



도시 소유역 내 내수침수 위험도 평가 : 강우 시간분포 및 이중배수체계 모형을 중심으로

Risk assessment for inland flooding in a small urban catchment : Focusing on the temporal distribution of rainfall and dual drainage model

이재현¹·박기홍¹·전창현²·오재일^{2,*}

Jaehyun Lee¹·Kihong Park¹·Changhyun Jun²·Jeill Oh^{2,*}

¹중앙대학교 토목공학과, ²중앙대학교 사회기반시스템공학부

¹Department of Civil Engineering, Chung-Ang University

²School of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University

ABSTRACT

In this study, dual drainage system based runoff model was established for W-drainage area in G-si, and considering the various rainfall characteristics determined using Huff and Mononobe methods, the degree of flooding in the target area was analyzed and the risk was compared and analyzed through the risk matrix method. As a result, the Monobe method compared to the Huff method was analyzed to be suitable analysis for flooding of recent heavy rain, and the validity of the dynamic risk assessment considering the weight of the occurrence probability as the return period was verified through the risk matrix-based analysis. However, since the definition and estimating criteria of the flood risk matrix proposed in this study are based on the return period for extreme rainfall and the depth of flooding according to the results of applying the dual drainage model, there is a limitation in that it is difficult to consider the main factors which are direct impact on inland flooding such as city maintenance and life protection functions. In the future, if various factors affecting inland flood damage are reflected in addition to the amount of flood damage, the flood risk matrix concept proposed in this study can be used as basic information for preparation and prevention of inland flooding,

Received 31 August 2021, revised 3 November 2021, accepted 12 November 2021.

*Corresponding author: Jeill Oh (E-mail: ohjeill@cau.ac.kr)

• 이재현 (박사과정) / Jaehyun Lee (Ph.D. Student)

서울특별시 동작구 흑석로 84, 06974

84, Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Republic of Korea

• 박기홍 (석사과정) / Kihong Park (Master Student)

서울특별시 동작구 흑석로 84, 06974

84, Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Republic of Korea

• 전창현 (조교수) / Changhyun Jun (Assistant Professor)

서울특별시 동작구 흑석로 84, 06974

84, Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Republic of Korea

• 오재일 (교수) / Jeill Oh (Professor)

서울특별시 동작구 흑석로 84, 06974

84, Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

as well as it is judged that it can be considered as a major evaluation item in the selection of the priority management area for sewage maintenance for countermeasures against inland flooding.

Key words: Dual drainage model, Inland flooding, Return period, Risk assessment, Risk matrix, Temporal distribution of rainfall

주제어: 이중배수체계 모형, 내수침수, 재현기간, 위험도 평가, 위험도 매트릭스, 강우 시간분포

1. 서 론

내수침수는 제방 내에 있는 토지인 제내지에 내린 우수로 인한 유출이 적절히 배수되지 않아 발생하게 되는 침수 현상을 의미한다 (MOIS, 2020). 최근 기후 변화 등의 영향으로 예측하기 어려운 도시 내 국지성 호우의 발생 빈도가 증가하고, 도시화로 인한 불투수 면적 또한 크게 증가함에 따라 도시 소유역 내 잦은 내수침수 피해로 인한 제도 개선 및 대응 마련의 필요성이 더욱 강조되는 실정이다. 특히, 하수관로 통수 능력 이상의 우수가 빈번하게 유입됨에 따라 기존 하수관로로의 유입지연과 저지대 적체현상(surcharge), 관로 이송 용량 부족으로 인한 배수 지체현상(overloading) 및 하천수위 증가에 의한 관로 역류현상(backwater) 등으로 인한 내수침수 피해 사례가 급증하고 있다 (Lee et al., 2016). 내수침수의 경우, 도시 소유역 내 침수의 주된 원인이 되며 국내에서는 2020년에 발생한 기록적인 호우를 계기로 총 38개 시·군·구 및 36개 읍·면·동을 특별재난지역으로 선포한 바 있다 (Kim, 2020).

이와 관련하여 MOIS (2018)는 국내 풍수해 저감을 목표로 풍수해 저감 계획 세부기준을 수립하고, ‘피해 발생 이력 지수’와 ‘긴급성’의 개념을 활용하여 풍수해에 대한 위험성 지수를 산정하였다. 여기서 ‘피해 발생 이력 지수’는 최근 10년간 발생한 피해 이력으로부터 산정되고, ‘긴급성’은 재해 발생 위험 유형에 따라 결정되는 재해 위험도 지수와 주민이 겪는 불편의 유형에 따른 주민 불편도 지수로부터 산정된다. 최종적인 풍수해 위험등급은 ‘극한위험’, ‘고위험’, ‘중위험’, ‘저위험’으로 구분되며 ‘피해 발생 이력 지수’와 ‘긴급성’ 간의 곱인 위험도 지수로부터 결정된다는 특징이 있다. MOE (2013)는 하수의 범람으로 인한 피해를 줄이기 위한 목적으로 하수도법 제4조의 3에 따라 하수 범람으로 인해 인명, 재산 등의 피해가 반복적으로 발생하거나 발생할 우려가 있는 지역, 하수관로의 경사

혹은 용량이 적정하지 아니하여 하수의 범람으로 인한 침수 피해가 발생하거나 발생할 우려가 있는 지역 그리고 하수의 범람으로 인하여 취수원 또는 공공수역의 수질이 악화되었거나 악화될 우려가 있는 지역 등을 ‘하수도 정비 중점 관리지역’으로 지정하였다. 이는 최근 10년 동안의 강우로 인해 하수의 범람 등으로 인해 침수가 발생했지만 대책이 시행되지 않고, 강우-유출 시뮬레이션을 통해 침수 발생 우려가 있는 지역과 하수관 내 수위보다 낮은 저지대 지역, 반지하 건축물 등이 포함된 지역 등을 포함한다는 특징이 있다. 대상지역들 내 실제 침수 피해 현황에 대한 침수 면적, 침수위치, 피해대상, 피해액에 대한 정보를 작성함으로써 ‘하수도 정비 중점 관리지역’ 후보지를 선정하고자 하였다.

Lee et al. (2016)은 도시침수 발생지역을 구분하고자 설정된 범위인 침수 영향권을 구획화함으로써 대상지역 내 침수 위험도를 평가하고자 하였다. 이러한 영향권은 침수 발생의 가능성과 침수 영향의 크기를 통해 결정되며 침수 발생 가능성의 경우, 재현기간 30년과 100년을 고려했다는 특징이 있다. 해당 재현기간 별 강우 시나리오로부터 침수 모의 결과를 도출하고, 50 cm 이하, 50 cm 초과, 100 cm 이하, 100 cm 초과로 구분되는 침수심의 범위로부터 침수 영향의 크기를 결정하였다. 최종적으로 침수 위험도 등급을 red zone, orange zone, yellow zone, green zone으로 구분하고, 등급별 방재대책을 제시하였다. 여기서, red zone의 경우, 호우 발생 시 매우 심각한 피해 영향이 있어 방재 대책이 시급한 지역을 의미하며 orange zone은 상대적으로 red zone에 비해 하위 수준에 해당하는 지역이지만 방재대책이 필요한 지역이다. Yellow zone의 경우, 주의 정도의 위험 수준을 나타내며 green zone은 호우 시 피해 영향이 거의 없는 지역을 의미한다.

UNISDR (2009)은 위험도를 특정 사건의 발생 가능성과 부정적인 영향 정도의 조합으로 정의하고, 재해 특성(hazard), 노출특성(exposure) 및 취약성(vulnerability)



요소들로부터 재해에 대한 위험도를 평가하였다. 여기서, 재해특성은 침수심 등 재해 관련 인자의 크기, 노출특성은 재해 발생지역 내에 존재하는 인구, 자산, 시스템 등의 잠재적인 손실, 그리고 취약성은 재해로 인한 피해 발생 정도를 의미한다. 침수 위험도와 관련하여 EXCIMAP (2007)는 두 종류의 침수 관련 지도 작성의 필요성을 제안하였다. 이는 침수심, 유속, 과거 재해 발생 기록에 대한 정보를 포함하는 재해특성지도와 재해 발생 가능성, 인간의 삶과 자산에 미치는 영향, 노출특성, 취약성 등의 조합으로 결정되는 위험도 지도로 구분된다. 위험도 지도 중 취약성의 경우, 인구, 자산 및 경제적인 활동과 관련된 내용들로부터 결정되며 잠재적으로 오염을 발생시킬 여지가 있는 시설물에 대한 정보도 포함한다는 특징이 있다. Loat (2010)은 스위스 내 침수 위험도 평가를 위해 침수 발생 가능성에 대한 재현기간으로 1-30년, 30-100년, 100-300년, 300년 이상으로 구분된 기준을 활용했으며 침수로 인한 영향의 크기를 정의함에 있어 외수범람으로 인한 비유량, 제방침식의 파괴 크기, 낙석 발생 시 운동에너지 등을 고려하였다.

