Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 22, No. 12 pp. 427-436, 2021

https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.12.427
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

수문운영을 고려한 빗물펌프장 자동운영 기술과 소유역 유출량 기반 복원력 지수의 개발

김영남[1], 이의훈[2*]
[1]충북대학교 토목공학과, [2]충북대학교 토목공학부

Development of Automatic Operation Considering Gate Operation for Drainage Pump Station and Resilience Index Based on Subcatchment Runoff

Young Nam Kim[1], Eui Hoon Lee[2*]
[1]Department of Civil Engineering, Chungbuk National University,
[2]School of Civil Engineering, Chungbuk National University

요 약 최근 지구온난화로 인해 기후변화가 증가하고 있으며, 극한강우의 발생빈도와 강도가 증가하고 있다. 증가하는 극한강우와 급격한 도시화로 인한 불투수면적의 증가로 도시지역의 침수피해가 늘어나고 있다. 도시지역의 침수피해를 줄이기 위해서는 내배수시설의 비구조적인 개선이 필수적이다. 도시지역의 대표적인 내배수시설으로는 빗물펌프장이 있으며, 본 연구에서 제안하는 비구조적인 개선은 새로운 빗물펌프장의 운영이다. 본 연구는 수문운영을 고려한 빗물펌프장의 자동운영 기술을 제안하였다. 또한 제안된 기술의 성능을 기존 운영과 비교하기 위해 소유역 유출량 기반 복원력을 개발하였다. 대상유역은 문래빗물펌프장을 선택하였고, 강우자료는 대상유역에 침수가 발생하였던 기왕강우와 재현기간 30년, 50년, 70년 그리고 100년인 확률강우를 사용하였다. 적용 결과 기존운영 보다 수문운영을 고려한 빗물펌프장 자동운영의 복원력이 기왕강우와 확률강우에서 더 효과적인 것으로 나타났다.

Abstract Recently, climate change has been accelerating due to global warming, and the frequency and intensity of extreme rainfall increase due to this climate change. In addition, increasing impervious areas due to rapid urbanization and the increasing extreme rainfall lead to increased flood damage in urban areas. Hence, improving the internal drainage facility non-structurally is essential to reduce flood damage in urban areas. This study considered a pump station in a representative urban internal drainage facility and proposed a non-structural improvement leading to a new drainage pump station operation. In particular, this study proposes an automatic operation technology for the drainage pump station considering gate operation. In addition, a subcatchment runoff-based resilience was developed to compare the performance of the proposed technology with the current system. The Munlae drainage pump station was selected as the target area. Further, the study used the previous rainfall data of the floods in the target area and probability rainfalls of 30, 50, 70, and 100 years of frequency. The study results found that resilience of the drainage pump station's automatic operation considering gate operation was more effective than the current operation for the previous and probability rainfall.

Keywords : Drainage Pump Station, Gate Operation, Automatic Operation, Resilience, Subcatchment Runoff

본 논문은 충북대학교 국립대학육성사업(2021)지원을 받아 작성되었음.
*Corresponding Author : Eui Hoon Lee(Chungbuk National Univ.)
email: hydrohydro@cbnu.ac.kr
Received October 18, 2021 Revised November 16, 2021
Accepted December 6, 2021 Published December 31, 2021

1. 서론

IPCC(2014)에 따르면 최근 지구온난화로 인해 기후변화가 증가하고 있다. 기후변화는 대부분 지역에서 호우 발생 빈도를 증가시켰으며, 대표적인 극한현상인 극한강우의 발생 빈도와 강도를 증가시켰다[1]. 극한강우가 자주 발생하게 되면서 홍수 및 산사태와 같은 대규모 자연재해의 발생 빈도 역시 증가하고 있다[2]. 도시지역은 인구와 재산이 집중되고 있어 피해규모도 커지고 있다. 도시지역에 집중되는 인구는 도시화를 가속화하고 있으며, 도시지역의 불투수면적 확대로 이어진다. 불투수면적의 확대는 유출량 증가로 이어지며, 기후변화와 더불어 도시지역의 홍수위험을 증가시킨다[3]. 도시지역의 침수피해를 줄이기 위해서는 내배수시설의 개선이 필수적이다. 본 연구에서는 도시지역의 대표적인 내배수시설인 빗물펌프장에 관한 연구를 진행하였다.

빗물펌프장은 유수지 또는 집수정의 수위를 기준으로 일정 수위에 도달하는 경우 펌프를 가동하여 우수를 강제적으로 배출하는 내배수시설이다[4]. 빗물펌프장의 성능은 펌프 토출량으로 의존하며, 구조적 개선을 위해 펌프장 확충과 같은 펌프 토출량 설계에 집중되어있다[5-7]. 다만 구조적 개선은 도시확장으로 인해 공간적, 경제적 한계가 존재한다. 내배수시설의 성능을 극대화하기 위해서는 구조적 개선과 더불어 내배수시설의 운영과 같은 비구조적인 방법이 동반되어야 한다[8-10].

일반적으로 빗물펌프장은 단순히 유수지 및 집수정의 수위만을 고려하여 운영하므로, 각 펌프장의 특성과 유수지 유입량의 변화를 고려하지 못한다. 이러한 문제점을 해결하고자 각 빗물펌프장의 상황을 고려한 빗물펌프장 운영 최적화에 관한 연구가 진행되었다[11-13]. 다만 이러한 연구들은 펌프의 초기 가동수위 결정하거나 펌프 운영 빈도를 줄이는 것을 목적으로 하여 실시간으로 변화하는 내배수시스템의 상황을 반영하지 못하였다.

