내수침수시나리오와 침수피해곡선을 활용한 도시지역 내수침수피해특성 분석

Analysis of Urban Flood Damage Characteristics Using Inland Flood Scenarios and Flood Damage Curve

신지예* · 임성민** · 김중훈*** · 김태웅****

Shin, Ji Yae*, Lim, Sung Min**, Kim, Joong Hoon***, Kim, Tae-Woong****

Abstract

Recently, in Korea, localized heavy rainfall events have occurred frequently due to climate change. Especially, since urban areas depend heavily on pump and pipe systems, extreme rainfalls that exceed the design capacity of drainage facility result in increasing inland flood damage. This study proposed a methodology to analyze urban flood damage characteristics in inland flood prone areas. After firstly constructing rainfall scenarios which have various durations and intensities, inland flood scenarios were developed using XP-SWMM. This study presented the inland flood damage analysis (IFDA) to calculate inland flood damage from the inland flood scenarios. Based on the inland flood scenarios and corresponding flood damage curves, the characteristics of damage due to inland flood were analyzed using the relationships among precipitation depth, flood depth, and flood area. The proposed method can be used to identify the storm event resulting in heavy flood damage, and to predict the flood area, depth and damage from various storm events.

Key words : Flooding area, Flood damage curve, Inland flood, Rainfall scenario

요 지

최근 우리나라에서는 기후변화에 의한 집중호우의 영향으로 여름철마다 내배수 시설물의 설계빈도를 벗어나는 강우사상이 빈번하게 발생하고 있다. 특히 불투수성이 큰 도시지역의 경우에는 우수관거 및 펌프장에 대한 의존도가 높아 극치강우로 인한 내수침수의 발생 및 그 피해가 증가하고 있다. 본 연구에서는 내수침수 위험도가 높은 지역의 내수침수피해 특성을 분석할 수 있는 방법을 제시하였다. 부산시 연제구 거제지구를 대상으로 다양한 지속시간과 강우강도를 고려한 강우시나리오를 구축하였으며, XP-SWMM을 활용하여 내수침수시나리오를 구축하였다. 본 연구에서는 다차원법을 바탕으로 만들어진 내수침수피해액 산정법을 활용하여, 침수심과 침수면적에 따른 침수피해액을 산정한 후, 내수침수시나리오에 따른 침수피해곡선을 작성하였다. 또한 이를 바탕으로 대상지역의 내수침수피해 특성을 분석하였다. 본 연구를 통하여 침수가 발생하기 시작하는 강우량 및 큰 침수피해를 유발하는 호우사상을 파악하며, 침수가 발생하는 지역의 침수면적, 침수심, 침수피해액을 예측하는 수단으로 활용할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 내수침수, 호우시나리오, 침수면적, 침수피해곡선

1. 서 론

단시간에 발생하는 국지성 집중호우에 의한 도심지역의 침

수피해가 최근 증가하고 있다. 집중호우란 한 시간에 30 mm 이상 또는 하루에 80 mm 이상의 비가 내리거나 연강수량의 10%에 상당하는 비가 하루에 내리는 것을 의미한다(Korea

*정회원. 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정(E-mail: starzee@hanyang.ac.kr)

Member. Graduate Research Assistant, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

**고려대학교 대학원 건축사회환경공학부 석사과정

Graduate Research Assistant, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

***정회원. 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

Member. Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

****교신저자. 정회원. 한양대학교 공학대학 건설환경플랜트공학과 부교수(Tel: +82-31-400-5184, Fax: +82-31-436-8170, E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

Meteorological Administration). 이러한 국지성 집중호우는 하천범람에 의한 외수침수보다는 우수관거 및 펌프장의 용량 부족이 주원인인 내수침수를 유발한다. 특히, 도시지역에서의 국지적인 집중호우는 우수배제 시스템의 설계용량을 크게 초과하는 강우를 발생시키고 있으며(Lee, 2013), 최근 5년간 부산과 서울을 비롯한 여러 도시에서 침수피해를 발생시키는 주요 재해로 손꼽히고 있다. 기상청(Korea Meteorological Administration)에 의하면 시간당 30 mm 이상의 집중호우의 발생빈도는 1980년과 비교하여 2000년대에 약 30% 정도 증가하였다. 또한, IPCC 4차 보고서에 의하면 기온이 증가하고, 대기 중의 수증기 양이 증가하면서 특정지역에 많은 수증기의 유입이 빈번해지면서 집중호우의 발생빈도는 증가할 것으로 예측된다(IPCC, 2007). 우리나라에서도 집중호우의 발생빈도가 현재보다 증가될 것으로 예측되고 있으며, 내수침수의 피해를 저감하기 위한 대응이 효과적으로 이루어지지 않는다면 도시지역에서의 내수침수에 의한 피해는 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 도시지역 내수침수에 대비하기 위한 합리적인 대응책 마련을 위하여 내수침수시나리오 및 침수피해곡선을 개발하고 도시지역의 내수침수피해 특성을 분석하고자 한다.

