



# 복합원인을 고려한 연안도시 지역의 침수해석

## Inundation Damage Assessment for Coastal Urban Area Considering Complex Causes of Inundation

최종원\* · 전환돈\*\*

Choi, Jongwon\*, and Jun, Hwandon\*\*

### Abstract

Unlike that in inland regions, inundation in coastal urban areas can be caused by multiple factors because storm surge can cause rainfall with increased sea level. Therefore, inundation analysis of a coastal urban area in Jeju Sanji stream was conducted by using XP-SWMM, an outflow hydrologic model of the city watershed. This study considers increases in sea level and river flood level caused by outflow of a domestic drainage system, and the results were used to assess flood damage relative to people and buildings. This study confirmed that when the rainfall amount was constant, flood damage to buildings and injuries to humans were greater owing to sea level rise. In addition, we confirmed that flood analysis in coastal urban areas needs to consider multiple factors.

**Key words** : Coastal Urban Area, Inundation, Complex Causes

### 요 지

연안도시 지역의 침수는 내륙지방과는 다르게 복합적인 원인으로 인해 발생할 수 있다. 이는 폭풍 해일로 인한 해수면 상승과 함께 강우가 발생할 수 있기 때문이다. 따라서 도시 유역의 유출수문모형인 XP-SWMM을 이용하여 연안도시 지역(제주 산지천)의 침수 해석을 수행 하였다. 본 연구는 복합원인으로 해수면 상승과 하천의 홍수위 상승, 내수배수체계의 유출을 함께 고려하였다. 또한 그 결과를 통해서 인적 및 건물에 대한 침수 피해 평가를 수행하였다. 이 연구는 해수면 상승에 따라 같은 강우에서도 인적 및 건물에 대한 침수 피해가 보다 큼을 확인하였다. 또한 연안도시 지역에서는 복합원인에 대한 침수 해석이 필요함을 확인하였다.

**핵심용어** : 연안도시, 침수 피해, 복합원인

## 1. 서 론

전세계적인 산업화의 발달은 화석연료의 과다한 사용으로 탄소 배출을 증가시켰으며, 이로 인한 오존층 파괴는 지구온난화의 주된 요인이 되고 있다. 현재 지구온난화로 인한 전지구적인 국지성 강우, 태풍, 홍수와 같은 극한 기후 현상의 발생빈도와 강도가 증가하고 있다. 또한 고온현상 등에 의한 빙하의 해빙에 의한 해수면 상승이 급격하게 진행되고 있다. 이로 인해 발생하는 자연재해는 우리에게 인적·물적 피해를 발생시키고 있다. 특히 연안도시의 경우

에는 내륙의 도시에 비해 바다에 접해있어 해수면 상승 및 태풍, 폭우에 보다 영향을 크게 받을 수 있다.

대표적인 예로는 2016년 10월에 발생한 태풍 ‘차바’이다. 태풍 ‘차바’는 제주를 포함하여 부산, 울산, 창원 등 경상남도의 연안도시 지역에 영향을 주었으며, 이로 인해 하천범람, 내수 침수 등이 발생하여 막대한 피해가 발생하였다.

특히 태풍 ‘차바’는 내륙도시보다 연안도시 지역에 보다 큰 피해를 야기하였다.

이러한 주된 원인은 지리적인 요인과 기상측면의 요인이 복합적으로 작용하고 있다. 먼저 연안도시 지역의 배수관

\*정회원, LIG시스템 위험관리연구소 사원(E-mail: gksapdlf1599@naver.com)

Member, Manager, Risk Management Research Institute, LIG System

\*\*교신저자, 정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수(Tel: +82-2-970-6570, Fax: +82-2-948-0043, E-mail: hwjun@seoultech.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Seoul national University of Science and Technology

및 인접 하천의 하류가 바다와 접해있다. 이와 함께 해수의 유입과 폭풍에 의한 해일고 등에 의한 해수면의 상승으로 배수 불량에 의한 복합적인 침수가 발생하고 있다.

당시 울산과 부산의 경우 만조위와 폭풍에 의한 폭풍해일고 및 대규모 파랑에 의한 월파에 의해 피해가 보다 가중되었다. 즉, 연안도시 인접 하천 수위는 해수면 만조시간과 강우발생 시간이 유사할 경우 해수위의 상승이 하천수위의 급격한 증가에 영향을 미칠 수 있다. 또한 해안가 및 해안에 인접한 하천으로 배수되는 배수관의 역류와 강우에 의한 복합적인 원인의 침수가 발생하였다.

평상시에는 조위가 낮거나, 폭풍해일에 의한 영향이 없는 경우에는 방파제 등 침수 방지 시설에 의해 대부분의 내수 침수를 방지할 수 있다. 그러나 태풍 ‘차바’와 같이 폭풍해일과 만조가 겹치게 되면서 폭우에 의한 연안도시 지역의 배수 능력의 과부하에 의한 침수에 의해 큰 피해가 발생할 수 있다.

