

도시지역의 침수저감을 위한 내외수 연계 운영 기법 개발: 목감천 유역을 중심으로

권순호¹, 정현우², 황윤권³, 이의훈⁴, 김종훈^{5*}

¹고려대학교 미래건설환경융합연구소, ²고려대학교 건축사회환경공학과, ³한국수력원자력(주),
⁴충북대학교 토목공학부, ⁵고려대학교 건축사회환경공학과

Combined Inland-River Operation Technique for Reducing Inundation in Urban Area: The Case of Mokgam Drainage Watershed

Soon Ho Kwon¹, Hyun Woo Jung², Yoon Kwon Hwang³,
Eui Hoon Lee⁴, Joong Hoon Kim^{5*}

¹Future and Fusion Lab of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Korea University

²Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

³Korea Hydro & Nuclear Power Co

⁴School of Civil Engineering, Chungbuk National University

⁵School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

요약 최근 전 세계적으로 기후변화로 인해 설계빈도를 초과하는 강우가 발생함에 따라 도시 지역의 침수피해가 종종 발생한다. 도시 침수방어 대책으로는 구조적 대책과 비구조적 대책이 있다. 본 연구에서는 비구조적 대책 중에서 내배수 시스템의 운영에 초점을 두었다. 제안 방법인 내외수 연계 운영 방법은 상류 지점에 모니터링 지점을 선정하여 빗물펌프장에 유입되는 유입량을 예측하고, 이를 바탕으로 펌프를 운영하는 방법이다. 본 연구에서는 내외수 연계 운영 기술을 목감천 유역에 적용하였으며, 서울특별시에서 큰 침수피해가 발생했던 기왕 강우인 2010년, 2011년 사상을 바탕으로 내외수 연계 운영 방법을 검증하였다. 2010년, 2011년 강우 사상을 적용 결과, 기존 운영 방법대비 침수 저감 효과는 각각 34.9 %, 54.4 % 만큼 감소한 것으로 확인되었다. 즉, 본 연구에서 제안한 내외수 연계 운영 방법은 우수지의 추가 저류 공간을 확보함으로써 도시 유역 내에서 침수피해를 최소화했음을 확인하였다. 또한, 집중호우가 많이 발생하는 도시지역에서 침수를 예방하고, 시민의 생명과 재산을 지킬 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract Urban areas can often suffer flood damage because of the more frequent catastrophic rainfall events from climate change. Flood mitigation measures consist of (1) structural and (2) non-structural measures. In this study, the proposed method focused on operating an urban drainage system among non-structural measures. The combined inland-river operation technique estimates the inflow of pump stations based on the water level obtained from a preselected monitoring point, and the pump station expels the stored rainwater to the riverside based on those estimates. In this study, the proposed method was applied to the Mokgam drainage watershed, where catastrophic rainfall events occurred (i.e., 2010- and 2011-years), and severe flood damage was recorded in Seoul. Using the proposed method, the efficiency of flood reduction from the two rainfall events was reduced by 34.9 % and 54.4 %, respectively, compared to the current operation method. Thus, the proposed method can minimize the flood damage in the Mokgam drainage watershed by reserving the additional storage space of a reservoir. In addition, flooding from catastrophic rainfall can be prevented, and citizens' lives and property in urban areas can be protected.

Keywords : Flood Mitigation Measures, Non-structural Measures, Combined Inland-River Operation Technique, Monitoring Point, Rating Curve

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 스마트시티 혁신성장동력 프로젝트 지원으로 수행되었음 (과제번호 19NSPS-B154314-02).

*Corresponding Author: Joong Hoon Kim(Korea Univ.)

email: jaykim@korea.ac.kr

Received October 30, 2020

Revised December 7, 2020

Accepted January 8, 2021

Published January 31, 2021

1. 서론

도시 내배수시스템에 설계빈도를 초과하는 강우가 발생함에 따라 도시지역의 침수피해액은 점차 증가하고 있다[1]. 도시지역의 침수피해를 줄이기 위한 대책이 요구되고 있으며, 이를 위해 지금까지 많은 연구들이 수행되어왔다[2-12].

도시 침수저감 대책은 크게 두 가지로, 구조적 대책과 비구조적 대책으로 구분된다. 먼저, 구조적 대책은 기존 설치되어 있던 도시 내배수시스템 (우수관거, 지하저류조, 빗물펌프장 등)을 변경 및 증설하거나, 새로운 요소 시설물을 추가적으로 설치하는 것을 의미한다. 반면, 비구조적 대책은 기존의 요소 시설물의 운영을 극대화하는 침수저감 대책이다. 앞서 설명한 두 가지 대책은 침수저감 효율과 경제적 비용 측면에서의 이점과 단점을 명확하게 구분된다. 예를 들어, 댐이나 빗물저류조, 빗물펌프장 등과 같은 구조적 침수대책은 구조물을 통해 직접적으로 우수를 처리하기 때문에 침수저감 효율이 높지만, 경제적 비용 측면에서 부담이 크다. 반면에, 비구조적 대책은 이미 설치된 수공구조물을 바탕으로, 펌프 및 저류조의 운영방법을 개선하거나 수문 개폐의 운영방법 같은 배수시설물의 운영을 극대화하여 침수저감 효율을 극대화할 뿐만 아니라, 경제적 비용 측면에서 부담을 최소화할 수 있다. 즉, 도시 내배수시스템에서는 침수저감의 효율성과 경제적 비용 측면에서의 장점을 모두 포함할 수 있는 새로운 비구조적 대책의 침수저감 기술이 필요하다.