침수피해액에 영향을 미치는 요인들은 매우 다양하지만, 그 중 침수심이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(USACE, 2013). 침수피해곡선은 침수심과 침수피해액과의 관계를 도식적으로 나타내는 것으로 미국의 연방재난관리청(Federal Emergency Management Agency: FEMA)과 일본의 건설성을 비롯하여 호주와 영국에서도 침수피해액 산정을 위하여 활용되고 있다(Ministry of Construction and Transportation, 2004; Genovese, 2006; Queensland Government, 2002). 특히, 미국 홍수보험프로그램(The National Flood Insurance Program)에서는 침수피해곡선을 활용하여 일반주택을 대상으로 면적당 침수심에 해당하는 예상 침수피해액을 제공한다. 국외에서는 정확도 높은 침수피해액을 산정하기 위하여 침수피해곡선을 활용한 다양한 침수피해액 산정방법 및 침수피해곡선 도출방법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Oliveri and Santoro, 2000; Dutta *et al.*, 2003). 국내에서는 Kang *et al.*(2010)이 저수지 하류부에 모의된 침수심별 침수피해액 자료를 활용하여 침수심-피해액 곡선을 도출하여 댐 붕괴시 발생할 수 있는 침수심과 침수피해액을 예측한 바 있다. 그러나, 국내에서는 과거의 침수자료가 매우 부족하여 관측자료를 활용한 침수피해곡선 도출이 매우 어려운 실정이다. 과거 침수자료가 없는 지역에 대하여 Bouwer *et al.*(2009)는 42개의 침수 시나리오를 활용하여 침수피해곡선 및 토지이용별 침수피해액 관계를 도출한 바 있으며, Prettenthaler *et al.*(2010)은 홍수로 인하여 발생할 수 있는 144개의 댐 붕괴 시나리오를 구축하여 침수피해곡선을 작성한 바 있다. 본 연구에서도 과거에 관측된 침수자료를 구할 수 없는 상황을 고

려하여 다양한 강우시나리오를 대상지역에 모의하여 내수침수시나리오를 구축한 후 침수피해곡선을 작성하고자 한다.

본 연구에서 활용하는 내수침수시나리오에는 강우량, 침수면적, 침수심, 침수피해액의 정보가 포함되어 있으며, 침수면적과 침수심은 해당 강우시나리오를 XP-SWMM을 활용하여 대상지역에 모의한 결과이다. 침수피해액은 Ministry of Construction and Transportation(2004)에서 제시한 다차원 홍수피해산정법(이하 다차원법)을 기반으로 산정하였다. 다차원법은 침수지역의 자산가치, 전체 면적에 대한 침수면적의 비율을 나타낸 침수편입율, 침수심에 따른 침수피해율을 적용하는 침수피해액 산정법이다. 또한, 본 연구에서는 내수침수시나리오와 침수피해곡선을 활용하여 강우량과 침수심, 침수면적과 침수면적 등의 회귀관계를 토대로 대상지역의 침수특성을 도출하고자 한다.

2. 내수침수시나리오

국내에서는 과거의 침수피해에 대하여 침수심에 따른 침수면적이 함께 조사된 자료가 충분치 않다. 따라서, 본 연구에서는 도시지역에서 내수침수가 발생하는 침수형상을 파악하기 위하여 내수침수시나리오를 구축하였다. 다양한 강우시나리오에 대하여 도시유출모형인 XP-SWMM으로 모의한 침수심과 침수면적이 침수형상을 나타내며, 침수형상에 따른 침수피해액이 계산된다. 따라서, 내수침수시나리오는 강우량, 침수심, 침수면적, 침수피해액의 정보를 포함하고 있다. 내수침수시나리오를 구축하는 절차는 Fig. 1과 같다.

2.1 강우시나리오 구축

강우의 실관측 자료는 범위와 조건이 제한적이므로 다양한 강우에 대한 침수 모의를 위하여 본 연구에서는 강우시나리

Fig. 1. Flow Chart of Making Inland Flood Scenarios.

Table 1. Rainfall Scenarios

Accumulated rainfall (mm)		Duration (min)												
		180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900
Hourly rainfall (mm/hr)	20	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
	30	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450
	40	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600
	50	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
	60	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900
	70	210	280	350	420	490	560	630	700	770	840	910	980	1050
	80	240	320	400	480	560	640	720	800	880	960	1040	1120	1200

오를 구축하여 내수침수시나리오를 위한 기본 자료로 활용하였다. 강우시나리오에서 강우의 지속시간을 3시간부터 1시간씩 증가시켜 15시간까지의 13가지의 지속시간을 고려하였으며, 시간당 강우량은 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 mm 등 7가지 강우강도를 고려하였다. 따라서 강우시나리오는 Table 1에 정리된 바와 같이 총 91 가지 시나리오를 가진다. Table 1의 누적강우량은 각각 하나의 강우시나리오이며, 가장 작은 누적강우량 60 mm(지속기간 3시간 강우강도 20 mm/hr)가 첫 번째 시나리오가 되며, 누적강우량 1200 mm(지속기간 15시간 강우강도 80 mm/hr)는 마지막 91번째 시나리오가 된다. 강우량으로 표현되는 강우시나리오는 Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2011)에서 제시한 Huff 4분위를 활용하여 강우주상도로 변환되었다.

2.2 도시유출모형을 활용한 침수심과 침수면적 산정

2.1절에서 구축된 강우시나리오는 도시유출모형의 입력자료가 되며, 도시유출모형은 강우시나리오에 의한 침수심과 침수면적을 모의하는데 활용된다. 도시유출모형이란 도시지역에서 유출해석을 할 수 있도록 도심지의 특성을 반영하여 개발된 모형으로 합리식(Rational Method)을 시작으로 RRL(Road Research Laboratory Method), ILLUDAS(Illinois Urban Drainage Area Simulator), SWMM(Storm Water Management Model), STORM(Storage, Treatment, Overflow Runoff Model) 등이 있다. 현재까지 개발된 모형 중에서, 관로의 저류효과와 수리학적 배수영향을 고려할 수 있으며, 침수시간, 침수위, 침수범위를 시공간적으로 제시할 수 있는 모형으로는 SWMM과 도시홍수재해관리기술연구단에서 개발한 FFC5(V. 2008)이 있다. 특히, SWMM은 수리학적인 배수영향을 고려한 모의가 가능하여 우수관거, 펌프장 저류지의 범람이 발생하는 도시지역의 내수침수를 위한 모형으로 적합하다. 또한, 상용화된 프로그램인 XP-SWMM은 유역에서 침수가 발생하는 지점 및 면적, 침수심 등을 상세하게 나타낼 수 있어 침수심, 침수면적 산정에 적합하다. 따라서, 본 연구에서는 XP-SWMM을 이용하여 대상지역의 침수모의를 수행하여 침수심과 침수면적 자료를 도출하였다.