또한 기존에 선행되어온 침수피해에 대한 평가는 외수 및 내수에 의한 독자적인 분석에 국한되어 있다. 이에 따라 복합적인 요인을 고려한 침수 분석이 필요함을 강조하고 있다. 따라서 연안도시 지역의 침수에 대한 피해는 내·외수와 해수에 대한 복합적인 영향을 고려하여 침수 분석이 수행되어야 한다는 것이다. 이를 위하여 먼저 복합적인 원인을 고려한 침수해석이 선행되어야 하며, 이러한 복합원인에 의한 침수 피해를 정량적으로 평가하는 침수 피해 분석이 이루어져야 할 것이다.

도시지역의 침수피해 및 침수예상지역 선정을 위한 침수 해석에 관한 연구는 이전까지 활발하게 진행되어 왔다. 대부분의 연구들은 도시 내수배수체계의 유출량 및 월류량 계산을 통하여 침수 해석을 진행해왔다. 특히 미국환경보전국에서 개발한 SWMM (Storm Water Management) 모델을 기반으로 한 XP-Solution사에서 개발한 XP-SWMM을 이용한 도시지역의 내수 침수 해석이 주를 이루고 있다. Phillips et al. (2005)은 2차원 침수해석을 통하여 도시지역의 침수 해석을 평가하였고, Shin et al. (2014)은 XP-SWMM을 이용하여 도시침수 해석을 통한 침수예상지도를 작성하여 침수에 대한 분석을 실시하였다. 또한 Lee and Yeon (2008)은 도시지역의 하천의 외수위를 내수배수 체계 최 하류의 경계조건으로 고려한 복합적인 침수 모의를 진행하였으며, 과거의 침수현황과 모의한 결과의 침수구역을 비교하였다. 또한 Lee (2007)은 도시지역의 배수효과 즉 최 하류 배수관망의 수위에 따른 침수변화를 제시하였으며, 시시각각 변화하는 수위에 따른 배수효과를 고려한 합리적인 내수 배수시스템의 운영 모형을 제시하였다. 또한 Hsu et al. (2000)은 SWMM 모형과 GIS를 결합한 2차원 침수지도 모형 개발을 통해 침수피해를 분석하였다.

또한 이전의 침수 피해 평가에 관한 연구들은 다차원 홍수피해산정기법(MD-FDA)를 이용한 침수피해를 피해 금

액 통해 평가해왔다.

즉 대부분의 연구들은 피해를 통계적인 기법을 적용한 금액 산정 방법을 통하여 적용하여, 이전의 피해 사례의 통계에 의존적인 결과를 나타내고 있다. 이로 인하여 다른 통계결과를 적용한 침수 피해 평가는 각기 다른 결과를 표출하게 된다.

본 연구에서는 연안도시 지역이 복합원인에 취약함을 고려하고자 하였다. 이를 위하여 연안도시 지역의 내수배수 체계 최 하류 배수토구의 2가지의 복합원인에 대하여 분류하였다. 첫 번째, 해수위 상승에 의한 바다에 접해있는 배수토구의 잠식과 두 번째, 해수위 상승으로 인한 하천 수위 상승으로 하천에 접해있는 배수토구의 잠식되는 경우가 존재한다. 이러한 복합원인을 배수토구의 기점수위를 경계조건으로 고려하여 강우 사상 별 내수침수 해석 및 침수 피해 평가를 진행하고자 하였다.

## 2. 침수해석 방법

### 2.1 배수토구 하류의 경계조건으로 기점수위 산정

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 경계조건 변화에 따라 배수효과에 의한 복합원인을 고려하였다. 이러한 하류단 경계조건은 해수위 상승고와 하천 홍수위의 2가지 조건으로 구분할 수 있다.

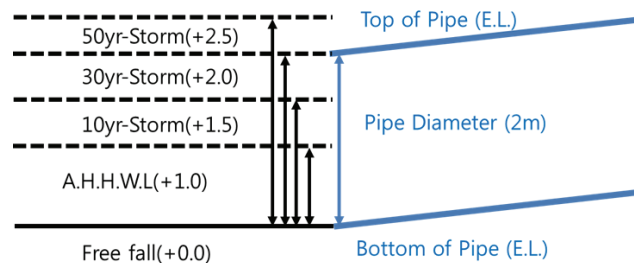


Fig. 1. Example of Change in Starting Point Level

#### 2.1.1 폭풍해일에 의한 해수위 상승고 산정 방법

본 연구에서는 복합원인에 의한 배수위 영향을 배수토구에 적용한 경계조건을 결정하였다. 그 경계조건으로 배수토구가 바다에 접한 경우의 기점수위는 행정안전부에서 수행한 “기후변화 적응 위한 연안도시 지역별 복합원인의 홍수 취약성 평가 기술 개발 및 대응방안 연구”(Park, 2017)에 제시된 각 지역별 폭풍해일에 의한 해수위 상승고와 대상 지역의 약최고조위를 함께 고려하여 적용하였다.

