

시스템 탄력성을 고려한 빗물저류조 운영수위 결정

이의훈¹, 이용식¹, 정동휘², 주진걸³, 김종훈^{4*}

¹고려대학교 건축사회환경공학과

²고려대학교 방재과학기술연구소

³동신대학교 토목공학과

⁴고려대학교 건축사회환경공학부

Determination of operating offline detention reservoir considering system resilience

Lee. Eui Hoon¹, Lee. Yong Sik¹, Jung. Donghwi², Joo. Jin Gul³, Kim, Joong Hoon^{4*}

¹Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

²Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea University

³Department of Civil Engineering, Dongshin University

⁴School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

요약 최근 도시 지역에서 엄청난 집중 호우의 빈도가 높아지고 불투수면적의 비율이 증가하면서 침수 발생 횟수 및 침수로 인한 피해가 급증하고 있다. 대부분의 지방자치단체에서는 도시의 침수를 방어하기 위해 빗물펌프장 설치, 우수관거 개량, 빗물저류조 설치 등의 구조적인 대책을 마련하고 있으나 치수시설의 포화로 치수대책의 효과가 줄어들고 있다. 이를 보완하기 위해 다양한 홍수 예보 및 내배수시설 운영 등과 같은 비구조적인 대책이 마련되고 있다. 본 연구에서는 구조적인 대책의 한계점을 보완하기 위해 현행 빗물저류조 운영방법이 아닌 새롭게 제시된 빗물저류조 운영방법의 펌프정지수위를 결정하였다. 새롭게 제시된 빗물저류조 운영에서 펌프정지수위 결정을 위해 Huff 분포에 의해 생성된 총 48개의 강우를 생성하였다. 먼저 생성된 강우를 빈도, 분위 및 지속시간 별로 구분하였다. 생성된 강우를 적용하여 실시한 강우-유출 모의를 토대로 평균 탄력성을 산정하고 1.2 m에서 1.5 m의 범위를 결정하였다. 결정된 범위에서 하수도 시설 기준에 의한 안전율 1.25를 고려하여 최종적으로 1.2 m를 적정 펌프정지수위로 결정하였다.

Abstract Recently, the number of occurrences of inundation and the severity of flood damage has increased rapidly as the frequency of localized heavy rainfall and the ratio of impervious area increased in urban areas. Most local governments focus on employing structural measures (e.g., the construction of detention reservoirs/pump stations, rehabilitation of drainage and sewer pipes) to prevent urban inundation. On the other hand, the effectiveness of implementing such structural measures is being diminished because there are already many inundation prevention facilities. The limitation of structural measures can be overcoming by employing non-structure measures, such as flood alerts and the operation of drainage facilities. This study suggests the pump operation rule (i.e., suggesting pump stop level) for a new detention reservoir operating method, which triggers the operation of a pump based on the water level at the monitoring node in urban drainage system. In the new reservoir operation, a total of 48 rainfall events are generated by the Huff distribution for determining the proper pump stop level. First, the generated rainfall events are distributed as frequencies, quartiles, and durations. The averaged system resilience value was determined to range from 1.2 m to 1.5 m is based on the rainfall-runoff simulation with rainfall generated by the Huff distribution. In this range, 1.2 m was identified considering the safety factor of 1.25 by the Standard on sewer facilities in 2011.

Keywords : Detention Reservoir Operation, Nonstructure Measure, Pump Stop Level, Rainfall-Runoff Simulation, System Resilience

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(13AWMP-B066744-01)에 의해 수행되었습니다.

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

Tel: +82-2-3290-3316 email: jaykim@korea.ac.kr

Received July 18, 2016

Revised (1st September 28, 2016, 2nd October 4, 2016)

Accepted October 7, 2016

Published October 31, 2016

1. 서론

기존의 도시침수 저감 대책들은 내배수시설의 증설 및 신설 등을 바탕으로 하는 구조적인 대책에 머물러 있으며, 충분한 비용과 시간이 필요하다. 뿐만 아니라 과도한 내배수시설은 비효율적인 침수대책으로 이어질 수 있으며 이상기후에 따른 집중호우 등에 완벽하게 대응하기 힘들다. 이를 보완하기 위하여 구조적인 대책과 더불어 집중호우에 대비할 수 있도록 각 시설물의 기능 및 경제성을 최대화 하며 방재성능을 향상시킬 수 있는 비구조적인 대책이 동시에 수립되어야 한다.

도시지역에서의 침수를 저감하기 위한 다양한 내배수 시설이 설치되고 있으며 특히 빗물저류조는 우수를 저류하여 침투홍수량 저감에 효과적이다. 빗물저류조는 온라인 빗물저류조, 오프라인 빗물저류조로 나눌 수 있으며 각각의 장, 단점은 다음과 같다. 먼저 온라인 빗물저류조의 경우 빈도에 상관없이 모든 유입량을 받을 수 있으며 간단한 수리구조물이며 높은 안정성을 가지고 있다. 뿐만 아니라 유입, 저류, 유출이 동시에 이루어지며 연속강우에도 높은 안정성을 가지고 있다. 반면에 큰 용량이 필요하기 때문에 많은 공사비용이 들고 유지관리에 많은 비용이 소요되며 침수가 발생하였을 때 더 큰 저류용량이 필요하다.