지금까지 도시 내배수시스템에서의 비구조적 대책을 제안한 수행된 연구를 살펴보면, 저류조[13], 펌프[14, 15] 및 수문[16] 운영 등으로 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 먼저, 저류조 운영에 대한 연구를 살펴보면, [13]은 저류지의 수위에 따라 저류지의 배수 펌프를 활용하여 유입량과 방류량을 조절함으로써 침수저감 효과를 나타내었다. 펌프 운영에 대한 주요 연구를 살펴보면, [14]는 강우-유출 모형인 SWMM (Storm Water Management Model)을 이용하여 도시 내배수시설의 예측 수위 기준 펌프 운영 방식을 통해 예측유입량을 선제 배수하고 우수지의 추가 저류공간을 확보함으로써 침수저감 효과를 높이고, 성능을 향상시켰다. 또한, [15]는 우수지의 유입량을 예측하고, 그 결과를 바탕으로 펌프의 조기가동을 통해 침수저감 효과를 극대화

할 수 있는 방안을 제시하였다. 수문운영 관련 주요연구를 살펴보면, [16]은 빗물펌프장의 우수지의 수위를 바탕으로, 우수지와 우수지 사이에 있는 수문을 운영함으로써

써 우수지의 추가 저류공간 확보와 침수저감 효과를 동시에 향상시킬 수 있는 기법을 개발하였다. 하지만, 위 언급한 모든 연구에서는 내수의 수위만을 고려하여 비구조적 대책을 제안하였으며, 이들은 하천 (제외지)의 수위 영향 (외수)을 전혀 고려하지 않았다는 한계를 가지고 있다.

도시지역의 침수는 제내지와 제외지에서 유기적으로 발생할 수 있다. 예를 들어, 제내지의 침수를 단순히 줄이기 위해 배수펌프가 빗물을 과도하게 방류하는 경우, 제내지의 침수위험은 줄어들지만, 제외지 (본류 하천)의 수위가 증가하여 외수의 침수위험이 증가하여 더 큰 침수피해를 야기할 수 있다. 그러므로, 제내지와 제외지의 상황을 적절히 고려하는 것이 중요하다. 현재까지 조사된 연구를 바탕으로, 도시 내배수시스템의 비구조적 대책과 관련된 대부분의 연구들은 주로 제내지의 내배수시설물의 운영과 제내지의 침수를 줄이는 것에 초점이 맞춰져왔다. 하지만, 서울의 도시하천 주변 저지대 주거지역의 경우, 2010년부터 2014년까지 주기적으로 침수가 발생하여 피해를 입은 것으로 확인되었으며[17], 도시하천의 범람은 단순 침수피해 뿐만 아니라, 교통 및 통신에도 악영향을 끼칠 수 있는 2차 재해를 유발할 수 있다. 이에 따라, 비구조적 대책의 수립 필요성이 커지고 있으며 [18], 이를 개선하기 위한 연구가 필수적으로 수행되어야 한다.

본 연구에서는 도시지역의 침수피해를 최소화하기 위해 새로운 비구조적 대책 방법인 내외수 연계 운영 기법을 제시하였다. 개발 기법인 내외수 연계 운영 기법은 상류 지점에 관측지점을 선정하여 빗물펌프장에 유입되는 유입량을 예측하고, 이를 바탕으로 펌프를 운영하는 기법이다. 또한, 우수지의 추가 저류공간을 확보하여 하천의 통수능을 최대한 확보하고, 유역 내의 침수피해를 최소화하였다. 개발 기술은 목감천 유역에 적용되었으며, 서울 특별시에 큰 침수피해가 발생했던 기왕 강우인 2010년, 2011년 기왕 강우사상을 바탕으로 개발 기법을 검증하였다.

2. EPA-SWMM 모형

SWMM(Storm Water Management Model) 모형은 1971년 미국환경청으로부터 도시유역 내배수시스템 내의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 개발되었다. SWMM 모형은 동적 강우-유출 모형으로써 단일 강우사상이나, 장기모의가 가능한 특징을 지니고 있으며, 다양

한 시계열 시나리오가 고려된 모의 결과를 도출해 낼 수 있다. 또한, 배수구역에서의 수리구조물 등을 활용하여 유출량 및 침수량의 거동을 분석할 수 있는 장점을 가지고 있다.

