

잔류유량 기반 복원력 지수를 통한 빗물펌프장 자동운영 성능 검토

김영남* · 이의훈**

Kim, Young Nam* · Lee, Eui Hoon**

A Study of the Automatic Operation Performance of a Pump Station using Resilience Considering Residual Flows

ABSTRACT

Non-structural improvements to urban drainage systems are necessary to overcome the elevated levels of urban flood damage. This study proposed a type of automatic pump/gate operation technology for urban pump stations that takes reservoir inflows and river water levels into account and its performance is compared with the current operation using the concept of residual flow-based resilience. The proposed automatic operation relies on three pump operations and two gate operations. The water depth at the monitoring node was used for the pump operation, and the monitoring node was selected in consideration of the first overflow node and the maximum overflow node. The target area is the Daegu Bisan urban pump station, and the rainfall data consisted of probability rainfall sets with durations of 30 minutes, 60 minutes, 90 minutes and 120 minutes, and frequencies of 30, 50, and 70 years. As a result of the application of the proposed operation, differences in the resilience between the automatic operation and the current operation were at least $5.20E-05$ with a maximum of $8.07E-04$. The longer the duration is, the greater the difference in the resilience.

Key words : Drainage pump station operation, Residual flow, Resilience, Pump operation, Gate operation

초록

증가하는 도시 침수 피해에 대응하기 위해서는 내배수시스템의 비구조적인 개선이 필요하다. 본 연구에서는 유수지 유입량과 외수위를 고려한 빗물펌프장 펌프/수문 자동운영 기술을 제안하고, 성능을 평가하기 위해 잔류유량 기반 복원력을 사용하여 기존 운영과의 성능차이를 비교하였다. 제안된 자동운영은 3가지 펌프운영과 2가지 수문운영으로 구성되었다. 펌프운영을 위해 모니터링 지점의 수심을 사용하였으며, 모니터링 지점은 최조월류발생지점과 최대월류발생지점을 고려하여 선택하였다. 대상구역은 대구 비산빗물펌프장이며, 강우자료는 재현기간 30년, 50년 및 70년으로, 지속시간 30분, 60분, 90분 그리고 120분으로 설정한 확률강우를 사용하였다. 적용결과 자동운영과 기존 운영의 복원력 차이는 최소 $5.20E-05$ 에서 최대 $8.07E-04$ 로 나타났다. 지속시간이 길어질수록 복원력 차이는 크게 나타났다.

검색어 : 빗물펌프장 운영, 잔류유량, 복원력, 펌프운영, 수문운영

1. 서론

지구온난화로 인한 수문 시스템의 변화에 따라 극한 강우의 발생빈도가 증가하고 있다. 늘어나는 극한 강우로 인해 도시 방재시스템의 설계빈도를 능가하는 재난의 발생이 증가하는 추세이다(Pachauri et al., 2014). 국내의 경우 2020년 발생한 강우는 강우량뿐만 아니라 강우일수도 역대 최대치를 기록하고 있으며, 강우량 및 강우일수를 동시에 고려하는 경우 800년 빈도 이상을 기록하기도 했다(Kim et al., 2020).

* 중신회원 · 충북대학교 토목공학과 박사과정, 공학석사 (Chungbuk National University · reion70@gmail.com)

** 중신회원 · 교신저자 · 충북대학교 토목공학부 조교수, 공학박사 (Corresponding Author · Chungbuk National University · hydrohydro@cbnu.ac.kr)

Received December 10, 2021/ revised January 3, 2022/ accepted September 1, 2022

급격한 도시화로 인해 도시지역에 인구와 재산이 집중되었으며, 이는 재난 피해의 증가로 이어진다. 또한 급격한 도시화는 도시지역의 불투수면적을 늘리게 되며, 늘어난 불투수면적은 도시지역의 유출량을 증가시키게 된다. 불투수면적의 증가는 기후변화와 더불어 도시지역의 홍수위험을 증가시키고 있다(Li et al., 2021). 기후변화로 인해 늘어나는 도시지역의 침수피해를 줄이고자 빗물펌프장/빗물저류조의 증설, 하폭 확장 및 하수관거 개량 등과 같은 내배수시설에 대한 구조적인 개선이 진행되었다. 하지만 구조적인 개선은 공간적, 경제적 한계로 기후변화로 인한 침수피해에 대응하기 어렵다. 따라서 내배수시설의 성능을 극대화하기 위해서는 구조적인 개선과 더불어 방재시스템의 운영개선과 같은 비구조적인 개선도 이루어져야 한다(Faisal et al., 1999; Maeda et al., 2002; Meyer et al., 2012).

본 연구에서는 도시 방재시스템 중 대표적인 시설인 빗물펌프장의 운영에 관한 연구를 진행하였다. 빗물펌프장은 고정된 펌프 가동 수위에 따라 순차적으로 펌프를 가동하여 도시하천으로 배수하는 시설이다. 다만 고정된 수위에 따라 운영하는 빗물펌프장은 펌프장의 특성과 유수지 유입량의 변화를 고려하지 못하여 기후변화로 인한 침수에 대응하기 어렵다. 이를 해결하고자 펌프운영에 관한 다양한 연구가 진행되었다(Hwang et al., 2019; Lee et al., 1992; Lee et al., 2012; Pasha and Lansley, 2009; Son et al., 2017). 기존의 연구들은 빗물펌프장의 구성요소인 수문을 제외한 펌프운영에 집중하였다. 기존의 수문운영은 외수위가 방류토구 하단에 도달하면 수문을 폐쇄하는 단순한 운영이다. 본 연구에서는 수문의 배수능력을 최대한 활용하기 위해 외수위와 내수위의 차이에 따른 수문운영을 포함한 빗물펌프장 자동운영 기술을 제안하였다.

