

빗물펌프장 운영시스템 개선 및 적용과 경제효과분석

Improvement and Application of Pump Station Operating System and Economic Analysis of the Application

주진걸* · 유도근** · 양재모*** · 정동휘*** · 김종훈****

Joo, Jin Gul · Yoo, Do Guen · Yang, Jae Mo · Jung, Dong Hwi · Kim, Joong Hoon

Abstract

In low-lying districts of urban areas, pump stations were built to protect flooding by the heavy rain. Particularly, the automatic pump operation system was installed for efficiency in the pump stations of Seoul. However, the effective pump operation is difficult under existing operating system because the system only performs operation by reservoir depth. This study would like to improve the real time operating system suggested by Jun et al.(2007) and to apply the system Gasan 1 pump station in Seoul. For various design rainfall events, maximum water levels simulated by the suggested system were 10~70cm lower than results by the existing system. And overflow volume at upstream manholes were 50% reduced. We converted the flood control effects by establishment of the suggested system to economic indicators. To obtain the same effect, approximately 4.9 billion won needs to expand pump capacities or 3.2~6.9 hundreds million won needs to construct storm water detention on upstream area. The suggested system could improve the flood control stability by efficient operation of the existing pump station.

Key words : pump station, operation system, inundation

요 지

도시 저지대에는 원활한 우수배제 및 내수침수의 방지를 위하여 빗물펌프장이 설치되어 있다. 특히 인구가 과밀화 되어있고 도시화가 완전히 진행된 서울시의 경우 빗물펌프장의 효율적인 운영을 위하여 자동운영시스템이 설치되어 있다. 그러나 현재 자동운영시스템은 우수지의 수위가 일정수위에 도달해야 순차적으로 펌프가 작동하게 되어 있어, 집중 호우 시 효과적인 펌프의 운영이 어려운 실정이다. 본 연구에서는 전환돈 등(2007)에 의해 제안된 실시간 빗물펌프장 운영시스템을 개선하고 서울시 가산 1 빗물펌프장에 적용하였다. 다양한 확률호우사상에 대하여 본 연구에서 제안된 시스템과 현재 자동운영시스템에 의한 펌프장 운영을 비교한 결과, 우수지의 최대수위가 10-70 cm 저감되는 것으로 나타났으며, 상류유역의 월류량은 약 50% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 제안된 시스템을 설치함으로써 얻을 수 있는 치수방지효과를 경제적 지표로 나타내었다. 펌프를 증설하여 동일한 효과를 얻기 위해서는 약 49억원의 펌프증설비용이 소요되는 것으로 나타났으며, 우수저류시설을 설치할 경우에는 3.2~6.9억원의 예산이 필요한 것으로 나타났다. 본 연구를 통하여 설치된 빗물펌프장 운영 프로그램은 기존의 빗물펌프장을 더욱 효율적으로 사용하여 치수안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며, 빗물펌프장 증설이나 우수저류시설을 설치하는 것 보다 저렴하게 도시유역의 치수안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 빗물펌프장, 운영시스템, 내수침수

1. 서 론

최근 산업화와 도시화에 따른 지구온난화가 가속되면서 기후변화에 의한 집중호우, 돌발홍수 등의 기상이변이 급증하고 있다. 특히 인구나 산업이 집중된 서울시와 같은 도시지역에서는 불투수율의 증가로 유역의 도달시간이 감소하고 침투 유출량이 증가하고 있다. 이에 따라 서울시의 홍수피해 및

저지대 내수침수 잠재 위험성은 증가하고 있으며, 우수배제 시스템의 수방능력 향상을 위해 빗물펌프장 신설 및 증설이 진행되고 있다. 그러나 우수지와 함께 운영되는 빗물펌프장은 일반적으로 우수지의 수위만으로 펌프를 운영하는데, 이러한 운영방법은 급격한 수위의 변화에 효율적으로 펌프가 운영되지 못하며, 침수가능성에 대한 높은 불확실성을 내포하는 단점을 가지고 있다(건설교통부, 2006). 따라서 빗물펌프장의

*고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 박사수료 (E-mail : civilguy97@korea.ac.kr)

**고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 박사과정

***고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 석사과정

****정희원 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수(교신저자)

증설사업 뿐 만 아니라, 효과적인 펌프 운영 방안이 반드시 필요하다.

이러한 빗물펌프장의 운영에 대한 연구는 지속적으로 이루어져왔다. 이원환 등(1992)은 내수침수 방지를 위한 펌프 가동수위의 결정에 관한 연구에서 기존의 빗물펌프장의 펌프가동수위에 대하여 연구하였으며, 심재현 등(1992)은 기존의 빗물펌프장의 시설용량으로 적절히 홍수에 대처하기 위한 자기조정능력을 가진 펌프제어 기법을 개발하였다. 윤세의와 이종태(1995)는 SWMM 모형을 이용하여 petri net diagram과 종합지표를 이용하여 펌프의 효율적 조작모형을 개발하였으며, 길경익 등(2005)은 ArcView와 Hec-HMS 모형을 결합하여 홍수유출수문곡선의 재현을 통한 도시소유역 빗물펌프장의 운영을 개선하는 방안을 제시하였다. 조덕준(2007)은 GA-Fuzzy를 이용하여 빗물펌프장의 최적운영 방안을 제시하였다. 국외에서는 Dubrovin 등(2002)은 Fuzzy 모형을 이용하여 저수지의 실시간 운영에 대한 연구를 진행하였으며, Yuri 등(2002)은 기존의 상수관망에 주로 적용되던 신뢰도에 대한 지표를 내배수시스템에 적용하여 펌프의 고장에 따른 영향을 고려한 신뢰도를 분석하였다. 기존의 이러한 연구들 중 일부는 기 획득된 강우자료를 통한 유출분석결과를 바탕으로 내배수시스템의 운영 기법을 제시하는 한계점을 나타내고 있으며, 내배수시스템의 효율적인 운영을 위하여 강우-유출의 실시간 모의 및 운영 모형의 필요성이 일관되게 언급되고 있다. 또한 이러한 연구들은 실제 유역에 적용되지 못하고 있어, 현재 유수지 및 빗물펌프장의 운영기준은 정확하게 제시되어 있지 않고 관리자의 경험에 의존하여 운영하거나 적절한 운영기준이 마련되어 있지 못한 실정이다. 즉, 현재 서울 지역의 대부분 빗물펌프장에는 자동운영 시스템이 설치되어 있긴 하지만 현장 실무자들의 자동운영시스템에 대한 신뢰가 부족하고 홍수기 기간의 상위 기관의 펌프 초기가동지침에 따라 자동운영시스템의 활용도가 낮고 호우 시 펌프의 수동 작동이 이루어지고 있는 실정이다. 이와 같은 자동운영시스템의 활용도가 낮은 이유는 현재 시스템은 유수지 수위 기준으로 현재의 유효 수심에 따라 펌프의 가동 대수를 정의하여 집중 호우 시 현재의 시스템으로는 초기가동이 불가하기 때문이다.

이에 전환돈 등(2007)은 도시 내배수시스템의 실시간 운영모형을 개발하였으며, 이정호 등(2007)은 실시간 도시 내배수시스템에 적용 가능한 다양한 펌프운영규칙을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 전환돈 등(2007), 이정호 등(2007)에 의해 제시된 모형의 성능을 개선하고, 서울시에 위치한 실제 빗물펌프장에 적용하여 효과를 확인하고자 하였다. 본 연구를 통하여 현재 빗물펌프장의 효율성이 극대화 될 것으로 판단되며, 궁극적으로 집중호우에 따른 저지대의 침수를 예방하여 시민의 생명과 재산을 지킬 수 있을 것으로 기대된다.