오프라인 빗물저류조의 경우 작은 용량으로 설치할 수 있어 부지를 효율적으로 사용할 수 있으며 건설비용도 적게 소요된다. 모든 유입량을 받는 온라인 빗물저류조에 비해 사용빈도 및 유지관리비용이 적게 소요된다. 하지만 용량이 작기 때문에 연속강우에 효율적으로 대처하기 힘들고 유입부를 위한 월류턱 설계가 필요하며 복잡한 형태의 구조물로 안정성이 낮다.

하천의 상류에 설치되는 온라인 빗물저류조는 오프라인 빗물저류조보다 큰 규모로 설계되며 이에 따라 연속강우에도 강하다. 반면, 오프라인 빗물저류조는 대개 도시지역 우수관망 내에 설치되는 경우가 많으며 일반적으로 저류용량이 작고 연속강우에 약하다.

2000년대 이후 도시지역에서 설치되고 있는 빗물펌프장 및 빗물저류조를 포함한 내배수시스템에 대한 다양한 연구들이 발표되었다. 먼저 빗물펌프장에 대한 연구들을 살펴보면 내배수시스템 실시간 운영모형을 이용한 빗물펌프장 운영기법 (Lee et al., 2007) [1], 도시유역에서의 예측기반 빗물펌프장 운영 (Tamoto et al., 2008)

[2], 빗물펌프장 설계에 대한 일반적인 방법 (Graber, 2010) [3], 빗물펌프장 운영시스템 개선 및 적용과 경제효과를 분석 (Joo et al., 2010) [4] 및 실시간 빗물펌프장 운영 (Hsu et al., 2013) [5] 등을 포함한 설계, 경제효과, 운영에 대해 분석을 실시한 연구들이 진행되었다. 빗물펌프장의 운영효과에 대한 다양한 기법을 기반으로 한 연구가 진행되고 있는 상황이다.

빗물저류조에 대한 연구들은 Multi-objective genetic algorithms (MOGA)를 이용한 저류조 용량 및 위치 최적화 (Chung et al., 2008) [6], 소유역에서 저류조의 용량 결정 (AL-Hamati et al., 2010) [7] 및 도시배수시스템에서의 저류조 평가를 위한 확률적 강우 분석 (Andrés-Doménech et al., 2010, 2012) [8][9] 등의 연구에 이어 저류조 위치, 매개변수 및 용량 최적설계에 대한 다양한 연구들이 주목받았다 (Chill and Mays, 2013; Tao et al., 2014) [10][11]. 최근 기존의 연구들과 달리 빗물저류조 운영에 대한 연구로 도시지역에서의 오프라인 빗물저류조 운영방법 개발 (Lee et al., 2016) [12]과 같은 연구들이 발표되었다. 빗물저류조 운영에 대한 연구는 최근 등장하고 있는 실정이며 추가적으로 빗물저류조 운영에 대한 다양한 연구가 필요하다.

최근 빗물저류조 운영에 대한 연구들이 등장하고 있지만 과거 구조적인 대책을 강조하는 연구들이 주를 이루었다. 하지만 최대치에 대한 분석에 국한하고 있어 시설의 과다계획으로 인한 예산낭비가 되고 있다 (Lee et al., 2014) [13]. 빗물저류조의 침수효과를 극대화시키기 위해서는 구조적인 대책뿐만 아니라 운영을 포함한 비구조적인 대책도 동시에 강구되어야만 한다. 도시지역에서의 오프라인 빗물저류조 운영방법 개발 (Lee et al., 2016) [12]의 경우 새로운 빗물저류조 운영에 대한 개념을 정립하였으나 운영에 대한 명확한 기준을 제시하지 않았을 뿐만 아니라 완전한 빗물저류조의 운영을 위해서는 운영에 대한 명확한 기준이 필요하다.

본 연구에서는 도시지역 우수관망 내에 설치되는 오프라인 빗물저류조의 운영 (Lee et al., 2016) [12]에 대한 수위를 결정하기 위한 연구를 진행하였다. 빗물저류조 운영수위를 결정하기 위한 방법으로 Huff(1967) [14] 분포를 기반으로 하여 확률강우를 생성하고 각각의 운영수위에 따른 빗물저류조를 적용하여 강우-유출 모의를 실시하였다. 빗물저류조 운영에 따른 내배수시스템의 평가를 위하여 내배수시스템 탄력성 지수를 제안하고 이를

적용하여 각각의 모의에 따른 탄력성을 산정하였다. 분위별, 지속시간 및 빈도별 탄력성에 따른 결과를 기반으로 하여 빗물저류조 운영 수위를 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 연구개요

본 연구는 도시지역 빗물저류조 운영, 내배수시스템 탄력성 및 빗물저류조 운영결정 등으로 구성되어 있다. 비구조적인 치수대책으로 빗물저류조 운영결정을 위한 시스템 탄력성 지수를 제안하고 이를 바탕으로 운영수위를 결정하여 제시하고자 한다. 아래의 Fig. 1은 연구흐름도이다.