Park (2017)은 전 연안을 대상으로 태풍해상풍 모형과 격자삽입기법을 적용한 폭풍해일모형 실험을 수행하였다. 이를 위해 국내에 피해를 미친 1951-2015년의 개별 태풍의 중심최저기압(hPa), 영향기간, 태풍의 진로 등을 입력하여 태풍해상풍 모형과 폭풍해일모형 실험을 수행하였다. Park (2017)의

수행 결과는 개별 검조소별 기존 태풍에 대한 관측해일고와 계산해일고의 오차로 검증되었다. 그 검증과정은 3가지의 극치분포 모형(Gumbel, Weibull, GEV)에 최소자승법(LSM), 통상모멘트법(CMM), 확률가중적률법(PWM)의 3가지 모두 추정방법을 적용하였으며, 추정된 매개변수가 적정한지를 K-S (Kolmogorov-Smirnov)을 통해 모형 검정이 수행되었다. 이와 같은 과정을 통하여 Park (2017)은 전 연안의 20m의 격자로 해일고를 산출하였다. 이에 본 연구에서는 Park (2017)의 폭풍해일에 의한 해수위 상승고를 적용하였다.

### 2.1.2 해수위 상승에 따른 하천 홍수위 산정 방법

연안도시 지역에 위치하고 있는 하천들은 내륙지방과는 다르게 해수위 상승에 따른 홍수위 상승에 영향을 보다 직접적으로 받고 있다. 하천의 홍수위 상승은 하천에 접해있는 배수 토구의 배수능력에 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 하천에 접해있는 배수토구의 배수위 영향을 고려하기 위한 경계조건을 해수위 상승에 영향을 받은 하천 홍수위로 결정하였다. 이 하천 홍수위는 HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) 모형을 적용하여 홍수위를 산정하였다. HEC-RAS 모형은 자연하천 및 인공하천의 정상류뿐만 아니라 부정류, 유사현상 해석 기능까지 포함하는 종합 하천 해석 시스템이다. 기본적으로 마찰(Manning 공식)과 단면 수축/확장에 의한 에너지 방정식을 기본으로 계산한다. 또한 수리계산을 위해 한 단면에서 다음 단면까지 표준축차법에 의해 반복적으로 에너지 방정식에 의해 계산이 되어진다.

이러한 계산 과정의 하천 하류의 경계조건은 해수위 상승고를 적용하여 홍수위를 산정하였다. 최종적으로 본 연구에서는 하천에 접해있는 배수토구의 위치에 일치되는 하천의 단면별 홍수위를 산정하여 해당 토구의 경계조건을 적용하였다.

## 3. 침수 피해 평가 방법

### 3.1 침수 피해 평가를 위한 비교 기준 설정

본 연구에서는 각기 다른 강우사상, 기점수위에 대하여 침수 해석을 진행하고자 하였으며, 그 결과를 토대로 침수 피해 평가를 진행하고자 하였다. 그 시나리오는 다음과 같다. 기점수위는 4가지 시나리오로 구성된다. 첫 번째는 배수위 영향이 없는 자유방류조건, 그 이외에 배수위 영향이 생기는 약최고고조위(A.H.H.W.L)와 30년빈도 폭풍해일고, 50년빈도 폭풍해일고의 총 4가지의 기점수위이다. 또한 강우사상으로는 지속시간 60분에 강우량 10 mm부터 100 mm까지 10 mm씩 증가하는 10개의 시나리오로 구성된다.

이러한 각기 다른 기점수위와 강우사상에 대한 침수 피해에 평가를 진행하기 위해 비교 기준의 설정은 중요하다. 가장 간단하게 대상 지역의 전체를 기준으로 피해를 평가하는 방법이 있다. 그러나 이러한 방법은 본 연구에서 수행중인

연안도시 지역의 침수 피해 평가에 적용하기에는 과도한 기준이라고 판단된다. 연안도시 지역 전체가 침수 피해를 입는 경우는 대규모 폭풍해일 및 쓰나미에 의한 해안가 전체 범람이 주된 원인일 것이다. 그러나 이러한 경우는 드물게 발생한다. 대부분의 기존의 침수 피해 평가 방법에서 적용하고 있는 유역 전체를 기준으로 하는 평가는 내수 침수 피해에 적용할 경우 결과가 과소 산정이 될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 전체 유역을 기준으로 각 시나리오의 피해를 평가하지 않고, 50년빈도 폭풍해일고와 지속시간 60분에 100 mm에 해당하는 시나리오를 기준으로 침수 피해 평가를 진행하였다. 이러한 피해 평가 비교 기준은 방재관련 엔지니어 및 방재행정가가 해당 평가 유역에 대한 합리적인 판단에 의해 산정이 가능하다.