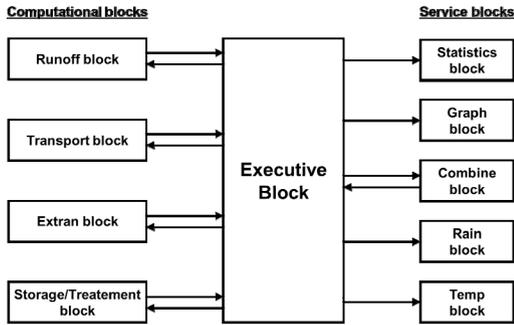


Fig. 1. Schematic of SWMM configuration

SWMM 모형의 구성은 Fig. 1과 같이, 네 가지의 실행 블록 (예, Runoff, Transport, Extran 및 Storage/Treatment) 및 다섯 가지의 보조 블록 (예, Statistic, Graph, Combine, Rain 및 Temp)으로 구성되며, 개별적인 모듈로 구분되어 계산이 이루어진다. 먼저, Runoff 블록은 도시 유역에서의 유출로 인한 유입량, 주관로에서의 유량 또는 침수량의 추적을 모의한다. Transport 블록은 Runoff 블록에서 연산된 결과를 기본 자료로 활용하여 시스템을 통해 유량 및 침수량의 추적을 모의한다. 하지만, Transport 블록은 Runoff 블록에서 직접 유입량을 계산하기 때문에, 이를 직접적으로 산정하지는 않는다. Extran 블록은 시스템에 대한 수리학적 흐름을 추적하기 위한 모형으로 Runoff 블록과 같은 상위 블록으로부터의 입력파일에 의해 특정한 위치의 절점에 수문곡선이 입력된다. 이는, 배수시스템을 통한 강우사상의 동적 계산을 수행하므로, 다양한 수리구조물 (예, 웨어, 오리피스, 저류지, 빗물펌프장)을 고려하여 시스템 내 동적 거동 (조석효과, 자유수면 흐름, 압력류, 수격, 역류 등)을 모의할 수 있다. Storage/Treatment 블록은 여러 가지로 배열되어 연결되고, 부가적으로 각각의 장치에 대하여 자본과 가동, 유지비용을 산정하는 것뿐만 아니라, 유량 추적도 가능하다.

SWMM 모형의 도시유역 유출해석 방법은 세 가지 (예, steady state, kinematic wave 및 dynamic wave)로 구성되어 있으며, 모의 조건에 따라 알맞은 방법을 선택하여 수행할 수 있다. 앞서 언급한 세 가지 방법에 따라 유출해석 모의에 대한 가정조건이 달라진다.

먼저, Kinematic wave 방법은 사면구배가 비교적 급할 경우, 마찰구배와 사면구배를 동일하다고 가정함에 따라 하류의 영향이 상류에 미치지 않는 것을 전제로 모의를 수행한다. 이는, 비교적 큰 시간 계산 간격을 가지므로, 장기적인 예측에 일반적으로 적용된다. Dynamic wave 방법은 도시유역에서의 관거 내 흐름 특성을 고려하고, 관거 내 일부 구간에서 발생하는 역경사 및 만관으로 인한 압력의 영향까지 고려할 수 있다. 특히, 강우 초기에는 자유수면을 가지는 개수로의 흐름에서는, 지속적인 강우가 발생하면 관로의 수위가 상승하여 압력차에 의한 흐름으로 전환되는 것도 고려할 수 있다. 이는, 운동량방정식을 이용하며, 흐름이 1방향이고, 흐름단면에서 균일 유속분포를 보인다고 가정한다. 또한, 정수압이 작용하며, 흐름의 경사가 완만하다고 가정하며, 마찰 손실을 Manning's 식으로 산정한다. 그래서, 유출 흐름해석을 위한 부정류방정식을 식(1)과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \times \frac{\partial V}{\partial x} + g \times \frac{\partial y}{\partial x} + g \times (S_0 - S_f) + \frac{\bar{q}V}{\Omega} = 0 \quad (1)$$

여기서, V 는 흐름의 평균유속, y 는 수심, S 는 마찰경사, \bar{q} 는 측방 유입량, g 는 중력가속도, S_0 는 하도의 경사를 의미한다.

3. 대상유역 선정

본 연구에서 대상유역으로 선정한 목감천 유역은 Fig. 2와 같으며, 서울특별시의 구로구 (개봉1, 2 빗물펌프장)와 경기도 광명시 (광명 빗물펌프장과 광명 제1, 제2, 제3 빗물펌프장)를 포함한 두 개의 배수구역으로 구성되어 있다. 먼저, 개봉1, 2 빗물펌프장은, 서울특별시 구로구에 위치하는 배수시설이며, 해당 유역의 경우, 네 개의 유수지를 두 곳의 빗물펌프장이 공용으로 활용 가능하여, 서로 연계 운영이 가능한 특징을 가지고 있다. 경기도 광명시의 4개 빗물펌프장의 경우, 개별 빗물펌프장은 해당 유수지의 수위를 바탕으로 각각 운영되는 것이 특징이다. 개봉1, 2 빗물펌프장의 유역 출구부에는 본류 하천인 안양천이 있으며, 광명 빗물펌프장 (광명 제1, 제2, 제3, 제4 빗물펌프장)의 유역 출구부에는 안양천의 지류인 목감천이 위치한다. 대상유역인 목감천 유역의 빗물펌프장 현황 및 각종 제원은 Table 1에 정리되어 있다.

Table 1. Information of individual pump stations in this study [19]

