

19CTA
P-C143
641-02

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 제2차년도 최종 보고서

R&D /
19CTAP-C143641-02

초고층 건물로 인한 강우-유출 과정 왜곡
및 재해 취약성 증가 평가 최종보고서

초고층 건물로 인한 강우-유출 과정 왜곡 및 재해 취약성 증가 평가

최종보고서

2020. 02. 03.

2019

주관연구기관 / 고려대학교 산학협력단

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

'초고층 건물로 인한 강우-유출 과정 왜곡 및 재해 취약성 증가 평가'(연구개발 기간 : 2018.04.17 ~ 2019.12.31) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2020. 02. 03

주관연구기관명 : 고려대학교 산학협력단 (대표자) 허 준 (인)



주관연구기관책임자: 유 철 상

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C1436 41-02	해당 단계 연구 기간	2018.04.17 - 2019.12.31	단계구분	2차년도 / 2차년도
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명	대과제가 있을 경우 기재합니다(단위과제일 경우에는 아래에 기재합니다)			
	세부과제명	초고층 건물로 인한 강우-유출 과정 왜곡 및 재해 취약성 증가 평가			
연구책임자	유 철 상	해당단계 참여연구원 수	총: 10 명 내부: 9 명 외부: 1 명	해당단계 연구비	정부: 120,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 10 명 내부: 9 명 외부: 1 명	총 연구비	정부: 220,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속 부서명	고려대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반 / 「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의4제1항 참고
-------------------------	---

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

- 초고층 건물이 도시유역의 강우 차단 특성과 유출 경로 특성을 어떻게 바꾸는지 정량적으로 추정하는 방법론을 개발하고 실험을 통해 검증함
- 초고층 건물을 고려하는 경우 강우-유출해석 결과(첨두 유량, 첨두 시간 등)가 기존에 비해 어떻게 달라지는지 확인함
- 초고층 건물로 인해 도시유역의 수재해에 대한 취약성이 어느 정도 증가하는지 평가하고 이에 대한 대응책 마련함

보고서 면수

92

연구의 목적 및 내용	본 연구의 목표는 다음과 같다. 첫 째, 본 연구에서는 초고층 건물이 도시유역의 강우 차단 특성과 유출 경로 특성을 어떻게 바꾸는지 이론적으로 검토하고, 실험을 통해 검증하고자 한다. 둘째, 초고층 건물을 고려하는 경우 유출해석 결과가 기존에 비해 어느 정도 왜곡되는지를 정량적으로 파악하고자 한다. 마지막으로, 초고층 건물로 인해 수재해에 대한 취약성이 어느 정도 증가하는지 평가하고자 한다. 본 연구에서는 초고층 건물로 인해 강우-유출 과정이 어떻게 왜곡되는지를 분석하고, 이로 인해 도시유역의 수재해 취약성이 얼마나 증가하는지 평가해보고자 한다. 강우-유출과정의 왜곡은 크게 강우부분과 유출부분으로 나누어 살펴볼 수 있는데, 먼저, 강우 과정에서는 차단(interception) 특성의 변화와 밀접한 관련이 있다. 이러한 변화를 분석하기 위해서는 초고층 건물 벽면에 의해 차단되는 빗물의 양을 추정하는 것이 무엇보다 중요하다. 유출특성의 변화와 관련해서는 유출경로 변화가 중요하다. 특히 초고층 건물의 규모특성이 집중시간(concentration time)을 어떻게 변화시키는지를 파악하는 것이 중요하다. 이러한 연구는 궁극적으로 초고층 건물이 유출해석 결과를 어떻게 왜곡시키는지를 정량화하는 데 이용된다. 마지막으로 본 연구에서는 초고층 건물로 인해 수재해에 대한 취약성이 얼마나 증가하는지 평가해보고자 한다.				
연구개발성과	(1) 초고층 건물로 인해 차단되는 빗물의 양 추정 (2) 초고층 건물 벽면에 의해 변화되는 유출 경로 파악 (3) 초고층 건물로 인한 강우-유출 과정의 왜곡 정도 평가 (4) 초고층 건물로 인한 수재해 취약성 증가 평가 및 대응				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	초고층 건물에서 진행되는 수문순환 과정의 규명은 도시 수문순환 해석을 더욱 정교하게 하며, 기존에 고려하지 못했던 건물 벽면에서의 차단, 유출의 영향을 포함하는 수문해석 모형의 개발에 직접 활용된다. 초고층 건물로 인한 강우-유출 과정의 왜곡 정도를 파악하는 방법론은 도시의 물순환 왜곡을 최소화하는 방향으로 도시를 설계하는 과정에 활용되어, 미래 친환경적인 도시개발에 기여할 수 있다. 3차원적 수문순환 해석이 가능한 수문해석 방법은 초고층 도시유역의 홍수저감 계획을 정교하게 수립하는데 기여하여, 사회적 비용의 감소효과를 가져올 수 있다. 본 연구에서 개발하는 수재해 취약성 평가 방법은 기존의 방법의 정확도를 개선할 수 있으며, 보다 수재해로부터 안전한 도시 방재시스템을 구축하는데 기여할 수 있다.				
핵심어 (5개 이내)	초고층 건물	강우-유출 해석	취약성 평가		

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	The purposes of this study can be summarized as follows. First, this study will theoretically examine and validate how the high-rise buildings change the rainfall interception characteristics and the runoff characteristics of the urban watershed. Second, this study will quantitatively evaluate the distortion of rainfall-runoff analysis results when considering a high-rise buildings. Finally, this study will assess the extent of water-related vulnerability increased due to high-rise buildings. This study will analyze how the rainfall-runoff process is distorted due to high-rise buildings and evaluate how much the water-related vulnerability will be increased due to high-rise buildings. The major factors for distortion of the rainfall-runoff process can be divided into rainfall and runoff. First, it is closely related to the change of the interception characteristics in the rainfall process. To analyze these changes, it is important to estimate the amount of rainwater intercepted by the facade of high-rise buildings. Regarding the change of the runoff characteristics, the change of runoff route is important. In particular, it is important to understand how the scale characteristics of high-rise buildings change the concentration time. These studies are ultimately used to quantify how high-rise buildings distort the runoff analysis results. Finally, this study will evaluate the extent of water-related vulnerability due to high-rise buildings.				
Results	(1) Estimation of amount of rainwater to be intercepted due to the facade of the high-rise building (2) Identification of the runoff route changed by the facade of the high-rise building (3) Evaluation of the extent of distortion of the rainfall-runoff process due to the high-rise buildings (4) Assessment and response to water-related vulnerability increased due to high-rise buildings				
Expected Contribution	Identification of the hydrological process in the high-rise buildings will make rainfall-runoff analysis more sophisticated and can be used directly for the development of hydrological models, which is capable to consider the effect of high-rise buildings. The methodology to evaluate the extent of distortion of the rainfall-runoff process due to the high-rise building can be utilized in the process of designing the city in the direction of minimizing the water cycle distortion, contributing to the development of eco-friendly cities in the future. The hydrological interpretation method capable of three-dimensional hydrologic cycle analysis contributes to elaborate the flood reduction plan of the high-rise urban basin and can reduce the social cost. The water-related vulnerability assessment method developed in this study can improve the accuracy of existing methods and contribute to the construction of urban disaster prevention system that is more secure from water disaster.				
Keywords	High-rise building	Rainfall-runoff analysis	Vulnerability assessment		

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	7
2. 국내외 기술 개발 현황	8
3. 연구수행내용 및 성과	12
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	84
5. 연구개발성과의 활용 계획	85
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	85
7. 연구개발성과의 보안등급	86
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	86
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	86
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	89
11. 기타 사항	89
12. 참고 문헌	90

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

구분	내용
최종 목표	본 연구의 최종 목표는 다음과 같다. 첫 째, 본 연구에서는 초고층 건물이 도시구역의 강우 차단 특성과 유출 경로 특성을 어떻게 바꾸는지 이론적으로 검토하고, 실험을 통해 검증하고자 한다. 둘 째, 초고층 건물을 고려하는 경우 유출해석 결과가 기존에 비해 어느 정도 왜곡되는지를 정량적으로 파악하고자 한다. 마지막으로, 초고층 건물로 인해 수재해에 대한 취약성이 어느 정도 증가하는지 평가하고자 한다.
세부 목표	본 연구의 연차별 세부 목표는 다음과 같다. 먼저 1차년도에 해당하는 8.5개월 동안에는 초고층 건물 벽면으로 인해 차단되는 빗물의 양을 추정하고, 초고층 건물 벽면에 의해 변화되는 유출 경로를 파악하는 방법론을 개발하여 제안하고자 한다. 다음으로 2차년도에는 초고층 건물이 존재하는 도시구역에 1차년도에 개발한 방법론을 적용하여 초고층 건물로 인한 강우-유출 과정의 왜곡 정도 평가하고자 한다. 이와 더불어 2차년도에는 초고층 건물로 인해 수재해 취약성이 얼마나 증가하는지 평가하고, 이에 대한 대응책 또한 마련할 것이다.

2. 연구개발의 필요성

- 초고층 건물이 존재하는 도시구역은 3차원 구조를 가지기 때문에 기존 일반 도시구역과 다른 방법으로 수문순환과정을 해석할 필요가 있다. 초고층 도시구역의 경우 2차원적인 구역의 지면뿐만 아니라 초고층 건물의 벽면 또한 수문순환이 일어나는 중요한 공간이라 할 수 있다. 이곳에서 일어나는 차단, 유출이 도시구역의 수문순환 과정에 큰 영향을 미침
- 기존 식생에 의해 이루어졌던 차단 현상은 이제 건물의 벽면을 통해 주로 이루어진다. 증발 또한 구역의 지면에서 발생하는 양에 건물 벽면에서 발생하는 양까지 추가로 고려해주어야 함
- 특히, 유출 해석 시 강우가 건물 지붕에 도달하는 경우, 건물 벽면에 도달하는 경우, 지면에 도달하는 경우가 각각 다르게 해석되어야 한다. 이는 각각의 경로차이로 인해 도달시간(concentration time)과 저류효과(storage effect)가 다르기 때문이다. 현재 적용되고 있는 도시 유출 해석 방법에는 이러한 초고층 건물의 영향을 고려해주는 과정이 없기 때문에 유출 해석 결과에 불확실성이 매우 클 수밖에 없음
- 초고층 건물을 고려한 도시 수문 해석 방법은 도시홍수재해 방지 차원에서 대단히 중요하다. 도시지역은 구조적으로 홍수에 취약하기 때문에 대다수의 홍수재해가 도시에서 집중적으로 발생하고 있다. 이에 도시지역에는 홍수재해를 방지하기 위한 침투시설, 저류시설 등의 수공구조물이 설치된다. 초고층 건물을 고려한 도시 수문 해석 방법은 이러한 수공구조물을 최적으로 설계하기 위해 중요함
- 이를 위해 본 연구에서는 초고층 건물이 도시구역의 강우 차단 특성과 유출 경로 특성을 어떻게 바꾸는지 이론적으로 검토하고, 실험을 통해 검증하고자 한다. 다음으로는, 초고층 건물을 고려하는 경우 유출해석 결과과 기존에 비해 어느 정도 왜곡되는지를 정량적으로 파악하고자 한다. 마지막으로, 초고층 건물로 인해 수재해에 대한 취약성이 어느 정도 증가하는지 평가할 것임

3. 연구개발 범위

가. 1차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(고려대학교 산학협력단):
초고층 건물에 의한 강우-유출 과정의 왜곡 정도 평가 방법론

- ② 개발 내용 및 범위(그림을 이용하여 시스템 구성도, 구조 등을 구체적으로 표현)
 - 주관연구기관(고려대학교 산학협력단):

1차년도 연구개발 목표 및 내용			
연구 목표	연구 내용		최종 성과물
초고층 건물에 의한 강우-유출 과정의 왜곡 정도 평가 방법론 개발			초고층 건물에 의한 강우-유출 과정의 왜곡 정도 평가 방법론

나. 2차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(고려대학교 산학협력단):

초고층 건물을 고려한 강우-유출 해석 및 수재해 취약성 평가

- ② 개발 내용 및 범위(그림을 이용하여 시스템 구성도, 구조 등을 구체적으로 표현)
 - 주관연구기관(고려대학교 산학협력단):

2차년도 연구개발 목표 및 내용			
연구 목표	연구 내용		최종 성과물
초고층 건물을 고려한 강우-유출 해석 및 수재해 취약성 평가			초고층 건물을 고려한 강우-유출 해석 및 수재해 취약성 평가

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 초고층 건물에 따른 강우-유출 과정 왜곡

1.1 산지에 의한 차단

- Murphy et al.(2017)은 푸에르토리코의 Luquillo Mountains를 대상으로 산지의 동쪽과 서쪽에서 발생하는 강우의 차이를 분석함. Luquillo Mountains는 바람의 방향으로 인해 푸에르토리코 동쪽(바람에 대해 정방향)에서는 상대적으로 높은 강수량을 보이며 서쪽(바람을 등지는 방향)에서는 그 반대의 특성을 보임. 이러한 영향은 Luquillo Mountains의 지형적 특성으로 인한 강우 차단과 바람의 방향에 의한 것으로 분석됨. 이러한 강수량의 차이는 지역에 따라서 약 2배 이상으로 차이가 나는 곳도 있으며(연 강수량 기준), 평균적으로도 Luquillo Mountains 서쪽의 강수량이 동쪽에 비해 46% 낮은 것으로 확인되었음
- Hughes et al.(2008)은 캘리포니아 남부에서 산지에 의한 강수 차단(orographic blocking on the precipitation)에 대해 분석함. 변인으로는 고도, 경사, 강수 등이 고려되었음. 분석 결과, 지형적 특성과 풍향의 영향으로 인해 산지를 기준으로 해안 방향과 내륙지방의 강수량이 계절에 따라 극명히 다른 것으로 나타남
- USGS(2001)은 뉴멕시코 지역을 대상으로 MFR(Mountain-Front Recharge, 강수가 산지에 의해 차단되어 산을 기준으로 한쪽 지역의 지하수위를 높이는 현상)에 대해 분석함. 우기의 강수량을

기준으로 약 8 inch의 강수량 차이를, 겨울철에는 4.6 inch의 강설량 차이가 나타났음. MFR을 기준으로 최대 100배까지 차이가 나는 지역도 있음

- Bookhagen and Strecker(2008)는 안데스 산맥의 고도자료, 강수량 자료를 수집하여 산지의 차단에 영향을 받는 강우의 공간분포를 파악함. 안데스 산맥을 기준으로 양쪽 지역의 강수 분포를 비교 및 분석하였음. 안데스 산맥의 단면, 안데스 산맥의 고도에 따른 강수분포를 도시하였으며 산의 전면과 후면의 강수 분포는 반대의 특성(즉 한쪽 면의 경우 건조, 반대 면에서는 습윤한 상태가 지속됨)이 나타남

1.2 도시화에 의한 침투 왜곡

- ESEPA(1999)는 도시 유역의 강우-유출 과정에 대한 영향을 분석함. 불투수면적이 증가함에 따라 침투, 증발산이 감소하며 지면 유출이 증가하는 것을 확인하였음. 자연상태인 지면(0% impervious)에서는 총 강수량 중 50%가 지표 아래로 침투되는데(25% shallow infiltration, 25% deep infiltration) 불투수면적이 75~100%로 증가하면 총 강수량 중 15%(10% shallow infiltration, 5% deep infiltration)만이 지표 밑으로 침투되는 것을 확인함
- Endreny(2005)는 토지이용 및 토지피복 변화가 강우-유출 과정에 미치는 영향을 분석함. 도시화의 영향에 대해 분석하기 위해 도심지와 교외 지역을 비교하였음. 침투에 관련하여 도심지의 경우에는 교외 지역과 비교하였을 때 지면의 투과율이 낮고 다짐(compaction)이 높아 침투율을 저감시키는 것으로 나타남. 이와 같은 침투 특성의 변화는 결과적으로 도시 유역에서 홍수심을 증가시키고 홍수 도달시간을 단축시키는 영향을 가져오는 것으로 평가함
- 이종형과 윤석환(2004)은 무심천 유역을 대상으로 도시화에 의한 유출 특성 분석을 수행함. 사용된 모형은 HEC-HMS임. 도시화의 영향을 반영하기 위해 CN값을 일정 비율로 증가시켜 유효우량을 재산정함. CN값은 5%, 10%, 15%, 20%로 증가시켰으며 그에 따른 홍수량 증가는 약 4.6%~16.0%로 나타남
- 박민지 외(2005)는 토지피복 변화에 따른 유출의 변화를 분석하였음. 대상 유역은 경안천 상류 유역으로 도시 면적이 약 4배 증가하여 토지 이용의 변화가 두드러짐. 토지이용 변화에 대한 민감도 분석을 수행하기 위해 다섯 개의 매개변수를 조정하였으며, 이 중 특히 토양수대 저수량에 대한 인자와 침투능 인자가 유출량에 높은 영향을 미치고 있는 것을 확인함
- 이보람 외(2019)는 복대동 유역을 대상으로 기후변화 및 도시화에 따른 도시유출특성을 분석함. 도시유출을 모의하기 위해 XP-SWMM 모형을 이용하였음. 도시화의 영향은 XP-SWMM의 입력 매개변수 중 불투수율(불투수 면적 비율; Impervious area ratio)을 증감시켜 분석에 반영함. 기존에 구축된 모형을 기준으로 10%, 20% 증감하였으며, 불투수율이 이미 100%인 지역에 대해서는 증감을 적용하지 않음

1.3 건물에 의한 지표유출 왜곡

- Isidoro et al.(2012)은 실험을 통하여 건물의 유무에 따른 강우-유출을 모의, 분석함. 변인으로는 바람의 발생 여부, 바람의 방향, 건물의 밀도, 호우의 이동 방향을 고려함. 분석 결과 건물 밀도가 높아짐에 따라 침투유량은 감소, 기저시간은 증가하였음. 바람이 발생하는 경우 건물 밀도나 호우 이동에 의한 유출의 왜곡 경향이 감소함
- Isidoro(2012)는 건물의 분포에 따라 유출이 어떻게 변화하는지 실험을 통해 모의함. 건물이 차지하는 총 면적은 같게 설정하고, 건물의 배치를 바꾸어 실험을 수행함. 건물이 밀집될수록 지표유출의 기저시간은 증가하는 경향이 있었으며 침투유량은 반대로 감소하였음
- Isidoro et al.(2014)은 실험을 통하여 건물의 높이에 따른 강우-유출 왜곡을 모의, 분석함. 고려된 건물 모형의 높이는 0.2, 0.4, 0.6 m임. 건물의 높이가 높아질수록 미세하게 침투유량은 감소하는 경향이 나타남. 지표 유출 기저시간은 건물 높이가 증가할수록 증가하였음
- 조완희 외(2011)는 건물 및 도로를 고려한 지형자료를 구축하고 구축된 자료를 바탕으로 2차원 침수해석을 실시함. 건물 및 도로의 면적이 고려된 경우, 그렇지 아니한 경우에 비해 침수면적과 침수심이 모두 증가하는 것으로 확인됨. 실제 침수면적과 비교하여 침수해석 결과에 대한 적합도

를 산정한 결과 건물 및 도로의 면적을 고려한 경우가 약 20% 높은 적합도를 나타냄

- 이정영과 하성룡(2013)은 Building-Block 방법을 활용하여 도시유역의 침수를 해석하고 건물 형상 정보를 반영하여 도시 침수특성을 분석함. LiDAR 기반의 측량 자료로부터 건물의 형상을 반영한 건물영역도를 구축하고 지표면 유출수의 하수관거 내 재유입을 고려하였음. 단순 지형만을 고려한 DEM에 기반하여 산정한 유속과 Building Block 방법에 기반하여 산정한 유속을 비교한 결과 건물에 의한 간섭현상이 크게 나타나는 유역의 경우 유속이 2배까지 차이가 발생하는 것으로 나타남. 종합적으로 건물의 간섭으로 침수면적은 감소, 침수심 및 지표수의 유속은 증가하는 양상이 나타남
- 이형택(2017)은 초고층 건물에 따른 강우 유출 특성 변화에 대한 연구를 수행함. 건물의 유무에 따라 유역의 집중시간을 산정하기 위해 강우가 건물의 옥상으로부터 우수수직관을 따라 내려오는 시간을 고려함. 우수수직관을 이용한 강우의 수직 이동속도는 우수 수직관의 관경을 고려한 개수로 흐름 식을 이용하여 산정함. 실험 및 모의결과 건물의 위치가 유역 출구에서 멀어질수록 침투 유량은 감소하였음. 건물 밀도가 높을수록 침투유량은 감소, 침투시간은 증가하는 경향이 있었음

2. 초고층 건물로 인한 수재해 취약성 증가 평가 및 대응

2.1 국내 수재해 취약성 증가 평가 및 대응 방법

- 손태석 외(2010)는 SWMM을 부산의 온천천 유역에 적용하여 소유역을 구분하고, 유역의 대표 우수관을 선정하여 강우에 의한 도시하천 내수침수 위험 취약성 분석을 수행하였음. 취약성 분석의 한 지표로 SWMM 내 관거의 용량을 나타내는 Capacity를 고려하였음. SWMM을 이용한 취약성 분석 결과와 부산 지역의 실제 침수 이력을 비교한 결과 상당히 일치하는 것을 확인함
- 김환석 외(2012)는 낙동강 유역의 위험성 정도 산정에 있어서 과거 위험도와 미래 위험도를 비교하였음. 기존 자료를 이용한 현재 취약성과 기후변화 시나리오 모델 결과 및 대규모 하천정비사업 효과를 이용하여 구축된 미래 취약성을 비교하였음. 이 논문에서 취약성 평가는 국내외 문헌조사 및 가용 자료를 검토하고 대리변수를 선정하였음. 선정된 대리변수는 전문가 설문조사를 통해 선별되었으며, 대리변수의 가중치는 엔트로피 기법으로 선정하였음
- 박민규 외(2012)는 수재해취약성의 특성을 보여주는 다양한 취약성 평가 인자 중 저지대지역, 통수능력부족관거, 불투수지역, 유출곡선지수를 고려한 고위험지역 위험도 평가방법을 제안하였음
- 김지수(2013)는 서울의 도시지역을 대상으로 홍수 취약성을 분석하고 공간적 분포를 조사하였음. 이 연구에서는 취약성을 기후요인, 민감도, 적응도의 함수로 정의하였으며, 선정한 16개의 대표변수 간 상관분석을 수행하였음
- 박무종 외(2013)는 도시홍수를 유발하는 직접적인 인자를 선정하여 산술적인 도시홍수 취약성평가 방법과 Promethee를 이용한 도시홍수 취약성 평가방법의 적용성을 검증하였음. 산술적인 도시홍수 취약성 평가방법에서는 평가인자를 저지대 지역, 통수능력 부족 관거, 유출곡선지수를 산정하였으며, Promethee를 적용한 도시홍수 취약성 평가인자는 가중치를 동일하게 선정하고 각 선호함수로부터 배수분구별 상대적 위험순위를 결정함. 그 결과 산술적인 도시홍수 취약성 평가방법이 적용성이 더 높은 것으로 나타남
- 김종우와 최충익(2014)은 도시지역 취약성 분석에서 다양한 재해인자를 고려하여 연안지역과 내륙지역을 대상으로 수행하였음. 이에 본 연구에서는 HEC-RAS 모델을 이용한 하천재해 취약성, XP-SWMM 모형에 의한 내수재해 취약성, GIS Spatial Analysis를 활용한 사면재해 취약성, RUSLE를 활용한 토사재해 취약성으로 구분하여 분석하였음. 그 결과 하천재해와 내수재해에 대한 취약성은 인구밀도가 높은 지역에서 모두 취약한 것으로 나타남. 토사재해 취약성은 인구밀도와 상관없이 행정구역 전역에 걸쳐 분포하는 것으로 나타남. 사면재해 취약성은 인구밀도가 상대적으로 높은 지역과 토지이용 측면에서 도시화가 이루어진 지역에서 높게 나타남
- 오상백 외(2014)는 기존 일반도시와 연안지역의 기후변화 취약성 지표를 기반으로 연안지역의 특성을 고려한 취약성 평가 지표를 개발하였음. 이 연구에서는 취약성을 기후노출, 민감도, 적응능력의 함수로 정의하였음. 그 결과 취약성 평가 인자는 기후노출 지표에서 기온, 강수, 풍속, 해수면을 선정하고, 민감도 지표에서 인적요소, 시설요소, 토지요소, 해양요소를 그리고 적응능력 지표에서 경제능력, 사회능력, 행정능력, 해양대응능력을 선정하였음

- 강현웅(2015)은 기후변화를 고려하여 도림천 유역을 중심으로 도시지역의 홍수 취약성 평가함. 이 논문에서는 취약성을 기후노출, 민감도, 적응능력의 함수로 정의하였으며, 대리변수의 가중치는 연구자의 주관적인 판단에 의해 임의로 설정하였음
- 김진근(2018)은 제주도 상수도시설의 기후변화 취약성을 평가하였음. 이에 본 연구에서는 가뭄, 폭염, 호우에 대하여 국가기후변화적응센터에서 개발한 Vulnerability Assessment to Build Climate Change Adaption(VESTAP, 기후변화 취약성 평가 지원 도구 시스템)을 이용하여 정략적인 취약성 평가를 수행함. 이에 심층지하수를 취수하는 9개의 정수장의 기후변화 취약성은 상대적으로 낮으며, 지표수 및 용천수를 취수하는 WS 등 7개의 정수장의 경우가 취약한 것으로 결과가 나타남
- 신희재(2019)는 도시지역의 특성을 고려한 홍수피해 취약성 분석을 수행하였음. 취약성의 평가는 기후노출, 민감도, 적응도의 함수로 산정하던 기존의 방법에 추가적으로 홍수피해액을 고려하여 산정하였음. 각 요인에 대하여 도시 유형별 분석을 수행함

2.2 국외 수재해 취약성 증가 평가 및 대응 방법

- Gao et al.(2007)의 연구는 홍수 예방을 위해 중국에서 실시된 첫 번째 취약성 평가 연구임. 이 연구에서는 동팅 유역을 대상으로 취약성 평가 방법론을 개발하고, 취약성 평가 지표들의 가중치는 AHP 기법을 이용하여 선정함. 이를 통해 중국에서 도시유역의 취약성 평가를 위한 비공학 데이터 세트를 통합하고 분석하는 방법을 제시하였음
- Adelekan(2011)은 나이지리아에서 2007년 발생한 홍수를 대상으로 도시유역의 취약성 평가인자를 조사하였음. 도시홍수 취약성 평가인자를 도출하기 위해 거주자 248명을 대상으로 설문조사를 하였음. 이 연구에서는 노출된 인구의 취약성을 낮추는 행위가 홍수재해의 영향을 줄이는 방법이 가장 효과적이라고 제시하였음. 이에 저자는 지역사회 기반 홍수 취약성을 낮추기 위해서는 국민의 인식을 고려하여 평가되어야 하는 것을 강조하였음
- Nasiri and Shahram(2013)은 사전 연구에서 사용된 취약성 평가방법에 대한 방법을 취약성 지수 시스템, 취약성 곡선 방법, 재해 손실 데이터 3가지로 나누었음. 이 연구에서는 3가지 FVI(Flood Vulnerability) 방법을 검토하였으며, FVI의 전체 개념을 시스템에 영향을 미치는 홍수가 사회적, 환경적, 물리적 요소에 탄력성의 정의까지 함께 구성되어 있다고 설명하였음
- Chang and Shu(2018)는 대만의 홍수 취약성 평가를 위한 노출도, 민감도, 적응능력 3개의 지표를 통합한 프레임워크를 개발하였음. 이에 에너지 개념 기반 도시홍수 취약성을 평가하였으며, GIS를 이용하여 대만 서해안의 도시홍수 취약성을 공간적 분포를 분석하였음. 그 결과, 이 논문에서는 도시홍수 취약성을 평가하는 노출도, 민감도, 적응능력 3가지 지표의 공통 측정 단위를 제시하였음

1. 초고층 건물에 의한 강우-유출 과정의 왜곡 정도 평가 방법론

1.1 초고층 건물 벽면으로 인해 차단되는 빗물의 양 추정

1.1.1 차단되는 빗물의 양 추정 방법 개발

○ 점 강우강도

- Blocken and Carmeliet(2004)에 의하면 바람에 의한 수평 강우강도(본 연구에서는 이를 ‘측면 강우강도’로 부르기로 한다)는 다음 식으로 표현할 수 있음

$$R_{wdr} = R_h \cdot \frac{U}{V_t} \quad (1)$$

- 위 식에서 R_{wdr} 은 측면 강우강도를, R_h 는 수평면에서 관측한 연직 강우강도를, U 는 수평방향 풍속을, 마지막으로 V_t 는 강우입자의 종말속도를 나타냄
- Lacy(Lacy, 1965; Lacy, 1977)는 다양한 관측 결과를 종합하여 식 (1)을 다음과 같은 형태로 변형하여 제시함

$$R_{wdr} = 0.222 \cdot U \cdot R_h^{0.88} \quad (2)$$

- 위 식에서 0.222(s/m)는 측면 강우강도 상수라고 부르는 값으로 강우입자의 크기에 따라 다양한 종말속도 평균치의 역수 정도에 해당하는 값임. 연직 강우강도에 붙은 지수 0.88은 관측 자료의 분석을 통해 식 (1)의 지수 1을 수정한 값임
- 경우에 따라서는 지수 0.88을 이론값인 1로 그대로 사용하기도 함. 참고로, 상수 0.222(s/m)는 건물 벽면의 제일 높은 위치에 적용되는 값이고, 벽면의 다른 부분에서는 좀 더 작은 값으로 바뀜. 이 값은 벽면의 모양(또는 형상)에 따라서도 크게 달라지는 것으로 알려져 있음
- 위 두 식은 건물의 벽면에 수직 방향으로 바람이 부는 경우에 해당하는 식임. 그러나 벽면이 비스듬히 위치하여 벽면과 직각으로 위치하지 않은 경우에는 이를 반영하여야 함. 이론적으로 살펴보면, 벽면이 바람 방향과 직각이 아닌 경우에는 그 각도를 고려하여 다음 식과 같이 나타남

$$R_{wdr} = 0.222 \cdot U \cdot R_h^{0.88} \cdot \cos\theta \quad (3)$$

- 위 식을 벽면의 임의 위치를 고려할 수 있도록 좀 더 일반화시켜 나타내면 다음과 같음

$$R_{wdr} = \alpha \cdot U \cdot R_h^{0.88} \cdot \cos\theta \quad (4)$$

- 이 식이 측면 강우강도를 계산하는 가장 일반적인 형태의 경험식임. 많은 연구자들이 이 식의 매개변수 α 를 다양한 벽면의 형태, 벽면 내 위치 등을 고려하여 제시한 바 있음
- 공교롭게도 이 매개변수 α 의 범위는 매우 큼. 기존 연구에서 파악할 수 있는 가장 작은 경우는 0.02(s/m)(Lacy, 1965; Hens and Ali Mohamed, 1994)로 파악되며 가장 큰 경우는 0.26(s/m)까지로 (Flori, 1992) 0.222(s/m)를 초과하는 경우까지 발견됨

○ 측면 강우강도의 연직분포 및 면적분포

(1) 연직분포

- 측면 강우강도의 연직분포를 관측한 실험 결과도 여러 연구에서 발표된 바 있음. 특히, Beijer and Johansson(1977)은 연구에는 관측한 여러 강우사상에 대한 측면 강우강도의 연직분포를 제시하고 있

음(그림 1 참고).

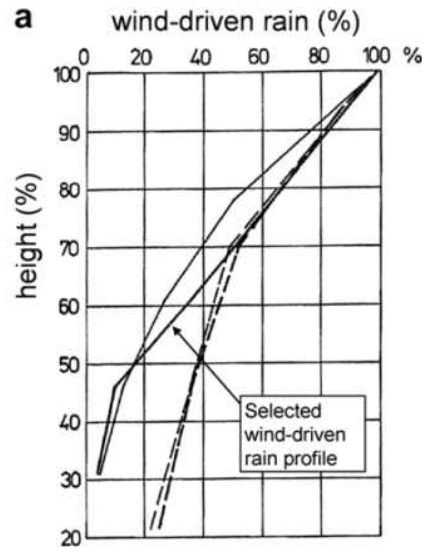


그림 1. Blocken and Carmeliet(2012)의 그림 11(a)

- 이 그림에서는 측면 강우의 연직분포가 1차함수 또는 2차함수의 형태로 모사될 수 있음을 보여 줌. 측면 강우강도의 연직분포를 1차함수로 가정한다면 연직방향 측면 강우강도의 합은 $q = 0.5R_{wdr} \cdot H$ 이 되고, 2차함수로 가정한다면 $q = 0.33R_{wdr} \cdot H$ 이 됨. 이 식에서 H 는 건물의 높이임

(2) 면적분포

- 벽면 전체에 대한 측면 강우강도의 분포는 관측자료의 분석을 통해 확인하기 어려움. 이는 바람의 방향이 시시각각으로 변해 그 영향을 보정하기 어렵기 때문임. 여기에 강우강도도 계속 변하므로 일관된 면적분포는 확인하기 어려움
- 이런 이유로 모의결과가 면적분포를 파악하는 데 일반적으로 사용됨. 관련된 모의는 1974년부터 시작된 것으로 알려져 있음(Sandberg, 1974)
- Sandberg(1974)는 풍동실험 모델링을 통해 벽면 주변에서의 강우입자의 거동을 모의한 바 있음. 유사한 연구가 Rodgers 등(Rodgers et al., 1974; Rodgers, 1977), Beijer (Beijer, 1977), Hilaire와 Savina(Hilaire and Savina, 1988)에 의해서도 수행된 바 있음이 확인됨
- 그러나 모의연구와 관련한 가장 중요한 이정표는 Choi(Choi, 1991; Choi, 1993; Choi, 1994)에 의해 마련됨. 이 연구성과를 기초로 그린 측면 강우강도 면적분포는 다음 그림 2와 같음

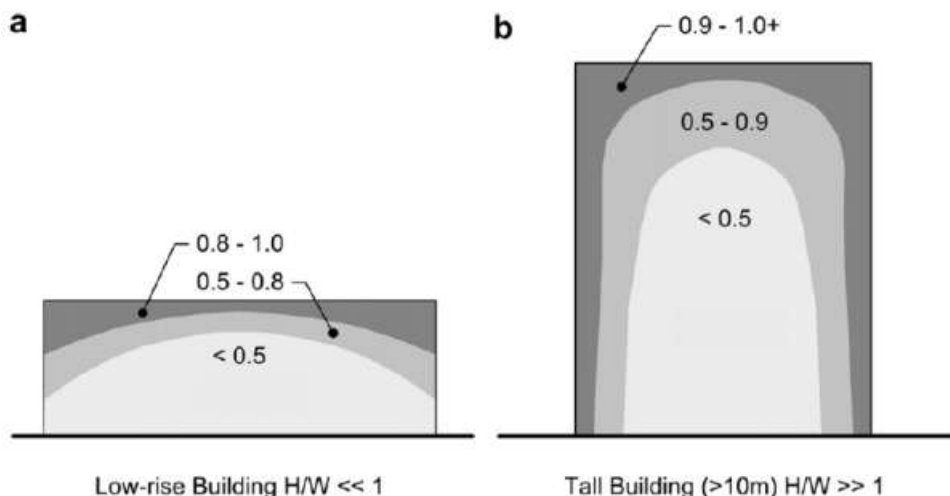


그림 2. Blocken and Carmeliet(2010)의 그림 2의 (a)와 (b)

- 이 그림에서도 측면 강우강도의 면적분포를 유추할 수 있음. 전체적으로 1차함수와 2차함수 사이 정도로 판단됨. 이 결과는 앞서 살펴본 Beijer and Johansson(1977)의 관측 결과와도 유사함

○ 차단량 추정 경험공식

- 본 연구에서는 위 그림과 같은 측면 강우강도의 면적분포를 고려하여 차단량 추정 경험공식(이하 ‘차단량 추정식’으로 부름)의 기본 형태를 유도함. 추정식의 유용성을 높이기 위해 측면 강우강도의 면적분포와 수평분포는 모두 선형으로 가정하였음
- 이러한 선형가정은 특히 수평방향에 대해 관측자료와의 차이가 있음. 그림 2에서도 높이보다 폭이 상대적으로 큰 건물에의 경우와 그 반대인 경우에 있어 측면 강우강도의 수평분포에 차이가 크게 있음을 확인할 수 있음. 이러한 차이는 향후 차단량 추정식에 매개변수를 조정하는 방식으로 반영될 수 있도록 할 것임
- 본 연구에서는 측면 강우강도의 면적분포를 아래 그림과 같이 가정하였음. 벽면의 경계면에서는 모두 위에서 살펴본 R_{wdr} 값을 갖는 것으로 가정함

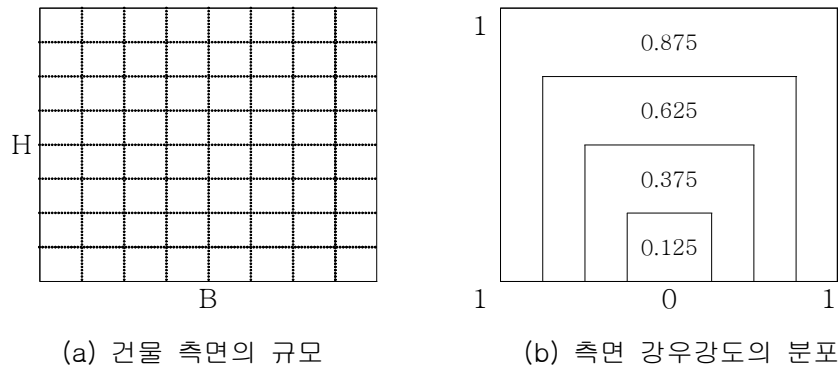


그림 3. 건물 측면의 제원 및 강우강도 분포

- 위 그림과 같은 강우강도 분포의 경우 총 차단량은 $Q \approx 0.656 R_{wdr} \cdot B \cdot H$ 로 나타남. 이 식을 앞서 정의한 R_{wdr} 식과 결합하여 일반적으로 나타내면 다음과 같음

$$Q = \beta \cdot B \cdot H \cdot (U \cdot R_h^{0.88} \cdot \cos\theta) \quad (5)$$

- 위 식에서 β 의 단위는 s/m이며, 매개변수 α 와 상수 0.656 그리고 건물의 형상에 따른 영향을 추가로 반영하여 최종적으로 제시하고자 하는 값임. 본 연구의 다양한 실험을 통해 특히 건물 측면의 규모 및 형상에 따른 β 값을 제시할 것임.
- 마지막으로 건물과 바람 방향 사이의 각도를 해결하는 문제가 남아 있음. 바람의 방향이 벽면과 직각이 아닌 경우 이론적으로는 두 개의 벽면에 측면 강우가 발생하게 된다는 점임. 이 경우 두 벽면에서의 차단량 전체는 위에서 제시한 경험식을 적용하여 다음과 같이 표현할 수 있음

$$Q = \beta \cdot B \cdot H \cdot (U \cdot R_h^{0.88}) \cdot (\cos\theta + \cos(\pi/2 - \theta)) \quad (6)$$

- 그러나 위 식은 실험실 관측자료에 대해서나 적용 가능한 식임. 현실에서는 실험실에서와는 달리 바람 방향이 시시각각으로 변하게 됨
- 즉, 바람과 건물 벽면 사이의 각도를 특정 값으로 지정하기 어려움. 기후특성을 반영하여 주된 방향이 있을 수는 있으나 다양한 규모, 형태의 건물이 존재하는 도시에서 이를 그대로 적용하는 것도 무리임
- 결과적으로 특정 건물에서의 차단량을 건물 벽면마다 따로 구분하여 판단하는 것은 불가능함. 오히려 건물의 차단량을 건물 전체 벽면에 대해 추정하는 것이 적절한 접근방법임
- 위 식 (6)에서 $\cos\theta + \cos(\pi/2 - \theta) = 2\cos(\pi/4)\cos(\pi/4 - \theta)$ 이므로 이 항은 간단히 1로 근사화 가능함. 이론적으로는 바람과 건물 벽과의 각도가 $\pi/2$ 에 가까울 경우에는 1로 가정하는 데 크게 문제가 없고, $\pi/4$ 에 가까운 경우에는 최대 40% 정도의 차이가 발생하게 됨

- 그러나 이 경우에는 강우입자가 벽면에 부딪히지 않고 밀려 나갈 가능성이 커지므로 역시 1로 가정하는 데 큰 무리는 없을 것으로 판단됨. 최종적으로 본 연구에서 제시하는 건물 벽면에 의한 차단량의 추정식은 다음과 같음

$$Q = \beta \cdot B \cdot H \cdot U \cdot R_h^{0.88} \quad (7)$$

1.1.2 실험을 통한 추정 방법 검증

○ 벽면 부착형 우량계 설계 방법

- 본 연구에서는 바람의 영향을 받아 측면으로 내리는 강우를 관측하기 위해 벽면 부착형 우량계를 설계하고 제작하여 이용함. 우량계를 설계하는 과정에서 먼저 결정해야 할 것은 우량계의 최대 용량임
- 이 과정에서 본 연구에서는 서울지점 빈도해석 결과를 참고함. 기존 서울지점 통합 IDF 곡선을 이용할 경우, 지속기간이 12시간이며 2년의 재현기간을 가지는 확률강우량은 124.8 mm임. 아울러 서울지점 연최대치 강우사상의 강우강도와 총 강우량을 이용하여 이변량 빈도해석을 수행하면 동일한 조건의 확률강우량이 106.1 mm로 주어짐. 본 연구에서는 두 가지 빈도해석 결과 중 큰 값인 124.8 mm를 우량계의 최대 용량으로 결정함
- 앞서 결정된 최대 용량을 이용하여 본 연구에서는 총 세 가지 유형의 우량계를 설계함. 세 가지 유형의 우량계는 크기를 기준으로 대형, 중형, 소형으로 나뉨. 대형 우량계는 앞서 결정된 최대 용량인 124.8 mm의 우량을 관측할 수 있도록 설계되었음
- 중형의 우량계는 최대 용량의 60%인 74.8 mm를 관측할 수 있게 설계되었으며, 소형은 최대 용량의 20%인 24.9 mm까지 관측하도록 설계되었음. 대형 우량계만을 이용하지 않고 중형, 소형 우량계를 함께 이용한 이유는 세밀한 강우의 변동을 자세하게 측정하기 위함임
- 대형 우량계의 경우 눈금 한 개의 값이 크기 때문에 이에 따른 관측 오차도 크다는 단점을 가지고 있음. 본 연구에서는 중형 우량계와 소형 우량계를 함께 이용하여 이러한 단점을 보완하고자 하였음. 그림 4는 대형, 중형, 소형 벽면 부착형 우량계를 도식화하여 나타낸 것임