기존 국내·외 침수 위험도 평가방법들은 대부분 외수침수를 고려한 하천 주변 중·대유역을 대상으로 하며, 특히 취약성 산정과 관련하여 무엇이 해당 재해에 취약하고 얼마나 재해에 취약한지를 정량적으로 파악하기가 어려워 특정 요소들에 한해서는 전문가의 주관적 판단이 요구되기도 한다. 또한, 침수 위험도 평가가 사후 대책의 측면에서 침수 위험 지도 제작, 상습 침수구역 선정 등을 목적으로 하기 때문에 침수 이력이 있던 지역 외에 어느 지역이 침수 위험에 노출될 수 있을지 예측하기 어려운 현실 속에서 사전 대응을 위한 주요 정보로써 활용될 수 있는 침수 위험도 평가방법이 개발될 필요가 있다. 즉, 어떤 기준으로 도시 소유역 내 내수침수 위험도를 정량적으로 평가하고, 위험 수준 및 등급을 구분하는 것이 적절한지에 대한 추가 논의가 필요한 시점이다.

본 연구에서는 침수 위험도 매트릭스 개념을 정의하고, 재현기간과 침수심을 바탕으로 도시 소유역 내 내수침수 위험도를 평가하고자 한다. 먼저, 최근 빈번히 발생하는 국지성 호우의 특성을 반영하기 위해 다양한 재현기간(2년, 5년, 10년, 50년, 100년) 및 30분 단위의 짧은 강우 지속시간을 고려한 설계 강우를 도출하였다. XPSWMM을 통해 대상 구역에 대한 이중

배수체계 기반의 유출 모형을 구축한 후, Huff 및 Mononobe 방법으로부터 결정된 1분 단위 설계 강우를 활용하여 재현기간별 침수 발생 가능성과 영향 정도를 비교·분석하였다.

2. 연구방법

본 연구에서 제안하고자 하는 위험도 매트릭스 개념을 활용한 내수침수 위험도 평가 절차는 Fig. 1과 같다.

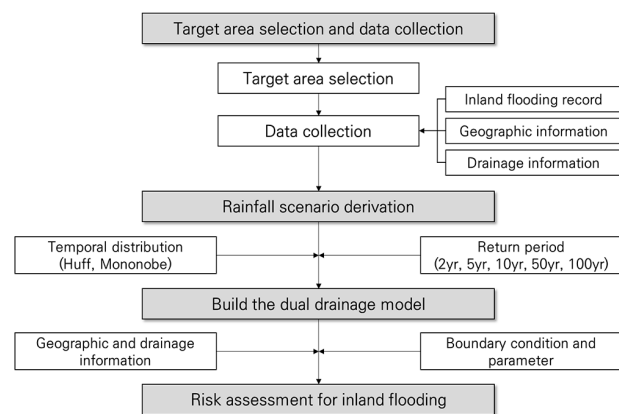


Fig. 1. Flowchart of risk assessment for inland flooding using a concept of risk matrix.

2.1 대상지역

본 연구에서는 도시 소유역 내 내수침수에 대한 위험도를 평가하기 위해 토지이용 특성상 불투수층 비율이 높아 저류효과를 기대하기 어렵고, 짧은 도달시간으로 인해 단기간의 호우에도 침수 발생 확률이 높은 G시 W배수분구를 대상지역으로 선정하였다. G시 W배수분구는 과거 10년간 174건의 침수피해가 발생한 지역으로서 G시 내에서도 침수발생 빈도가 높은 지역이다 (Lim and So, 2020). 전체면적은 0.45 km²이며, 주로 주거지역과 상업지역으로 구성되어 있다. 전체 면적 중 불투수율 비율이 64.1%로 강우 발생 시 짧은 유하시간을 갖는 전형적인 도시 소유역의 특성을 보인다. 하수배제는 분류식 배제방식으로 설치되어 있으며, 우수배제를 위한 우수관 및 암거가 각각 43 km, 6.5 km 설치되어 있다. 대부분의 빗물은 우수관 및 암거를 통해 하천으로 방류된다. 하지만 제1지류인 대장천을 통하여 간접적으로 한강에 유입되므로 한강 조위

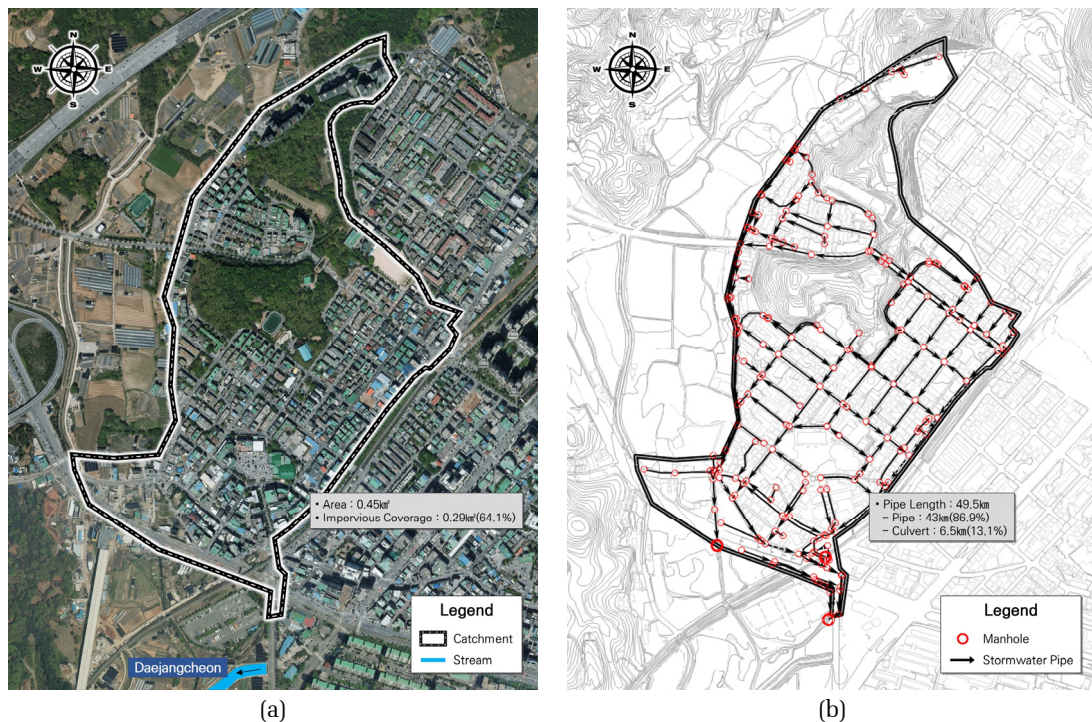


Fig. 2. Location of W-drainage area: (a) GIS map of W-drainage area, (b) Main stormwater pipe network of W-drainage area.

등의 영향을 거의 받지 않아 외수위 상승에 따른 침수는 발생하지 않는다는 특징이 있다.

본 연구의 대상지역에 대한 모식도는 Fig. 2와 같다.

2.2 강우 시나리오

강우 빈도해석으로부터 결정된 확률강우량은 재현기간 및 지속기간 별 총 강우량의 형태로 그 값이 결정되기 때문에 해당 지속기간 내 강우의 시간적 변동 특성을 반영하지 못한다는 특징이 있다. 따라서 이를 이중배수체계 모형 등 강우-유출 모형에 적용하여 홍수량을 산정하기 위해서는 실제 관측된 강우 자료와 같이 특정 지속기간 내 강우의 시간적 분포 특성을 고려한 우량주상도 작성이 요구된다. 즉, 대상 유역을 대표하는 호우 특성을 고려한 설계 우량주상도 결정이 필수적이며 해당 결과에 따라 유출 수문곡선의 형태, 첨두 홍수량의 크기 및 발생시간 등이 결정된다. 본 연구에서는 대표적인 강우 시간분포 모형인 Huff 및 Mononobe 방법을 고려하여 설계 강우의 시간분포 특성을 결정하고, 이를 이중배수체계 모형에 적용한 침수 시뮬레이션 결과들을 비교·분석하였다.

Huff 방법은 미국 일리노이주 내 400 mi² 이하의 면

적을 가진 유역들을 대상으로 실제 호우사상들에 대한 총 우량의 시간분포 양상을 분석하여 제한한 방법이다 (Huff, 1967). 총 강우 지속시간을 4개의 등시간구간으로 구분했을 때, 가장 큰 강우량이 어느 구간에서 발생하는가에 따라 강우의 시간분포 특성을 4가지로 구분하였다. 즉, 총 강우 지속기간 중 첫 1/4 구간에서 첨두 강우가 발생하면 1분위 호우(first quartile storm), 2/4 구간에서 발생하면 2분위 호우(second quartile storm), 3/4 구간에서 발생하면 3분위 호우(third quartile storm), 4/4 구간에서 발생하면 4분위 호우(fourth quartile storm)로 정의된다. 본 연구에서는 MOE (2019)에 제시된 Huff 분포의 초과확률-지속기간 백분을 관계 곡선으로부터 50%의 초과확률 및 3분위 호우 특성을 고려하였다. 여기서 초과확률 50%의 우량주상도는 해당 분위에서 총 강우량의 절반을 초과하는 누가 강우량의 시간적 분포 양상을 나타내며 첨두 강우가 해당 분위의 중심에 위치하게 된다는 특징이 있다.