Division	Gwangmyeong1	Gwangmyeong 2	Gwangmyeong 3	Gwangmyeong 4	Gaebong 1	Gaebong 2	
Drainage Area	0.687 km ²	0.997 km ²	0.25 km ²	0.192 km ²	42.09 km ²	10.86 km ²	
Reservoir Area	1,465 m ²	790 m ²	538 m ²	305 m ²	17,920 m ²	17,920 m ²	
Reservoir Volume	7,325 m ³	3,033 m ³	1,529 m ³	823 m ³	51,700 m ³	31,858 m ³	
Pump Capacity	736 m ³ /min	1,060 m ³ /min	380 m ³ /min	340 m ³ /min	9,440 m ³ /min	4,800 m ³ /min	
Gate Operation Elevation	EL : 9.49 m (Mokgam)	EL : 8.8 m (Mokgam)	EL : 9.5 m (Mokgam)	EL : 9.4 m (Mokgam)	EL : 7 m (Anyang)	EL : 7 m (Anyang)	
Reservoir Elevation	H : 8.5 L : 3.5	H : 8.5 L : 4.0	H : 8.1 L : 5.1	H : 8.45 L : 5.25	H : 10.9 L : 6.00	H : 8.0 L : 3.0	
S t r e a m	Ordinary Level (Stream)	EL : 7.4 m (Mokgam)	EL : 7.0 m (Mokgam)	EL : 6.6 m (Mokgam)	EL : 6.2 m (Mokgam)	EL : 4.64 m (Anyang)	EL : 4.64 m (Anyang)
	Flood Elevation	EL : 11.0 m	EL : 11.0 m	EL : 10.9 m	EL : 10.7 m	EL : 12.8 m	EL : 12.8 m
	Levee Height	EL : 13.2 m	EL : 13.0 m	EL : 12.5 m	EL : 12.0 m	EL : 14.8 m	EL : 14.8 m

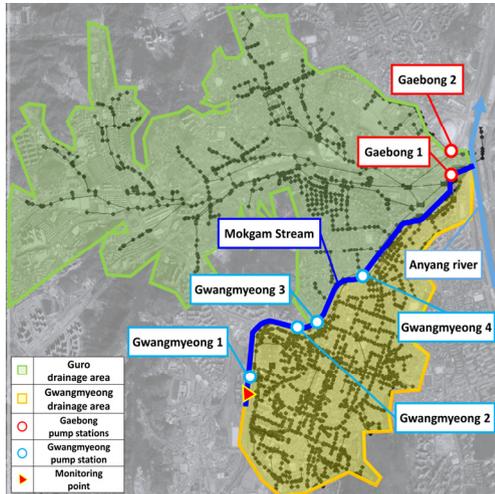


Fig. 2. Mokgam drainage network used in this study

4. 적용 방법 및 분석결과

4.1 내외수 연계 운영 기법의 구성 및 방법

연계 운영방법은 '내수 개념의 연계 운영'과 '외수 개념의 연계 운영'으로 크게 두 가지가 있다. 먼저, 내수 개념의 연계 운영방법을 설명하면, 홍수조절지와 빗물저류조를 포함한 저류시설에서 도시하천으로 방류되는 유량은 하류의 빗물펌프장의 우수지로 유입된다 (Fig. 3(a)). 이 때, 도시하천 자체를 하나의 내배수시스템으로 볼 수 있으며, 상류에 위치하는 빗물펌프장의 방류량, 우수관망에서의 방류량 또한 내수로 운영된다. 내수 개념의 연계

운영방법의 특징으로는, 내수 개념의 도시하천에서 상류의 빗물펌프장은 일종의 중계펌프장의 역할을 하게 되며 전체 내배수시설의 운영은 하류 빗물펌프장의 우수지 수위에 직접적인 영향을 주게 된다. 다음으로는, 외수 개념의 연계 운영방법을 설명하면, 홍수조절지와 빗물저류조를 포함한 저류시설에서 도시하천으로 방류되는 유량은 외수인 도시하천으로 방류된다. 또한, 도시하천에 설치된 수문은 하천의 유량을 조절하며 상류의 저류시설의 방류량, 우수관망에서의 방류량은 도시하천으로 유입된다 (Fig. 3(b)). 외수 개념의 도시하천에서 전체 내배수시설의 운영은 하류 빗물펌프장의 외수위에 영향을 주게 되며 외수위에 따라 빗물펌프장 방류토구의 개폐가 결정된다. 빗물펌프장의 방류토구를 닫을 경우, 자연배수 없이 펌프 가동을 통해 우수지 유량을 토출하게 된다. 본 연구에서는 내수 개념의 연계 운영방법과 외수 개념의 연계 운영방법을 통합한 '내외수 연계 운영방법'을 개발하였다.

기존 목감천 유역의 운영 방식은, 안양천의 수위에 따라 내수 개념의 연계 운영과 외수 개념의 연계 운영을 유기적으로 활용한다. 자세히 설명하면, 안양천의 일정 수위를 초과하게 되면, 안양천과 목감천 사이의 수문을 폐쇄함으로써, 목감천의 유량을 개봉1 빗물펌프장의 우수지로 유입시킨 후 안양천으로 방류하는 방식을 사용하고 있다 (Fig. 4(a)). 하지만, 이는 한 번에 많은 강우가 내릴 경우, 개봉1 빗물펌프장에서 많은 양의 우수를 방류하기 때문에 안양천 주변에 침수피해를 야기할 수 있는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해, 본 연구에서는 목감천 유역에서의 내수와 외수를 모두 고려한 운영방법을 개발하였다. 목감천 유역에 모니터링 지점을 선