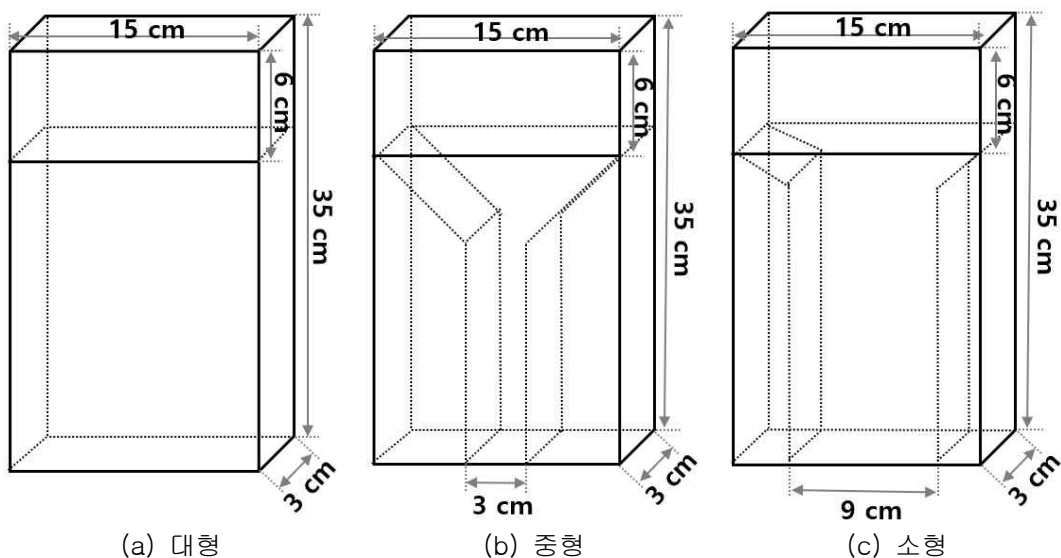


그림 4. 대형, 중형, 소형 벽면 부착형 우량계의 도식

○ 차단량 관측 실험 조건

- 본 연구에서는 차단량 추정식을 유도하기 위해 강우와 바람을 모의하는 실험 장치를 제작하여 이용하였음. 실험 장치의 바닥면은 추후 강우-유출 해석 실험을 수행하기 위해 10° 기울어져 있음. 차단량 관측 실험을 수행하는 과정에서는 평평한 바닥면이 설치되어 이용되었음
- 그림 5는 차단량 관측 실험 장치를 도식화하여 나타낸 것임. 그림 5에서 Rainfall nozzle는 강우를 모의하는데 이용되는 강우 노즐이며, Fan은 바람을 모의하는데 이용된 바람 발생 장치임. 오른쪽 아래 꼭짓점에는 물이 빠지는 출구가 만들어져있음

- 본 연구에서는 전압을 조절해가며 생성되는 바람의 풍속이 어떻게 나타나는지 확인해보았음. 풍속 관측은 한 지점당 1분 동안 10초에 한 번씩 풍속계의 눈금을 읽고 여섯 값의 평균을 기록하는 방식으로 진행함
- 관측 높이와 Fan으로부터의 거리를 기준으로 지점별 4개의 관측값을 구한 후 이를 평균한 값으로 지점별 평균 풍속을 결정함. 지점별 관측된 평균 풍속은 아래 표와 같이 정리됨

표 1. 관측 높이 및 Fan으로부터의 거리에 따른 평균 풍속

전압(V)	Fan으로부터의 거리(m)	관측 높이(m)	평균 풍속(m/s)
180	0.55	1.72	2.39
		1.84	2.30
		1.96	2.37
	0.93	1.72	2.08
		1.84	2.00
		1.96	2.16
220	0.55	1.72	2.90
		1.84	2.90
		1.96	2.80
	0.93	1.72	2.46
		1.84	2.40
		1.96	2.34

- 관측 높이와 지점을 고려하지 않고 단순히 평균값을 구했을 때 전압이 220V이면 풍속이 2.63 m/s, 전압이 180V일 때는 2.22 m/s인 것으로 확인됨
- 다음으로 본 연구에서는 실험에 이용할 강우강도 조건을 결정함. 강우를 모의하기 위해 총 5개의 분사형 강우 모의 노즐이 설치되었으며, 설치된 위치는 그림 5에 나타나 있음. 이용된 노즐의 직경은

0.5 mm이며, 이는 강우의 형태 물을 분사하는 노즐의 최소 직경임

- 강우강도를 조절하기 위해서는 펌프의 유량을 조절하였으며, 1.5 L/min, 2.0 L/min의 펌프 유량에 따른 강우강도를 관측함. 강우를 모의할 때 바람도 함께 모의하였으며, 평균 풍속 2.22 m/s와 2.63 m/s인 경우를 조건으로 이용하였음
- 강우강도 또한 풍속과 마찬가지로 Fan으로부터의 거리를 기준으로 평균 강우강도를 결정함. Fan으로부터의 같은 거리에 있는 5개의 지점에서 강우강도를 관측하고, 이를 평균한 값으로 지점별 평균 강우강도를 결정함. 결정된 평균 강우강도는 아래 표와 같이 정리됨

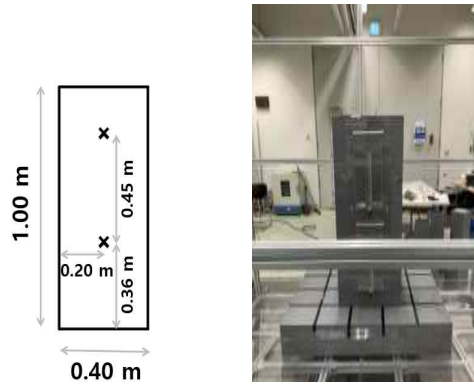
표 2. 펌프 유량, Fan으로부터의 거리 및 평균 풍속에 따른 평균 강우강도

펌프 유량(L/min)	Fan으로부터의 거리(m)	평균 풍속(m/s)	평균 강우강도(mm/hr)
1.5	1.10	2.22	62.0
		2.63	76.2
	1.30	2.22	32.0
		2.63	33.1
2.0	1.10	2.22	107.6
		2.63	110.4
	1.30	2.22	49.9
		2.63	52.7

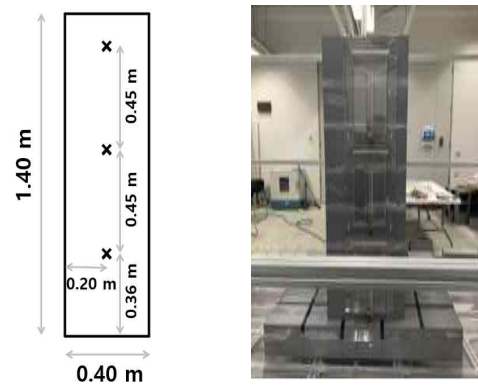
- 본 연구에서는 Fan으로부터의 거리를 고려하지 않고, 펌프 유량과 평균 풍속에 따라 총 네 가지 경우의 평균 강우강도를 실험에 이용함
- 펌프 유량이 1.5 L/min일 때, 평균 풍속이 2.22 m/s일 때의 평균 강우강도는 47.0 mm/hr이고 평균 풍속이 2.63 m/s일 때의 평균 강우강도는 54.7 mm/hr임. 아울러, 펌프 유량이 2.0 L/min인 경우에는 평균 풍속이 2.22 m/s일 때의 평균 강우강도는 78.7 mm/hr이고, 평균 풍속이 2.63 m/s일 때의 평균 강우강도는 81.6 mm/hr으로 계산되었음

○ 다양한 형태의 건물 모형

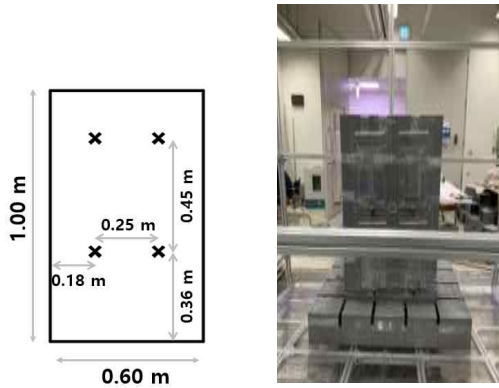
- 본 연구에서는 차단량 추정식의 매개변수를 추정하기 위해 실험실 환경에서 다양한 형태를 가진 건물에 의해 차단되는 강우의 강우강도를 관측하였음. 관측에 이용된 건물은 벽면의 크기에 따라 총 여섯 가지로 구분됨. 그림 6은 여섯 가지 건물의 형태를 도식화한 것과 실제 사진을 보여 줌
- 각각의 건물에는 가로 0.3 m, 세로 0.5 m의 크기를 가지는 벽면 부착형 우량계가 설치되어 있으며, 우량계의 설치 위치는 건물 형태를 도식화한 그림에 'x'로 표시되어 있음. 건물 벽면의 크기에 따라 최소 2개에서 최대 9개의 우량계가 측면 강우강도 관측에 이용됨



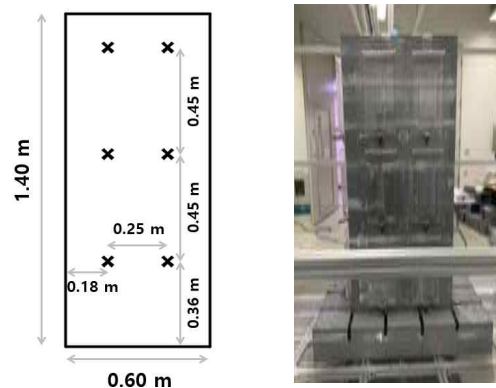
(a) $B = 0.4 \text{ m}$, $H = 1.0 \text{ m}$ 인 건물



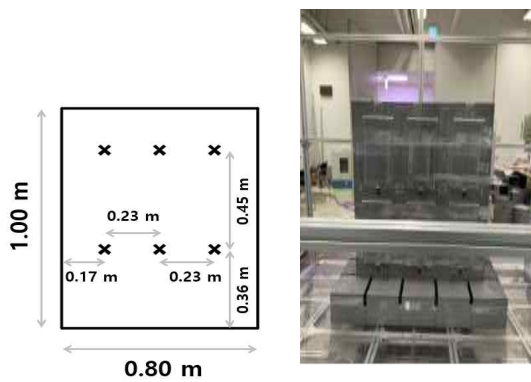
(b) $B = 0.4 \text{ m}$, $H = 1.4 \text{ m}$ 인 건물



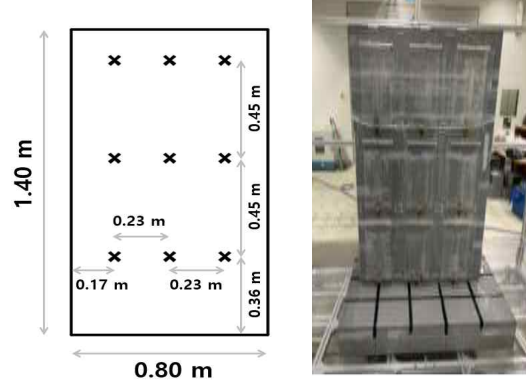
(c) $B = 0.6 \text{ m}$, $H = 1.0 \text{ m}$ 인 건물



(d) $B = 0.8 \text{ m}$, $H = 1.0 \text{ m}$ 인 건물



(e) $B = 0.6 \text{ m}$, $H = 1.4 \text{ m}$ 인 건물



(f) $B = 0.8 \text{ m}$, $H = 1.4 \text{ m}$ 인 건물

그림 6. 건물 모형의 도식 및 실제 사진

- 아울러 건물과 바람 방향 사이 각도에 따라 차단량이 달라지는지 확인하기 위해 $B = 0.8 \text{ m}$, $H = 1.4 \text{ m}$ 인 건물 모형의 위치를 바꿔가며 강우 차단량을 관측함. 건물 모형의 위치는 반시계방향으로 건물 모형을 45° , 30° , 15° 회전시키는 방법으로 바꿔보았음
- 건물 모형을 회전하면서 모형의 두 면에 의해 차단되는 강우량을 관측함. 이때 이용된 벽면 우량계는 한 면 당 아홉 개씩 열여덟 개임. 아래 그림은 건물 모형을 45° , 30° , 15° 회전시켰을 때의 건물 모형을 정면에서 찍은 사진을 보여 줌



(a) 건물 모형을 45°

회전시킨 경우



(b) 건물 모형을 30°

회전시킨 경우



(c) 건물 모형을 15°

회전시킨 경우

그림 7. 건물과 바람 방향 사이 각도에 따른 건물 모형

- 본 연구에서는 건물에 의해 차단되는 현상이 주변 건물에 영향을 받는지 확인하였음. 이를 위해 건물 사이에 간격을 두고 한 건물에 차단되는 강우량이 다른 건물에 의해 어떻게 바뀌는지 알아보기 위한 실험을 수행하였음.
- 실험은 총 네 가지 경우로 진행되었음. 네 가지 경우는 높이 1.0 m 건물을 두 개 이용하는 경우와 같은 높이의 건물을 네 개 이용하는 경우, 그리고 높이 1.4 m 건물을 두 개 이용하는 경우와 같은 높이의 건물을 네 개 이용하는 경우임. 이에 네 가지 경우에 해당하는 건물 모형 및 건물 배치 방법은 그림 8과 같음

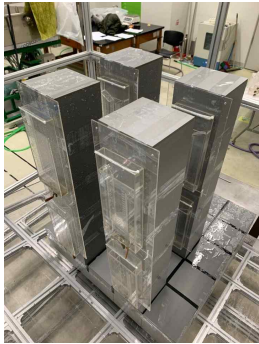
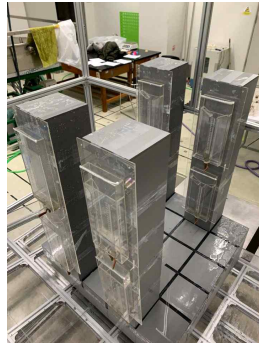
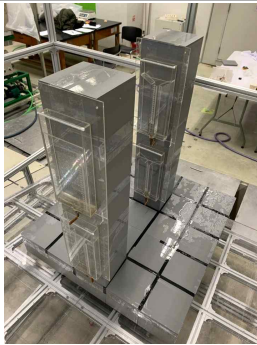
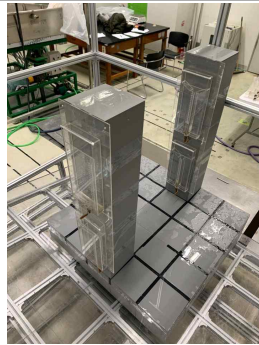
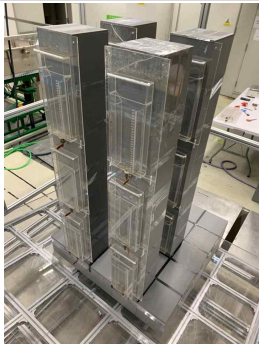
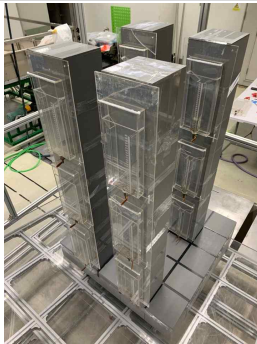
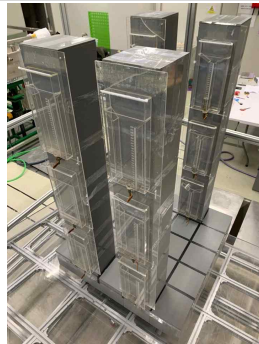
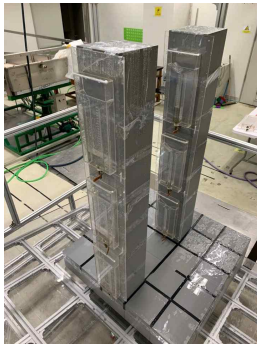
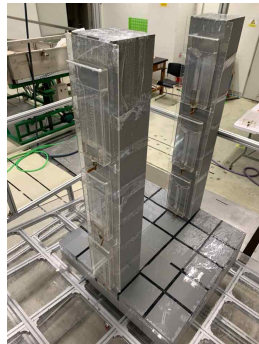
건물 높이	건물 개수	건물 사이 거리		
		0.2 m	0.4 m	0.6 m
1.0 m	4개			
	2개			
1.4 m	4개			
	2개			

그림 8. 건물 높이 및 건물 사이 거리에 따른 건물 배치 결과

○ 측면 강우량 관측 결과

- 본 연구에서는 네 가지 형태의 건물 모형과 네 가지 조건의 강우강도와 풍속에 따른 측면 강우량을 관측함.
- 강우강도와 풍속에 따른 측면 강우량은 각 케이스별로 10분씩 진행되었음. 10분 동안 강우강도와 바람을 모의했을 때 각 우량계에 수집되는 강우량을 관측하였음
- 관측되는 강우량은 mm/hr 단위로 환산하였음. 환산하는 방법은 우량계의 종류에 따라 다르게 결정됨. 아래 그림은 소형, 중형, 대형 벽면 우량계의 도식을 보여줌

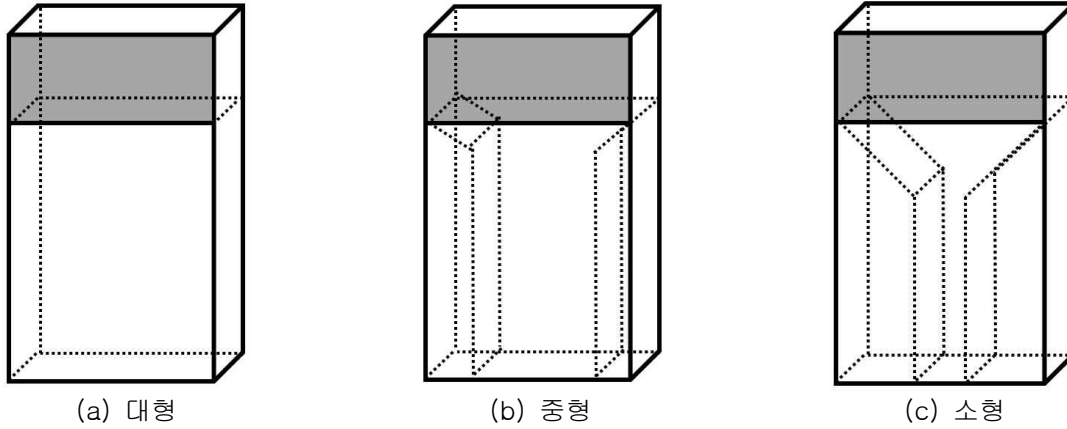
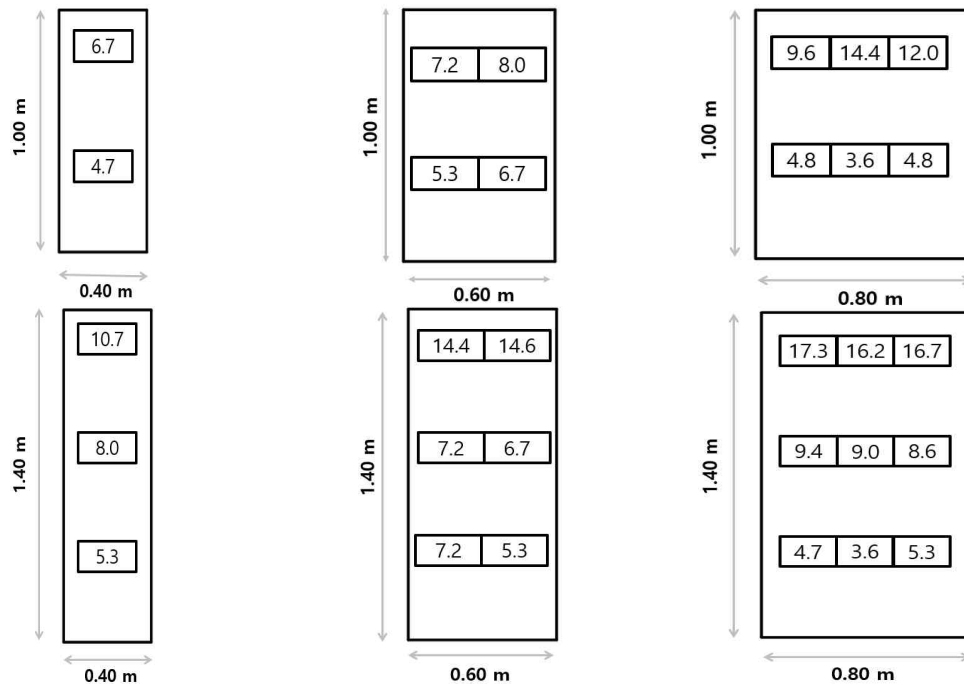
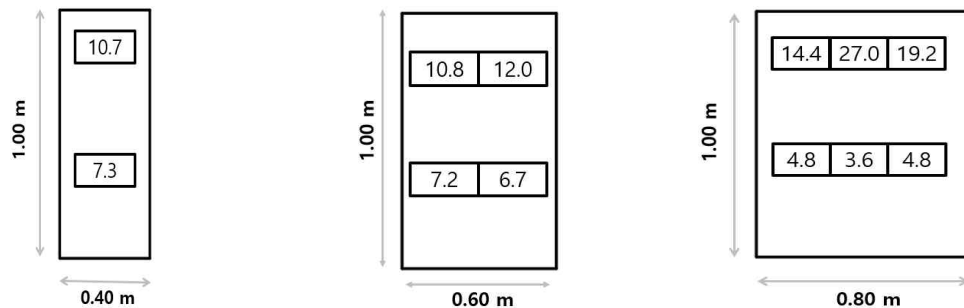


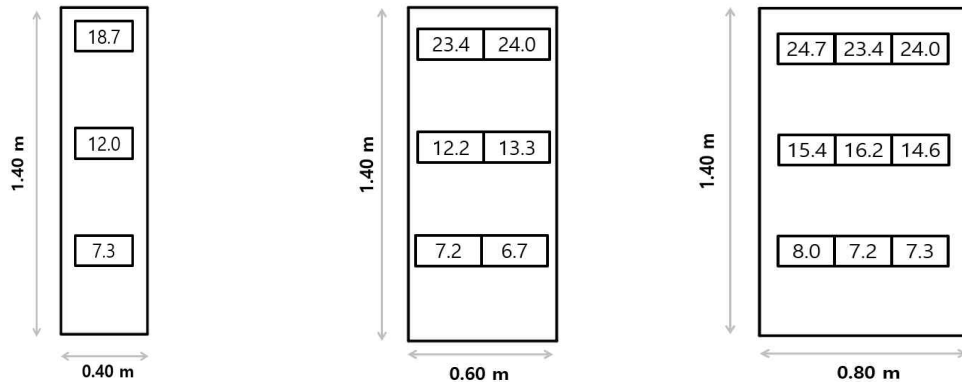
그림 9. 대형, 중형, 소형 벽면 우량계의 도식

- 그림 9에서 진회색으로 표시된 면적은 측면 강우에 대한 집수면임. 각 우량계의 관측 강우량은 집수면과 강우가 모이는 저장고의 밑면에 대한 비율을 관측 눈금에 곱한 값으로 정해짐
- 집수면과 강우가 모이는 저장고의 밑면에 대한 비율은 대형 우량계가 0.40, 중형 우량계는 0.30, 소형 우량계는 0.11임
- 그림 10에는 네 가지 강우강도와 풍속 조건 중 강우강도가 47.0 mm/hr이고 풍속이 2.22 m/s인 경우와 강우강도가 81.6 mm/hr이고 풍속이 2.63 m/s인 조건에 대한 측면 강우강도의 관측값이 정리되어 있음. 관측된 강우강도는 건물 모형을 도식화한 그림 안에 표의 형태로 기록되어 있음



(a) 강우강도 47.0 mm/hr, 풍속 2.22 m/s

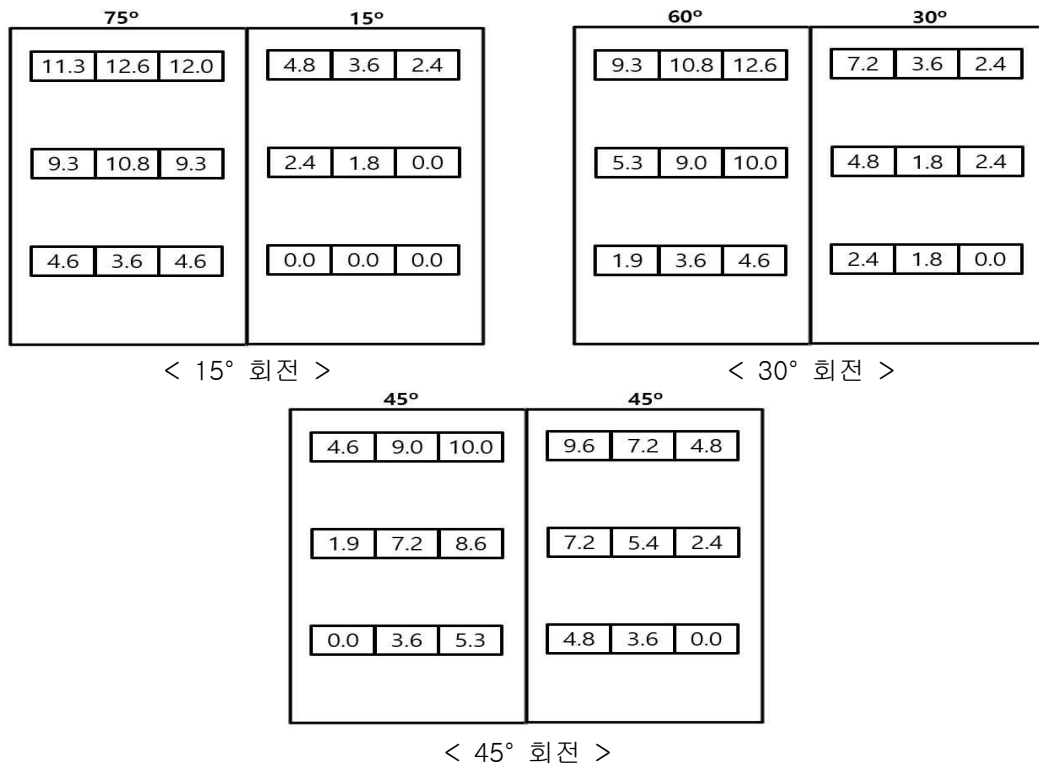




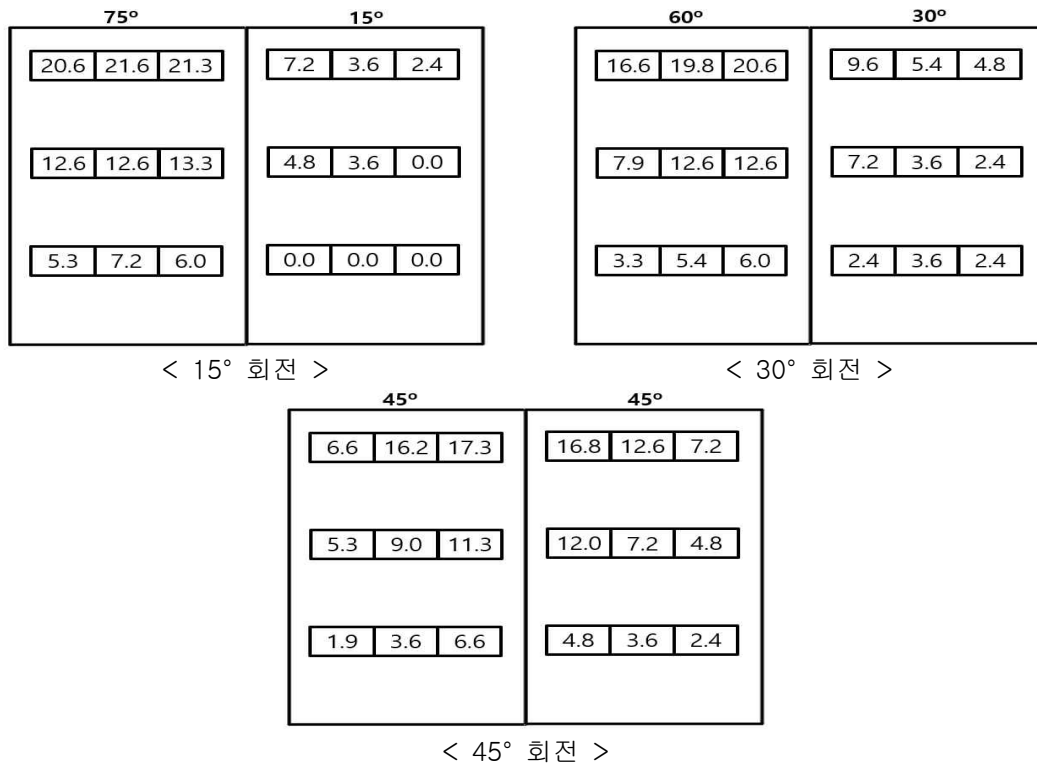
(b) 강우강도 81.6 mm/hr, 풍속 2.63 m/s

그림 10. 벽면 형태별 강우강도와 풍속에 따라 관측된 측면 강우강도(mm/hr)

- 그림 10을 자세히 보면, 건물 형태와 상관없이 모든 경우에서 높이가 높아질수록 측면 강우량이 커지는 경향이 있음을 알 수 있음. 아울러, 풍속과 강우강도가 커질수록 관측되는 측면 강우량도 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있음
- 차단량 추정식을 유도할 때 가정했던 측면 강우량의 분포와 실제 관측한 측면 강우량의 분포는 크게 다르지 않은 것으로 나타남. 완전히 동일한 분포를 가지고 있지는 않지만, 측면 강우의 전체적인 차단량을 추정하는 데 큰 문제가 되지 않았음
- 다음으로, 본 연구에서는 건물 모형을 회전시켰을 때 모형에 의해 차단되는 강우량을 관측한 결과를 정리함. 아래 그림은 건물 모형을 45°, 30°, 15° 회전시켰을 때 관측된 강우의 차단량을 보여줌



(a) 강우강도 47.0 mm/hr, 풍속 2.22 m/s



(b) 강우강도 81.6 mm/hr, 풍속 2.63 m/s

그림 11. 건물과 바람 방향 사이 각도에 따라 관측된 측면 강우강도(mm/hr)

- 아래 막대 그래프는 건물과 바람 방향 사이 각도에 따른 차단량을 나타낸 것임. 그림을 자세히 보면, 건물과 바람 방향 사이 각도에 따라 관측된 차단량이 미세하게 다른 것을 확인할 수 있음
- 건물 모형을 15°나 30° 회전시킨 경우에는 정면으로 관측한 결과보다 작은 양이 차단되는 것을 볼 수 있음. 반면, 건물 모형을 45° 기울이면 정면으로 관측한 결과보다 큰 양의 강우가 차단됨
- 하지만 모든 경우에서 정면으로 관측한 차단량의 10% 이상 차이 나는 경우가 없는 것으로 나타남. 이에 따라 건물에 의해 차단되는 강우량을 추정하는 과정에서 건물과 바람 방향 사이 각도가 크게 문제 되지 않는 것으로 확인되었음

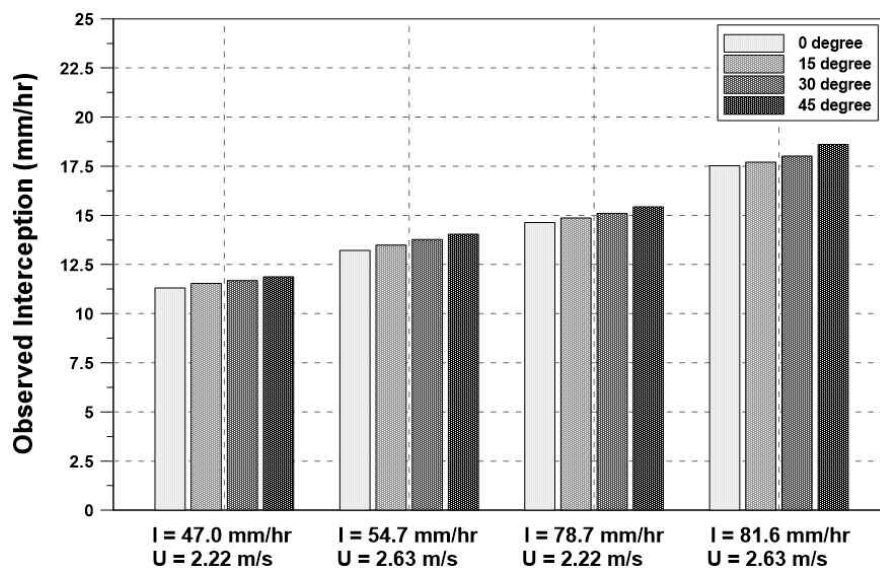


그림 12. 건물과 바람 방향 사이 각도에 따른 차단량 비교

- 각각의 경우에 건물 사이의 간격을 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m로 바꾸어 가며 차단량을 관측해보았음. 이때 차단량 관측을 위한 강우강도는 85.7 mm/hr이고 풍속은 2.63 m/s로 결정하였음. 그림 13은 각각의 경우에 대한 10분 동안 관측한 측면 강우강도를 건물 모형에 정리하여 나타낸 것임. 건물 모형 안의 표에 표기되어 있는 숫자가 mm/hr 단위의 강우강도를 의미함

건물 높이	건물 개수	건물 사이 거리		
		0.2 m	0.4 m	0.6 m
1.0 m	4개			
	2개			
1.4 m	4개			
	2개			

그림 13. 건물 사이 거리에 따른 측면 강우강도 관측 결과

- 그림 13의 결과를 보면 건물 사이 간격이 0.6 m인 경우 주변 건물에 의한 영향을 거의 받지 않는 것을 확인할 수 있음. 강우강도의 크기가 작아진 것은 강우노출부터의 거리가 멀어졌기 때문일 것으로 판단됨.
- 반면, 건물 사이 간격이 0.4 m인 경우에는 건물의 상단 부에 의해서만 강우가 차단되고, 중앙과 하단 부에 의해서는 차단이 되지 않는 것으로 확인됨. 건물 사이 간격이 0.2 m까지 좁아지면, 건물의 상단 부에 의해 소량의 강우만 차단될 뿐 건물에 의한 차단이 거의 이루어지지 않았음.
- 0.2 m는 건물 모형의 폭과 동일한 값임. 이에 따라 본 연구에서는 건물 사이에 간격이 건물의 폭보다

작은 경우에는 건물에 의한 간섭 효과가 있다고 가정하고, 건물 폭 내에 존재하는 건물을 하나의 건물로 고려하여 강우-유출 실험을 수행하였음

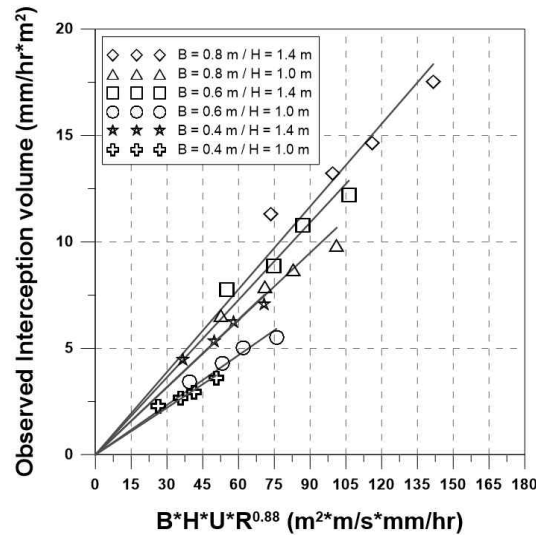
○ 차단량 추정식의 매개변수 추정

- 본 연구에서는 차단량 추정식의 매개변수를 추정하기 위해 총 스물네 케이스의 실험 결과에 대한 차단량 추정식의 각 성분들을 계산해보았음
- 아래 표는 열여섯 케이스의 실험 결과 및 벽면 형태의 정보를 정리하여 나타낸 것임. 아래 표에서 B, H, U, $R^{0.88}$ 은 차단량 추정식의 우변에 해당하는 성분이며, 관측값인 Obs는 실험을 통해 관측한 강우의 평균에 벽면 넓이를 곱한 값임. 해당 식에서 강우강도의 단위는 mm/hr임. 차단량 추정식의 매개변수 β 는 표 3에서 $B \times H \times U \times R^{0.88}$ 와 관측값의 관계를 통해 추정할 수 있음

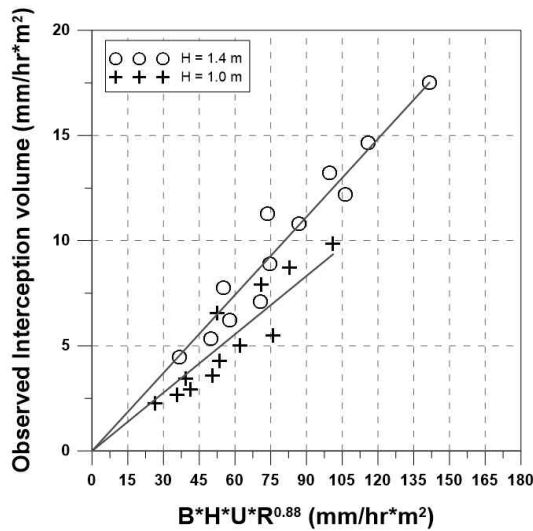
표 3. 실험 결과별 차단량 추정식의 성분

Case	B (m)	H (m)	U (m/s)	$R^{0.88}$ (mm/hr)	$B \times H \times U \times R^{0.88}$	Obs (mm·m ² /hr)
1	0.4	1.0	2.22	29.6	26.30	2.27
2	0.4	1.0	2.63	33.8	35.58	2.66
3	0.4	1.0	2.22	46.6	41.39	2.94
4	0.4	1.0	2.63	48.1	50.59	3.60
5	0.4	1.4	2.22	29.6	36.82	4.48
6	0.4	1.4	2.63	33.8	49.81	5.35
7	0.4	1.4	2.22	46.6	57.95	6.23
8	0.4	1.4	2.63	48.1	70.83	7.09
9	0.6	1.0	2.22	29.6	39.45	3.42
10	0.6	1.0	2.63	33.8	53.37	4.28
11	0.6	1.0	2.22	46.6	62.09	5.02
12	0.6	1.0	2.63	48.1	75.89	5.50
13	0.6	1.4	2.22	29.6	55.23	6.56
14	0.6	1.4	2.63	33.8	74.72	7.92
15	0.6	1.4	2.22	46.6	86.92	8.72
16	0.6	1.4	2.63	48.1	106.25	9.84
17	0.8	1.0	2.22	29.6	52.60	7.77
18	0.8	1.0	2.63	33.8	71.16	8.89
19	0.8	1.0	2.22	46.6	82.78	10.80
20	0.8	1.0	2.63	48.1	101.19	12.21
21	0.8	1.4	2.22	29.6	73.64	11.30
22	0.8	1.4	2.63	33.8	99.62	13.21
23	0.8	1.4	2.22	46.6	115.89	14.64
24	0.8	1.4	2.63	48.1	141.66	17.52

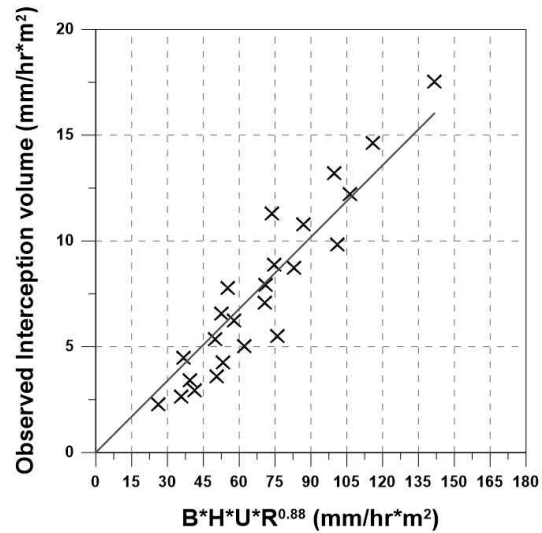
- 본 연구에서는 먼저 건물의 형태별 차단량 추정식의 β 가 어떻게 추정되는지 또한 확인하였음. 즉, 표 3에 정리된 24개의 자료를 건물 형태별로 여섯 개씩 나누어 각각의 자료에 대한 선형 관계식을 유도해보았음
- 이와 더불어 본 연구에서는 건물 형태별로 선형 관계식을 유도할 뿐만 아니라 여러 형태의 건물 모형을 동시에 고려하여 선형 관계식을 유도해보기도 함. 높이를 기준으로 전체 실험 결과를 두 그룹으로 나누어 분석을 수행하였으며, 두 그룹으로 나누는 기준으로 건물 높이가 이용되었음. 아울러, 모든 실험 결과를 이용하여 선형 관계식을 유도하고 이를 다른 결과들과 비교하였음
- 그림 14는 건물 형태별, 건물 높이별 실험 결과 및 모든 실험 결과에 대한 $B \times H \times U \times R^{0.88}$ 와 측면 강우강도에 대한 산점도 및 선형 관계식을 나타낸 것임. 선형 관계식의 기본 형태는 $Y = aX$ 이며, 최소제곱법을 적용하여 자료에 적합한 기울기를 결정함. 이때 결정된 기울기가 바로 차단량 추정식의 β 와 같음



(a) 건물 형태별 실험 결과



(b) 건물의 높이에 따른 실험 결과



(c) 모든 실험 결과

그림 14. 실험 결과별 $B \times H \times U \times R^{0.88}$ 와 측면 강우강도의 산점도 및 선형 관계식

- 그림 14를 살펴보면, 건물 형태별로 구분하여 분석한 결과가 뚜렷한 선형 관계를 나타내고 있는 것을 알 수 있음. 그림 14(a)에서 $B = 0.4 \text{ m}$, $H = 1.0 \text{ m}$ 인 건물에 대한 β 는 0.0735로, $B = 0.6 \text{ m}$, $H = 1.0 \text{ m}$ 인 건물에 대한 β 는 0.0779로, $B = 0.8 \text{ m}$, $H = 1.0 \text{ m}$ 인 건물에 대한 β 는 0.105로 추정되었음.
- $B = 0.4 \text{ m}$, $H = 1.4 \text{ m}$ 인 건물의 β 는 0.106으로, $B = 0.6 \text{ m}$, $H = 1.4 \text{ m}$ 인 건물의 β 는 0.130으로, $B = 0.8 \text{ m}$, $H = 1.4 \text{ m}$ 인 건물의 β 는 0.121로 추정되었음.
- 아울러 여러 형태의 건물 모형을 함께 고려한 결과 또한 선형 관계식으로 나타낼 수 있음을 알 수 있음. 그림 14(b)에서 $H = 1.0 \text{ m}$ 인 건물의 실험 결과로 추정한 β 는 0.0925, $H = 1.4 \text{ m}$ 인 건물의 실험 결과로 추정한 β 는 0.130임. 그림 14(c)에서 모든 실험 결과로 추정한 β 는 0.113으로 확인되었음.
- 건물의 형태적인 특성에 따른 β 의 경향은 건물의 형태적인 특성과 유도된 β 를 산점도로 나타내면 더욱 쉽게 확인할 수 있음. 그림 15는 건물 폭(B), 건물 높이(H), 건물 면적($B \times H$), 건물 폭에 대한 높이의 비율(H/B)과 β 의 관계에 대한 산점도를 나타낸 것임.