2.3 내수침수피해액 산정

2.3.1 다차원법 홍수피해산정법

다차원 홍수피해산정법(Multi-Dimensional Flood Damage Analysis: MD-FDA)은 침수심에 따른 침수피해액의 차이를 반영하지 못하는 기존의 개선법을 보완하기 위하여 Ministry of Construction and Transportation(2004)에서 제시한 침수피해액 산정방법으로 침수지역 내의 피해자산에 침수심에 해당하는 침수피해율을 곱하는 방식으로 홍수피해액을 산정한다. 다차원법은 침수편입율이라는 개념을 이용하기 때문에 침수피해액 산정 시, 침수심을 고려할 수 있다. 또한, 상업, 농업, 주거지역으로 분류하여 지역의 자산가치를 반영하여 침수피해액을 산정하므로 내수침수가 주로 발생하는 도시지역의 침수피해액을 산정하기에 가장 적합한 모형으로 판단된다. 그러나, 현재 국내에서 적용되는 다차원법은 인구주택총조사, GDP, 건물신축단가표 등 다양한 통계적 지표를 활용하기 때문에 자산가치를 구축하는 과정이 복잡하다. 특히, 건물내용물 자산가치의 경우에는 Ministry of Construction and Transportation(2004)에서는 1999년의 국부통계자료, Korea Water Resources Corporation(2008)에서는 2006년 내구 소비재 자료를 활용하였으나, 5년 이상의 과거자료를 활용하기에 현재 사용하는 가정용품의 종류 및 가치의 차이가 존재할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 내수침수지역에 한정하여 자산가치를 간단하게 산정하고 최신의 통계자료를 활용하는 내수침수피해액 산정방법을 제시하였다.

2.3.2 내수침수피해액 산정

내수침수가 발생하는 도심지역의 침수피해액을 산정하는 방법인 내수침수피해액 산정법(Inland Flood Damage Analysis: IFDA)의 세부항목을 Table 2에 제시하였다. 도시지역에서 주로 발생하는 내수침수의 특성에 의하여 다차원법에서 제시하는 농작물 및 농경지 피해액과 인명, 이재민 피해액을 제외한 건물, 건물내용물, 유형 및 재고자산에 대한 피해액 항목만을 활용하였다. 또한, 최근 도시지역에서는 차량의 침수피해가 빈번하게 발생하므로, 본 연구에서는 내수침수피해액 항목에 차량 피해액을 추가하였다. 기존의 다차원법에서는 침수심이

Table 2. Contents of Inland Flood Damage Analysis

Damage		Inland flood damage analysis
Property value damage	Residential building	Damage=Property value of building×Inundated inclusion ratio×Flood damage evaluation Property value of building=Number of houses by total floor space of building×Price per unit×Number of layers *Building type : Apartment, House *Price per unit is referred to National Tax Service (2011) of Standard market price of building per the unit area
	Residential contents	Damage=Property value of residential contents×Inundated inclusion ratio×Flood damage evaluation Property value of residential contents=Assessment price of residential contents×Number of households *Assessment price of residential contents is referred to Federation of Korean Trade Unions (2012)
	Tangible assets	Damage=Property value of tangible asset×Inundated inclusion ratio×Flood damage evaluation *Industrial Classification A, B, C are removed
	Inventories	Damage=Property value of inventories×Inundated inclusion ratio×Flood damage evaluation *Industrial Classification A, B, C are removed
Vehicle damage		Damage=Number of cars per unit×Flood area×5,000,000 *flood damage evaluation is used by HAZUS Flood model
Damage Ratio		Unit flood depth : 0.25 m

0.5 m씩 증가할 때마다 침수피해율을 제시하였던 부분도 침수심을 0.25 m로 세분화하여 계산하도록 하였다.

1) 건물(Residential Building), 건물내용물(Residential Contents) 피해액

다차원법에서는 침수발생지역에서 4가지 건축형태(아파트, 단독주택, 연립주택, 다세대주택)로 구분하여 침수피해액을 산정하도록 제시되어 있으나, 침수지역에서 건축물 종류별로 구분된 침수자료를 구축하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 아파트와 주택으로 구분하여 침수피해액을 산정하였다. 통계청(National Statistical Office)의 시도별 연건평별 주택 자료를 활용하여 4가지 건축형태로 자산가치를 산정한 뒤, 침수피해율과 침수면적율을 곱하여 피해액을 산정하는 단계에서는 건축형태를 아파트와 주택(단독주택, 연립주택, 다세대주택 포함)으로 구분하였다. Seoul Development Institute(2007)에 의하면 아파트에 의한 침수피해는 전체 건물피해의 중에서 1%를 차지하고 있으므로, 본 연구에서는 자산가치가 크지만 침수피해가 적은 아파트와 주택을 구분함으로써, 침수피해액의 과다산정을 피하고자 한다. 또한, 침수면적에 대한 자세한 정보가 주어지지 않았을 때에는 통계연보의 아파트현황자료를 활용하여 주거지역 면적에서 아파트가 차지하는 면적을 제외하여 주택의 면적을 산정할 수 있어 자료구축이 용이해진다.

건물신축단가표를 기준으로 제시하던 ‘건축형태별 단위면적당 건축단가’의 항목을 National Tax Service (2011)에 제시되어 있는 건물기준시가 산정기준을 참고하여 건물별 단위면

적당 단가를 활용하였다. 건물기준시가 산정사례 중 일반주택, 아파트, 연립, 다세대 주택과 같은 종류의 건축물에 대하여 기준시가의 계산 부분에서 m^2 당 가격 항목에 대한 평균값을 이용하였으며, 단위면적당 기준시가는 Table 3에 제시하였다.