2. 빗물펌프장 실시간 운영모형

2.1. 빗물펌프장 실시간 운영모형의 구성

전환돈 등(2007)에 의해 개발된 빗물펌프장 실시간 운영모형은 현재까지의 강우량과 내수위를 입력자료로 하여 강우-

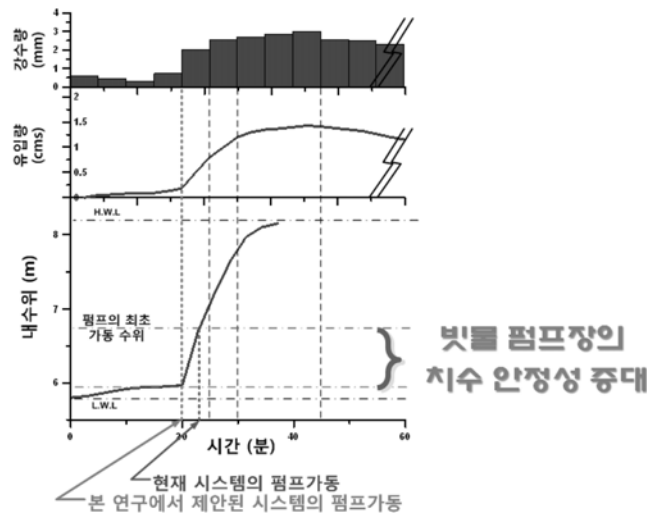


그림 1. 빗물펌프장 실시간 운영모형에서의 펌프운영결정 과정

유출 시뮬레이션을 수행하고, 이를 통해 향후 유수지로의 유입량을 예측하여 펌프운영을 결정하는 모형이다. 모든 입출력 및 강우-유출 시뮬레이션은 time step별로 이루어지며, time step은 최소 1분 이상으로 설정이 가능하다. 그림 1은 빗물펌프장 실시간 운영모형이 강우량, 유수지 수위 등의 입력자료를 사용하여 펌프의 운영을 결정하는 과정을 보여준다. time step 1에서 현재까지의 강우량과 유수지 수위를 사용하여 EPA SWMM(Storm Water Management Model)이 강우-유출 모의를 실행하고 time step 1 ~ time step 2 동안 유수지로의 유입량과 자연 방류량이 결정된다. 이를 바탕으로 time step 2에서의 유수지 수위가 예측되며, time step 1 ~ time step 2 동안의 펌프운영이 결정된다. 최종적으로 time step 1 ~ time step 2 동안의 유입량, 자연방류량, 펌프토출량을 합하여 time step 2에서의 수위를 예측할 수 있다. 이러한 일련의 과정은 실시간으로 이루어질 수 있도록 설계되어 있으며, 이전 단계에서 계산한 유수지 수위는 time step별로 관측값으로 보정되어 강우-유출 모형의 계산 오차로 인한 유입량 차이를 최소화 한다.

2.2. 펌프운영규칙

이정호 등(2007)은 빗물펌프장 실시간 운영프로그램에 적합한 3가지의 펌프 운영규칙을 개발하였으며, 이를 Rule 1, Rule 2, Rule 3로 명명하였다. Rule 1은 1 time step 후의 유수지의 수위에 따라 펌프를 운영하는 룰이다. 펌프 운전의 공동현상 방지 측면과 침수량 등을 고려하여 초기 가동수위를 설정한 후 호우 시 유수지 수위가 상승하여 1 time step 후의 수위가 초기 가동수위에 도달할 것으로 예상되면 최초 펌프를 가동한다. 그 이후 각 빗물펌프장의 특성(펌프용량, 펌프 개수, 유수지 면적, 유효수심 등)에 따라 일정한 수위를 결정하여 1 time step 후 유수지 예측 수위가 해당 수위에 도달하면 순차적으로 펌프를 가동한다.

Rule 2는 상류 하수관이 과부하 상태가 되었을 경우 과부하 발생 시점부터의 예측 유입량을 전량 배제하는 규칙이다. 즉, Rule 2는 상류 하수관거에서 원활하게 배수가 이루어지

고 있을 때에는 Rule 1과 동일하게 수위에 따라서 펌프의 가동여부를 결정한다. 그러나 내배수시스템의 절점가운데 한 점에서의 수위벡터가 증가하여 과부하가 발생되면 배수효과를 최소화하기 위해 유수지의 수위가 초기 가동수위가 될 때까지 펌프를 추가 가동한다.

Rule 3는 내배수시스템의 안정성을 최대한 유지하고자 하는 모형이다. 따라서 현재 유수지의 수위가 초기 가동수위보다 높을 경우, 1 time step 동안 예상되는 유입량을 펌프의 가동을 통해 전량 배제하여 항상 유수지의 수위를 초기 가동수위 이하로 유지하는 운영 방법이다.

본 연구에서는 기존의 자동운영시스템과 빗물펌프장 실시간 운영프로그램의 성능 비교를 위하여, 실시간 운영프로그램에 포함된 3가지 펌프운영규칙 외에 기존 자동운영시스템에 의한 펌프운영규칙을 Rule 0으로 지정하여 모의하였다. Rule 0은 지정된 수위에 따라 펌프가 순차적으로 가동되는 운영규칙이다.

2.3. 모형개선사항

본 연구에서는 전환돈 등(2007)에 의해 개발된 빗물펌프장 실시간 운영모형을 개선하여 실제 빗물펌프장에의 적용성을 향상하고자 하였다. 전환돈 등(2007)의 모형은 펌프운영의 time step를 최소 1분으로 설정하였다. 이는 모형이 1분에 1번씩 강우-유출 모의를 수행하고 실시간으로 변화하는 내수위를 고려하여 펌프의 가동여부를 결정함을 의미한다. 그러나 유수지 면적이 작거나 집수정만 있는 펌프장은 내수위의 변동이 매우 급하게 일어나므로, 펌프의 가동여부를 가능한 짧은 간격으로 결정할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 강우량 및 내수위자료의 입력과 강우-유출 분석이 가능한 가장 짧은 시간인 5초를 time step 으로 결정하였다. Time step이 이처럼 짧을 경우 펌프의 잦은 on/off가 문제가 될 수 있으며, 실제로 5초 만에 펌프를 켜다 끄는 것은 물리적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 펌프의 가동수위와 정지수위를 다르게 하여 펌프의 최소운영시간을 확보하였다. 펌프의 최초 가동수위는 EL. 6.0m이고, 펌프의 정지 수위는 EL. 5.2m로 결정하여, 일단 펌프가 한번 가동되면 유입량이 없더라도 최소 5분간 펌프가 가동될 수 있도록 하였다. 이러한 운영방법은 펌프운영의 안정성을 향상시킬 것으로 판단한다. 또한 전환돈 등(2007)의 모형은 향후 1분 후의 유입량을 예측하여 펌프를 운영한다. 그러나 대상유역의 크기 및 특징, 유수지의 면적, 펌프용량 등에 따라 유입량 예측시간은 변해야 한다. 일반적으로 유역면적이 넓은 펌프장은 유수지 면적도 크고, 저류용량도 크다. 따라서 설계호우사상에서 첨두유입량이 펌프의 총 토출량보다 훨씬 크며, 펌프의 가동에 따른 수위변화가 비교적 작다. 이런 경우에는 빗물펌프장 운영프로그램의 예측시간을 길게 설정하여 펌프를 조기가동하는 것이 효율적이다. 그러나 유수지면적이 작고 펌프용량이 큰 펌프장은 펌프의 가동에 따라 수위가 빠르게 변하며, 이러한 펌프장의 경우에는 예측시간을 길게 설정하면 펌프의 조기가동으로 인하여 펌프 on/off 횟수가 증가하고, 펌프의 공동현상이 발생할 수 있는 등 유지관리가 어렵게 된다. 따라서 다