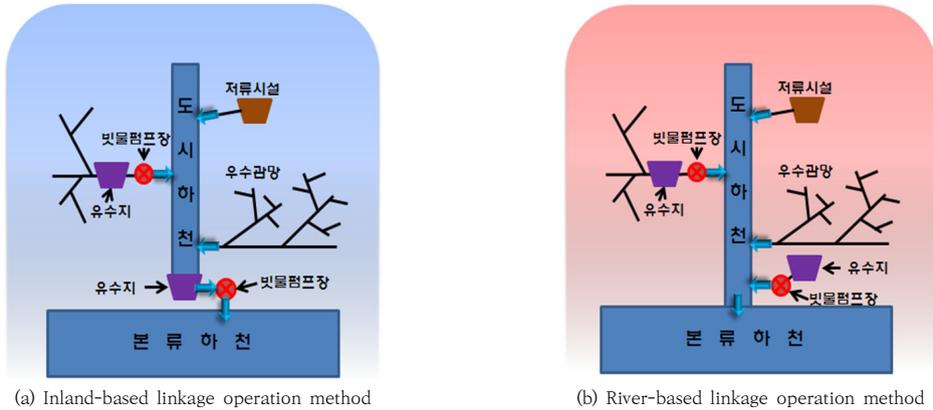


Fig. 3. Schematic of the inland- and river-based operation methods

정하여, 목감천이 내수로 운영될 때 관측지점의 실시간 수위로부터 예측유입량 산정을 통해 펌프 방류량을 결정하여 운영한다 (Fig. 4(b)).

모니터링 지점의 경우, 유역의 상류부에 위치하고 있다 (Fig. 2). 또한, 해당 위치에서의 수위를 바탕으로, 수위-유량곡선을 활용하여 빗물펌프장으로 유입되는 유입량을 예측하고, 그 값을 기반으로 펌프를 운영하여 유수지의 저류공간을 최대한 확보하여 침수피해를 줄일 수 있다. 즉, 외수의 상황을 고려하면서 빗물펌프장 저류지의 추가적인 공간확보를 통해 내수 및 외수 침수의 위험을 동시에 줄일 수 있다. 본 연구에서 제안하는 내외수 연계 운영방법은 내수와 외수를 동시에 고려하여 물을 적절히 분배함으로써, 내수침수와 외수침수를 모두 줄일 수 있는 운영 기법을 제안한다.

4.2 내외수 연계 운영을 위한 모니터링 지점 선정

대상지점의 수위변동 분석을 통해, 본 연구에서는 도시하천의 모니터링 지점으로 목감천 상류부의 ‘너부대교’를 모니터링 지점으로 선정하였다. 모니터링 지점으로부터 예측유입량을 계산하기 위해, 대상지점의 수위-유량곡선을 활용하였다 (Table 2) [20]. Fig. 5는 너부대교의 유입량 자료를 도시화한 것이다.

4.3 침수사례 선정

먼저, 우리나라의 침수피해 정보를 확인할 수 있는 재해연보 (행정안전부에서 매년 발간하는 피해정보를 기록한 자료)를 기반으로 2010년부터 2019년까지의 기간 동안 서울특별시에서 가장 큰 피해 (인명 및 경제적 피해)가 발생했던 침수피해 정보를 조사하였다. 이 결과를 바탕으로

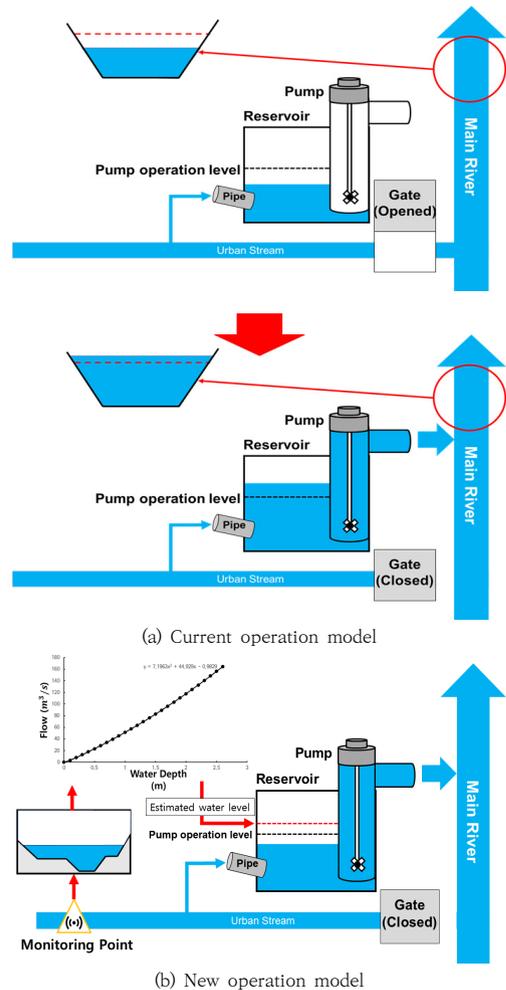


Fig. 4. Schematic of the inland- and river-based operation methods

로, 목감천 유역에 침수피해가 가장 크게 발생했던 연도로는, 2010년 (Fig. 6(a))과 2011년 (Fig. 6(b))으로 확인되었다. 본 연구에서는, 2010년과 2011년의 강우사상을 바탕으로, 제안하는 운영방법과 현재 운영방법 간의 비교 및 검토를 수행하였다.