건물내용물 피해액은 건물 내의 가정용품에 대한 피해액으로써, 본 연구에서는 한국노동조합총연맹에서 제공하는 한국노총 표준생계비 자료를 이용하였다. Federation of Korean Trade Unions(2012)에서 가구 및 가사용품비에 속하는 대상 항목으로는 가구, 가전제품, 내구소비재, 가사용품, 의복이 포함되며, 한국노총 표준생계비에서는 가구별로 해당용품의 사용유무가 나누어져 있지만 대략적인 계산을 위하여 모든 품목을 더하여 총가격을 산정하였다. 2012년도의 한국노총 표준생계비에서 제공하는 가구, 가사용품의 세대당 총가격은 약 1600만원으로 추정되었다.

2) 유형고정자산(Tangible Assets) 및 재고자산(Inventories) 피해액

유형고정 및 재고 자산가치는 내수침수가 도시지역에서 주로 발생한다는 특성을 고려하여 한국표준산업대분류에서 A. 농업, 임업 및 어업, B. 광업 항목은 제외하고 유형고정자산 피해액을 산정하였다(Lee *et al.*, 2006).

3) 차량 피해액(Vehicle Damage)

최근 도시지역에서는 침수가 발생할 경우, 주거·산업시설물의 침수피해 뿐만 아니라 차량 침수로 발생하는 피해가 큰 부분을 차지하고 있기 때문에 IFDA에서는 차량 침수피해액

Table 3. Standard Market Price of Building Per the Unit Area

Residential building type	General house	Apartment	Row house	Multiplex house
Standard market price per the unit area (won)	186,000	400,000	497,000	497,000

Table 4. Flood Level (cm) Resulting Vehicle Damage

Type of vehicle Damage (%)	Car	Light truck	Heavy truck
15	< 45	< 82	< 152
60	45 - 73	82 - 112	152 - 228
100	< 73	< 12	> 228

Table 5. Flood Damage Cost Per Vehicle

Year	The number of vehicles	Damage (1,000 won)	Damage per vehicle (1,000 won)	Source
2002.08	33,000	49,500,000	1,500	GIAK*
2003.09	3,976	18,148,000	4,564	GIAK
2003.09	14,072	44,695,000	3,176	GIAK
2006.07	5,477	24,025,000	4,386	GIAK
2007	15,000	73,000,000	4,866	GIAK
2007.09	4,838	11,700,000	2,418	GIAK
2008	41,042	91,100,000	2,219	GIAK
2009	1,308	7,100,000	5,428	GIAK
2009	14,602	99,300,000	6,800	GIAK
2009.07	2,934	30,000,000	10,224	GIAK
2009.07	10,424	45,000,000	4,316	GIAK
2009.07	1,247	20,000,000	16,038	GIAK
2010	14,602	99,300,000	6,800	HMF1**
2010	99	400,000	4,040	HMF1
2011	528	2,600,000	4,924	HMF1
2011	851	4,900,000	5,757	GIAK
2011.01~07	4,838	11,700,000	11,700	GIAK
2011.06~08	2,804	9,400,000	9,400	GIAK
2011.07	978	4,900,000	4,900	HMF1
2012	1,625	11,100,000	11,100	HMF1
2012.07	170	1,300,000	1,300	LIG***
2012.08	113	890,000	890	FFMI****
2012.08	53	200,000	200	HGI*****
2012.08	19,718	66,800,000	66,800	GIAK
2012.08	111,445	23,100,000	23,100	GIAK
2012.09	41,042	91,100,000	91,100	GIAK
2012.09	1,339	4,400,000	4,400	GIAK
2012.09	3,114	10,900,000	10,900	GIAK
Mean damage per vehicle (won)			4,891,903	

*GIAK: General Insurance Association of Korea, **HMF1: Hyundai Marine & Fire Insurance, ***LIG: LIG Insurance, ****FFMI: First Fire & Marine Insurance, *****HGI : Hanwha General Insurance

의 산정 기준을 제시하였다. Scawthorn *et al.*(2006)에서 제시한 HAZUS Flood Model에서는 침수심별 차량 침수피해액 곡선을 활용하여 차량 침수피해액을 산정하였다. 국내의 침수

피해액 산정지침(간편법, 개선법, 다차원법)에서는 차량 침수 피해액 산정을 위한 상세한 기준이 없기 때문에 본 연구에서는 차량침수피해에 대한 언론기사와 HAZUS Flood Model의 자료를 활용하여 차량피해액을 산정기준을 제시하였다. Scawthorn *et al.*(2006)은 침수피해차량의 종류를 승용차, 소형트럭, 대형트럭으로 구분하여 침수심별 차량피해율 함수(Vehicle Depth Damage Function)를 활용하여 차량피해액을 산정하였으며, 침수심별 피해액은 Table 4와 같다.

Table 5는 2002년부터 2012년에 발생한 차량침수피해액을 보험회사에서 평가한 것으로 차량 1대에 해당하는 평균 침수 피해액은 약 489만원으로 추정되었다. 이를 바탕으로 본 연구에서 제시하는 차량피해액 산정방법은 식 (1)과 같다.

$$\text{차량피해액} = 1\text{대당 차량피해액} \times \text{단위면적당 차량(대/m}^2\text{)} \times \text{침수면적(m}^2\text{)} \times \text{침수피해율} \quad (1)$$

여기서, 단위면적당 차량은 국토교통부(Ministry of Land, Infrastructure and Transport)에서 제공하는 시군구별 자동차등록차량을 해당지역의 면적으로 나누어 계산한다. 차량 1대당 피해액은 Table 5를 통하여 도출된 차량 1대에 해당하는 평균 침수피해액인 489만원이다. 침수피해율은 HAZUS Flood Model의 침수피해율(Table 4)을 참고하여 승용차의 경우에는 차량 바퀴를 기준으로 침수심 0.25 m 이하의 침수지역에서는 차량침수피해가 발생하지 않으며, 0.25~0.5 m에서는 15%, 0.5~0.75 m는 침수지역에서는 60%, 0.75 m 이상의 지역부터는 100% 침수피해가 일어난다고 가정하여 침수피해액을 산정하였다. 하지만 본 차량피해액 산정방법은 자료의 한계로 침수지역에서 차량의 이동 및 주차여부를 반영하지 못하며, 모두 침수되었다고 가정하였기에 피해액이 과다 산정되는 한계가 있다.