### 3.2 인적 침수 피해 평가 방법

내수 침수 피해 평가를 진행하기 위하여, 본 연구에서는 인적 피해와 건물 피해로 구분하였다. 기존의 연구들은 인적 피해 평가는 침수면적에 절대적인 영향을 받고 있다. 이전의 침수 피해 사례의 침수면적을 기반으로 한 통계학적인 분석 결과에 따라 침수 피해를 산정하고 있다. 즉 침수 면적 변화에 따라 인적 침수 피해 결과가 크게 변화하게 된다. 또한 전체 침수 면적에 대하여 동일한 가중치를 주어 평가하고 있어 침수 피해 발생 측면에서 유효하지 않은 침수심의 침수 면적을 고려하지 못하는 단점이 존재한다. 따라서 이를 보완하기 위하여 침수심별 물리적인 피해를 받을 수 있는 집단을 설정하여 집단별 침수 피해 평가를 진행하였다.

이를 위해 홍수 시 한계유속 및 한계수심에 관한 수리학적 실험의 연구를 기반으로 한계유속과 한계수심의 관계를 적용하였다. Abt et al. (1989)은 홍수흐름에서 사람들이 넘어지게 되는 한계수심과 한계유속을 결정하기 위한 실험을 수행하였고, 수행한 결과에 의해 경험식을 유도하게 된다. 즉 실제 사람 모형을 이용하여 산정된 홍수 발생 시 수심과 유속을 산정하는 실험을 수행하였다. 실험에 의해 유도된 한계유속과 한계수심 경험식은 아래와 같다.

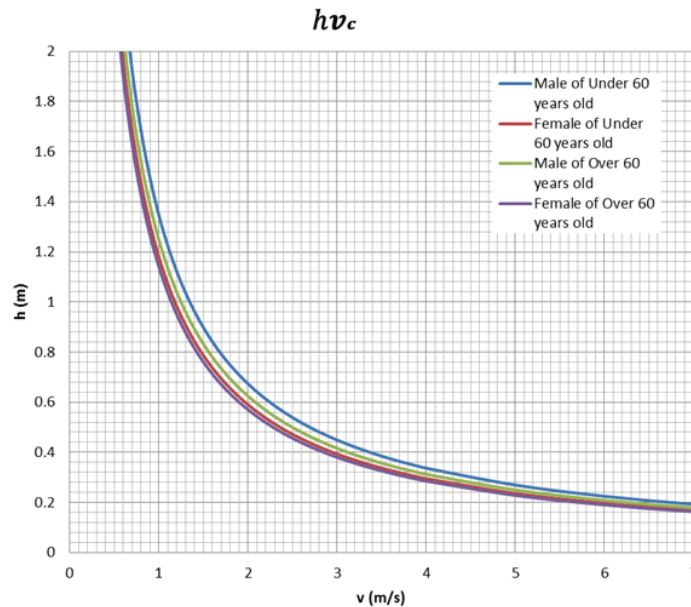
$$h v_c = 0.0929 (e^{0.001906Lm+1.09})^2 \quad (1)$$

여기서  $h$ 는 한계수심(m),  $v_c$ 는 한계유속(m/s),  $L$ 은 피실험자의 신장(m),  $m$ 은 피실험자의 체중(kg)을 나타낸다. 위의 경험식을 통하여 평균 신장과 체중을 통하여 한계수심과 한계유속의 관계를 정의할 수 있다.

다음과정으로 침수에 취약한 그룹화를 수행하여 평균 신장과 평균 체중을 구한다. 본 연구에서는 홍수에 취약한 그룹을 60세를 기준으로 남성과 여성으로 구분하였다. 그룹화에 따른 피해 평가를 위한 한계수심과 한계유속의 관계는 아래의 Table 1과 Fig. 2와 같다.

**Table 1.** Vulnerable Group by Depth

Vulnerability	Age	Gender	Average Height (m)	Average Weight (kg)	$h_{vc}$
Vulnerable group	Under 60 years old	Male	1.72	72.96	1.346
		Female	1.6	57.62	1.179
Non-vulnerable group	Over 60 years old	Male	1.65	64.61	1.248
		Female	1.51	55.22	1.14



**Fig. 2.** The Relationship Curve Between Critical Flow Velocity and Critical Water Depth

위의 Fig. 2에서 한계수심과 한계유속 관계곡선의 아래에 침수 발생 시나리오가 위치하게 되면 해당 집단은 침수 피해에 취약하지 않으며, 관계곡선의 위에 위치할 경우에는 침수에 취약할 수 있음을 나타낸다. 즉 침수 해석 결과에 따라 한계수심과 한계유속의 관계를 침수 취약 집단 별로 구분하였다. 그 취약 집단을 구분한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2에 의해 침수심과 유속에 따라 취약 집단을 구분하고 그 집단에 따라 침수심과 유속 정보를 가지고 있는 침수 해석결과를 토대로 인적 침수 피해(Human Inundation Damage)를 산정한다.