복원력은 성능저하 정도뿐만 아니라 기간까지 고려할 수 있는 성능평가 지표이다. 따라서 일반적인 경우뿐만 아니라 기후변화로 인한 극한 강우로 인한 성능저하의 정도와 기간을 최소화할 필요가 있는 빗물펌프장에 복원력을 적용하는 것이 적합하다(Dong et al., 2017). 이러한 복원력을 내배수시스템에 적용하는 연구가 진행되었다. Mugume et al.(2015)은 내배수시스템의 복원력을 전체 분석 시간 동안 유입량 대비 침수량으로 산출하는 전체 유입량 기반 복원력을 제안하였다. 하지만 전체 유입량 기반 복원력은 시간에 따른 복원력 변화를 확인할 수 없는 단점이 있었다. Lee et al.(2017)은 시스템의 유입량을 유역 전체에 내린 강우량으로 계산하는 총강우량 기반 복원력을 제안하였다. 다만 총강우량 기반 복원력은 시간에 따라 변하지 않는 전체 유역의 강우량을 시스템 유입량으로 설정하여 시간별 복원력이 과대평가 될 수 있다.

본 연구에서는 수문운영을 포함한 빗물펌프장 자동운영 기술의 성능을 평가하기 위해 시스템의 유입량을 잔류유량으로 설정한 복원력 지수를 제안하였다. 잔류유량은 각 절점의 시간에 따른

총유입량을 합한 값이다. 잔류유량 기반 복원력을 대상유역의 빗물 펌프장에 적용하여 기존 운영과 수문운영을 고려한 자동운영의 복원력을 비교하였다.

2. 연구방법

2.1 대상유역 및 강우자료

본 연구의 대상유역은 대구광역시 서구 비산동에 있는 비산빗물 펌프장을 선택하였다. 유역면적은 55 ha이며, 배수펌프는 총 3개로, 배수량이 3.16 m³/s인 전동펌프 2대와 배수량이 1.58 m³/s인 엔진 펌프 1대로 구성되어있다. 수문은 유수지 유입량을 조절하는 내수문(2.5 m × 2.5 m) 1기와 하천으로 방류하는 외수문(2.5 m × 2.0 m) 1기가 있다. Fig. 1은 대상유역의 하수관망과 배수구역을 나타내는 그림이다. Fig. 1에서 빨간색으로 표시된 지점은 간선지점(Main node)을 나타낸다. 간선지점은 유출계수와 유역면적의 곱이 0.12 km² 이상인 지점이다. 초록색으로 표시된 지점은 본 연구에서

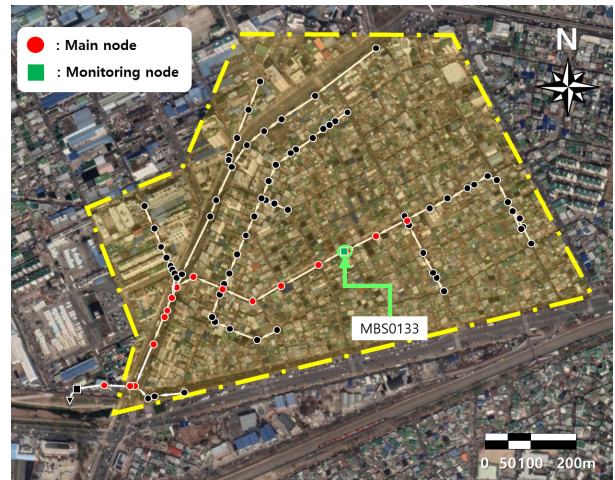


Fig. 1. Basin and Sewer Network of the Bisan Pump Station

Table 1. Date and Frequency of Flooding Rainfall Events

Rainfall date	Total rainfall (Frequency)
1998.08.16. - 08.17.	109.5 mm (2 yr)
1998.09.29. - 10.01.	247.5 mm (10 yr)
1999.09.19. - 09.20.	91.0 mm (2 yr)
1999.09.23. - 09.24.	132.0 mm (2 yr)
2000.07.23. - 07.24.	189.5 mm (5 yr)
2002.08.30. - 08.31.	233.0 mm (10 yr)
2003.09.12. - 09.13.	196.0 mm (5 yr)
2004.06.19. - 06.21.	135.0 mm (2 yr)
2004.08.18. - 08.19.	236.5 mm (10 yr)
2004.07.16. - 07.17.	125.0 mm (2 yr)

선택한 모니터링 지점이다.

비산빗물펌프장의 설계빈도는 1982년 집중호우를 기준으로 설계되었다. 대구의 1982년 강우는 8월 14일에 발생하였으며, 시간 최대 강우량이 61.4 mm로 관측되었다. 해당 강우는 확률강우량도 개선 및 보완 연구(MOLIT, 2011)를 기준으로 재현기간 20년에 해당한다. 실제 침수가 발생하였던 강우자료를 획득하기 위해 재해 연보(MOIS, 2013)를 확인하였다. Table 1은 재해연보를 통해 확인한 침수발생 일자의 강우자료를 정리한 표이다.

Table 1을 살펴보면 모든 강우가 재현기간 10년을 넘어가지 않는 강우이며, 비산빗물펌프장의 설계빈도인 20년보다 낮아 침수가 발생하기 어렵다. 따라서 실제 홍수사상에 대한 검증이 어려워 확률강우량 자료를 사용하였다. 확률강우는 인근 기상관측소인 대구(143)관측소의 확률강우량을 사용하였으며, 홍수량 산정 표준 지침(ME, 2019)에 따라 초과확률 50 %이고, huff 3분위를 통해 무차원 누기곡선을 작성하였다. 확률강우량의 지속시간은 30분, 60분, 90분, 120분으로 설정하였고, 재현기간은 하천의 설계빈도가 100년임을 고려하여 30년, 50년, 70년을 사용하였다.

대상유역 관망의 정보와 강우자료를 기반으로 SWMM (Storm Water Management Model)을 통해 유출 모형을 구축하였다. SWMM은 대표적인 도시유출 모형으로 미국환경보호청(United States Environmental Protection Agency, EPA)이 1971년에 개발하였다. SWMM은 시가지와 비시가지에 대한 단일 강우 또는 장기간 연속 강우에 대한 모의가 가능한 유출 모형이다(Rossman and Simon, 2022). 모의 시간의 간격은 사용자가 임의로 조절할 수 있다. SWMM의 유출 모형은 소유역, 수로 또는 관로, 우수지, 오리피스, 펌프 등으로 구성된다. 각 구성요소에 대한 수질 및 수량에 대한 모의 결과를 모의 시간 간격에 따라 표 또는 그래프로 확인할 수 있다.