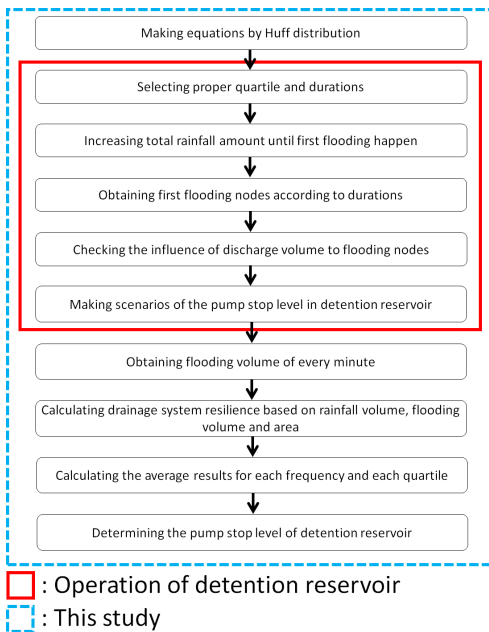


Fig. 1. Research flow

위의 Fig. 1을 기반으로 하여 정리한 연구의 진행과정은 다음의 step 1부터 step 10과 같다. 아래의 step 2부터 step 6까지는 도시지역 오프라인 빗물저류조 운영방법 개발 (Lee et al., 2016) [12]에서 제안된 운영방법의 내용이다.

- step 1: Huff분포를 바탕으로 회귀식을 산정한다.
- step 2: 대상유역에 적용할 적절한 분위 및 지속시간

을 선택한다.

- step 3: 최초월류지점이 발생할 때까지 강우총량을 증가시킨다.
- step 4: 지속시간에 따라 최초월류지점들을 확인한다.
- step 5: 빗물저류조 방류량에 따른 침수지점들의 수위 변화를 검토한다.
- step 6: 빗물저류조 펌프정지수위에 따른 시나리오를 만든다.
- step 7: 매분마다의 침수량을 획득한다.
- step 8: 강우, 침수량 그리고 유역면적을 바탕으로 내배수시스템 탄력성을 계산한다.
- step 9: 각각의 빈도와 분위별로 대상유역의 평균시스템 탄력성을 계산한다.
- step 10: 빗물저류조의 적절한 펌프정지수위를 결정한다.

2.2 도시지역 빗물저류조 운영

현재 도시지역 빗물저류조의 운영은 유입과 유출로 나눌 수 있다. 먼저 유입을 살펴보면 월류턱과 수문으로 구분할 수 있는데 도시지역에 설치되는 빗물저류조의 유입부 형태는 대부분 설계빈도를 반영한 일정한 높이의 월류턱으로 되어 있다. 도시지역 빗물저류조의 유출을 살펴보면 대부분 배수펌프를 통한 강제배수를 실시하고 있고 내수위가 방류수위에 도달하거나 강우가 종료되었을 때 배수를 실시한다.

하지만 이러한 형태의 배수는 빗물저류조의 용량만큼의 저류가 가능할 뿐 연속강우에 대해서는 취약하게 된다. 연속강우에 대한 약점을 보완하기 위하여 제안된 방법이 우수관망의 상황을 고려한 배수를 실시하여 빗물저

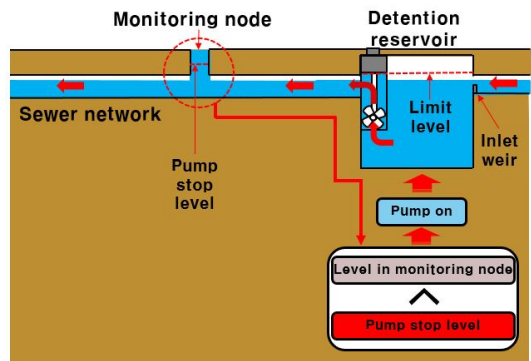


Fig. 2. Operation of detention reservoir

류조 내의 추가적인 저류공간을 확보하는 운영이다. Huff 분포에 의한 확률강우를 기반으로 대상유역의 최초월류발생지점을 검토하고 이를 모니터링 지점으로 선정하여 모니터링 지점의 수위에 따라 방류를 결정하는 운영이다. 아래의 Fig. 2는 도시지역 오프라인 빗물저류조 운영방법에서 제안된 연구의 모식도이다.

2.3 내배수시스템 탄력성

도시지역에서의 내배수시스템의 탄력성은 내배수시설 오작동 및 침수 등의 실패로부터 준비, 회복 및 복구를 준비하는 능력으로 정의될 수 있다. 예를 들어, 빗물 펌프장이나 빗물저류조에서 기기 오작동이나 미숙한 운영으로 인해 도시지역에 침수가 발생하는 것을 실패라 할 수 있다. Fig. 3은 시간에 따른 실패 및 복구를 포함한 시스템 탄력성을 개념적으로 정의하고 있다.