**Table 2.** Vulnerable Group and  $h_{vc}$  by Flood Depth

no.	$h_{vc}$ Range (m)	Vulnerable group
①	0~1.14	No
②	1.14~1.18	Female over 60 years
③	1.18~1.25	Female over 60 years+Female under 60 years
④	1.25~1.35	Female over 60 years+Female under 60 years+Male over 60 years
⑤	1.35~	All

본 연구에서는 위의 집단에 따른 인적 내수 침수 피해 평가를 위하여 침수 해석결과를 격자형식으로 표출하여 침수심에 따른 침수 격자, 유속에 따른 침수 격자를 이용하여 인적 침수 피해를 산정한다. 침수심과 유속 관계의 취약 인구별 격자의 개수로 표현된 침수면적을 산정하게 되며, 산정된 침수면적을 통해 구분된 그룹에 의해 대상 지역의 집계구별 60대 이상, 이하의 남, 녀 인구를 각각 고려하여 피해 가능 인구를 산정하게 된다. 이 산정된 인구의 합을 통해 전체 대상 지역의 침수 피해 가능 인구를 산정하게 되며 이 값은 인적 침수 피해(Human Inundation Damage) 값이 된다.

최종적으로 위에서 언급한 50년빈도 폭풍해일고 및 지속 시간 60분에 강우량 100 mm의 시나리오를 기준으로 각 시나리오별 상대적인 인적 침수 피해(Scenario-Based Human Inundation Damage)를 최종적으로 산정하였다.

### 3.3 건물 침수 피해 평가 방법

이전의 연구 중 Shin (2012)은 적용한 건물의 침수 피해 평가는 건물 가치에 침수심 별 건물 침수 피해율을 적용하여 산정하고 있으며, 전체 침수 분석결과를 동일한 침수심 별로 건물 자산에 대한 피해율을 적용하고 있다. 또한 Cho (2014)



는 대상 지역의 평균 연면적을 적용한 침수 가구 수에 의해 산정된 건물자산에 해수면 상승에 따른 평균 피해율을 곱하여 산정한 피해액을 산정하고 있다.

본 연구에서는 평균 연면적에 따른 건물 자산이 아닌 개별 건물에 대한 직접적인 침수 피해 평가를 위하여 건물별 침수 면적을 고려하고자 하였다. 또한 건물별로 최고 침수심에 해당하는 침수심별 피해율을 적용하여, 내수 침수 발생에 따른 유효 침수 발생 가능 건물 면적을 산정하였다. 그 값을 건물 침수 피해(Building Inundation Damage) 값으로 산정하여 평가하였다.

건물 침수 피해는 침수심별 침수 건물 면적에 피해율을 적용한 면적을 산정하였다. 이 침수 피해율은 “수자원사업의 타당성 분석 개선방안 연구(K-water, 2008)”에 기재된 피해율을 적용하였으며, 본 연구에서는 대상 건물을 단독 주택으로 가정하여 피해를 산정하였다. 이 때 침수심과 건물과의 공간정보분석의 중첩을 통하여 최대 침수심에 대한 침수건물을 추출한 후 침수심에 따른 피해율과 침수건물 면적을 곱하여 침수에 따른 피해 건물 면적을 계산하였다. 즉 Table 3의 침수심별 피해율 구간에 맞도록 침수면적을 구분하여 공간정보 데이터를 구축하였으며, 다음으로 건물 공간정보 데이터와 중첩하여 건물 침수 피해(Building Inundation Damage)를 평가하였다. 또한 인적 침수 피해 평가와 동일한 시나리오를 기준으로 최종 침수 평가를 진행하였다.

**Table 3.** Buildings Damage Rate by Flood Depth (K-water, 2008)

Flood depth	0~0.5m	0.5~1.0m	1.0~2.0m	2.0~3.0m	Above 3.0m
Damage rate	15%	32%	64%	95%	100%

#### 4. 침수 해석 및 피해 평가 결과

본 연구에서는 위의 방법에 따라 제주 산지천 좌안 배수구역에 대하여 침수 해석 및 피해 평가를 진행하였다.

##### 4.1 제주 산지천 좌안 구역 침수 해석

제주의 산지천 하류는 제주특별자치도 제주시 일도동과 이도동 인근에 위치한 하천으로 제주 구시가지 인근의 도심 하천이다.