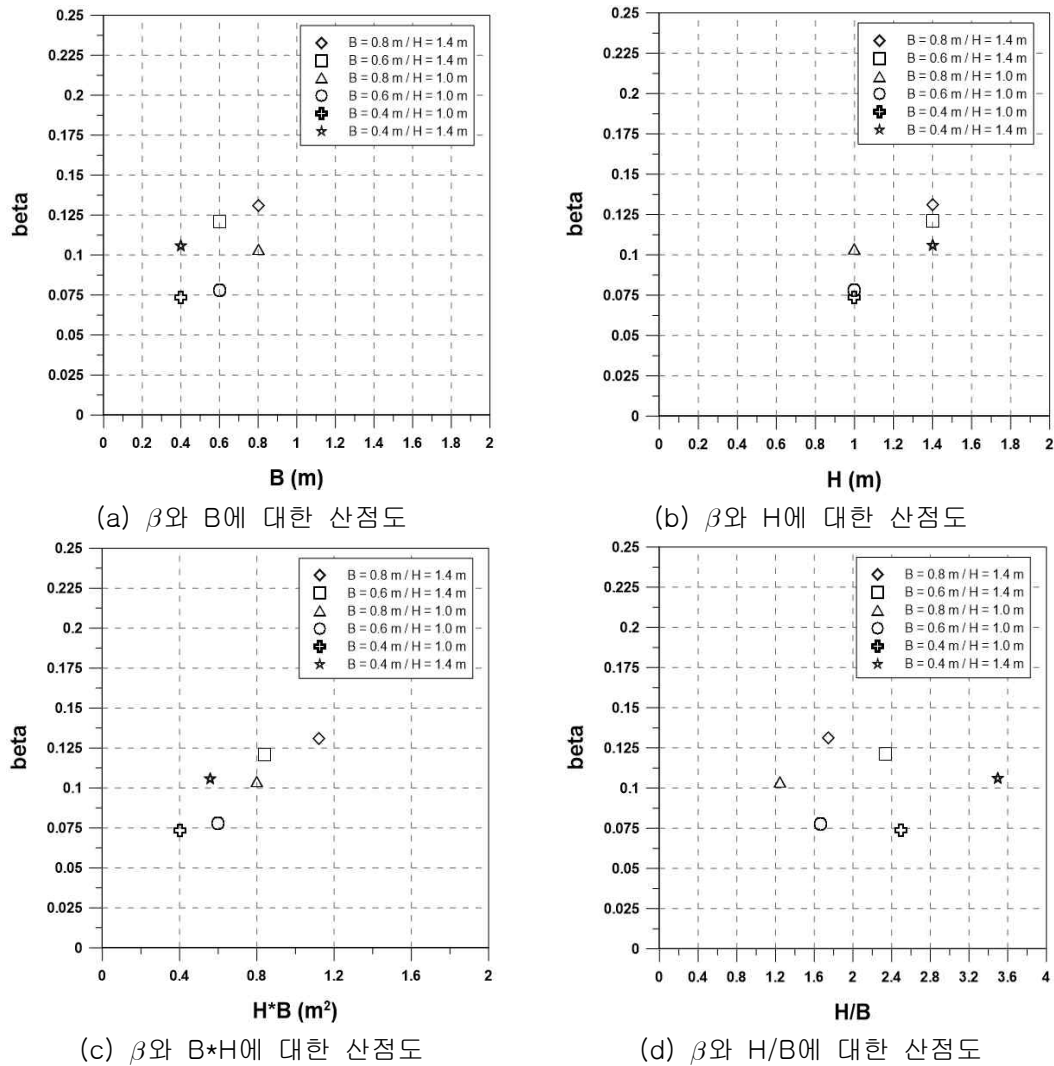


그림 15. β 와 건물 특성에 대한 산점도

- 그림 15를 자세히 살펴보면 건물의 특성에 따라 β 가 어떻게 추정되는지 확인할 수 있음. 먼저, 그림 15(a)에 나타난 β 는 건물 폭에 비례하여 증가하는 경향이 있는 것으로 보이나, 그 경향이 뚜렷하지 않은 것으로 확인됨
- 예를 들어, 건물 폭이 두 배가 되는데도 불구하고 β 가 유사하게 추정된 경우가 있음. β 와 건물 높이의 관계 또한 명확하지 않은 것으로 보임. 그림 15(b)를 자세히 보면 건물 높이가 다른데도 불구하고 β 가 거의 동일한 것을 알 수 있음
- 다음으로, 그림 15(d)를 보면 β 가 건물 폭에 대한 높이의 비율(H/B)과 반비례하는 경향이 있는 것을 알 수 있음. 반면, 반비례 경향 또한 뚜렷하게 나타나지 않아 H/B 의 비율이 3배 가까이 차이나는 데도 불구하고 β 가 유사하게 추정된 경우가 있음
- 다른 결과에 비해 그림 15(c)에 나타난 건물 면적과 β 는 어느 정도 정비례하는 경향이 나타나는 것으로 확인되었음. 차단량 추정식의 β 는 상한값이 존재하기 때문에 이러한 비례 관계 또한 특정 상한치에 도달하기까지 성립할 것으로 예상됨. 건물 모형의 규모를 더 크게 하여 실험을 수행하면 건물 면적과 β 의 관계를 더 명확하게 규명할 수 있으리라 판단됨
- 본 연구에서는 건물 형태별로 여섯 개, 건물 높이를 기준으로 두 개, 모든 실험 결과를 이용하여 아홉 개의 차단량 추정식을 유도하였음. 그리고, 아홉 개의 선형 관계식을 비교하기 위해 각 선형 관계식의 결정계수를 계산해보았음. 표 4는 분석 실험 결과에 따른 차단량 추정식의 β , R^2 를 정리한 것임

표 4. 분석 실험 결과에 따른 차단량 추정식의 β , R^2

분석 실험 결과	β	R^2
B = 0.4 m, H = 1.0 m인 건물	0.0735	0.85
B = 0.6 m, H = 1.0 m인 건물	0.0779	0.86
B = 0.8 m, H = 1.0 m인 건물	0.105	0.67
B = 0.4 m, H = 1.4 m인 건물	0.106	0.86
B = 0.6 m, H = 1.4 m인 건물	0.121	0.86
B = 0.8 m, H = 1.4 m인 건물	0.130	0.76
H = 1.0 m인 건물	0.0925	0.83
H = 1.4 m인 건물	0.124	0.93
모든 실험 결과	0.113	0.86

- 표 4의 내용을 살펴보면, B = 0.8 m, H = 1.0 m인 건물을 고려한 결과를 제외하면 모든 선형 관계식이 0.75 이상의 결정 계수를 가지고 있는 것을 알 수 있음. 해당 결과를 통해 본 연구의 차단량 추정식이 실험실 환경에서 관측한 차단량을 충분히 예측할 수 있음이 확인되었음
- 이후 실제로 관측한 차단량을 추정하기 위해 본 연구에서는 모든 실험 결과를 이용하여 유도한 차단량 추정식을 이용하였음. 이에 해당하는 차단량 추정식은 식 (8)과 같이 표현됨

$$Q = 0.113 \times B \times H \times U \times R_h^{0.88} \quad (8)$$

- 여기에 단일 건물 모형 또는 건물 높이를 기준으로 유도한 경험공식도 적용 가능함. 하지만, 더 많은 자료를 이용하여 추정한 경험공식이 통계적으로 유의하다는 판단 하에 모든 실험 결과를 이용하여 유도한 경험공식을 선정하여 이용하였음

○ 관측 자료를 이용한 차단량 추정식의 검증

(1) 벽면 부착형 우량계를 이용한 차단량 관측 방법

- 본 연구에서는 2018년 6월 26일부터 2019년 7월 28일까지 서울시 성북구 고려대학교 공학관에서 바람의 영향을 받는 강우를 관측하였음. 관측 장소인 서울시 성북구 고려대학교 공학관의 위도와 경도는 각각 $127^\circ 1' 31''$, $37^\circ 35' 1''$ 이며, 대한민국 상 위치는 그림 16과 같음

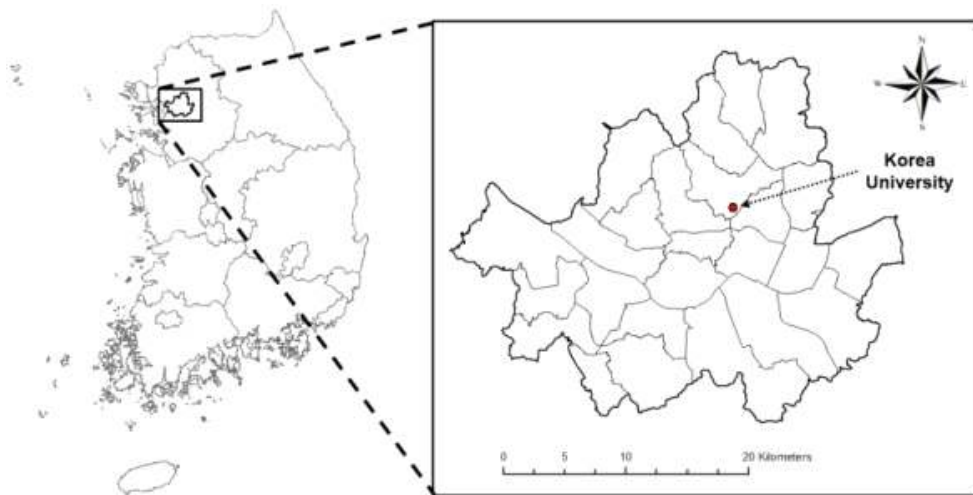


그림 16. WDR 관측 장소의 위치

- 관측 장소인 고려대학교 옥상에서 앞서 설계한 벽면 우량계를 이용하여 관측을 수행하였으며, 건물 모형과 함께 36개의 우량계가 관측에 쓰임. 아울러, 벽면 우량계 관측 결과와 비교할 일반 우량을 4개의 일반 우량계를 이용하여 관측하였음
- 4개의 일반 우량계는 동서남북 방향에 고정하여 사용함. 36개의 벽면 우량계는 건물 모형에 동서남북 방향별로 9개씩 부착하였으며, 관측 높이별로 세 개씩 배치함. 그림 17은 방향별 벽면 우량계를 배치

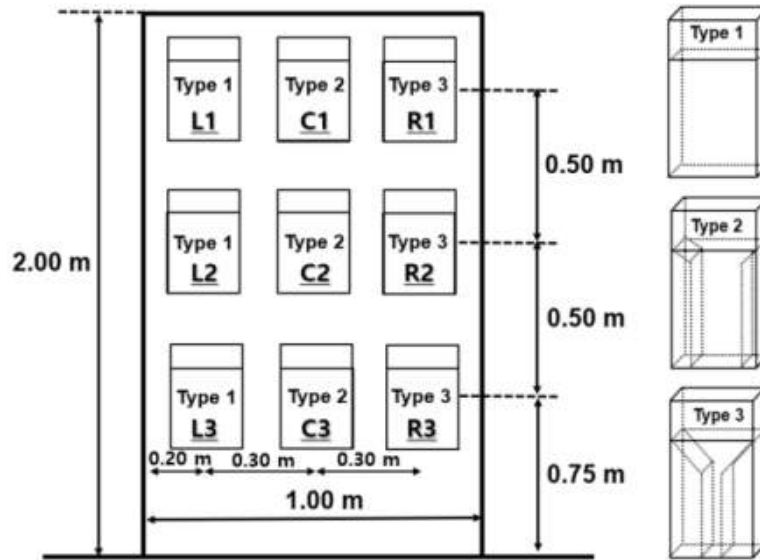


그림 17. 방향별 벽면 우량계의 종류 및 설치 위치

- 그림 17에서 Type은 우량계의 크기를 의미하며, Type 1, Type 2, Type 3 순으로 대형, 중형, 소형을 지칭함. 본 연구에서 이용한 건물 모형의 높이는 2 m, 폭은 1 m임. 그림 17에서 확인할 수 있듯이 우량계는 높이 0.75 m, 1.25 m, 1.75 m에 부착되었음
- 그림 18은 실제로 고려대학교 옥상에 설치된 건물 모형과 벽면 우량계의 모습을 사진으로 찍은 것임. 그림 18에서 벽면 우량계는 WDR gauge로, 일반 우량계는 Rain gauge로 표기되어 있음

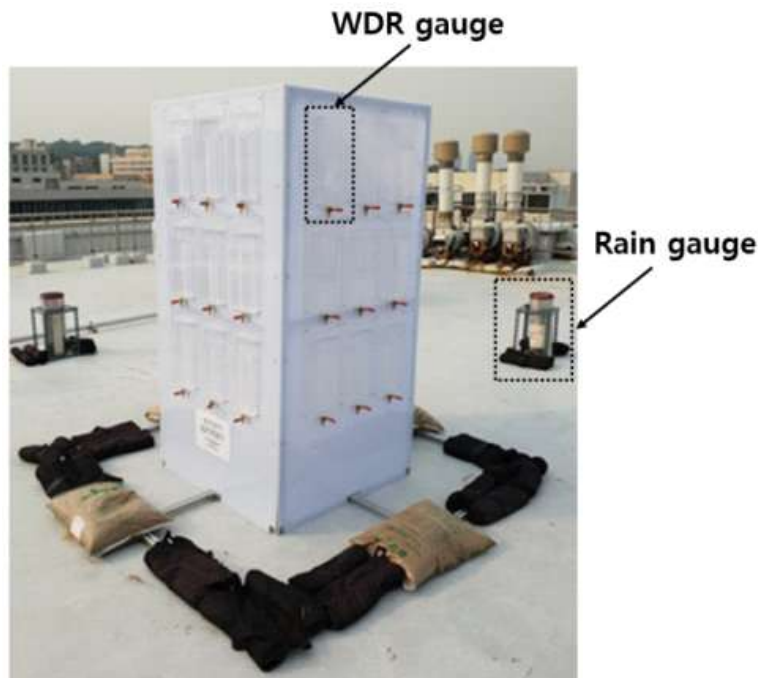


그림 18. 제작 완성되어 설치된 건물 모형, 벽면 우량계, 일반 우량계의 모습

(2) 차단량 추정식 적용 결과 및 차단량 관측 결과

- 2018년 6월 26일부터 2019년 7월 28일까지 매시간별로 36개의 우량계를 이용하여 관측을 수행함. 그 결과, 총 40개의 시 단위 강우 자료가 만들어졌음
- 아래 그림은 관측한 시 단위 강우자료를 막대 그래프로 나타낸 것임. 40개 시 단위 강우자료의 차단량을 관측해본 결과 아래 그래프와 같은 값을 얻을 수 있었음. 차단량의 평균은 3.2 mm/hr로 확인되

었으며, 표준편차는 2.9 mm/hr로 계산되었음

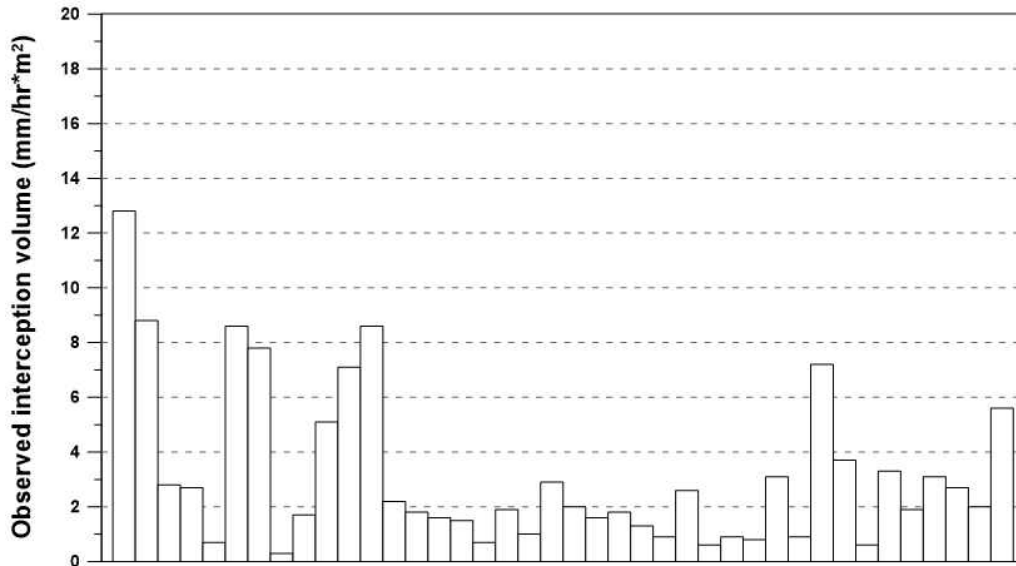


그림 19. 건물 모형과 벽면 우량계를 이용하여 관측한 차단량

- 이후 본 연구에서는 앞서 유도한 차단량 추정식을 이용하여 관측한 차단량과 같은 시점에서의 차단량을 추정함. 차단량 추정식에 이용할 풍속은 서울지점 종관기상관측장비(Automated Surface Observing System)의 시간 단위 풍속을 이용함. 그림 20은 차단량 추정에 이용된 풍속 자료에 대한 풍배도(wind rose)를 나타낸 것임

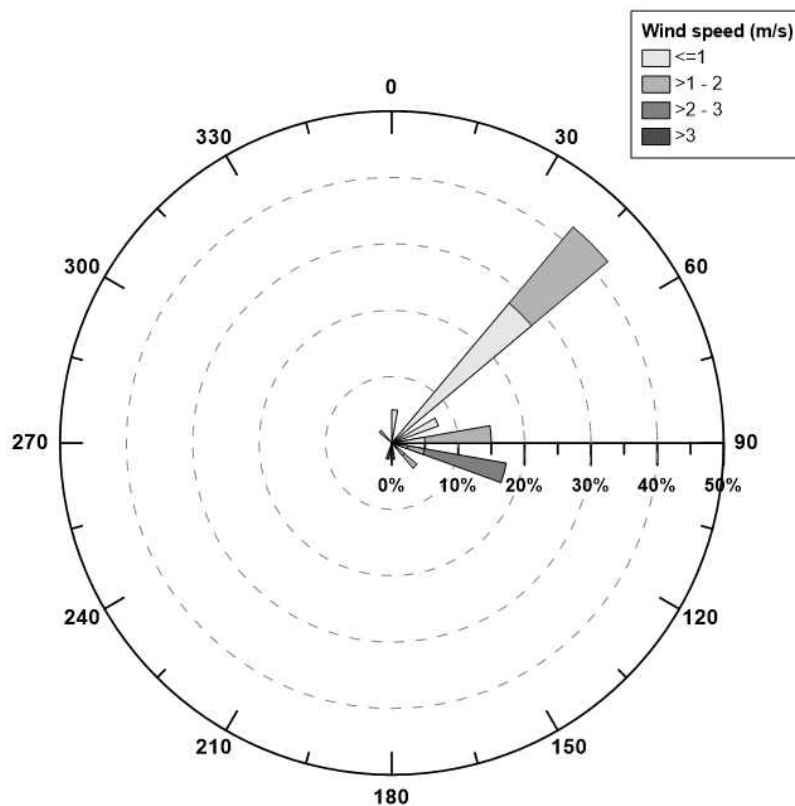


그림 20. 서울지점 종관기상관측장비로 관측된 시자료 40개에 대한 풍배도(wind rose)

- 풍배도 그림을 통해 자료의 풍속과 풍향의 분포가 어떤지 알 수 있음. 차단량 추정에 이용된 풍속 자료는 주로 북동쪽에서 불어오는 것을 확인할 수 있음. 아울러, 해당 자료의 풍속은 평균 1.3 m/s이며, 풍속 3.0 m/s 이상의 바람은 주로 동쪽에서 불어오는 것으로 나타났음

- 강우강도의 경우에는 차단량을 관측할 당시에 일반 우량계로 관측한 자료를 그대로 이용함. 차단량을 추정하기 위해 앞서 유도한 차단량 추정식(식 (7))을 이용함
- 아래 표는 45개 시 단위 강우자료에 대한 B, H, U, $R^{0.88}$ 을 정리하여 나타낸 것임. B는 건물 모형의 폭인 1.0 m, H는 건물 모형의 높이인 2.0 m임. 최종 추정값에 4를 추가로 곱하여 계산함. 이 과정에서 4를 추가로 곱한 이유는 그림 19에 나타난 관측 차단량이 건물 모형의 네 면에서 관측된 차단량을 모두 더한 값이기 때문임. 관측된 차단량은 $Q_{observed}$ 라 표시함

표 5. 실제 관측 자료에 대한 차단량 추정식 적용 결과

Case	B (m)	H (m)	U (m/s)	$R^{0.88}$ (mm/hr)	$Q_{estimated}$	$Q_{observed}$
1	1.0	2.0	1.4	11.47	14.3	12.8
2	1.0	2.0	1.2	11.72	12.5	8.8
3	1.0	2.0	0.7	2.80	1.7	2.8
4	1.0	2.0	0.6	6.04	3.2	2.7
5	1.0	2.0	3.4	0.75	2.3	0.7
6	1.0	2.0	5.0	2.95	13.1	8.6
7	1.0	2.0	0.7	8.66	5.4	7.8
8	1.0	2.0	0.9	1.70	1.4	0.3
9	1.0	2.0	0.9	3.43	2.7	1.7
10	1.0	2.0	0.5	11.17	5.0	5.1
11	1.0	2.0	1.2	8.92	9.5	7.1
12	1.0	2.0	1.2	6.26	6.7	8.6
13	1.0	2.0	1.1	3.31	3.2	2.2
14	1.0	2.0	0.7	1.51	0.9	1.8
15	1.0	2.0	0.7	4.65	2.9	1.6
16	1.0	2.0	1.1	0.82	0.8	1.5
17	1.0	2.0	0.4	2.53	0.9	0.7
18	1.0	2.0	1.3	3.37	3.9	1.9
19	1.0	2.0	1.3	5.99	6.9	1.0
20	1.0	2.0	1.3	3.25	3.8	2.9
21	1.0	2.0	1.3	2.95	3.4	2.0
22	1.0	2.0	1.3	3.01	3.5	1.6
23	1.0	2.0	1.3	4.30	5.0	1.8
24	1.0	2.0	0.8	3.07	2.2	1.3
25	1.0	2.0	0.8	2.77	2.0	0.9
26	1.0	2.0	0.8	2.28	1.6	2.6
27	1.0	2.0	0.8	3.72	2.6	0.6
28	1.0	2.0	0.8	3.35	2.4	0.9
29	1.0	2.0	0.8	1.64	1.2	0.8
30	1.0	2.0	0.8	0.75	0.5	3.1
31	1.0	2.0	0.8	1.70	1.2	0.9
32	1.0	2.0	0.6	3.43	1.8	7.2
33	1.0	2.0	0.5	7.34	3.3	3.7
34	1.0	2.0	2.6	0.82	1.9	0.6
35	1.0	2.0	2.6	0.89	2.1	3.3
36	1.0	2.0	2.6	0.75	1.7	1.9
37	1.0	2.0	2.6	3.25	7.5	3.1
38	1.0	2.0	2.6	4.07	9.4	2.7
39	1.0	2.0	0.8	0.96	0.7	2.0
40	1.0	2.0	1.5	5.54	7.4	5.6

(3) 차단량 추정값과 관측값의 비교

- 본 연구에서는 앞서 추정한 차단량과 관측한 차단량을 비교하기 위해 두 값을 이용하여 산점도를 그려보았음. 아래 그림에서 x 축은 자료의 추정 차단량을 나타내고, y 축은 관측된 차단량을 나타낸 것

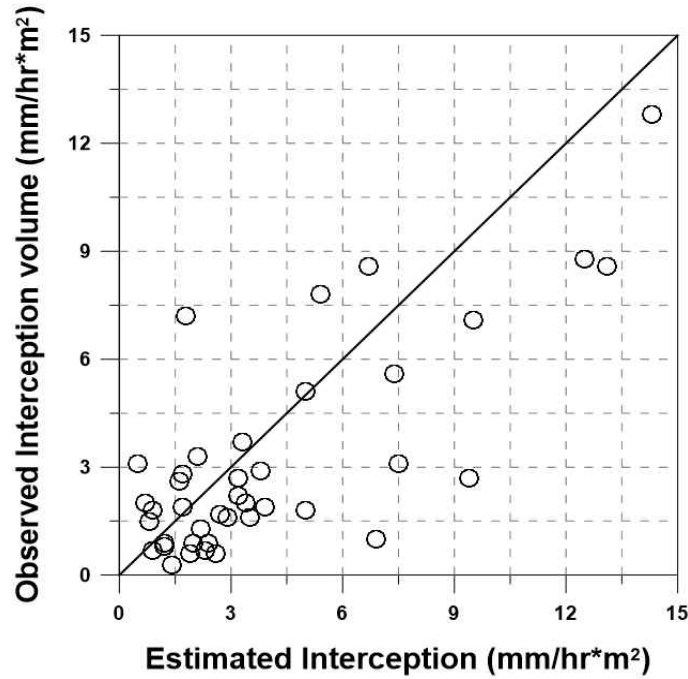


그림 21. 차단량 추정값과 관측값에 대한 산점도

- 위 그림을 자세히 보면, 차단량 추정값과 관측값에 대한 산점도가 $y = x$ 그래프에 완전히 밀집되어 있지는 않지만, 개략적으로 약한 선형 관계가 있는 것을 알 수 있음
- $y = x$ 식에 대해 차단량 추정값과 관측값의 RMSE는 $2.85 \text{ mm} \cdot \text{m}^2$ 로 계산되었으며, 상관계수는 0.70으로 계산되었음
- 차단량 추정식이 실험실에서 유도된 점을 감안하면, 위 그림에서 나타난 경향성이 차단량 추정식의 적용성을 충분히 검증할 수 있는 정도라 판단됨

1.2 초고층 건물 벽면에 의해 변화되는 유출 경로 파악

1.2.1 변화되는 유출 경로 추정 방법 개발

○ 초고층 건물로 인한 집중시간의 변화

- 본 연구에서는 강우가 초고층 건물의 옥상에서 지표까지 도달하는데 걸리는 시간을 소유역의 집중시간 산정에 고려함. 먼저, 건물의 영향을 고려하지 않는 경우에는 일반적으로 경험공식을 이용하여 집중시간을 산정하였음
- 이들 경험공식은 특정한 지역에서 측정된 한정된 자료를 사용하여 개발된 것이므로 적용 조건을 잘 파악하여야 함. SWMM 모형에서는 도시유역의 집중시간 산정에 식 (9)와 같이 운동파 공식(Kinematic wave formulation)을 사용함

$$t_c = \left(\frac{L}{a \cdot i^{m-1}} \right)^{1/m} \quad (9)$$

- 여기서 t_c 는 집중시간(min) i 는 강우강도(ft/sec)임. L 은 유역에서 가장 먼 지점에서부터 주유로의 시작점까지의 길이로 정의되지만, SWMM 모형의 적용 시에는 유역에서 가장 먼 지점에서부터 유역 출구까지의 길이(ft)가 사용됨
- a 와 m 은 운동파 매개변수로, m 은 5/3을, a 는 Manning 공식을 적용해 식 (10)와 같이 표현됨

$$a = (1.49/n)S^{1/2} \quad (10)$$

- 여기서 n 은 조도계수이고 S 는 유역 평균 경사임
- 강우는 건물의 발코니나 옥상 등에 내려 루프 드레인을 통해 우수 수직관으로 들어가 낙하함. 이때 흘러내리는 속도는 중력가속도를 받아 증가하나, 관 내벽 및 중심부 공기와의 마찰저항도 유속의 제곱에 비례하여 증대하므로 결국 둘 사이의 균형이 잡혀 거의 일정한 속도가 유지됨
- 이와 같이 관 내벽 및 공기와의 마찰저항과 평형이 되는 유속을 종단유속(terminal velocity)이라 하며, 주철관에서는 약 5~12 m/sec임
- 또 수직관에 유입한 후 종단유속에 도달하기까지의 흘러내린 길이를 종단길이(terminal length)라 하며, 관경, 배수량, 관 내벽의 조도계수 등에 따라 다르나 보통 3~6 m정도임
- Wyly and Eaton(1952)은 첫째 수직관내의 부분유수가 수륜을 만드는 충분한 유량일 것, 둘째 유입구의 초기속도는 0일 것, 셋째 실험의 주철관일 것 등을 조건으로 하여 Manning의 공식과 형식을 맞추어 만든 실험식을 제안함
- Wyly and Eaton(1952)의 식을 간단하게 정리하여 나타내면 식 (11)과 같음

$$v_t = 16.2 \left(\frac{Q_1}{d_1} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (11)$$

- 위 식에서 v_t 는 종단속도(m/sec), Q_1 은 관내의 유량(feet³/sec), d_1 은 관의 지름(m)임
- 본 연구에서는 위 식을 이용하여 강우의 종단 속도를 산정하고, 초고층 건물의 우수 수직관에서의 낙하시간을 결정함. 낙하시간 산정에 필요한 관경은 환경부에서 제안한 허용 최대 지붕면적별 관경값을 이용함(ME, 2015).

○ SWMM 모형에서 초고층 건물을 고려하는 방법

- SWMM 모형에 초고층 건물을 반영하기 위해서는 초고층 건물에 의한 지표수 흐름의 시간 지체를 고려해 주어야 함. 지표수 흐름의 시간 지체는 강우가 우수 수직관을 통해 지표면으로 유출되기까지의 시간을 의미함
- SWMM 모형에서 흐름의 시간 지체를 반영할 수 있는 방법은 유역 정보를 수정하는 것임. 유역정보 중 시간 지체를 고려하기 위해 조정할 수 있는 인자는 조도계수, 유역 경사, 유역폭임
- 조도계수를 이용하는 방법은 건물의 영역에 조도계수 등과 같은 저항계수의 값을 다른 영역에 비해 높게 설정하여 지표수의 흐름을 지체시키는 방법임. SWMM에서는 입력자료로 평균 조도계수를 사용하기 때문에 건물만 따로 조도계수를 설정할 수 없음
- 따라서 건물에 높은 조도계수를 설정하려면 건물 자체로 유역을 설정해야 되기 때문에 자료의 구축에 상당한 시간이 필요하게 되는 단점과 건물의 형상을 정확하게 반영하기 어려운 점이 있음
- 유역 경사를 이용하는 방법은 지표수 흐름을 지체시키기 위해 유역의 경사를 낮추어 주는 방법임. 유역의 경사가 높을수록 유출속도가 빨라지고 경사가 낮을수록 유출속도가 느려짐. 따라서 유역의 경사를 조절하여 지표수 흐름을 지체시킬 수 있음
- 실험 논문의 대상유역은 경사가 낮은 경사로 이루어져 있음. 지표수 흐름을 지체시킬 정도로 경사를 더 낮추기엔 경사가 어느 정도 낮은 상태여서 지체시키기 어려움
- 유역폭은 사용자의 주관적인 유역 분할 방법이나 유역폭 산정 방법에 따라 많은 차이를 보임. 이로 인해 유역폭은 다른 유역 정보보다 쉽게 접근하여 수정할 수 있음. 또한 SWMM 모형의 매뉴얼에서도 다른 유역 인자보다 유역폭의 수정을 통한 유출형태를 조절하는 것을 추천하고 있음(Huber and Dickinson, 1988)
- 유역 경사 등은 지형자료 및 다양한 GIS(Geographic Information System) 도구를 이용하여 비교적 객관적으로 산정이 가능함. 조도계수 등은 실제 유역 답사나 기존의 경험값을 이용하여 추정 가능하다는 면이 있기 때문에 유역폭을 수정하는 방법이 다른 방법보다 주로 이용됨
- 본 연구에서는 이 세 가지 방법 중 유역폭을 수정하는 방법으로 초고층 건물의 영향을 유출해석에 반영하고자 함. 유역폭을 수정하는 방법은 다음과 같음. 먼저, 건물을 고려하지 않은 유역의 집중시간과 유역 최원점에서 유역출구까지 거리를 고려하여 유속을 계산함

- 계산된 유속을 유역의 집중시간과 건물에서의 낙하시간을 합한 값에 곱하여 거리를 계산함. 마지막으로, 계산된 거리를 유역의 면적으로 나누어 유역폭을 산정함. 즉, 고층건물을 고려할 경우 유역의 형태는 폭이 작아진 길쭉한 형태로 바뀌게 됨

1.2.2 실험을 통한 추정 방법 검증

○ Isidoro et al.(2012)의 실험 연구

- Isidoro et al.(2012)은 고층 빌딩이 있는 고밀도 도시화 지역을 1:100 크기의 모형으로 제작하고, 그 위에 부착된 강우발생 장치를 이용하여 유출실험을 수행하였음
- 모형의 크기는 가로 2 m, 세로 2 m로 면적이 4 m²임. 모형은 유역출구방향으로 10%, 이에 직각인 방향으로 양쪽 각 2.5%임(그림 22(a)). 모형의 바닥은 MDF(Medium Density Fibreboard)로 제작하였으며 방수 코팅을 하였음
- 유역 내 배수는 지름이 15 mm인 반원형 개수로를 통해 이루어짐. 강우강도는 120 mm/hr이고 강우의 지속시간은 55초임. 유량 측정은 원통형 저장 장치를 이용하여 1초 간격으로 수행함
- Isidoro et al.(2012)의 연구에서 설명하는 건물의 높이는 약 20층임. 층당 높이 4 m를 고려하여 모형에서는 높이 0.8 m로 제작됨. 실험에서는 고려한 모든 건물의 높이는 같은 것으로 가정함. 그림 22(b)는 실험 과정에서 고려한 유역과 건물 밀도에 따른 건물의 위치를 나타낸 것임

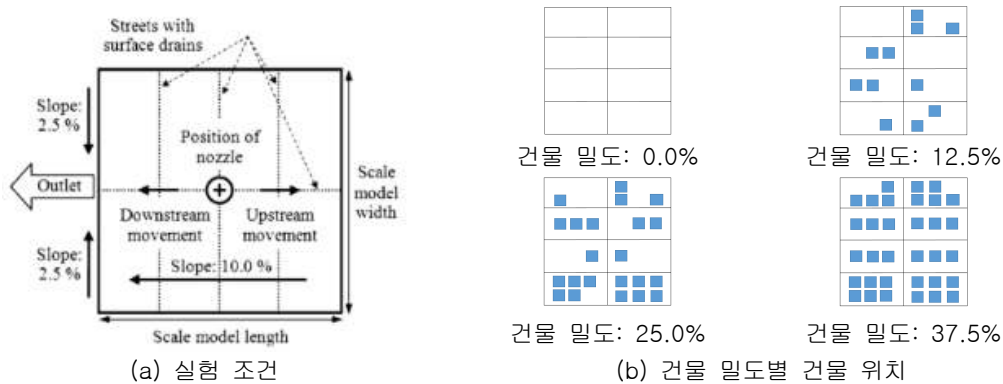


그림 22. 실험 조건 및 건물 밀도에 따른 건물의 위치

(Isidoro et al., 2012)

○ SWMM 모형의 기본 구조

- SWMM 모형은 그림 23과 같이 5개의 Service Block과 Executive block, 그리고 4개의 Computational Block로 구성되었으며 126개의 Subroutine들을 포함하고 있음
- 실제로 모형 결과를 도출하는 부분은 Computational Block들임. 개발초기에는 RECEIV Block을 포함하여 6개의 Computational Block들이 있었으나, 1981년 이후 RECEIV Block은 SWMM 모형에서 제외되었음(Huber and Dickinson, 1988)
- Computational Block 중 RUNOFF Block은 유출을 산정하는데 사용되고, TRANSPORT Block은 하수도 내 수질을 모의함. Extran Block은 하도의 수리 수문을 정밀하게 표현 하는데 사용되고 STORAGE/TREATMENT Block은 결과와 처리를 담당함

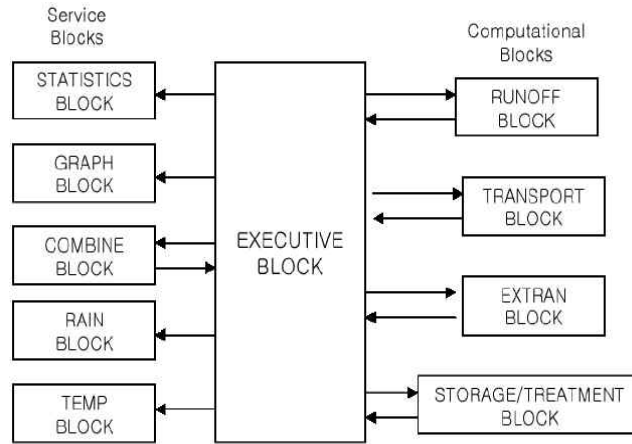


그림 23. SWMM 모형의 기본 구조 (Huber and Dickinson, 1988)

- SWMM 모형은 실제 유역을 그림 24와 같이 직사각형 모양으로 표현함으로써 실제 유역의 모든 기하학적 특성(geometrical properties)을 몇 개의 매개변수로 표현하고, 유역의 고유 모양은 고려되지 않음
- 또한, 각각의 소유역은 유역의 서로 다른 지표면 특성을 나타내기 위하여 그림 24와 같이 불투수 유역 A1, A3와 투수 유역 A2로 총 3개의 세부유역으로 표현됨
- 이때 A1에는 지면 저류(depression storage)가 있으며 A3에는 지면 저류가 없음. 각 세부유역의 흐름은 측구(gutter)나 관(pipe), 유입구(inlet)로 바로 흐르게 됨. 즉, 특정 세부유역의 흐름이 다른 세부유역을 따라 흐르지 않는 것으로 가정함

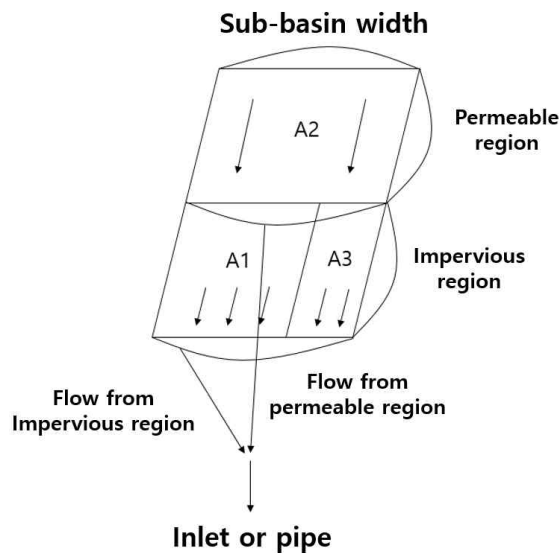


그림 24. SWMM 모형에서의 소유역 구조

○ SWMM 모형을 이용한 유출해석

- SWMM 모형을 이용한 유출해석에 필요한 입력자료는 유역폭, 유역평균경사, 유역면적, 조도계수 등이 있음. 유역은 똑같은 크기의 총 8개의 소유역으로 분할함. 이는 유역의 관로를 기준으로 분할한 것임. 총 유역 면적은 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 로 4 m^2 이고 각 소유역의 면적은 각각 가로 1 m , 세로 0.5 m 로 0.5 m^2 임
- 유역폭은 소유역에서 관로가 유역의 측면에 위치하고 있기에 유역폭 산정 방법 중 유역의 주 관로가 유역의 측면에 위치했을 경우 유역폭을 산정하는 방법을 사용함
- 유역 폭은 1 m 이며, 유역 경사는 그림 22(a)에서 확인할 수 있는 것과 같이, 유역의 가로 측 경사는 2.5% , 세로 측 경사는 10.0% 임. 소유역 평균경사의 산정을 위해 Fleming and Hoffer(1979)의 방법을 사용함. 최종적으로 산정된 평균 경사는 4.4% 임

- 침투에 의한 손실량 산정에는 CN 방법을 적용함. 대상 유역은 AMC-II 조건으로 가정하여 전체 다 불투수 유역으로 CN 값은 98로 가정함. 대상 유역은 실험에서 사용된 MDF에 방수 코팅한 것을 감안하여 전체를 불투수 지역으로 가정하고 조도계수로는 Hjelmfelt(1986)가 제안한 시가화 지역의 조도계수인 0.1과 Vieux(2004)가 제안한 시가화 지역의 조도계수인 0.015를 평균한 값인 0.057로 가정함
- 불투수 지역 지면저류는 Isidoro et al.(2012)이 실험 유역을 방수 코팅하였다는 것을 따라 0으로 가정함. 강우강도와 지속시간은 실험과 동일하게 조건을 주어 120 mm/hr와 55초로 하였음. 8개의 소유역의 입력자료는 모두 동일하게 입력함. 소유역 입력자료를 표로 정리하면 아래와 같음

표 6. SWMM 모형에서의 소유역 입력 자료

소유역 면적 (m ²)	유역폭 (m)	평균 경사 (%)	조도계수	지면저류 (mm)	CN
0.5	1.0	4.4	0.057	0	98

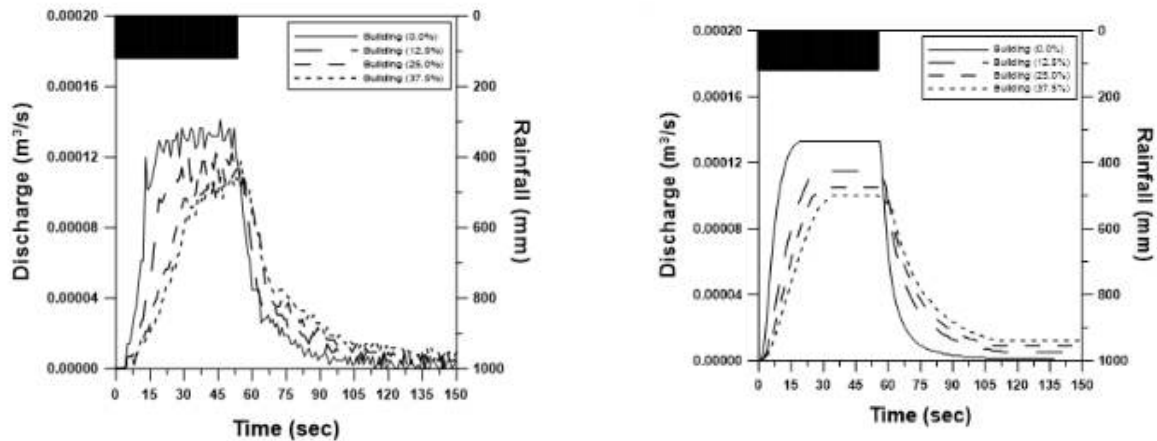
- 노드와 링크는 Isidoro et al.(2012)에 의해 정리된 내용으로 모의한 실험 장치와 동일하게 입력하였음. 노드의 높이는 유역의 경사가 10%인 것을 감안하여 유역 출구의 높이를 0으로 기준 잡아 0.05 m씩 높아지게 입력함. 노드의 최대 깊이는 실험에서 사용한 관의 반지름으로 함. 관의 길이는 소유역의 세로 길이인 0.5 m로 하였음. 관의 조도계수는 Isidoro et al.(2012)을 참고하여 유역의 조도계수와 같은 값인 0.057을 모든 관에 균일하게 적용함
- 각 소유역들의 집중시간은 앞서 설명한 SWMM 모형에서 집중시간을 산정할 때 사용하는 운동파 공식인 식 (9)와 식 (10)을 통해 산정함. 가로 1 m, 세로 0.5 m인 직사각형 모양의 소유역에서 지표면 거리 L 은 대각선 길이인 1.118 m로 가정함. n 은 0.057 그리고 강우강도로는 논문에서 사용한 120 mm/hr를 사용함. 소유역의 집중시간을 계산한 결과 14.89 sec로 산정됨
- 건물의 총 높이는 0.8 m로 가정하였음. 아울러 건물 지붕에 떨어진 강우는 건물 지붕에 흘러 우수수직관을 통해 낙하하는 것으로 가정함. 이들 경로를 따라 이동하는 강우의 이동 시간은 다음과 같이 계산함
- 먼저, 지붕의 경우 건물이 없을 시 지표면에서의 흐름과 같다고 가정하여 고려하지 않았음. 우수 수직관의 경우는 앞서 설명한 바와 같이 우수수직관을 통해 낙하하는 시간으로, 식 (11)를 이용하여 산정함. 이때 Q_1 은 합리식을 통해 결정하였고, 유출계수는 아스팔트의 0.9를 사용하였음. 관경은 50 mm로 가정함. 결과적으로 낙하속도는 0.27 m/sec로 결정하였으며, 0.8 m 높이의 건물에서의 낙하시간은 2.9 sec로 계산됨
- 본 연구에서는 앞서 산정한 소유역별 집중시간과 건물 지붕에서의 낙하시간을 추가로 고려하여 유역폭의 길이를 다시 산정하였음. 건물의 밀도에 따라 CASE A, B, C, D로 나눈 다음 각 소유역의 수정된 유역폭을 구하여 다음 표 7로 나타냄