Mononobe 방법은 t 시간까지의 누가 강우량을 축차적으로 산정하여 총 강우량을 시간분포 시키는 방법으로 설계 강우 산정 후 전진형(advanced type), 중앙집중형(centered type), 지연형(delayed type) 중 대상 유역의

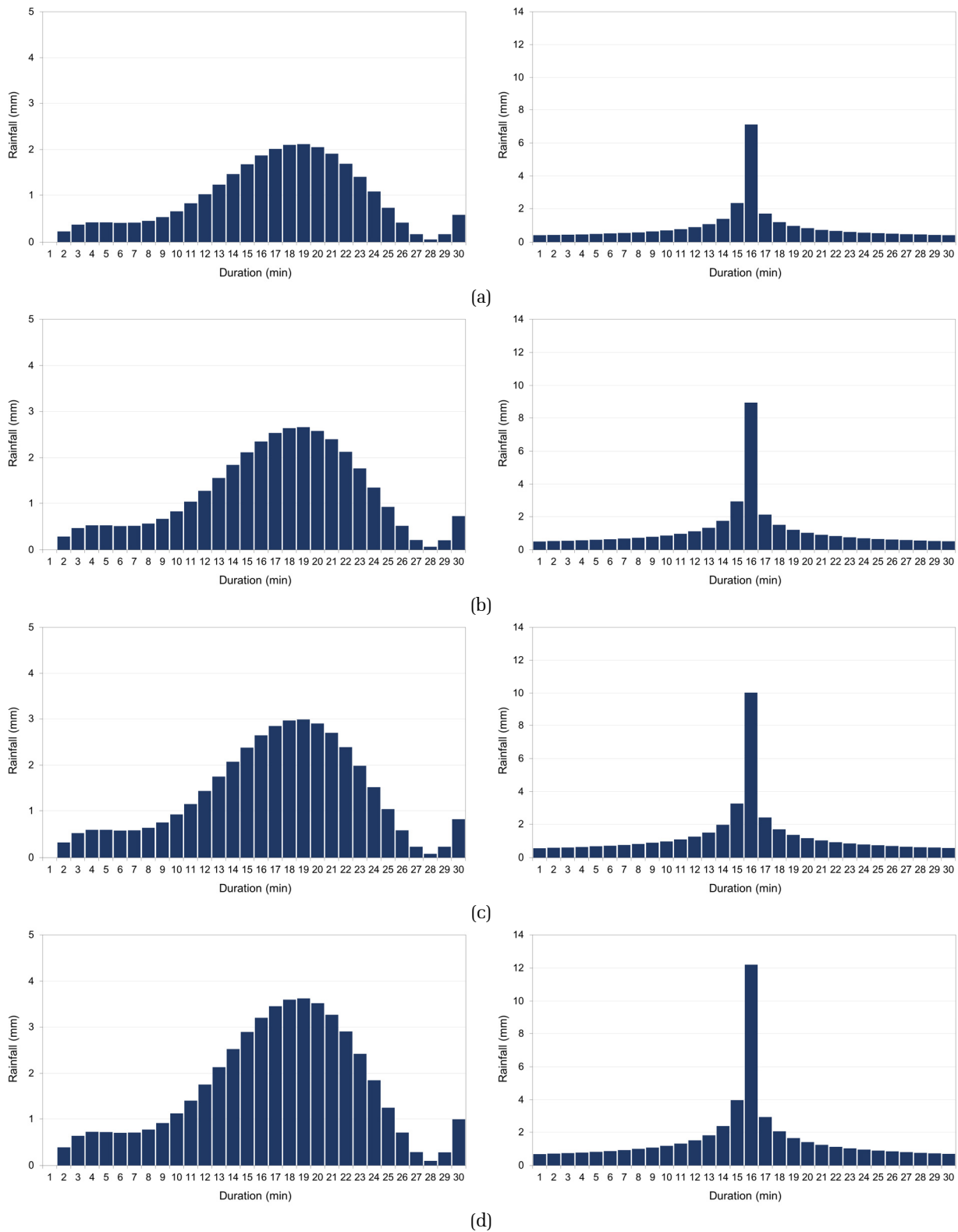
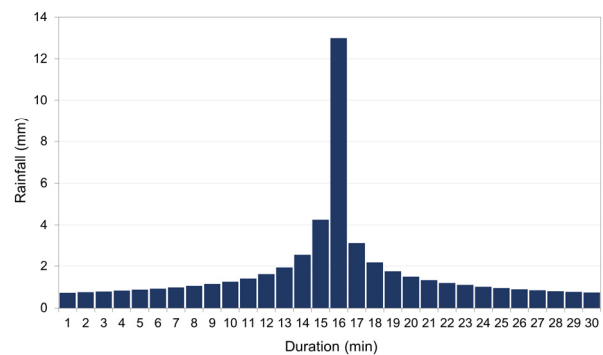
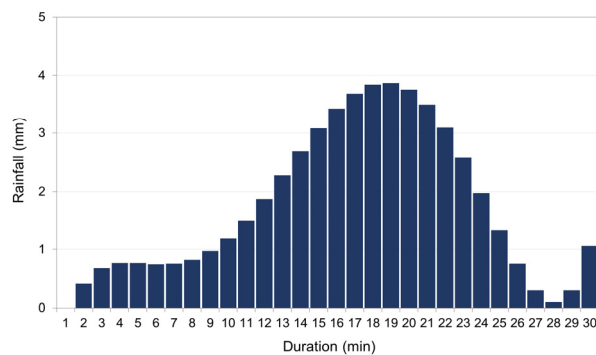


Fig 3. Hydrographs for design rainfalls from Huff (left) and Mononobe (right) methods for different return periods: (a) 2 years, (b) 5 years, (c) 10 years, (d) 50 years, (e) 100 years.



(e)

Fig. 3. Continued

강우분포양상과 유사한 형태를 선택함으로써 최종 우량주상도를 결정하게 된다. 전진형은 Δt 시간별 강우량이 가장 큰 것부터 가장 작은 것까지 차례로 배치하며 중앙집중형은 가장 큰 것을 중앙에, 다음은 좌우를 반복해 나가며 배치하고, 지연형은 전진형과 반대의 순서로 시간별 강우량을 배치하게 된다. 이를 수식으로 정리한 결과는 식 (1)과 같다.

$$R_t = \frac{R_T}{T} \left(\frac{T}{t} \right)^n \cdot t \quad (1)$$

여기서 R_T 는 강우 지속시간 동안의 설계 강우량(mm)이고, R_t 는 t 시간까지의 누가강우량(mm), T 는 강우 지속시간, n 은 상수를 의미한다. 본 연구에서는 n 값을 서울 지점에 해당하는 0.5917로 고려하였으며 (Yoon, 2009), 중앙집중형 우량주상도를 최종 선정하였다. 이를 바탕으로 강우 지속시간 30분에 대한 재현기간별 설계 강우로부터 Huff 및 Mononobe 방법을 적용하여 결정된 1분 단위 우량주상도를 정리한 결과는 Fig. 3과 같다.

2.3 이중배수체계 모형

2.3.1 개요

국내·외에서 다양한 도시유출 모형을 활용하여 침수를 모의하였다. 대표적으로 RRL, ILLUDAS, SWMM 모형이 있다. RRL 모형의 경우, 도시 소유역의 강우-유출자료를 사용한 도시배수망 설계를 위해 고안되었으며 우수관로와 직접 연결된 지역만 고려하며, 대상유역을 유하시간별로 분할하여 등도달시간-집수면적곡

선(Time-area curve)를 통하여 강우강도를 적용하여 시간별 유출량을 지체 및 합산하여 산정하게 된다. ILLUDAS는 RRL 모형을 기초로 개발되어 직접 연결된 불투수지역과 투수지역, 직접 연결되지 않는 불투수지역과 투수지역으로 구분되어 RRL 모형과 같이 등도달시간-집수면적곡선을 활용하여 유출량이 산정된다. SWMM은 지면저류가 발생하는 투수지역, 지면저류가 발생하는 불투수지역, 지면저류가 발생하지 않는 불투수지역으로 대상유역이 나뉘어져 있으며 지면저류 침투 및 증발에 의한 손실을 고려한 유출해석을 이용하며 강우손실모형, 비선형저류법 등 다양한 방법이 적용된다 (Suwon, 2018).

이중배수체계(Dual-Drainage)는 과거 도시침수에서 활용되던 해석모형의 단점인 지표면 월류량 등이 없어 지거나 맨홀에 저류된다는 가정을 보완하기 위해 고안된 개념으로서 이중배수체계 모형은 지표면 유출수의 관로 내 재유입을 설명하기 위해 지표면 유출과 관로 유출을 각각 관련 방정식과 매개변수 등을 통해 해석하고 각 해석결과를 연동하여 모의하는 방식이다 (Park and Ha, 2013). 본 연구에서 활용한 이중배수체계 모형은 XPSWMM의 2D 모형으로 미국 EPA의 SWMM(Storm Water Management Model)의 1차원 해석용 관로유출 모형과 호주 WBN사에서 개발한 2차원 침수해석용 Full Dynamic 엔진인 TUFLOW(Two Dimensional Unsteady Flow)를 결합한 모형이다. 본 모형은 1차원 배수관망 해석은 물론 2차원 지표수 흐름을 해석할 수 있도록 개발되었으며, 표고자료 입력 시 자체적인 DTM(Digital Terrain Model)을 생성하여 지표수의 동적인 흐름을 모의할 수 있다 (Lee et al., 2014).