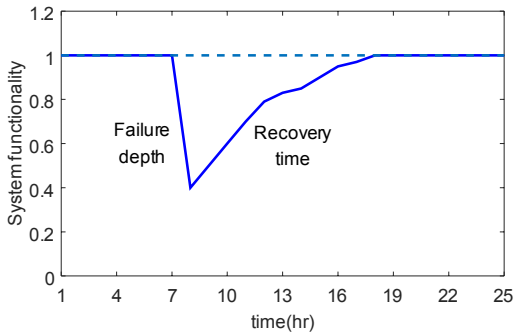


Fig. 3. Concept of system resilience

본 연구에서 제안한 식은 내배수시스템의 탄력성을 평가하는 식으로 내배수시스템의 침수저감 능력과 침수 회복력을 종합적으로 평가할 수 있는 지표이다. 침수저감 능력이란 초기 침수발생시 그 총량 (Fig. 3의 “Failure depth”)을 최대한 줄이는 시스템의 능력을 말하며 급격한 침수피해를 줄이기 위해 필요하다. 침수회복력이란 이미 발생한 침수를 가능한 빠른 시간 (Fig.3의 “Recovery time”) 내에 배제하여 시스템을 정상상태로 복구하는 능력을 말한다. 위의 두가지 시스템능력이 우수할 수록 총 침수량은 줄어든다.

본 연구에서는 매 분마다의 침수량, 강우량 및 유역면적 등을 탄력성 산정을 위한 성능평가 함수를 산정하는 요소들로 사용하였다. 성능평가 함수의 값은 0부터 1까지 분포하며 도시 내배수시스템에서 침수가 발생하지 않

았을 때는 1이며 침수가 발생하게 되면 1 미만으로 떨어지게 된다. 아래의 식 (1)은 임의의 시간 t분에서의 성능평가 함수이다.

$$u(T)_t = 1 - \frac{F_t}{R \times A} \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 $u(T)_t$ 는 성능평가함수, F_t 는 t분에서의 침수량, R 은 강우총량, A 는 유역면적이다. R 과 A 의 곱은 유역강우총량이며 유역에 내린 강우의 총 합이다. 높은 성능평가 함수의 값은 침수(실패) 발생 후 내배수시스템이 높은 복원력을 가지고 있음을 의미한다. 반대로 낮은 성능평가 함수의 값은 침수(실패) 발생 후 내배수시스템이 낮은 복원력을 가지고 있음을 의미한다. 성능평가함수는 매분마다의 내배수시스템의 탄력성을 의미하며 이를 전체시간 T 로 적분하여 시스템탄력성을 계산한다. 위의 식 (1)에서 계산된 각 시간별 성능평가 함수를 기반으로 하여 식(2)가 계산된다.

$$R_s = \frac{1}{T} \int_0^T u(T)_t dT \quad (2)$$

위의 식 (2)에서 R_s 는 내배수시스템의 탄력성, T 는 전체 모의 시간, $u(T)_t$ 는 식 (1)을 통해 계산된 성능평가함수이다. 본 연구에서는 식 (1) 및 식 (2)를 통해 계산된 내배수시스템의 탄력성을 이용하여 내배수시스템의 탄력성이 최대가 될 수 있는 빗물저류조의 펌프정지수위를 결정하고 제안하였다.

2.4 빗물저류조 운영수위 결정

빗물저류조 운영수위 결정을 위한 모의에 사용된 강우는 앞서 언급한 바와 같이 Huff 분포에 의한 확률강우이다. Huff 분포에 의해 강우를 빈도, 지속시간 및 분위에 따라 발생시킨다. 본 연구에서 적용한 강우는 총 48개이다. 총 48개의 강우는 1분위부터 4분위까지 30년, 50년, 80년 및 100년 빈도를 고려하여 30분, 60분, 90분의 지속시간에 따라 분포시켰다. 모든 강우를 적용하여 강우-유출 모의를 실시하고 내배수시스템의 분단위 침수량을 획득한다. 획득한 분단위 침수량을 빈도별로 분류한 후 다시 분위별로 분류하고 마지막으로 지속시간별로 분류한다. 역으로 지속시간별 평균, 분위별 평균, 빈도별

평균을 산정하여 시스템 탄력성 결과를 획득한다. 빈도, 지속시간 및 분위에 따른 결과를 정리하기 위하여 Fig. 4와 같은 방식으로 계산하였다.

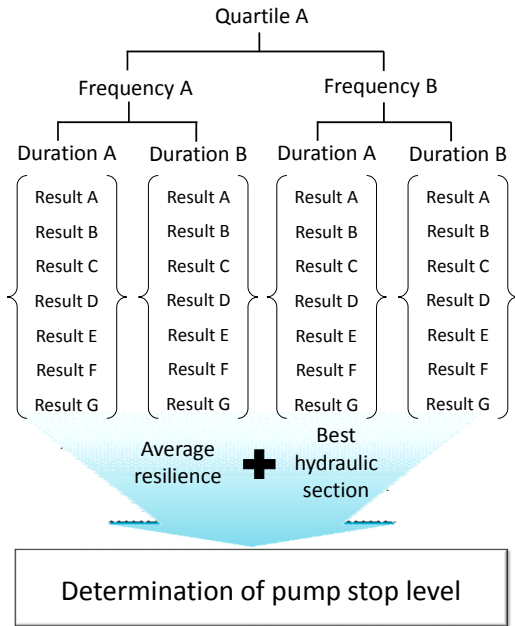


Fig. 4. Calculation for determining pump stop level

시스템 탄력성 지수가 최초로 평균 시스템 탄력성을 넘는 펌프정지수위 및 빗물저류조 방류지점의 최상유리 단면을 고려한 수위를 적정 펌프정지수위로 결정하였다.