표 7. 건물 높이와 밀도를 고려하여 수정한 소유역의 유역폭

		Total area of building (m ²)				Basin width (m)			
Building density		0.0% (CASE A)	12.5% (CASE A)	25.0% (CASE A)	37.5% (CASE A)	0.0% (CASE A)	12.5% (CASE A)	25.0% (CASE A)	37.5% (CASE A)
Sub-basin number	1	0.0000	0.0000	0.0625	0.2500	1.0000	1.0000	0.4898	0.4794
	2	0.0000	0.1875	0.1875	0.3125	1.0000	0.4847	0.4847	0.4726
	3	0.0000	0.1250	0.1875	0.1875	1.0000	0.4881	0.4847	0.4847
	4	0.0000	0.0000	0.1250	0.1875	1.0000	1.0000	0.4881	0.4847
	5	0.0000	0.1250	0.0625	0.1875	1.0000	0.4881	0.4898	0.4847
	6	0.0000	0.0625	0.0625	0.1875	1.0000	0.4898	0.4898	0.4847
	7	0.0000	0.0625	0.3125	0.3750	1.0000	0.4898	0.4726	0.4641
	8	0.0000	0.1250	0.3750	0.3750	1.0000	0.4881	0.4641	0.4641

○ 유출해석 결과와 실험결과와의 비교 검증

- 유역폭 수정을 통해 건물을 고려하는 방법을 검증하기 위해서 Isidoro et al.(2012)의 결과와 SWMM 모형의 결과를 비교함. 그림 25의 그래프에서 x-축은 시간(sec)을, y-축은 유출량(m^3/sec)을 나타냄. 두 개의 그래프 중 왼쪽은 실험결과의 그래프이고 오른쪽은 SWMM 모형으로 모의한 그래프임



(a) 실험 결과

(b) SWMM 모의 결과

그림 25. SWMM 모형의 모의 유출수문곡선과 실험 유출수문곡선의 비교

- 두 그래프를 비교해보면 SWMM 모형을 이용한 유출해석 결과가 실험결과와 매우 유사함을 판단할 수 있음. 건물의 밀도가 높을수록 더 느린 유출반응을 보인다는 점도 동일하게 나타남
- 또한 유출수문곡선의 기울기가 건물의 밀도가 높아짐에 따라 낮아지는 것도 확인할 수 있었음. 이는 건물의 밀도가 높으면 건물 지붕에 떨어지는 강우가 많아지고, 이에 따라 건물의 영향을 받는 강우 입자 수가 많아지기 때문임
- 유출수문곡선의 꼬리 부분이 길어지는 것도 유역에서의 흐름 경로가 길어지기 때문임. SWMM 모형의 적용을 통해 얻은 첨두유량, 첨두유량 발생시간, 총 유출량 그리고 강우총량을 실험결과와 비교하면 다음 표 8과 같음
- 표 8에서 SWMM 모의결과 아래 괄호에 있는 수치는 실험결과에 대한 모의결과의 비율을 백분율로 나타낸 것임

표 8. SWMM 모형의 모의 유출수문곡선과 실험 유출수문곡선의 특성

	Experiment result				SWMM simulation result			
CASE	A	B	C	D	A	B	C	D
Peak discharge ($10^{-3}m^3/s$)	0.141	0.122	0.113	0.118	0.133 (94.3%)	0.115 (94.3%)	0.105 (92.9%)	0.100 (84.7%)
Time of peak discharge (sec)	19	26	31	43	19 (100.0%)	27 (103.8%)	32 (103.2%)	36 (83.7%)
Total discharge amount ($10^{-3}m^3$)	7.30	6.80	6.60	7.00	7.33 (100.4%)	7.33 (107.8%)	7.33 (111.1%)	7.33 (104.7%)
Total rainfall amount ($10^{-3}m^3$)	7.33	7.33	7.33	7.33	7.33 (100.0%)	7.33 (100.0%)	7.33 (100.0%)	7.33 (100.0%)

- 표 8에 나타난 결과를 보면 모의 결과와 실험결과에서 모두 건물 밀도가 증가할수록 첨두유량이 점점 감소하고, 첨두시간은 늘어난다는 것을 확인할 수 있음. 특히, 실험결과와 SWMM 모형 모의결과에서 첨두시간은 거의 일치하는 것으로 나타남
- SWMM 모형으로 모의한 수문곡선의 첨두유량이 실험결과의 첨두유량보다 작은 것은 실험의 관측치가 변동성을 가지고 있어 위로 약간 튀었기 때문으로 판단됨. 총 유출량의 경우에도 두 모형이 유사하게

나타났으며, SWMM 모형의 모의 결과에서는 물수지(water balance)가 정확히 맞고, 실험결과에서는 관측 오차 등의 원인으로 약간의 차이가 있는 것으로 파악됨

- 전체적으로 실험결과와 SWMM 모의 결과는 매우 유사한 것으로 파악되었으며, 이를 통해 본 연구에서 제안한 초고층 건물을 고려한 유출 모의 방법은 적절한 것으로 판단할 수 있음

2. 초고층 건물을 고려한 강우-유출 해석 및 수재해 취약성 평가

2.1 초고층 건물로 인한 강우-유출 과정의 왜곡 정도 평가

2.1.1 초고층 건물로 인한 강우-유출 과정 왜곡 평가 이론

○ 초고층 건물로 인한 유출경로 왜곡

- 초고층 건물이 존재하는 도시 유역에서는 기존 저층 건물 위주의 도시유역과는 다른 수문 특성을 보이게 됨. 먼저, 차단이라는 현상이 다른 형태로 발휘되게 됨
- 기본적으로 연직방향으로의 강우 차단과 수평방향으로의 강우 차단이 다르다는 점에 주목할 필요가 있음. 연직방향의 차단은 주로 유출을 가로막는 역할로서의 차단이며, 식생이나 지표면의 다양한 구조물로 인해 발생함. 그러나 수평방향의 차단은 오히려 지나가는 강우를 intercept 하여 유출량을 증가시키는 방향으로 역할하게 됨. 따라서 건물의 높이 및 벽면의 면적이 이러한 수평방향 차단을 결정하는 중요한 인자가 된다.
- 아울러, 초고층 건물은 도시유역에서 유출 경로를 복잡하게 바꾸는 역할을 함. 이 경우에도 초고층 건물의 규모와 건물 밀도에 따라 유출 경로를 왜곡하는 정도가 다르게 나타남. 따라서 도시유역의 수문 순환에 대한 해석과 강우-유출 모의를 위해서는 초고층 건물에 의해 왜곡되는 유출경로 문제를 파악하는 것이 필요함
- 기존 일반 도시유역에서의 강우-유출해석은 유역의 지면에 내리는 강우를 2차원적으로 고려할 수 있음(그림 26(a)). 반면에 도시유역에서는 건물로 인해 유출 흐름이 3차원으로 확장됨. 차단된 강우가 건물의 지붕에서 벽면을 타고 흘러 수직적 유출 흐름으로 이어짐(그림 26(b))

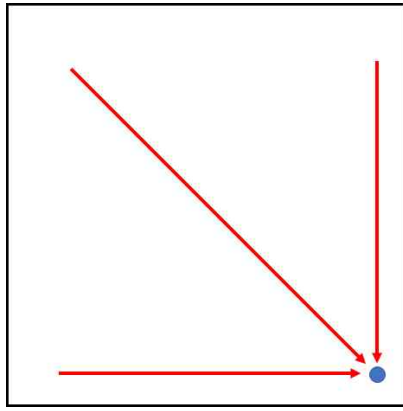


(a) 일반 도시유역에서의 강우

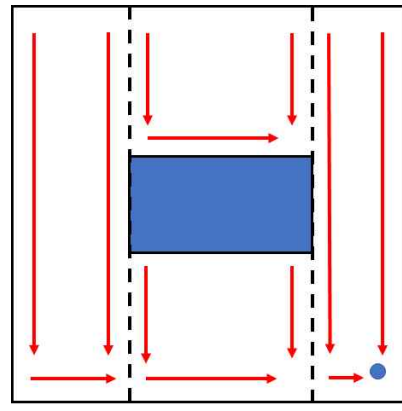
(b) 초고층 도시유역에서의 강우

그림 26. 일반 도시유역과 초고층 도시유역에서의 강우 흐름

- 초고층 건물로 인한 유출경로의 왜곡에는 수평적 왜곡과 수직적 왜곡이 있음. 즉, 초고층 도시유역에 대한 강우-유출 해석 시 초고층 건물로 인해 왜곡되는 수평적 유출 흐름과 추가되는 수직적 유출 흐름을 함께 고려해야 함
- 먼저, 수평적 유출경로의 왜곡은 초고층 건물이 유출 경로를 방해하기 때문에 발생함. 기존 일반 도시유역의 유출경로 중 일부를 초고층 건물이 방해함으로써 완전히 다른 유출경로가 만들어짐. 그림 27(a)은 기존 도시유역의 유출경로를 나타낸 것이며, 유역 출구 쪽으로 흐름이 집중되는 형태임. 초고층 도시유역의 경우, 건물이 기존 유출경로를 방해하므로 건물의 주변에서 유출경로가 왜곡됨. 그림 27(b)은 초고층 건물이 수평적 유출 흐름을 왜곡하는 일례를 보여주고 있음



(a) 기존 도시구역에서의 유출경로 예시



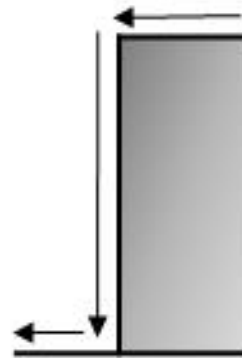
(b) 초고층 도시구역에서 왜곡되는 수평적 유출경로 예시

그림 27. 기존 도시구역과 초고층 도시구역에서의 유출경로 비교

- 다음으로, 연직방향의 유출경로가 추가됨. 초고층 건물에 의해 차단되는 경우는 3차원적인 유출 경로를 따라 움직이게 됨. 기존 일반 도시구역에서의 흐름(그림 28(a))과 달리 초고층 도시구역의 경우(그림 28(b)), 건물의 벽면과 지붕에 차단되는 경우에 의한 유출을 고려해야 하므로 기존 도시구역의 유출과 다른 수직적 유출 성분이 추가됨



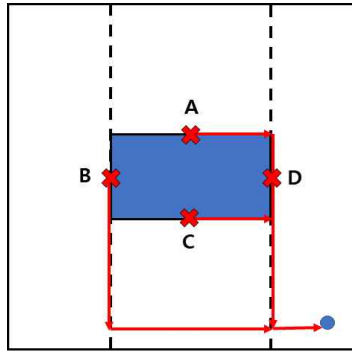
(a) 일반 도시구역에서의 유출경로



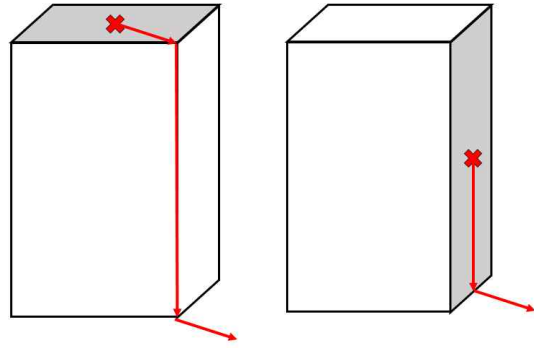
(b) 초고층 도시구역에서 추가되는 수직적 유출경로

그림 28. 도시구역과 초고층 도시구역에서의 유출 흐름

- 예컨대 그림 29(a)와 같이 기존 도시구역의 중앙부에 초고층 건물이 들어서는 경우, 초고층 건물에 의해 차단되는 수직적 유출은 지면을 거쳐 유역출구까지 도달함. 건물의 지붕과 벽면에서 내려오는 유출은 지면의 한 지점으로 집중된다고 가정되며, 이 과정에서 수직적 유출이 추가로 고려될 수 있음. 그림 29(a)의 “X”는 각 벽면에서 지면에 도달하게 되는 지점(A~D)을 나타낸 것임. 또한, 건물의 지붕과 벽면에서 발생하는 유출에 대한 경로는 그림 29(b)와 같음
- 건물의 지붕에 의해 차단되는 경우에 대한 유출은 풍향에 영향을 받게 됨. 만약 그림 29(a)에 나타난 유역에서 A→C 방향으로 바람이 불고 있다면, 지붕에서의 유출은 C 지점을 통해 지면에 도달하여 최종적으로 유역출구에 도달하게 됨
- 바람이 사선으로 불 때에는 바람의 영향은 1개의 벽면에 아닌 2개의 벽면에 미치게 됨. 두 개의 면에서 받는 바람의 영향은 한 면에 대한 영향으로 변환하여 고려할 수 있으며, 결국 이 경우에 바람의 방향에 관계없이 고려해야 할 초고층 건물의 요소는 지붕 1개와 벽면 1개가 됨



(a) 초고층 도시구역에서 추가되는 수직적
유출경로



(b) 초고층 건물 지붕과 벽면에서의 유출
경로

그림 29. 도시구역과 초고층 도시구역에서의 유출 흐름

○ 유출경로 왜곡을 고려한 소유역 분할

- 초고층 도시구역의 강우-유출 모의 시 수평적 수직적 유출경로의 왜곡을 고려하려면 초고층 도시유역을 여러 개의 소유역으로 분할하는 과정이 필요함. 또한, 초고층 건물의 차단에 의한 유출량을 고려하려면 건물의 벽면과 지붕도 일부 소유역으로 간주되어 도시유역에 포함되어야 함
- 초고층 도시구역의 경우, 초고층 건물로 인해 유출특성이 변화하므로 건물의 주변을 중심으로 여러 개의 소유역으로 분할되어 나타나며(그림 30), 각 소유역의 유출경로 및 특성이 모두 다름. 예컨대 그림 30과 같이 1개의 초고층 건물이 있는 상태에서는 도시유역이 5개의 소유역으로 분할됨
- 초고층 건물에 대한 소유역(그림 30의 ①)은 다시 건물의 특성을 포함하는 더 작은 소유역 ①-1~①-5로 분할됨. 그리고 이 소유역들의 유출특성은 건물의 높이와 폭에 따라 결정됨

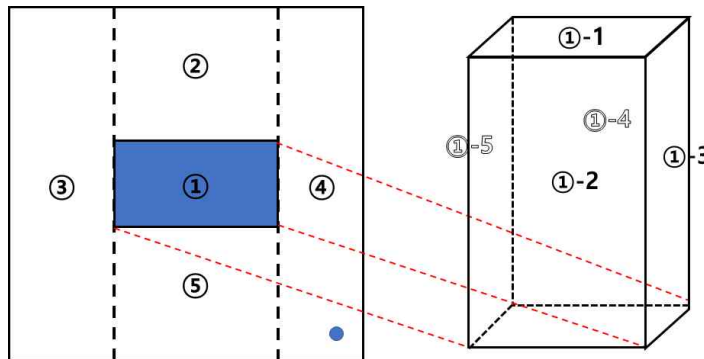
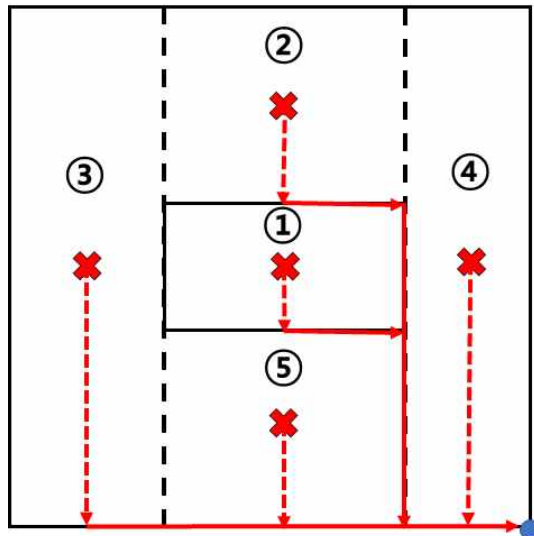
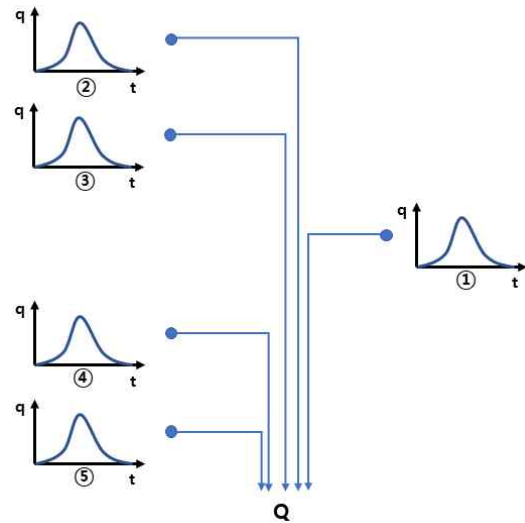


그림 30. 초고층 도시구역의 소유역 분할

- 기존 도시구역의 소유역 분할은 여러 방법으로 나타낼 수 있으며, 각 소유역마다 다른 유출경로와 특성을 가짐. 명확한 유출경로를 알 수 없는 경우, 유출경로에 대한 가정이 필요함. 그림 31(a)은 분할된 소유역에 대한 유출경로의 한 예시를 나타낸 것임. 그림 31(b)은 각 소유역별로 유역출구까지 도달하는 유출의 전이 형태를 나타낸 것임. 각 소유역별 유출은 유역출구까지 각기 다른 독립적인 경로로 이동하며, 최종적으로는 유역출구에서 선형적으로 결합됨



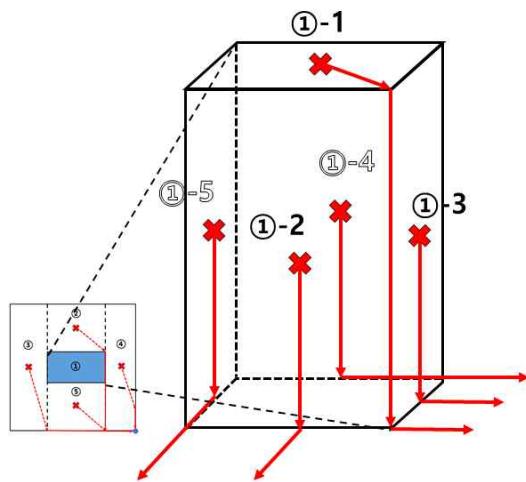
(a) 각 소유역에 대한 유출 경로 예시



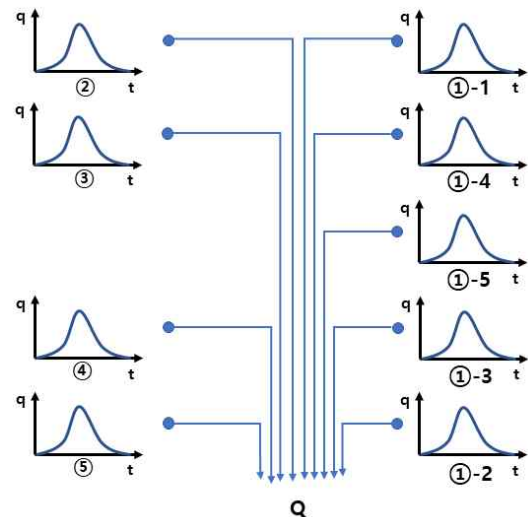
(b) 각 소유역의 유출 전이 형태

그림 31. 기존 도시구역에서의 유출경로

- 그림 32(a)는 초고층 도시구역의 소유역 분할 및 유출 경로 예시를 나타낸 것임. 먼저, 지표면 구역이 기존 도시구역과 마찬가지로 ①~⑤까지 5개의 소유역으로 분할된다는 점은 동일함. 다른 점은 초고층 건물이 들어선 소유역 ①에 초고층 건물로 인해 추가되는 소유역 ①-1~①-5가 추가로 고려된다는 점임. 벽면 ①-2~①-5를 통해 발생하는 유출은 앞서 초고층 건물의 유출경로를 표시한 그림 29(a)의 “X”지점으로 지면에 도달하게 됨. 그리고 지붕 ①-1에서 차단되는 강우는 바람의 영향에 의해 유출지점이 결정되고, 벽면을 통해 지면으로 도달하여 유역출구까지 도달하게 됨. 각 소유역의 유출응답은 유역출구까지 독립적으로 전이된 후 결합됨(그림 32(b))



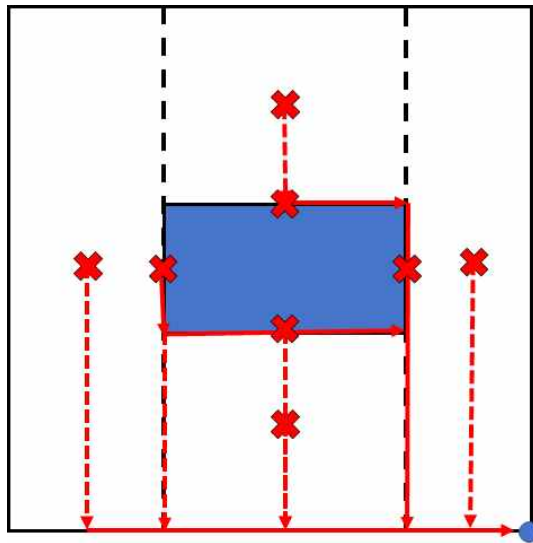
(a) 각 소유역에 대한 유출 경로 예시



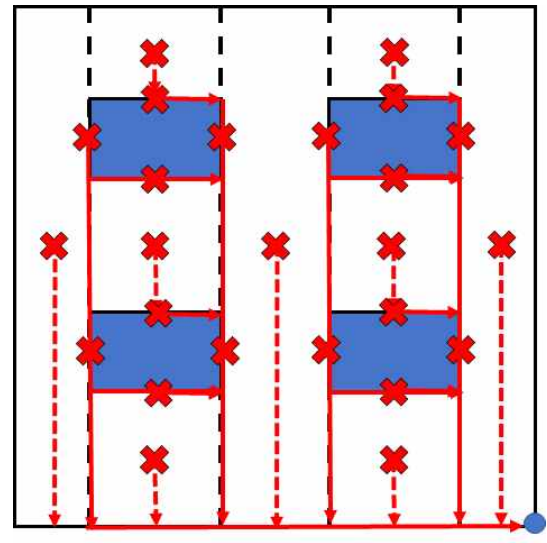
(b) 각 소유역의 유출 전이 형태

그림 32. 초고층 도시구역에서의 유출경로

- 초고층 건물의 밀도가 커질수록 더 많은 소유역으로 분리될 수 있음. 즉, 유역에서 초고층 건물이 차지하고 있는 면적의 비율이 커지면 구역이 더 많은 개수의 소유역으로 분할됨. 건물이 여러 개 들어선 복잡한 도시구역의 경우, 강우-유출 모형을 통한 모의를 위해 적절한 소유역 분할이 필요함
- 그림 33(a)은 도시구역에 초고층 건물이 1개 위치하는 경우이고, 그림 33(b)은 건물이 4개 위치하는 경우임. 그림에서 알 수 있듯이 건물의 개수가 많을수록 소유역의 개수도 많아지는 반면 소유역의 크기는 전체적으로 작아지게 됨. 이에 따라 유출 경로도 더욱 많아지고, 다양해짐. 이와 같은 과정에 따라 초고층 건물이 존재하는 다양한 형태의 도시구역에 대한 소유역 분할이 가능함



(a) 초고층 건물 1개 구역 분할 예시



(b) 초고층 건물 4개 구역 분할 예시

그림 33. 초고층 건물 개수에 따른 구역 분할 및 유출 경로 파악

○ 유출경로 왜곡을 고려한 소유역별 도달시간 산정

- 유출의 수평적, 수직적 경로 왜곡은 구역 도달시간의 증가로 이어짐. 정확도 높은 강우-유출 모의를 위해서는 소유역별로 도달시간을 적절히 결정하는 것이 중요함
- 초고층 건물로 인해 수평적 유출경로가 왜곡되어 건물을 우회하는 경로로 유출이 발생하므로 도달시간은 더 길어짐. 건물 벽면과 지붕에 의해 차단되는 수직적 유출은 흐름 경로가 더 길어지게 되므로 도달시간 또한 증가함. 아울러 건물의 높이와 재질에 따라 강우가 지면까지 도달하는데 걸리는 시간이 달라짐
- 일반 도시구역에서 도달시간을 산정하는 대표적인 경험공식은 Kirpich, Rziha, Kraven (I), Kraven (II), Kerby, 공식 등등이 있음. 이러한 도달시간 경험공식은 특정한 지역에서 측정된 한정된 자료를 이용하여 개발된 것이므로 적용 조건을 잘 파악해야 함
- 실제로 바람에 의해 영향받는 면은 5개의 면이 아니라 지붕과 벽면 2개의 면임. 이때 직육면체 형태 건물의 경우에 벽면으로는 바람이 사선으로 부는 경우를 고려하여 맞닿은 두 면을 평균하여 강우-유출모의에 이용하였음. 또한, 벽면 4개에 대한 유출경로도 하나의 경로로 평균하여 결합하였음. 즉, 초고층 건물 소유역에 대한 도달시간은 아래의 식 (12)를 통해 산정할 수 있음

$$t_{roof} = t_{roof-side wall} + t_{side wall} + t_{ground}$$

$$t_{side wall} = \frac{t_{1-2} + t_{1-3} + t_{1-4} + t_{1-5}}{4} \quad (12)$$

- 여기서 $t_{1-2} \sim t_{1-5}$ 는 그림 32의 각 벽면(①-2~①-5)에서 유역출구까지의 도달시간을 의미함

(1) 지붕 소유역

- 지붕 소유역의 도달시간 t_{roof} 는 지붕에서 벽면 관거로 강우가 모이는 시간($t_{roof-side wall}$), 벽면 관거를 통해 지면으로 이동하는 시간($t_{side wall}$), 지면에서 유역출구까지 도달하는 시간(t_{ground})으로 나뉨
- 먼저, $t_{roof-side wall}$ 와 t_{ground} 는 일반 유역에 적용되는 Kirpich, Rziha, Kraven (I), Kraven (II), Kerby, 공식 등의 경험식을 통해 산정할 수 있음
- $t_{side wall}$ 는 수직관거 내 우수의 낙하속도 공식을 이용하여 산정할 수 있음. Wyly and Eaton(1952)은 첫째 수직관거의 부분유수가 수륜을 만드는 충분한 유량일 것, 둘째 유입구의 초기속도는 0일 것, 셋째 신풍의 주철관일 것 등을 적용 조건으로 하여 Manning 공식과 형식을 맞추어 만든 실험식을 제안하였음. Wyly and Eaton(1952)의 식은 아래와 같음

$$v_t = 16.2 \left(\frac{Q_1}{d_1} \right)^{0.4} \quad (13)$$

- 여기서 v_t 는 종단속도(m/sec), Q_1 은 관내의 유량(ft³/s), d_1 은 관의 지름(m)임

(2) 벽면 소유역

- 벽면 소유역의 도달시간은 벽면에서 지면까지 강우가 도달하는 시간($t_{side\ wall}$)과 지면에서 유역출구까지 도달하는 시간(t_{ground})으로 나뉨. $t_{side\ wall}$ 은 비흘림 효과를 고려하여 건물의 상부층에서는 벽면에 붙어 흘러 내려 오다가 어느 높이 이하로는 자유 낙하한다고 가정하여 산정할 수 있음. t_{ground} 는 일반 유역에 적용되는 Kirpich, Rziha, Kraven(I), Kraven(II), Kerby, 공식 등 경험공식을 통해 산정할 수 있음

① 비흘림 효과

- 강우 입자가 건물 외벽에 부딪힌 이후의 과정은 퍼짐(spreading), 산란(splashing), 튕김(bouncing)으로 나타남(Abuku et al 2009). 세 가지 강우 입자의 충돌 이후 과정은 그림 34와 같으며, 굉장히 짧은 시간 내에 진행됨. 퍼짐은 강우 입자가 건물 외벽에 충돌한 이후, 건물의 외벽에 붙은 채 남아있는 현상임. 산란은 강우 입자가 벽면에 충돌하면서 더 작은 입자로 흩어지는 현상임. 튕김은 강우 입자가 건물 외벽과 충돌한 이후 다시 대기 중으로 떨어져 나가는 현상을 의미함

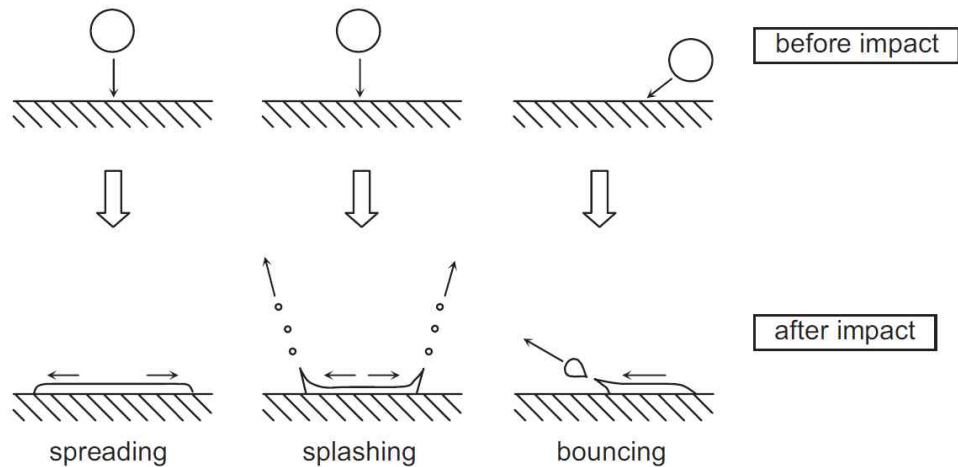


그림 34. 벽면 충돌 후 강우 입자의 운동(Abuku et al. 2009)

- 초고층 건물의 외벽은 비흘림 효과가 나타나는 구조로 되어있음(그림 35). 초고층 건물의 외벽은 통상 하중은 지지하지 않으면서 단순히 공간을 칸막이하는 “커튼월(curtain wall)”공법을 통해 마감됨. 커튼월 공법은 바닥 슬라브가 외벽으로까지 이어진 상태에서 유리벽을 조립하는 형태임. 따라서 벽면 충돌 이후 벽면에 붙어 하강하는 강우 입자의 경우에도 바닥 슬라브의 영향으로 인해 한 층에서 두 층 정도만 하강하다가 대기 중으로 떨어지는 현상이 발생할 가능성이 큼



(a) 서울숲 갤러리아 포레



(b) 도곡동 타워팰리스



(c) 송도 더샵

그림 35. 초고층 건물의 외벽 구조 예시

- 따라서 본 연구에서는 대부분의 강우 입자는 충돌 이후 비هل림 효과로 인해 대기로 튕겨 나오는 것(bouncing)으로 가정하였음. 즉, 벽면에 부딪힌 강우 입자는 바로 튕겨 나와 자유낙하를 하거나, 짧은 시간 동안 부착되었다가 튕겨 나와 자유낙하를 하는 경우로 가정됨

② 벽면 흐름 유속

- Vogelaere and Pacco(2012)는 강우의 건물 외벽(유리)에 대한 영향을 분석하기 위해 수직면에서의 강우-유출을 수치 모형을 이용하여 모의하고 실험 결과와 비교하여 분석하였음. 실험에서는 수직으로 세워진 유리 단면에 대한 강우 입자의 유속을 측정하였음. 유리 단면은 30 cm × 15 cm 규모이며, 초고속 카메라를 이용하여 0.0417초 간격으로 강우의 흐름을 촬영하였음. 실험 결과, 유속은 낙하하여 벽면에 도달한 직후에 가장 빠르게 측정되었으며(170 mm/s), 벽면을 타고 흐르면서 감속하여 평균 26.9 mm/s의 일정한 속도로 벽면을 흐르는 것으로 나타났음
- Beijer(1977)는 콘크리트 재질의 수직 벽면에서의 빗물 흐름에 대한 실험을 수행하고, 벽면에서의 평균 유속을 단위폭당 유량으로 설명하였음. 해당 실험은 높이 20 m의 콘크리트 재질 건물에 대해 수행되었으며, Nusselt(1916)가 제시한 수리학적 해석 결과와 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났음. 해당 식은 아래의 식 (14)과 같음

$$v = 13\sqrt{q} \quad (14)$$

여기서 q 는 단위폭 당 유량($\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$)이며, v 는 평균유속으로 m/sec 의 단위임

③ 강우의 낙하 시 종단속도

- 강우의 낙하 종단속도는 비هل림 효과로 인해 강우가 벽면으로부터 튀어 자유낙하하는 상태의 평균적인 낙하속도로 정의됨
- Ferro(2001)는 실험을 통하여 강우 입자의 크기와 낙하 높이에 대한 함수로 강우 입자의 종단속도를 산정하였음. Ferro(2001)는 강우 입자의 종단속도를 식 (15)와 같이 산정함

$$v_t = v_{\max}(1 - e^{-a_n \times d}) \quad (15)$$

- 여기서 $v_{\max}$ 와 a_n 은 실험을 통해 얻어낸 수치로써 강우 입자의 낙하 높이에 따라 값이 결정됨(표 9). 예를 들어 10 m에서 떨어진 강우 입자는 $v_{\max} = 9.01$, $a_n = 7$ 을 적용하게 됨. 높이가 20 m를 초과하게 되면 20 m에 대한 값을 그대로 사용함

표 9. Ferro(2001)의 강우 입자 종단속도를 산정하기 위한 매개변수

H (m)	$v_{\max}$ (m/s)	a_n
0.5	3.1	14
0.75	3.75	13
1	4.31	12
1.5	5.2	10
2	5.9	9
2.5	6.46	8
3	6.94	8
4	7.69	7
5	8.2	7
6	8.55	7
8	9.01	7
20	9.55	6

- Ferro(2001)의 종단속도 관계식을 이용하기 위해서는 강우 입자 크기 d 를 결정해야 함. 본 연구에서는 강우 입자 크기 d 의 결정에 Best(1950)가 제시한 확률론적 강우 입자 크기 경험식을 이용하였음
- Best(1950)는 중력에 의해 대기 중에서 낙하하는 강우 입자 크기의 분포와 종단속도에 대한 분석을 수행하였음. 전체 강우 입자 중 d 보다 작은 강우 입자의 비율을 지수함수로 나타내었으며, 이는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있음

$$F(d) = 1 - (e^{-10d/a})^n \quad (16)$$

- 식 (16)의 d 는 강우 입자의 직경, a 는 강우강도에 대한 지수함수로 결정되는 값으로 식 (17)를 통해 산정할 수 있음

$$a = AI^p \quad (17)$$

- 식 (17)의 A , p , 식 (16)의 n 은 WDR에 관련된 기존 문헌들(Abuku et al. 2009; Blocken et al. 2012)을 참고하여 $A=1.3$, $p=0.232$, $n=2.25$ 로 결정할 수 있음

2.1.2 Shot noise process 기반 강우-유출 모형

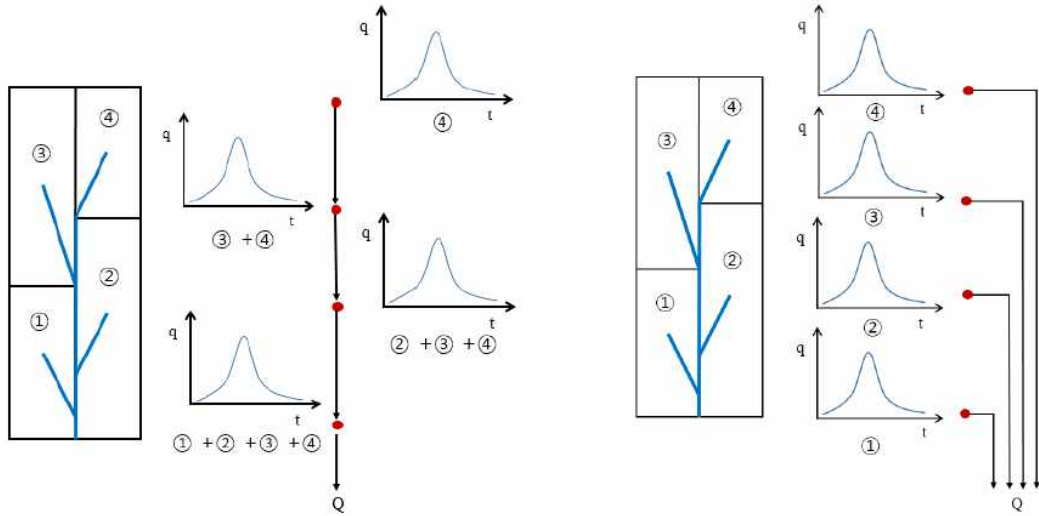
- 본 연구에서는 도시유역의 강우-유출해석에 적합한 shot noise process 기반 강우-유출모형을 초고층 건물로 인한 강우-유출 과정의 왜곡 정도 평가에 이용함
- Shot noise process는 다이오드나 트랜지스터와 같은 전자 장치에서 발생하는 잡음(noise)의 한 형태임. 이 noise는 발생 시점에서 최대값을 가지고 발생 시점 이후부터는 지수적으로(exponentially) 감소하는 형태를 나타냄
- Shot noise process는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있음(Weiss, 1977)

$$Q(t) = \begin{cases} Q_0 e^{-\frac{(t-t_0)}{K}}, & (t \geq t_0) \\ 0, & (t < t_0) \end{cases} \quad (18)$$

- 여기서 Q_0 는 첨두유량, K 는 감쇄상수, t_0 는 noise의 발생 시점을 의미함.
- 만일 noise의 발생이 시간축 상에서 연속적으로 나타나게 되면 결과적으로 나타나는 신호는 개개 shot noise들의 합으로 표현될 수 있음(식 (19))

$$Q(t) = \sum_i Q(t_i) = \sum_i Q_{0(i)} e^{-\frac{t-t_{0(i)}}{K_i}} \quad (19)$$

- Kang and Yoo(2018)에서는 자세하게 소유역 분할이 되어 있거나 도시유역에서와 같이 배수분구 또는 블록 단위의 소유역 분할을 고려할 수 있는 경우에 shot noise process 모형을 적용한 바 있으며, 모형의 효율성과 우수성을 검증한 바 있음
- Shot noise process 모형에서는 각 소유역들의 병렬 또는 직렬 연결을 고려하지 않고, 소유역에서의 유출은 독립적으로 유역출구까지 도달하는 것으로 가정됨. 즉, 일반적인 강우유출 과정에서는 그림 36(a)과 같이 유출이 합쳐지게 되나, Kang and Yoo(2018)에서 제안한 형태는 그림 36(b)과 같이 각 소유역별 유출이 독립적으로 유역출구에 도착함
- 본 연구에서는 초고층 건물의 벽면과 지붕을 독립적인 소유역으로 분할하여 강우-유출 해석을 수행하기 위해 shot noise process 모형을 선택하여 이용함. Shot noise process 모형은 건물의 벽면을 포함한 다양한 소유역의 영향을 개별적으로 판단하는데 유리함



(a) 일반적인 강우-유출모형

(b) Kang and Yoo(2018)의 강우-유출 모형

그림 36. Shot noise process 기반 강우-유출모형의 비교

- 위의 강우-유출모형을 shot noise process 기반으로 표현하기 위해서는 먼저 단위 지속기간 동안의 단위 유효우량으로 인한 유역의 유출을 표현해야 함. 이는 단위도의 개념과 동일함
- 각 소유역의 유출이 shot noise process를 따르므로, 유역에서의 단위응답함수는 식 (20)와 같이 결정됨

$$U(t) = \sum_n P_n e^{-\frac{t-t_{c(n)}}{K_n}} \quad (20)$$

- 여기서 n 은 각 소유역, P_k 는 단위유효우량에 의해 발생하는 소유역의 첨두유량, $t_{c(n)}$ 은 소유역에서 유역 출구까지의 도달시간, K_n 은 소유역의 출구에서 유역출구까지 도달하는 과정을 대표하는 감쇄상수를 나타냄
- 마지막으로 연속강우에 대한 유역의 유출은 식 (21)과 같이 나타나며, 소유역별 유출이 선형적으로 결합되는 형태임

$$O(t) = \sum_i R_i \times U(t-i) = \sum_i R_i \left[\sum_n P_n e^{-\frac{(t-i)-t_{c(n)}}{K_n}} \right] \quad (21)$$

- 여기서 i 는 강우발생 시점, R_i 는 강우강도를 나타냄
- Shot noise process 모형의 매개변수는 첨두치(P_k), 지체시간($t_{c(n)}$), 감쇄상수(K_n)임
- 첨두치는 수정합리식의 개념을 통해 결정됨. 수정합리식의 경우, 유역의 도달시간과 실제 지속시간의 관계에 따라 수문곡선의 형태가 결정됨. 따라서 강우의 지속기간(t_r)과 유역의 도달시간(t_t)을 비교하여 아래의 식 (23)으로 첨두치 Q_p 와 총 유출용적 V 가 결정됨

$$Q_p = Q \times (t_r/t_t), \quad (t_r < t_t) \\ = Q, \quad (t_r \geq t_t) \quad (22)$$

$$V = Q_p \times t_r \quad (23)$$

- 추가적으로, 총유출용적을 반영하여 아래의 식 (24)을 만족하는 첨두치로 P_k 가 결정됨

(24)

- (1979), Sabol(1988) 식이 있음

2.1.3 실험 유역에 대한 강우-유출 모의 검증 및 평가

○ 강우-유출 실험 조건 및 수행 방법

- 어저 있음

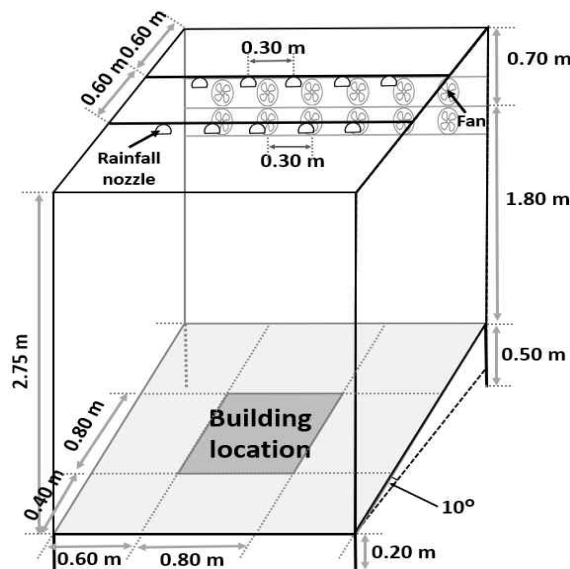


그림 37. 차단량 관측 실험을 위한 도시 유역 모형의 규격

- $\frac{1}{2}$
- 은 어떤 수를
- $\frac{1}{2}$
- 배한 것이므로,
- $\frac{1}{2}$
- 을 곱한 것과 같다.