2.3.2 모형 구축

대상지역은 외수위 영향을 받지 않으므로 위 조건에 따라 자유 방류시 통수능 부족에 의한 내수침수 발생모의를 실시하였으며, 내수침수 발생 특성인자는 침수심과 침수면적을 사용하였다.

강우시나리오는 Huff 및 Mononobe 방법을 통해 2년, 5년, 10년, 50년, 100년 빈도의 재현기간을 갖는 지속시간 30분의 강우를 적용하였다. 관로유출모델 구축 시, 대상지역의 관로는 대부분 매설된지 10년 이상의 기존 관로로서 신설관 대비 관내 퇴적, 장애물, 단차 등의 불량항목으로 인해 유하능력이 저하되어 있음에 따라 일반적으로 신설관로 수준으로 적용되는 기존 조도계수를 상향 조정하여 모델을 구축하였다. 일반적으로 신설된 원형관과 암거의 조도계수는 평균 0.013, 0.015를 적용하지만 본 연구에서는 원형관 0.014, 암거 0.017을 적용하였다. 표면유출모델 구축 시, 보다 정밀한 분석을 위해 최소 격자 크기를 10 m × 10 m으로 적용하였으며, 작업제어의 시뮬레이션 시간은 1초로 설정하였다.

본 연구에서 침수 시뮬레이션을 위해 고려한 이중 배수체계 모형의 주요 입력 변수 및 대상 값들을 정리한 결과는 Table 1과 같다.

2.4 내수침수 위험도 평가

국외의 경우, 위험도를 산정하기 위하여 어떤 상황이 발생할 수 있는 가능성과 이로 인한 영향으로 나누어 이를 조합하여 위험도 크기를 표현한다. 이를 ‘위험도(Risk) = 발생확률(Probability) × 피해영향도(Consequence)’로 표현한다 (Sayers et al., 2003).

본 연구에서는 위험도 매트릭스의 개념을 활용한 내

수침수 위험도 평가방법을 제안하고자 한다. 즉, 위험도를 평가하기 위해서는 침수가 발생할 가능성(probability)과 영향(consequence)을 통하여 산정하게 된다. 계산된 위험도의 크기와 식별을 위하여 위험도 매트릭스를 이용하여 보다 직관적으로 표현할 수 있다. 위험도 매트릭스의 경우 시각화를 통하여 재해 크기를 식별할 수 있도록 하는 도구로써 위험도 매트릭스를 활용하여 위험도에 대한 가능성과 영향의 범위를 정의함으로써 위험도에 대한 평가 및 묘사가 가능해진다 (ISO, 2020). 위험도의 가능성과 영향에 따라 구역이 나누어지게 되고 매트릭스의 구역별 위험도의 등급을 분류하게 된다. 등급에 대한 상세한 기준과 내용을 정의하여 재해에 대한 위험도를 명확히 제공할 수 있다. 또한, 색을 통한 구분으로 위험도를 빠르게 인식할 수 있다. 이외에도 위험도에 대한 특징 표현, 위험도 우선순위 산정에도 사용이 된다 (ODASDSE, 2014).

본 연구에서 고려하고자 하는 위험도 매트릭스는 재현기간과 침수심에 따라 총 25가지의 침수 위험도 점수로 구성되며 침수로 인한 영향의 크기와 발생 가능성의 측면에서 침수 위험도를 평가할 수 있다는 특징이 있다. 여기서 재현기간은 자연현상의 발생기간 간격의 평균값으로 발생확률 및 가능성 정도로 표현될 수 있다. 침수심은 내수침수 발생 시 당시 지반고로부터의 침수 높이를 의미한다. 이는 XPSWMM을 활용할 경우 침수 발생시 침수심의 크기, 시간에 따른 침수심 분석 결과를 활용하여 산정하였다.

내수침수 발생시 침수심에 따라 피해의 크기가 달라지기 때문에 이를 반영하기 위하여 국내·외 다양한 사례에서 침수심에 따른 위험도를 구분하고 있다. 국내 행정안전부(2020)에서 제작된 ‘재해지도 작성 기준 등

Table 1. Main parameters with their values or value range in XPSWMM modeling

Parameter		Values or value range
Rainfall	Temporal distribution	Huff, Mononobe
	Return period	2yr, 5yr, 10yr, 50yr, 100yr
	Duration	30 minutes
Hydraulic model	Pipe size	Pipe : D300mm ~ 1,500mm Culvert : 0.45m×0.5m ~ 2m×5m
	Roughness coefficient	Pipe : 0.014, Culvert : 0.017
	Time interval	1 second
Surface runoff model	Grid size	10×10m
	Time interval	1 second

에 관한 지침'에서는 침수심을 통해 침수 피해를 인지할 수 있도록 하였다. 침수심 순위는 0.0~3.0 m 범위에서 0.5 m 단위로 표시함을 원칙으로 하며 필요에 따라 그 간격을 조정하도록 한다. 또한, 도심 및 농어촌의 주거, 상업, 산업 단지에 대해서는 0.3 m 이상 침수되어 상당한 불편을 야기할 때, 침수에 대한 관리를 시행하도록 한다 (MOIS, 2020). 스위스에서는 침수심이 0.5 m 이하, 0.5 m에서 2.0 m, 2.0 m 이상인 경우로 분류하여 침수심에 대한 위험도를 구분한다. 이를 세부적으로 0.25 m 단위로 구분하여 나타내기도 한다 (Loat, 2010). 일본의 경우에서도 마루(0.5 m)를 기준으로 침수피해에 대해 분류하였다. 이처럼 국내·외에서 침수심을 분류하기 위하여 침수심별로 야기되는 불편함, 인명 혹은 재산 피해 등을 기준으로 한다 (MILT, 2016).

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 피해영향(CoF)별 침수심 구간은 지층 가옥의 침수 가능성 및 도로 경계석 월류 가능성을 기준으로 설정하였다. 일반적으로 지층은 지표보다 아래에 존재함에 따라 지표에 0 m를 초과한 침수심이 발생한다면 낮은 확률이라도 침수가 발생할 수 있기 때문에 피해영향의 최소 침수심 기준값을 0.0 m 초과로 설정하였다. 또한, 도심지 표면에서 빗물 유출은 대부분 도로를 따라 흐른 뒤, 측구를 통해 우수관으로 유입되어 하천으로 배수됨에 따라 도로를 넘어서는 순간 지층 가옥의 침수가 발생할 가능성이 높다. 이에 따라 도로에 설치된 경계석의 높이를 기준으로 '서울시 보도공사 설계시공 매뉴얼(Seoul, 2020)'에서 규정하는 도로 경계석과 도로의 높이차가 10~20 cm임에 따라 최소값인 10 cm를 기준으로 총 5 등급으로 침수심 구간을 설정하였다.

발생가능성(PoF)은 재현기간별 확률강우량의 증가율 및 최근 급증하는 집중호우를 충분히 반영할 수 있도록 기준을 설정하였다. 이에 따라 재현기간을 2년, 5년, 10년, 30년, 50년, 70년, 100년, 200년으로 구분하여 각 기간별 확률강우량을 산정하고, Fig. 5와 같이 도식화 후 확률강우량의 변화율이 보이는 기간을 선정하였다. 이에 따라 2년, 5년, 10년, 50년 빈도를 선정하였다. 또한 집중호우를 반영하기 위해 100년 빈도를 추가적으로 선정하여 총 5등급으로 발생가능성을 구분하였다.

위험도는 피해영향 및 발생가능성의 곱으로 산정되며, 최종적으로 침수 위험도 등급을 매우 낮음(Controlled), 낮음(Serious), 보통(Disruptive), 높음(Severe), 매우 높음(Critical)으로 구분하였다. 여기서, 높음(Severe) 및 매우

		Controlled Serious Disruptive Severe Critical					
CoF (Depth)	0.4m<D	5	5	10	15	20	25
	0.3m<D≤0.4m	4	4	8	12	16	20
	0.2m<D≤0.3m	3	3	6	9	12	15
	0.1m<D≤0.2m	2	2	4	6	8	10
	0.0m<D≤0.1m	1	1	2	3	4	5
Risk = CoF × PoF		1	2	3	4	5	
		100years	50years	10years	5years	2years	
		PoF (Return periods)					

Fig. 4. Risk matrix for inland flooding in a small urban catchment.