내배수시스템의 실시간 상황을 반영하기 위한 연구가 다양하게 진행되었다. Lee 등(2017)은 각 맨홀의 실시간 수위를 고려한 운영과 시점별 유입량을 고려한 운영을 제안하였다[14]. Hwang 등(2019)은 침수 취약지점의 수위를 펌프 운영 기준에 추가하여 상류관거의 과부하를 최소화하는 운영을 제안하였다[15]. Son 등(2017)은 배수구역의 지형적 특징을 반영하여 내수위를 예측한 운영을 제안하였다[16]. Lee 등(2012)은 빗물펌프장 내수위와 유수지 유입량을 계측하여 초기 가동 수위를 최대한 유지하는 운영을 제안하였다[17]. 앞선 연구들은 모두 빗물펌프장의 실시간 펌프운영이 가능하였으나 빗물펌프장의 구성 요소인 수문운영은 고려하지 않았다.

본 연구에서는 이전 연구들이 고려하지 않았던 수문운영에 대하여 연구를 진행하였다. 기존 빗물펌프장의 수문운영은 방류하천의 수위인 외수위가 방류토구 하단고 보다 높아지면 수문을 폐쇄하고 방류토구 하단고 보다 낮으면 개방하는 단순한 운영이다. 이번 연구에서 제안하는 수문운영은 외수위와 유수지 혹은 집수정의 수위인 내수위를 고려한 운영이다. 제안된 수문운영은 외수위가 내수위 보다 낮으면 수문을 개방하여 자연 방류를 지속할 수 있다.

도시침수 방지 구조물로서 빗물펌프장은 일반적인 강우뿐만 아니라 기후변화로 인한 극한 강우로 인한 성능저하 정도와 기간을 최소화할 필요가 있다. 이러한 관점에서 성능저하 정도뿐만 아니라 기간까지 고려할 수 있는 복원력이 빗물펌프장에 요구되는 사항을 설명하는 것에 더 적합하다[18]. 공학에서 복원력은 사건(event)으로 발생하는 시스템의 성능저하 정도와 허용 가능한 시스템 성능까지의 복구 속도를 측정하는 지표이다[19, 20]. 공학적 복원력은 도시전력망, 교통네트워크, 인터넷 등과 같은 기반시설에 적용되었다[19-25]. 수자원시스템에도 복원력을 적용하기 위한 다양한 연구가 진행되었다[26-31].

도시 침수피해를 방지하기 위한 내배수시스템의 복원력에 관한 다양한 연구가 진행되었다. Mugume 등(2015)은 내배수시스템의 복원력을 전체 분석 시간 동안 유입량 대비 침수량으로 산출하였다[32]. 하지만 Mugume 등(2015)의 복원력 지수는 시간에 따른 복원력 변화를 확인할 수 없는 단점이 있었다. Lee 등(2017)은 시스템의 유입량을 유역 전체에 내린 강우량으로 설정하여 복원력을 계산하였다[33]. Lee 등(2017)의 복원력 지수는 시간별 시스템 유입량을 전체 유역의 강우량으로 설정하여 과대평가 할 수 있다. 반면 유입량 대비 침수량이 아닌 침수피해를 고려한 복원력 산출방법도 제안되었다[34,35]. 이러한 복원력 지수는 방대한 자료를 필요한 단점이 있다.

본 연구에서는 시스템의 유입량을 시간에 따라 변하는 값인 소유역 유출량으로 설정한 새로운 복원력 지수를 제안하였다. 시간에 따라 변화하는 유입량 대비 침수량으로 복원력을 계산하기 때문에 더 정밀한 분석을 할 수 있다. 본 연구는 제안된 소유역 유출량 기반 복원력 지수를 수문운영을 포함한 빗물펌프장 자동운영에 적용하여 성능을 평가하였다.

2. 수문운영을 고려한 빗물펌프장 자동운영

2.1 펌프운영(Pump Rule)

기존의 빗물펌프장은 정해진 가동수위에 따라 펌프를 순차적으로 가동한다. 본 연구에서 제안한 펌프운영은 총 3가지로 구성되어 있다. 첫 번째는 유수지 수위를 고려한 펌프운영이다. 두 번째는 모니터링 수위를 고려한 펌프운영이다 세 번째는 초기가동수위 유지를 위한 운영이다.

2.1.1 Pump Rule 1(PR1)

PR1은 기존 운영과 동일한 펌프운영이다. 유수지 수위가 설정된 가동수위에 도달하게 되면 펌프를 차례로 가동하게 된다. Fig. 1은 PR1을 설명하는 개념도이다.

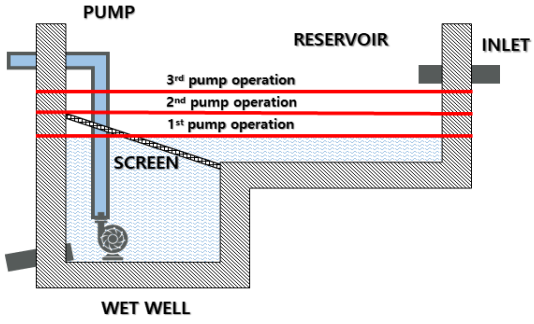

Fig. 1. Pump rule 1 operation

2.1.2 Pump Rule 2(PR2)

PR2는 PR1과 동일하게 운영하다가, 모니터링 지점의 우수관거에서 과부하가 발생하면 전량가동을 실시하는 운영이다. 모니터링 지점은 최초 및 최대월류발생 지점으로 침수위험구역이다. 모니터링 지점의 과부하가 발생하게 되면 침수위험이 증가하며, 이를 최소화하기 위해 펌프를 전량가동 할 필요가 있다. Fig. 2는 초기가동 및 2번째 펌프 가동 후 모니터링 지점에 과부하가 발생하여 모든 펌프를 가동하는 운영하는 경우를 나타내고 있다.

