,127
Nowon	1	68.7	4	592	0	0
Dongdaemun	15	2,090.2	75	15,343	59,122	208,800
Dongjak	4	266.9	19	2,670	12,982	39,000
Mapo	10	2,617.0	65	14,426	304,744	792,595
Seocho	7	1,064.0	45	11,889	76,545	140,000
Seongdong	9	1,198.3	54	12,193	90,433	243,050
Seongbuk	2	56.0	11	819	0	0
Songpa	6	3,265.7	59	14,621	213,051	637,200
Yankcheon	4	1,870.7	54	16,947	139,063	375,000
Yeongdeungpo	8	1,215.1	56	14,396	134,460	192,200
Yongsan	11	709.1	42	5,080	94,357	166,271
Eunpyeong	1	22.9	3	350	0	0
Jungrang	4	777.1	30	8,120	71,243	95,000
Total	111	26,671.6	750	181,891	1,823,099	4,320,873

**Table 3.** Considered Indices for Flood Vulnerability Evaluation and Potential Flood Damage of Indices Calculated by Weights

Flood Vulnerability Evaluation Weights (Entropy Method)			Potential Flood Damage (Weighting Factor)		
Categories	Indices	Weight	Categories	Indices	Weight
Exposure	# of inundated households per total area	0.293	Potential (FPO)	Population	0.500
	Number of effected people per total population	0.618		Asset	0.125
	Cost of flood damage (10 <sup>3</sup> won/total area)	0.089		Urbanization rate	0.250
Sensitivity	Population density	0.153		Importance SOC facility	0.125
	Total impervious area per total area	0.693	Risk (FRI)	Cost of the flood damage	0.500
	# of household per total area	0.154		Probable rainfall	0.000
Adaptation Capacity	Length of sewerage per total population	0.110		Defensive vulnerability of external water	0.000
	Financial independence rate (%)	0.283		Dam and reservoir	0.000
	# of fireman per total population	0.607		Defensive vulnerability of external water	0.500

**Table 4.** Calculated Index of Flood Vulnerability Evaluation and Potential Flood Damage

Method	Flood Vulnerability		Potential Flood Damage (PFD)	
Administrative Districts	Flood Vulnerability -Resilience (FVR) Index	Ranks of Flood Vulnerability -Resilience Index	PFD Index	Ranks of PFD Index
Gangnam	5.1	1	43.2	18
Gangdong	1.7	9	47.9	12
Gangseo	-4.1	17	41.1	20
Gwanak	0.7	11	48.6	11
Gwangjin	-2.1	14	53.4	4
Guro	-2.5	16	53.3	5
Geumcheon	-11.9	20	51.6	8
Nowon	1.9	8	45.9	15
Dongdaemun	-2.4	15	61.5	2
Dongjak	-1.2	13	56.1	3
Mapo	3.7	4	46.3	14
Secho	4.8	2	45.7	16
Seongdong	-4.5	18	51.8	7
Seongbuk	2.6	7	49.2	10
Songpa	3.6	5	49.4	9
Yangcheon	-4.8	19	65.0	1
Yeongdeungpo	3.2	6	47.6	13
Yongsan	3.9	3	44.2	17
Eunpyeong	-0.3	12	42.8	19
Jungrang	1.4	10	53.2	6

경우 자연재해가 발생하였을 때 입을 수 있는 인명상, 재산상의 피해 가능성을 뜻하므로, 인명 피해요소와 재산 피해요소로 구분하였다. 먼저 인명 피해요소에 해당하는 인구밀도 지수의 경우 “0.5”를 산정하였으며, 재산 피해요소에 해당하는 자산, 도시화율, 사회간접 시설밀도 지수에 경우에 “0.5”

를 산정하였다. 또한 자산과 사회간접 시설밀도 지수의 경우 지역의 자산 정도를 평가하는 값이므로 같은 범주이기 때문에 자산, 사회간접 시설밀도와 도시화율의 가중계수를 균등하게 나누어 구분하였다. 즉, 도시화율의 가중계수는 “0.25”, 자산 및 사회간접 시설밀도 지수의 가중계수는 각각 “0.125”

로 산정하였다. 두 번째로 위험성 요소의 경우 자연재해가 일어날 가능성과 자연재해 발생을 대비한 방어능력으로 구분하여 각각의 가중계수를 “0.5”로 주었으며, 각 요소의 중요성을 고려하여 가중계수를 분배하였다. 하지만 본 연구의 경우 지역적으로 좁은 지역을 대상으로 수행하기 때문에 확률강우량, 개수율, 댐 및 저수지 지수를 통한 변별력을 반영하기 어려워 가중계수를 “0”으로 산정하였다. 즉, 각 홍수피해액과 내수방어능력의 가중계수를 “0.5”로 최종 산정하여 Table 3에 나타내었다.