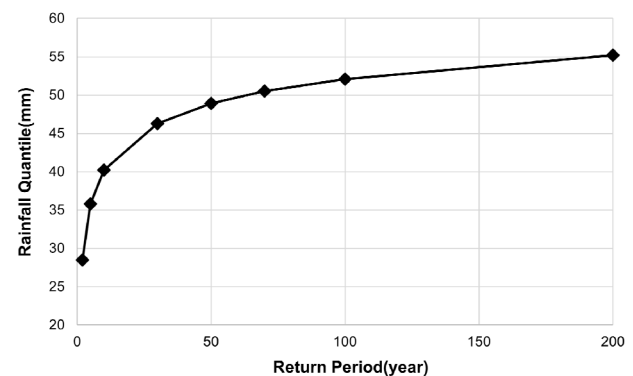


Fig. 5. Rainfall quantiles for different return periods.

높음(Critical)의 경우, 강우 발생 시 매우 심각한 침수 발생 가능성이 있는 지역을 의미하며 보통(Disruptive)은 상대적으로 높음(Severe) 및 매우 높음(Critical)에 비해 하위 수준에 해당하는 지역이지만 침수발생의 가능성이 있는 지역이다. 낮음(Serious)의 경우, 강우시 침수 가능성은 낮으나 주의해야할 지역이며, 매우 낮음(Controlled)은 강우 시 침수피해 영향이 거의 없는 지역을 의미한다.

3. 결 과

3.1 도시침수 분석 결과

구축된 도시침수 모델을 통해 Huff 방법 및 Mononobe 방법별 지속시간 30분 및 2년, 5년, 10년, 50년, 100년의 재현기간에 대한 대상지역 내 침수심 및 침수발생 면적을 예측하였다.



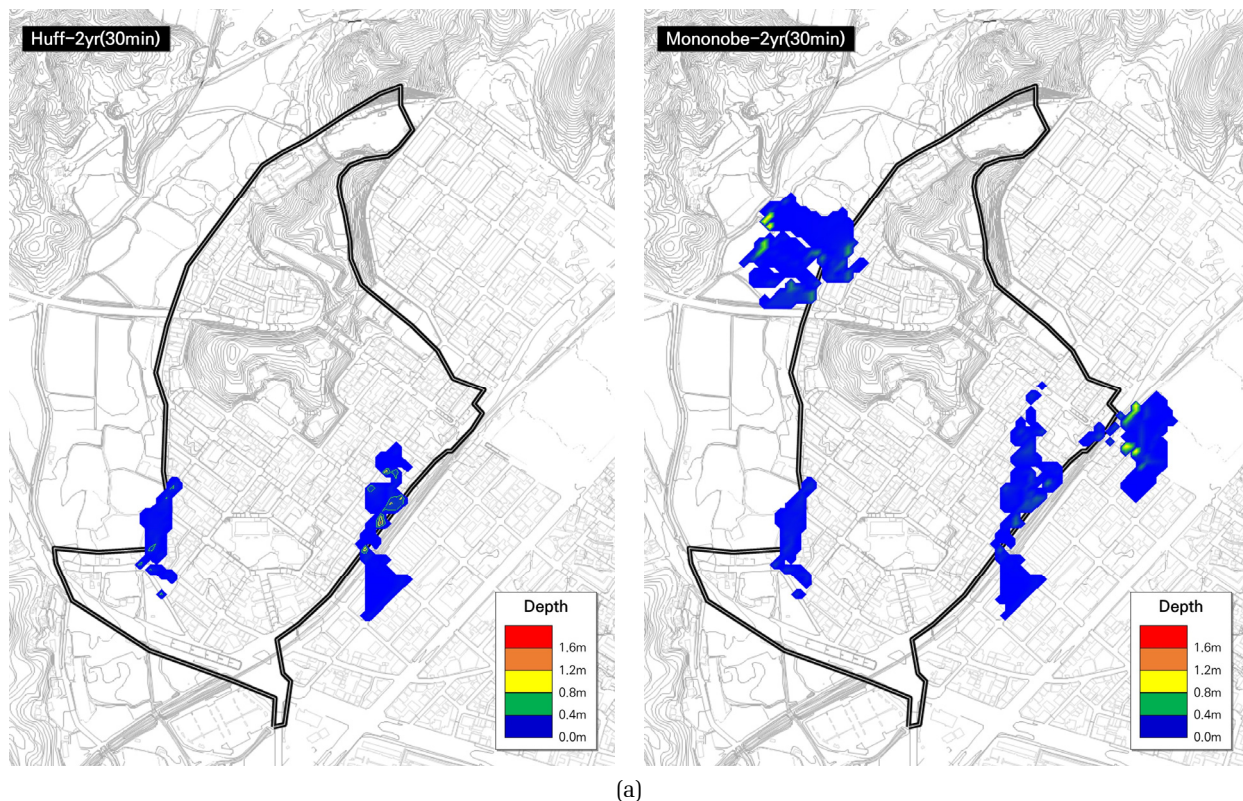
그 결과 대상지역을 기준으로 Huff 방법과 Mononobe 방법의 각 재현기간별 평균 침수심이 0.04~0.07 m, 0.06~0.08 m이며, 최대 침수심은 0.21~0.67 m, 0.34~1.12 m로 분석되었다. Huff 방법에 비해 Mononobe 방법이 평균 침수심은 최소 14%에서 최대 50%, 최대 침수심은 최소 62%에서 최대 168% 정도 높은 것으로 나타났다. 또한 10 m × 10 m 단위면적을 기준으로 Huff 방법과 Mononobe 방법의 각 재현기간별 침수면적은 0.010~0.049 km²,

0.019~0.081 km²이며, 이는 대상지역 전체 면적의 약 2.1~11.3%, 4.2~18.0%에 해당하는 비율이다. Huff 방법에 비해 Mononobe 방법의 침수면적이 최소 58%에서 최대 157% 정도 넓게 발생하는 것으로 나타났다.

Huff 방법 및 Mononobe 방법을 통해 지속시간 30분 및 2년, 5년, 10년, 50년, 100년의 재현기간별 대상지역 내 최대 침수 발생면적 및 범위를 예측한 결과는 Table 2 및 Fig. 6과 같다.

Table 2. Area of inland flooding simulation results with Huff and Mononobe methods for different return periods

Classification		Temporal distribution of rainfall									
		Huff					Mononobe				
		2 yr	5 yr	10 yr	50 yr	100 yr	2 yr	5 yr	10 yr	50 yr	100 yr
Depth (m)	Avg.	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08
	Max	0.21	0.38	0.41	0.67	0.67	0.34	1.02	1.08	1.11	1.12
Area (km ²)	Flooding	0.010	0.019	0.029	0.049	0.051	0.019	0.049	0.070	0.078	0.081
	Non flooding	0.439	0.430	0.419	0.399	0.398	0.430	0.400	0.378	0.371	0.368
	Total	0.448	0.448	0.448	0.448	0.448	0.448	0.448	0.448	0.448	0.448
	Flooding ratio(%)	2.1%	4.2%	6.5%	11.0%	11.3%	4.2%	10.8%	15.7%	17.4%	18.0%



(a)

Fig. 6. Inland flooding simulation results with Huff (left) and Mononobe (right) methods for different return periods: (a) 2 years, (b) 5 years, (c) 10 years, (d) 50 years, (e) 100 years.