2.1.3 Pump rule 3(PR3)

PR3은 초기가동수위를 유지하는 펌프운영이다. 이상기후로 인해 유수지의 유입량이 급격히 늘어나는 것으로 예측되는 경우 유수지의 저류공간을 최대한 확보하기 위한 운영이다. PR3은 모니터링 지점의 과부하 여부와 상관없이 유수지 수위가 초기가동수위를 넘어가면 펌프를 전량가동하는 운영이다. Fig. 3은 모니터링 지점의 과부하와 상관없이 펌프를 전량가동하여 초기가동수위를 유지하는 운영을 나타내고 있다.

2.2 수문운영(Gate Rule)

기존 빗물펌프장 운영에서 수문운영은 단순히 외수위

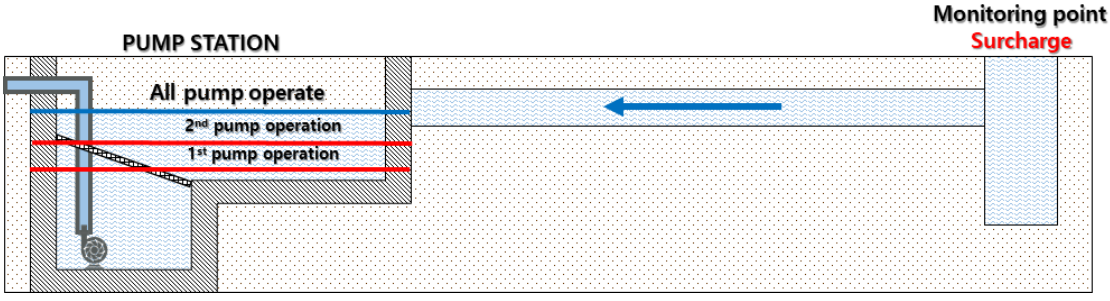

Fig. 2. Pump rule 2 operation

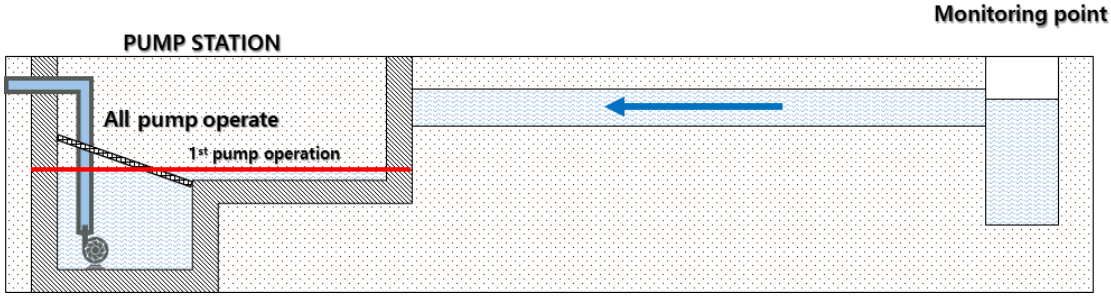

Fig. 3. Pump rule 3 operation

에 따라 결정되었다. 본 연구에서 제안한 수문운영은 외수위와 내수위를 고려하여 운영한다. 외수위가 내수위보다 높은 경우 수문을 폐쇄하며, 반대로 내수위가 외수위보다 높은 경우 수문을 개방한다. Fig. 4는 수문 폐쇄를 나타낸 그림이고 Fig. 5는 수문 개방을 나타낸 그림이다.

Fig. 4를 보면 하천의 수위가 방류토구 하단고보다 높은 것을 확인할 수 있다. 기존의 수문운영의 경우는 하천의 수위가 방류토구 하단고보다 높게 되면 수문을 폐쇄하지만 본 연구가 제안한 수문운영은 하천수위보다 내수위가 높다면 수문을 개방한다. Fig. 5를 보면 하천의 수위가 내수위 보다 높아 수문을 폐쇄한 것을 볼 수 있다.

3. 소유역 유출량 기반 복원력

복원력은 사건(event)으로 발생하는 시스템의 성능저하 정도와 시스템 복구 기간을 측정하는 지표이다[19,20]. 빗물펌프장에서 사건은 강우발생이며, 시스템의 성능저하는 침수량이다. 시스템의 성능은 시스템 유입량 대비 배수한 유량이며, 시스템 배수량은 시스템 유입량에서 침수로 빠져나간 유량을 제외한 값이다. 이를 수식으로 표현하면 Eq. 1과 같다.

$$u(T) = \frac{S_O}{S_I} = \frac{S_I - F}{S_I} = 1 - \frac{F}{S_I} \quad (1)$$

여기서 u(T)는 시스템 성능함수를 나타내며, S_o는 시스템 배수량, S_I는 시스템 유입량, F는 침수량을 나타낸다.

Eq. 1을 살펴보면 시스템 성능함수는 시스템 유입량과 침수량으로 표현할 수 있다. Mugume 등(2015)이 제안한 총유입량 기반 복원력 지수와 Lee 등(2017)이 제안한 총강우량 기반 복원력 지수는 시스템 유입량을 각각 절점의 총유입량과 유역의 총강우량으로 정의하여 계산