서울시의 20개 구별 홍수취약성 평가와 PFD 지수를 산정한 결과는 Table 4에 나타내었다.

첫 번째 홍수취약성 결과를 살펴보면, 강남구가 가장 안전하고, 금천구의 홍수 피해 발생이 높게 산정되었다. 이러한 이유는 강남구의 적응능력 요소인 재정자립도와 하수관거 길이가 다른 행정구역 대비 상당히 높게 산정되어 홍수피해 정도가 낮게 평가 되었으며, 금천구는 과거 홍수피해에 따른 노출도와 민감도 인자가 적응도 보다 높게 산정되어 홍수에 취약한 것으로 나타났다. 그러나 노출도와 민감도만을 고려한 지수는 양천구가 가장 높아 미래의 홍수에 대해 피해가 클 것으로 예상되며, 반대로 마포구는 미래 홍수 피해가 가장 작을 것으로 예상지역으로 산정되었다.

두 번째 PFD 산정 결과 강서구가 홍수 피해가 발생할 가능성이 낮게 산정되었으며, 양천구의 경우 가장 높게 나타났다. 특히 양천구의 경우 홍수로 발생할 수 있는 잠재적인 피해 정도를 나타내는 잠재성 요소( $F_{PO}$ )와 홍수피해가 발생할 가능성과 이에 대한 방어능력 정도를 나타내는 위험성 요소( $F_{RI}$ )가 각각 다른 지자체보다 높아 홍수 피해에 대한 잠재성이 높게 나타났다. 즉 이는 홍수취약성 평가 결과와 거의 유사한 결과를 보여 주고 있다.

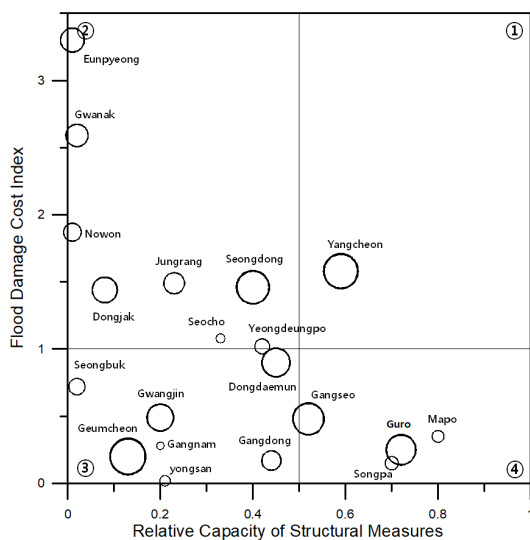
### 3.3 PCD 매트릭스를 이용한 홍수취약성과 홍수 피해잠재능 분석

본 연구에서는 PCD 매트릭스를 적용하여 홍수취약성 지수와 홍수피해잠재능 지수를 비교 분석하여 Fig. 3에 나타내었다. PCD 매트릭스 분석을 위해 사용된 자료는 Table 1의 서울시 20개 자치구별 2002-2011년까지의 10년간 홍수 피해액과 자치구별 우수지 용량과 빗물펌프장 펌프의 토출량을 적용하였다.

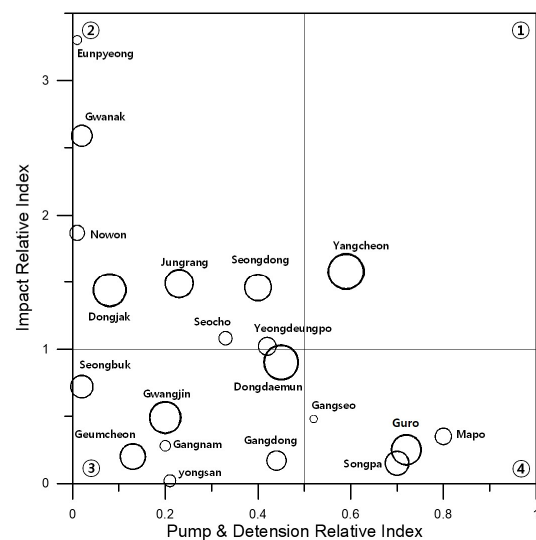
PCD 매트릭스 기법을 이용하여 서울시 20개 행정 “구”를 대상으로 계산한 홍수취약성 결과는 Fig. 3(a)와 같으며, 홍수피해잠재능 결과는 Fig. 3(b)에 나타내었다. 각 방법별 PCD 매트릭스의 심볼의 크기는 FVR 지수 값과 PFD 지수 값을 이용하여 나타내었다.