표 10. 관측 높이 및 Fan으로부터의 거리에 따른 평균 풍속

전압	Fan으로부터의 거리	관측 높이	평균 풍속
180 V	0.55 m	1.72 m	2.39 m/s
		1.84 m	2.30 m/s
		1.96 m	2.37 m/s
	0.93 m	1.72 m	2.08 m/s
		1.84 m	2.00 m/s
		1.96 m	2.16 m/s
220 V	0.55 m	1.72 m	2.90 m/s
		1.84 m	2.90 m/s
		1.96 m	2.80 m/s
	0.93 m	1.72 m	2.46 m/s
		1.84 m	2.40 m/s
		1.96 m	2.34 m/s

- 관측 높이와 지점을 고려하지 않고 단순히 평균값을 구했을 때 전압이 220V이면 풍속이 2.63 m/s, 전압이 180V일 때는 2.22 m/s인 것으로 확인됨
- 다음으로 본 연구에서는 실험에 이용할 강우강도 조건을 결정함. 강우를 모의하기 위해 총 5개의 분사형 강우 모의 노즐이 설치되었음. 이용된 노즐의 직경은 0.5 mm이며, 이는 강우의 형태 물을 분사하는 노즐의 최소 직경임
- 강우강도를 조절하기 위해서는 펌프의 유량을 조절하였으며, 2.0 L/min, 2.5 L/min, 3.0 L/min의 펌프 유량에 따른 강우강도를 관측해보았음. 강우를 모의할 때 바람도 함께 모의하였으며, 평균 풍속 2.63 m/s인 경우를 조건으로 이용함
- 강우강도 또한 풍속과 마찬가지로 Fan으로부터의 거리를 기준으로 평균 강우강도를 결정함. Fan으로부터의 같은 거리에 있는 5개의 지점에서 강우강도를 관측하고, 이를 평균한 값으로 지점별 평균 강우강도를 결정하였음. 결정된 평균 강우강도는 아래 표와 같이 정리됨

표 11. 펌프 유량, Fan으로부터의 거리 및 평균 풍속에 따른 평균 강우강도

평균 풍속	펌프 유량	Fan으로부터의 거리	평균 강우강도
2.63 m/s	2.0 L/min	0.95 m	44.2 mm/hr
		1.55 m	47.4 mm/hr
	2.5 L/min	0.95 m	50.2 mm/hr
		1.55 m	53.0 mm/hr
	3.0 L/min	0.95 m	56.2 mm/hr
		1.55 m	58.8mm/hr

- 본 연구에서는 Fan으로부터의 거리를 고려하지 않고, 펌프 유량과 평균 유속에 따라 총 네 가지 경우의 평균 강우강도를 실험에 이용함
- 평균 풍속이 2.63 m/s일 때 펌프 유량이 펌프 유량이 2.0 L/min인 경우의 평균 강우강도는 45.8 mm/hr이었고, 펌프 유량이 2.5 L/min인 경우에는 평균 강우강도가 51.6 mm/hr이었음. 마지막으로, 평균 풍속이 2.63 m/s이고 펌프 유량이 3.0 L/min일 때의 평균 강우강도는 57.5 mm/hr로 계산되었음

○ 도시 모형 배치 방법

- 본 실험에서는 하나의 건물을 크게 만들어 배치하는 방법만을 이용하였음. 한 층당 열여섯 개의 블록을 이용하여 한 건물을 만들고 높이도 1층에서 7층까지 변경하며 실험을 수행함. 아울러 건물이 강우-유출 과정에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위해 아무 건물이 없는 상태에서도 강우-유출 실험을 수행하였음. 그림 38은 1층, 3층, 5층, 7층의 건물 모형의 실제 모습을 보여줌.



(a) 1층 건물 모형



(b) 3층 건물 모형



(c) 5층 건물 모형



(d) 7층 건물 모형

그림 38. 강우-유출 실험을 위한 도시 모형 배치 방법

○ 실험 구역에 대한 소유역 분할 및 도달시간 산정

- 건물에 의한 차단효과 및 유출 왜곡을 평가하기 위해 실험 구역에 대해 관측한 강우량, 유출량을 이용하였음. 동일한 유역에 대해 shot noise process 기반 강우-유출 모의를 수행하고 그 결과를 검증 및 평가하였음
- 실험 구역의 유역면적은 $2.0 \times 2.0 \text{ m}^2$ 이고, 건물이 차지하는 밑면은 $0.8 \times 0.8 \text{ m}^2$ 임. 건물이 없는 경우부터 높이가 0.2, 0.6, 1.0, 1.4 m인 건물이 위치하는 경우에 대해 shot noise process 기반 강우-유출 모의를 수행하였음

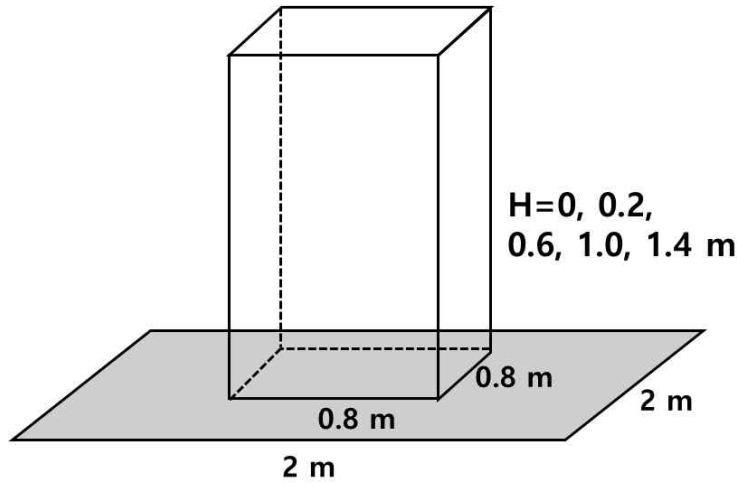


그림 38. 실험 구역

- 먼저, shot noise process 기반 강우-유출 모의를 위해 실험 유역을 여러 개의 소유역으로 구분하였음. 건물이 위치하는 소유역은 건물의 요소별로 또 다른 소유역으로 구분됨(그림 39). 건물이 위치하지 않는 상태를 기존 유역이라고 하면, 소유역은 5개로 구분되지만, 건물이 위치하게 되면 소유역의 개수는 증가함
- 기존 유역은 그림 39와 같이 ①~⑤번 소유역으로 구분할 수 있으며, 모두 지면 유출만 발생하는 상태임. 그러나 건물이 위치하면 ①번 소유역이 ①-1~5번 소유역으로 세분화됨
- 건물 소유역은 크게 지붕 소유역(①-1)과 벽면 소유역(①-2~5)으로 구분됨. 지붕에 해당하는 ①-1번 소유역은 강우가 지붕에 도달하고 벽면을 타고 흘러 지면에 떨어진 후 유역의 출구로 이동하게 됨. 벽면에 해당하는 ①-2~5번 소유역은 바람의 방향에 따라 하나의 면만 고려하기도 하고, 두 개 면이 고려되기도 하나 본 실험에서는 ①-4번 벽면 소유역에만 바람이 불어오는 관계로 하나의 소유역만 고려함

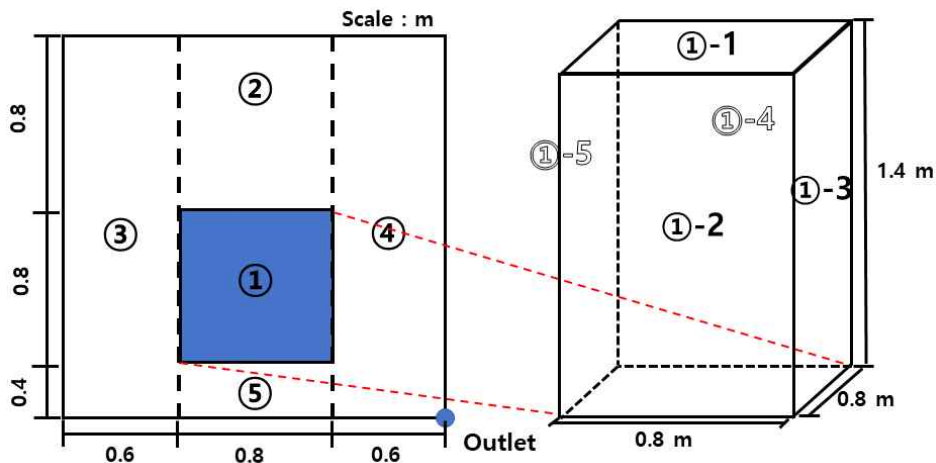
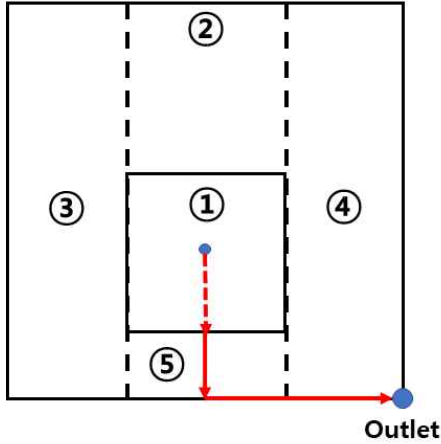
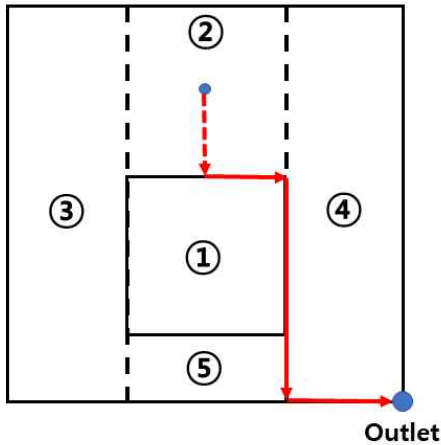
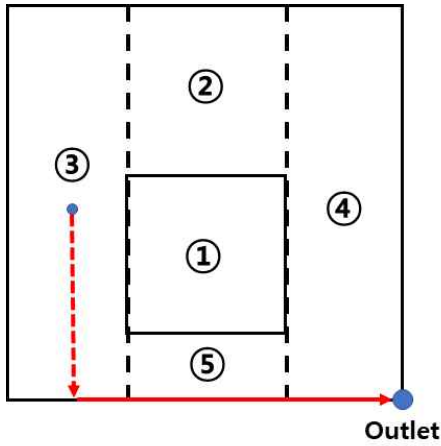
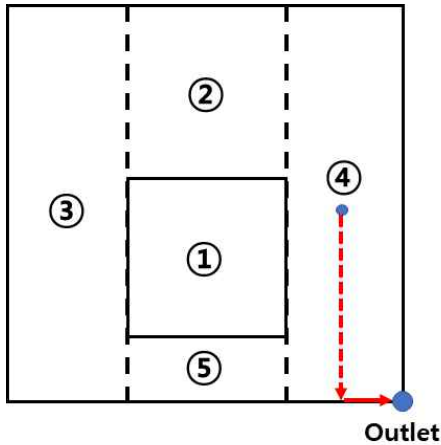
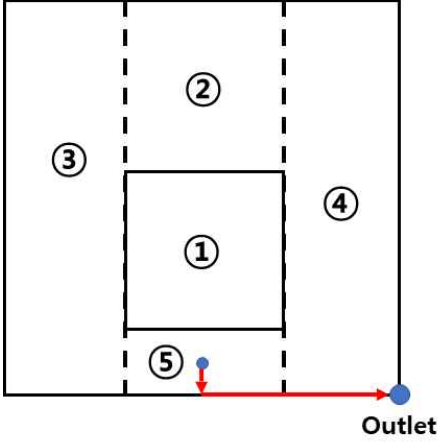
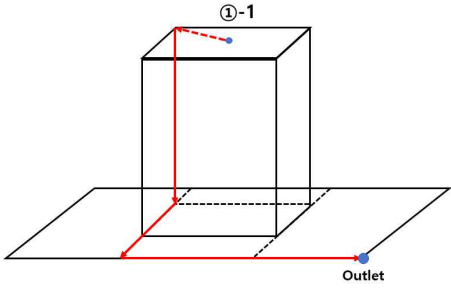
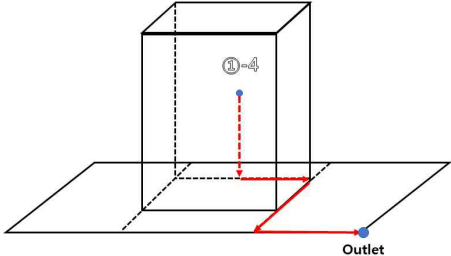


그림 39. 실험 유역의 소유역 분할

- 아래의 표 12는 각 소유역별 특성 및 유출경로를 정리한 것임. ①~⑤번 소유역은 기존 유역에 대한 소유역 구분 결과에 해당하며, ①-1, 4, ②~⑤번 소유역은 건물이 들어선 유역의 소유역 구분 결과에 해당함. 그림에서 점선은 소유역 내 흐름을 나타낸 것이며, 실선은 소유역 외부의 유출경로를 나타낸 것임
- 소유역의 길이와 경사는 소유역의 최원점을 기준으로 산정하였음. 아울러 소유역 외부의 유출 경로 중 가로에 해당하는 경로에서는 경사를 0.003 정도로 가정하였음(도달시간 경험공식으로 도달시간을 계산하기 위함)

표 12. 실험 유역 소유역별 특성 및 유출 경로

소유역 번호	유출 경로	특성
①		[소유역 내부] 소유역 면적 : $0.8 \times 0.8 \text{ m}^2$ 소유역 길이 : 0.8 m 소유역 경사 : 10° [소유역 외부] 유출경로 길이 : $0.2 \text{ m(세로)} + 1.0 \text{ m(가로)}$ 유출경로 세로 경사 : 10° 유출경로 가로 경사 : 0.003
②		[소유역 내부] 소유역 면적 : $0.8 \times 0.8 \text{ m}^2$ 소유역 길이 : 0.8 m 소유역 경사 : 10° [소유역 외부] 유출경로 길이 : $1.2 \text{ m(세로)} + 1.0 \text{ m(가로)}$ 유출경로 세로 경사 : 10° 유출경로 가로 경사 : 0.003
③		[소유역 내부] 소유역 면적 : $0.6 \times 2.0 \text{ m}^2$ 소유역 길이 : 2 m 소유역 경사 : 10° [소유역 외부] 유출경로 길이 : 1.7 m(가로) 유출경로 가로 경사 : 0.003
④		[소유역 내부] 소유역 면적 : $0.6 \times 2.0 \text{ m}^2$ 소유역 길이 : 2 m 소유역 경사 : 10° [소유역 외부] 유출경로 길이 : 0.3 m(가로) 유출경로 가로 경사 : 0.003

⑤		[소유역 내부] 소유역 면적 : $0.8 \times 0.4 \text{ m}^2$ 소유역 길이 : 0.4 m 소유역 경사 : 10° [소유역 외부] 유출경로 길이 : 1.0 m(가로) 유출경로 세로 경사 : 10° 유출경로 가로 경사 : 0.003
①-1		[소유역 내부] 소유역 면적 : $0.8 \times 0.8 \text{ m}^2$ 소유역 길이 : 0.8 m 소유역 경사 : 0.001 [소유역 외부] 유출경로 길이 : 벽면 높이($0.2, 0.6, 1.0, 1.4 \text{ m}$) $+1.2 \text{ m}$(세로)$+1.4 \text{ m}$(가로) 유출경로 세로 경사 : 10° 유출경로 가로 경사 : 0.003
①-4		[소유역 내부] 소유역 면적 : $0.8 \times \text{벽면 높이}(0.2, 0.6, 1.0, 1.4) \text{ m}^2$ 소유역 길이 : 1.4 m [소유역 외부] 유출경로 길이 : 1.2 m(세로)$+1.0 \text{ m}$(가로) 유출경로 세로 경사 : 10° 유출경로 가로 경사 : 0.003

- 구분된 각 소유역별로 도달시간을 산정하였음. 소유역의 도달시간은 소유역 내에서의 도달시간과 유출 경로에서의 도달시간으로 나누어 산정됨. 예컨대 ③번 소유역의 경우, 소유역에 떨어진 강우가 소유역 내부에서 도달하는 시간과 소유역의 출구로부터 유역의 출구까지 유출경로를 따라 도달하는 시간을 모두 고려해야 함
- 건물 지붕에 해당하는 ①-1번 소유역은 지붕에서의 도달시간과 벽면에서의 도달시간, 그리고 지면에서의 도달시간을 모두 고려하게 됨. 벽면인 ①-4번 소유역은 벽면에서의 도달시간과 지면에서의 도달시간을 함께 고려해야 함
- 지붕과 벽면, 지면에서의 도달시간 산정을 위해 사용한 공식은 아래의 표 13과 같음
- 지면 소유역의 경우, 대표적인 도달시간 산정식인 Kerby 공식을 이용하였음. 조도계수 n 은 본 연구에서는 실험 재료에 맞추어 지붕과 벽면의 경우에는 나무에 대한 0.01 , 지면의 경우에는 아크릴에 대한 값인 0.009 로 설정하였음

- 지붕 소유역의 경우, 소유역 내부와 지면에 도달한 흐름에 대해서는 Kerby 공식을 이용하였음. 또한, 지붕에서 지면까지 벽면 흐름의 도달시간은 Beijer(1977)의 식을 통해 산정하였음. 실제 초고층 건물에서는 지붕에 모인 유량이 우수 수직관거를 통해 지면까지 도달하지만, 실험 시에는 벽면에 붙어 흘러내려 가게 됨. 해당 식에서 단위폭당 유량은 지붕에서 발생한 유량을 계산하여 적용하였음. 강우강도가 지속되므로 유량은 합리식을 이용하여 도출하였음. 지면에 도달한 이후의 흐름에는 Kerby 공식을 적용하여 유역 출구까지의 도달시간을 산정하였음
- 벽면 소유역의 경우, 소유역 내부에 대해서는 지붕 소유역의 벽면 흐름과 동일하게 Beijer(1977)의 식을 이용하여 산정하였음. 실제 초고층 건물은 매우 높아 비흘림 효과를 고려해야 하나 실험 시 건물의 높이는 비흘림 효과를 고려하지 않아도 될 정도이므로 벽면에 붙어 흘러내려 가는 흐름에 대한 도달시간을 산정하였음. 지면에서의 도달시간은 Kerby 공식을 이용하여 산정하였음

표 13. 도달시간 산정 공식

구분	공식	Reference
지붕/지면	$t_c(\text{min}) = 36.264 \frac{(\text{Ln})^{0.467}}{S^{0.2335}}$	Kerby(1959)
벽면	$v_t = 13 \sqrt{q}$	Beijer(1977)

- 먼저, 건물이 없는 기존 유역에 대해 도달시간을 산정하였음. 분할한 소유역에 대해 Kerby 공식을 적용하여 소유역 내부와 유역 출구까지의 흐름 경로에 해당하는 소유역 외부의 도달시간을 계산하였음. 그 결과는 표 14와 같으며, 소유역 내부에 비해 외부의 도달시간이 길게 산정됨. 이는 소유역 내부 흐름의 경사가 외부 흐름의 경사보다 더 크기 때문임. 특히, 소유역 외부에서 유역 출구쪽으로 가로로 흐르는 경사는 0.003 정도로 매우 작아서 상대적으로 긴 도달시간을 유발하게 됨

표 14. 도달시간 산정 결과(기존 유역)

소유역 번호	소유역 내부(sec)	소유역 외부(sec)	총 도달시간(sec)
①	15.22	57.61	72.83
②	15.22	74.95	90.17
③	20.26	41.97	62.23
④	20.26	28.26	48.52
⑤	13.63	35.87	49.50

- 1.4 m 높이 건물의 ①-1 소유역(지붕 소유역)에 대한 도달시간 산정 결과는 다음과 같음. 강우강도 i 가 18.9 mm/hr인 경우에 대한 결과임. 먼저, Kerby 공식을 통해 산정한 지붕 소유역 내부의 도달시간은 27초임. 벽면에 붙어 지붕에서 지면까지 흘러내려 가는 흐름의 유속은 Beijer(1977) 공식을 이용하여 산정하였음. 약 0.01 m/sec으로 산정되며, 따라서 1.4 m를 내려가는 데 걸리는 시간은 121초임. 지면에 도달한 우수가 유역 출구로 이동하는 데까지는 Kerby 공식이 적용되었으며, 소요되는 시간은 약 69초로 계산됨. 즉, 총 도달시간은 218초임
- 강우강도가 45.8 mm/hr인 경우의 모든 소유역에 대한 도달시간은 아래와 같음. 건물의 유무와 관계없이 소유역 ②~⑤의 도달시간은 변하지 않음. 건물이 있는 경우에는 소유역 ①이 지붕(①-1)과 벽면(①-4)으로 나뉨
- 지붕 소유역 ①-1의 소유역 내부 흐름의 경우, 기존 유역에서의 소유역 ① 도달시간과 상이한데, 이는 지붕과 지면의 경사 차이에서 비롯된 결과임. 지붕의 경사는 실제로는 0이지만 도달시간의 계산을 위해 본 연구에서는 지면의 가로 흐름과 동일하게 0.003으로 가정하였음

표 15. 도달시간 산정 결과(1.4 m 높이 건물)

소유역 번호	소유역 내부(sec)	소유역 외부(sec)	총 도달시간(sec)
①-1(지붕)	38.00	178.91	216.91
①-4(벽면)	121.30	57.61	178.91
②	15.22	74.95	90.17
③	20.26	41.97	62.23
④	20.26	28.26	48.52
⑤	13.63	35.87	49.50

- 구분된 소유역별로 산정한 감쇄상수는 도시유역에 적용이 가능한 경험공식으로 알려진 Russell et al.(1979) 공식을 이용하였음(식 (25)). 해당 경험공식에는 α 라는 상수가 필요한데, 본 연구에서는 $\alpha=1$ 로 설정하였음

$$K = \alpha \cdot t_c \quad (25)$$

○ 실험 유역에 대한 단위응답함수 유도

- 소유역별로 산정된 도달시간을 이용하여 소유역별 단위응답함수를 유도하였음. 단위응답함수는 첨두치가 발생한 이후 지수적으로 감소하는 형태이며, 소유역에 대한 도달시간과 저류상수를 적용하여 유도되며, 소유역에 대한 1초 단위도와 유사한 개념임
- 강우강도 45.8 mm/hr인 경우의 소유역별 단위응답함수는 그림 40과 같음. 기존 유역(건물 x)과 건물이 존재하는 유역(건물 높이 1.4 m)의 소유역별 단위응답함수를 비교하였음. 기존 유역에서 소유역 ①과 ②는 단위응답함수의 형태가 동일하고, 소유역 ③과 ④도 동일함. 이는 두 소유역의 특성이 같기 때문에 나타난 결과임. 기존 유역에서 건물 유역으로 변화함에 따라 지면에 대한 소유역인 ②~⑤번 소유역의 단위응답함수는 동일하지만 건물이 위치하게 되는 ①번 소유역은 ①-1, ①-4번 소유역으로 나뉘며 다른 형태로 유도됨. ①-4번 소유역의 첨두치가 작은 값인데, 이는 shot noise process 모형에서 첨두치를 결정하는 수정합리식의 이론에 근거한 결과임. 벽면 소유역 내부의 도달시간이 121초 정도로 긴 경우, 수정합리식에 의해 상대적으로 단위응답함수의 첨두치가 작게 결정되기 때문임

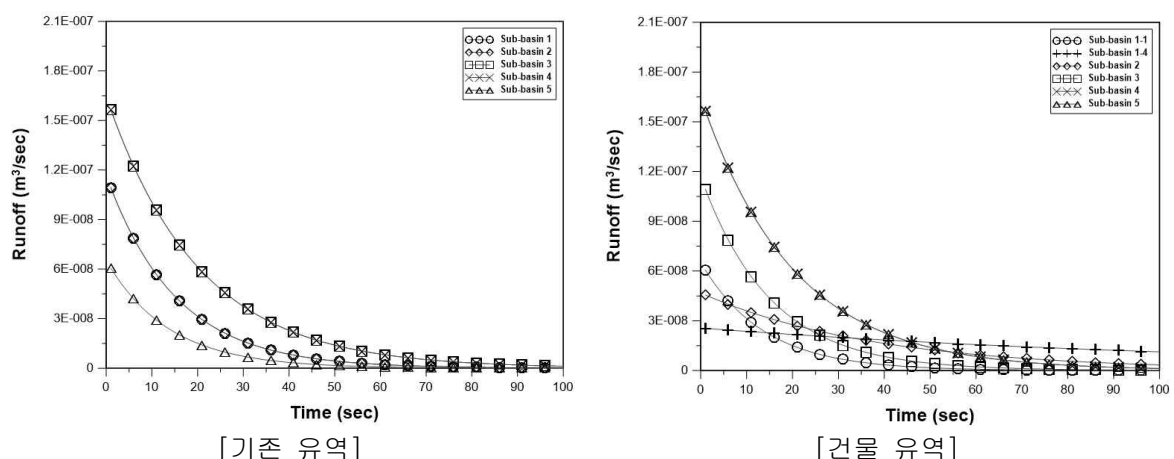


그림 40. 소유역별 단위응답함수

- 유역 출구에서의 소유역별 단위응답함수는 그림 41과 같음. 아울러 유역 출구에서의 유역 단위응답함수도 함께 도시하였음. 기존 유역과 건물 유역의 유역 출구에서의 유역 단위응답함수는 다른 형태로 유도됨. ①번 소유역이 건물의 지붕(①-1)과 벽면(①-4)으로 변화함에 따라 소유역 출구에서 유역 출구까지의 지체 및 저류효과의 영향이 크게 나타나기 때문임.

- 그림 41의 실선은 유역의 단위응답함수임. 소유역의 출구에서 유역 출구까지의 도달시간 중 가장 짧은 시간 이후부터 단위응답함수의 유출이 발생하는 형태의 수문곡선 형태가 유도됨. 아울러 건물 유역의 경우, 180초 근방에서 중거가 약간 증가하는데, 이는 지붕 소유역(①-1)의 유출이 발생하기 시작하는 시점을 의미함

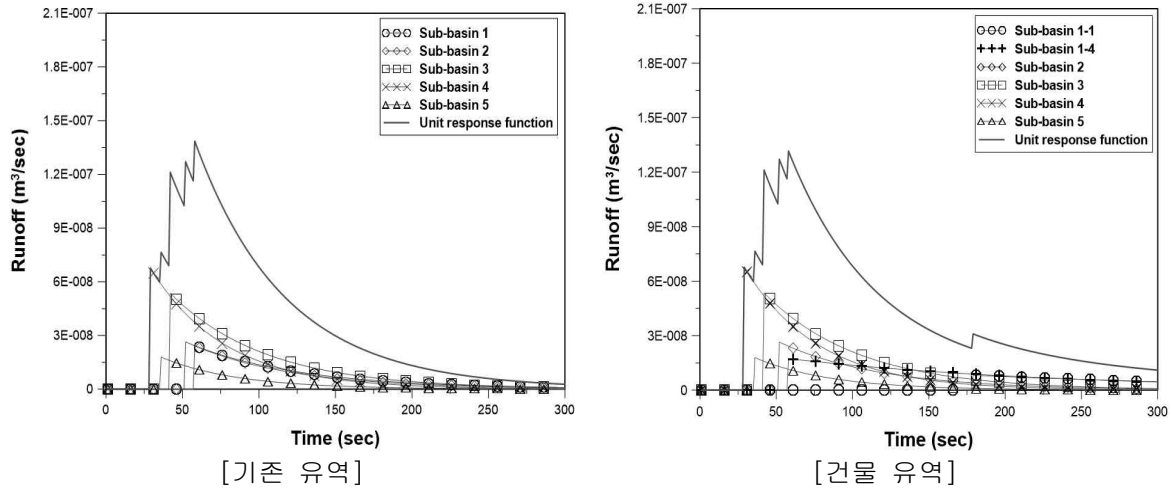


그림 41. 유역 출구에서의 소유역별 단위응답함수

○ 강우-유출 모의 시간 결정 및 모의 결과 해석

- 본 연구에서는 각 실험당 모의 시간을 결정하기 위해 관측 유출수문곡선과 모의 유출수문곡선이 어느 시점에 침두 유출량에 도달하는지 확인함
- 이때 관측 및 모의는 풍속 2.63 m/s 조건에서, 평균 강우강도는 45.8 mm/hr, 51.6 mm/hr, 57.5 mm/hr 조건에서 수행되었음. 각각의 조건에서 총 20분 동안의 강우를 발생시켰으며, 이때 관측 및 모의 유출수문곡선은 아래와 같이 나타남

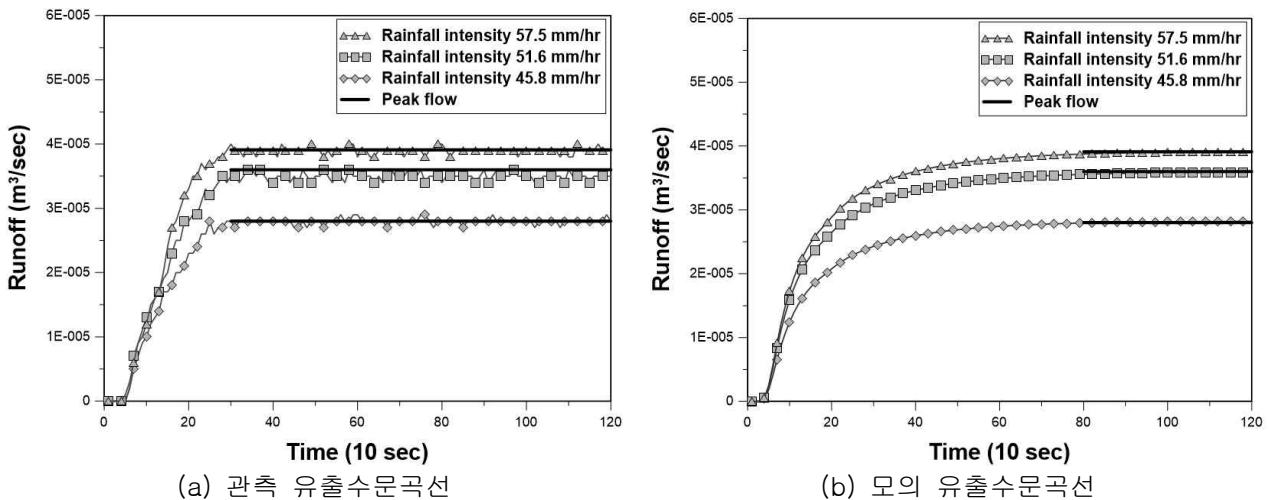


그림 42. 실험 시간 결정을 위한 유출 관측 및 모의 실험

- 먼저, 관측 유출수문곡선을 살펴보면, 약 300초에 침두 유출량에 도달하는 것을 확인할 수 있음. 침두 유출량에 도달하는 시간은 강우강도 세 가지 조건에서 모두 유사함
- 반면, 모의 유출수문곡선의 경우 관측 유출수문곡선보다 더 늦게 침두 유출량에 도달함. 세 가지 강우 강도 조건에서 약 800초에 침두 유출량이 모의되었음
- 관측 유출수문곡선과 모의 유출수문곡선의 침두 유출량을 비교하기 위해서는 800초 이상의 모의 시간이 필요함. 본 연구에서는 침두 유출량이 어느 정도 평형에 이르기까지 모의를 수행하기 위해 모의 시간을 1200초(20분)로 결정하였으며, 유출 수문곡선의 하강부를 충분히 나타내기 위해 추가로 600초(10

분) 동안의 유출량을 관측함

- 추가로 고려해야 할 문제는 실험 결과에서 나타난 총 강우량과 총 유출량의 불일치 문제임. 기존 유역의 실험 결과, 관측된 총 강우량과 총 유출량을 꽤 큰 차이를 보였음. 이는 바람의 영향으로 인해 상당부분의 강우량이 유역 외부로 빠져나가 버리는 데에서 비롯된 문제임. 따라서 shot noise process 기반 유출 모의 시에는 이를 고려해 주어야 함
- 표 16은 실험한 세 가지 경우의 강우강도에 대한 총 강우량 대비 총 유출량의 비율을 산정한 결과임. 즉, shot noise process 유출 모의 시에는 표 16에 주어진 강우강도에 비율을 곱한 강우강도를 모의에 사용하였음

표 16. 강우강도별 총 유출량/총 강우량 비율

No.	강우강도 (mm/hr)	변환된 강우강도 (mm/hr)	총 유출량/총 강우량 비율
1	45.8	18.9	0.44
2	51.6	22.3	0.47
3	57.5	26.0	0.48

- 아울러 벽면에 의해 차단되는 강우는 따로 고려하였음. 실험의 결과를 토대로 총 강우 중 차단되는 강우의 양을 산정할 수 있는 관계식이 식 (26)과 같이 유도되었음. 실험 유역에 대한 shot noise process 기반 강우-유출 모의에서는 건물의 벽면 소유역에 발생하는 강우를 식 (26)을 통해 산정되는 강우 차단량 Q 을 건물 벽면으로 나눈 값으로 적용하였음.

$$Q = 0.113 \times B \times H \times U \times R_h^{0.88} \quad (26)$$

- 여기서 B 는 건물의 폭(m), H 는 건물의 높이(m), U 는 풍속(m/s)임. R_h 는 mm/hr 단위로 된 총 강우량을 의미함. 본 실험에 적용된 풍속은 2.63 m/s이고, 건물의 높이 1.4 m, 폭 0.8 m를 대입하면, 강우강도가 45.8 mm/hr인 경우에 총 강우량 중 차단되는 강우량의 비율은 약 11% 정도 됨
- 입력 강우는 표 16에서 산정한 비율을 강우강도에 곱한 값을 적용하였음. 즉, 실험에서는 45.8, 51.6, 57.5 mm/hr의 세 가지 강우강도를 적용하여 유출수문곡선 결과를 도출하였으나, shot noise process 기반 강우-유출 모의에서는 18.9, 22.3, 26.0 mm/hr로 적용하였음. 건물 높이로는 0.2, 0.6, 1.0, 1.4 m의 네 가지를 고려하였음. 이 높이는 실험 건물의 1층, 3층, 5층, 7층에 해당하는 것임. 건물의 지붕과 벽면, 지면의 도달시간은 표 13에서 제시한 공식들을 이용하였으며, 감쇄상수는 $\alpha=1$ 인 Russell 공식을 이용하여 산정하였음
- Shot noise process 기반 강우-유출 모의 결과는 그림 43~45와 같음. 소유역별 유출수문곡선과 이를 중첩하여 결합된 유역의 유출수문곡선을 함께 도시하였음

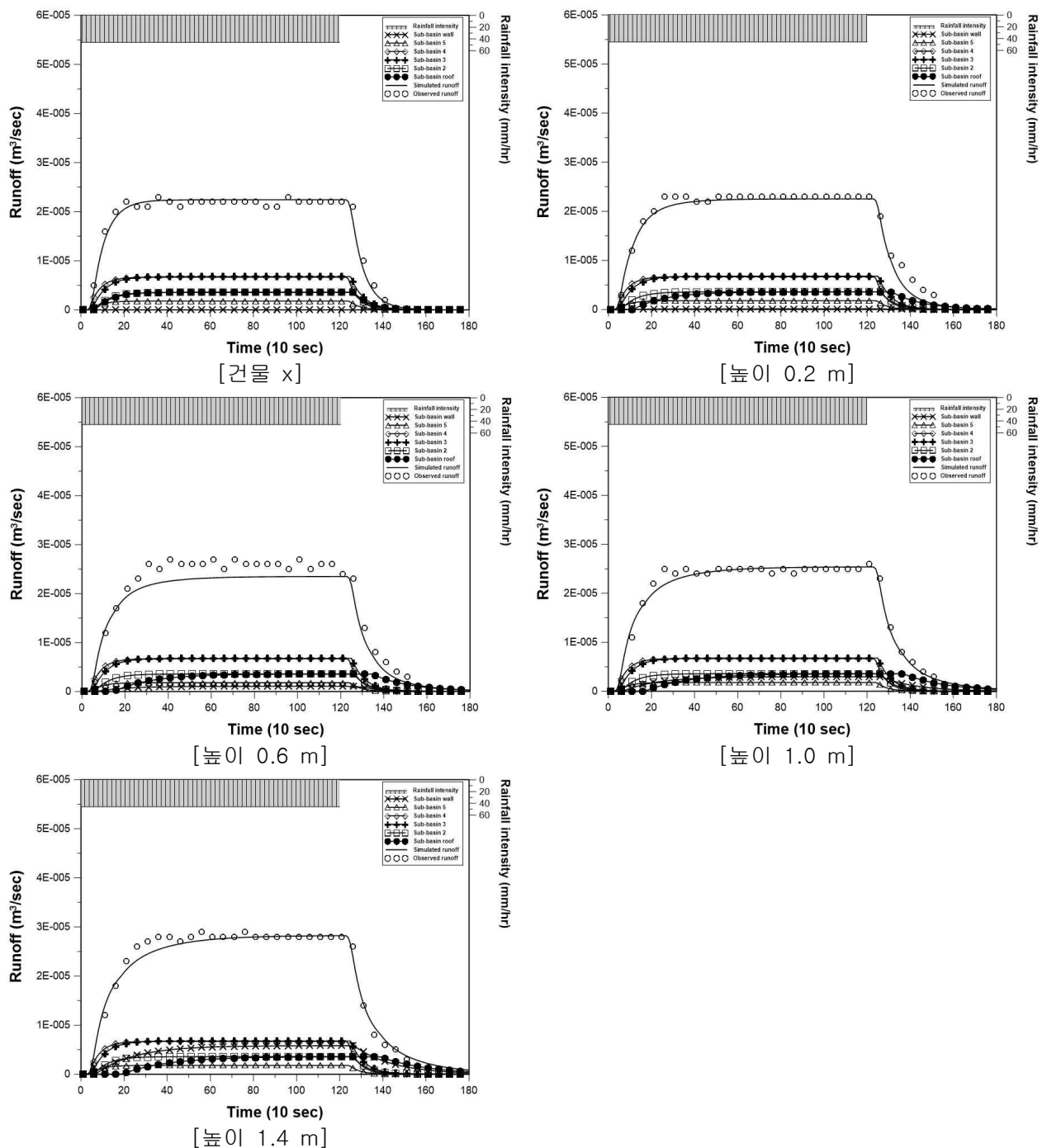


그림 43. Shot noise process 기반 유출 모의 결과와 실험 관측 결과의 비교
($I=45.8$ mm/hr)

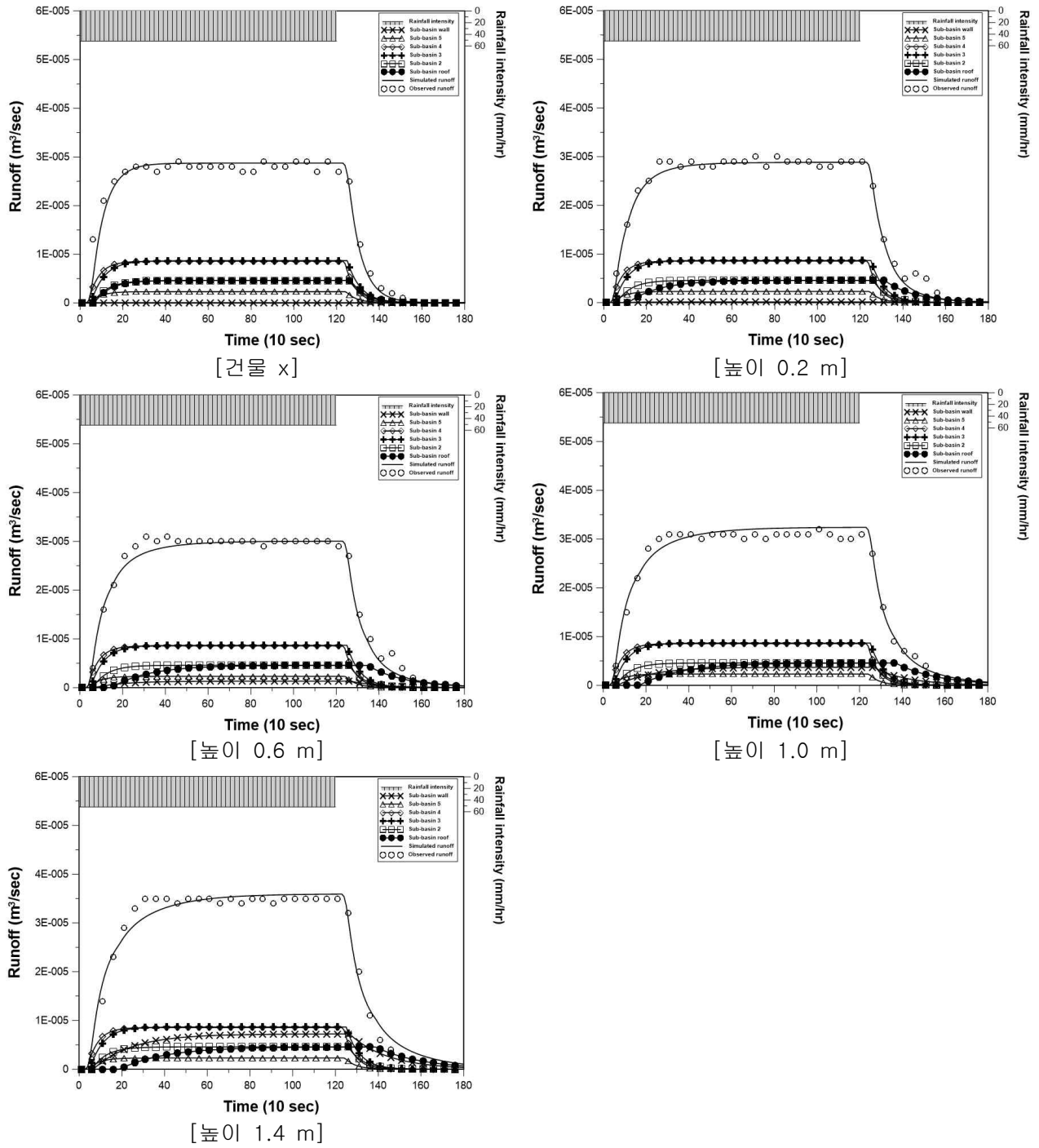


그림 44. Shot noise process 기반 유출 모의 결과와 실험 관측 결과의 비교
($I=51.6$ mm/hr)

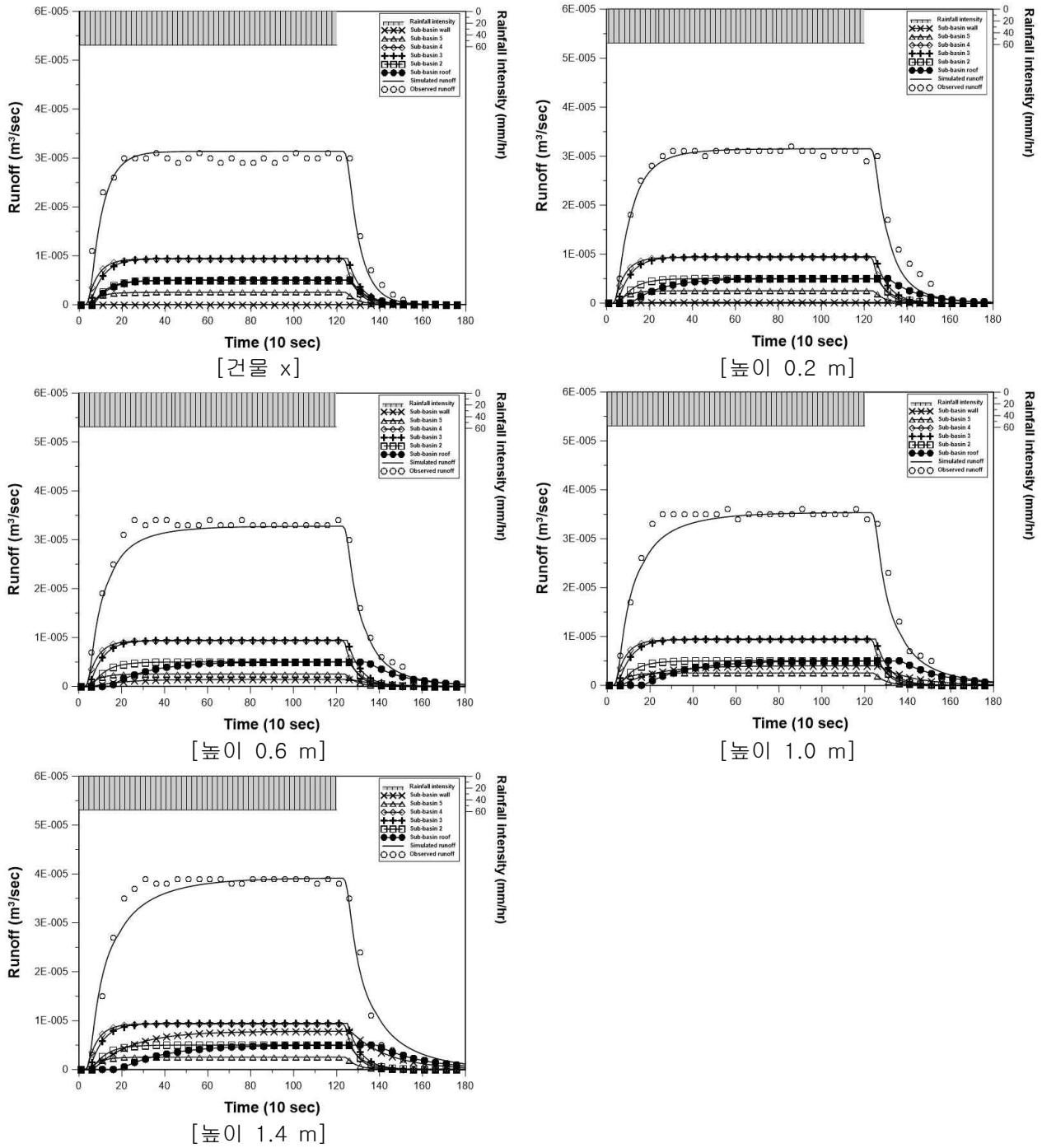


그림 45. Shot noise process 기반 유출 모의 결과와 실험 관측 결과의 비교
($I=57.5$ mm/hr)