Table 2. Rating curve equation used in this study

Height	Equation
$0.60 \leq H \leq 1.00$	$Q=10.453 (H-0.600)^{2.000}$
$1.00 < H \leq 1.65$	$Q=94.821 (H-0.904)^{1.723}$
$1.65 < H \leq 7.00$	$Q=172.892 (H-1.150)^{1.595}$

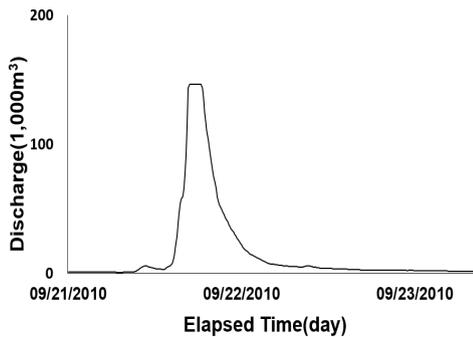


Fig. 5. Inflow hydrograph in Nebu-bridge

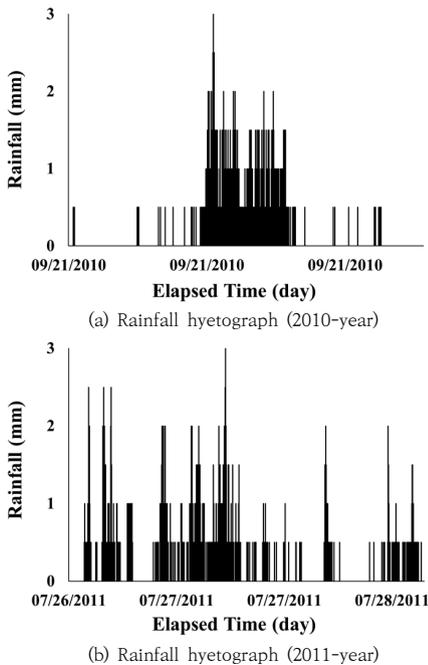


Fig. 6. Rainfall hyetograph used in this study

4.4 침수피해 모의 및 분석결과

EPA-SWMM을 이용하여 강우-유출 시뮬레이션을 수행하였다. 강우-유출 모의를 수행하기에 앞서, 2010년, 2011년의 강우 자료를 포함한 모니터링 지점의 유량을 입력자료로 선택하고, 모니터링 지점의 수위를 바탕으로 펌프를 운영하였다. 목감천의 수위가 일정 값을 초과하게 되면, 목감천과 안양천을 잇는 수문을 폐쇄하고, 모든 하천 유량을 개봉1 빗물펌프장의 유수지로 유입이 시작된다. 그 이후 너부대교, 모니터링 지점에서의 수위 값에 따라 방류펌프를 가동하게 된다. 이러한 내외수 연계 운영방법에 2010년과 2011년 기왕 강우사상을 각각 모의하고, 각 강우사상별 침수량 및 기존 운영에 따른 침수량을 계산하였다.

두 가지의 기왕 강우사상으로부터 도출된 유출량과 침수량의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 또한, Table 3에서 내외수 연계운영 방법과 기존 운영 방법으로부터 도출된 결과를 정리하였다. 2010년 강우사상으로부터 도출된 결과를 살펴보면, 총 침수량은 기존 운영 방법에서는 590,687 m³/s, 내외수 연계운영 방법에서는 384,790 m³/s로 각각 확인되었다. 내외수 연계운영 방법을 적용한 결과에서 205,897 m³/s 침수량이 감소하고, 34.9 %의 침수 저감효과를 나타내었음을 확인하였다. 또한, 침수 값의 결과에서도 기존 운영 방법에서는 8,749 m³/s, 내외수 연계운영 방법에서는 6,489 m³/s의 침수 값이 발생하였으며, 제안 방법에서 2,260 m³/s의 침수량이 줄어들었으며, 침수 저감효과를 나타낸 것을 확인하였다. 이 뿐만 아니라, 방류량의 결과에서도 큰 차이를 보였다. 제안 방법보다 기존 운영 방법에서 훨씬 적은 우수가 방류된 것을 확인할 수 있다 (Fig. 7(a)). 특히, 기존 운영 방법에서는 조기가동을 하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 이를 더 자세히 살펴보면, 유출량의 경우, 제안된 내외수 연계운영 방법이 기존 운영 방법보다 많음을 확인하였다. 이 의미는, 유출량이 많으면 배수구역 내에 저류하고 있는 빗물이 적어진다는 의미와 같으며, 그만큼 침수량도 감소했다는 의미를 갖는다. 마찬가지로, 2011년 강우사상의 결과 (Fig. 7(b))에서도 2010년 강우사상의 분석 결과와 비슷한 양상임을 확인하였다.

본 연구에서 제안하는 내외수 연계 운영방법은 두 가지의 기왕 강우사상으로부터 침수피해를 줄이는 데에 효과적임을 확인하였다. 빗물펌프장의 운영을 개선함으로써 하천의 통수능을 원활히 하여 하천 수위를 감소시켜, 침수피해를 줄일 수 있었다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 내외수 연계 운영방법은 제내지의 침수량을 저감하

Table 3. Comparison of flood reduction efficiency with proposed and current operation methods

		Total flooding volume (m ³ /s)	Peak flooding volume (m ³ /s)	Flood reduction efficiency (%)
2010 -year	Proposed operation method	384,790	6,489	- 34.9
	Current operation method	590,687	8,749	
2011 -year	Proposed operation method	1,215,747	11,968	-54.8
	Current operation method	2,688,802	23,639	