해당 지역은 제주 산지천의 좌안의 배수구역으로 해당 지역은 북쪽으로 남해가 접해있고 우측으로는 산지천 좌측으로는 한천이 접해있다. 해당 지역의 내수배제체계의 배수 구역은 산지천을 기준으로 나누어져 있으며, 그 구역의 경계와 주요 맨홀 및 투구의 위치는 Fig. 3과 같다. 구역의 전체 면적은 84.24 ha이며, 본 연구에서는 주요 관로인 직경 500 mm 이상의 관로와 과거 침수 피해가 크게 발생한 지역에

대하여 자세한 분석을 위해 500 mm이하의 일부 관로를 추가하여 침수 해석을 진행하였다.



**Fig. 3.** The Sanji Left-watershed in Jeju

입력 강우자료는 지속시간 60분에 10 mm부터 100 mm까지 10 mm 간격으로 10개의 강우량을 입력하였으며, 강우 분포는 “설계홍수량 산정요령(MOLIT, 2012)”에서 Huff 4분 위법의 3분위를 권장함에 따라 본 연구에서는 Huff 3분위를 기준으로 침수 해석을 진행하였다. Huff 분포형의 각분위별 회귀상수는 “확률강우량도 개선 및 보완 연구(MOLIT, 2011)”의 제주지점의 값을 이용하였다.

다음으로 복합원인을 고려한 침수 해석을 위하여 산지천 좌안 구역의 배수투구에 영향을 미치는 하류단 경계조건은 해수위 상승조건과 하천 홍수위 상승을 고려하여 입력하였다.

먼저, 해수위 상승조건은 위에서 언급한 폭풍해일고를 Table 4와 같으며 다음으로, HEC-RAS 모형을 이용하여 해수위 상승조건을 고려한 산지천의 홍수위를 산정하였다. 산지천에 연결된 배수 투구의 위치에 해당하는 단면별 홍수위를 확인하였으며, 산정을 위해 Table 2의 해수위 상승고를 산지천 하류단 기점수위로 입력하여 각 단면별 홍수위를 산정하였다.

**Table 4.** The Rising Sea Level of The Sanji Left-watershed in Jeju

A.H.H.W.L.	Frequency	
	30-year frequency strom	50-year frequency strom
EL. 1.390m	EL. 2.100m	EL. 2.240m

Table 5에서 잠식도 값은 하류단 경계 조건에 의해 토구의 잠식정도를 나타내며, 잠식도(Degree of Sinking)는 아래와 같다.

$$\text{잠식도*} = \frac{\text{하류단 경계조건(EL.)} - \text{배수토구의 관저고(EL.)}}{\text{관경(m)}}$$

이를 통해 제주 산지천 좌안 유역은 50년빈도 폭풍해일 발생 시 해안에 접해 있는 토구 6개 중 1개를 제외 하고 전부 해수위 상승에 영향을 받는 것으로 확인 된다.

산지천 좌안 유역의 복합원인을 고려한 침수 해석결과는 해수위가 상승함에 따라 배수토구의 하류 경계조건으로 기점수위가 상승함에 따라 침수 해석 결과도 달라짐을 확인 하였다. 그 결과는 Table 6과 같다.

다음 결과를 보아 해수위 상승이 전체 배수유역 면적 대비 침수면적의 변화에 일부 영향을 미치는 것으로 판단된다. 작은 강우 시나리오에서는 침수면적이 약 3 ha의 증가를 보이지만, 강한 강우 시나리오에서는 보다 작은 면적 증가를 보이는 것으로 판단된다. 즉 강우강도가 커질수록 단순 침수 면적은

해수위 증가에 영향이 적다. 그러나 평균 침수심의 경우에는 강한 강우강도에서 보다 큰 차이를 보이는 것으로 판단된다.

#### 4.2 제주 산지천 좌안 유역 침수 피해 평가

제주 산지천 좌안 유역은 대상 유역에 5821명이 거주하고 있으며, 26.81 ha의 건물면적을 가지고 있다. 위의 인적, 건물 침수 피해 평가 방법에 따른 침수 피해 결과는 Tables 7, 8과 같다. 먼저 인적 침수 피해의 최대 피해값인 658을 기준으로 시나리오에 대한 침수 피해를 평가하였으며, 건물 침수 피해의 최대 피해값인 42027.4를 기준으로 시나리오에 대한 평가한 결과가 %의 값으로 Figs. 4, 5와 같다.

강우의 강도가 커질수록 침수 피해는 커지고 있으며, 50 mm를 기준으로 급격하게 커지고 있음을 확인할 수 있다.

이를 토대로 기준 시나리오에 대한 전체 시나리오의 침수 피해 평가 결과는 아래와 같다. 그 결과 인적, 건물 침수 피해 결과는 지속시간 60분, 강우량 50 mm를 기점으로 보다 크게 증가하는 경향을 보였으며, 또한 인적 침수 피해 보다 건물 침수 피해가 해수위 상승고에 보다 큰 영향을 받는 경향을 보였다.