표 1. 빗물펌프장 실시간 운영모형 개선사항

항목	전환돈 등(2007)의 모형	본 연구의 개선사항
펌프운영 time step	최소 1분 이상	최소 5초 이상
유입량 예측시간	1분	n분. 최적 예측시간 결정 가능
펌프 강제 정지수위	없음	설정
이상 내수위 관측시	관측값 사용	time step 이내 허용값 이상 변화시 무시

양한 펌프장의 특성에 따라 유입량 예측시간을 탄력적으로 운영할 필요가 있다. 본 연구에서는 유입량예측시간을 다양하게 설정할 수 있도록 모형을 수정하였으며, 최적의 유입량 예측시간을 산정하고자 하였다. 또한 관측장비의 고장에 따른 돌발상황에서 펌프의 안전성을 향상시키기 위한 로직을 추가하였다. 본 시스템 외적으로 우량계의 고장, 자료 전송의 오류, 또는 우수관거의 막힘에 따른 예측 유입량과 실제 유입량의 차이가 발생할 수 있으며, 이는 낮은 수위에서의 펌프 작동으로 펌프고장을 유발할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 펌프 강제정지수위를 추가하였다. 내수위가 펌프 강제정지수위에 도달하게 되면 예측되는 유입량과 상관없이 펌프의 작동을 정지시키도록 하였다. 빗물펌프장에서 일반적으로 사용되는 초음파 수위계는 별레나 먼지 등의 간섭으로 때때로 수위가 튀는 값을 주는 것으로 나타났다. 이로 인한 펌프의 오작동을 막기 위하여 수위값이 허용값 이상으로 변할 때는 기존의 수위를 사용하는 로직을 추가하였다. 표 1은 본 연구로 인한 모형의 개선사항을 나타내고 있다.

3. 모형의 적용 및 결과

3.1. 대상유역현황

본 연구의 대상유역인 가산 1 빗물펌프장은 서울시 금천구 가산동의 안양천변에 위치하고 있다. 배수유역 면적은 0.48km²이며, 유역전체의 약 73%가 공업지역으로 유역대부분이 포장지역으로 이루어져 있다. 그림 2는 가산1빗물펌프장의 위치와 형상을 나타낸다. 가산 1 빗물펌프장은 10년 빈도로 설계되어 있으며, 금천구 가산동 일대의 우수를 안양천으로 방류하는 역할을 수행하고 있다. 표 2는 가산 1 빗물펌프장의 현황을 나타낸다.

펌프용량, 유수지 H.W.L 및 L.W.L 와 실제 펌프가동 기록을 고려하여 가산 1 빗물펌프장에 적합한 펌프운영규칙을 표 3과 같이 설정하였다. Rule 2의 과부하 발생 시와 Rule 3에서는 예상 유입량을 모두 배제할 수 있도록 펌프를 가동하도록 하였다.

3.2. SWMM 입력자료 구축 및 검증

빗물펌프장 실시간 운영 시스템은 강우-유출의 정확한 모의를 기본으로 한다. 따라서 현지 조사를 통하여 대상유역의 관망도를 그림 3과 같이 구축하였으며, 이를 바탕으로

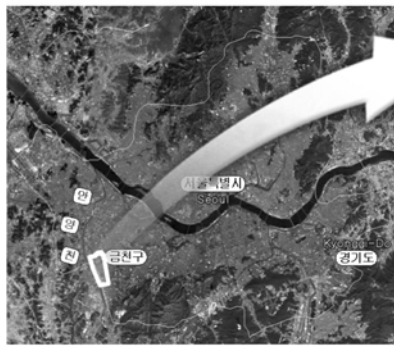


그림 2. 가산 1 빗물펌프장 위치 및 형상

표 2. 가산 1 빗물펌프장 현황

구분	현황
위치	서울특별시 금천구 가산동 550-22번지
유역면적	48.46ha
유수지 H.W.L	E.L 8.20m
유수지 L.W.L	E.L 5.80m
저수면적	4,200
펌프토출량	300 m ³ /min (100 m ³ /min×3대)
펌프구경	Ø 1,000mm×3대
배수관로	자연방류관거 : 1.8m×1.8m 강제토출관로 : D 1,500mm

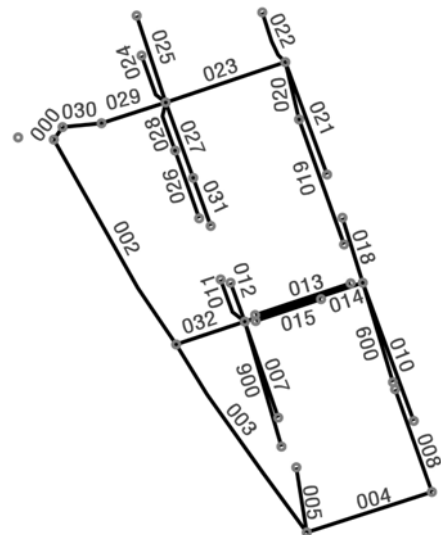


그림 3. 가산 1 빗물펌프장 유역 관망도

표 3. 펌프운영 규칙 별 상세 내용

Rule	운영 규칙	펌프 가동 여부
Rule 1	EL. 6.0m ≤ 예측 수위 < EL 6.3m	펌프 1기 가동
	EL. 6.3m ≤ 예측 수위 < EL 6.5m	펌프 2기 가동
	EL. 6.5m ≤ 예측 수위	펌프 3기 가동
	예측 수위 < EL. 5.2m	펌프 전체 가동 중단
Rule 2	평상시	Rule 1과 동일
	상류 우수관 과부하(Surcharge) 발생시	유입량 전량 배제 (펌프 가동)
Rule 3	EL. 5.2m ≤ 예측 수위	유입량 전량 배제 (펌프 가동)
Rule 0	EL. 6.0m ≤ 수위 < EL 6.3m	펌프 1기 가동
	EL. 6.3m ≤ 수위 < EL 6.5m	펌프 2기 가동
	EL. 6.5m ≤ 수위	펌프 3기 가동
공통	실제 수위 = EL. 5.1 m 실제수위가 5초이내 1 m 이상 차이발생	펌프 전체 가동 중단 수위계 이상으로 판단