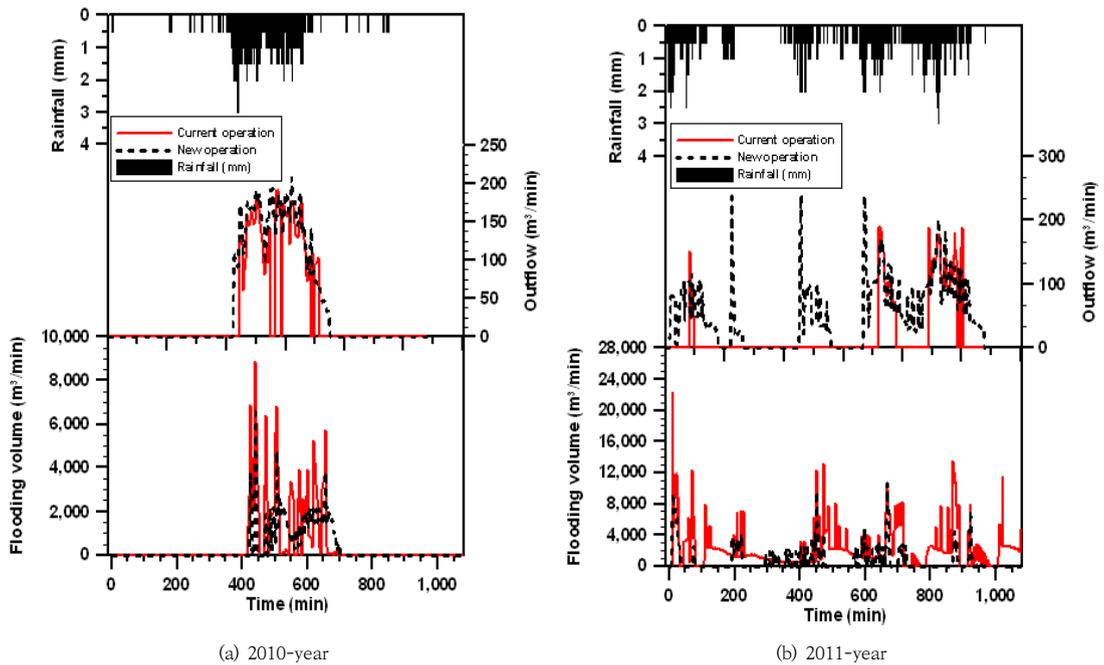


Fig. 7. Comparison between the proposed and current operation methods

면서 동시에, 제외지의 침수량도 줄일 수 있으므로, 도시 하천 관리를 위한 적절한 비구조적 대책임을 확인하였다.

4. 결론

도시 내배수시스템은 강우가 발생할 때, 우수를 하천이나 출구로 운반하여 하천으로 배출하여 도시지역에서 홍수를 방어할 수 있는 사회기반시설이다. 최근 설계 빈도를 초과하는 강우가 발생함에 따라 도시지역의 침수피해액은 점차 증가하고 있으며, 이를 보완하기 위해 침수저감 대책을 개발하고 있다. 본 연구에서는 도시지역의

침수피해를 최소화하기 위해 새로운 비구조적 대책 방법인 내외수 연계 운영방법을 제안하였다. 제안 기법은 상류 지점에 모니터링 지점을 선정하고, 빗물펌프장에 유입되는 유입량을 예측함으로써 펌프를 효율적으로 운영하여 유역 내, 하천변 침수피해를 최소화하기 위한 새로운 비구조적 대책이다. 제안 기술은 목감천 유역에 적용하였으며, 서울시의 대표적인 침수 사례인 2010년, 2011년 기왕 강우사상을 바탕으로 침수 모의 결과를 제시하고, 효율적인 비구조적 대책임을 검증하였다. 다음과 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 두 가지의 기왕 강우사상으로부터 기존 운영방법과 제안 방법의 결과를 비교 분석을 수행하였다.

기존 운영방법의 결과보다 제안하는 내외수 연계 운영방법의 결과에서 침수량이 각각 -34.9% (2010년), -54.8% (2011년) 침수저감 효과가 나타난 것을 확인하였다. 그 이유로는, 모니터링 지점에서의 수위를 바탕으로 예측 유입량을 산정하고, 빗물펌프장의 펌프 조기가동을 통해 우수지의 추가 저류공간 확보와 적절한 펌프 운영을 수행하여 외수 및 내수침수를 모두 저감시켰기 때문이다. 향후 본 연구에서 개발한 내외수 연계 운영방법에 우수 시간 수문운동을 고려한 비구조적 대책 방법도 필요하다. 우수지 간 수문운동을 통해, 저류공간을 최대한 활용함으로써 제내지와 제외지의 침수량을 모두 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