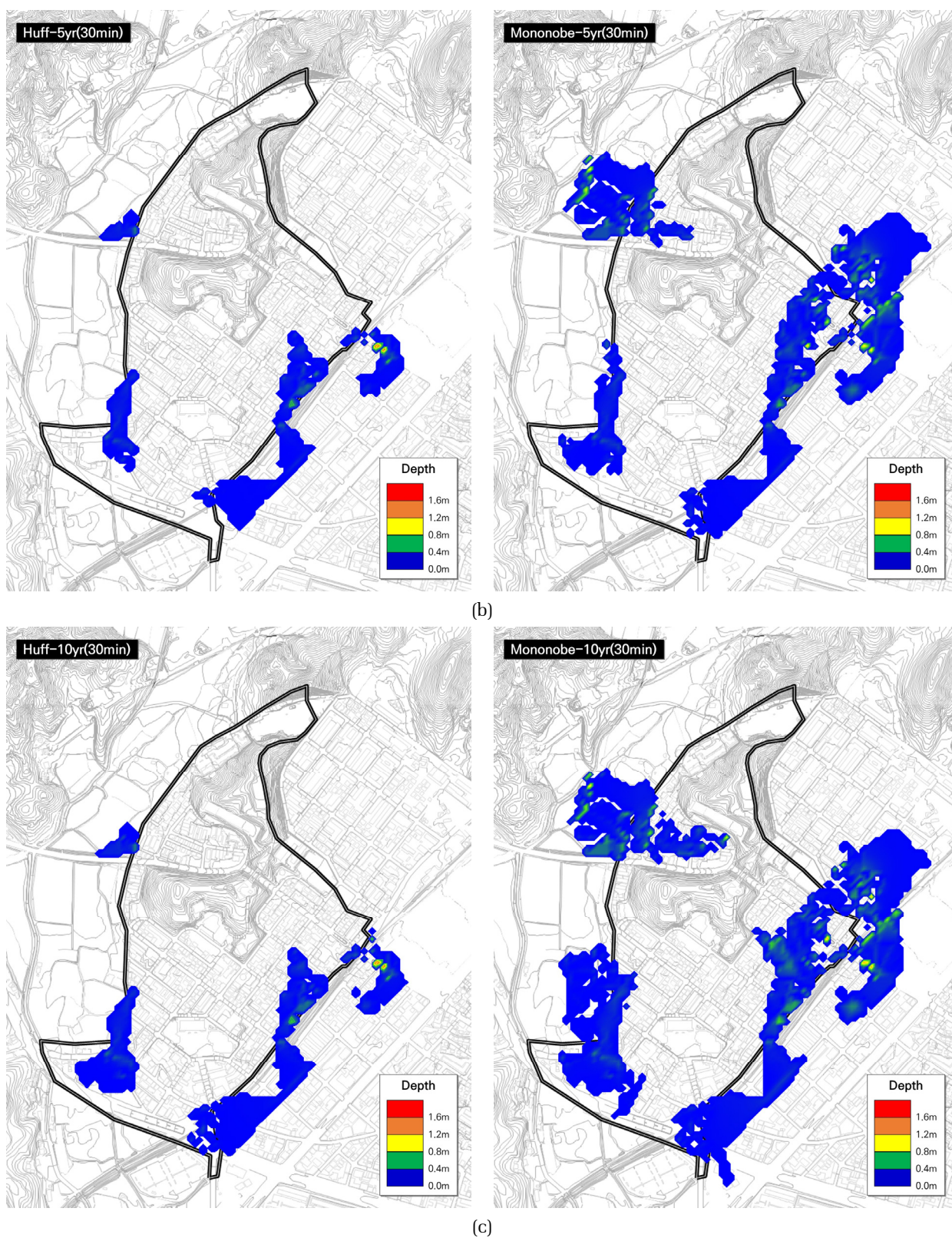
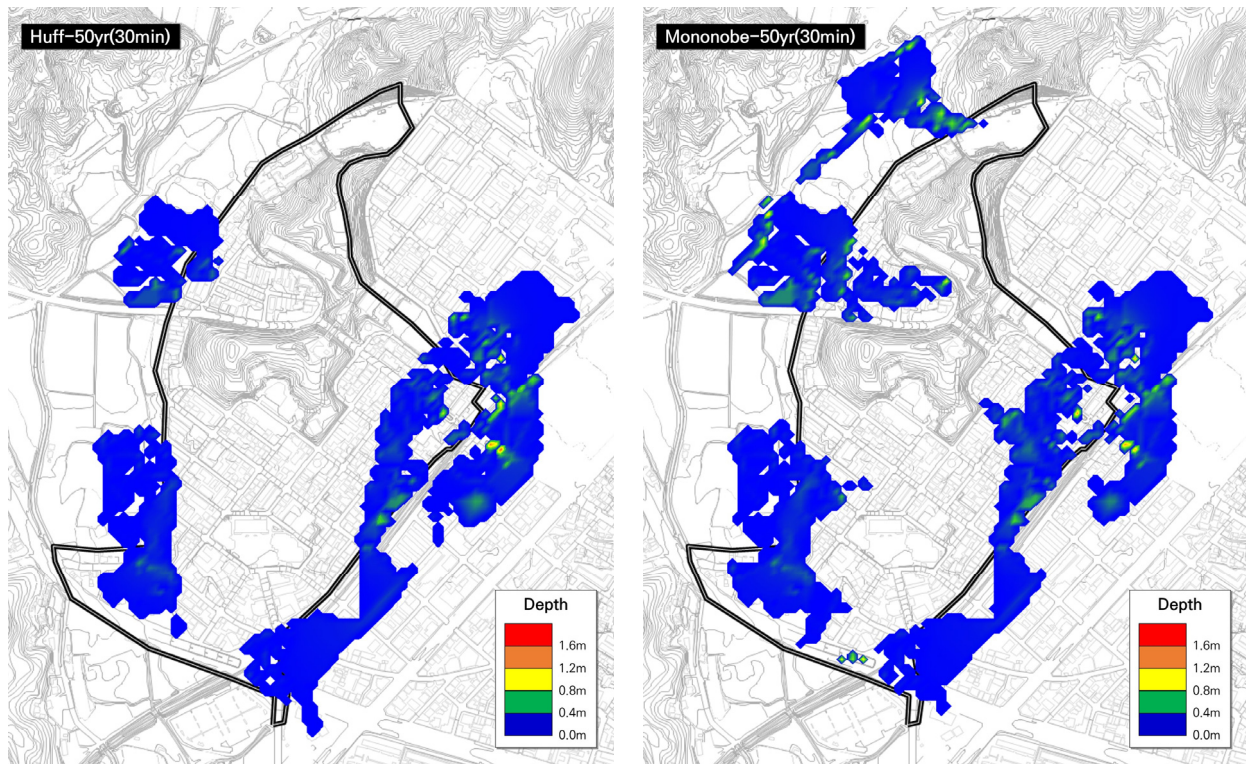
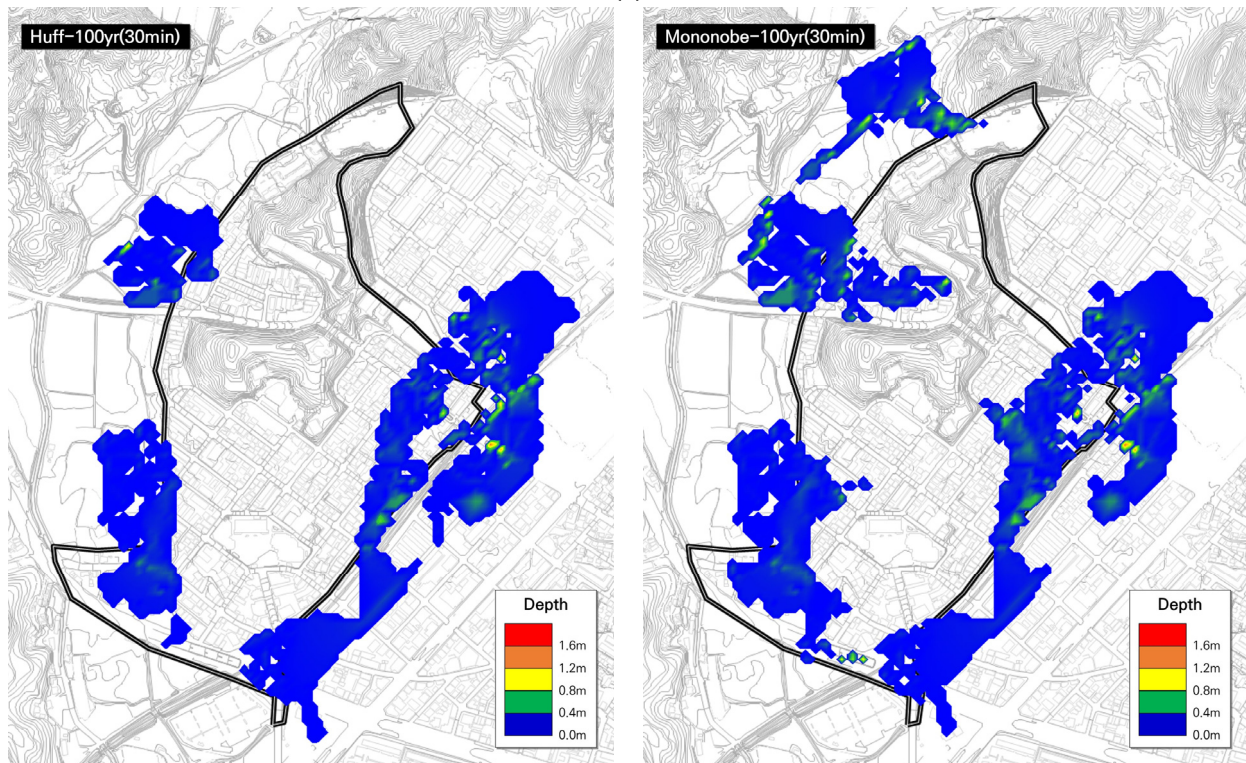


Fig. 6. Continued



(d)



(e)

Fig. 6. Continued

대상지역의 과거 10년간의 침수피해 현황과 Huff 방법 및 Mononobe 방법을 적용하여 침수발생을 예측한 결과를 비교한 결과, Huff 방법은 과거 침수피해지역의 일부에서만 침수현상이 나타나는데 비해 Mononobe 방법은 과거 침수피해지역 전반에 걸쳐 침수가 나타나는 것으로 예측되었다. 이는 최근 발생하는 집중호우가 단시간 내 높은 강우강도로 발생하기 때문에 지속시간동안 고르게 발생하는 Huff 방법보다는 집중적으로 발생하는 Mononobe 방법이 보다 정확한 침수 예측 결과를 보이는 것으로 판단된다. 다만 두 가지 방법 모두 과거 침수피해지역을 중심으로 광범위하게 침수가 발생하며, 침수발생 이력이 있는 일부 지층 주택지역에서는 침수가 발생되지 않는 것으로 예측되었다. 이는 과거 침수피해 이력이 건축물 단위로 관리되기 때문에 10 m × 10 m의 면단위 기반의 시뮬레이션 결과가 보다 광범위한 침수범위를 보이며, 본 연구에서 적용한 이중배수체계 모형이 수치지도에 의한 지표면의 표고와 하수도대장상의 관로 및 맨홀 제원만을 고려해 구축되었기 때문에 실제 대상지역의 건축물 형태, 지하공간 이용 현황 등을 정확히 반영할 수 없는 한계를 갖기 때문으로 판단된다. 그림에도 불구하고 침수가 발생하는 지역을 포함해 전반적으로 유사한 침수발생 양상을 나타내고 있어 비교적 적절한 모형 구축이 이루어진 것으로 판단되므로 보수적 관점에서 침수 위험도를 평가하는데 활용하였다.