SWMM 입력자료를 구축하였다. 표 5는 대상유역의 주요 관거의 매개변수를 타나낸다. SWMM 입력자료의 적절성을 확

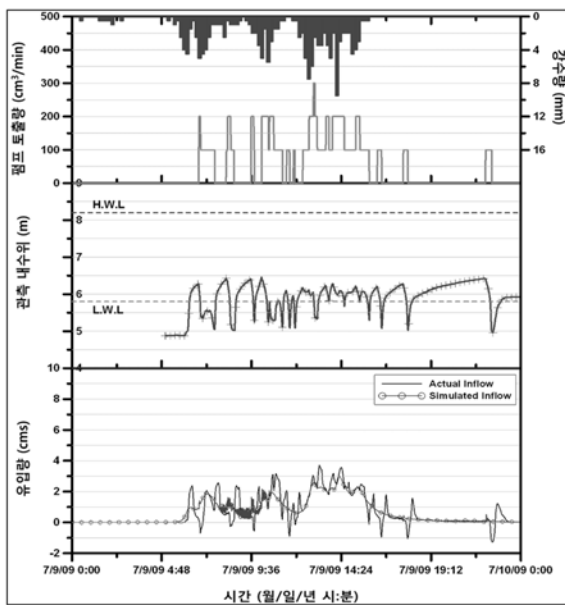
인하기 위하여 표 4와 같은 4개 관측호우사상에 적용하여 관측값과 모의값을 비교하였다. 빗물펌프장으로의 유입량은 측정하고 있지 않으므로, 유수지의 수위변화량과 펌프토출량을 합산하여 관측수문곡선을 산정하였다. 그러나 펌프가동 직후 펌프가 정상적으로 가동되기까지 일정시간이 걸린다. 이 시간 동안 펌프가 실제로 토출하는 용량은 펌프의 용량보다 작으며, 유입량 산정시에는 펌프가동직후부터 정상가동되는 것으로 가정하여 토출량을 산정했기 때문에 펌프가동 및 종료 직후에는 실제 토출량이 계산된 토출량과 차이가 발생하였다. 따라서, 관측유입수문곡선에서 펌프의 on/off 지점에서 이 오차만큼 돌출되는 부위가 나타난다. 본 연구에서는 이러한 돌출부위를 별도의 보정없이 나타내었으며, 관측 유입량과 SWMM으로 모의한 수문곡선을 그림 4에 나타내었다. SWMM으로 모의한 결과는 침투 유입량과 전체적인 수문곡선의 형태를 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났다.

표 4. 적용된 관측호우사상

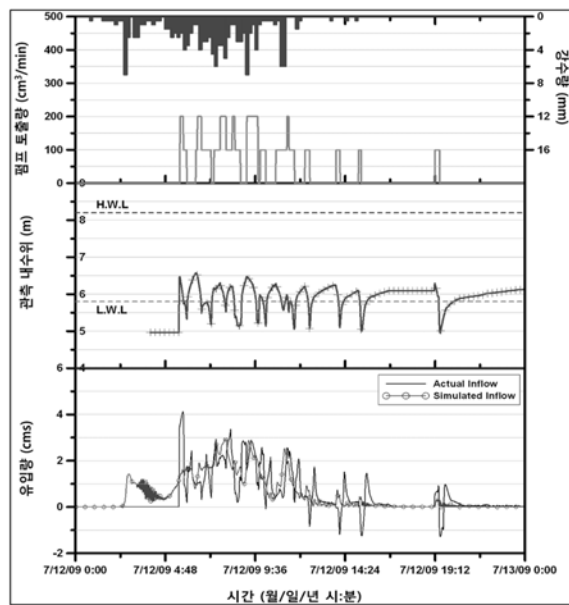
연 번	발생 일시	지속 기간	총 강우량	최대 강우강도	30분 지속기간 최대 빈도
No. 1	2009.07.09	15hr 26 min	153.5 mm	28.5 mm/hr	2년 빈도 미만
No. 2	2009.07.12	14hr 12 min	129.0 mm	26.0 mm/hr	2년 빈도 미만
No. 3	2009.07.14	20hr 13 min	159.0 mm	41.5 mm/hr	2년 빈도
No. 4	2009.08.12	14hr 17 min	75.0 mm	18.0 mm/hr	2년 빈도 미만

표 5. 대상구역 매개변수

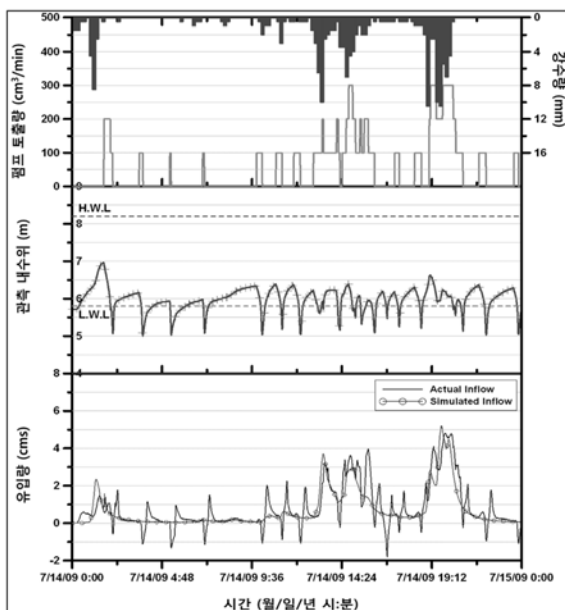
소유역 경사 (%)	불투수 면적 비율	불투수 면적의 조도계수 (n)	투수면적의 조도계수 (n)	불투수 면적의 요지저류량 (mm)
0.1	80%	0.015	0.03	2.54
투수면적의 요지저류량 (mm)	Horton curve의 최대 침투율 (mm/hr)	Horton curve의 최소 침투율 (mm/hr)	Horton 감소율 (1/hr)	관의 Manning's n
5.08	203	12.7	3.6	0.017