- 다음으로, 건물 높이에 따른 실험 관측치와 shot noise 모의치의 변화를 비교하였음. 세 가지 강우강도에 대한 결과는 그림 46-48과 같음. 유출수문곡선의 개형은 관측치와 모의치가 유사하게 나타남. 또한, 건물 높이가 증가할수록 첨두유량이 증가하는 것을 확인할 수 있음

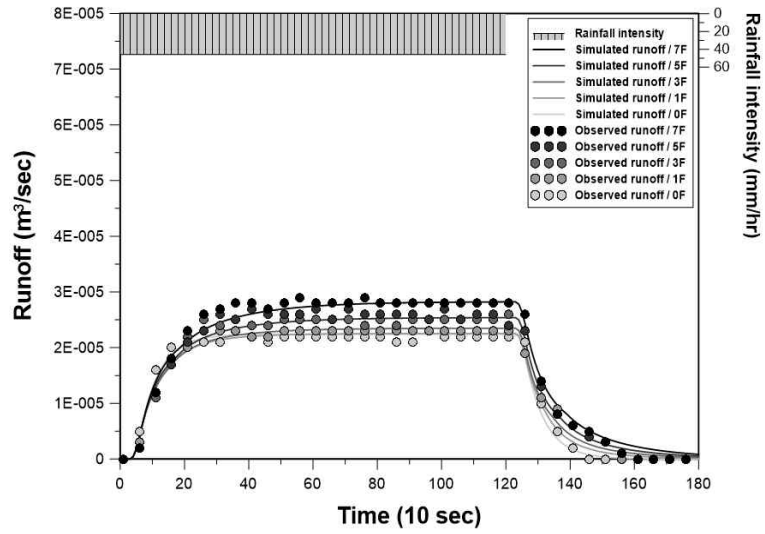


그림 46. 건물 높이에 따른 Shot noise process 기반 유출 모의치와 실험 관측치의 변화
($I=45.8$ mm/hr)

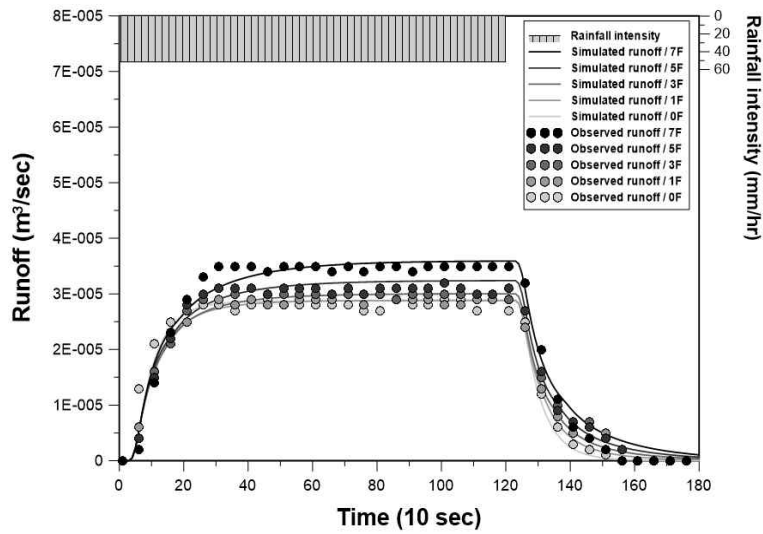


그림 47. 건물 높이에 따른 Shot noise process 기반 유출 모의치와 실험 관측치의 변화
($I=51.6$ mm/hr)

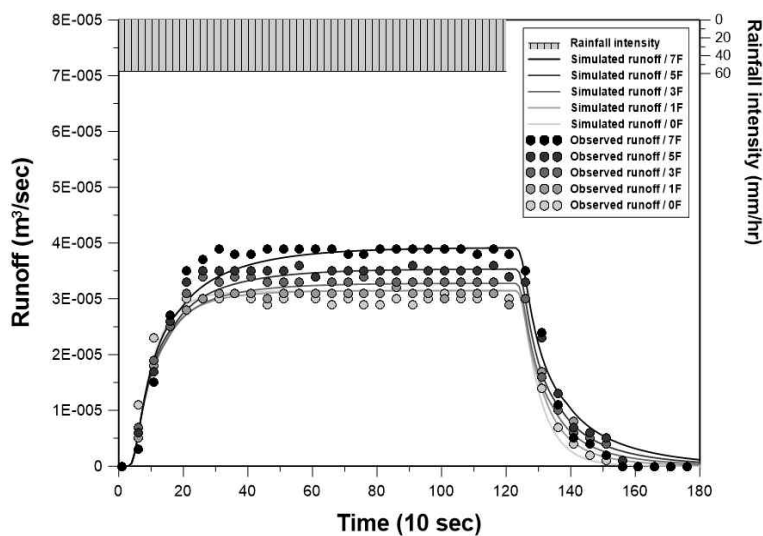
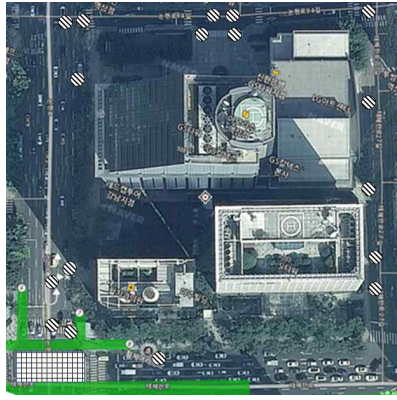


그림 48. 건물 높이에 따른 Shot noise process 기반 유출 모의치와 실험 관측치의 변화
($I=57.5$ mm/hr)

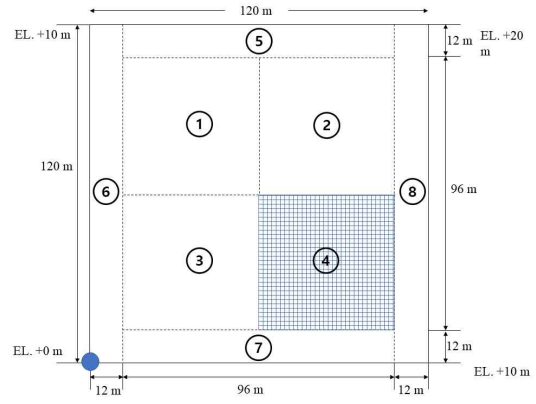
- 초고층 건물로 인한 유출 왜곡의 모의를 검증하기 위해 shot noise process 기반의 강우-유출 모형을 이용한 결과, 강우강도와 관계없이 관측치를 적절히 모의할 수 있을 것으로 판단됨. 그 이유는 관측치와 모의치의 유출수문곡선의 개형이 상당히 유사하며, 첨두시간 및 첨두유량 또한 유사하기 때문임
- 벽면으로 인해 차단되는 강우에 의한 유출 왜곡 정도는 건물의 높이가 증가할수록 영향이 더욱 크게 나타남. 즉, 건물이 있는 경우에 벽면에 의해 차단되는 강우의 영향으로 건물이 높아질수록 벽면 소유역의 유출량이 증가하게 되며, 유역의 유출수문곡선 첨두치 또한 증가하게 됨
- 일반적인 강우-유출 과정에서 차단되는 강우량은 증발하여 유출에 기여하지 않는 것으로 고려됨. 반면 초고층 건물로 인해 차단되는 강우량은 벽면을 타고 흘러내려 유출에 기여함
- 본 연구에서는 초고층 건물로 인해 차단되는 강우량을 유출에 반영하기 위해 차단량을 강우-유출 모형에 추가로 입력해주었음. 이후 차단량에 의해 유도되는 유출수문곡선은 최종 유출수문곡선에 더함. 이에 따라 초고층 건물의 높이가 증가할수록 최종 유출수문곡선의 첨두치가 증가하는 결과가 나타난 것임
- 건물에 대한 shot noise process 모형의 강우-유출 모의 시 지붕과 벽면에 대한 모의 조건을 적절히 고려해야 함. 모형의 검증을 위해 실험 조건과 유사한 조건으로 벽면 흐름 특성을 가정하였음. 즉, 실험 조건 하에서는 초고층 건물 벽면에서의 비흘림 효과는 거의 나타나지 않음. 또한, 통상 초고층 건물에서 지붕에서 지면까지의 우수 흐름은 수직 관거를 통해 이루어지나 실험에서는 벽면과 동일하게 벽면에 붙어서 흘러내리는 경우로 도달시간을 산정하였음. 실제 도시 유역의 초고층 건물에 대한 모의 시에는 비흘림 효과, 우수 수직관거 흐름 등을 고려해야 함

2.1.4 실제 도시유역에 대한 강우-유출해석 및 평가

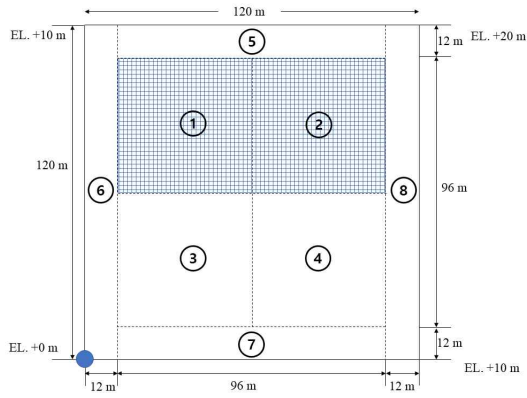
- 본 연구에서는 초고층 건물을 고려한 유출경로 왜곡을 분석을 위해 대상 지역을 서울시 강남구에 위치한 역삼역 인근 지역을 선정하였으며, 초고층 건물로 GS 타워를 선정함
- 다음 그림 49(a)는 역삼역 인근에 위치한 GS 타워의 위성 사진임. 그림에서 은 맨홀을, 은 유역 출구부를 의미함
- 초고층 건물을 포함하는 실제 도시유역에 대한 강우-유출을 위해서는 먼저 소유역 분할이 필요함. 앞서 실험 유역에서와 같이 전체 유역을 여러 개의 소유역으로 분할하였음. 또한, 건폐율에 따라 소유역의 특성도 달라짐. 건폐율이란 대지 면적에 대한 건축면적의 비율임. 건폐율에 따라 고려할 수 있는 건물의 개수, 규모가 달라져서 소유역 분할은 초고층 건물의 건폐율에 따라 달라지며, 건물의 벽면 또한 소유역으로 고려됨



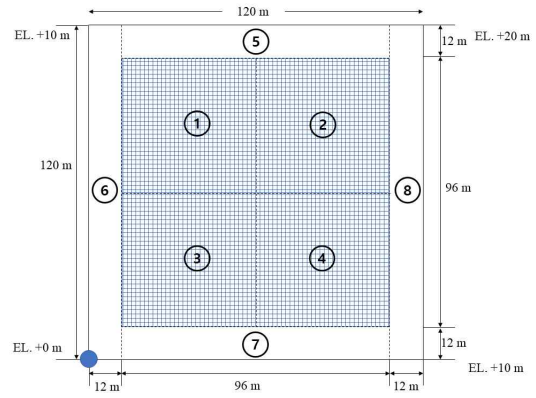
(a) 역삼역 GS 타워 block



(b) 소유역 분할 결과(건폐율 16%)



(c) 소유역 분할 결과(건폐율 32%)



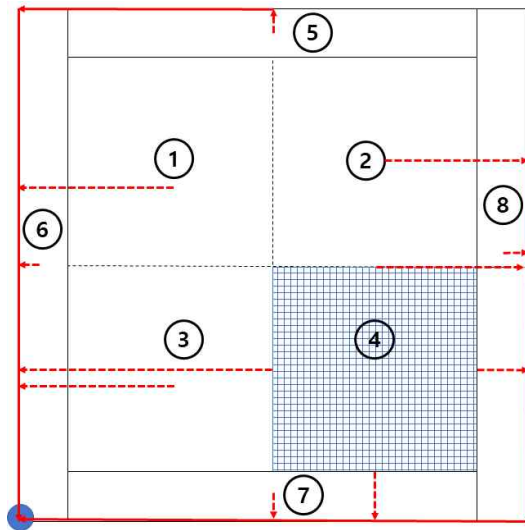
(d) 소유역 분할 결과(건폐율 64%)

맨홀 :

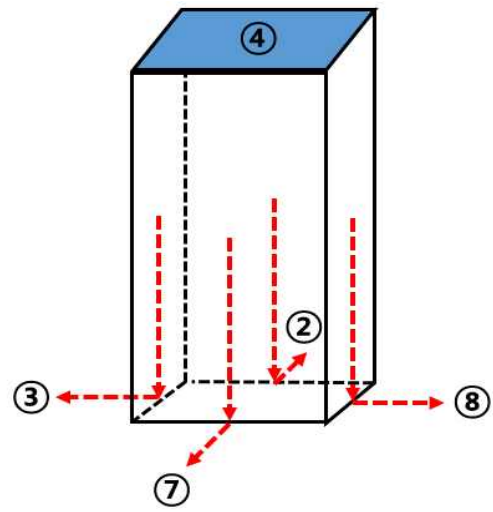
유역 출구 :

그림 49. GS 타워 유역의 위성 사진 및 대상지역의 소유역 분할 결과

- 소유역별 유출경로는 아래의 그림 50과 같으며, 건폐율에 따라 유출경로가 달라짐. 유출경로는 유역의 맨홀 위치에 따라 결정되고, 유역 출구쪽으로 유출이 발생하게 됨
- 건폐율 16%의 경우, 소유역 ④에 건물이 들어서게 되며 건물의 높이는 10, 30, 50, 70, 100층을 고려함. 32%가 되면 소유역 ①과 ②에, 64%이면 소유역 ①~④이 건물 소유역으로 변하게 됨

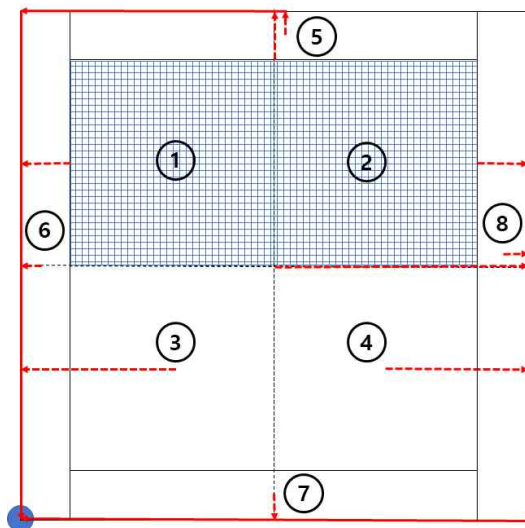


[수평 유출경로]

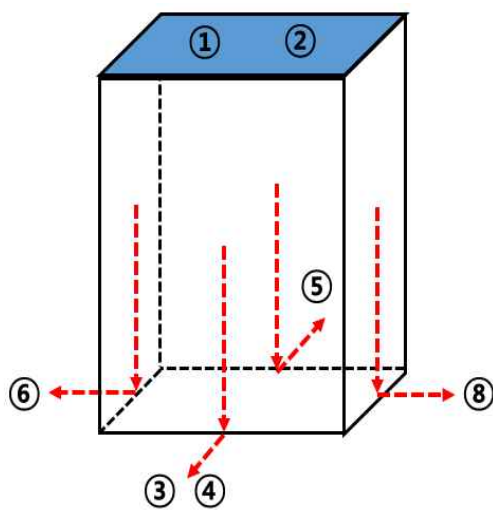


[수직 유출경로]

(a) GS 타워 block 유출경로 (건폐율 16%)

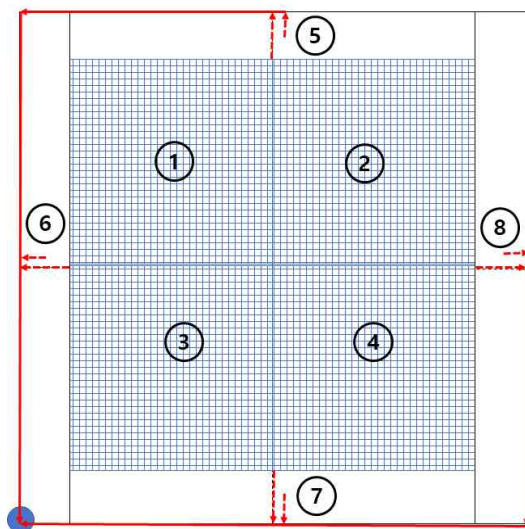


[수평 유출경로]

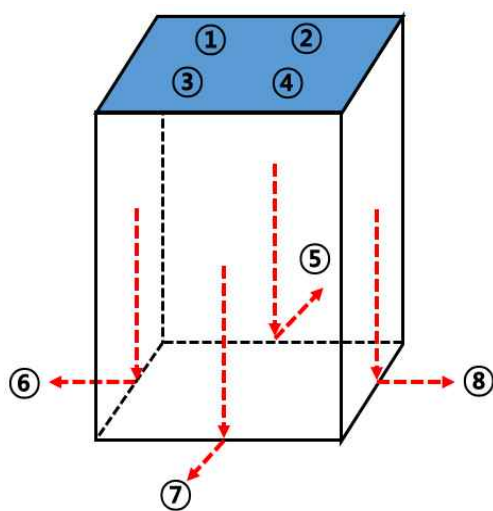


[수직 유출경로]

(b) GS 타워 block 유출경로 (건폐율 32%)



[수평 유출경로]



[수직 유출경로]

(c) GS 타워 block 유출경로 (건폐율 64%)

그림 50. 건폐율에 따른 도시구역 유출경로

- 다음 표 17은 shot noise process 모형의 매개변수 산정을 위한 소유역 특성을 정리한 것임. 소유역 내부의 유로 연장은 유역의 최원점에서 유역 출구까지의 거리로 산정하였으며, 소유역 외부의 유로 연장은 유출 경로의 길이를 의미함. 경사는 GIS 정보를 이용하여 소유역 내부의 경우, 최원점에서 출구까지를 기준

으로, 소유역 외부의 경우, 유출경로를 기준으로 산정하였음. 조도계수는 도시유역에 적합한 0.011로 결정함(이재수, 2007)

표 17. 소유역별 유역 특성(건폐율 0%)

소유역	소유역 면적 (km ²)	유로연장(km)		경사		조도계수
		소유역 내부	소유역 외부	소유역 내부	소유역 외부	
①	0.0023	67.88	72	0.167	0.083	0.011
②	0.0023	67.88	168	0.167	0.083	0.011
③	0.0023	67.88	48	0.167	0.083	0.011
④	0.0023	67.88	144	0.167	0.083	0.011
⑤	0.0012	96.75	186	0.093	0.083	0.011
⑥	0.0014	120.60	66	0.090	0.083	0.011
⑦	0.0012	96.75	66	0.114	0.083	0.011
⑧	0.0014	120.60	186	0.117	0.083	0.011

- 위와 같은 소유역별 유역 특성을 이용하여 소유역별 도달시간을 산정하였음. 각 소유역에 적용한 도달 시간 및 유속 산정 공식은 아래의 표 18과 같음
- 지면에서의 도달시간은 Kerby 공식을 이용하여 산정하였음. 표 17의 경사 및 유로연장, 조도계수의 정보를 이용하여 Kerby 공식에 적용하면 min 단위의 도달시간을 산정할 수 있음. 소유역 내부의 유량이 소유역 근방의 맨홀로 유입되고 다시 유역 출구까지 흘러간다고 가정하였음
- 건물이 있는 경우에 대해서는 건물 소유역의 지붕과 벽면의 도달시간을 추가로 고려해야 함
- 지붕 소유역의 경우, 지붕에서의 도달시간은 지면과 동일하게 Kerby 공식을 이용하여 산정하며, 지붕에서 모인 강우가 지면까지 우수 수직관거를 통해 도달하는 데 걸리는 시간은 Wyly and Eaton(1952)이 제시한 공식을 이용하여 산정하였음. 해당 공식의 변수로는 유량 Q_1 와 관경의 크기 d_1 이 있음. 유량 Q_1 은 일정한 강우강도 조건이므로 지붕에 대해 합리식을 적용하여 산정함. 건물 1개의 경우, 30년 빈도, 10분 지속시간 강우강도를 적용하면 0.107 m³/sec의 유량이 발생함. 또한, 관경의 크기 d_1 을 결정해야 하는데, 환경부에서 제안한 허용 최대 지붕면적별 관경값을 이용하여 0.2 m로 결정함(ME, 2015)
- 벽면 소유역의 경우, 도달시간의 산정에 비흘림 효과를 고려하게 됨. 실험 유역에 대한 강우-유출 모의와 달리, 실제 유역에 대한 모의에서는 비흘림 효과를 반영할 필요가 있음. 이는 실험조건과 달리 실제 유역에서는 강우가 벽면을 따라 흐르다가 바닥 슬라브의 영향으로 인해 실제로는 1~2개 층만을 흐르고 다시 대기로 떨어지기 때문임
- 본 연구에서는 벽면의 강우는 벽면에 부딪힌 후, 3층에 해당하는 높이(9 m)를 흘러내려 이동하고 비흘림 효과에 의해 떨어져 나와 대기 중에서 자유낙하하는 상황을 가정함. 벽면을 타고 흘러내려 가는 속도는 Volgelaere and Pacco(2012)가 벽면을 흘러내려 가는 우수의 속도 관측 실험을 통해 산정한 0.027 m/sec를 적용하였음. 즉, 건물의 상부 벽면 9 m를 타고 내려가는 우수의 이동시간은 약 5.5분임
- 자유낙하속도는 Ferro(2001)의 식을 이용하여 산정하였음. 해당 식에는 결정해야 할 상수로 v_{max} , a_n , d 가 있는데, v_{max} 와 a_n 는 실험 결과를 통해 얻어낸 수치로써, 강우 입자의 낙하 높이가 20 m를 초과하게 되면 각각 $v_{max}=9.55$ m/s, a_n 은 6으로 고정됨. d 는 강우 입자의 직경으로, Best(1950)의 종단속도에 따른 강우 입자 크기 분포 연구를 토대로 50% 분포를 가지는 직경인 0.87 mm로 결정하였음(10분 지속, 30년 빈도 강우강도를 적용하는 경우)

표 18. 소유역별 도달시간/유속 산정 공식

구분	공식	Reference
지붕/지면	$t_c(\text{min}) = 36.264 \frac{(\text{Ln})^{0.467}}{S^{0.2335}}$	Kerby(1959)
지붕 우수 수직관거	$v_t = 16.2 \left(\frac{Q_1}{d_1} \right)^{0.4}$	Wyly and Eaton(1952)
벽면 부착 흐름	$v_t = 0.027 \text{ m/sec}$	Vogelaere and Pacco(2012)
벽면 자유낙하	$v_t = v_{\text{max}} (1 - e^{-a_n \times d})$	Ferro(2001)

- 건물이 없는 기존 유역에 대해 30년 빈도, 10분 지속시간 강우강도가 발생한 경우, 소유역별로 산정된 도달시간은 아래의 표 19와 같음

표 19. 도달시간 산정 결과(기존 유역)

소유역 번호	소유역 내부(min)	소유역 외부(min)	총 도달시간(min)
①	1.91	3.12	5.03
②	1.91	5.36	7.27
③	1.91	2.89	4.80
④	1.91	4.39	6.30
⑤	2.35	4.93	7.28
⑥	2.89	2.84	5.73
⑦	2.46	2.84	5.30
⑧	2.71	5.12	7.83

- 100 m 높이의 건물이 1개 들어선 도시유역에 대해 30년 빈도, 10분 지속시간 강우강도가 발생한 경우, 소유역별 도달시간 산정 결과는 다음과 같음. 건물이 들어서는 ①번 소유역을 제외한 나머지 소유역에 대한 도달시간은 동일함
- 바람에 의한 강우에 의해 영향을 받는 벽면은 바람이 사선으로 불어오는 것을 고려하여 이웃한 두 개 면을 평균하였음. 벽면에 의해 차단된 강우량 또한 낙하 혹은 벽면을 따라 흘러 지면에 도달하고, 관거를 따라 유역출구까지 흘러감. 이때 벽면에서 유역출구까지 흐르는 도달시간은 4개 벽면의 유로연장의 평균값으로 산정됨
- 먼저, Kerby 공식을 통해 Kerby 공식을 통해 산정한 지붕 소유역 내부의 도달시간은 1.88분임. 지붕에 모인 우수가 수직관거를 통해 지면을 거쳐 유역 출구까지 도달하는 데 걸리는 시간은 4.79분임. 벽면 소유역의 경우, 강우가 벽면에 붙어 지면까지 도달하는 데 걸리는 시간은 5.51분임. 지면에 도달한 우수가 유역 출구로 이동하는 데까지 걸리는 시간은 4.82분으로 계산됨
- 건물이 있는 유역의 소유역별 도달시간 산정 결과는 아래의 표 20과 같음

표 20. 도달시간 산정 결과(100 m 높이 건물 1개)

소유역 번호	소유역 내부(min)	소유역 외부(min)	총 도달시간(min)
④-지붕	1.88	4.79	6.67
④-벽면	5.51	4.82	10.33
①	1.91	3.12	5.03
②	1.91	5.36	7.27
③	1.91	2.89	4.80
⑤	2.35	4.93	7.28
⑥	2.89	2.84	5.73
⑦	2.46	2.84	5.30
⑧	2.71	5.12	7.83

- 소유역별로 산정된 도달시간을 이용하여 소유역별 단위응답함수를 유도하였음. 단위응답함수는 첨두치가

발생한 이후 지수적으로 감소하는 형태이며, 소유역에 대한 도달시간과 저류상수를 이용하여 유도되며, 소유역에 대한 1분 단위도와 유사한 개념임

- Shot-noise process 기반 강우-유출 모의 특성상 소유역을 구분하는 방법에 따라서 같은 규모 유역의 단위응답함수가 달리 나타남. 건물이 들어서지 않은 조건에 대한 shot-noise process 기반 강우-유출 모의는 건폐율에 대한 단위응답함수를 따로 결정함
- 다음 그림 51과 52는 100 층 건물에 30년 빈도 10분 지속시간 강우강도를 적용한 경우, 각각 소유역 출구에서의 소유역별 단위응답함수와 전체 유역 출구에서의 소유역별 단위응답함수를 나타냄. 단위유역 출구에서의 소유역별 단위응답함수는 소유역 출구에서 유역 출구까지의 지체 및 저류효과를 고려하기 때문에 다른 형태로 유도됨. 전체 유출곡선 중 벽면 소유역이 차지하는 부분이 제일 큰 것으로 나타났음. 이 효과는 건물의 높이가 커질수록, 건폐율이 증가할수록 더욱 크게 나타나는 것으로 확인됨

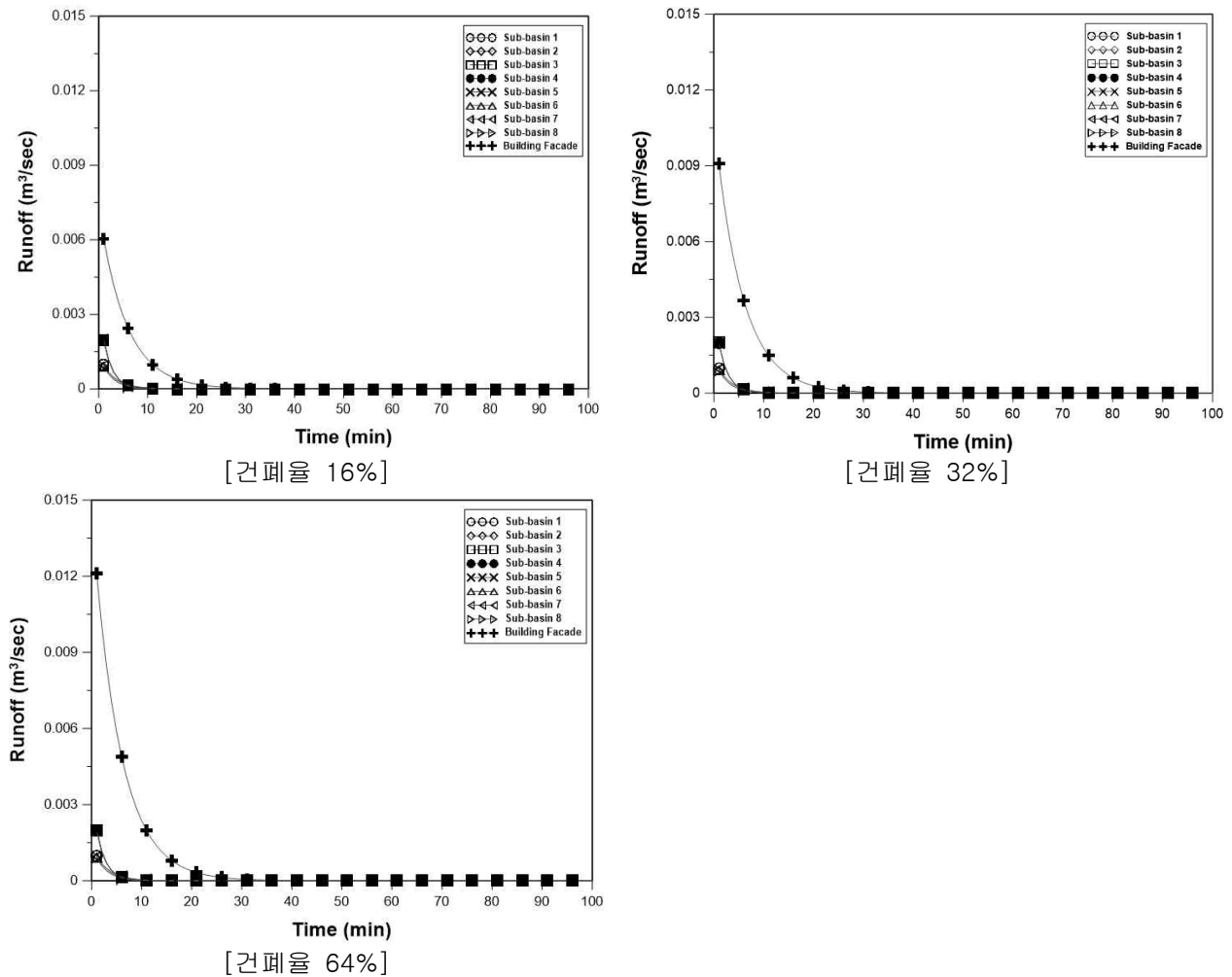


그림 51. 소유역 출구에서의 소유역별 단위응답함수

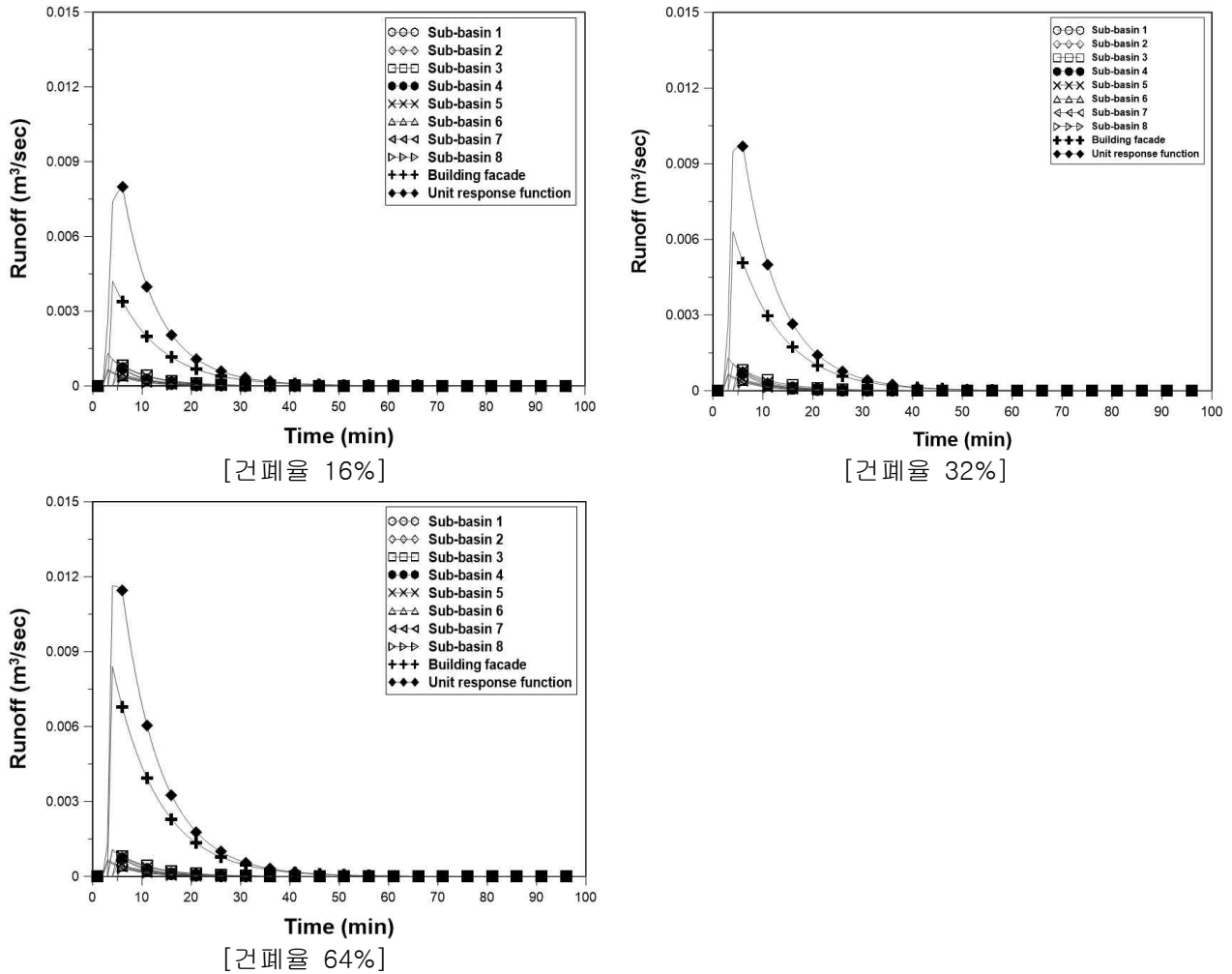
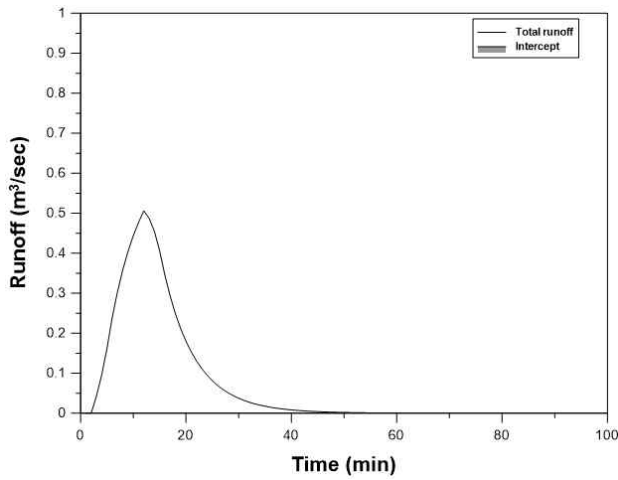


그림 52. 전체 유역 출구에서의 소유역별 단위응답함수

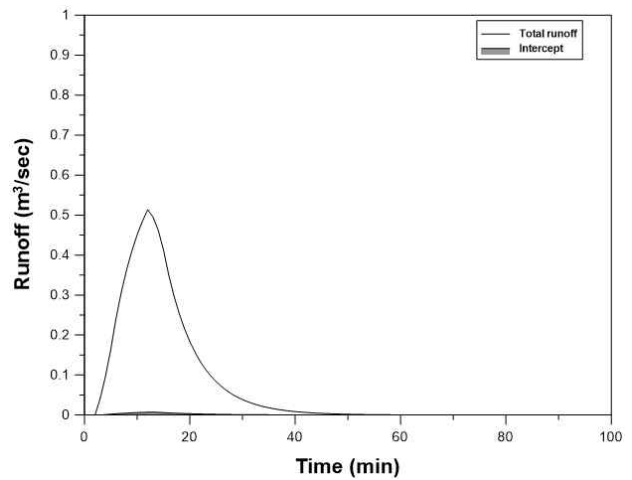
- 30년 빈도 10분 지속시간 강우강도를 적용한 경우에 유도된 단위응답함수를 이용하여 shot noise process 기반 강우-유출 모의 결과인 유출수문곡선을 유도하였음
- Shot noise process 입력 강우는 서울 지점의 IDF 곡선으로부터 결정하였음. 재현기간 30년, 지속시간 10분에 대한 강우강도는 166.9 mm/hr로 이를 1분 강우량으로 환산하여 shot noise process의 입력자료로 적용함
- 건물 벽면 차단에 의해 증가하는 홍수량을 비교·평가하기 위하여 건물이 없는 유역에 40년부터 100년까지의 재현기간에 해당하는 강수량을 입력하여 40년부터 100년 빈도의 첨두홍수량을 산출함
- 벽면에 의해 차단되는 강우는 실험 결과를 통해 얻은 차단식을 사용하였으며 이는 식 (27)과 같음. 실제 유역에 대한 shot noise process 기반 강우-유출 모의에서는 건물의 벽면 소유역에 발생하는 강우를 식 (27)을 통해 산정되는 강우 차단량 Q 을 건물 벽면으로 나눈 값으로 적용하였음

$$Q = 0.113 \times B \times H \times U \times R_h^{0.88} \quad (27)$$

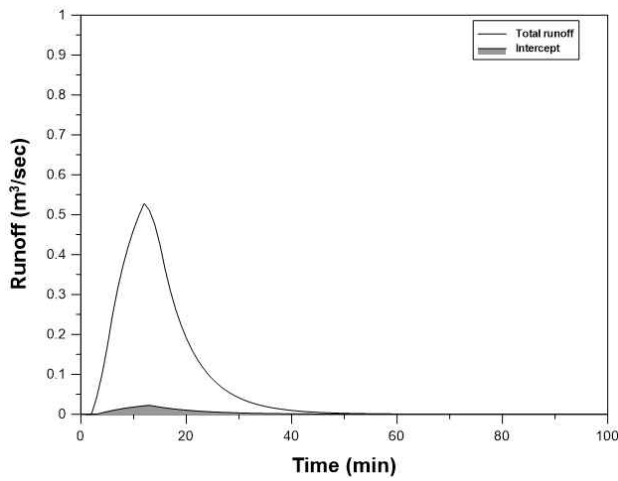
- 다음 그림 53은 건폐율 16%의 경우의 총 유출수문곡선과 차단에 의해 발생하는 홍수량의 유출수문곡선을 비교한 결과를 나타낸 것임. 건물의 높이가 높아질수록, 건폐율이 증가할수록 차단에 의해 발생하는 총 유출량과 첨두홍수량이 증가하는 경향을 보임
- 총 유출량과 차단에 의해 발생한 홍수량을 비교한 결과, 건폐율 16% 조건에서는 총 유출량의 15.1%정도가 건물 외벽에 의한 차단에 의해 발생한 것으로 확인됨(100층 기준)
- 첨두홍수량을 기준으로 총 유출과 차단에 의한 유출을 비교한 결과, 차단에 의한 유출은 첨두홍수량의 15.7% 정도에 해당하는 것으로 확인됨(100층 기준)



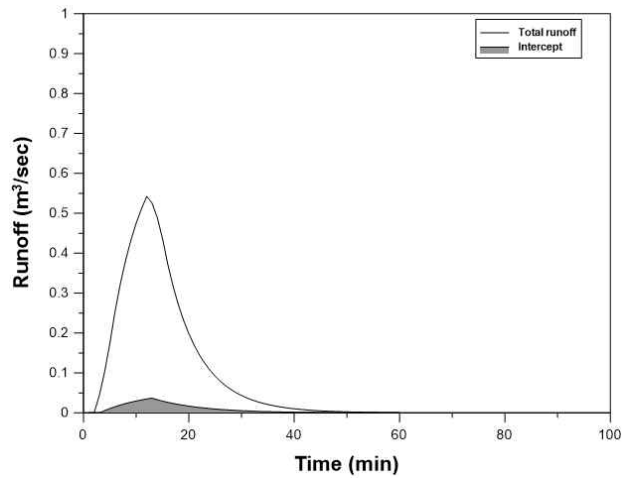
(a) 0층



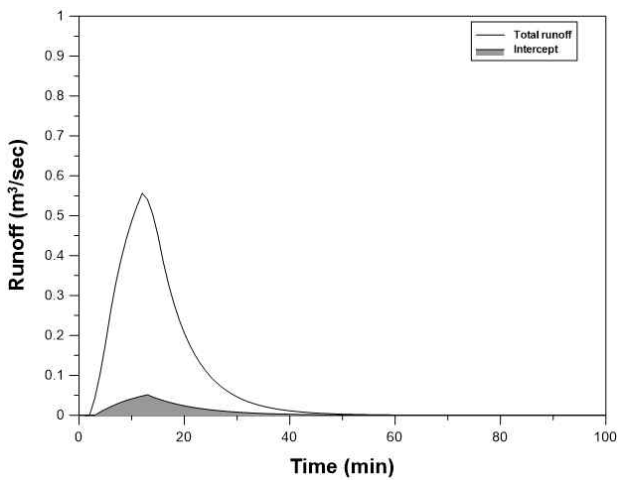
b) 10층



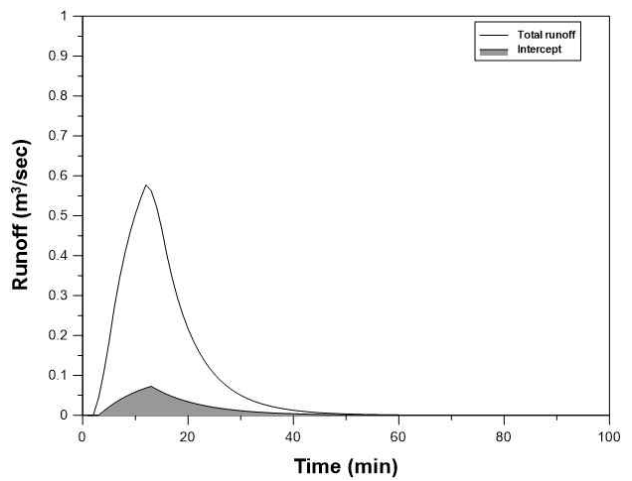
(c) 30층



(d) 50층



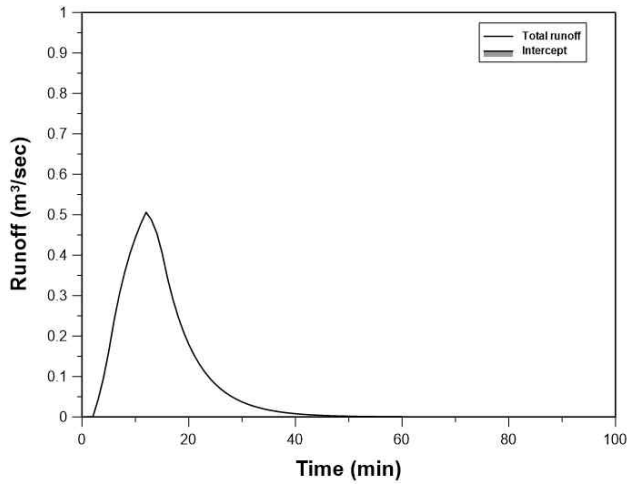
(e) 70층



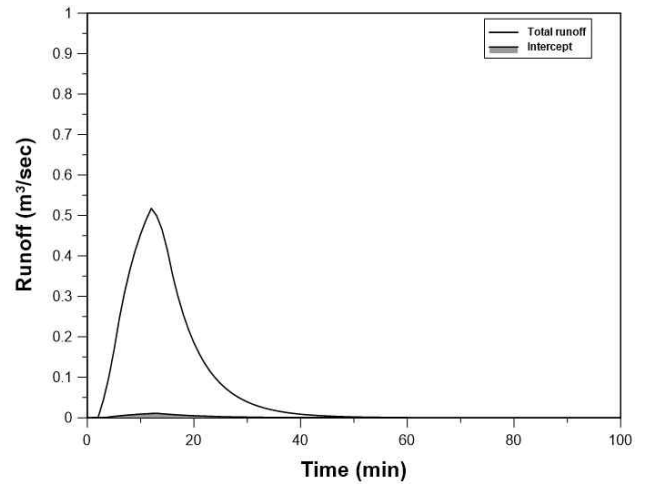
(f) 100층

그림 53. Shot noise process 강우-유출해석 결과(건폐율 16%)