또한, Mononobe 방법을 기반으로 재현기간 50년 및 100년의 설계강우를 적용해 분석한 침수예측 결과가 과거 10년간의 침수피해가 발생한 대부분의 지역을 포함하는 것으로 분석되었다. 이는 최근 급증한 집중호우로부터 기인하는 침수를 예측하기 위해서는 50년, 100년 등 상향된 재현기간의 설계강우를 적용하는 것이 타당함을 의미한다. 이와 함께 침수 예측 시, 일반적으로 적용하는 지속시간 24-48시간을 갖는 설계강우 뿐만 아니라 불투수율이 높고 우수관을 통한 배수체계가 갖춰진 도시지역 특성상 유하시간이 매우 짧음을 고려해 30분의 짧은 지속시간의 설계강우를 적용하는 것도 현실을 반영한 적절한 방법이라 판단된다.

3.2 내수침수 위험도

위험도 매트릭스 방법을 통해 대상지역의 최대침수심 예측 결과를 5등급 체계로 분류하여 산정한 피해영향(CoF) 점수와 Huff 방법 및 Mononobe 방법의 재현기간별 PoF 점수의 곱으로 침수 위험도를 분석하였다. 침수 위험도는 10 m × 10 m으로 구분된 각 지점(cell)별로 재현기간이라는 발생빈도의 확률을 고려해 산정하였으며, 대상지역의 침수 위험도 분석 결과는 Fig. 7과 같다.

위험도 매트릭스 기반의 침수 위험도 평가는 재현기간이라는 발생확률을 고려하기 때문에 동적 위험도

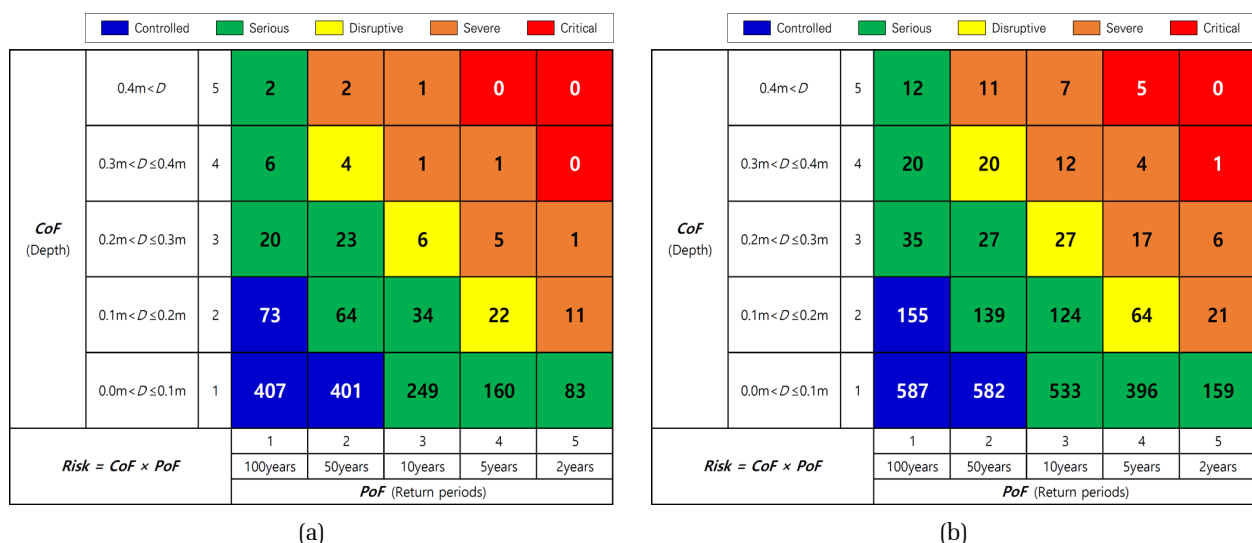


Fig. 7. Cell numbers of inland flooding simulation results for each component in risk matrix: (a) Huff method, (b) Mononobe method.



평가가 가능함에 따라 침수심 지도를 기반으로 한 단순 위험도 평가 및 기존의 단순 피해영향에 기반한 다기준 의사결정 방식의 위험도 평가 방식보다 진일보된 방법이라 할 수 있다.

재현기간에 따른 침수 위험도 분석 결과를 바탕으로 각 지점(cell)별 최대 침수 위험도값을 도출하여 대상지역의 최종 침수 위험도를 산정하였다. 이는 각 지점에서 발생 가능한 최대 수위값이 아닌 발생빈도라는 확률의 가중치를 고려한 위험도로 볼 수 있다. 이

에 따라 100년 빈도에서 발생 가능한 침수 구역을 모두 포함하지만, 각 지점별 위험도는 침수심이 아닌 발생확률을 고려한 위험도값으로 표현이 된다. 최대 침수 위험도 분석 결과는 Table 3 및 Fig. 8과 같다.

대상지역의 Huff 방법 및 Mononobe 방법별 침수 위험도 분석을 비교한 결과, Huff 방법은 매우 낮음(Controlled) 4.5%, 낮음(Serious) 6.4%, 보통(Disruptive) 0.4%, 높음(Severe) 0.4%, 매우 높음(Critical)은 발생하지 않음으로 분석되었다. Mononobe 방법은 매우 낮음

Table 3. Cell numbers and area of inland flooding simulation results for risk matrix

Risk	Huff			Mononobe		
	Cell(ea)	Area(km ²)	Ratio(%)	Cell(ea)	Area(km ²)	Ratio(%)
No risk	3,964	0.3964	88.4%	3,655	0.3655	81.5%
Controlled	200	0.0200	4.5%	95	0.0095	2.1%
Serious	288	0.0288	6.4%	625	0.0625	13.9%
Disruptive	16	0.0016	0.4%	59	0.0059	1.3%
Severe	16	0.0016	0.4%	44	0.0044	1.0%
Critical	0	0.0000	0.0%	6	0.0006	0.1%
Total	4,484	0.4484	100.0%	4,484	0.4484	100.0%

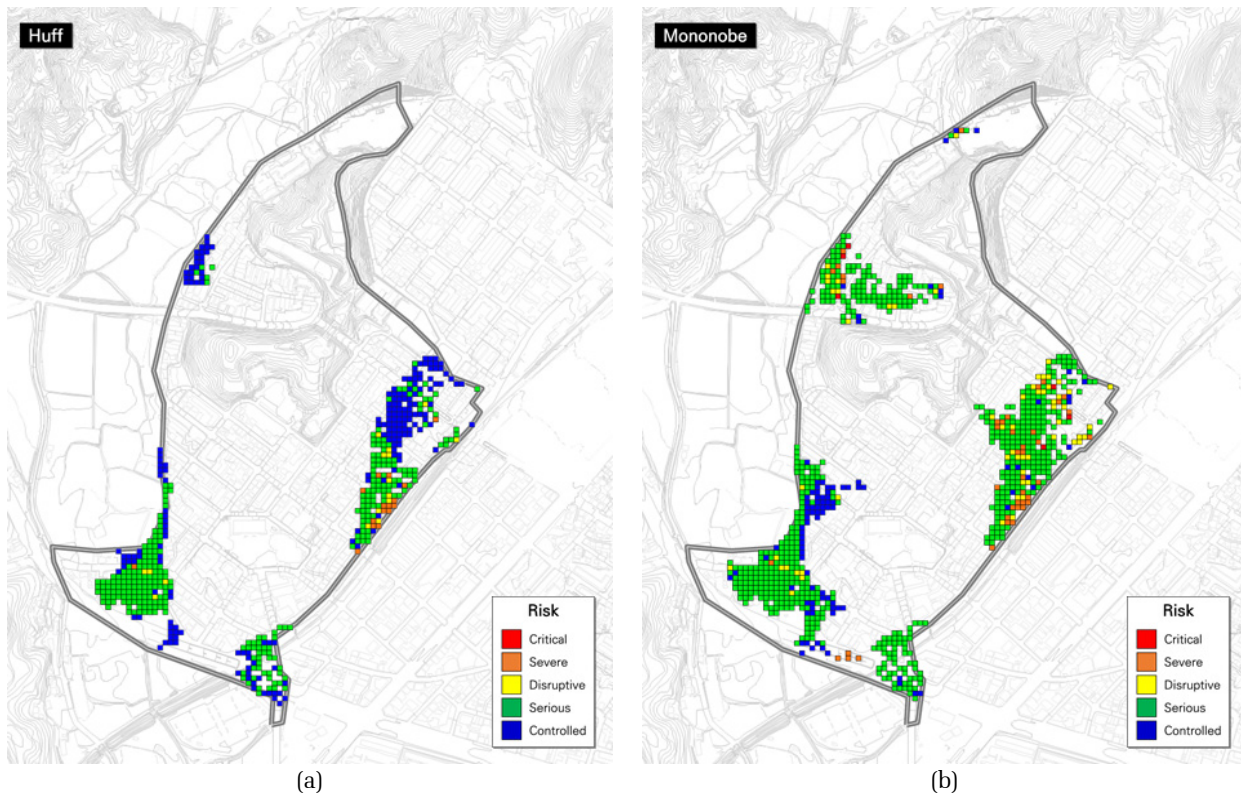


Fig. 8. Risk map for inland flooding area: (a) Huff method, (b) Mononobe method.