2.2 모니터링 지점 선정

모니터링 지점은 최초 및 최대월류발생지점을 확인하여 선정하였다. 최초 및 최대월류발생지점은 확률강우를 사용하였다. 최초월류발생지점은 1 mm씩 강우량을 늘려가며 강우-유출모의를 진행하여, 월류가 최초로 발생한 지점을 뜻한다. 최초월류지점은 전체 관과 간선에서 선정하였다. Table 2는 전체 관(All conduit)과 간선(Main conduit)에서 최초월류발생지점과 월류발생 강우량을 정리한 것이다. 전체관에서 최초월류발생지점은 MBS0438로 나타났고, 간선에서는 지속시간 30분과 60분일 때 MBS0133으로 나타났고 나머지 90분과 120분에서는 MBS0014로 나타났다.

최대월류발생지점은 재현기간 30년, 50년, 70년인 확률강우량을 사용하여 지속시간별로 최대월류가 발생한 지점으로 선정하였다. Table 3은 최대월류발생지점을 재현기간과 지속시간별로 정리한 것이다. 최대월류발생지점은 모든 경우에서 동일하게 MBS0133

Table 2. First Flooding Node and Rainfall by Duration

Duration (min)	First flooding node (All conduit)		First flooding node (Main conduit)	
	Node	Rainfall	Node	Rainfall
30	MBS0438	28 mm	MBS0133	39 mm
60	MBS0438	37 mm	MBS0133	52 mm
90	MBS0438	47 mm	MBS0014	58 mm
120	MBS0438	57 mm	MBS0014	75 mm

Table 3. Maximum Flooding Node by Frequency and Duration

Duration (min)	Frequency		
	30 yr	50 yr	70 yr
30	MBS0133	MBS0133	MBS0133
60	MBS0133	MBS0133	MBS0133
90	MBS0133	MBS0133	MBS0133
120	MBS0133	MBS0133	MBS0133

으로 나타났다. 따라서 간선에서 최초월류발생지점이자 최대월류 발생지점인 MBS0133을 모니터링 지점으로 선정하였다.

2.3 수문운동을 포함한 빗물펌프장 자동운영

수문운동을 포함한 빗물펌프장 자동운영은 외수위와 내수위의 차이에 따른 수문운동과 우수지 유입량에 따른 펌프운동으로 구성된다. 수문운동은 외수위가 내수위보다 높은 경우 폐쇄하며 외수위가 내수위보다 낮은 경우 개방하여 수문을 통한 배수를 실시한다. Fig. 2는 수문이 개방된 상황을, Fig. 3은 수문이 폐쇄된 상황을 나타내는 개념도이다.

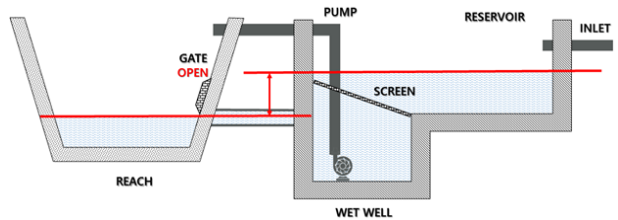


Fig. 2. Gate Open Concept

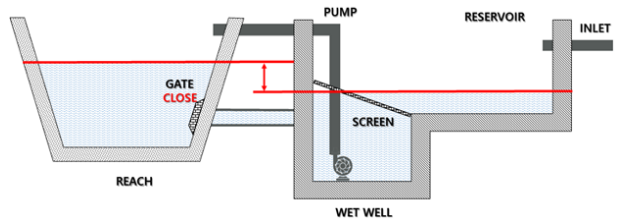


Fig. 3. Gate Close Concept

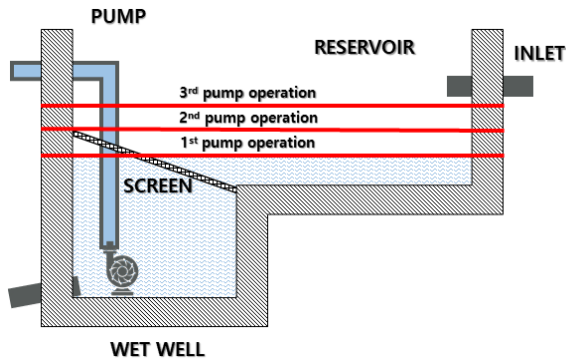


Fig. 4. PR1 Operation

펌프운영은 총 3가지 운영으로 구성되어 있다. 첫 번째는 Pump Rule 1 (PR1)로 기존 운영과 동일하게 정해진 가동수위에 따라 순차적으로 펌프를 가동하는 운영이다. Fig. 4는 PR1을 설명하는 개념도이다.

두 번째는 Pump Rule 2 (PR2)로 모니터링 지점의 과부하 여부에 따라 펌프를 전량가동하는 운영이다. PR2는 모니터링 지점에서 과부하가 발생하기 전까지 PR1으로 운영하며, 과부하가 발생하게 되면 모든 펌프를 가동한다. Fig. 5는 PR2를 설명하는 개념도이다.

마지막으로 Pump Rule 3 (PR3)은 초가가동수위를 최대한 유지하는 운영이다. 이상기후로 인해 유수지 유입량이 급격하게 늘어나는 경우 모든 펌프를 가동하여 초가가동수위를 유지하도록 한다. Fig. 6은 PR3를 설명하는 그림이다.