3. 적용 및 분석

3.1 대상유역

본 연구에서는 서울시 구로구, 영등포구, 관악구 등에 걸쳐 흐르고 있는 안양천의 지류인 도림천 유역을 검토하였다. 도림천은 대방천, 봉천천과 같은 지류를 비롯하여 2개의 빗물저류조(대림어린이공원 빗물저류조, 관악산 빗물저류조), 10개의 빗물펌프장(구로1, 구로2, 구로3, 구로4, 문래, 도림1, 대림2, 대림3, 신림, 신림5) 등으로 구성되어 있다. 2개의 빗물저류조 중 관악산 빗물저류조의 경우 도림천 상류에 설치되어 있기 때문에 대림3 빗물펌프장 유역에 설치된 대림어린이공원 빗물저류조를 선택하였다.

대림어린이공원 빗물저류조는 약 248.5ha의 면적을

가지고 있는 대림3 빗물펌프장으로 연결되는 우수관망의 상류에 위치하고 있으며 2009년부터 설치되어 운영하고 있다. 하지만 2010년 9월 21일 및 2011년 7월 27일에 온강우로 인해 해당유역에 침수가 발생하였다. 강우-유출 모의를 위해 선택한 모델은 EPA (Environmental Protection Agency)에서 1971년 개발한 SWMM (Stormwater Management Model) 5.0이다. 아래의 Fig. 5는 서울시 하수정보시스템 및 GIS를 기반으로 만든 대상유역 우수관망도이다.

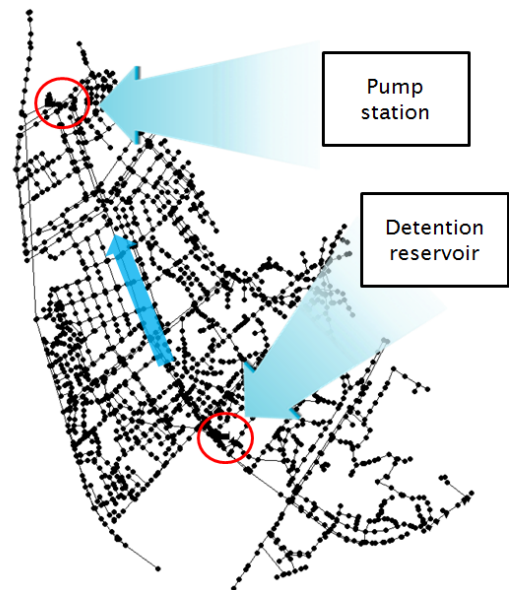


Fig. 5. Daerim drainage network

대림어린이공원 빗물저류조는 20년 빈도, 임계지속시간 210분의 우수를 저류하기 위해 설계되었으며 5년 빈도를 상회하는 우수를 월류턱을 통해 빗물저류조로 유입된다. 대림어린이공원 빗물저류조의 총 저류용량은 2,447 m³이며 자연배제없이 전량 수중펌프 (22kW, 9 m³/min)에 의해 방류한다. 빗물저류조의 높이는 3.2 m 이고 1 m의 여유고를 가지고 내수위가 2.2 m가 되면 저류된 우수를 전량 방류한다. 월류턱은 폭 2 m, 높이 0.4m로 설계되었으며 월류턱을 넘어온 유량은 전량 폭 2 m, 높이 1.5 m의 구형 유입관거에 의해 빗물저류조로 유입된다 (Yeongdeungpo-Gu, 2007) [15].

3.2 강우자료

내배수시스템 탄력성 분석을 위한 강우자료로 Huff

분포를 이용한 확률강우를 사용하였다. Huff 분포를 이용한 확률강우의 경우 1분위는 첨두값이 전체시간의 0/4에서 1/4, 2분위는 1/4에서 2/4, 3분위는 2/4에서 3/4, 4분위는 3/4에서 4/4 범위에 위치한다. 서울지역 Huff 1분위는 식 (3), 2분위는 식 (4), 3분위는 식 (5), 4분위는 식 (6)과 같다.

$$y = 29.289x^6 - 95.64x^5 + 119.7x^4 - 70.768x^3 + 18.176x^2 + 0.2426x - 0.0007 \quad (3)$$

$$y = -38.505x^6 + 118.93x^5 - 132.67x^4 + 60.815x^3 + 8.3001x^2 + 0.7296x - 0.0005 \quad (4)$$

$$y = 37.835x^6 - 106.21x^5 + 105.18x^4 - 44.549x^3 + 9.1084x^2 - 0.3603x + 0.0005 \quad (5)$$

$$y = -25.498x^6 + 63.755x^5 - 57.196x^4 + 22.882x^3 - 3.4377x^2 + 0.4955x - 0.0002 \quad (6)$$

위의 식 (3)에서 식 (6)까지의 식을 이용하여 Fig. 6과 같은 누가분포를 구하고 Fig.7과 같이 시간대별로 분포 시킨다.