**Table 5.** Outlet Boundary Condition

Outlet	Bottom stage (EL.m)	Diameter (m)	A.H.H.W.L.		50-years frequency strom		Outlet Location
			Water level (EL.m)	Degree of Sinking*	Water level (EL.m)	Degree of Sinking*	
1	2.4	0.8	1.39	-1.26	2.24	-0.20	Coast
2	1.5	0.8	1.39	-0.14	2.24	0.93	Coast
3	1.44	0.6	1.39	-0.08	2.24	1.33	Coast
4	1.44	0.6	1.39	-0.08	2.24	1.33	Coast
5	-0.1	0.8	1.39	1.86	2.24	2.93	Coast
6	1.45	1	1.39	-0.06	2.24	0.79	Coast
7	1.87	0.4	2.56	1.73	2.56	1.73	The Sanji River
8	4.56	0.4	2.56	-5.00	2.56	-5.00	The Sanji River
9	1	0.4	2.56	3.90	2.56	3.90	The Sanji River
10	5	0.8	4.99	-0.01	4.99	-0.01	The Sanji River

**Table 6.** Maximum Flood Area Analysis

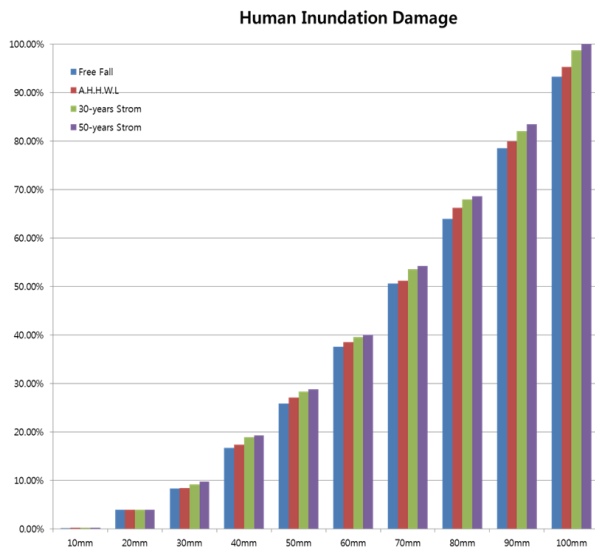
Scenarios		A.H.H.W.L. (EL. 1.390m)			50-years Strom (EL. 2.240m)		
		Flooded area	Rate of flooded area to total watershed area	Average Depth	Flooded area	Rate of flooded area to total watershed area	Average Depth
(Duration / Rainfall)	60min / 10 mm	1.27ha	1.5%	0.11m	4.12ha	4.9%	0.11m
	60min / 50 mm	12.80ha	15.2%	0.25m	15.38ha	18.3%	0.27m
	60min / 100 mm	27.25ha	32.3%	0.40m	28.87ha	34.3%	0.49m

**Table 7.** Human Inundation Damage

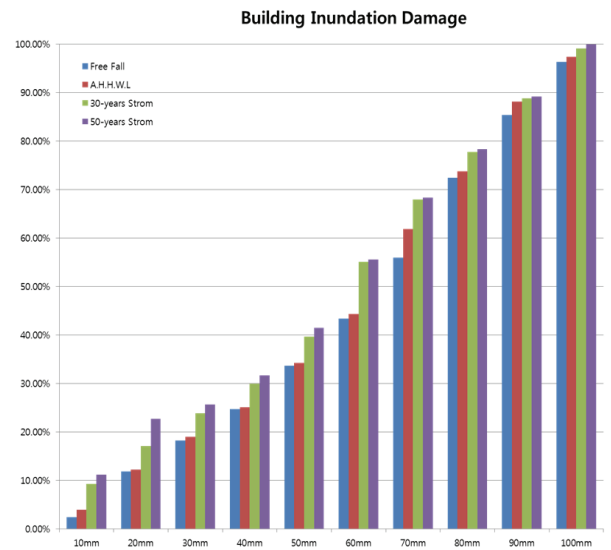
Outlet boundary condition		60min / 10mm	60min / 50mm	60min / 100mm
A.H.H.W.L.	Damage	1	178	626
50-years Strom	Damage	1	189	658

**Table 8.** Building Inundation Damage

Outlet boundary condition		60min / 10mm	60min / 50mm	60min / 100mm
A.H.H.W.L.	Damage	1652.4	14381.0	40951.8
50-years Strom	Damage	4712.9	17429.0	42027.4



**Fig. 4.** Relationship Between Human Inundation Damage and Scenarios



**Fig. 5.** Relationship Between Building Inundation Damage and Scenarios

**Table 9.** Comparison of Flooded area and Inundation Damage

Outlet boundary condition		60min / 10 mm	60min / 50mm	60min / 100mm
A.H.H.W.L.	Flooded area compared to Standard Scenario	4.4%	44.3%	94.4%
	Human Inundation Damage compared to Standard Scenario	0.2%	27.1%	95.3%
	Building Inundation Damage compared to Standard Scenario	3.9%	34.2%	97.4%
50-years Strom	Flooded area compared to Standard Scenario	14.3%	53.3%	100.0%
	Human Inundation Damage compared to Standard Scenario	0.2%	28.8%	100.0%
	Building Inundation Damage compared to Standard Scenario	11.2%	41.5%	100.0%