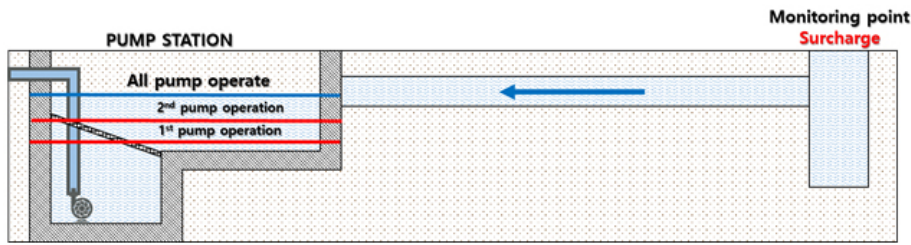


Fig. 5. PR2 Operation

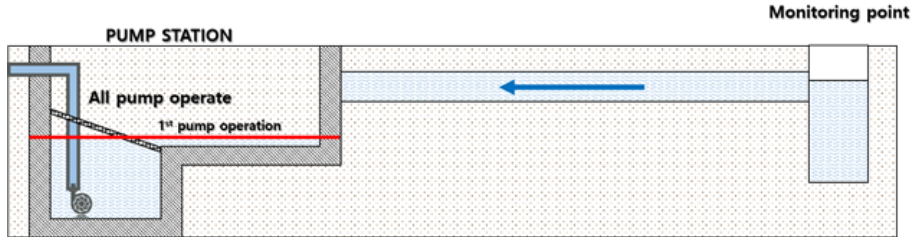


Fig. 6. PR3 Operation

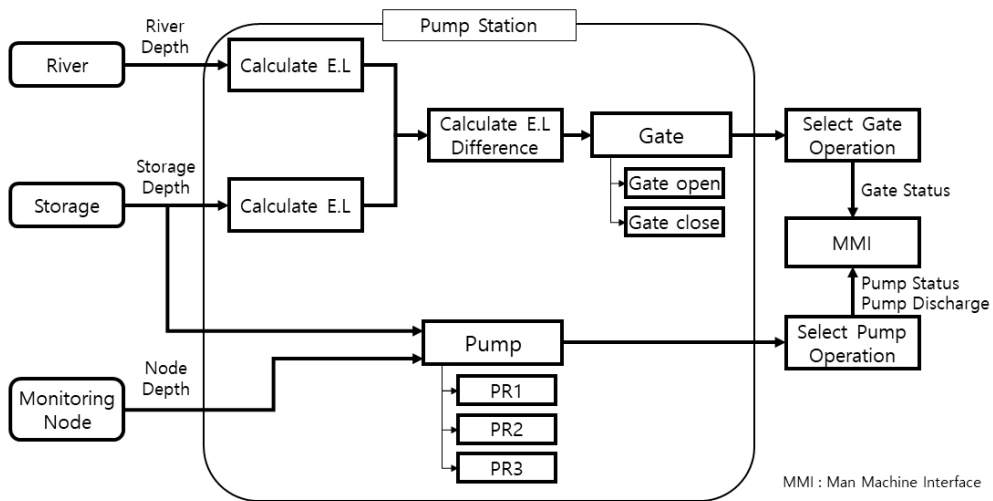


Fig. 7. Automatic Operation of the Drainage Pump Station Including the Gate Operation

수문운영 2가지와 펌프운영 3가지로 구성된 빗물펌프장 자동운영은 외수위, 내수위 및 모니터링 지점의 관측수위를 빗물펌프장 운영시스템으로 받아 수문운영과 펌프운영을 선택하여 운영한다. Fig. 7은 수문운영을 포함한 빗물펌프장 자동운영의 모식도이다.

Fig. 7을 살펴보면 수문운영은 방류하천에서 관측 외수위와 유수지에서 관측 내수위를 받아와 외수위와 내수위의 수위차를 계산한다. 계산된 수위차를 통해 수문운영을 선택한다. 펌프운영은 유수지의 관측 수위와 모니터링 지점의 수심을 받아 펌프운영을 선택하게 된다. 빗물펌프장 운영 시스템에서 선택된 수문운영과 펌프운영의 결과로 수문 상태, 펌프 운영여부 및 펌프 토출량 정보를 확인할 수 있다.

2.4 잔류유량 기반 복원력

본 연구에서 제안하는 잔류유량 기반 복원력은 시스템에 잔류하고 있는 잔류유량을 고려하여 계산한다. 잔류유량은 시스템이 처리 중인 유량으로 단위 시간당 시스템 유입량과 관내 유량의 합이다. 복원력은 잔류유량 대비 침수량의 비를 통해 시스템 성능함수 $u(t)$ 를 계산하고, $u(t)$ 를 분석 시작 시간부터 마지막 시간까지 적분하여 복원력을 계산한다. Fig. 8은 잔류유량의 개념도를 나타낸 그림이다.

Fig. 8은 절점의 개수가 n 개이고 관거의 개수가 m 개인 내배수시스템에서 잔류유량의 개념도를 나타내고 있다. 내배수시스템 내부에 존재하는 유량은 m 개의 관거내를 흐르는 유량의 합이며, 새로 유입되는 유량은 n 개의 절점에서 들어오는 유입량의 합이다. 따라서 t 시간의 잔류유량은 시스템 내부에 존재하는 유량과 새로 들어오

는 유량의 합으로 계산할 수 있다. Eq. (1)은 잔류유량 계산식을 나타내며, Eq. (2)는 시스템 성능함수 식, Eq. (3)은 복원력 식을 나타낸다.

$$RQ_t = \sum_{i=1}^n Q_{Ii} + \sum_{j=1}^m Q_{Cj} \tag{1}$$

$$u(t) = 1 - \frac{F_t}{RQ_t} \tag{2}$$

$$Res = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} u(t) dt \tag{3}$$

여기서, n 은 총 절점의 개수이고, m 은 총 관거의 개수이다. Q_{Ii} 는 i 번째 절점의 유입량이고, Q_{Cj} 는 j 번째 관거의 관내 유량이다. $u(t)$ 는 시스템 성능함수를 나타내고, Res 는 복원력을 나타낸다. F_t 는 t 시간 침수량(m^3/s), RQ_t 는 t 시간 잔류유량(m^3/s)을 나타내며, T_n 은 전체 분석 시간을 나타낸다.

3. 적용 결과

비산빗물펌프장에 확률강우자료를 적용하여 기존의 비산빗물펌프장의 운영과 제안된 수문운영을 고려한 빗물펌프장 자동운영의 성능을 비교하였다. 성능 비교를 위한 지표는 잔류유량 기반 복원력을 사용하였다. 복원력이 큰 값을 가지면, 전체 분석 시간 동안 잔류유량 대비 침수량이 전체 분석 시간 동안 작은 것을 의미하고, 침수량이 작은 값을 가지면, 잔류유량 대비 침수량이 큰 것을 의미한다.