4) 침수피해율

IFDA에서는 0.25 m와 0.75 m 구간을 추가하여 세분화된 침수심별 침수피해율을 적용하였다. 추가한 구간의 침수피해율은 기존의 침수피해율의 절반 값을 사용하였으며, 아파트는 평균 20층, 주택은 평균 3층 건물이라고 가정하여 다차원법에서 제시한 주거 지역의 침수피해율에 각각의 층수를 나누어 주었다. 주택 침수의 기준이 되는 거실 방바닥의 침수여부를 고려하여 아파트의 경우에는 0.25 m 침수심이 발생하더라도 아파트 1층 바닥이 지표면보다 높이 위치되어 있다는 것을 고려하여 침수피해율이 0이 되며, 주택에서는 지하 혹은 반지하 건물을 고려하여 0.25 m 침수심에도 침수피해율이 존재한다는 가정 아래 침수피해율을 제시하였다. 또한 침수가 거의 발생하지 않는 아파트에서는 Seoul Development Institute (2007)에서 제시한 침수발생비율인 0.01을 곱하여 침수피해액의 과다산정을 피하였으며, 주택에는 아파트를 제외한 침수발생비

Table 6. Flood Damage Ratio (IFDA)

Flood depth	D=0	0<D≤0.25	0.25<D≤0.5	0.5<D≤0.75	0.75<D≤1.0	1.0<D≤1.5
Apartment	0	0	0.000075	0.000115	0.00016	0.00024
House	0	0.0396	0.0825	0.1221	0.165	0.2475
Industry	0	0.07	0.15	0.23	0.3	0.45

율인 0.99를 곱하였다. IFDA의 침수심별 침수피해율을 Table 6에 제시하였다.

3. 침수피해곡선

침수심과 침수피해액 관계를 나타낸 침수피해곡선(Flood Damage Curve or Stage-Damage Curve or Flood Loss Functions)은 미국과 일본을 비롯한 유럽지역에서 침수피해액을 산정하기 위하여 널리 활용되는 방법이다. 일반적으로 침수피해곡선은 Fig. 2와 같이 과거의 침수자료를 바탕으로 침수심과 피해액과의 회귀분석을 통하여 도출되며, 침수지역 내에서도 토지의 이용도, 건물의 높이, 건물 지반고에 따라서 관계곡선이 도출된다(USACE, 2013). 하지만, 최근 미국에서는 침수피해곡선을 일반화하기 위하여 건물의 층수와 종류를 기준으로 다양한 종류의 침수심별 침수피해곡선을 도출하고 있다(USACE, 2013).

국내에서는 소방방재청(National Emergency Management Agency)이 재해연보를 통해서 홍수피해가 발생한 지역의 침수면적과 침수피해액에 대한 정보를 제공하고 있으나, 침수심에 대한 정보는 제공되지 않는다. 또한, 홍수피해액을 산정하는 간편법과 개선법에서는 침수면적만을 활용하여 침수피해액을 계산한다. 다차원법에서는 침수가 발생한 지역의 침수심에 따른 침수면적을 산정하고, 침수심별 침수피해율을 함께 고려하여 침수심에 따른 침수피해액을 산정하도록 제시되어

있으나, 아직까지 국내에서는 침수피해곡선을 활용한 피해액 산정은 거의 이루어지고 있지 않다. 이는 다차원법을 적용하기 위한 자료구축이 어렵고, 소규모 지역에 적용하기가 어렵기 때문이다(Kang *et al.*, 2010). 이러한 한계에 대한 대안으로 Kang *et al.*(2010)은 침수모의를 통한 침수심-침수피해액 관계를 도출하여 침수피해액을 산정하는 침수피해추정곡선법을 제시하고, 저수지 하류부의 침수피해액을 산정한 바 있다. 본 연구에서는 내수침수가 발생하는 지역에 한하여 다양한 강우시나리오를 바탕으로 침수모의를 수행한 후, 침수심, 침수면적, 침수피해액의 정보를 포함한 침수피해곡선을 도출하였다.

4. 거제지구의 내수침수피해특성 분석

본 연구에서는 부산시 연제구 거제지구를 대상으로 내수침수시나리오를 작성한 뒤, 침수피해곡선을 도출하여 대상구역의 침수특성을 분석하였다.

4.1. 대상지역

거제지구는 부산시 연제구에 속하는 지역으로 소방방재청에 의하면 부산시 연제구에서는 최근 10년간 약 38억원의 침수피해가 발생하였다. 거제지구는 2009년 7월 16일에 발생한 집중호우로 약 0.44 km²의 면적에 평균침수심 0.5 m, 최대침수심 1.5 m의 침수피해를 입은 바 있다. 또한, 연제구 거제동 일대는 계획홍수위보다 낮은 저지대로 상습침수가 발생하는 자연재해위험지구로 2011년 지정되었으며, 2012년, 2013년에도 폭우에 의한 침수가 발생하였다. Fig. 3은 대상지역의 행정구역과 거제지구의 침수범람도를 보여준다.

4.2. 강우시나리오 및 침수모의

본 절에서는 XP-SWMM을 이용하여 다양한 강우 시나리오(Table 1 참고)에 대한 침수모의를 한 후, 침수심과 침수면적을 산정하였다. 대상지역에서의 일부 관망에 대한 XP-SWMM의 입력매개변수를 Table 7과 8에 제시하였으며, 침수모의를 수행한 결과는 Fig. 4와 Table 9에 나타내었다.