Fig. 3의 PCD 매트릭스 결과를 살펴보면 1사분면은 홍수 방어 시설이 많음에도 불구하고 홍수피해가 빈번하게 크게 발생하는 지역이다. 홍수취약성에서는 양천구는 홍수방어 시설이 많음에도 과거 홍수피해 금액이 높은 지역으로 홍수취약성이 크게 산정되었으며, 홍수피해잠재능 지수 또한 동일하게 높게 산정되어 미래 홍수에 대해 피해가 높을 것으로 예상되었다. 대표적인 침수사례로 양천구 신월동의 경우를 보면 설계빈도를 초과한 집중호우로 인해 발생한 하수관의 월류로 인해 저지대 등의 주택 등이 매년 침수가 반복적으로 발생하는 지역으로 알려져 있어 PCD 매트릭스의 분석에 따른 2가지 적용 결과가 대체적으로 타당한 것으로 판단된다.

PCD 매트릭스의 2사분면은 8개(은평구, 관악구, 노원구, 동작구, 중랑구, 성동구, 서초구, 영등포구) 행정 자치구는 포함하고 있으며, 대체적으로 홍수방어시설이 부족하고 홍수피해 규모도 크게 발생하여 추후에는 홍수피해 저감을



(a) Compared to Flood Vulnerability-Resilience Index



(b) Compared to Potential Flood Damage Index

Fig. 3. Flood Vulnerability and Potential Flood Damage Using PCD Matrix



위해 홍수 방어시설이 시급히 필요한 곳이다. 특히 서초구의 경우는 SM (2011)에서 재정자립도가 높아 홍수취약성 지수와 홍수피해잠재능 지수가 모두 낮으나 PCD 매트릭스에서는 홍수위험도가 높은 것으로 산정되었다. 즉 이러한 이유는 과거에는 대체적으로 큰 홍수 피해는 없었으나 2011년에 발생한 강남역 도심 홍수피해와 우면산 산사태 등의 큰 피해를 고려한다면 제안된 PCD 매트릭스 분석 결과가 타당하다고 판단된다.

PCD 매트릭스의 3사분면은 홍수방저시설이 상대적으로 적고 홍수피해도 역시 빈번하지 않은 지역으로 7개(성북구, 동대문구, 광진구, 금천구, 강남구, 강동구, 용산구) 행정구역을 포함하고 있으며, 다른 자치구와 비교해 상대적으로 안전 지역으로 구분된다. 언급한 7개 행정구역 역시 과거 큰 호우로 인해 상대적으로 다른 자치구와 비교해 큰 피해가 없었던 것으로 분석된다.

PCD 매트릭스의 4사분면은 과거 홍수피해규모가 상대적으로 작고 홍수방어시설도 많은 지역이나 홍수방어시설이 기계고장 및 운영자 미숙으로 인해 정상적으로 운영되지 않을 경우 큰 홍수를 유발할 수 있는 지역으로 4개(강서구, 구로구, 마포구, 송파구) 행정구역을 포함하고 있다. 홍수취약성 지수와 홍수피해잠재능 지수 분석에서 구로구는 거의 유사한 결과를 보여주었으며, 송파구와 마포구의 경우는 재정자립도가 각각 6위, 9위이며 대표적 홍수방어시설인 펌프 토출량은 Table 1에서 14,621 m<sup>3</sup>/min, 14,426 m<sup>3</sup>/min으로 각각 4위, 5위로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 송파구와 마포구는 홍수취약성 지수와 홍수피해잠재능 지수가 모두 낮은 것으로 계산되었다. 그러나 송파구와 마포구는 빗물펌프장이 건설 이전에는 홍수피해가 빈번한 지역이며, 특히 송파구의 경우는 1984년에 풍납동 대홍수로 인해 20,962가구가 침수되어 85,000명의 이재민이 발생되었던 지역으로 PCD 매트릭스 방법이 보다 타당한 결과를 제시한 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 서울시 20개 행정 자치구를 대상으로 홍수취약성 지수와 홍수피해잠재능 지수를 방법별로 산정 후 결과를 바탕으로 Kim et al. (2014)가 제안한 PCD 매트릭스 기법을 이용하여 직관적으로 행정구역별 홍수피해 정도를 4개로 구분하여 비교 분석하였다.