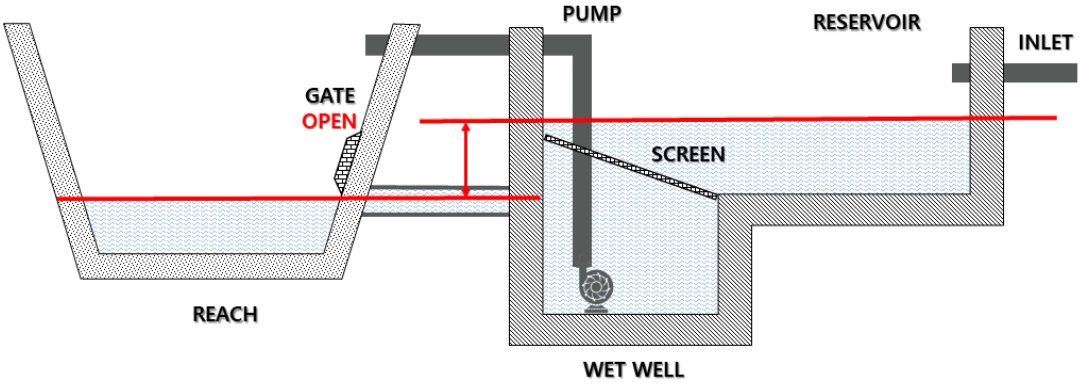

Fig. 4. Gate operation when gate open

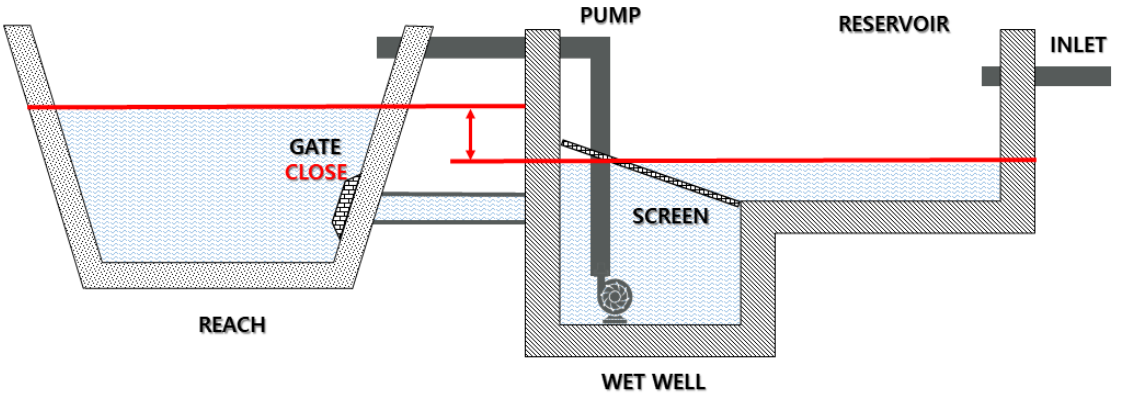

Fig. 5. Gate operation when gate closed

한 것이다[32,33].

본 연구에서 제안하는 소유역 유출량 기반 복원력 지수는 시스템의 유입량을 소유역 유출량으로 설정하여 시스템 성능함수를 계산한다. 소유역 유출량은 소유역에서 내배수시스템으로 배출되는 유량을 말하며, 이는 소유역에서 손실 유량을 제외한 순수 유입량이라고 볼 수 있다. 소유역 유출량 기반 복원력의 성능함수는 Eq. 2와 같고 복원력 계산식은 Eq. 3과 같다.

$$u(T) = 1 - \frac{V_F}{V_R} \quad (2)$$

$$Res = \frac{1}{T_n}\int_0^{T_n} u(T)dT \quad (3)$$

여기서, u(T)는 시스템 성능함수를 나타내고, V_F는 T 시간 침수량(m^3/s), V_R은 T 시간 소유역 유출량(m^3/s)을 나타내며, T_n은 전체 분석시간을 나타낸다.

4. 결과

4.1 대상유역 및 적용 강우

본 연구의 대상유역은 서울특별시 영등포구 문래동에 있는 문래빗물펌프장을 선택하였다. 문래빗물펌프장은 도림천 수계이며, 유역면적이 81.9ha이다. 유입관거는 너비 2.1m, 높이 2.18m인 2련관 1개이며, 동일 규격으로 자연 방수로가 존재한다. 문래빗물펌프장의 펌프는 5대가 설치되어 있으며, 각 펌프의 토출량은 329m^3/min 4대, 119m^3/min 1대로 구성되어 있다. Fig. 6은 대상유역의 하수관망과 배수유역을 나타내는 그림이다.

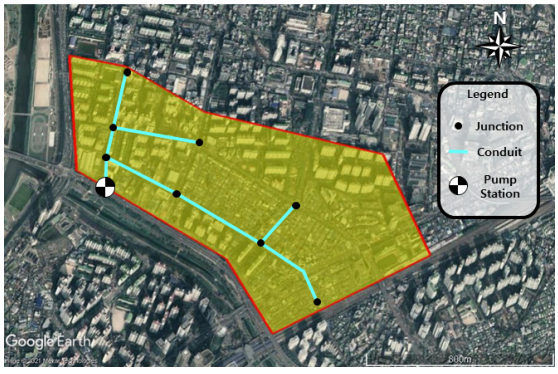

Fig. 6. Munrae basin and sewer network

강우자료는 기왕강우와 확률강우를 사용하였다. 기왕강우는 서울에 침수가 발생하였던 2010년 9월 21일의 서울(510)관측소의 강우자료를 사용하였다. 확률강우량은 1967년부터 2007년까지 47개년 강우자료를 통해 산정하였다. 확률강우는 재현기간 30년, 50년, 70년, 100년에 대하여 지속시간 60분, 120분, 180분을 적용하였고, Huff 2분위로 강우를 분포시켰다.

4.2 모니터링 지점 선정

모니터링 지점 선정을 위해 최초 및 최대월류발생지점을 확인하였다. 최초월류발생지점은 확률강우를 사용하여 산정한다. Table 1은 지속시간별 최초월류발생지점과 강우량을 나타낸 표이다. 문래빗물펌프장 유역에서 최초월류발쟁지점은 모든 지속시간에 대하여 동일하게 2015-100-1 지점으로 나타났다.