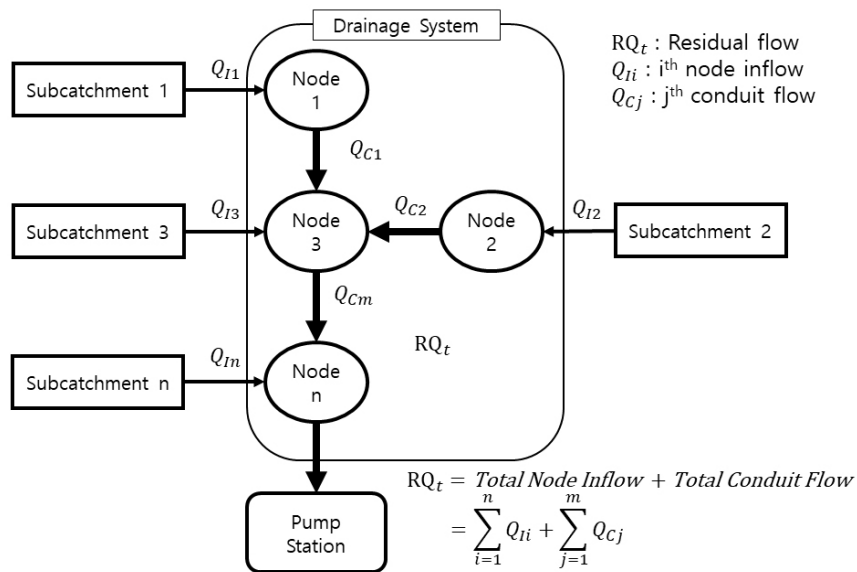


Fig. 8. Residual Flow Concept

지속시간 30분, 60분, 90분 그리고 120분 결과를 각각 Tables 4~7에 정리하였다. 결과를 살펴보면 모든 지속시간에서 재현기간이 늘어날수록 복원력이 감소하였으며, 모든 재현기간에서 지속시간이 90분일 때 가장 작은 복원력을 나타냈다. 기존 운영과 제안된 운영의 복원력 차이는 모든 지속시간에서 재현기간이 늘어날수록 커졌다. 해당 결과를 지속시간별로 살펴보았다.

Table 4를 살펴보면 기존 운영과 제안된 운영의 복원력 차이가 재현기간 30년에서 5.20E-05, 재현기간 50년에서 8.18E-05, 재현

Table 4. Resilience Results for the Current Operation and the Proposed Operation (Duration 30 min)

Operation	30 min		
	30 yr (45.80 mm)	50 yr (49.60 mm)	70 yr (52.00 mm)
Current	0.999414	0.999059	0.998838
Proposed	0.999466	0.999141	0.998935
Difference	5.20E-05	8.18E-05	9.72E-05

Table 5. Resilience Results for the Current Operation and the Proposed Operation (Duration 60 min)

Operation	60 min		
	30 yr (65.60 mm)	50 yr (71.10 mm)	70 yr (74.70 mm)
Current	0.998598	0.997928	0.997476
Proposed	0.998856	0.998366	0.998034
Difference	2.58E-04	4.38E-04	5.58E-04

Table 6. Resilience Results for the Current Operation and the Proposed Operation (Duration 90 min)

Operation	90 min		
	30 yr (78.10 mm)	50 yr (84.70 mm)	70 yr (89.00 mm)
Current	0.998585	0.997802	0.997228
Proposed	0.998948	0.998397	0.997999
Difference	3.63E-04	5.96E-04	7.71E-04

Table 7. Resilience Results for the Current Operation and the Proposed Operation (Duration 120 min)

Operation	120 min		
	30 yr (87.41 mm)	50 yr (94.71 mm)	70 yr (99.62 mm)
Current	0.998989	0.998149	0.997548
Proposed	0.999318	0.998756	0.998354
Difference	3.29E-04	6.07E-04	8.07E-04

기간 70년에서 9.72E-05로 나타났으며, 재현기간이 늘어날수록 두 운영의 복원력 차이가 증가하였다. 제안된 운영이 지속시간 30분에서 기존 운영보다 복원력이 더 크게 나타났다.

Table 5를 살펴보면 기존 운영과 제안된 운영의 복원력 차이가 재현기간 30년에서 2.58E-04, 재현기간 50년에서 4.38E-04, 재현기간 70년에서 5.58E-04로 나타났으며, 재현기간이 늘어날수록 두 운영의 복원력 차이가 증가하였다. 제안된 운영이 지속시간 60분에서 기존 운영보다 더 효과적인 운영이다.

Table 6을 살펴보면 지속시간 90분에서 기존 운영과 제안된 운영의 복원력 차이는 재현기간 30년에서 3.63E-04, 재현기간 50년에서 5.96E-04, 재현기간 70년에서 7.71E-04로 나타났다. 재현기간이 늘어날수록 두 운영의 복원력 차이는 증가하였다. 지속시간 90분에서 제안된 운영이 기존 운영보다 효과적인 운영으로 나타났다.

Table 7을 살펴보면 지속시간 120분에서 기존 운영과 제안된 운영의 복원력 차이는 재현기간 30년에서 3.29E-04, 재현기간 50년에서 6.07E-04, 재현기간 70년에서 8.07E-04로 나타났다. 재현기간이 늘어날수록 두 운영의 복원력 차이는 증가하였다. 지속시간 120분에서도 제안된 운영이 기존 운영보다 효과적인 운영으로 나타났다.

Tables 4~7의 내용을 정리하자면 지속시간 90분에서 운영에 따른 복원력 값이 가장 작게 나타났다. 지속시간 90분인 경우 최소유입량의 배수가 완료되는 시간보다 짧아 우수관망의 과부하가 빠르게 발생하여 지속시간 120분인 경우보다 복원력이 작게 발생하였다. 지속시간 30분과 60분인 경우 지속시간 90분보다 총강우량이 작아 침수량 자체가 지속시간 90분보다 낮게 발생하였기 때문에 지속시간 90분의 복원력이 가장 작게 나타난 것으로 분석된다.