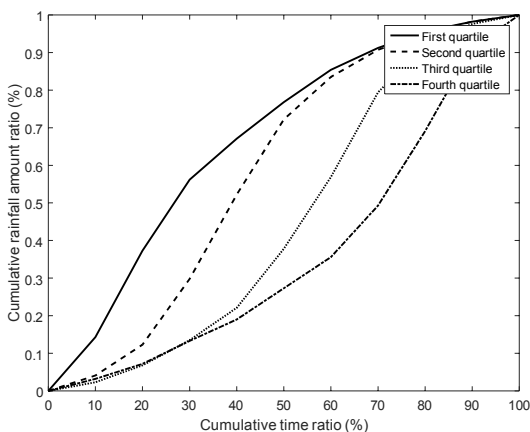


Fig. 6. Cumulative Huff distribution in Seoul

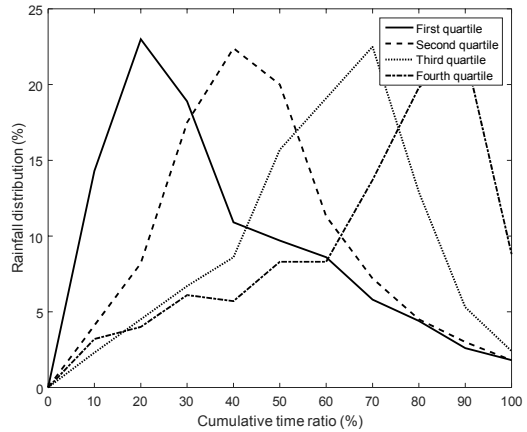


Fig. 7. Huff distribution in Seoul

3.3 적용결과

모니터링 지점을 선정하기 위해 Huff 분포 중에서 서울지역에 적합하다고 알려진 3분위를 적용하고 지속시간별(30, 60, 90분) 최초월류발생지점을 검토하면 지선에서 최초월류가 발생한다. 하지만 지선에서 발생한 최초월류가 대상유역을 대표한다고 보기 힘들뿐만 아니라 간선으로 방류하는 빗물저류조에 의해 영향을 받는다고 보기 힘들다. 간선관거 내에서 최초월류가 발생하는 지점은 아래의 Fig. 8과 같다 (Lee et al., 2016).

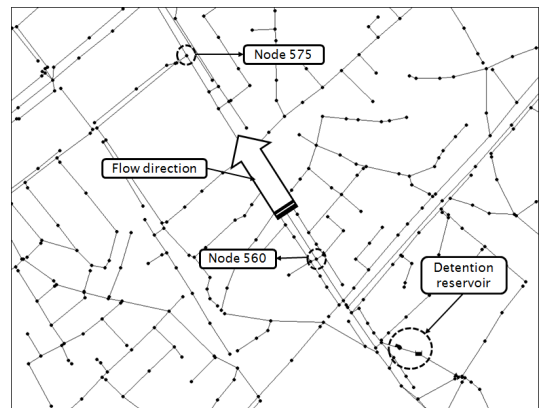


Fig. 8. First inundation nodes in main conduits

지속시간 30분, 60분에서는 560지점, 지속시간 90분에서는 575 지점이 최초월류지점이므로 두 지점 중에서 모니터링 지점을 검토하였다. 대상유역에서의 도달시간은 30분이므로 대상유역의 도달시간을 고려하여 560지점을 모니터링지점으로 선정하였다. 최초월류발생지점

인 560지점의 분단위 침수량 (1분위, 100년 빈도, 지속 시간 60분)은 다음의 Fig. 9와 같다.

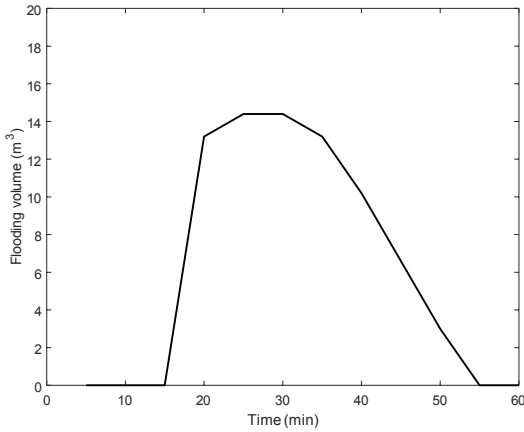


Fig. 9. Flooding volume in node 560

빗물저류조의 방류에 따른 모니터링지점에서의 수위를 검토하면 수위차가 없음을 알 수 있다. 이는 모니터링 지점이 3련의 간선관거 (3×1.5m×2.0m) 내에 있으며 방류펌프의 총용량이 0.3 m³/sec에 불과하기 때문이다.

모니터링 지점의 높이는 1.5 m이며 펌프정지수위를 검토하기 위해 전체 높이의 절반인 0.8 m부터 1.5 m까지의 수위를 0.1 m 단위로 구분하여 순차적으로 검토하였다. 0.1 m부터 0.7 m의 수위를 검토에서 배제한 이유는 기존의 운영을 적용한 결과와 동일하기 때문이다. 현재까지의 적용방법들은 도시지역 오프라인 빗물저류조 운영방법 개발 (Lee et al., 2016)에서 제안된 내용이다.

대상구역의 내배수시스템 탄력성을 계산하기 위해 먼저 선행되어야 할 부분은 대상구역에서의 분단위 침수량을 얻는 것이다. 획득한 분단위 침수량을 바탕으로 식 (1)을 적용하여 분단위 성능평가를 실시하고 이를 식 (2)를 통해 전체 시스템 탄력성을 획득하게 된다.