Table 1. First flooding node and rainfall by duration

Duration(min)	First flooding node	Rainfall
60	2015-100-1	46mm
120	2015-100-1	97mm
180	2015-100-1	145mm

최대월류발생지점을 선정하기 위해 기왕강우자료를 사용하였다. 해당 자료는 2010년 9월 21일에 발생한 기습폭우로 대상유역이 존재하는 영등포구에 시간당 74mm의 강우량이 발생하였으며, 3시간 지속강우량은 179mm로 나타났다. 시간당 강우량은 재현기간 10년 빈도에 해당하며, 3시간 지속강우량은 100년빈도에 해당하는 강우이다. 기왕강우를 적용하여 발생하는 침수량의 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Flooding volume of flooding node

Flooding node	Flooding volume
2015-100-1	1034m^3
2019-100-01	37m^3
2020-100-00	196m^3
2033-700-00	35m^3
2055-100-00	18m^3
2056-100-00	23m^3

Table 2를 살펴보면 2015-100-1이 가장 큰 침수량을 나타내는 최대월류발생지점이다. 최초월류발생지점이자 최대월류발생지점인 2015-100-1을 모니터링 지점으로 선정하였다. Fig. 7은 문래 하수관망에서 모니터링 지점인 절점 2015-100-1의 위치를 나타내는 그림이다.

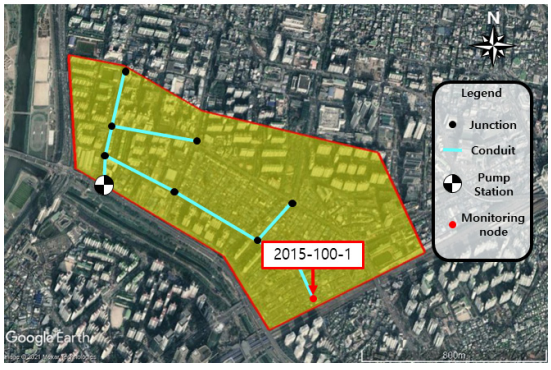

Fig. 7. Monitoring node in Munrae sewer network

4.3 적용결과

기왕강우와 확률강우를 문래빗물펌프장에 적용하여 결과를 확인해보았다. 기왕강우를 적용한 결과는 Table 3과 같다. 기존운영과 새로운 운영의 전체 기간에 대한 복원력의 차이는 약 0.0002의 차이를 보인다. 강우가 집중된 구간에서의 복원력의 차이는 약 0.001 정도의 차이를 나타냈다.

Table 3. Resilience and system function (rainfall data)

Pump rule	Resilience (Total duration)	Resilience (Rainfall duration)
Current	0.9993	0.9960
New rule	0.9995	0.9970

기왕강우 자료에서 기존운영보다 새로운 운영의 복원력이 전체 기간뿐만 아니라 강우가 집중된 기간에서도 더 좋은 것으로 평가된다. Fig. 8은 시스템 성능의 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 8을 보면 강우가 가장 크게 나타난 구간에서 기존운영과 새로운 운영 모두 성능이 크게 저하된 것으로 나타났다. 해당 구간에서 기존운영은 약 0.8383의 성능지수를 보였으며, 새로운 운영은 약 0.8602의 성능 지수를 보였다.

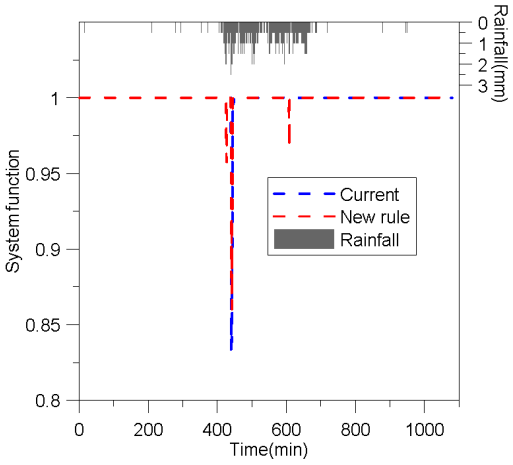

Fig. 8. System function graph(rainfall data)

강우 시작 구간에서 기존운영과 새로운 운영 모두 0.9575로 같은 성능값을 나타냈다. 이는 급격한 강우량의 증가로 일시적인 시스템 과부하가 발생하여 침수가 발생한 것으로 분석된다. 해당 부분의 성능저하는 빗물펌프장 운영 방안에 따른 차이를 보이지 않으므로 대상 유역의 하수관망의 구조적인 개선이 필요하다.

600분 구간은 강우량이 많아지는 두 번째 구간이다. 이 구간에서 새로운 운영의 시스템 성능이 감소하는 구간이 발생하였는데, 이는 새로운 운영이 기존 운영보다 더 많은 유량을 처리하기 때문이다. 새로운 운영이 많은 유량을 처리하면서 침수량으로 빠졌던 유량이 하수관망으로 들어와 유입량이 많아진다. Table 4는 각 방법의 시스템 유입량을 나타낸 표이다.

Table 4. Total inflow by each method

Pump rule	Total inflow(m^3/s)
Current	10791.8
New rule	10797.5

Table 4를 통해 확인할 수 있는 것은 새로운 운영이 기존운영 대비 약 $6m^3/s$ 만큼 더 많은 유량이 유입된 것을 확인할 수 있다. 따라서 새로운 운영의 경우 하수관망 내에 더 많은 유량이 존재하는 것으로 볼 수 있으며, 강우량이 증가하게 되면 과부하가 쉽게 일어날 수 있다. 따라서 강우량이 증가하는 600분 구간에서 새로운 운영의 침수가 발생한 것으로 분석된다.

Table 5는 지속시간 60분인 확률강우를 재현기간별

로 적용한 결과이다. 전체적으로 새로운 운영의 복원력 값이 더 크게 나타났다. 재현기간이 30년과 50년인 경우 두 운영 간의 복원력 차이는 동일하였다. 재현기간이 70년과 100년인 경우 각각 0.0042, 0.0053 정도로 새로운 운영의 복원력이 높은값을 나타냈다. Fig. 9는 각 운영 간 복원력 차이가 가장 크게 나타난 100년 빈도의 시스템 성능 그래프이다.