(Controlled) 2.1%, 낮음(Serious) 13.9%, 보통(Disruptive) 1.3%, 높음(Severe) 1.0%, 매우 높음(Critical) 0.1%로 분석되었다.

본 연구에서는 침수 위험도 평가 시 피해영향을 단순히 침수심만을 고려하였다. 하지만 피해영향은 침수심만으로 평가되지 않으며, 침수가 발생한 지점의 사회적, 환경적 상황 등을 고려한 다양한 영향인자를 복합적으로 고려해 산정해야 한다. 이를 위해 피해영향 산정 시 침수심 외에 도시기능유지를 위한 상업 업무 시설, 주거 활동 시설, 교통 시설, 재난 구조 위생 시설 등의 포함 여부 및 시민의 생명보호를 위한 사회복지시설 포함 여부, 지하도 및 지층과 같은 지하 이용공간 포함 여부 등을 복합적으로 고려할 필요가 있다. 또한 각 인자들에 대한 가중치와 다양한 재현기간에 대한 동적 침수 위험도 분석을 위한 절차와 방법 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 과거의 침수 평가방법과 달리 기존의 내수침수 시뮬레이션에서 일반적으로 적용하는 강우지속시간(24시간)을 적용하지 않고, 실제 발생하고 있는 집중호우를 재현하기 위해 지속시간 30분을 적용하였다. 또한, 기존에는 단순 침수심 정도로 위험도를 평가하였으나 본 연구에서는 위험도 매트릭스 기반의 침수 위험도 분석(위험도=피해영향도×발생확률)을 위해 침수에 따른 피해영향도를 침수심으로 정의하고 침수 발생확률을 다양한 재현기간으로 정의하여 위험도를 평가하였으며, 이를 종합한 최종 침수 위험도를 도출하는 새로운 평가방법을 제시하였다. 이를 통해 기존의 단순 침수심에 따른 침수 위험도 평가 방식이나 피해영향에 기반한 다기준 의사결정 방식의 위험도 평가 방식보다 한걸음 나아가 강우재현기간에 따른 침수 피해영향까지 고려한 동적 위험도 평가의 적용 타당성을 검증하였다.

도시침수 분석 결과, 대상지역 내 과거 10년 간의 침수 피해 현황과 Huff 방법 및 Mononobe 방법을 적용하여 침수 발생을 예측 결과 비교를 통해 Mononobe 방법이 Huff 방법보다 더 정확한 침수 예측 결과를 보임을 확인하였다. 또한, Mononobe 방법을 기반으로 지속시간 30분, 재현기간 50년 및 100년의 설계강우를 적용해 분석한 침수예측 결과가 과거 10년 간의 침수 피해가 발생한 대부분의 지역을 포함하는 것으로 분

석되었다. 이를 통해 최근 급증한 집중호우로부터 기인하는 침수를 예측하기 위해서는 단시간 집중적 형태의 강우 발생 분포인 Mononobe 방법의 적용 및 불투수율이 높고 우수관을 통한 배수체계가 잘 갖춰진 도시지역의 짧은 유하시간을 고려해 30분의 짧은 지속시간과 50년 및 100년의 상향된 재현기간의 설계강우를 적용하는 것이 타당함을 확인하였다.

내수침수 위험도 분석 결과, 위험도 매트릭스 기반의 침수 위험도 평가를 침수심이라는 피해영향도와 함께 재현기간이라는 발생확률을 고려해 각 지점별 위험도를 기존의 침수심 발생 정도가 아닌 다양한 설계강우 조건에서의 침수심 발생 정도와 발생확률을 고려한 위험도 값으로 산정할 수 있음을 확인하였다. 하지만 침수 피해로 인한 영향은 침수심 외에도 침수가 발생한 지역의 사회적, 환경적 상황 등에 따라 변화할 수 있으므로 보다 현실적인 침수 위험도를 평가하기 위해서 침수 피해영향 산정 시, 침수심 발생 정도, 도시 기능 유지를 위한 상업 업무 시설, 주거 활동 시설, 교통 시설, 재난 구조 위생 시설 및 시민의 생명보호를 위한 사회복지시설, 지하 이용공간 포함 여부 등을 종합적으로 고려해야 한다. 이와 함께 각 인자들에 대한 가중치와 다양한 재현기간에 대한 침수 위험도 분석을 위한 절차와 방법에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 보인다.

본 연구에서 제안한 위험도 매트릭스 기반의 침수 위험도 평가방법은 다양한 설계강우 조건에서 발생 가능한 침수심 및 발생확률을 고려해 침수 위험도 평가가 가능함에 따라 이를 활용하여 내수침수에 대한 사전 대책 마련 및 예방을 위한 기본 정보로써 활용될 수 있을 뿐만 아니라 내수침수 대응을 위한 하수도 정비 중점관리지역 선정에도 주요 평가항목으로 고려될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 상하수도 혁신 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(2020002700015).

References

EXCIMAP(European Exchange Circle on Flood Mapping). (2007). Handbook on good practices for flood mapping



- in Europe, 17-32.
- Huff, F.A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms, *Water Resour. Res.*, 3(4), 1007-1019.
- ISO(International Organization for Standardization). (2020). Medical laboratories - application of risk management to medical laboratories (ISO Standard No. 22367:2020), <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:22367:ed-1:v1:en> (July 30, 2021).
- Kim, J.S. NARS(National Assembly Research Service). (2020). Urban flooding measures in response to climate change, 9-10.
- Lee, J.Y., Jin, G.H. and Ha, S.R. (2014). Analysis of urban inundation considering building footprints based on dual-drainage scheme, *J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud.*, 17(4), 40-51.
- Lee, S.E., Kim, C.H., Park, T.S., Kim, M.E., Kim, S.Y., Lee, T.S. and Kim, J.H. KRIHS(Korea Research Institute for Human Settlements). (2016). Development of the urban flooding risk prevention system (I), 153-156.
- Lim, J.Y. and So, G.R. GYRI(Goyang Research Institute). (2020). Research on rainfall characteristics urban flood damage in Goyang city, 94.
- Loat, R. FOEN(Federal Office for the Environment). (2010). Risk management of natural hazards in Switzerland, 3-8.
- MILT(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism). (2016). Sewerage flood damage reduction comprehensive plan establishment manual, 3.5-3.14.
- MOE(Ministry of Environment). (2013). Guidelines for the handling of sewage maintenance intensive management area, 1-6.
- MOE(Ministry of Environment). (2019). Guidelines for flood volume estimation, 16-21.
- MOIS(Ministry of the Interior and Safety). (2018). Detailed standards for establishing a comprehensive plan for reducing the storm and flood damage in cities and counties, 62-64.
- MOIS(Ministry of the Interior and Safety). (2020). Guidelines for preparing disaster maps, 2-115.
- ODASDSE(Office of the Deputy Assistant Secretary of Defense for Systems Engineering). (2014). Department of defense risk management guide for defense acquisition programs, 7th ed, 20-32.
- Park, I.H. and Ha, S.R. (2013). An analysis on inundation characteristics of urban watershed according to variation in return period of design rainfall, *J. Wetl. Res.*, 15(4), 585-593.
- Sayers, P.B., Gooledby, B.P., Simm, J.D., Meadowcroft, I. and Hall, J. Defra(Department for Environment Food and Rural Affairs). (2003). Risk, performance and uncertainty in flood and coastal defence - a review, 8-28.
- Seoul. (2020). Sidewalk design and construction manual, 53-57.
- Suwon. (2018). Master plan of sewage maintenance, 257-261.
- UNISDR(The United Nations International Strategy for Disaster Reduction). (2009). UNISDR terminology on disaster risk reduction, 15-30.
- Yoon, Y.N. (2009). *Hydrology basics and applications*. Chungmoongak, 1052.

pp. 379-387

pp. 389-403

pp. 405-415

pp. 417-424

pp. 425-436

pp. 437-454

pp. 455-463

pp. 465-476

pp. 477-487

pp. 489-496

pp. 497-505

pp. 507-516

pp. 517-531

pp. 533-544