강우-유출 모의를 위해 3.2절에서 언급한 바와 같이 Huff 분포를 바탕으로 하여 분위별(1, 2, 3, 4분위), 빈도별(30, 50, 80, 100년), 지속시간별(1, 2, 3시간)로 총 48개의 확률강우를 생성하였다. 빈도를 30년부터 적용한 이유는 30년빈도 이하의 확률강우를 적용하였을 때 대상구역에 침수가 발생하지 않아 운영에 따른 차이를 검토하기 힘들기 때문이다. 뿐만 아니라 지속시간 1시간 이상의 강우를 모의한 이유는 30분 이내의 지속시간이 짧은 강우에서는 연속강우에서 장점을 갖는 도시지역

오프라인 빗물저류조 운영방법에서의 펌프정지수위별 운영차이를 보여주기 어렵기 때문이다. 총 48개 강우를 모의하여 나온 48개의 시스템 탄력성은 다음의 Table 1과 같다.

Table 1. System resilience based on probability rainfall data

Frequency	30 year		
Quartile	First quartile		
Duration	60 min	120 min	180 min
0.8	0.99996413	0.99993852	0.99994704
0.9	0.99996622	0.99994045	0.99995034
1.0	0.99996620	0.99993867	0.99995137
1.1	0.99996098	0.99994005	0.99994566
1.2	0.99996622	0.99993748	0.99995000
1.3	0.99996591	0.99994202	0.99995152
1.4	0.99996591	0.99994152	0.99995410
1.5	0.99996591	0.99994369	0.99995410
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
Frequency	100 year		
Quartile	Fourth quartile		
Duration	60 min	120 min	180 min
0.8	0.99975906	0.99967957	0.99974440
0.9	0.99976158	0.99968198	0.99974561
1.0	0.99976196	0.99968017	0.99974603
1.1	0.99976185	0.99968319	0.99974795
1.2	0.99976153	0.99968193	0.99974710
1.3	0.99976087	0.99968084	0.99974813
1.4	0.99976037	0.99968364	0.99974892
1.5	0.99976247	0.99968357	0.99974909

빈도별, 분위별 결과를 Table 1에서의 결과를 Fig. 4에서 보여주는 방식으로 정리하고 각각의 펌프정지수위에 따른 시스템탄력성을 계산하였다. 아래의 Fig. 10은 펌프정지수위에 따른 시스템탄력성 결과이다.

평균 시스템 탄력성보다 높은 결과를 보이는 펌프정지수위는 1.2 m에서 1.5 m까지이다. 전반적으로 펌프정지수위를 높게 유지할수록 빗물저류조 내의 추가 저류공간 확보가 용이해져 내배수시스템의 탄력성이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 빗물저류조 운영을 위한 펌프정지수위를 1.2 m에서 1.5 m까지의 수위에서 결정하는 것이 적합하다. 최종적으로 우수관거의 효율적인 배수를 고려하기 위하여 원형관거의 최량수리단면인 0.8 D (D는 노드높이) 내에서 선택하는 것이 타당하고 수위에 대한 안전율은 대구경관거에서의 안전율 (25% ~ 50%, 하수도시설 기준 [16])을 고려하여 1.25로 선정하였고 이를

바탕으로 모니터링 지점인 노드 560의 높이를 고려하여 1.2 m (= 1.5 m * 0.8 or 1.5 m / 1.25)를 적정 펌프정지수위로 결정하였다.

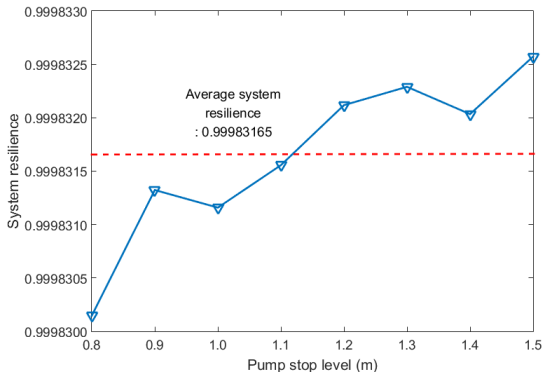


Fig. 10. Results of system resilience

4. 결 론

본 연구에서는 도립천에 위치한 대립3 빗물펌프장 유역에 있는 대립어린이공원 빗물저류조의 운영을 위해 시스템 탄력성을 고려한 펌프정지수위를 결정하였다. 이를 위해 Lee et al.(2016) [12]이 발표하였던 운영을 기반으로 하여 운영의 핵심이 되는 펌프정지수위를 결정하기 위해 내배수시스템의 탄력성을 고려하였다. 먼저 서울지역 Huff 분포를 이용하여 확률강우를 분위 (1, 2, 3, 4분위), 빈도 (30, 50, 80, 100년) 및 지속시간 (1, 2, 3시간) 별로 생성하여 총 48개의 강우자료를 구성하였다.

각 확률강우별 모의를 실시하고 분당 침수량을 기반으로 하여 각각의 시스템 탄력성을 산정하였다. 펌프정지수위별 평균 시스템탄력성을 산정하고 이를 검토하였다. 전반적으로 모니터링지점에서의 펌프정지수위가 높을수록, 즉 배수펌프를 가동하여 빗물저류조의 추가저류공간을 확보할수록 시스템 탄력성이 높았다. 펌프정지수위가 1.2 m에서 1.5 m 사이일 때 시스템 탄력성이 전체 평균보다 높았으며 원형관거의 최량수리단면 및 안전율을 고려하여 1.2 m를 적정 펌프정지수위로 결정하였다.