후속 연구로 (1) 펌프 운영을 통한 배수효과를 정량적으로 평가하기 위해 성능평가지표를 개발할 수 있으며, (2) 탄력성이나 신뢰도와 같은 지표를 활용한 시스템의 성능을 정량화 및 분석도 가능하다. 마지막으로, (3) 도시 지역의 침수 범위 및 심도를 정량적으로 분석하여 침수 피해액을 산정하고, 경제성 분석도 수행하여, 다양한 도시 침수 방재에 관한 연구에 활용할 수 있다. 본 연구의 결과로, 비구조적 침수저감 대책을 통해 도시 내배수시스템의 침수저감 효율을 증대시킬 수 있다. 또한, 집중호우가 많이 발생하는 도시지역에서 침수를 예방하고, 시민의 생명과 재산을 지킬 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] Roh, H. S. *A Study of the Measures and Effectiveness of Preventing Flood Damage in Urban Area*. Master's thesis, Hanyang University, pp.12-17, 2019.
- [2] Kessler, A., and M. H. Diskin. "The efficiency function of detention reservoirs in urban drainage systems," *Water Resources Research*, vol.27.3, no.3, pp.253-258, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1029/90WR02143>
- [3] Al-Hamati, A. A., Ghazali, A. H., & Mohammed, T. A. "Determination of storage volume required in a sub-surface stormwater detention/retention system," *Journal of Hydro-environment Research*, vol.4, no.1, pp. 47-53, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iher.2009.12.002>
- [4] Hsu, N. S., Huang, C. L., & Wei, C. C. "Intelligent real-time operation of a pumping station for an urban drainage system," *Journal of hydrology*, vol.489, pp.85-97, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.047>
- [5] Chill, J., & Mays, L. W. "Determination of the optimal location for developments to minimize detention requirements," *Water resources management*, vol.27, no.15, pp.5089-5100, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0453-6>
- [6] Vojinovic, Z., Sahlu, S., Torres, A. S., Seyoum, S. D., Anvarifar, F., Matungulu, H. & Kapelan, Z. "Multi-objective rehabilitation of urban drainage systems under uncertainties," *Journal of Hydroinformatics*, vol.16, no.5, pp.1044-1061, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.223>
- [7] Yazdi, J., Lee, E. H., & Kim, J. H. "Stochastic multiobjective optimization model for urban drainage network rehabilitation," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol.141, no.8, Article. 04014091, 2015. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000491](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000491)
- [8] Li, F., Duan, H. F., Yan, H., & Tao, T., "Multi-objective optimal design of detention tanks in the urban stormwater drainage system: framework development and case study," *Water Resources Management*, vol.29, no.7, pp.2125-2137, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0931-0>
- [9] Cimorelli, L., Morlando, F., Cozzolino, L., Covelli, C., Della Morte, R., & Pianese, D., "Optimal positioning and sizing of detention tanks within urban drainage networks," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol.142, no.1, Article. 04015028, 2016. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000927](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000927)
- [10] Jafari, F., Mousavi, S. J., Yazdi, J., & Kim, J. H. "Real-time operation of pumping systems for urban flood mitigation: single-period vs. multi-period optimization," *Water Resources Management*, vol.32, no.14, pp.4643-4660, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2076-4>
- [11] Ngo, T. T., Jung, D., & Kim, J. H. "Robust urban drainage system: Development of a novel multiscenario-based Design Approach," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol.145, no.7, Article. 04019027, 2019. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001084](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001084)
- [12] Wang, H., Lei, X., Khu, S. T., & Song, L. "Optimization of pump start-up depth in drainage pumping station based on SWMM and PSO," *Water*, vol.11, no.5, pp.1002, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11051002>
- [13] Lee, E. H. "Advanced operating technique for centralized and decentralized reservoirs based on flood forecasting to increase system resilience in urban watersheds," *Water*, vol.11, no.8, Article. 1533, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11081533>
- [14] Lee, J. H., Lee, Y. J., Jun, H. D., Kim, J. H. "Development of a Pump Operation Rule in a Drainage Pump Station using a Real Time Control Model for Urban Drainage System," *Journal of Korea Water Resources Association*, vol.40, no.11, pp.877-886, 2007.

DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2007.40.11.877>

- [15] Song, Y. H., Park, M. J., Lee, J. H. "Analysis of urban inundation reduction effect by early operation of drainage pumping station," *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, vol.14, no.2, pp.267-276, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2014.14.2.267>
- [16] Lee, Eui Hoon, and Joong Hoon Kim. "Development of resilience index based on flooding damage in urban areas," *Water* vol.9, no.6, Article. 428, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.3390/w9060428>
- [17] Park J. S. *Distribution and Cause Identification of Flood Damage Areas in Seoul*, Master's thesis, Seoul University, pp.5-14, 2018.
- [18] Park, S. H., Kim, H. J. "Design of Artificial Intelligence Water Level Prediction System for Prediction of River Flood," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol.24, no.2, pp.198-203, 2020.
DOI: <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.2.198>
- [19] Seoul Metropolitan Government, "Policy Report: River Management Division, Report on Design and Expansion of Gaebong1 Pump Station," Seoul Metropolitan Government, Republic Korea, pp.26-28.
- [20] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), "Annual Hydrological Report on Korea (Discharge)," Ministry of Land, Republic Korea, pp. 1-715, 2008.

권 순 호(Soon Ho Kwon)

[정회원]



- 2015년 2월 : 호서대학교 토목공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 호서대학교 토목공학과 수자원공학 (공학석사)
- 2020년 8월 : 고려대학교 건축사 회환경공학과 수자원공학 (공학박사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 미래건설환경융합연구소 연구교수

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학, 수자원시스템

정 현 우(Hyun Woo Jung)

[준회원]



- 2019년 2월 : 호서대학교 토목공학과 (공학사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과 수자원공학전공 석박통합과정

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

황 윤 권(Yoon Kwon Hwang)

[정회원]



- 2018년 8월 : 고려대학교 건축사 회환경공학과 (공학사)
- 2020년 8월 : 고려대학교 건축사 회환경공학과 수자원공학 (공학석사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 한국수력원자력 주식회사

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

이 의 훈(Eui Hoon Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2005년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 수자원공학 (공학석사)
- 2017년 2월 : 고려대학교 건축사 회환경공학과 수자원공학 (공학박사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 충북대학교 토목공학부 교수

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

김 중 훈(Joong Hoon Kim)

[정회원]



- 1984년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : Virginia Polytechnic Institute & State Univ. (공학석사)
- 1992년 2월 : Univ. of Texas at Austin (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

〈관심분야〉

수문학, 수리학, 수자원공학