Fig. 9는 지속시간 30분에 재현기간 30년일 때와 지속시간 120분에 재현기간 70년일 때의 강우량, 침수량, 우수지 수위 그리고 시스템 성능 그래프를 각각 나타낸 것이다. Fig. 9(a)의 침수량 그래프에서는 기존 운영보다 제안된 운영의 침수량이 침두에서 더 높게 나타났으나 시스템 성능 그래프에서는 제안된 운영이 침두에서의 시스템 성능이 더 높았다. 그 이유는 제안된 운영에서 짧은 시간에 내배수시스템으로 더 많은 유입이 발생하였기 때문으로 분석된다. Fig. 9(b)의 침수량 그래프는 기존 운영보다 제안된 운영의 침두부분의 침수량이 낮으며, 침수량이 소멸하는 시간도 단축되었다. 우수지 수위는 기존 운영에서 최대 4.5 m까지 일어나는 것에 비해 제안된 운영은 초기 가동 수위인 1.5 m를 유지하고 있다. 분석 초반 우수지 수위가 증가하다가 감소하는 구간이 나타났다. 이는 수문을 통한 배수와 더불어 펌프가 전량가동되어 배수량이 증가하여 우수지 수위가 급감하기 때문이다. 시스템 성능 그래프를

살펴보면 Fig. 9(a)에서는 기존 운영보다 제안된 운영의 시스템 성능이 침투부분에서 더 높게 나타났고, Fig. 9(b)에서는 기존 운영보다 제안된 운영의 시스템 성능이 침투부분에서 더 높게 나타났고, 원래 성능으로 복원되는 시간도 빠르다. Fig. 10은 각각의 지속시간과 재현기간에 대한 시스템 성능 그래프를 나타낸 것이다.

Fig. 10을 살펴보면 동일 지속시간에 대한 기존 운영과 제안된 운영의 시스템 성능은 점점 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다. 동일 재현기간에 대한 기존 운영과 제안된 운영의 최저 시스템 성능은 지속시간이 늘어남에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다. 지속시간이 30분인 경우 원래 성능으로 복원되는 시간은 기존 운영과 제안된 운영에서 차이가 발생하지 않았으며, 시스템 성능의

침투에서만 차이가 발생하였다. 따라서 다른 지속시간의 결과보다 소량의 복원력 차이가 발생한다. 지속시간 60분, 90분, 120분의 경우 침투에서의 시스템 성능의 차이도 점점 커지며, 시스템 성능의 복원시점도 빨라졌다. 강우의 지속시간이 짧을수록 운영으로 인한 차이를 확인하기 어렵고, 지속시간이 길수록 운영으로 인한 복원력 차이가 커졌다. 기존 운영은 지속시간이 짧고 재현기간이 늘어날수록 성능저하가 점점 크게 발생하는 반면, 제안된 운영은 성능저하의 폭이 기존 운영에 비해 작은 것을 확인할 수 있다. 또한 지속시간이 120분인 경우 기존 운영의 성능이 눈에 띄게 감소하는 반면, 제안된 운영의 성능은 비교적 감소폭이 작은 것을 확인할 수 있다.