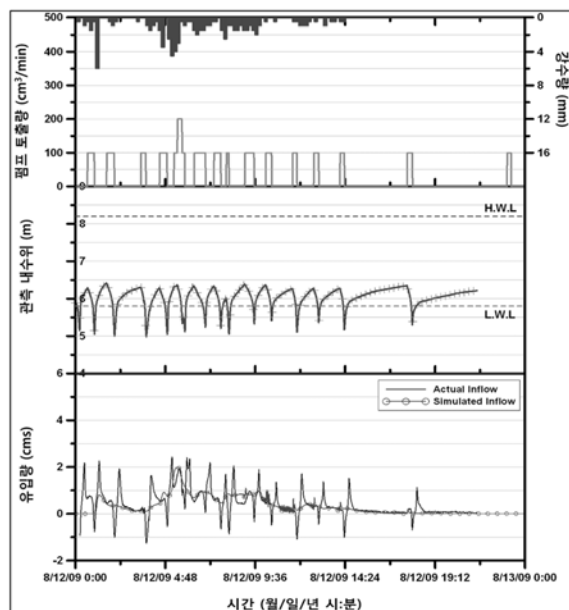
(a) 2009.07.09일 강우사상



(b) 2009.07.12일 강우사상



(c) 2009.07.14일 강우사상



(d) 2009.08.12일 강우사상

그림 4. 관측수문곡선과 모의 수문곡선의 비교

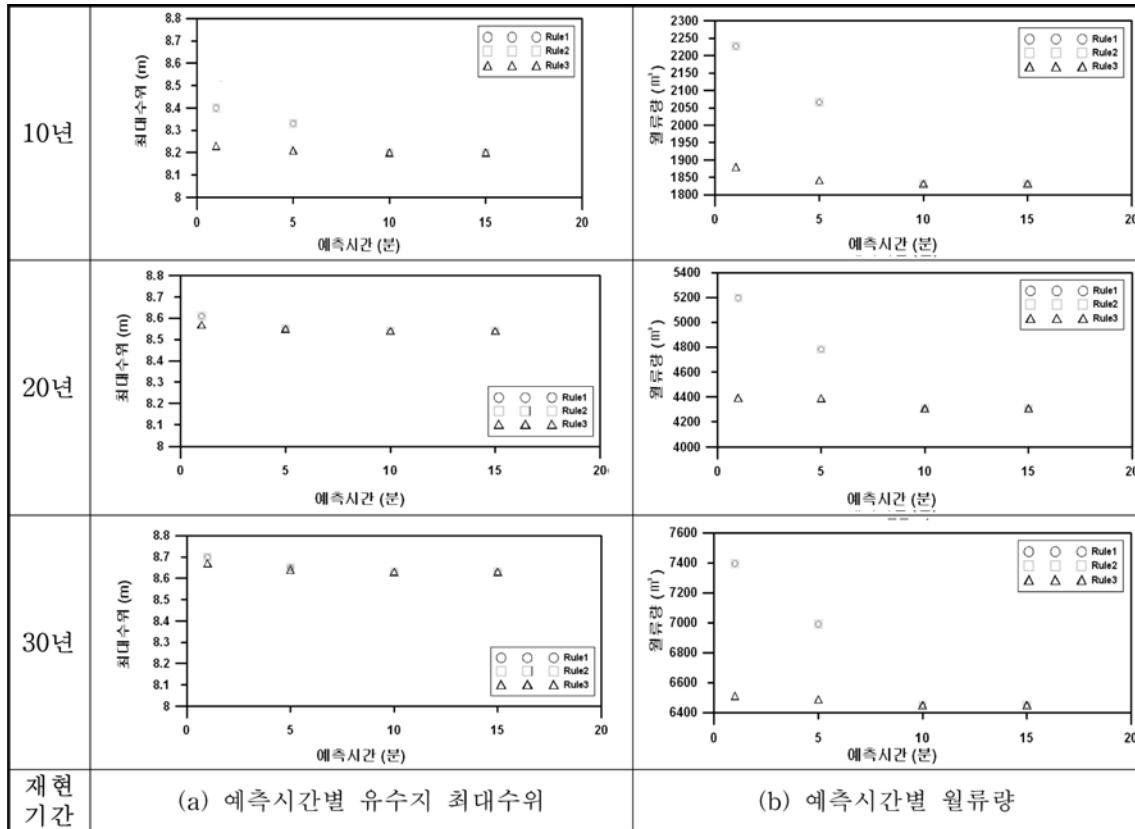


그림 5. 유입량 예측시간별 유수지 최대수위 및 월류량변화

3.3. 최적유입량 예측시간 결정

본 연구에서 개선된 빗물펌프장 운영 프로그램은 우수의 유입량 예측시간을 n분으로 설정할 수 있다. 최적 유입량 예측시간을 결정하기 위하여 10, 20, 30년 빈도의 확률호우사상에 대하여 모의를 수행하여 유입량 예측시간별 유수지 최고 수위와 월류량을 산정하였다. 유입량 예측시간을 증가시킴에 따라 유수지 수위는 낮아지고, 상류 우수관거에서의 월류량이 감소하는 경향을 확인 할 수 있다. 그러나 예측시간이 10분 이상이 되면 이러한 경향은 없어지는 것으로 나타났다. 또한 초기가동수위에서 유입량 없이 10분 이상 펌프를 돌릴 경우 펌프정지수위에 도달하는 것으로 나타났다. 따라서 가산 1 빗물펌프장에서의 유입량 예측시간은 10분으로 결정하였다. 그림 5는 확률호우사상별 모의 결과를 나타낸다.



그림 6. 빗물펌프장 운영 프로그램 및 MMI 설치 사진

3.4. 빗물펌프장 운영 프로그램의 설치 및 MMI와의 연계

빗물펌프장 운영시스템의 안전성을 향상시키기 위하여 기존에 설치되어 있는 MMI 시스템과 빗물펌프장 운영 프로그램이 연계운영 되도록 설치하였다. 그림 6은 가산 1 빗물펌프장에 설치된 빗물펌프장 운영 프로그램 및 MMI의 모습을 나타낸다. MMI 시스템은 외부계측기로부터 관측자료를 전송 받고, 펌프의 on/off 명령을 수행한다. 또한 빗물펌프장 운영 프로그램에 필요한 기초 자료를 제공한다. 빗물펌프장 운영 프로그램은 MMI로부터 전송받은 자료를 바탕으로 펌프의 운영여부를 결정하여 MMI로 명령을 전달한다. MMI, 빗물펌프장 운영프로그램 및 계측기 사이의 정보 및 명령전달 체계는 그림 7과 같다.

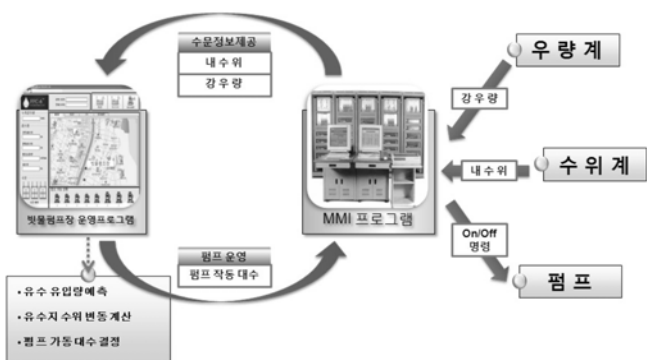
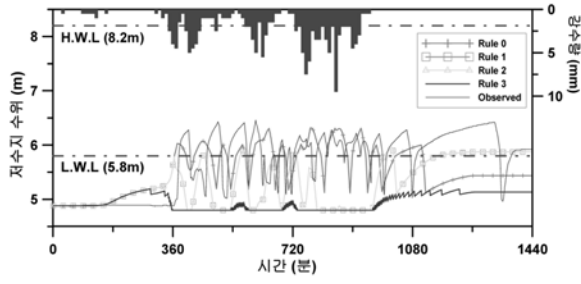
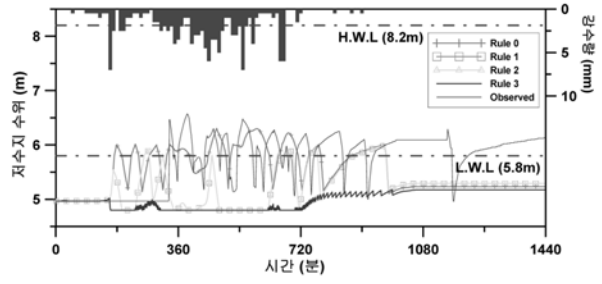


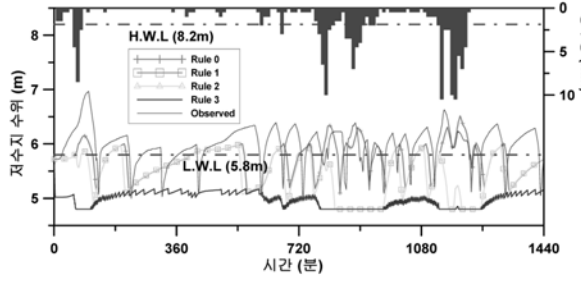
그림 7. MMI, 빗물펌프장 운영프로그램 및 계측기 사이의 연계운영



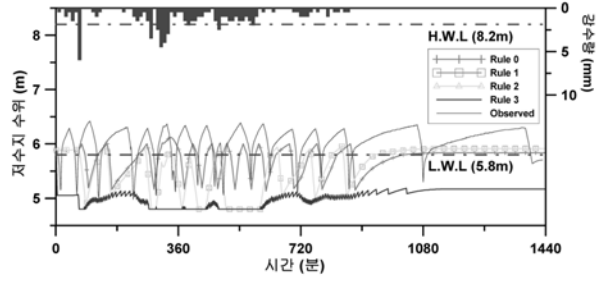
(a) 호우사상 1



(b) 호우사상 2



(c) 호우사상 3



(d) 호우사상 4

그림 8. 유수지 수위곡선 비교

유수지의 수위계에서 관측된 내수위와 인근의 가산 2 빗물 펌프장에서 관측된 강우량이 각각 MMI로 전송되며, MMI는 각 계측기로부터 전송받은 수문자료와 펌프작동 상태 등 펌프운동을 결정하기 위한 기초 자료를 빗물펌프장 운영 프로그램으로 전송한다. 자료의 전송형태는 Database 방식인 SQL(structured query language)을 이용한다. 빗물펌프장 운영 프로그램은 과거 6시간동안의 강우자료로 SWMM을 모의하며, 내수위를 고려하여 펌프가동여부를 결정하여 MMI로 전송한다. 빗물펌프장 운영 프로그램으로부터 펌프가동여부를 전송받은 MMI는 해당 값에 맞게 펌프의 스위치를 조작한다. 이상의 과정은 매 5초마다 반복하여 수행된다.