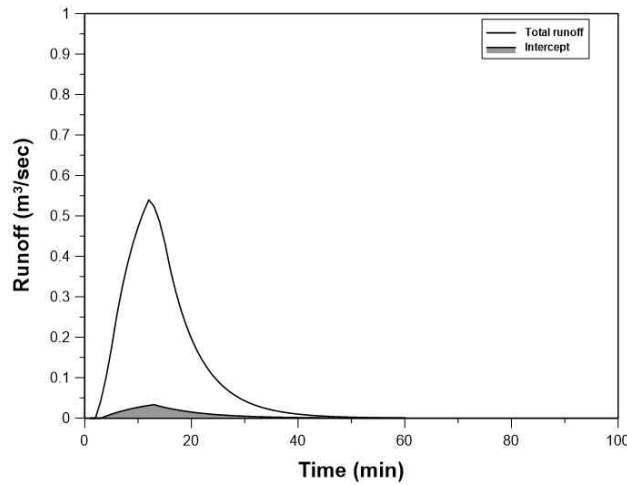
- 다음 그림 54는 건폐율 32%의 경우의 총 유출수문곡선과 차단에 의해 발생하는 홍수량의 유출수문곡선을 비교한 결과를 나타냄
- 총 유출량과 차단에 의해 발생한 홍수량을 비교한 결과, 건폐율 32% 조건에서는 총 유출량의 23.1%정도가 건물 외벽에 의한 차단에 의해 발생한 것으로 확인됨(100층 기준)
- 첨두홍수량을 기준으로 총 유출과 차단에 의한 유출을 비교한 결과, 차단에 의한 유출은 첨두홍수량의 20.4%정도에 해당하는 것으로 확인됨(100층 기준)



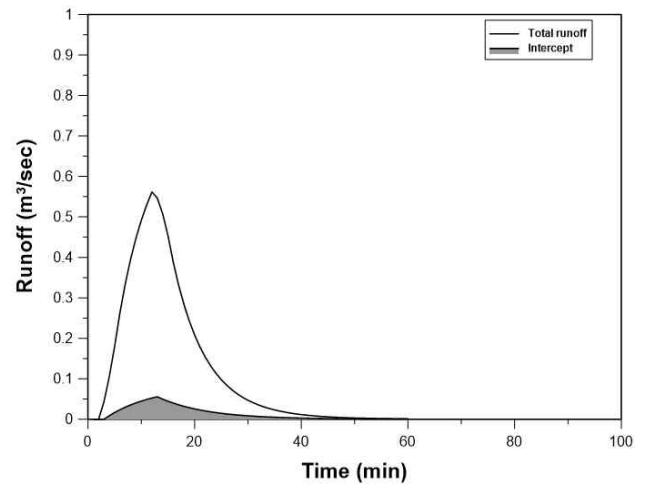
(a) 0층



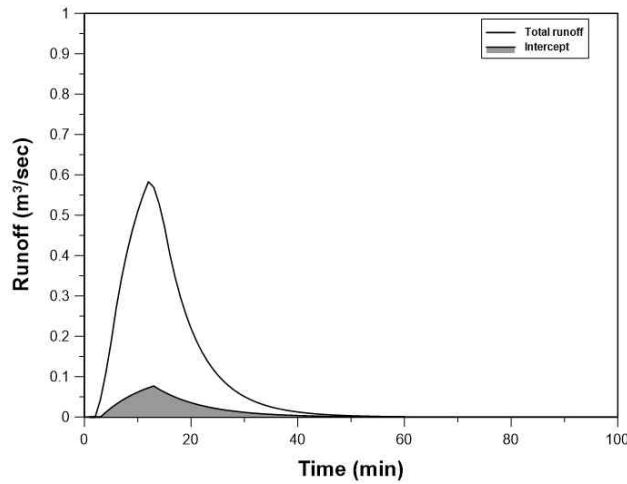
(b) 10층



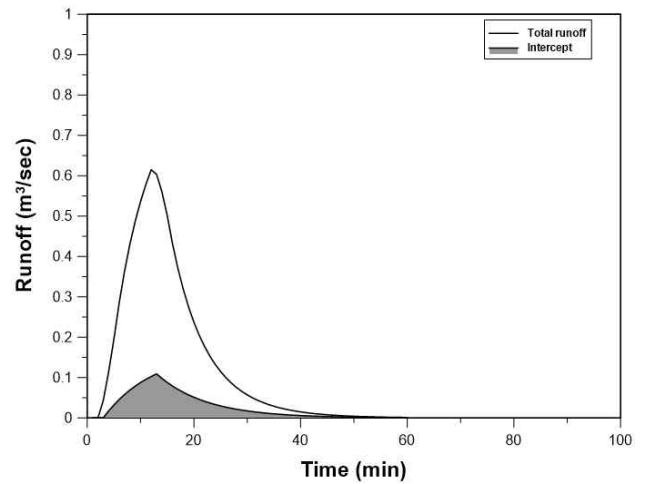
(c) 30층



(d) 50층



(e) 70층



(f) 100층

그림 54. Shot noise process 강우-유출해석 결과(건폐율 32%)

- 다음 그림 55는 건폐율 64%의 경우의 총 유출수문곡선과 차단에 의해 발생하는 홍수량의 유출수문곡선을 비교한 결과를 나타냄
- 총 유출량과 차단에 의해 발생한 홍수량을 비교한 결과, 건폐율 64% 조건에서는 총 유출량의 28.6%정도가 건물 외벽에 의한 차단에 의해 발생한 것으로 확인됨(100층 기준)
- 첨두홍수량을 기준으로 총 유출과 차단에 의한 유출을 비교한 결과, 차단에 의한 유출은 첨두홍수량의 26.3% 정도에 해당하는 것으로 확인됨(100층 기준)

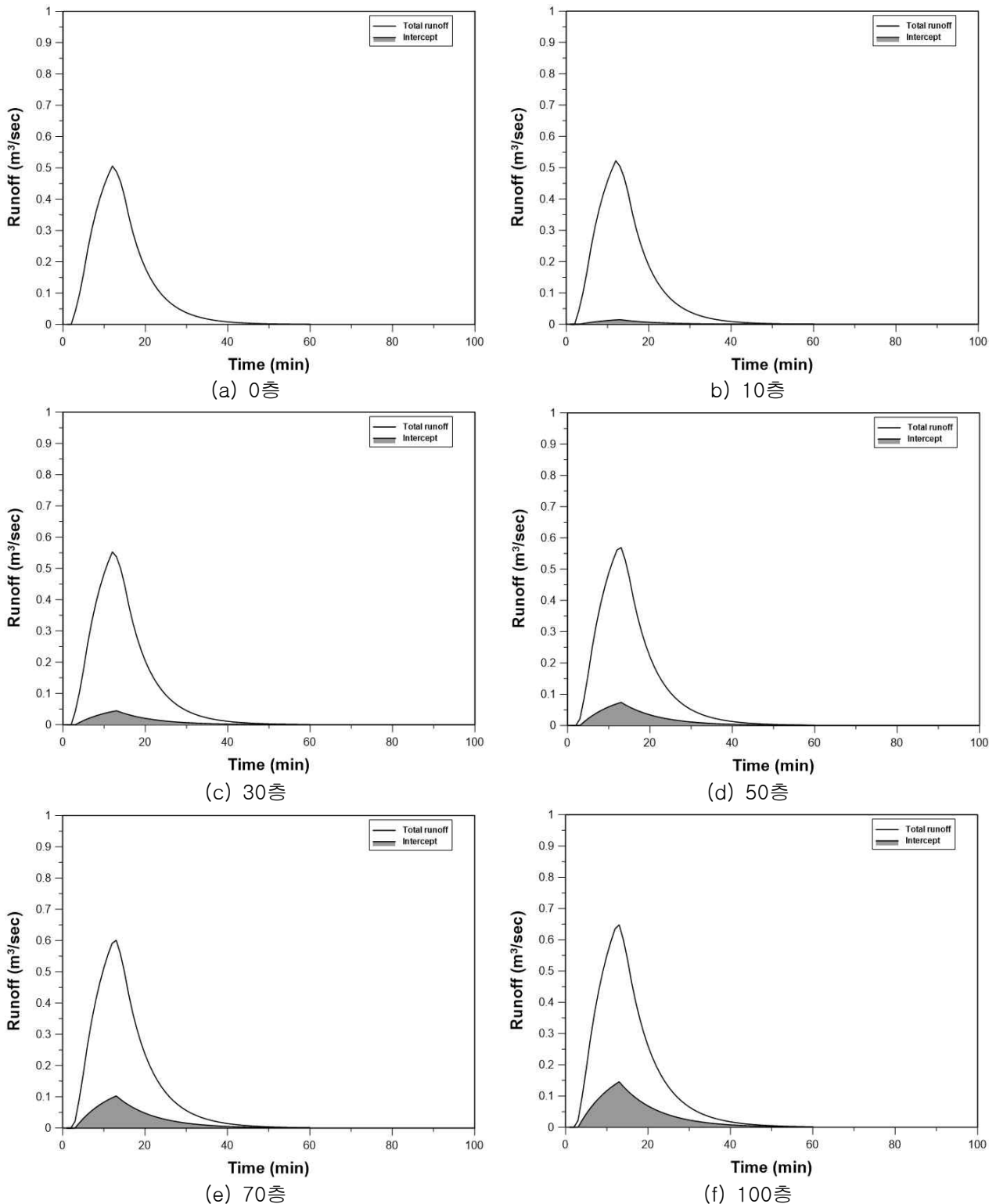
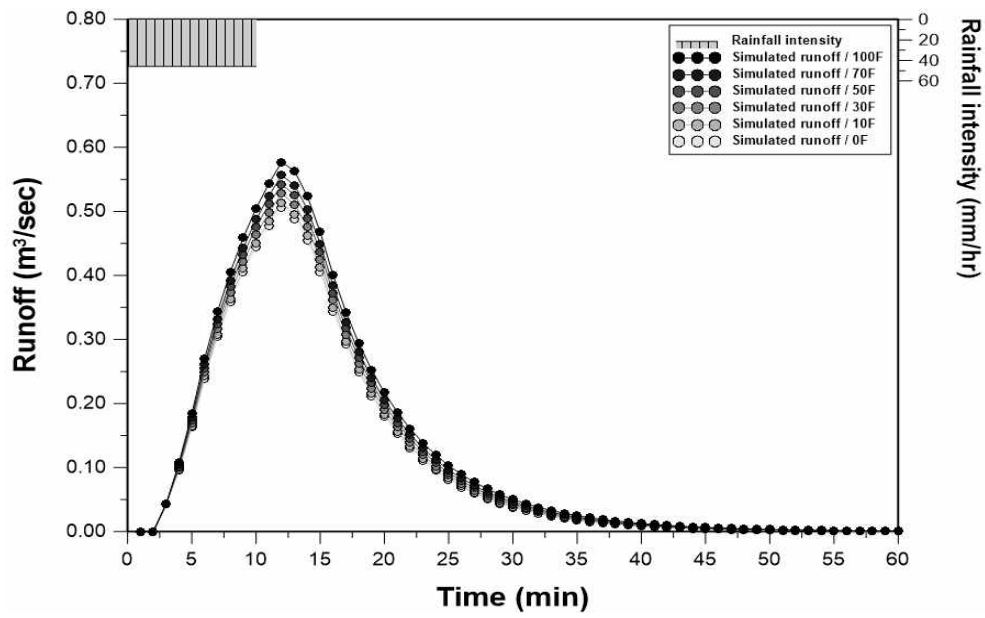
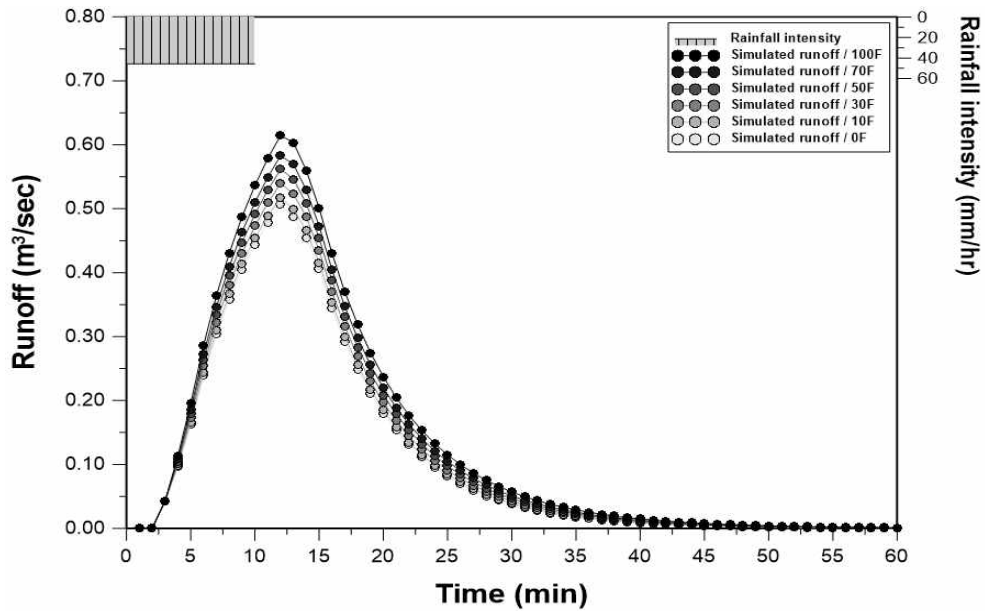


그림 55. Shot noise process 강우-유출해석 결과(건폐율 64%)

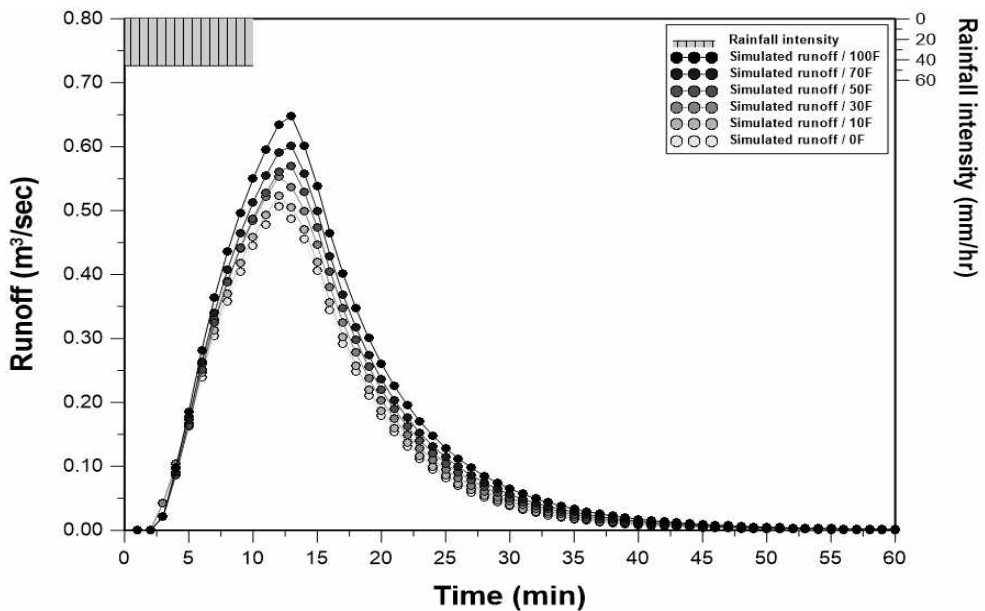
- 다음 그림 56은 shot noise process 기반 강우-유출해석 모의 수행 결과를 나타냄. 전체적으로 도시 유역에 대한 유출수문곡선은 높이와 건폐율에 따라 변화하며, 건물의 규모가 증가함에 따라 첨두유출량이 증가하며, 첨두시간의 지체 또한 확인할 수 있음
- 그림 56은 shot noise process 기반 강우-유출해석 모의 수행 결과를 나타낸 것임. 전체적으로 유출수문곡선은 건물 높이와 건폐율에 따라 변화하며, 건물의 규모와 건폐율이 증가함에 따라 첨두유출량이 증가하며, 첨두시간 또한 지체되는 것을 확인할 수 있음
- 특히, 그림 56(a)와 그림 56(c)을 자세히 살펴보면, 건폐율이 증가할수록 건물 높이에 따른 첨두유출량 증가폭이 커지는 것을 알 수 있음. 본 연구에서는 건폐율에 따라 건물 높이에 따른 첨두유출량이 정량적으로 어떻게 달라지는지 확인하기 위해 건물이 없는 상황에서의 유출수문곡선을 기준으로 첨두유출량의 증가율을 계산하여 비교해보았음



(a) 건폐율 16%



(b) 건폐율 32%



(c) 건폐율 64%

그림 56. 실제 도시유역 대상 Shot noise process 강우-유출해석 결과

- 건물이 들어서지 않은 조건과 비교할 때 건물의 높이 및 설계강우강도의 지속기간, 건폐율에 따른 침투홍수량 및 침투홍수량의 증가율은 표 21과 같이 나타남
- 전반적으로 5분, 10분, 30분 지속기간과 30년 재현기간을 가지는 설계강우강도에 대한 결과를 보았을 때, 침투홍수량은 건물의 규모가 증가함에 따라 증가하는 양상을 보였음. 아울러, 건폐율이 증가하면 침투홍수량의 증가폭이 더욱 커짐
- 예를 들어, 지속기간 10분이고 재현기간이 30년인 설계강우량으로 구한 결과를 보면, 건폐율 64%인 경우 100층 규모의 건물이 들어서면 건폐율 16%인 경우에 같은 높이 건물이 들어서는 경우보다 침투홍수량이 약 12%가량 더 증가함
- 이는 건물 벽면에 의한 차단이 도시구역에서의 강우-유출 과정을 크게 변화시키는 것을 의미함. 건폐율이 높아질수록 강우의 차단에 기여하는 면적이 커지기 때문임

표 21. 건물의 높이 및 설계강우량의 지속기간, 건폐율에 따른 침투홍수량 및 침투홍수량의 증가율

설계강우량의 지속기간(min)	건폐율(%)	층	침투홍수량(cms)	증가율(%)
5	16%	0	0.4189	0.0
		10	0.4254	1.5
		30	0.4377	4.5
		50	0.4499	7.4
		70	0.4617	10.2
		100	0.4792	14.4
	32%	0	0.4189	0.0
		10	0.4289	2.4
		30	0.4478	6.9
		50	0.4663	11.3
		70	0.4845	15.7
		100	0.5111	22.0
	64%	0	0.4189	0.0
		10	0.4329	3.3
		30	0.4587	9.5
		50	0.4841	15.6
		70	0.509	21.5
		100	0.5454	30.2
10	16%	0	0.5061	0.0
		10	0.5136	1.5
		30	0.5281	4.3
		50	0.5424	7.2
		70	0.5564	9.9
		100	0.5771	14.0
	32%	0	0.5061	0.0
		10	0.5177	2.3
		30	0.5398	6.7
		50	0.5617	11.0
		70	0.5832	15.2
		100	0.6149	21.5
	64%	0	0.5061	0.0
		10	0.5224	3.2
		30	0.5529	9.2
		50	0.5692	12.5
		70	0.6009	18.7
		100	0.6477	28.0
30	16%	0	0.4624	0.0
		10	0.4705	1.8
		30	0.4868	5.3
		50	0.503	8.8
		70	0.5191	12.3
		100	0.5432	17.5

	32%	0	0.4624	0.0
		10	0.4749	2.7
		30	0.4998	8.1
		50	0.5247	13.5
		70	0.5494	18.8
		100	0.5863	26.8
	64%	0	0.4624	0.0
		10	0.4799	3.8
		30	0.5144	11.3
		50	0.5338	15.4
		70	0.5681	22.9
		100	0.6194	34.0

2.2 초고층 건물을 고려한 도시유역 취약성 평가

2.2.1 취약성의 개념 및 평가방법

○ 취약성의 개념

- 취약성이란 쉽게 상처, 영향, 공격 등을 받을 수 있는 상태를 의미함
- 취약성은 위험(Hazard), 노출(Exposure)과 함께 위험(Risk)을 평가하는 하나의 요소로 구분되었으며, 최근 취약성의 중요성이 강조되고 학문분야마다 그 개념이 다양하게 정의되어 사용되고 있음



그림 57. 위험 평가의 개념적 틀(de britto et al., 2017)

- 취약성이란 용어는 생태학, 식량안보, 자원관리와 개발, 재난위험관리, 기후변화 등 많은 학문 영역에서 사용되고 있으며 이에 따라 개념과 의미도 다양함
- 취약성 개념은 (1) 취약성을 평가의 출발점, 중간 요소 혹은 결과물로 볼 것인지, (2) 기후변화와 같은 외적인 스트레스 요인 아니면 기근과 같이 바람직하지 못한 결과와 관련하여 정의할 것인지, (3) 시스템의 내재적인 특성인지 아니면 외부 스트레스와 내부적인 대응의 특정 시나리오에 의존하는지, (4) 정적인 개념 혹은 동적인 개념으로 볼 것인지 등에 따라 많은 논의가 있음(Fussel and Klein, 2006)

○ 분야별 취약성 정의

- 취약성의 개념적 정의와 관련된 최근의 논의는 크게 세 가지 학문분야로 구분할 수 있으며, 이와 관련된 학문은 자연재해, 사회보건, 기후변화 분야가 있음
- 자연재해에 따른 위험 관리 분야의 연구에서 취약성 개념은 주로 잠재적인 위험에 노출되어 피해를 입을 수 있는 정도를 의미함. 보다 구체적으로는 시스템 내부의 대처, 회복, 적응 관련 능력과 외부의 스트레스, 노출, 교란 등이 결합된 결과로 시스템이 피해에 민감한 정도로 정의할 수 있음

- 사회보건과 같이 사회과학 분야에서는 사회의 구조적인 측면에 집중하여 취약성 개념을 활용함. 이 분야에서는 하나의 사회 또는 집단이 가지는 사회, 경제 및 정치적 요인들에 집중하며, 다양한 분야의 외부 스트레스에 대한 인간의 대응 능력과 연관 지어 취약성을 설명함. 사회과학적 분야에서는 취약성을 현재의 사회, 경제, 정치적 조건들을 종합한 사회 또는 집단의 상태와 이 상태에 해로운 영향을 미치는 외부 스트레스의 노출도가 결합된 보건수준으로 정의됨
- 기후변화와 관련된 분야에서의 취약성은 노출도와 민감도를 결합한 개념임. 대표적으로 IPCC에서는 취약성을 특정 시스템이 기후 변동이나 극한 기후로 인해 야기되는 현상들을 수용할 수 없고 대처할 수 없는 정도로 정의함. 구체적으로, 취약성은 전술한 현상들에 대해 노출(Exposure)된 정도와 시스템의 민감도(Sensitivity), 그리고 적응력(Adaptation capacity)이 결합된 함수로 구성됨. 아래 표 22는 기후변화 관련 분야에서의 취약성 정의를 정리한 표임

표 22. 취약성 정의(Han et al., 2007)

출처	정의
IPCC	기후변동과 극한 기후 상황을 포함한 기후변화의 부정적 영향에 대한 시스템의 민감도 혹은 대처할 수 없는 정도
UNDP	기후변동이나 스트레스에 대한 노출과 이에 대한 대처, 회복, 적응능력에 따른 노출 단위의 위협에 대한 민감도
UKCIP	특정 위험상황에서 야기되는 피해의 범위. IPCC 정의를 바탕으로 취약성은 시스템의 민감도 및 적응능력에 의해 결정됨
UNFCCC	사회, 인구, 생물종, 생태계, 지역, 농업시스템이나 이외의 다른 시스템이 기후 변화의 부정적 영향에 민감한 정도 혹은 대처할 수 없는 정도
UN/ISDR	위험의 영향에 대한 지역사회의 민감도를 증가시키는 물리적, 사회적, 경제적, 환경적 요소에 의해 결정되는 일련의 조건 혹은 과정
Australian Greenhouse Office	자연계와 인간 사회가 기후변화, 기후변동, 극한기후 상황이 야기하는 부정적 영향에 대처할 수 없는 정도, 시스템이나 사회의 민감도, 적응능력뿐 아니라 기후변화에 의해 좌우됨
E. Tomkins (2005)	개인이나 집단, 시스템이 위험이나 스트레스에 노출되어 나타나는 위험과 그에 대한 대처, 회복, 적응능력에 대한 민감도
Pew Center (2004)	기후변화에 대한 시스템의 민감도 측정지표로, 시스템의 노출, 민감도, 적응능력의 함수임
U.S. 에너지부	기후변화에 대한 시스템 혹은 과정의 민감도(기후 투입 변화에 따른 결과 혹은 특성의 변화 정도)와 시스템의 적응성(변화가 새로운 조건을 활용할 수 있는 정도)
Blaikie et al. (1994)	자연재해의 영향에서 회복할 수 있는 정도를 포함한 개인이나 집단의 노출
Kelly and Adger(2000)	개인이나 사회집단이 생계와 복지에 영향을 주는 외부적 스트레스에 대처하고 회복하며 적응할 수 있거나 없는 능력
Brooks (2003)	리스크는 기후위해와 취약성의 함수이며, 여기서 취약성은 기후위해와 별개로 시스템 내에 존재하는 상태로서 사회적 취약성과 동일한 의미로 사용

○ 취약성 평가방법

- 일반적으로 시범 기초지자체 취약성 평가를 위한 절차는 취약성 평가 방법론 검토부터 시범 취약성 평가 및 결과의 도시화까지 5단계로 이루어짐
 - (1) 취약성 평가 방법론 검토
 - (2) 중점분야별 세부항목 선정
 - (3) 세부항목별 대응변수 선정
 - (4) 대응변수별 표준화 및 가중치 선정
 - (5) 시범지역 중점분야 세부항목별 취약성 평가 및 도시화

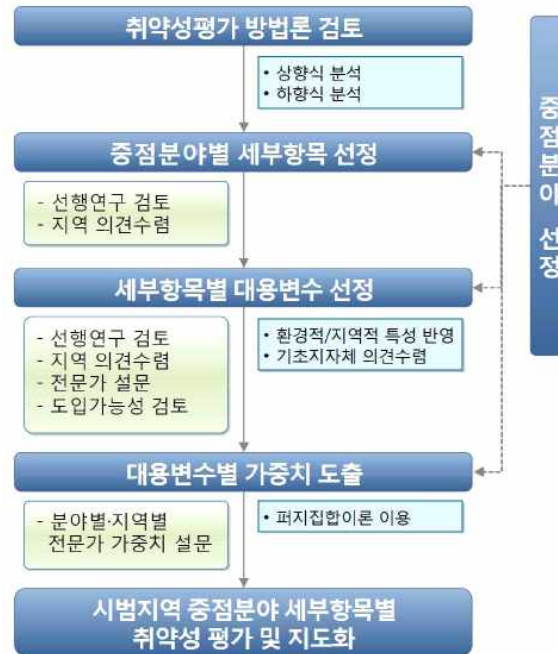


그림 58. 취약성 평가 절차(국립환경과학원, 2012)

- 취약성 평가의 방법론은 연구마다 적용되는 방법과 도출되는 식이 다름. 이에 취약성 평가를 적용하는 대상유역에 알맞게 성격이 다른 여러 요인을 고려한 함수식을 도출해야 함. 취약성을 평가하는 방법으로 크게 하향식, 상향식 평가방법으로 분류될 수 있음. 하향식 평가방법은 기존의 경험적인 자료를 바탕으로 적용 권역의 미래 기후 시나리오를 적용하는 방법으로서 기후변화와 영향과의 관련성을 정량적으로 제시할 수 있음. 상향식 평가방법은 지역의 기후변화 취약성을 설명할 수 있는 각종 사회·경제적 지표를 활용하여 민감도, 노출도 및 적응도를 정성적 또는 정량적으로 분석함
- 중점분야별 세부항목의 선정은 세부항목 후보 도출, 세부항목 후보의 타당성 검토, 세부항목 최종 선정의 절차를 거침. 중점분야는 시범지역별 의견조사지 작성, 지자체 의견조사 시행 및 회신,
- 관계기관 협의 및 최종안 선정, 최종 의견수렴, 중점분야 확정의 5단계 절차를 바탕으로 선정함
- 세부항목별 대응변수의 선정은 기존 연구 검토 및 대상지역 의견수렴 등을 통해 세부 대응변수 후보를 도출하고, 대응변수의 적용 가능성을 검토하여 지역적 특징을 반영한 여러 세부 대응변수를 추출함
- 대응변수별 표준화 및 가중치 선정 부문에서는 일반적으로 사용되는 표준화 식, Z-score 방법 등을 이용하여 자료의 표준화를 수행함. 일반 표준화 식은 다양한 대응변수들을 0~1의 범위를 갖는 값으로 표준화함. Z-score 방법은 모든 자료를 평균이 0, 표준편차가 1이 되도록 만드는 방법이며, 이 방법은 자료의 수치가 그 분포의 평균으로부터 표준편차의 몇 배 정도나 떨어져 있는지를 표준화된 확률변수인 Z값으로 나타냄
- 가중치의 결정은 전문가 의견 수립을 기반한 설문조사, 엔트로피 기법, AHP 기법 등을 활용하여 수행함
- 위와 같은 절차를 거쳐 도출된 취약성 지수는 그 크기가 클수록 취약함을 나타내며, 취약성 지수에 따라 등급을 매기거나 지도에 도시화하여 공간적 분포를 확인함으로써 평가함

2.2.2 초고층 건물로 인한 수재해 취약성 증가 평가 이론

- 초고층 도시유역은 일반 도시유역과 확연히 구분되는 특성이 있으므로 일반 도시유역에 적용되었던 수재해 취약성 평가 또한 다르게 평가되어야 함. 예를 들어, 수재해 취약성을 평가할 때에 초고층 건물의 개수와 규모를 고려하는 작업이 필수적으로 수반되어야 함
- 본 연구에서는 기존 도시유역 수재해 평가 방법 검토 및 초고층 건물의 영향을 반영할 방법을 모색하고, 초고층 건물로 인해 수재해 취약성이 얼마나 증가하는지 평가하였음
- 본 연구에서 수행한 초고층 건물로 인한 수재해 취약성 평가는 수재해 취약성 평가를 위한 대상지역 선정 및 자료 수집, 대상지역의 설계강우량 산정, 초고층 건물을 고려한 설계홍수량 산정, 수재해

취약성 평가 4단계로 구성되어있으며, 다음 그림 59는 본 연구의 취약성 평가 흐름도를 나타냄

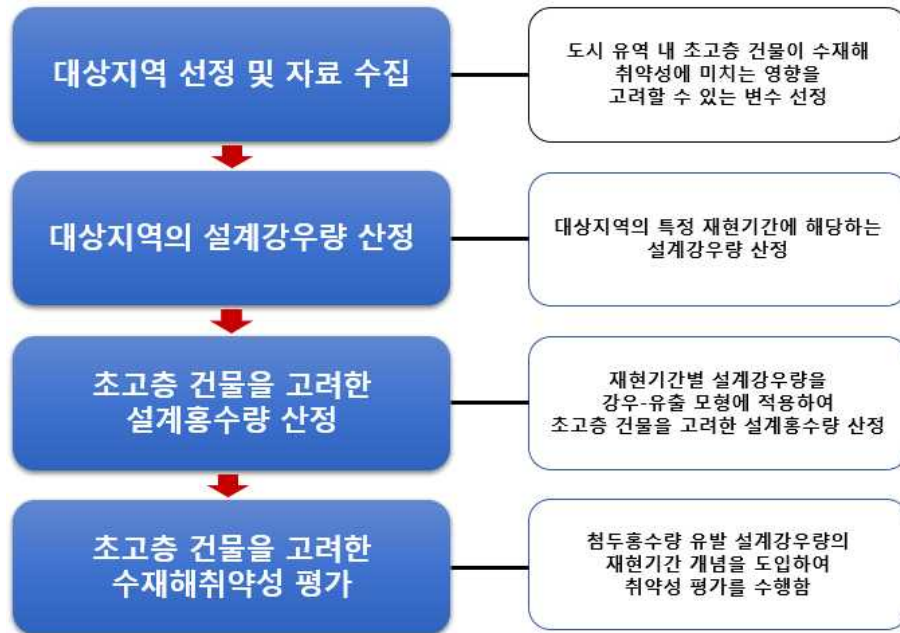


그림 59. 본 연구에서의 취약성 평가 절차

○ 대상지역 선정 및 자료 수집

- 본 연구에서는 도시 유역 내 초고층 건물이 수재해 취약성에 미치는 영향을 평가하기 위해 초고층 건물이 밀집된 도시지역을 대상지역으로 선정하였으며, 초고층 건물이 수재해 취약성에 미치는 영향을 평가하기 위한 변수로 초고층 건물 높이, 건물 벽 면적, 건폐율을 변수로 선정함

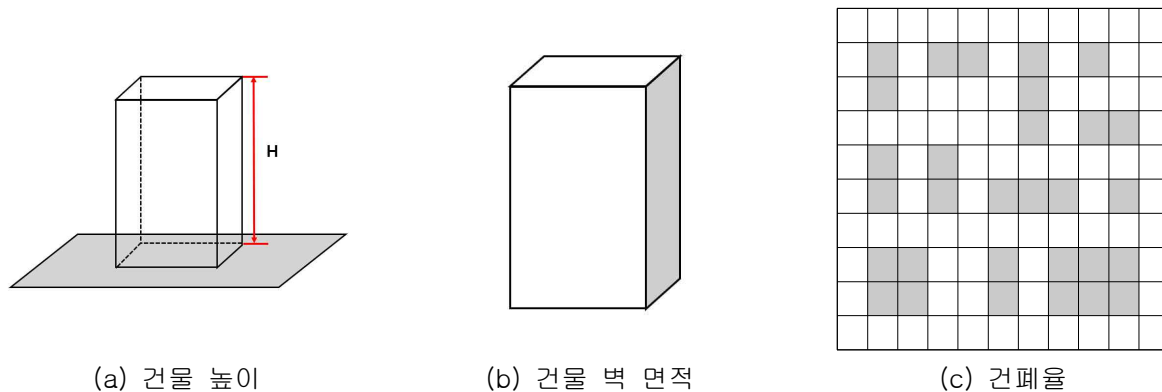


그림 60. 수재해 취약성 평가를 위한 변수 선정

○ 설계강우량 산정

- 설계강우량은 이수, 치수를 위한 수공구조물의 설계 및 하천기본계획 수립 등에서 가장 중요한 기준이며, 해당 구조물의 설계 및 하천개수 계획의 빈도와 지속기간에 해당하는 설계강우량을 산정하여 설계홍수량을 결정함
- 대상지점의 설계강우량은 30년 이상의 강우기록 중 연도별 최대강우량 자료에 대한 빈도해석으로 산정하게 되며, 그 절차는 다음 그림 61과 같음

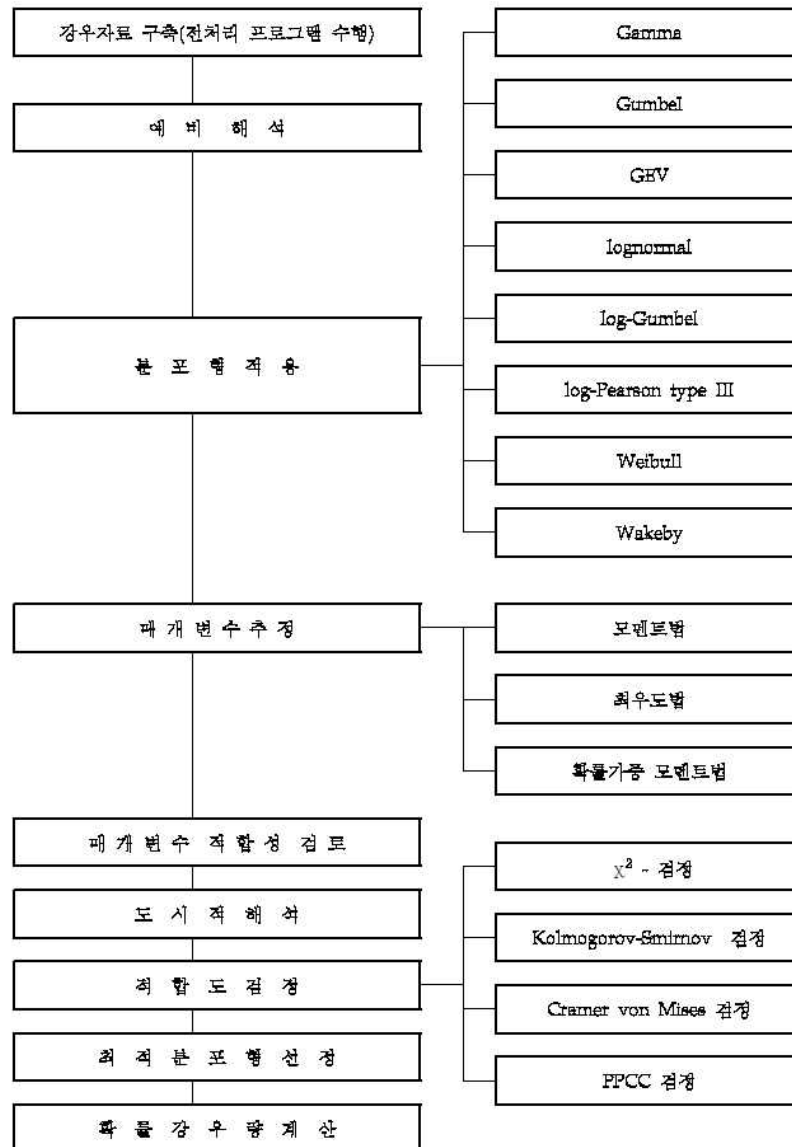


그림 61. 빈도해석 흐름도(국토해양부, 2011)

- 임의의 지속기간에 대한 확률강우량이 없는 경우에는 강우강도식을 적용하며, 강우강도식 형태로는 Talbot형, Sherman형, Japanese형이 있음

$$\text{Talbot형: } I = \frac{a}{t+b} \quad (28)$$

$$\text{Sherman형: } I = \frac{c}{t^n} \quad (29)$$

$$\text{Japanese형: } I = \frac{d}{\sqrt{t+e}} \quad (30)$$

- 여기서, I 는 최대강우강도(mm/hr), t 는 강우지속기간(min, hour)이며, a, b, c, d, e 와 n 은 지역에 따라 다른 값을 가지는 지역상수를 나타냄
- 국토교통부에서는 전대수 다항식 형태의 확률강우강도식을 유도함(식 (31)). 이는 전대수지 상에서 직선에 근접한 곡선형을 나타내는 확률강우강도식을 지속시간에 따른 확률강우강도를 대수화하여 고차 다항식에 적합시키는 방법임
- 이 식은 비선형 적합도가 높아 확률강우강도식을 지속기간별로 단기간, 장기간의 구분 없이 전 지속기간에 걸쳐 하나의 곡선식을 표현이 가능한 장점이 있음

$$\ln(I) = a + b \ln(t) + c(\ln(t))^2 + d(\ln(t))^3 + e(\ln(t))^4 + f(\ln(t))^5 + g(\ln(t))^6 \quad (31)$$

- 여기서, I 는 강우강도(mm/hr), $\ln$ 은 자연대수, a, b, c, d, e, f, g 는 6차 다항식의 계수이고 t 는 지속기간(hour)임. 지속기간별로 변화가 크지 않으면 4차 다항식으로도 표현할 수 있지만, 지속기간 전반에 걸쳐 높은 정확도를 위해 6차 다항식으로 유도함

○ 설계홍수량 산정

- 홍수량 산정방법은 홍수량 빈도해석 방법과 강우-유출관계 모형에 의한 방법으로 나눌 수 있음. 홍수량 자료가 충분히 계측된 유역에 대해서는 연최대홍수량 자료 계열을 작성 후 홍수빈도분석을 하여 설계홍수량을 산정함. 반면에 홍수량 자료가 없는 미계측 유역에서는 설계강우량을 산정하고 이를 강우-유출 모형에 적용하여 설계홍수수문곡선을 작성하고 첨두유출량을 결정함
- 본 연구에서는 설계홍수량을 산정하기 위한 강우-유출 모형으로 초고층 건물로 인한 유출경로 왜곡 실험 검증에 적용한 shot noise process 기반 강우-유출 모형을 적용함

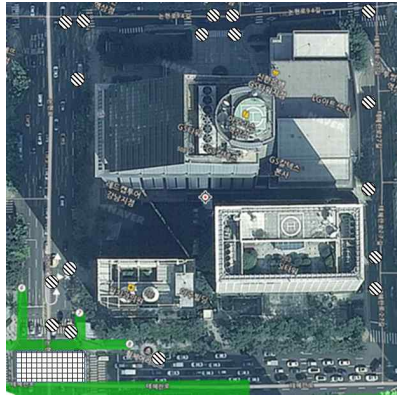
○ 초고층 건물로 인한 수재해 취약성 평가

- 수재해 취약성 평가는 첨두홍수량 유발 설계강우의 재현기간 개념을 적용하여 수행함. 초고층 건물의 영향이 없는 경우의 첨두유출량과 초고층 건물의 영향이 있는 경우의 첨두유출량을 비교하여 동일한 강우조건에서 초고층 건물의 영향으로 인해 첨두홍수량 유발 설계강우의 재현기간이 증가하였는가를 판단하였음
- 이를 위해 먼저 건물이 없는 상황에서 설계 강우량의 재현기간에 따른 첨두홍수량을 산정하고, 이를 “기준 재현기간”이라 정의하였음. 이후 건물을 고려했을 때 증가하는 첨두 홍수량을 기준 재현기간을 이용하여 정량화하였음. 예를 들어, 30년 빈도의 설계 강우량으로 강우-유출 해석을 수행한 결과로 초고층 건물로 인해 첨두 홍수량이 $X \text{ m}^3/\text{s}$ 로 계산되었다면, 이를 재현기간으로 환산하기 위해 기준 재현기간이 $X \text{ m}^3/\text{s}$ 인 강우-유출 해석 결과의 설계 강우량을 찾았음. 이에 해당하는 설계 강우량의 재현기간이 $X+a$ 년이라면, 초고층 건물로 인해 재현기간이 a 만큼 증가하고, 이로 인한 취약성이 증가할 것으로 해석할 수 있음
- 이러한 평가 방법을 통해 초고층 건물의 영향으로 인한 대상 지역의 침수 발생 여부를 판단할 수 있음. 하수도 설계기준(2017)에 따르면 하수관로의 설계강우는 10~30년 빈도를 원칙으로 하고 있음. 따라서 대상 지역의 초고층 건물로 인해 첨두 홍수량의 재현기간이 30년 이상으로 증가하게 되면 대상 지역의 하수관거의 통수능력을 넘어서는 유출량이 발생하게 되어 침수가 발생할 위험이 있음