Fig. 4(a)는 강우시나리오 중에서 Scenario #4(지속시간 3시간, 시강우량 50 mm, 누적강우량 150 mm)에 대한 XP-SWMM 모의결과를 나타낸 것으로, Fig. 3(b)와 비교하면 침수지역과 침수범람도의 침수지역이 대체적으로 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)에서 가장 큰 침두홍

Fig. 2. Example of Flood Damage Curve.

(a) Districts of Busan

(b) Flooding map (Yeonjegu, 2012)

Fig. 3. District of Busan and Flooding Map of Study Area.

Table 7. Input Parameters of XP-SWMM for Gwoje district (Node)

Node	Ground elevation (m)	Invert elevation (m)	Area (ha)	Slope (°)	Width (m)	Previous area curve number	Time of concentration (min)
GMH001	65	61.6	53.73	0.005	733.0	33	10
GMH002	61	57.6	1.88	0.117	137.8	33	10
GMH003	45	40.3	3.21	0.089	179.1	65	5
GMH004	90	85.3	6.23	0.08	249.7	65	5
GMH005	70	64.6	5.84	0.099	241.7	65	5
GMH006	46	43.9	1.5	0.049	122.6	65	5
GMH007	75	64.9	1.88	0.182	137.3	65	5
GMH008	50	43.7	2.11	0.069	145.4	65	5
GMH009	40	38.2	0.98	0	99.2	65	5
GMH010	50	47.7	2.37	0	153.9	65	5
...							

Table 8. Input Parameters of XP-SWMM for Gwoje District (Link, Scenario #4)

Link	Length (m)	Bottom width (m)	Height (m)	Upstream invert elevation (m)	Downstream invert elevation (m)	Peak flow (m ³ /s)	Critical storm duration (min)
L000005	61.7	1.2	1.2	41.6	29.1	0.251	203.9
L000069	215.1	1.2	1.2	82.9	54	2.237	672.4
L000076	193	0.45	0.55	112.25	81.95	0.555	677.3
L000077	145	0.45	0.6	81.9	69.3	0.837	689.5
L000094	210.1	2.2	1.8	53.4	35.4	3.068	710.6
L000099	214.8	0.9	0.9	67.71	46.2	1.312	710.6
L000401	431.6	2	2	3.2	1.9	1.598	680.3
L000404	316.6	0.5	0.2	11.6	5	0.278	710.6
...

(a) Flooding map of Scenario #4

(b) Peak flow of Scenario #4

Fig. 4. Analysis Result of XP-SWMM (Scenario #4).

Table 9. Flood Area According to Depth (Scenario #4)

Depth (m)	D=0	0<D≤0.25	0.25<D≤0.5	0.5<D≤0.75	0.75<D≤1.0	1.0<D≤1.5
Area (m ²)	23,438,592	944,640	188,928	50,688	16,128	9,216

수량을 가지는 관거(Fig. 4(a)의 점선부분)의 홍수량을 그래프로 나타낸 것이고, Table 8에 Scenario #4의 첨계홍수량과 임계지속시간을 나타내었다. 또한, Table 9는 Scenario #4에 대하여 침수심에 해당하는 침수면적을 정리한 것으로 침수면적을 모두 더하면 내수침수 시나리오의 침수면적과 같아진다.

4.3 내수침수피해액 산정

앞 절에서 산정한 침수심, 침수면적 자료를 활용하여 내수 침수피해액을 산정하였다. 내수침수피해액 산정을 위하여 2011년도 부산시 통계연보(Busan Metropolitan City, 2011)를 활용하여 부산시 연제구의 건물, 가정용품, 산업 자산가치를 산정하였다. 건물 및 가정용품 자산가치는 주거지역에 속하는 주거건물의 자산가치이며, 산업 자산가치는 상업 및 공업지역에서의 유형 및 무형고정 자산가치이다. 부산시 연제구에서는 전체 지역의 31.05%가 주거지역, 3.07%가 상업지역이고, 공업지역은 0.26%에 해당하며, 침수시나리오 별로 침수면적에

대하여 주거, 상업, 공업지역으로 구분하기 어려우므로 침수 면적에 대하여 연제구의 용도지구 비율과 동일하다는 가정 아래 피해액을 산정하였다.

건물 자산가치 산정을 위하여 부산시 연제구의 단독주택, 아파트, 연립주택, 다세대주택의 연건평별 주택자료를 추출한 뒤, 주택별로 연건평별 주택비를 계산하였다. 이어서, 건물별 가구수와 2011년 건설업 Deflator 1.34를 곱하여 아파트와 나머지 주택(단독주택, 연립주택, 다세대주택)으로 나누어 건물별 자산가치를 산정하였다. 가정용품 자산가치는 2.3.2절에서 제시한 세대당 가정용품 가격과 건물별 가구수를 곱하여 계산하였다. 산업 자산가치는 Korea Water Resources Corporation (2008)에서 제시한 부산시의 산업분류대별 유형자산 및 재고 자산 비율과 부산시 통계연보에서 제시한 연제구의 산업, 사업체 현황자료를 활용하였다. 각각의 자산가치에 침수면적을 곱하여 자산 피해액을 추정하였다. 이어서, 차량 피해액은 부산시 연제구의 면적당 차량 수인 0.005698에

Table 10. Inland Flood Damage Cost (₩) for Scenario #4

Flood depth		0<D≤0.25	0.25<D≤0.5	0.5<D≤0.75	0.75<D≤1.0	1.0<D≤1.5
Residential building damage	Apartment	0	21,061	10,275	8,169	9,190
	House	113,100,824	5,689,523	2,775,798	2,206,845	2,482,701
Residential contents damage	Apartment	0	27,781	13,554	10,776	12,123
	House	53,649,419	2,698,828	1,316,701	1,046,818	1,177,670
Tangible assets damage		94,030	52,558	24,750	19,112	21,501
Inventories damage		24,608	14,148	6,902	5,145	5,788
Property value damage		166,868,882	8,503,899	4,147,980	3,296,865	3,708,973
Vehicle damage		0	807,383,808	866,460,672	459,486,720	262,563,840

침수면적과 침수피해율을 곱하여 산정하였다. 본 연구에서는 각각의 강우시나리오에 대한 침수피해액을 산정하였으며, Table 10은 예시적으로 Scenario #4의 침수피해액을 보여준다.