3.5. 펌프운영결과

표 4의 실제 호우사상에 대하여 빗물펌프장 운영 프로그램을 모의 운영 하였으며, 현재 펌프장 운영시스템과 동일한 rule 0 및 실제 현장에서 수동으로 가동한 결과와 비교하였다. 그림 8은 펌프운영규칙별 유수지 수위를 나타낸다. 4개의 관측호우사상은 2009년에 발생한 가장 큰 호우사상들이나, 모두 펌프장의 설계빈도인 10년에는 훨씬 미치지 못하고 있다. 이에 펌프 운영방법에 상관없이 모든 호우에서 H.W.L(High Water Level)인 EL. 8.2m 이내에서 빗물펌프장이 안정적으로 운영되는 것으로 나타났으며, 상류지역에 월류는 발생하지 않았다.

극한 호우사상에서의 펌프장 운영을 모의하기 위하여, 5, 10, 20, 30년 빈도 호우사상에서 빗물펌프장 운영 프로그램을 모의 운영하였다. 다양한 호우패턴을 반영하기 위하여 강우 지속기간을 60, 120, 180, 240분, 강우의 시간분포를 Huff 1~4분위로 구분하여 총 64가지의 다양한 호우사상을 구현하였다. 표 6는 모의에 적용된 확률호우사상을 나타낸다.

가산 1 펌프장의 설계빈도보다 작은 5년 빈도 호우에서는 모든 rule에서 유수지의 침투수위가 H.W.L.을 넘지 않으며,

월류량도 미미하거나 없는 것으로 모의되었다. 10년 빈도 호우에서는 일부호우에서 유수지 최대수위가 H.W.L.을 넘었으며, 빗물펌프장의 설계빈도를 초과하는 20년과 30년 빈도 호우에서는 대부분의 호우에서 침투수위가 H.W.L.을 넘는 것으로 나타났다. 펌프운영별로는 현재 펌프장 운영규칙인 Rule 0가 가장 수위가 높게 나타났으며, Rule 2와 Rule 3에서 가

표 6. 적용된 확률호우사상

재현기간/ 강우지속 기간	5년빈도	10년빈도	20년빈도	30년빈도
60분	62.1 mm	74.8 mm	87.0 mm	94.0 mm
120분	86.5 mm	103.4 mm	119.5 mm	128.8 mm
180분	101.3 mm	120.4 mm	138.8 mm	149.4 mm
240분	111.1 mm	131.7 mm	151.6 mm	163.0 mm

주) 건설교통부. 한국확률강우량도 작성(2000)

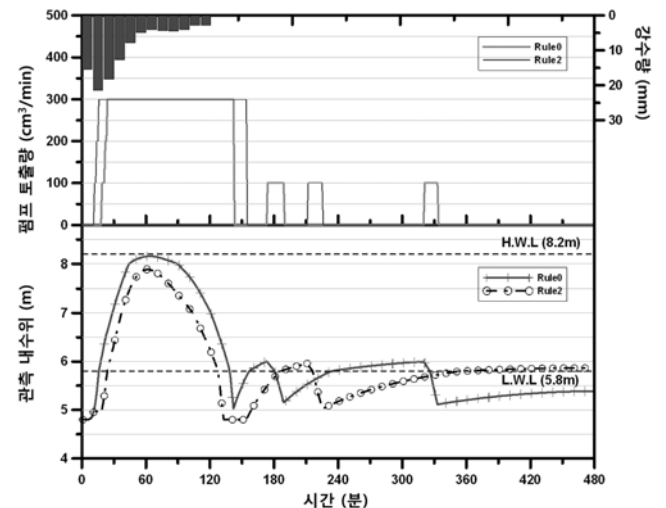


그림 9. 펌프운영결과 (10년빈도 지속기간 120분 Huff 1분위)

장 수위가 낮게 유지되었다.

10년 빈도에서도 일부 호우에 대하여 월류가 발생하였으며, 이는 상류의 우수관이 10년 빈도보다 낮은 빈도로 설계되어 통수능이 부족하기 때문으로 판단된다. 10년빈도에서의 펌프 운영결과를 그림 9에 나타내었다. 20년 빈도와 30년 빈도 호우사상에서 월류량이 급속하게 증가하였다. 빗물펌프장의 설계빈도를 초과하는 호우로 예상되는 결과였으며, 상류 우수관의 통수능 부족과 빗물펌프장 유수지의 수위상승으로 인하여 상류 우수관에서 배수가 원활하게 이뤄지지 않았기 때문으로 판단된다. 월류가 가장 많이 발생한 관은 22, 23번 관

으로 나타났다. 동일한 호우사상에서 Rule 0에서 월류량이 가장 많았으며, 본 빗물펌프장 운영 프로그램을 사용하였을 경우 20년 빈도는 최소 10.1%이상, 30년 빈도는 11.1~50.3% 월류량이 감소하는 것으로 나타났다. 표 7은 호우사상별 유수지의 최대수위를 나타내며, 표 8은 월류량을 나타낸다.

3.6. 빗물펌프장 운영 프로그램의 적용으로 인한 경제효과

본 연구에서 제안한 빗물펌프장 운영 프로그램의 적용으로 극한 호우사상에서 유수지의 수위를 낮추고, 상류 우수관에서 월류량을 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 표 9은 빗물펌

표 7. 펌프운영규칙에 따른 호우사상별 유수지 최대수위

(단위 : EL, m)

대상호우		5년빈도				10년빈도			
지속 기간	시간 분포	Rule 0	Rule 1	Rule 2	Rule 3	Rule 0	Rule 1	Rule 2	Rule 3
60분	1분위	7.18	6.50	6.50	6.32	7.83	7.43	7.43	7.26
	2분위	7.60	7.02	7.02	6.83	8.12	7.93	7.93	7.80
	3분위	7.75	7.17	7.17	7.02	8.15	7.96	7.96	7.84
	4분위	7.80	7.23	7.23	7.06	8.14	7.86	7.86	7.71
120분	1분위	7.38	6.70	6.70	6.70	8.16	7.87	7.87	7.86
	2분위	7.90	7.25	7.25	7.24	8.42	8.18	8.18	8.17
	3분위	8.03	7.48	7.48	7.47	8.47	8.21	8.21	8.21
	4분위	8.10	7.76	7.76	7.73	8.42	8.20	8.20	8.20
180분	1분위	7.24	6.49	6.49	6.49	8.14	7.82	7.82	7.81
	2분위	7.60	6.94	6.94	6.94	8.39	8.15	8.15	8.14
	3분위	7.86	7.20	7.20	7.20	8.47	8.22	8.22	8.22
	4분위	8.14	7.84	7.84	7.84	8.57	8.34	8.34	8.34
240분	1분위	7.04	6.05	6.05	6.03	8.06	7.42	7.42	7.41
	2분위	7.24	6.25	6.25	6.25	8.21	7.86	7.86	7.86
	3분위	7.48	6.60	6.60	6.60	8.30	8.05	8.05	8.05
	4분위	8.06	7.60	7.60	7.60	8.55	8.32	8.32	8.32
지속 기간	시간 분포	20년빈도				30년빈도			
		Rule 0	Rule 1	Rule 2	Rule 3	Rule 0	Rule 1	Rule 2	Rule 3
60분	1분위	8.20	8.09	8.09	8.04	8.41	8.25	8.25	8.20
	2분위	8.41	8.22	8.22	8.18	8.59	8.36	8.36	8.32
	3분위	8.43	8.21	8.21	8.16	8.57	8.33	8.33	8.28
	4분위	8.32	8.14	8.14	8.09	8.41	8.23	8.23	8.18
120분	1분위	8.44	8.30	8.30	8.30	8.72	8.51	8.51	8.51
	2분위	8.69	8.62	8.62	8.61	8.98	8.84	8.84	8.82
	3분위	8.73	8.65	8.65	8.64	8.97	8.82	8.82	8.82
	4분위	8.73	8.54	8.54	8.54	8.83	8.66	8.66	8.63
180분	1분위	8.61	8.40	8.40	8.39	8.82	8.63	8.63	8.63
	2분위	8.86	8.67	8.67	8.67	9.08	8.91	8.91	8.90
	3분위	8.90	8.72	8.72	8.72	9.09	8.95	8.95	8.95
	4분위	8.89	8.74	8.74	8.74	9.02	8.86	8.86	8.86
240분	1분위	8.53	8.28	8.28	8.28	8.78	8.59	8.59	8.58
	2분위	8.74	8.54	8.54	8.54	8.97	8.82	8.82	8.82
	3분위	8.80	8.61	8.61	8.61	9.04	8.87	8.87	8.87
	4분위	8.95	8.79	8.79	8.79	9.09	8.96	8.96	8.96