기존의 홍수취약성 평가 기법에서는 구조적인 홍수방어 대책이 많이 갖추어져 있을 경우 홍수가 발생할 수 있는 가능성이 작아지는 경향으로 결과가 산정될 수 있는 구조로 과거 피해 등 노출 지수와 민감도 지수만을 대체적으로 이용하여 계산하였다. 또한 홍수피해잠재능(PFD)은 홍수인해 발생할 수 있는 잠재적인 피해 정도와 발생할 가능성에 대한 방어능력을 이용하여 산정하였다.

그러나 실제로 2005년 미국 허리케인 ‘카트리나’에 의해 대규모 홍수피해를 입은 뉴올리언즈의 경우는 지역의 80% 이상이 해수면보다 낮아, 하천 제방에 의해 홍수피해가 억제되고 있었다. 또한, 2022년 8월에 발생한 서울시 강남구와 서초구의 홍수피해는 구조적 홍수방어시설에 의해 홍수피해가 저감되고 있을 때는 홍수피해가 실제로 자주 발생하지 않는다고 하더라도 잠재적 홍수피해가 크게 발생 할 수 있다는 것을 보여 주는 것으로 홍수방어시설이 충분히 갖추어져 있다고 하더라도 관리자의 미숙련도와 방어시설물의 관리가 미흡 할 경우 의외로 많은 피해가 발생할 수 있음을 보여주는 사례이다. 따라서 과거의 홍수 피해액과 구조적 홍수방어시설의 규모를 고려하여 홍수피해 정도를 나타낼 수 있는 PCD 매트릭스 기법이 필요하다고 판단되었다.

즉 홍수방어시설의 건설규모가 상대적으로 많아 홍수피해가 억제되고 있는 지역을 잠재 홍수피해가 큰 지역으로, 본 연구결과에서는 서울시의 행정 자치구 중에서 강서구, 구로구, 송파구, 마포구가 분류되었다. 그 중 송파구와 마포구는 재정자립도와 홍수방어시설 규모로 인해 홍수 취약성 지수가 낮게 산정되었으나, 본 연구에서는 잠재 홍수피해가 높은 PCD 매트릭스 4분위에 산정되었다. 또한 은평구, 관악구, 노원구, 동작구, 중랑구, 성동구, 영등포구는 홍수피해가 많이 발생함에도 불구하고 홍수저감 시설의 용량이 충분하지 않은 지역으로 분류되어, 향후 구조적 홍수방어시설에 대한 투자가 이루어져야 하는 지역으로 산정되었다. 즉, 기존의 홍수피해 정도를 정량화 하여 나타내는 대표적인 홍수취약성 지수와 홍수피해잠재능 지수는 사용되는 인자 및 가중치 산정에 따른 작은 결과 값 차이를 보여 주었지만 비슷한 결과를 나타내었다. 그러나 이들 2가지 방법을 PCD 매트릭스 분석 결과로 나타낼 경우 4분위 결과는 기존의 홍수피해의 결과와 상반된 결과를 보여 줄 수 있다는 것을 본 연구에서 증명되었다고 판단된다.

PCD 매트릭스 방법은 4분위로 나누어 지역의 특징을 구분하므로 경계선 근처에 존재하는 지역들은 크지 않은 차이에도 이분법적으로 구분되어진다는 단점이 있지만, 잠재 홍수피해를 고려하여 향후에 도시홍수 방제정책을 할 때 학술적으로 기여도가 클 것으로 판단된다.

본 연구에 제시한 홍수 취약성 지수와 홍수피해잠재능 지수를 바탕으로 분석한 PCD 매트릭스 방법은 도시지역 혹은 자연유역 등의 홍수방어 시설 투자 및 정책 결정시 보다 신뢰성 있는 기법으로 활용될 수 있다고 판단된다.

## References

- Ahn, J.Y., Kagn, D.S., and Yoon, Y.N. (2006). An improvement of estimation technique on potential flood damage. *Proceeding of Korean Society of Civil Eng.* pp. 2039-2042.
- Baeck, S.H., Choi, S.J., Hong, S.J., and Kim, D.P. (2011).