Table 10은 침수심에 따른 침수피해액을 보여주고 있으며, 차량 피해액은 자산피해액에 비하여 크게 산정된다는 것 또한 확인할 수 있다. 차량침수피해액의 과다추정으로 자산 피해액에 대한 시나리오별 비교가 어려울 것으로 판단되어, 내수침수시나리오에서는 자산 피해액만을 활용하여 분석하도록 하였다. 본 연구에서 산정된 시나리오별 내수침수피해액은 9,000만원에서 8억원 사이의 값으로 추정되었다.

4.4 내수침수시나리오 구축

부산시 연제구 거제지구 일대에 대하여 91가지의 강우시나

리오와 XP-SWMM을 활용하여 침수심, 침수면적을 도출하였으며, 그 결과를 토대로 내수침수피해액을 산정하여 내수침수시나리오를 구축하였다. 내수침수시나리오의 일부는 Table 11에 제시하였다. 내수침수시나리오에는 지속시간, 시간당 평균강우량, 누적강우량, 평균침수심, 최대침수심, 침수면적, 침수피해액의 항목이 포함되어 있으며, 다음 절에서는 이러한 내수침수시나리오를 바탕으로 침수피해곡선을 도출하여 거제지구에서 발생하는 침수의 특성을 파악하였다.

4.5 침수피해곡선 도출 및 침수특성 분석

내수침수시나리오를 바탕으로 대상지역의 침수피해곡선 및 침수특성을 분석한 결과는 다음과 같다. Fig. 5(a)는 시간당 강우량과 평균침수심과의 관계를 나타낸 것으로, 시간당 20 mm 강우가 발생하였을 때에는 지속시간 13시간 이후에

Table 11. Inland Flood Scenarios for Geoje

No.	Hourly precipitation	Duration (hour)	Accumulated precipitation (mm)	Average flood depth (m)	Maximum flood depth (m)	Flood area (m ²)	Flood damage cost (₩)
1	20	3	60	-	-	-	-
2	30	3	90	-	-	-	-
3	40	3	120	-	-	-	-
4	50	3	150	0.1797	1.96	1216512	186,526,599
5	60	3	180	0.1875	1.96	1345536	208,860,301
6	70	3	210	0.2418	2.278	1651968	312,341,544
7	80	3	240	0.3348	2.8851	2221056	523,437,891
8	20	4	80	-	-	-	-
10	30	4	120	-	-	-	-
11	40	4	160	0.1828	1.96	1207296	183,899,044
12	50	4	200	0.1871	1.96	1363968	223,517,366
13	60	4	240	0.2404	2.1858	1571328	301,470,298
14	70	4	280	0.27	2.8851	1854720	383,128,313
15	80	4	320	0.4067	2.8851	2393856	693,709,968

Fig. 5. Average Flood Depth According to Precipitation.

침수가 발생하고, 시간당 30 mm 강우에는 지속시간 5시간 이후, 시간당 50 mm 강우에는 지속시간 3시간 이후 침수가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)는 누적강우량과 평균 침수심과의 관계를 나타낸 것으로, 누적강우량 150 mm 이상이 발생한 이후부터 대상지역에서는 침수가 발생된다. Fig. 5를 통하여 동일한 누적강우량에는 지속시간이 짧은 호우사상이 평균적으로 큰 침수심을 유발하는 침수가 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 동일한 누적강우량에서도 시간당 강우량에 따라서 평균침수심이 변화한다는 것을 확인할 수 있다. 특히, 시간당 강우량이 80 mm인 호우에서는 그 이하의 시간당 강우량보다 0.1 m 이상 큰 평균침수심이 발생하게 된다. 이를 통하여 시간당 강우량 80 mm 이상의 강우가 지속된다면 큰 홍수피해를 유발할 수 있음을 예상할 수 있다.

시나리오별 평균침수심과 총침수면적의 관계는 Fig. 6과 같

Fig. 6. Total Flood Area According to Average Flood Depth.

(a) Inland flood damage cost according to flood depth

(b) Inland flood damage cost according to flood area

Fig. 7. Inland Flood Damage Curve.

으며, 결정계수가 0.96으로 높은 관계를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 평균침수심이 0.4 m 이상에서 침수면적이 크게 증가함을 확인할 수 있으며, Fig. 5에서 평균침수심 0.4 m 이상의 침수를 발생할 수 있는 강우량은 시간강우량 80 mm 이상, 누적강우량 600 mm 이상의 호우사상으로 본 강우량에서부터는 침수범위가 넓어지며, 침수피해가 급격하게 증가될 것으로 예상할 수 있다.