표 8. 호우사상별 월류량

(단위 : m³)

대상호우		5년빈도				10년빈도			
지속 기간	시간 분포	Rule 0	Rule 1	Rule 2	Rule 3	Rule 0	Rule 1	Rule 2	Rule 3
60분	1분위	0	0	0	0	1	1	1	1
	2분위	0	0	0	0	547(100%)	412(75.3%)	412(75.3%)	410(75.0%)
	3분위	0	0	0	0	946(100%)	750(79.3%)	750(79.3%)	736(77.8%)
	4분위	188(100%)	178(94.7%)	178(94.7%)	178(94.7%)	1,490(100%)	1,317(88.4%)	1,317(88.4%)	1,303(87.4%)
120분	1분위	0	0	0	0	0	0	0	0
	2분위	0	0	0	0	768(100%)	275(35.8%)	275(35.8%)	268(34.9%)
	3분위	0	0	0	0	1,250(100%)	717(57.4%)	717(57.4%)	716(57.3%)
	4분위	428(100%)	210(49.1%)	210(49.1%)	208(48.6%)	2,277(100%)	1,832(80.5%)	1,832(80.5%)	1,832(80.5%)
180분	1분위	0	0	0	0	0	0	0	0
	2분위	0	0	0	0	268(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
	3분위	0	0	0	0	680(100%)	107(15.7%)	107(15.7%)	107(15.7%)
	4분위	207	0	0	0	1,855(100%)	1,394(75.1%)	1,394(75.1%)	1,393(75.1%)
240분	1분위	0	0	0	0	0	0	0	0
	2분위	0	0	0	0	0	0	0	0
	3분위	0	0	0	0	0	0	0	0
	4분위	0	0	0	0	1,187(100%)	664(55.9%)	664(55.9%)	664(55.9%)
지속 기간	시간 분포	20년빈도				30년빈도			
		Rule 0	Rule 1	Rule 2	Rule 3	Rule 0	Rule 1	Rule 2	Rule 3
60분	1분위	1,187(100%)	856(72.1%)	856(72.1%)	847(71.4%)	1,894(100%)	1,648(87.0%)	1,648(87.0%)	1,590(83.9%)
	2분위	2,205(100%)	1,913(86.8%)	1,913(86.8%)	1,851(83.9%)	3,418(100%)	3,019(88.3%)	3,019(88.3%)	2,927(85.6%)
	3분위	2,711(100%)	2,378(87.7%)	2,378(87.7%)	2,303(85.0%)	4,049(100%)	3,600(88.9%)	3,600(88.9%)	3,520(86.9%)
	4분위	3,310(100%)	2,977(89.9%)	2,977(89.9%)	2,913(88.0%)	4,857(100%)	4,273(88.0%)	4,273(88.0%)	4,180(86.1%)
120분	1분위	1,547(100%)	1,076(69.6%)	1,076(69.6%)	1,076(69.6%)	2,830(100%)	2,244(79.3%)	2,244(79.3%)	2,244(79.3%)
	2분위	3,044(100%)	2,340(76.9%)	2,340(76.9%)	2,323(76.3%)	5,189(100%)	4,079(78.6%)	4,079(78.6%)	4,020(77.5%)
	3분위	3,644(100%)	2,923(80.2%)	2,923(80.2%)	2,900(79.6%)	6,095(100%)	4,785(78.5%)	4,785(78.5%)	4,758(78.1%)
	4분위	5,257(100%)	4,305(81.9%)	4,305(81.9%)	4,305(81.9%)	7,492(100%)	6,449(86.1%)	6,449(86.1%)	6,449(86.1%)
180분	1분위	1,107(100%)	543(49.1%)	543(49.1%)	522(47.2%)	2,514(100%)	1,738(69.1%)	1,738(69.1%)	1,738(69.1%)
	2분위	2,498(100%)	1,615(64.7%)	1,615(64.7%)	1,598(64.0%)	4,722(100%)	3,424(72.5%)	3,424(72.5%)	3,373(71.4%)
	3분위	3,036(100%)	2,190(72.1%)	2,190(72.1%)	2,185(72.0%)	5,542(100%)	4,007(72.3%)	4,007(72.3%)	3,995(72.1%)
	4분위	5,096(100%)	3,924(77.0%)	3,924(77.0%)	3,924(77.0%)	7,798(100%)	6,345(81.4%)	6,345(81.4%)	6,345(81.4%)
240분	1분위	451(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1,625(100%)	812(50.0%)	812(50.0%)	791(48.7%)
	2분위	1,263(100%)	476(37.7%)	476(37.7%)	476(37.7%)	3,076(100%)	1,972(64.1%)	1,972(64.1%)	1,972(64.1%)
	3분위	1,804(100%)	963(53.4%)	963(53.4%)	963(53.4%)	3,762(100%)	2,566(68.2%)	2,566(68.2%)	2,566(68.2%)
	4분위	3,901(100%)	2,900(74.3%)	2,900(74.3%)	2,900(74.3%)	6,646(100%)	5,071(76.3%)	5,071(76.3%)	5,071(76.3%)

표 9. 시스템 적용으로 인한 치수능력 향상효과(10년빈도, 180분 지속기간, Huff 4분위)

재현기간(년)	강우량(mm)	현재 시스템		빗물펌프장 운영 프로그램	
		월류량(m ³)	최대수위(EL. m)	월류량(m ³)	최대수위(EL. m)
10	120.4	1,855	8.57	1,393	8.34
11	123.0	.	.	1,682	8.40
12	125.0	.	.	1,914	8.45
13	127.0	.	.	2,153	8.49
14	129.0	.	.	2,414	8.54
15	130.5	.	.	2,621	8.57
16	132.5	.	.	2,889	8.61

표 10. 개발된 시스템의 적용으로 인한 펌프능력 향상효과(10년빈도, 180분 지속기간)

펌프토출능력 (m ³ /min)	현재 시스템		시스템 적용	
	월류량 (m ³)	최대수위 (EL. m)	월류량 (m ³)	최대수위 (EL. m)
300	1,855	8.57	1393	8.34
345	1,686	8.39	.	.
360	1,610	8.31	.	.
375	1,542	8.24	.	.
390	1,461	8.17	.	.
405	1,385	8.12	.	.
420	1,313	8.07	.	.