이러한 연안도시 지역의 복합원인을 고려한 침수 해석 결과와 합리적인 기준 선정에 따른 침수 피해 평가 결과를

함께 비교하였다. Table 9는 기준 시나리오 대비 침수 면적과 인적, 건물 침수 피해 결과를 비교하였다. 이를 통해 연안도시

지역으로 제주 산지천 유역의 경우 낮은 강우강도에서 보다 복합원인에 취약함을 확인할 수 있었으며, 인적보다는 건물 침수 피해에 보다 취약함을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 연안도시 지역 중 제주 산지천 좌안 배수유역에 대하여 복합원인을 고려한 내수 침수 해석 및 침수 피해 평가를 실시하였다. 이를 위해 대상 유역의 복합원인으로 해수위 상승에 영향을 주는 폭풍해일고를 적용하여 배수 토구에 영향을 주는 기점수위를 산정하였다. 이렇게 산정된 경계조건을 도시유출모형인 XP-SWMM에 적용하여 침수 면적과 침수심, 유속을 산정하였다. 그 결과는 전체 배수유역에 대하여 비교하는 것이 아닌 발생 가능한 시나리오를 기준으로 침수 피해 평가하였다.

그 결과는 연안도시 지역의 경우 작은 강우에서는 침수심보다 침수면적이 크게 영향을 받고, 큰 강우에서는 침수면적보다 침수심이 해수위 상승에 영향을 받음을 확인하였다. 또한 인적 침수 피해보다는 건물 침수 피해가 해수위 상승에 영향을 크게 받는 것으로 확인하였다.

그러나 이러한 결과는 연안도시 지역의 지형특성에 따라 해수위 상승고가 크거나 작은 영향을 미칠 수 있을 것이며 또한 제주와는 다른 침수 피해의 변화 양상이 보일 수 있을 것을 본다. 이에 후속 연구로서 다른 연안도시 지역에 대한 침수 해석과 침수 피해 평가를 실시되어야 한다고 판단된다.

따라서 본 연구의 침수 해석을 통해 연안도시 지역은 단순한 강우에 대한 평가가 아닌 해수위 상승과 같은 복합원인을 고려할 필요가 있다고 판단된다. 또한 본 연구의 침수 피해 평가는 방재행정 측면에서 연안도시 지역은 다른 내륙 지역과는 다른 침수 방지 대책 설정 시 의사결정에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임[MOIS-재난-2015-03].

## References

Abt, S.R., Wittier, R.J., Taylor, A., and Love, D.J. (1989). Human stability in a high flood hazard zone. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 25, No. 4, pp. 881-890.

Cho, K.W. (2014). *Study on quantifying risk of the effects*

*Climate Change I*. Korea Environmental Institute.

Hsu, M.H., Chen, S.H., Chang, T.J. (2000). Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. *Journal of Hydrology*, Vol. 234, No. 1-2, pp. 21-37.

Kim, N.W. (2011). *A study on the development of water management evaluation system (III)*. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport.

K-water (Korea Water Resources Corporation). (2008). *A study on the improvement of feasibility analysis for water resources projects*.

Lee, J.H., and Yeon, K.S. (2008). Flood inundation analysis using XP-SWMM model in urban area. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 8, No. 5, pp. 155-161.

Lee, Y.J. (2007). *Development of a real time control model for urban drainage systems considering backwater effect*. Master's thesis, Korea University.

MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport). (2011). *Research of improving and supplementing the probability rainfall*.

MOLIT. (2012). *Method of Design Flood Calculation*.

Park, M.J. (2017). *Development of Flood Vulnerability Assessment Technology for Various Causes of Coastal Cities for Adaptation to Climate Change*. Ministry of the Interior and Safety.

Phillips, B.C, Yu, S., Thompson, G.R., and de Silva, N. (2005). 1D and 2D modelling of urban drainage systems using XP-SWMM and TUFLOW. *10th International Conference on Urban Drainage*, Copenhagen, Denmark.

Shin, J.Y., Lim, S.M., Kim, J.H., and Kim, T.W. (2014). Analysis of urban flood damage characteristics using inland flood scenarios and flood damage curve. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 1, pp. 291-301.

Shin, S.S. (2012). Economic feasibility study of port disaster prevention facilities from climate change storm surge using MD-FDA. *Ocean Policy Research*, Vol. 27, No. 2, pp. 133-176.

Received	September 17, 2018
Revised	September 18, 2018
Accepted	September 27, 2018