Table 5. Resilience and system function(60min)

Frequency (yr)	Resilience		Difference
	Current	New rule	
30	0.9715	0.9753	0.0038
50	0.9666	0.9704	0.0038
70	0.9634	0.9676	0.0042
100	0.9595	0.9648	0.0053

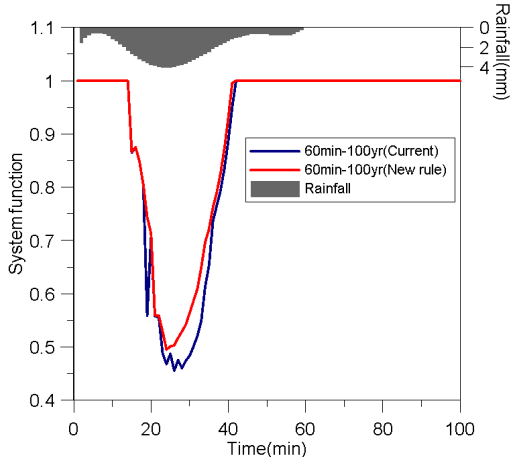

Fig. 9. System function graph(60min-100yr)

Fig. 9를 확인해보면 기존운영의 최저점은 약 0.4463이다. 반면, 새로운 운영의 최저점은 약 0.4949이다. 최저점 간의 차이는 약 0.05가 발생하였다. 따라서 지속시간 60분의 경우 새로운 운영이 빗물펌프장의 성능저하를 방지할 수 있는 효과적인 운영이다.

지속시간이 120분인 확률강우의 복원력 결과는 Table 6에 정리하였다. Table 6을 살펴보면 재현기간이 늘어날수록 복원력이 감소하는 것으로 나타났다. 기존운영은 0.9724에서 0.9531까지 떨어지는 것으로 나타났으며, 새로운 운영은 0.9761에서 0.9617까지 떨어졌다. 기존운영에 비해 새로운 운영의 복원력의 감소폭이 더 낮게 나타났다. Fig. 10은 각 운영 간의 복원력 차이가 가장 크게 나타난 100년 빈도의 시스템 성능 그래프이다.

Table 6. Resilience and system function(120min)

Frequency (yr)	Resilience		Difference
	Current	New rule	
30	0.9724	0.9761	0.0037
50	0.9649	0.9702	0.0053
70	0.9590	0.9661	0.0071
100	0.9531	0.9617	0.0086

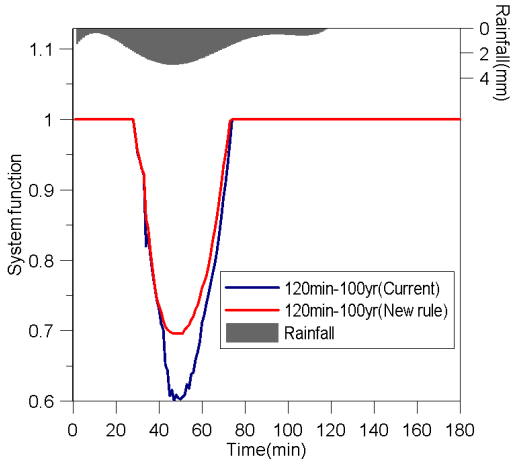

Fig. 10. System function graph(120min-100yr)

Fig. 10을 살펴보면 기존운영의 시스템 성능이 약 0.6까지 떨어지는 것을 확인할 수 있으며, 최저값은 0.6028이다. 새로운 운영의 시스템 성능은 약 0.7까지 떨어졌으며, 최저값은 0.6958이다. 각 방법의 최저값의 차이는 약 0.1이 발생하였다. 따라서 지속시간 120분의 경우 새로운 운영이 빗물펌프장의 성능저하를 방지할 수 있는 효과적인 운영이다.

Table 7은 지속시간 180분인 경우 재현기간별 복원력을 정리한 표이다. 재현기간 30년에서 기존운영과 새로운 운영 간의 복원력 차이는 0.0004로 크지 않았다. 다만 재현기간인 50년인 경우부터 두 운영의 복원력 차이는 매우 증가하였다. 지속시간 180분에서도 앞선 60분과 120분의 경우와 동일하게 새로운 운영의 복원력 감소폭이 더 작게 나타났다. Fig. 11은 지속시간 180분에서 복원력 차이가 가장 크게 나타난 재현기간 100년의 시스템 성능 그래프이다.

Fig. 11을 살펴보면 기존운영의 시스템 성능은 약 0.71까지 떨어지며, 새로운 운영의 시스템 성능은 약 0.77까지 떨어졌다. 두 운영의 최저값은 각각 0.71629, 0.7702이며, 최저값 간의 차이는 약 0.06이 발생하였다. 따라서 지속시간 180분의 경우 새로운 운영이 빗물펌프장의 성능저하를 방지할 수 있는 효과적인 운영이다.

Table 7. Resilience and system function(180min)

Frequency (yr)	Resilience		Difference
	Current	New rule	
30	0.9824	0.9828	0.0004
50	0.9723	0.9750	0.0027
70	0.9644	0.9687	0.0043
100	0.9565	0.9638	0.0073

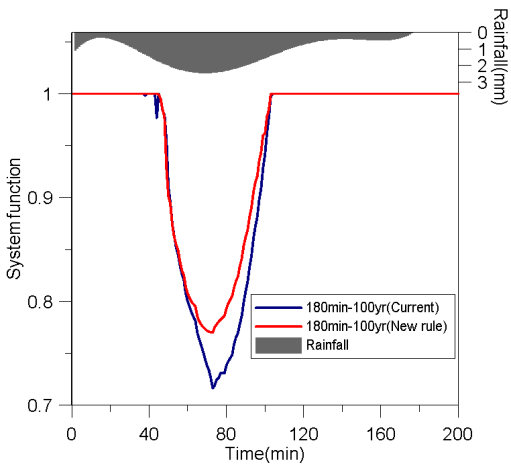

Fig. 11. System function graph(180min-100yr)