표 11. 펌프장 건설비용

펌프장용량(m ³ /d)	비용(천원)
5,000	1,066,144
10,000	1,357,656
30,000	1,761,373
50,000	2,753,412
70,000	2,822,816
100,000	3,458,067
150,000	4,864,800

주) 서울시 침수피해 저감을 위한 우수저류시설 적용방안(2004). 서울시정개발연구원

프장 운영 프로그램의 적용으로 인한 가산 1 빗물펌프장의 치수능력 향상효과를 보여준다. 빗물펌프장 운영 프로그램을 사용하였을 경우 월류량 기준으로는 12년 빈도, 우수지 수위 기준으로는 15년 빈도의 호우에서 현재시스템과 동일한 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 본 절에서는 빗물펌프장 운영 프로그램의 적용으로 얻을 수 있는 우수지 수위저감 및 월류량 감소 등 빗물펌프장의 치수안전성 향상으로 인한 경제적 효과를 산정하고자 하였다. 그러나 침수로 인한 피해액은 지역의 토지이용이나 피해액 산정기법에 따라 많은 차이가 나며, 객관적인 적용이 어려운 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 빗물펌프장의 증설에 필요한 비용과 월류량을 줄이기 위해 필요한 비용을 산정하여 경제효과를 분석하였다.

현재 빗물펌프장 자동화운영시스템이 본 개발 시스템으로 인한 운영과 동일한 효과를 얻기 위해서는 펌프의 용량을 약 35% 증설해야 하는 것으로 나타났다. 표 10은 빗물펌프장 운영 프로그램을 적용한 것과 동일한 효과를 현재 시스템에서 얻기 위해 필요한 펌프용량을 나타낸다. 그 결과 현재 펌프용량보다 약 105 m³/min이 더 필요한 것으로 나타났다. 서울시정개발연구원(2004)은 펌프용량별 빗물펌프장의 설치비용을 표 11과 같이 산정한 바 있다. 표 11의 결과를 선형보간하여 추가로 필요한 펌프용량을 경비로 환산한 결과 약 49억 여원이 필요한 것으로 나타났다. 표 12은 빗물펌프장 운영 프로그램의 적용으로 인한 예산 절감효과를 나타낸다.

빗물펌프장 운영 프로그램의 설치로 가산 1 빗물펌프장 유

표 12. 빗물펌프장 운영 프로그램의 적용으로 인한 예산 절감효과

현재펌프능력 (m ³ /min)	필요펌프능력 (m ³ /min)	펌프능력증대효과		예산절감액 (천원)	비고
		m ³ /min	m ³ /day		
300	405	105	151,200	4,894,662	

표 13. 우수저류시설 설치 공사비

저류시설용량(m ³)	비용(천원)
1,000	512,627
2,000	897,469
3,000	1,262,786
4,000	1,617,996

주) 서울시 침수피해 저감을 위한 우수저류시설 적용방안(2004). 서울시정개발연구원

표 14. 우수저류시설 설치 대비 시스템 설치로 인한 예산 절감효과

빈도(년)	최대월류저감량(m ³)	예산절감액(천원)
10	462	322,445
20	1,172	583,826
30	1,453	687,274

역에서는 각 호우사상별로 월류량을 462~1,453 m³ 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 유역에서 우수 저류시설을 설치하기 위해 필요한 비용을 서울시정개발연구원(2004)은 표 13과 같이 제안한 바 있다. 우수 저류시설을 설치하여 462~1,453 m³의 월류량을 처리하기 위해 필요한 비용을 표 13를 선형보간하여 산정하였으며, 표 14에 나타내었다. 유역의 토지이용과 경사 등에 따라 차이가 발생할 수 있으나, 빗물펌프장 운영 프로그램의 설치 약 3.2억~6.9억원의 우수저류시설 설치비를 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 월류량을 저류하기 위해서는 월류저감량보다 더 많은 저류지 용량이 필요하므로 실제 설치비용은 이보다 더욱 많을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서 제안한 빗물펌프장 운영 프로그램을 가산 1 빗물펌프장에 적용하여 극한 호우가 발생하였을 때 우수지의 수위를 현재 시스템을 사용하는 것보다 낮게 유지할 수 있었으며, 상류 우수관에서의 월류량을 줄이는 효과를 얻을 수 있었다. 빗물펌프장 운영 프로그램의 적용으로 인한 치수효과를 펌프장을 증설하여 얻기 위해서는 약 48.9억원의 공사비가 필요한 것으로 나타났으며, 우수저류시설을 설치하여 동일한 치수효과를 얻기 위해서는 3.2억~6.9억원 이상의 공사비가 필요한 것으로 산정되었다. 본 연구에서 제안한 빗물펌프장 운영 프로그램은 기존의 펌프장을 더욱 효율적으로 사용하여 치수안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며, 펌프장 증설이나 우수저류시설의 설치보다 저렴하게 도시유역의 치수안전성을 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고문헌

건설교통부 (2006) 빗물펌프장 최적운영기법 개발, 도시홍수재해 관리기술보고서, FFC 05-16, 도시홍수재해관리기술연구사업단.
건설교통부 (2000) 1999년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서 제1권 한국확률강우량도 작성.
길경익, 한중옥, 김구현 (2005) 도시 소유역 배수펌프장 운영개선 방안 연구(1)-GIS 기반 수문모형에 의한 홍수유출수문곡선의 재현. **한국물환경학회지**, 제21권, 제6호, pp.682-686
김영란 (2004) 서울시 침수피해 저감을 위한 우수저류시설 적용 방안. 시정연2004-R-19, 서울시정개발연구원
심재현, 조원철, 이원환 (1992) 자기 조정력을 가진 퍼지제어기법에 의한 우수배제펌프의 적응제어. **한국수자원학회 수공학연구 발표회논문집**, pp.291-299

윤세의, 이종태 (1995) 우수지 배수펌프 운영조작 모형의 개발. **한국수자원학회지**, 제28권, 제6호, pp.203-215
이원환, 조원철, 심재현 (1992) 퍼지제어기법을 사용한 우수배제 펌프의 조작기법 개발, **대한토목학회 논문집**, 제12권, 제3호, pp.107-114
이정호, 이양재, 전환돈, 김중훈 (2007) 내배수시스템 실시간 운영 모형을 이용한 배수펌프장 운영기법 개발. **한국수자원학회 논문집**, 제40권, 제11호, pp.877-886.
전환돈, 이양재, 이정호, 김중훈 (2007) 도시 내배수시스템 실시간 운영모형의 개발. **물환경학회지(수질보전)**, 제23권, 제5호, pp.748-755.
조덕준 (2007) 내수배제시스템의 최적운영을 위한 GA-Fuzzy 모형의 구축. **고려대학교** 박사학위논문
Dubrovin, T., Jolma, A., and Turunen, E. (2002) Fuzzy model for real-time reservoir operation. *Journal of water resources planning and management*, Vol. 299, No. 4, pp.300-311
Yuri, A. E., Leonid, I. Z. and Takamitsu, K. (2002) Hydraulic reliability index for sewage pumping station. *Journal of urban water*, Vol. 4, No. 3, pp.301-306

◎ 논문접수일 : 10년 04월 27일
◎ 심사의뢰일 : 10년 04월 29일
◎ 심사완료일 : 10년 05월 28일