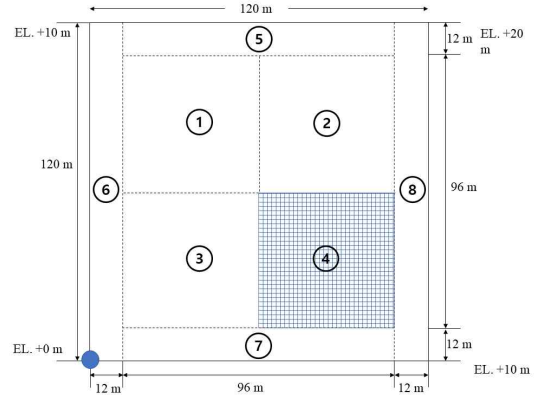
2.2.3 실제 도시유역에 대한 수재해 취약성 증가 평가

○ 대상지역 선정 및 자료 수집

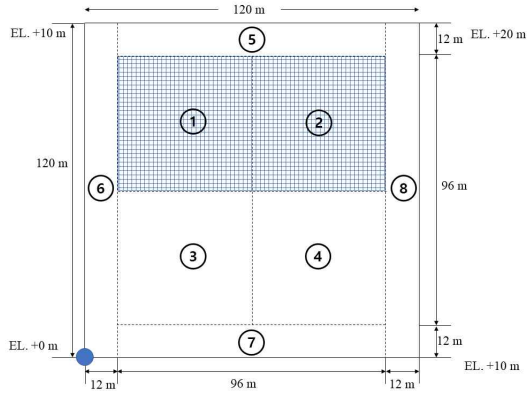
- 본 연구에서는 초고층 건물을 고려한 수재해 취약성 분석을 위해 앞서 초고층 건물로 인한 유출경로의 왜곡을 평가했던 대상 지역과 동일한 역삼역 인근 지역을 대상지역으로 선정하였으며, 초고층 건물로 GS 타워를 선정함
- 다음 그림 62(a)는 역삼역 인근에 위치한 GS 타워의 위성 사진임. 그림에서 은 맨홀을, 은 유역 출구부를 의미함



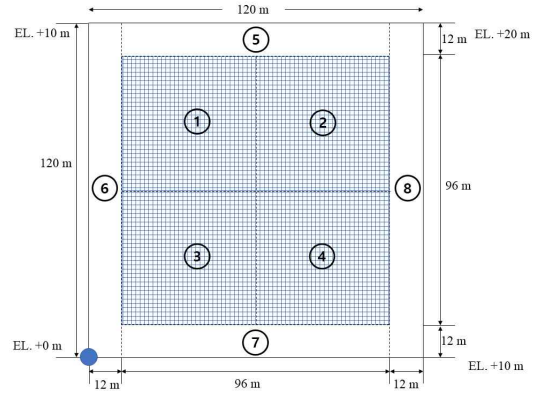
(a) 역삼역 GS 타워 block



(b) 소유역 분할 결과(건폐율 16%)



(c) 소유역 분할 결과(건폐율 32%)



(d) 소유역 분할 결과(건폐율 64%)

그림 62. 수재해 취약성 분석을 위한 대상지역 선정 결과 및 소유역 분할 결과

맨홀 :

유역 출구 :

○ 서울지점 설계강우강도 및 재현기간별 풍속 결정

- 본 연구에서는 국토교통부에서 제공하는 서울 지점의 재현기간 따른 확률강우량 자료를 적용함. 다음 그림 63은 서울지점의 IDF 곡선을 나타내며, 표 23은 서울지점의 재현기간별, 지속기간별 확률강우량을 정리한 표임. 표 24는 강우강도를 정리한 것임
- 본 연구에서는 초고층 건물로 인한 수재해 취약성 평가를 위해 서울 지점의 재현기간 30년, 지속기간 10분에 해당하는 설계강우량을 적용하였음. 재현기간 30년의 설계강우량을 적용한 이유는 초고층 건물로 인해 증가한 유출량이 대상지역 하수관로의 통수능력을 넘어서는 유출량이 발생하게 되는지 확인하기 위해서임. 하수도설계기준(2017)에서는 하수관로의 설계강우량의 재현기간을 10~30년으로 제안하고 있음

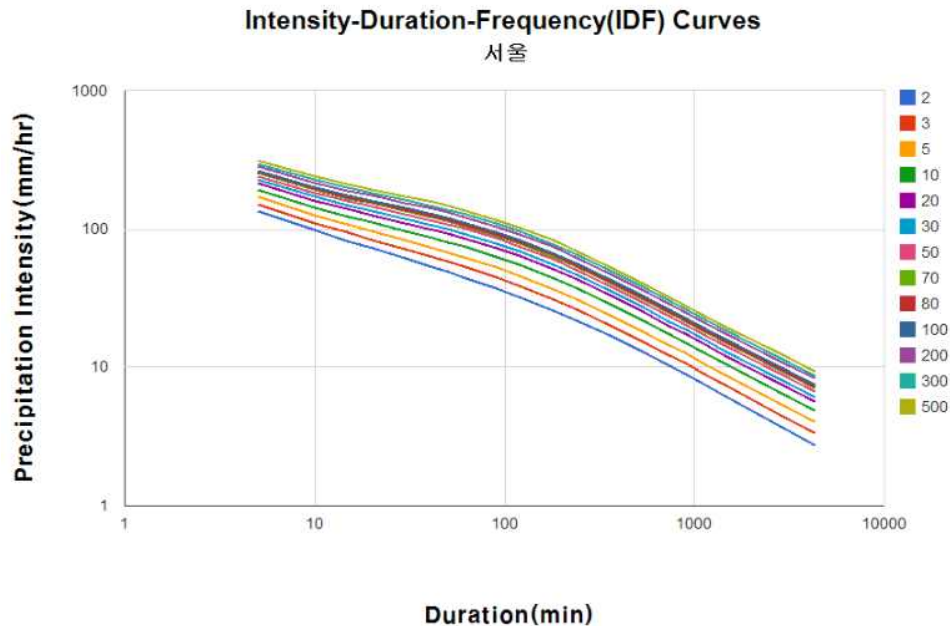


그림 63. 서울지점 IDF 곡선

표 23. 서울지점의 재현기간별, 지속시간별 확률강우량(단위: mm)

지속시간 (min)	재현기간 (yr)						
	10	20	30	50	70	80	100
5	15.7	17.5	18.5	19.8	20.7	20.9	21.4
10	23.4	26.2	27.8	29.9	31.2	31.7	32.5
30	47.6	54.2	58.1	62.9	66.0	67.3	69.4

표 24. 서울지점의 재현기간별, 지속시간별 확률강우강도(단위: mm/hr)

지속시간 (min)	재현기간 (yr)						
	10	20	30	50	70	80	100
5	188.1	209.6	221.5	237.1	247.8	251.4	257.4
10	140.3	157.1	166.9	179.2	187.2	190.3	195.3
30	95.2	108.5	116.2	125.9	132.1	134.6	138.7

- 본 연구에서는 설계 강우량에 대응하는 풍속을 결정하기 위해 1988년부터 2017년까지 관측된 강우사상 자료를 이용함. 각 강우사상 자료는 서울지점 종관기상관측장비(ASOS)로 관측된 강우자료를 기준으로 만들어졌으며, 강우사상을 정의하기 위한 무강우기간은 10 hr이 이용되었음. 설계 강우량에 대응하는 풍속은 1988년부터 2017년까지 관측된 강우사상 중 설계 강우강도와 동일한 강우사상들의 풍속을 평균하여 결정하였음

○ 대상지역의 설계홍수량 산정

- 취약성 평가를 위한 대상지역의 설계홍수량은 앞선 초고층 건물로 인한 유출경로의 왜곡 평가에서의 강우-유출 모의 결과를 적용함. 초고층 건물로 인한 유출경로의 왜곡 평가에서는 지속시간 10분 재현기간 30년에 해당하는 설계강우강도는 166.9 mm/hr이며, 이 값을 shot noise process 기반 강우-유출 모형의 적용하여 설계홍수량을 산정하였음

○ 초고층 건물을 고려한 취약성 평가

- 본 연구에서는 초고층 건물로 인한 침투홍수량의 증가 정도를 취약성 증가 요인으로 보았음. 따라서

첨두홍수량을 유발하는 강우의 재현기간과 기존 유역에서 동일한 유량을 유발하는 강우의 재현기간을 비교하면서 취약성의 증가 정도를 알 수 있음

- 표 25는 초고층 건물 형태 및 설계강우량의 지속기간에 따른 첨두홍수량과 그에 해당하는 재현기간을 정리한 표임
- 전체적으로 도시 유역에 대한 유출수문곡선은 높이와 건폐율에 따라 변화하며, 건물의 규모가 증가함에 따른 첨두시간의 지체 또한 확인할 수 있음
- 먼저 지속기간이 10분이고 재현기간이 30년인 설계강우량을 이용했을때 다음과 같은 특성을 확인할 수 있음. 건폐율 16%인 도시유역의 경우, 먼저 100층 규모의 초고층 건물이 있는 경우의 첨두홍수량은 건물이 없는 경우보다 약 14% 증가한 것으로 나타남. 이는 80년 빈도 홍수량을 초과하는 값임. 70층 규모의 건물에 의해 왜곡된 홍수량은 60년 빈도, 30층 규모의 건물로 왜곡된 홍수량은 40년 빈도 홍수량에 해당하는 수준으로 확인됨
- 다음으로, 건폐율 32% 도시유역 모의 결과, 다음과 같은 특성을 확인할 수 있음. 100층 규모의 건물이 들어서는 경우, 100년 빈도 홍수량을 넘어서는 수준으로 홍수량이 증가함. 50층 규모의 건물이 들어서는 경우, 60년 빈도 홍수량에 해당하는 수준으로 증가하며, 이는 건폐율 16%보다 높은 수준의 왜곡임. 30층 규모의 건물이 들어서는 경우, 30년 빈도 강우강도가 50년 빈도 홍수량을 유발하는 것으로 나타남
- 건폐율 64% 도시유역 모의 결과, 다음과 같은 특성이 확인됨. 70층 건물에 의한 홍수량 왜곡 정도는 30년 빈도 강우량을 100년 빈도 홍수량으로 증가시키는 것으로 나타남. 30층 규모의 건물이 들어서는 경우의 홍수량 또한 50년 빈도 홍수량에 해당하는 수준으로 왜곡이 발생하여 건폐율이 증가함에 따라 홍수량이 급격히 증가함을 확인할 수 있음
- 재현기간이 30년, 지속시간 5분, 30분인 설계강우강도를 이용한 강우-유출 해석 결과 또한 지속시간이 10분인 설계강우강도를 이용한 결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 확인되었음

표 25. 30년 빈도 설계강우강도 적용시 첨두홍수량의 변화 및 취약성 평가 결과

설계강우강도 지속기간(min)	건폐율(%)	층	첨두홍수량(cms)	재현기간
5	16	0	0.4189	30년
		10	0.4254	30년
		30	0.4377	40년
		50	0.4499	50년
		70	0.4617	60년
		100	0.4792	90년
	32	0	0.4189	30년
		10	0.4289	30년
		30	0.4478	50년
		50	0.4663	70년
		70	0.4845	90년
		100	0.5111	100년 이상
	64	0	0.4189	30년
		10	0.4329	30년
		30	0.4587	60년
		50	0.4841	90년
		70	0.5090	100년 이상
		100	0.5454	100년 이상
10	16	0	0.5061	30년
		10	0.5136	30년
		30	0.5281	40년
		50	0.5424	50년
		70	0.5564	60년
		100	0.5771	80년
	32	0	0.5061	30년

		10	0.5177	30년
		30	0.5398	50년
		50	0.5617	60년
		70	0.5832	80년
		100	0.6149	100년 이상
	64	0	0.5061	30년
		10	0.5224	30년
		30	0.5529	50년
		50	0.5692	70년
		70	0.6009	100년 이상
		100	0.6477	100년 이상
30	16	0	0.4624	30년
		10	0.4705	30년
		30	0.4868	40년
		50	0.503	50년
		70	0.5191	60년
		100	0.5432	90년
	32	0	0.4624	30년
		10	0.4749	30년
		30	0.4998	50년
		50	0.5247	60년
		70	0.5494	100년 이상
		100	0.5863	100년 이상
	64	0	0.4624	30년
		10	0.4799	40년
		30	0.5144	60년
		50	0.5338	70년
		70	0.5681	100년 이상
		100	0.6194	100년 이상

- 이러한 결과를 종합해보면 초고층 건물이 도시구역의 유출량 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 나타남. 10층 이상의 고층 건물을 고려하는 경우만 해도 설계홍수량의 재현기간이 증가하는 것으로 나타남. 50층 이상의 고층 건물을 고려하면 설계홍수량의 재현기간은 50년 이상의 값으로 계산되었으며, 100층 이상의 초고층 건물을 고려하는 경우에는 설계홍수량의 재현기간이 모두 90년 이상으로 산정되었음.
- 현재 하수도 설계기준에서 제시하는 하수관거의 설계기준은 재현기간 10~30년의 설계강우량임. 초고층 건물이 위치한 도시 구역에서 재현기간 100년의 설계강우량이 발생하면 하수관거의 통수능력을 넘어서는 유출량이 발생하게 되어 침수가 발생할 위험이 있음. 따라서 초고층 선물이 위치한 도시 지역의 수공구조물 설계 시에는 초고층 건물의 개수와 규모를 고려하는 작업이 필수적으로 수반되어야 할 것으로 판단됨
- 추가로 초고층 건물로 인한 취약성 평가 곡선을 도시하고, 그 결과를 분석하였음. 30년 빈도 강우강도 적용 결과를 기준으로 초고층 건물의 층수 증가에 따른 침두유출량 재현기간 증가 정도를 토대로 도시구역의 취약성을 판단하게 됨. 취약성 지표는 I~Ⅳ의 4개로 나뉘며, 각 지표는 일정 범위의 재현기간에 해당함. 취약성 지표는 표 26과 같이 정리됨

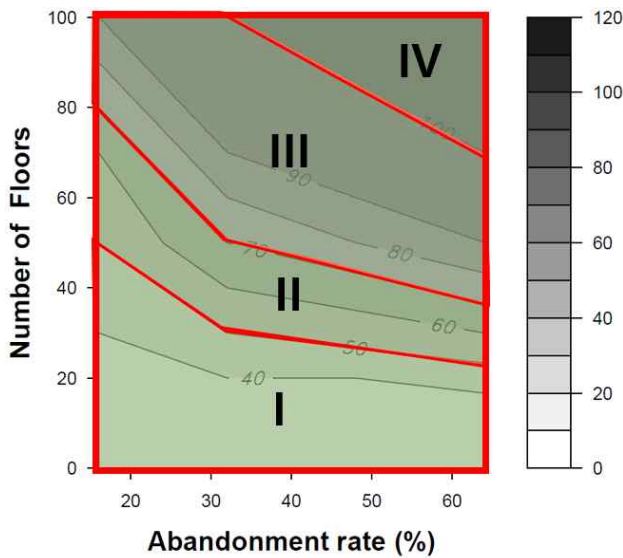
표 26. 취약성 지표(30년 빈도 재현기간 기준)

No.	취약성 지표	해당 재현기간 범위
1	I	30년~50년
2	II	50년~70년
3	III	70년~100년
4	IV	100년 이상

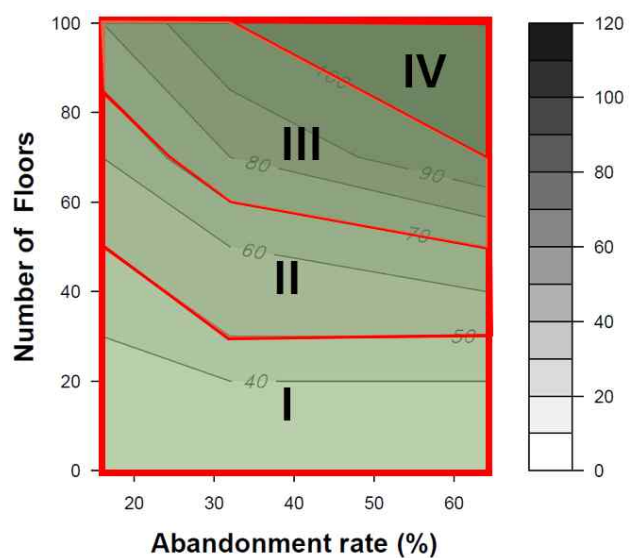
- 위의 지표로 구분한 취약성 평가 곡선은 그림 64와 같음. 지속시간과 관계없이 유사한 경향으로

곡선이 도시되었음. 동일한 층수의 건물이 있는 경우, 건폐율이 증가할수록 취약성이 증가하게 됨. 예컨대 그림 64(b)에서 40층의 건물이 1개 들어서면(건폐율 16%) 취약성 I에 해당함. 건폐율이 64%로 증가하게 되면 취약성 II로 증가하게 됨. 건폐율이 일정한 경우, 건물의 층수가 증가할수록 취약성 또한 증가함. 건폐율이 32%인 경우, 40층 건물은 취약성 II에 해당하지만, 80층으로 증가하게 되면 취약성 III으로 증가하게 됨

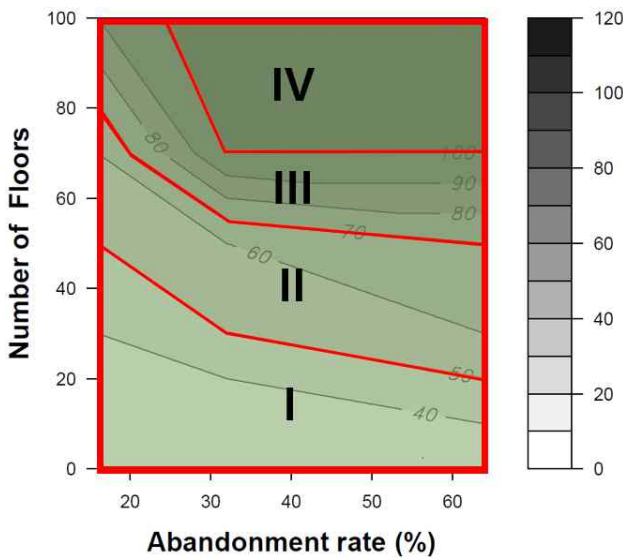
- 취약성 곡선을 이용하여 건폐율과 건물의 층수가 도시구역의 취약성에 미치는 영향을 비교하면, 건폐율의 증가보다는 건물의 층수가 취약성에 더 민감하게 영향을 미치는 것으로 나타남. 예를 들어, 그림 64(c)에서 건폐율이 40%인 경우 건물의 높이가 20층일 때는 취약성 I, 40층일 때는 취약성 II, 60층일 때는 취약성 III, 80층 일 때는 취약성 IV로 평가되는 것을 확인할 수 있음. 즉, 건물 높이에 따라 취약성 지표가 최저 단계에서 최고 단계까지 증가할 수 있음을 알 수 있음



(a) 지속시간 5분



(b) 지속시간 10분



(c) 지속시간 30분

그림 64. 초고층 건물로 인한 취약성 평가 곡선

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

본 연구는 총 2개 연도에 걸쳐 수행하는 것으로 계획되었고, 연차별 연구 목표에 따른 연구 내용과 달성도를 정리하여 나타내면 다음과 같음

연차별 성과 목표	단계 성과 목표	성과점검기준				
		개발 내용	목표치	평가 방법	달성도(%)	가중치
초고층 건물에 의한 강우-유출 과정의 왜곡 정도 평가 방법론	초고층 건물 벽면으로 인해 차단되는 빗물의 양 추정	차단되는 빗물의 양 추정 방법 개발	방법 개발	빗물 차단량 추정 방법론 설명 자료, 빗물차단량 추정 방법론 관련 논문	100	10
		실험을 통한 추정 방법 검증	방법 검증	벽면 부착형 우량계 제작 결과 보고서, 빗물수집장치제작결 과보고서	100	15
	초고층 건물 벽면에 의해 변화되는 유출 경로 파악	변화되는 유출 경로 추정 방법 개발	방법 개발	유출 경로 추정 방법론 관련 논문	100	10
		실험을 통한 추정 방법 검증	방법 검증	초고층 도시모형 도면	100	15
초고층을 고려한 유출 해석 및 취약성 평가	초고층 건물로 인한 강우-유출 과정의 왜곡 정도 평가	강우-유출과정의 왜곡 정도 평가 및 정량적 결과 (% 단위) 산출	왜곡 정도에 대한 정량적 수치 제시	강우-유출과정의 왜곡 정도 평가 관련 논문 및 학술발표	100	17.5
		기존 강우-유출해석 결과와 비교	기존 결과와의 차이	기존 강우-유출해석 결과와 비교 결과가 수록된 논문	100	7.5
	초고층 건물로 인한 수재해 취약성 증가 평가 및 대응	취약성 증가 평가 및 정량적 결과(% 단위) 결과 산출	취약성 증가량에 대한 정량적 수치 제시	취약성 증가 평가 관련 논문 및 학술발표	100	17.5
		기존 취약성 평가 결과와 비교	기존 결과와의 차이	기존 취약성 평가 결과와 비교 결과가 수록된 논문	100	7.5
계						100

2. 관련 분야 기여도

- 초고층 건물에서 진행되는 수문순환 과정의 규명은 도시 수문순환 해석을 더욱 정교하게 하며, 기존에 고려하지 못했던 건물 벽면에서의 차단, 유출의 영향을 포함하는 수문해석 모형의 개발에 직접 활용됨
- 초고층 건물로 인한 강우-유출 과정의 왜곡 정도를 파악하는 방법론은 도시의 물순환 왜곡을 최소화하는 방향으로 도시를 설계하는 과정에 활용되어, 미래 친환경적인 도시개발에 기여할 수 있음
- 3차원적 수문순환 해석이 가능한 수문해석 방법은 초고층 도시구역의 홍수저감 계획을 정교하게 수립하는데 기여하여, 사회적 비용의 감소효과를 가져올 수 있음
- 본 연구에서 개발하는 수재해 취약성 평가 방법은 기존의 방법의 정확도를 개선할 수 있으며, 보다 수재해로부터 안전한 도시 방재시스템을 구축하는데 기여할 수 있음

제5장. 연구개발성과의 활용계획

○ 본 연구를 통해 창출한 성과들은 다음과 같이 활용될 수 있음

- 초고층 건물에서 진행되는 수문순환 과정의 규명은 도시 수문순환 해석을 더욱 정교하게 하며, 초고층 건물에 의해 차단되는 강우와 왜곡되는 유출 경로를 고려하여 강우-유출 해석을 수행하는 모형 개발에 직접 활용됨
- 초고층 건물로 인한 강우-유출 과정의 왜곡 정도를 파악하는 방법론은 도시 지역의 수재해 취약성 지도를 구축하는데 이용될 수 있으며 친환경 도시 설계 과정에 활용되어 미래 지속가능한 도시 구축에 기여할 수 있음
- 3차원적 수문순환 해석이 가능한 강우-유출 해석 방법은 초고층 건물이 존재하는 도시유역의 홍수저감 계획을 정교하게 수립하는데 기여하여, 수재해로 인한 사회적 비용을 줄일 수 있음

○ 기술적 측면

- 초고층 건물이 존재하는 도시유역에서 건물 벽면에서 발생하는 차단 및 유출 현상을 고려하여 기존 방법 보다 정교하게 강우-유출 해석을 수행할 수 있게 됨
- 초고층 건물로 인한 강우-유출 과정 왜곡 평가 방법은 물순환 관점에서 기존 도시들에 대한 새로운 평가를 가능하게 함
- 초고층 건물로 인한 수재해 취약성 증가 평가 방법은 초고층 건물이 대다수 존재하는 도시에 적합한 홍수저감 계획을 수립하는데 중요한 기초 자료를 만드는 기술이 될 것임

○ 경제적·산업적 측면

- 본 연구에서 개발된 강우-유출 해석 방법은 향후 초고층 도시지역의 홍수해석, 홍수 저감계획 수립, 배수설계 등에 활용되어 관련 중소기업 및 벤처기업의 성장을 도모할 수 있으며, 이로 인해 고용증가 및 지역 경제활성화에 기여할 수 있음
- 초고층 건물로 인한 강우-유출 과정 왜곡 평가 방법은 기존 도시 유출해석 모형을 개선하는데 활용될 수 있으며, 모형 개발과 관련된 새로운 사업 및 일자리 창출이 가능할 것으로 예상됨
- 초고층 건물로 인한 수재해 취약성 증가 평가 방법은 친환경 도시 인프라 건설, 미래 친환경적 도시개발 관련 등 관련 분야의 사업기회 창출에 기여할 수 있음

○ 사회적 측면

- 초고층 건물에서 진행되는 수문순환 과정의 규명을 통해 이전보다 정교한 홍수유출 예경보시스템의 개발이 가능하고, 이를 통해 인명 및 재산 피해를 경감할 수 있음
- 초고층 도시유역의 수문해석 방법을 이용하여 도시 지역의 배수설계, 침투 및 저류시설 설계, 기타 수재해 예방 사업의 효과를 증대할 수 있음
- 초고층 건물을 고려한 수재해 취약성 평가 방법은 기후변화로 인해 그 위험성이 커질 수 있는 수재해로부터 안전한 사회를 구현하는데 기여할 수 있음

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 해당 없음
-

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의4제1항 참고	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1) 기술적 위험 요소 분석

(1) 연구활동종사자의 안전의식 부족

- i) 개인보호구 착용 미흡
- ii) 안전교육(실험 전 5분 안전교육, MSDS)의 형식적 이행
- iii) 안전점검(매월, 실험 전/후)의 형식적 이행

(2) 연구/실험실 작업공간 확보 미흡

- i) 정리정돈 부족으로 인한 안전사고 위험률 증가
- ii) 불필요한 용품(폐시약, 집기비품, 기자재) 실내 비치로 인하여 대피로 확보 불량

(3) 연구활동종사자, 학과담당자의 전문성 결여

- i) 시약, 가스 폭발 등 긴급상황에 적절하게 대처할 전문인력 부족
- ii) 연구활동종사자(학생)의 경험 부족

(4) 실험기자재, 설비 등의 노후화

- i) 실험기자재, 설비 등의 사용연한 경과로 사고위험 증가
- ii) 현장정리 미흡 등의 관리소홀로 인한 먼지, 쓰레기 등 점화원 다수 존재

2) 안전 관리 대책

(1) 사업기간 : 2016.03.01. ~ 2017.02.28.

(2) 안전관리 계획

i) 연구활동종사자 상해보험 가입

- 가입기간 : 2015.09.01.~ 2016.09.01.
- 가입대상 : 연구활동종사자(학부생, 대학원생, 연구(보조)원)
- 가입인원 : 10,736명
- 보상범위 : 사망/후유장해 : 100,000,000원, 상해 : 10,000,000원

ii) 안전관리에 관한 정보제공 및 연구활동종사자에 대한 교육·훈련

- 목표 : 안전관리에 관한 정보제공을 통해 연구(실험)실에서 발생할 수 있는 안전사고를 미연에 예방하며 자율적인 연구(실험)실 안전 문화 확산을 유도하고 지속적인 정보제공을 하기 위함.

- 내용

- 가) 안전훈련 홍보자료 제작
- 나) 통합홈페이지 구축을 통한 안전교육 실시
- 다) 안전관련 종사자(학과담당직원, 연구종사자) 안전교육 실시
- 라) 흡후드 사용 및 유지 시 주의사항 스티커 제작
- 마) 흡후드 적정높이 표시 스티커 제작

-
- 바) 안전정보 제공 포스터 제작
 - 사) 안전점검 달력 제작
 - iii) 연구활동종사자 건강검진
 - 목표 : 유해인자를 취급하는 연구활동종사자의 건강상태를 확인함으로써 직업병을 예방하고 질병을 조기에 발견하여 상대적 취약계층인 연구활동종사자의 안전보건을 확보하기 위함.
 - 검진대상 : 연구활동종사자(학부생, 대학원생, 연구(보조)원)
 - ※ 교과과정의 단순실습생 제외
 - 검진시기
 - 가) 일반검진 : 년1회 실시
 - 나) 특수검진 : [산업안전보건법 시행규칙 별표 12의3]에 의거하여 특수건강진단의 시기 및 주기에 따라 실시(년 2회 실시)
 - ii) 연구실의 안전을 유지관리하기 위한 설비(시설)의 설치·유지 및 보수
 - 목표 : 연구활동종사자들의 안전한 실험환경 조성을 위하여 위험요소의 제거 및 환경을 개선하기 위함.
 - 내용
 - 가) 연구(실험)실 환후드 개선사업
 - 나) 연구(실험)실 내 지정폐기물의 처리
 - 다) 실험폐수 배관 정비사업
 - 라) 실험실 비상상황 대비 모니터링 시스템 구축
 - 마) 고가장비 화재대비용 청정소화기 보급
 - 바) 가스누설경보기 설치작업
 - 사) 인화성 방화캐비닛 배기장치 설치
 - 아) 연구(실험)실 내 방화담요 설치
 - 자) 안전자료보관함 설치(MSDS, 연구실 규정, 매월점검표 등 비치 목적)
 - v) 연구활동종사자 보호장비 구입
 - 목표 : 연구의 목적, 특성에 맞는 개인보호구 지급을 통하여 안전사고 발생시 사고확산 방지 및 피해 최소화를 위함.
 - 지급대상 : 연구(실험)실 약 500여개소 연구활동종사자
 - 지급종류 : 연구실 개인보호구, 사고예방 KIT 등
 - iv) 안전점검 및 정밀안전진단(작업환경측정 포함)
 - 목표 : 연구활동종사자의 건강하고 안전한 실험환경 조성을 위하여 연구실의 안전상태를 정밀하게 점검하기 위하여 연구(실험)실 안전점검 및 작업환경측정을 실시함.
 - 측정대상 : 연구(실험)실 약 500여개소 연구실(작업환경측정: 일부 취약연구실)
 - 측정시기 : 상반기 실시예정(작업환경측정: 상반기/하반기 실시-관계법령에 따라 실시)
 - iiiv) 그 밖에 연구실의 안전환경 조성을 위하여 필요한 사항
 - 목표 : 연구활동종사자의 안전교육 이수율 증진을 위함.
 - 대상 : 교내 연구활동종사자
 - 내용 : 안전교육 우수이수자 홍보물품 지급
- (3) 인력 전문성 제고
- i) 안전환경관리자 교육 실시 : 신규(채용 후 6개월 전후 1회), 보수(신규교육 후 2년마다 실시)
 - ii) 환경담당자 교육 실시 : 환경보건협회 전문수질관리자 교육(1회/3년)
- (4) 점검사항
-

구분	점검 분야	중점 점검 사항	비고
일상점검	- 담당별 점검	- 매일 안전점검 실시(5분 안전점검, 점검일지)	기계설비, 전기, 소방, 환경, 실험실 등)
정기점검	- 기계, 전기	- 유해위험기계기구, 전기기구 관리상태	연 1회
	- 화공, 건축	- 유해위험물질 관리 상태	
	- 소방, 가스	- 화재, 고압가스 사용 및 관리 상태	
	- 보건, 위생	- 보건, 위생분야 관리 상태 - 기타 관련사항	
특별점검	- 합동점검	- 분야별 담당자 특별합동점검 실시	수시
	- 비상 대응 훈련	- 연구활동종사자 참여 특별 훈련 실시 - 재난대응 안전한국훈련 기간	연 1회
정밀진단	- 기계, 전기	- 유해위험기계기구, 전기기구 관리상태	연 2회
	- 화공, 건축	- 유해위험물질 관리 상태	
	- 소방, 가스	- 화재, 고압가스 사용 및 관리 상태	
	- 보건, 위생	- 보건, 위생분야 관리 상태 - 기타 관련사항	

(5) 관련 수칙

수칙명	주요내용	비고
- 실험실 안전관리 수칙	- 모든 실험은 실험복 착용을 원칙으로 한다 - 위험발생 요소가 있는 실험 시 적절한 보호구 착용을 원칙으로 한다 - 실험실 출입문에는 비상시 비상연락망과 연구책임자, 출입가능 연구원 등의 기록을 반드시 표시한다. - 실험책임자는 실험 전, 실험 중 발생할 수 있는 위험 요소에 대하여 사전 안전교육을 실시하여야 한다. - 실험구역에서 음식섭취, 식품보존, 흡연, 화장 등의 행위를 하지 않도록 한다 - 실험과 무관한 물품의 반입을 하지 않도록 한다 - 지정된 장소에서만 실험을 수행하며 실험 종료 후와 퇴실 시에는 반드시 얼굴과 손 등을 씻도록 한다. - 연구실 퇴실 전후에 연구실의 이상유무를 주의깊게 확인한다.	

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Effect of Multicollinearity on the Bivariate Frequency Analysis of Annual Maximum Rainfall Events	MDPI	주저자	스위스	2.524	2019.04.29	중복 사사	SCI
2	논문	Bayesian Update of Hydrometeorological Probable Maximum Precipitation	ASCE	주저자	미국	1.438	2019.08.28	단독 사사	SCI
3	논문	이변량 웨이블릿 분석을 통한 한반도 장마 및 태풍에 대한 북극진동의 영향 분석	방재학회	주저자	한국	-	2019.02.01	단독 사사	비SCI
4	논문	서울지점의 기존 Huff 모형의 문제점 분석 및 개선 방안에 대한 제안	방재학회	주저자	한국	-	2019.04.01	단독 사사	비SCI

제11장. 기타 사항

- 당해연도 기간에 개발한 초고층 건물을 고려하여 수문순환 과정을 해석하는 방법론을 이용하여 과제 종료 이후에 보다 많은 논문을 투고할 수 있을 것으로 기대됨
- 예상되는 논문의 제목은 다음과 같음
 - “건물에 의한 차단량 추정 및 검증”
 - “Copula를 이용한 강우강도-총 강우량-풍속 빈도해석 및 빗물 측면 집수량 추정”
 - “초고층 건물에 의한 강우 차단 및 강우-유출 과정 왜곡 평가”
 - “초고층 건물로 인한 침수 취약성 증가 평가”
 - “SWMM을 이용한 초고층 도시구역의 강우-유출 해석”
- 본 연구의 한계 및 향후 연구분야
 - 본 연구의 가장 큰 한계는 실제 벽면에서 발생하는 유출량을 관측하지 않았다는 점임. 이에 따라 초고층 건물로 인한 강우-유출 과정 왜곡정도 평가 결과와 수재해 취약성 증가 평가 결과를 실제 도시 설계 과정에 적용하기 위해서는 본 연구의 평가 결과를 실증하는 연구가 필요함
 - 본 연구에서는 도시 구역에 다양한 건물이 존재할 때 강우-유출 과정이 어떻게 왜곡되고, 수재해 취약성이 증가하는지 확인하지 않았음. 추후 다양한 건물로 구성되어 있는 도시 구역에 대한 실험 및 실증 연구가 수행되어 강우-유출 과정 및 수재해 취약성이 어떻게 바뀌는지 규명되어야 할 필요가 있음
 - 이에 따라 향후 연구분야로 초고층 건물에서 발생하는 유출을 관측하여 모의 결과와 비교하는 연구 및 다양한 건물이 존재하는 도시유역을 대상으로 건물들을 고려하여 유출해석을 수행하는 연구가 필요할 것으로 판단됨

- Abuku, M., Janssen, H., Poesen, J., and Roels, S. (2009). Impact, absorption and evaporation of raindrops on building facades. *Building and Environment*, 44(1), 113-124.
- Anderholm, S. K. (2001). *Mountain-front recharge along the eastern side of the Middle Rio Grande Basin, central New Mexico*. US Dept. of the Interior, US Geological Survey.
- Beijer, O., and Johansson, A. (1977). *Driving rain against external walls of concrete [Slagregn mot betongfasader]*. Swedish Cement and Concrete Research Institute at the Institute of Technology, Stockholm.
- Best, A. C. (1950a). Empirical formulae for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 76(329), 302-311.
- Best, A. C. (1950b). The size distribution of raindrops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 76(327), 16-36.
- Blocken, B., and Carmeliet, J. (2004). A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 92(13), 1079-1130.
- Blocken, B., and Carmeliet, J. (2010). Overview of three state-of-the-art wind-driven rain assessment models and comparison based on model theory. *Building and Environment*, 45(3), 691-703.
- Blocken, B., and Carmeliet, J. (2012). A simplified numerical model for rainwater runoff on building facades: possibilities and limitations. *Building and Environment*, 53, 59-73.
- Bookhagen, B., and Strecker, M. R. (2008). Orographic barriers, high-resolution TRMM rainfall, and relief variations along the eastern Andes. *Geophysical Research Letters*, 35(6).
- Cho, W. H., Han, K. Y., Hwang, T. J., and Son, A. L. (2011). 2-D inundation analysis in urban area considering building and road. *Journal of korean society of hazard mitigation*, 11(5), 159-168.
- Choi, E. C. C. (1991). Numerical simulation of wind-driven rain falling onto a 2-D building. In *The Asian Pacific Conference on Computational Mechanics*, Hong Kong, Hong Kong, 12/11-13/91 (pp. 1721-1727).
- Choi, E. C. C. (1993). Simulation of wind-driven-rain around a building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46, 721-729.
- Choi, E. C. C. (1994). Determination of wind-driven-rain intensity on building faces. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 51(1), 55-69.
- Clark, C. O. (1945). Storage and the unit hydrograph. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* (Vol. 69, No. 9, pp. 1333-1360). ASCE.
- De Vogelaere, T., and Pacco, M. (2012). *Development of a numerical model for rainwater run-off on vertical planes extended with experimental verification*. Ghent University.
- Endreny, T. A. (2006). Land use and land cover effects on runoff processes: urban and suburban development. *Encyclopedia of hydrological sciences*.
- Ferro, V. (2001). Tecniche di misura e monitoraggio dei processi erosivi. *Quaderni di Idronomia Montana*, 21(2), 63-128.
- Fleming, MD, and Hoffer, RM. (1979) *Machine processing of Landsat MSS data and LARS Technical Report 062879*. Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Hens, H., and Ali Mohamed, F. (1994). Preliminary results on driving rain estimation. *Contribution to the IEA Annex*, 24.
- Hilaire, J., and Savina, H. (1988). *Pluie battante sur une facade d'immeuble*.
- Hjelmfelt, A. T. (1986). Estimating Peak Runoff From Field-Size Watersheds. *Journal of the American Water Resources Association*, 22(2), pp. 267-274.
- Huber, W. C., Dickinson, R. E., and Barnwell, T. O. (1988). *Storm water management model, version 4: user's manual*. Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.

-
- Hughes, M., Hall, A., and Fovell, R. G. (2009). Blocking in areas of complex topography, and its influence on rainfall distribution. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66(2), 508-518.
- Isidoro, J. M. G. P., and De Lima, J. L. M. P. (2014). Laboratory simulation of the influence of building height and storm movement on the rainfall run-off process in impervious areas. *Journal of Flood Risk Management*, 7(2), 176-181.
- Isidoro, J. M., de Lima, J. L., and Leandro, J. (2012). Influence of wind-driven rain on the rainfall-runoff process for urban areas: Scale model of high-rise buildings. *Urban Water Journal*, 9(3), 199-210.
- Isidoro, J. M., de Lima, J. L., and Leandro, J. (2013). The study of rooftop connectivity on the rainfall-runoff process by means of a rainfall simulator and a physical model. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 57(1), 177-191.
- Kang, M., and Yoo, C. (2018). Development of a shot noise process based rainfall-runoff model for urban flood warning system. *Journal of Korea Water Resources Association*, 51(1), 19-33.
- Kerby, W. S. (1959). Time of concentration for overland flow. *Civil Engineering*, 29, 60.
- Lacy, R. E. (1965). Driving rain maps and the onslaught of rain on buildings. In *Proc. of CIB/RILEM Symposium on Moisture Problems in Buildings*, Helsinki, 1965.
- Lacy, R. E. (1977). *Climate and Building in Britain: building research establishment*.
- Lee, B. R., Jeong, D. M., and Choi, S. Y. (2019). Analysis of Urban Runoff Discharge Characteristics Affected by Climate Change and Urbanization: Case on Bokdae-dong Basin. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 19(3), 41-46.
- Lee, H., Cho, E., and Yoo, C. (2018). A Rainfall-runoff Analysis Method of SWMM Model Considering Building Height. *Journal of Wetlands Research*, 20(1), 14-19.
- Lee, J. H., and Yoon, S. H. (2004). Runoff characteristics by urbanization in the Mushim stream watershed using HEC-HMS. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*.
- Lee, J. Y., and Ha, S. R. (2013). Impact of building blocks on inundation level in urban drainage area. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 22(1), 99-107.
- Linsley Jr, R. K., Kohler, M. A., and Paulhus, J. L. (1975). Hydrology for engineers.
- ME (Ministry of Environment) (2015). *Guidelines for Establishing the Basic Plan for Sewerage Maintenance*. Ministry of Environment, Seoul, Korea.
- Murphy, S. F., Stallard, R. F., Scholl, M. A., González, G., and Torres-Sánchez, A. J. (2017). Reassessing rainfall in the Luquillo Mountains, Puerto Rico: Local and global ecohydrological implications. *PloS one*, 12(7), e0180987.
- Park, M. J., Kwon, H. J., and Kim, S. J. (2005). Analysis of impacts of land cover change on runoff using HSPF model. *Journal of Korea Water Resources Association*, 38(6), 495-504.
- Rodgers, G. G. (1977) *Theoretical studies of the interaction of wind flow with precipitation elements in determining the deposition of rain, snow and ice on buildings and structures*, Sixth Course Airflow and Building Design, Sheffield University.
- Rodgers, G. G., Poots, G., Page, J. K., and Pickering, W. M. (1974). Theoretical predictions of raindrop impaction on a slab type building. *Building Science*, 9(3), 181-190.
- Russell, S. O., Sunnell, G. J., and Kenning, B. F. (1979). Estimating design flows for urban drainage. *Journal of the Hydraulics division*, 105(1), 43-52.
- Sabol, G. V. (1988). Clark unit hydrograph and R-parameter estimation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(1), 103-111.
- Sandberg, P. I. (1974). Driving rain distribution over an infinitely long high building: computerized calculations. *2nd International CIB/RILEM Symp. on Moisture Problems in Buildings*. Rotterdam, The Netherlands, 10-12 September 1974. Paper 1-1-2.
- USEPA (1999). Storm Water Technology Fact Sheet: *Infiltration Trench*, US Environmental Protection Agency: Washington, EPA 832-F-99-019. p. 7.
- Vieux, B.E. (2004). *Building Parameter Maps for Vflo™*, pp. 43-46.
-

Wyly, R. S., and Eaton, H. N. (1952). *Capacities of plumbing stacks in buildings*. US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards.

Wyly, Robert S., and Herbert N. Eaton. *Capacities of plumbing stacks in buildings*. US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1952.

13. 뒷면지

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.