침수심과 침수피해액과의 관계를 나타낸 침수피해곡선은 Fig. 7(a)와 같으며, 결정계수가 0.96의 높은 상관관계를 가지고 있다. 내수침수시나리오 자료를 활용하여 선형의 침수피해곡선을 작성하였으며, 95%의 신뢰구간에 대하여 침수심에 해당하는 침수피해액을 나타내었다. 침수심이 낮은 구역에서는 침수피해곡선의 신뢰구간 내에 대부분의 시나리오 결과가 포함되고 있으나, 침수심이 높은 구역에서는 침수피해곡선의 신뢰구간을 벗어나는 경우가 많아 거제지구의 선형침수피해곡선은 침수심 0.4 m 이하의 침수발생 구간에 대해서 적용성이 높을 것으로 판단된다. Fig. 6에서 침수심과 침수면적의 상관성이 높았음을 확인한 내용을 바탕으로 침수면적과 침수피해액과의 관계를 Fig. 7(b)에 도출하였으며, 침수면적보다는 침수심이 침수피해액과 높음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 최근 빈번하게 발생하는 내수침수로 인하여 발생하는 침수피해의 특성을 분석하기 위하여 도시유출모형인 XP-SWMM과 본 연구에서 제안한 내수침수피해액 산정법(IFDA)을 활용하여 내수침수시나리오를 구축하였다. 도출된 내수침수시나리오를 바탕으로 강우량과 평균침수심, 평균침수심과 침수면적, 침수심과 침수피해액, 침수면적과 침수면

적의 관계를 도출하였으며, 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 침수심에 따른 침수면적 그리고 피해액 자료가 부족한 점을 고려하여 내수침수시나리오를 도입하여 대상지역에 발생할 수 있는 다양한 침수특성에 대하여 사전에 파악할 수 있도록 하였으며, 실제 발생한 침수흔적도와 시나리오상의 침수모의 결과가 유사함을 확인할 수 있었다. 또한, 다차원법을 기반으로 하는 내수침수피해액 산정방법을 활용하여 도시지역의 침수피해액을 쉽게 산정할 수 있는 방법을 제안하였다.
- 2) 내수침수시나리오에 의하면 부산시 연제구 거제지구는 누적강우량 150 mm 이상의 호우가 발생하면 침수가 발생하며, 동일 누적강우량에 대해서는 지속시간이 적을수록 큰 침수가 발생된다. 누적강우량 600 mm 이상이 발생하거나 시간당 평균강우량이 80 mm 이상이 지속되면 평균침수심 0.4 m 이상, 침수면적 2,000,000 m² 이상, 침수피해액 약 5억원 이상의 침수피해가 발생할 수 있다.
- 3) 내수침수시나리오를 바탕으로 회귀분석을 수행하여 침수피해액곡선을 작성하였으며, 침수심과 침수피해액과의 상관성이 높은 선형직선을 도출할 수 있었다. 이를 바탕으로 부산시 연제구 거제지구에 임의의 강우가 발생될 때, 누적강우량을 바탕으로 평균침수심을 추정하며, 평균침수심 자료를 바탕으로 예상되는 피해액을 산정하여 침수피해저감을 위한 대책을 비롯한 치수경제성분석을 위한 수단으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 소방방재청 자연재해저감기술개발사업의 지원 [NEMA-자연-2011-42]을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

- Bouwer, L.M., Bubeck, P., Wagtendonk, A.J., and Aerts, J.C.J.H. (2009) Inundation scenarios for flood damage evaluation in polder areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 9, pp. 1995-2007.
- Busan Metropolitan City (2011) 50th Busan Statistical Yearbook.
- Dutta, D., Herath, S., and Musiakke, K. (2003) A mathematical model for flood loss estimation. *Journal of Hydrology*, Vol. 277, No. 1, pp. 24-49.
- Federation of Korean Trade Unions (2012) *The Korean Confederation of Trade Unions Standard Living Expense 2012*.
- Genovese, E. (2006) *A Methodological Approach to Land Use-based Flood Damage Assessment in Urban Areas: Prague case study*. Technical EUR Reports, EUR, 22497.
- IPCC (2007) *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis*. Contributions of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996.
- Kang, B.S., Ryu, S.Y., Kim, S.J., and Lee, J.H. (2010) Estimation of flood-damage curve for evaluating flood damage cost in downstream area of agricultural reservoir. *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 1827-1831. Korea Meteorological Administration, www.kma.go.kr
- Korea Water Resources Corporation (2008) *Improving Measures of Feasibility Study for Water Resources Projects*.
- Lee, J.H. (2013) Cause and countermeasure of inundation damage. *Magazine of KOSHAM*, Vol. 13, No. 1, pp. 43-51.
- Lee, K.H., Choi, S.A., Kim, H.S., and Shim, M.P. (2006) Application of multi-dimensional flood damage analysis for urban flood damage. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 4B, pp. 363-369.
- Ministry of Construction and Transportation (2004) *A Study on Economic Analysis in Flood Control Projects—Multi-Dimensional Flood Damage Analysis*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2011) *Improvement and Supplement of Probability Rainfall in South Korea*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport www.molit.go.kr
- National Emergency Management Agency, www.nema.go.kr
- National Statistical Office, www.kostat.go.kr
- National Tax Service (2011) *A Manual of Estimating Standard Market Value of Building*.
- Oliveri, E. and Santoro, M. (2000) Estimation of urban structural flood damages: the case study of Palermo. *Urban Water*, Vol. 2, No. 3, pp. 223-234.
- Prettenhaler, F., Amrusch, P., and Habsburg-Lothringen, C. (2010) Estimation of an absolute flood damage curve based on an Austrian case study under a dam breach scenario. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10, pp. 881-894.
- Queensland Government (2002) *Guidance on the Assessment of Tangible Flood Damage*.
- Scawthorn, C., Flores, P., Blais, N., Seligson, H., Tate, E., Chang, S., Mifflin, E., Thomas, W., Murphy, J., Jones, C. and Lawrence, M. (2006) HAZUS-MH flood loss estimation methodology. II. Damage and loss assessment. *Natural Hazards Review*, Vol. 7, No. 2, pp. 72-81.
- Seoul Development Institute (2007) *Improvement of the Flood Insurance for Seoul Citizen*.
- US Army Corps of Engineers (USACE) (2013) *Flood Risk Management*.
- Yeonjegu (2012) *Basic Design and Working Design of Maintenance Project on Natural Disaster Prone Areas in Geoje District*.

Received	September 9, 2013
Revised	September 10, 2013
Accepted	November 18, 2013