새로운 운영이 기존운영보다 더 좋은 효과를 보이는 것은 추가된 수문운영으로 인해 배수되는 유량이 증가하였기 때문이다. 기존 운영에서 수문은 강우가 시작될 때 폐쇄하였다. 하지만 새로운 운영의 수문은 강우가 시작되더라도 외수위가 내수위보다 낮으면 수문을 개방하여 지속적인 자연방류가 가능하다. 따라서 기존운영과 동일한 펌프 토출량이더라도 수문을 통해 자연방류하는 유량이 더해져 기존운영보다 더 많은 유량을 배수할 수 있다. 많은 유량을 배수함에 따라 기존에는 침수로 발생하였던 유량을 배수할 수 있어 새로운 운영이 기존운영보다 더 효과적인 운영으로 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 빗물펌프장의 자동운영 기술을 제안하였고, 제안된 운영의 성능을 평가하기 위한 소유역 유출량을 기반으로 하는 새로운 복원력 지수를 제안하였다. 제안된 빗물펌프장 자동운영 기술은 기존 운영에서 고려하지 않았던 수문운영을 고려하였다. 새로운 운영은 수문을 통한 자연 방류가 가능하여 기존 운영에 비해 많은 양의 유량의 배수가 가능하였다.

내배수시스템 유입량 중 처리하지 못한 용량이 침수량으로 나타나며, 본 연구에서 제안한 소유역 유출량 기반 복원력은 내배수시스템의 유입량을 소유역 유출량으로 정의하였다. 소유역 유출량은 유역에 내린 강우량 중 손실 유량을 제외한 내배수시스템 유입량을 나타낸다. 제안된 복원력 지수를 문래빗물펌프장 유역에 적용하여 기존운영과 새로운 운영 간의 성능을 검토하였다.

먼저 2010년 9월 21일에 발생한 기왕강우를 적용하여 분석하였다. 적용 결과 전체 기간에 대한 복원력 차이는 0.0002로 미미하나 강우가 집중된 기간의 복원력 차이는 0.001 정도 차이가 발생하였다. 따라서 강우가 집중된 경우 새로운 운영이 더 효과적이다. 다만 새로운 운영의 경우 첫 번째 강우 이후 두 번째 강우가 발생하면 약간의 침수가 발생하였다. 이는 침수로 발생하였던 유량 중 일부가 하수관망으로 유입되어 관로에 저장되어 있었기 때문이다. 추후 이러한 현상을 개선할 수 있는 방안을 연구할 예정이다.

다음으로 재현기간이 30년, 50년, 70년, 100년인 확률강우를 지속시간 60분, 120분, 180분으로 분포한 강우자료를 적용하여 분석하였다. 재현기간이 늘어날수록 복원력은 감소하는 추세를 보였다. 하지만 기존운영과 새로운 운영을 비교하였을 때 기존운영이 더 많이 감소하였다. 지속시간에 따른 비교를 해보면 지속시간 120분일 때 재현기간 30년을 제외한 나머지 빈도에서 가장 작은 복원력을 나타냈다. 기존운영과 새로운 운영이 같은 경향을 보였다. 따라서 문래빗물펌프장은 지속시간 120분인 강우에서 침수위험이 가장 크다.

본 연구에서 제안된 수문운영을 고려한 빗물펌프장 자동운영은 고정된 수위로 운영하는 기존의 빗물펌프장 운영보다 효과적으로 침수를 줄일 수 있었다. 이후 대상유역인 문래빗물펌프장보다 더 복잡하고 대규모 하수관망에 적용하여 제안된 빗물펌프장 자동운영의 성능을 검토하는 연구가 가능하다.

References

[1] R. K. Pachauri, M. R. Allen, V. R. Barros, J. Broome, W. Cramer et al., 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, p. 151, IPCC, 2014.

[2] Y. Hirabayashi, R. Mahendran, S. Koirala, L.

Konoshima, D. Yamazaki, "Global flood risk under climate change", *Nature climate change*, Vol.3, Issue 9, pp816-821, 2013.
DOI: http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1911

[3] C. Li, M. Liu, Y. Hu, R. Zhou, W. Wu, N. Huang, "Evaluating the runoff storage supply-demand structure of green infrastructure for urban flood management", *Journal of Cleaner Production*, Vol.280, 2021.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124420

[4] Water Environment Federation, American Society of Civil Engineers, "Design and construction of urban stormwater management systems", *American Society of Civil Engineers and Water Environment Federation*, 1992.
DOI: https://doi.org/10.1061/9780872628557

[5] J. Chapin, "Municipal wastewater pump station design problems and solutions", *Proceedings of the Water Environment Federation*, Vol.2006, Issue 11, pp.2158-2164, 2006.
DOI: http://dx.doi.org/10.2175/193864706783750204

[6] S. D. Graber, "Generalized method for storm-water pumping station design", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol.15, Issue 11, pp.901-908, 2010.
DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000268

[7] J. T. Lee, S. E. Yoon, J. J. Lee, "Design of detention pond and critical duration of design rainfall in Seoul", *Korean Journal of Hydrosciences*, Vol.5, pp.33-43, 1994.