- A study on comparison of normalization and weighting method for constructing index about flood. *Journal of Korean Wetlands Society*, Vol. 13, No. 3, pp. 411-426.
- Department of the Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA). (2006). *Flood risks to people*. FD2321/TR2, Environment Agency, London.
- Go, J.K., and Kim, H.S. (2009). *A study on vulnerability assessment to climate change in Gyeonggi-Do*. Gyeonggi Research Institute.
- Gulf States Policy Institutes (GSPI). (2005). *From flood control to integrated water resources management*.
- Hwang, H., and Byung, B.S. (2011). Building vulnerability index on climate change: Focused on seoul metropolitan city. *Journal of Environmental Policy and Administration Society*, Vol. 19, No. 4, pp. 93-119.
- IPCC. (2001). Climate change 2001: Impact, adaptation and vulnerability. In J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, and K.S. White (Eds.), *Third assessment report* (pp. 77-100). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kim, B.K., Jang, D.W., Zhang, N., and Yang, D.M. (2011). The deduction of urban flood risk factor considering climate change. *Journal of Safety and Crisis Management*, Vol. 7, No. 1, pp. 125-142.
- Kim, C.S. (2020). *Improvement of evaluation method for potential flood damage using flood risk map (Ansung river basin application case)*. Master's thesis, Kongju National University, Kongju, Korea.
- Kim, E.S., Cho, Y.J., Choi, H.I., and Chung, G.H. (2014). Evaluation of inherent flood vulnerability in seoul administrative districts using flood protection capacity and damage matrix. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 2, pp. 1-9.
- Kim, I.D., Ahn, W.S., Ahn, J.H., and Lee, C.Y. (2015). Evaluation of potential flood damage with basin characteristics using analytical hierarchy process. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 5, pp. 229-238.
- Kim, J.H., and Kim, Y.O. (2003). Improving potential flood damage. *Proceeding of Korean Society of Civil Eng.*, pp. 2373-2378.
- Kim, J.S. (2013). *Urban flood vulnerability mapping for seoul Korea*. Master's thesis, Ewha Womans University, Seoul, Korea.
- Lee, M.H. (2011). *Korean flood vulnerability assessment on climate change*. Master's thesis, Sejong University, Seoul, Korea.
- Lee, S.M., Choi, Y.J., and Yi, J.E. (2020). Urban flood vulnerability assessment using the entropy weight method. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 20, No. 6, pp. 387-397.
- Ministry of Construction and Transportation (MCT). (2001). *A study on the improvement method of economic analysis in flood control project*.
- Moss, R.H., Brenkert, A.L., and Malone, E.L. (2001). *Vulnerability to climate change: A quantitative approach*. Prepared for the U.S. Department of Energy.
- National Emergency Management Agency (NEMA). (2007). *Report of the innovative national disaster management system*.
- Park, J.H. (2013). *Flood Vulnerability based on bias-corrected RCP scenarios at a Si-Gun level*. Master's thesis, Seoul University, Seoul, Korea.
- Park, T.S., Yeo, C.G., Choi, M.H., and Lee, S.O. (2010). Flood damage index regarding regional flood damage characteristics. *Journal of Korean Society of Civil Engineers B*, Vol. 30, No. 4, pp. 361-366.
- Seoul Metropolitan (SM). (2011). *A flood damage white paper*.
- Shin, H.J., Choi, Y.J., and Yi, J.E. (2019). Analysis of the local characteristics of flood damage vulnerability in an urban area: The Han River basin. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 5, pp. 293-303.
- Song, Y.S. (2012). *Quantitative relationship between flood vulnerability and urban inundation characteristics*. Master's thesis, Hanseo University, Seosan, Korea.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (1996). *Risk-based analysis for flood damage reduction studies*. Washington, DC.
- United Nations Development Programme (UNDP). (2004). *Reducing disaster risk: A challenge for development*. New York, NY: United Nations Development Programme.
- Yoo, G.Y., and Kim, I.A. (2008). Development and application of a climate change vulnerability index. *Korea Environment Institute*, Vol. 2008, No. 5, pp. 1-88.
- Yoon, S.G. (2012). *Flood risk and vulnerability analysis in an urban stream by climate change*. Ph.D. dissertation, University of Seoul, Seoul, Korea.

---

Received	September 4, 2022
Revised	September 5, 2022
Accepted	September 16, 2022