추후 빗물펌프장의 운영을 결정할 수 있는 시스템 탄력성 검토, 내배수시설 연계운영을 위한 시스템 탄력성 검토 등의 연구가 이어진다면 내배수시스템 평가 및 운영을 위한 새로운 방법이 될 것이다. 기존에 설치된 빗물펌프장 및 빗물저류조 뿐만 아니라 도시지하방수로 등의

새로운 치수구조물의 평가 및 운영에도 적용할 수 있을 것이다.

References

- [1] J.H. Lee, Y.J. Lee, H.D. Jun, and J.H. Kim, "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: <http://dx.doi.org/10.3741/JK WRA.2007.40.11.877>
- [2] N. Tamoto, J. Endo, K. Yoshimoto, T. Yoshida, and T. Sakakibara, "Forecast-based operation method in minimizing flood damage in urban area", *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK, 2008. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000268](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000268)
- [3] S. Graber, "Generalized Method for Storm-Water Pumping Station Design", *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 15, Issue 11, pp. 901-908, 2010.
- [4] J.G. Joo, D.G. Yoo, J.M. Yang, D.H. Jung, and J.H. Kim, "Improvement and Application of Pump Station Operating System and Economic Analysis of the Application", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 10, no. 3, pp. 155-165, 2010.
- [5] N. Hsu, C. Huang, and C. Wei, "Intelligent real-time operation of a pumping station for an urban drainage system", *Journal of Hydrology*, vol. 489, pp. 85-97, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.047>
- [6] J.H. Chung, K.Y. Han, and K.S. Kim, "Optimization of detention facilities by using multi-objective genetic algorithms", *Journal of Korea Water Resources Association*, vol. 41, no. 12, pp. 1211-1218, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JK WRA.2008.41.12.1211>
- [7] A.A.N. AL-Hamati, A.H. Ghazali, and T.A. Mohammed, "Determination of storage volume required in a sub-surface stormwater detention/retention system", *Journal of Hydro-environment Research*, vol. 4, Issue 1, pp. 47-53, 2010.
- [8] I. Andrés-Doménech, A. Montanari, and J.B. Marco, "Stochastic rainfall analysis for storm tank performance evaluation", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, Issue 7, pp. 1221-1232, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/hess-14-1221-2010>
- [9] I. Andrés-Doménech, A. Montanari, and J.B. Marco, "Efficiency of storm detention tanks for urban drainage systems under climate variability", *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 138, no. 1, pp. 36-46, 2012. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000144](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000144)
- [10] J. Chill, and L.W. Mays, "Determination of the optimal location for developments to minimize detention requirements", *Water Resources Management*, vol. 27, Issue 15, pp. 5089-5100, 2013.
- [11] T. Tao, J. Wang, K. Xin, and S. Li, "Multi-objective optimal layout of distributed storm-water detention", *International Journal of Environmental Science and*

Technology, vol. 11, no. 5, pp. 1473-1480, 2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-013-0330-0>

- [12] E.H. Lee, Y.S. Lee, J.G. Joo, and J.H. Kim, "Development of Operation in Urban Offline Detention Reservoirs", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 16, no. 1, pp. 227-236, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.1.227>
- [13] E.H. Lee, D.G. Yoo, and J.H. Kim, "Estimation of Intervent Time for Management of Non-Point Source Pollutants", *Journal of the Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 15, no. 5, pp. 3159-3168, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.5.3159>
- [14] F.A. Huff, "Time distribution of rainfall in heavy storms", *Water Resources Research*, vol. 3, Issue 4, pp. 1007-1019, 1967.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/WR003i004p01007>
- [15] Yeongdeungpo-Gu. "Report on design of Daerim reservoir", 2007.
- [16] Korea Water and Wastewater Works Association. "Standard on sewer facility", 2011.

김 중 훈(Kim Joong Hoon)

[정회원]



- 1984년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1986년 12월 : Virginia Polytechnic Institute & State Univ. (공학석사)
- 1992년 2월 : Univ. of Texas at Austin(공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

이 의 훈(Lee Eui Hoon)

[정회원]



- 2003년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2005년 2월 : 고려대학교 사회환경시스템공학과 수자원공학 (공학석사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과 수자원공학전공 박사과정

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

이 용 식(Lee Yong Sik)

[정회원]



- 2015년 2월 : 고려대학교 건축사회환경공학과 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과 수자원공학전공 석사과정

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

정 동 휘(Jung Donghwi)

[정회원]



- 2009년 2월 : 고려대학교 사회환경시스템공학과 (공학사)
- 2011년 2월 : 고려대학교 건축사회환경공학과 수자원공학 (공학석사)
- 2013년 2월 : Univ. of Arizona (공학박사)

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

주 진 걸(Joo Jin Gul)

[정회원]



- 2003년 8월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2005년 8월 : 고려대학교 사회환경시스템공학과 수자원공학 (공학석사)
- 2011년 2월 : 고려대학교 건축사회환경공학과 수자원공학 (공학박사)
- 2011년 3월 : 전북과학대학 토목공학과 조교수
- 2014년 3월 : 동신대학교 토목공학과 조교수

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학