[8] I. M. Faisal, M. R. Kabir, A. Nishat, "Non-structural flood mitigation measures for Dhaka City", *Urban water*, Vol.1, Issue 2, pp.145-153, 1999
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00004-2

[9] M. Maeda, H. Mizushima, K. Ito, "Development of the real-time control (RTC) system for Tokyo sewage system", *In Global Solutions for Urban Drainage*, pp. 1-16, 2002.
DOI: http://dx.doi.org/10.1061/40644(2002)317

[10] V. Meyer, S. Priest, C. Kuhlicke, "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, 2012.
DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s11069-011-9997-z

[11] M. F. K. Pasha, K. Lansey, "Optimal pump scheduling by linear programming", *In World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers*, pp.1-10, 2009.
DOI: http://dx.doi.org/10.1061/41036(342)38

[12] O. Fecarotta, A. Carravetta, M. C. Morani,R. Padulano, "Optimal pump scheduling for urban drainage under variable flow conditions", *Resources*, Vol.7, Issue 4, pp.73, 2018.
DOI: http://dx.doi.org/10.3390/resources7040073

[13] H. Wang, X. Lei, S. T. Khu, L. Song, "Optimization of pump start-up depth in drainage pumping station based on SWMM and PSO", *Water*, Vol.11, Issue 5, pp.1002, 2019.
DOI: https://doi.org/10.3390/w11051002

[14] J. H. Lee, Y. J. Lee, J. H. Kim, H. D. Jun, "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, Issue 11, pp.877-886, 2007.
DOI: https://doi.org/10.3741/JKWRA.2007.40.11.877

[15] Y. K. Hwang, S. H. Kwon, E. H. Lee, J. H. Kim, "Development of Optimal Pump Operation Method for Urban Drainage Systems", *In International Conference on Harmony Search Algorithm*, pp. 63-69, Springer, Cham, July 2019.
DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-31967-0_7

[16] A. Son, B. Kim, K. Han, "A Study on Real-Time Operation Method of Urban Drainage System using Data-Driven Estimation", *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol.37, Issue 6, pp.949-963, 2017.
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2017.37.6.0949

[17] G. Lee, H. Beak, J. Ryu, T. Kim, J. Oh, "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, Issue 6, pp.915-925, 2012.
DOI: https://doi.org/10.11001/jksww.2012.26.6.915

[18] X. Dong, H. Guo, S. Zeng, "Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure", *Water Research*, Vol.124, pp. 280-289, 2017.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.038

[19] R. Francis, B. Bekera, "A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.121, pp.90-103, 2014.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.07.004

[20] D. Henry, J. E. Ramirez-Marquez, "Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.99, pp.114-122, 2012.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.09.002

[21] R. Cohen, K. Erez, S. Havlinl, M. Newman, A. L. Barabási, D. J. Watts, "Resilience of the internet to random breakdowns" *In The Structure and Dynamics of Networks*, pp.507-509, Princeton University Press, 2011.
DOI: https://doi.org/10.1515/9781400841356.507

[22] A. Shafieezadeh, L. I. Burden, "Scenario-based resilience assessment framework for critical infrastructure systems: Case study for seismic resilience of seaports", Reliability Engineering & System Safety, Vol.132, pp.207-219, 2014.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.07.021

[23] L. Labaka, J. Hernantes, J. M. Sarriegi, "Resilience framework for critical infrastructures: An empirical study in a nuclear plant", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.141, pp.92-105, 2015.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.009

[24] R. Li, Q. Dong, C. Jin, R. Kang, "A new resilience measure for supply chain networks", *Sustainability*, Vol.9, Issue 1, pp.144, 2017.
DOI: https://doi.org/10.3390/su9010144

[25] M. Ouyang, L. Dueñas-Osorio, X. Min, "A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems", *Structural safety*, Vol.36, pp.23-31, 2012.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.12.004

[26] M. B. Fiering, "A screening model to quantify resilience", *Water Resources Research*, Vol.18, Issue 1, pp.27-32, 1982.
DOI: http://dx.doi.org/10.1029/WR018i001p00027

[27] T. Hashimoto, J. R. Stedinger, D. P. Loucks, "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation", *Water resources research*, Vol.18, No.1, pp.14-20, 1982.
DOI: https://doi.org/10.1029/WR018i001p00014

[28] J. M. Blackmore, R. A. Plant, "Risk and resilience to enhance sustainability with application to urban water systems", *Journal of Water Resources Planning and Managemen*t, Vol.134, No.3, pp.224-233, 2008.
DOI: https://doi.org/10.1061/9780784407370

[29] J. M. Blackmore, R. A. Plant, "Risk and resilience to enhance sustainability with application to urban water systems", *Journal of Water Resources Planning and Managemen*t, Vol.134, Issue 3, pp.224-233, 2008.
DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:3(224)

[30] D. Koren, V. Kilar, K. Rus, "Proposal for holistic assessment of urban system resilience to natural disasters", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, Vol.245, Issue 6, pp.062011, October 2017.
DOI: http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/245/6/062011

[31] S. N. Mugume, K. Diao, M. Astaraie-Imani, G. Fu, R. Farmani, D. Butler, "Enhancing resilience in urban water systems for future cities", *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol.15, Issue 6, pp.1343-1352, 2015.
DOI: https://doi.org/10.2166/ws.2015.098

[32] S. N. Mugume, D. E. Gomez, G. Fu, R. Farmani, D. Butler, "A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems", *Water research*, Vol.81, pp.15-26, 2015.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.030

[33] E. H. Lee, Y. S. Lee, J. G. Joo, D. Jung, J. H. Kim, "Investigating the impact of proactive pump operation and capacity expansion on urban drainage system resilience", *Journal of water resources planning and management*, Vol.143, Issue 7, 2017.
DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000775

[34] E. H. Lee, J. H. Kim, "Development of resilience index based on flooding damage in urban areas", *Water*, Vol.9, Issue 6, pp.428, 2017.
DOI: https://doi.org/10.3390/w9060428

[35] M. G. Miguez, A. P. Veról, "A catchment scale Integrated Flood Resilience Index to support decision making in urban flood control design", *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, Vol.44, Issue 5, pp.925-946, 2016.
DOI: https://doi.org/10.1177/0265813516655799

김 영 남(Young-Nam Kim) [정회원]

- 2018년 2월 : 충북대학교 토목공학부 (공학사)
- 2021년 2월 : 충북대학교 토목공학과 수공학 (공학석사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 토목공학과 수공학전공 박사과정

〈관심분야〉
수문학,수리학,수자원공학

이 의 훈(Eui-Hoon Lee) [종신회원]

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

〈관심분야〉
수문학,수리학,수자원공학