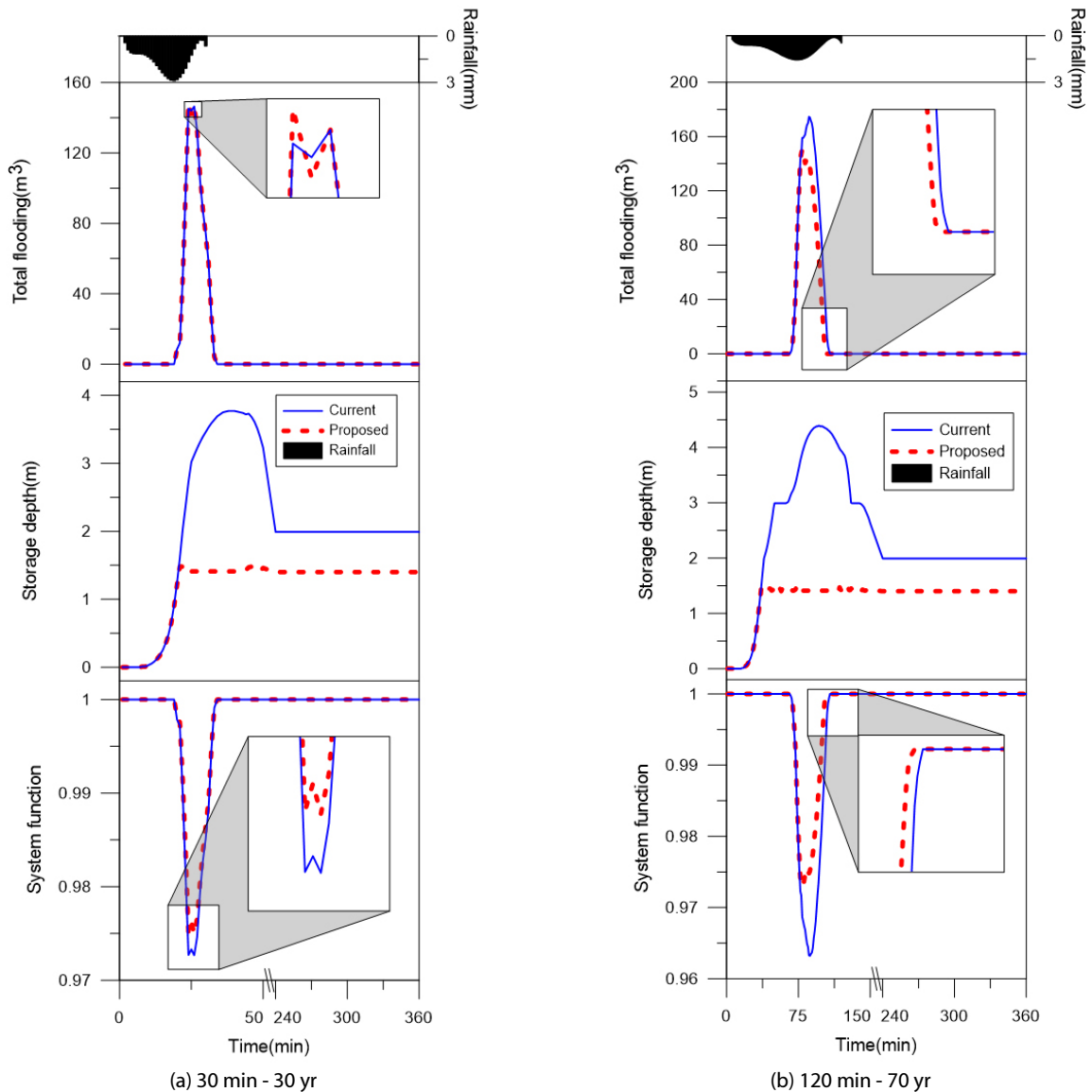


Fig. 9. System Function, Storage Depth and Flooding Graphs

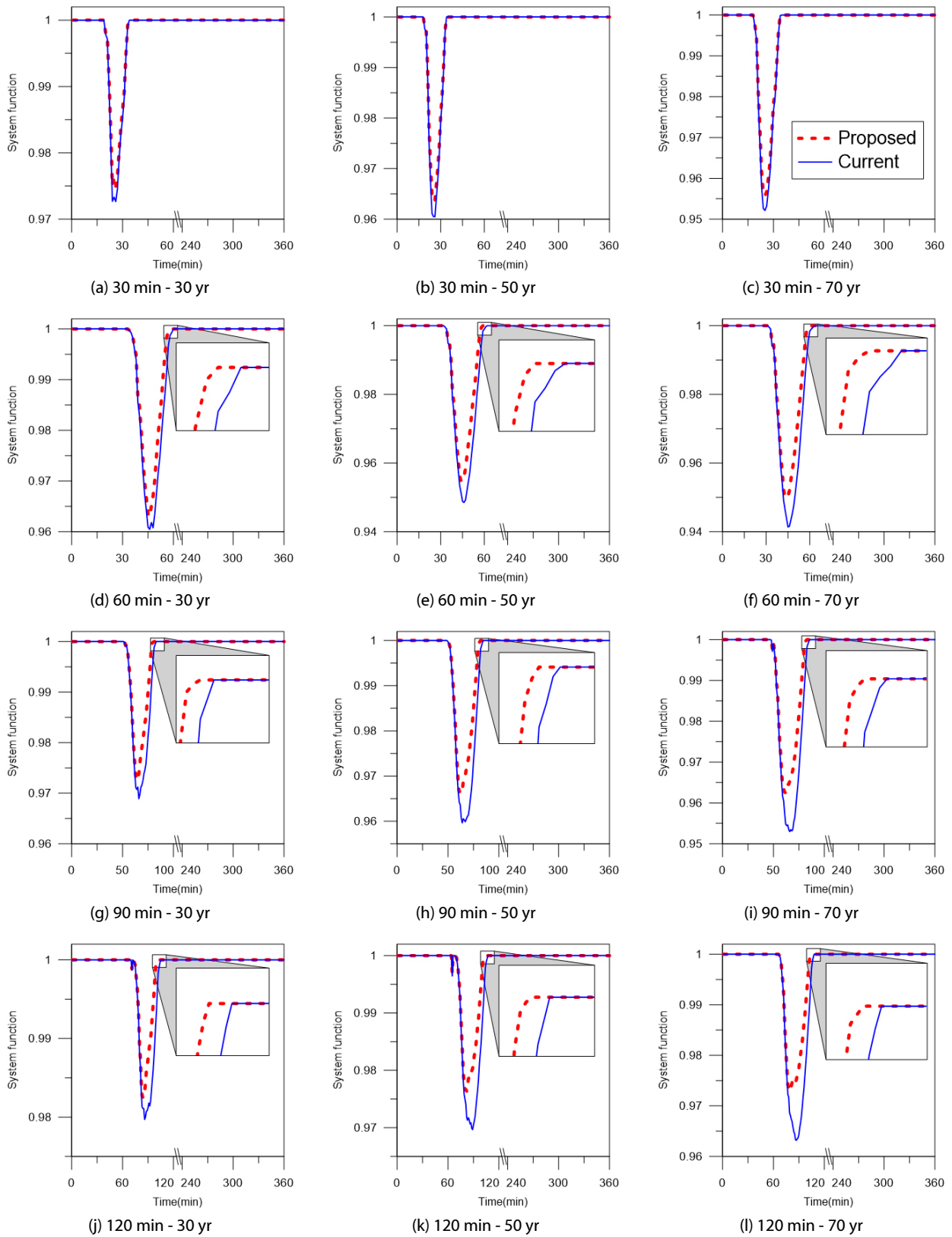


Fig. 10. System Function Graphs for Each Duration and Frequency

본 연구에서는 지속시간 30분, 60분, 90분 그리고 120분에 재현기간 30년, 50년 그리고 70년인 총 12가지 확률강우자료를 적용하여 기존 운영과 수문운영을 고려한 빗물펌프장 자동운영의 성능을 복원력을 통해 평가하였다. 적용 결과 기존 운영에 비해 수문운영을 고려한 빗물펌프장 자동운영이 모든 확률강우에 대하여 효과적인 운영으로 나타났다. 또한 지속시간이 길어지고 재현기간이 커질수록 제안된 운영이 시스템의 성능저하가 기존 운영에 비해 작게 나타났으며, 원래 성능으로 복구하는 시간도 빨랐다. 따라서 본 연구에서 제안한 수문운영을 고려한 빗물펌프장 자동운영이 기존 운영보다 더 효과적인 운영으로 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 수문운영을 고려한 빗물펌프장 자동운영 기술을 제안하였고, 제안된 운영의 성능을 평가하기 위해 잔류유량 기반 복원력 지수를 제안하였다. 수문운영을 고려한 빗물펌프장 자동운영 기술은 기존의 빗물펌프장 운영에서 고려하지 않았던 수문을 고려한 운영이다. 제안된 운영은 외수위보다 내수위가 높은 경우 수문을 개방하여 수문을 통한 자연방류를 지속하여 기존의 빗물펌프장 운영보다 더 많은 배수량을 확보할 수 있는 운영이다.

복원력은 시스템의 성능저하에 대한 평가뿐만 아니라 시스템의 성능이 원래 성능 또는 허용 가능한 성능까지 복구하는 시간까지 평가는 시스템 평가 지표이다. 이번 연구에서 제안하는 잔류유량 기반 복원력 지수는 현재 시스템에서 처리하고 있는 유량대비 침수량으로 계산된다. 잔류유량은 단위 시간당 시스템 유입량과 관내 유량의 합이다. 잔류유량 기반 복원력지수를 비산빗물펌프장에 적용하여 기존 운영과 수문운영을 고려한 빗물펌프장 자동운영의 성능을 검토하였다.

성능 검토를 위해 총 12가지의 확률강우 자료를 사용하였다. 사용한 확률강우의 지속시간은 30분, 60분, 90분 그리고 120분이며, 재현기간은 30년, 50년 그리고 70년이다. 확률강우 적용결과 모든 운영에서 지속시간 90분인 경우의 복원력이 가장 작은 값을 나타냈다. 그 이유는 강우 지속시간 90분이 최초유입량의 배수가 완료되는 시간보다 짧아 과부하가 빠르게 발생하여 침수가 크게 발생하였기 때문이다. 지속시간이 짧을수록 운영으로 인한 복원력 차이가 작게 발생하였고, 지속시간이 클수록 운영으로 인한 복원력 차이가 크게 발생하였다. 확률강우량보다 지속시간이 긴 실제 강우 사상에서는 운영으로 인한 차이가 크게 발생할 것으로 예상되며, 실제 강우에서는 제안된 운영이 더 효과적으로 내배수시스템의 성능을 개선할 수 있을 것으로 분석된다. 기존 운영과 제안된 운영의 복원력을 비교하였을 때, 모든 경우에서 제안된 운영이 기존 운영보다 더 큰 복원력을 나타냈다. 이를 통해 제안된 운영이 비산빗물펌프장에 적용되는 경우 기존 운영보다 효과적인 운영임을 알 수 있다.

이후 대규모 관망에 적용하여 수문운영을 고려한 빗물펌프장 자동 운영의 성능을 검토하는 연구가 가능하며, 실제 침수가 발생하는 강우사상이 존재하는 유역에 적용하여 제안된 운영의 실제 성능을 검토할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 정부(교육부)의 재원을 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제번호: NRF-2019R1I1A3A01059929).

본 논문은 2021 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

- Dong, X., Guo, H. and Zeng, S. (2017). "Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure." *Water Research*, Vol. 124, pp. 280-289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.038>.
- Faisal, I. M., Kabir, M. R. and Nishat, A. (1999). "Non-structural flood mitigation measures for Dhaka City." *Urban Water*, Vol. 1, No. 2, pp. 145-153. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00004-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00004-2).
- Hwang, Y. K., Kwon, S. H., Lee, E. H. and Kim, J. H. (2019). "Development of optimal pump operation method for urban drainage systems." *In International Conference on Harmony Search Algorithm*, Springer, Cham, Kuming, China, pp. 63-69. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-31967-0_7.
- Kim, Y. T., Park, M. H. and Kwon, H. H. (2020). "Spatio-temporal summer rainfall pattern in 2020 from a rainfall frequency perspective." *Journal of Korea Society of Disaster and Security*, Vol. 13, No. 4, pp. 93-104. DOI: <https://doi.org/10.21729/ksds.2020.13.4.93> (in Korean).
- Lee, E. H., Lee, Y. S., Joo, J. G., Jung, D. H. and Kim, J. H. (2017). "Investigating the impact of proactive pump operation and capacity expansion on urban drainage system resilience." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 143, No. 7. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000775](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000775).
- Lee, G. Y., Beak, H. W., Ryu, J. N., Kim, T. H. and Oh, J. I. (2012). "A comparative study on the performance of pumping station by changing measurement methods and operational logic." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 26, No. 6, pp. 915-925. DOI: <https://doi.org/10.11001/jksww.2012.26.6.915> (in Korean).
- Lee, W. H., Cho, W. C. and Shim, J. H. (1992). "A new control technique of drainage pump based on fuzzy control." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 12, No. 3, pp. 107-114 (in Korean).
- Li, C., Liu, M., Hu, Y., Zhou, R., Wu, W. and Huang, N. (2021). "Evaluating the runoff storage supply-demand structure of green infrastructure for urban flood management." *Journal of Cleaner*

- Production*, Vol. 280. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124420>.
- Maeda, M., Mizushima, H. and Ito, K. (2002). "Development of the real-time control (RTC) system for Tokyo sewage system." *In Global Solutions for Urban Drainage, Ninth International Conference on Urban Drainage (9ICUD)*, Oregon, United States, pp. 1-16. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/40644\(2002\)317](http://dx.doi.org/10.1061/40644(2002)317).
- Meyer, V., Priest, S. and Kuhlicke, C. (2012). "Economic evaluation of structural and non-structural flood risk management measures: examples from the Mulde River." *Natural Hazards*, Vol. 62, No. 2, pp. 301-324. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-011-9997-z>.
- Ministry of Environment (ME) (2019). *Standard guidelines for estimating flood volumes* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLIT) (2011). *Improvement and supplement of probability rainfall in South Korea* (in Korean).
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS) (2013). *Disaster year book* (in Korean).
- Mugume, S. N., Gomez, D. E., Fu, G., Farmani, R. and Butler, D. (2015). "A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems." *Water Research*, Vol. 81, pp. 15-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.030>.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Dubash, N. K., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C. B., Forster, P., Friedlingstein, P., Fuglestedt, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., Hegerl, G., Howden, M., Jiang, K., Jimenez Cisneroz, B., Kattsov, V., Lee, H., Mach, K. J., Marotzke, J., Mastrandrea, M. D., Meyer, L., Minx, J., Mulugetta, Y., O'Brien, K., Oppenheimer, M., Pereira, J. J., Pichs-Madruga, R., Plattner, G. K., Pörtner, H. O., Power, S. B., Preston, B., Ravindranath, N. H., Reisinger, A., Riahi, K., Rusticucci, M., Scholes, R., Seyboth, K., Sokona, Y., Stavins, R., Stocker, T. F., Tschakert, P., van Vuuren, D. and van Ypserle, J. P. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*, Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 151, IPCC.
- Pasha, M. F. K. and Lansey, K. (2009). "Optimal pump scheduling by linear programming." *In World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers*, Missouri, United States, pp. 1-10. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/41036\(342\)38](http://dx.doi.org/10.1061/41036(342)38).
- Rossmann, L. A. and Simon, M. A. (2022). *Storm water management model user's manual, version 5.2.*, Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Son, A. L., Kim, B. H. and Han, K. Y. (2017). "A study on real-time operation method of urban drainage system using data-driven estimation." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 37, No. 6, pp. 949-963. DOI: <https://doi.org/10.12652/Ksce.2017.37.6.0949> (in Korean).