Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 19, No. 7 pp. 337-342, 2018

https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.7.337
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

최적화 기법을 이용한 빗물펌프장 최적 운영수위 결정

심규범[1], 유도근[2], 김응석[1*]
[1]선문대학교 건축사회환경학부, [2]수원대학교 건설환경에너지공학부(건설환경공학)

Determination of Optimal Operation Water Level of Rain Water Pump Station using Optimization Technique

Kyu-Bum Sim[1], Do-Guen Yoo[2], Eung-Seok Kim[1*]
[1]**Department of Architecture, Architectural Eng. & Civil Eng, Sunmoon University**
[2]**Department of Civil Engineering, The University of Suwon**

요 약 도시유역에서 발생되는 내수침수를 방어하는 수단으로 구조적 대책인 빗물펌프장이 있으나 현실적 적용에 어려움이 있기 때문에 비구조적 대책 등이 보안되어야 한다. 본 연구에서는 빗물펌프장 실무운영 담당자의 의견을 반영한 최소의 월류량을 가지는 펌프의 최적운영수위를 결정하였다. 빗물펌프장의 최적운영수위를 산정하기 위해 최적화 기법인 GA(Genetic Algorithm)을 이용하였으며, 도시유역의 강우-유출 모형인 SWMM(Ver.5.1) DLL과 연계하였다. 제약조건으로는 펌프의 효율을 극대화하는데 까지의 걸리는 시간을 고려하였으며, 최적운영수위를 산정한 결과 전체적으로 기존운영수위보다 낮은 운영수위에서 월류량이 감소하였다. 대부분 펌프의 경우 각 펌프 호기의 운영 범위에서 가장 낮은 운영 수위가 선정되었다. 초기 펌프의 운영하는 것이 월류량을 저감할 수 있는 것으로 판단되며 이 후 펌프 운영 조건 변경을 하여도 월류 저감에 변화는 없는 것으로 나타났다. 내수침수 저감정도는 약 1%~2%로 산출되었으며, 하류지역에서 발생되는 월류량을 저감하는 정도이지만, 펌프의 운영적 관점에서 기계적 및 실무적 관점의 접근에 따른 효과적인 운영이라 판단된다. 향후, 펌프의 운영조건 등을 고려한다면, 펌프의 효율을 증대하고 내수침수를 저감하는데 도움이 되리라 판단된다.

Abstract A rain water pumping station is a structural countermeasure to inland flooding of domestic water generated in a urban watershed. In this study, the optimal operation water level of the pump with the minimum overflow was determined based on the opinions of the person in charge of the operation of the rain water pump station. A GA (Genetic Algorithm), which is an optimization technique, was used to estimate the optimal operation water level of the rain water pump station and was linked with SWMM (Ver.5.1) DLL, which is a rainfall-runoff model of an urban watershed. Considering the time required to maximize the efficiency of the pump, the optimal operating water level was estimated. As a result, the overall water level decreased at a lower operating water level than the existing water level. For most pumps, the lowest operating water level was selected for the operating range of each pump unit. The operation of the initial pump could reduce the amount of overflow, and there was no change in the overflow reduction, even after changing the operation condition of the pump. Internal water flooding reduction was calculated to be 1%~2%, and the overflow occurring in the downstream area was reduced. The operating point of the pump was judged to be an effective operation from a mechanical and practical point of view. A consideration of the operating conditions of the pump in future, will be helpful for improving the efficiency of the pump and to reducing inland flooding.

Keywords : Optimization, SWMM, GA, Operation water level, Inland Flood

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행 된 이공분야기초연구사업(생애 첫 연구사업)의 성과이며, 이에 감사드립니다. (NRF-2018R1C1B5046400)
*Corresponding Author : Eung-Seok Kim(Sunmoon Univ.)
Tel: +82-41-530-2325 email: hydrokes@Sunmoon.ac.kr
Received April 10, 2018 Revised (1st May 10, 2018, 2nd June 14, 2018)
Accepted July 6, 2018 Published July 31, 2018

1. 서론

최근 산업화 및 도시지역의 발전으로 인해 불투수성 면적이 증가하여 도시유출에 있어 유출량 증가 및 도달시간 단축 등 내수침수의 위험성을 가중시키고 있다. 이러한 내수침수를 방어하기 위해 구조적 방안으로 빗물펌프장이 설치되었으나 빗물펌프장의 설계빈도를 초과 강우가 발생함에 따라 도시지역 내수침수는 현저히 발생하고 있다. 또한, 구조적 설계변경은 막대한 예산과 인력, 시간이 소요된다. 따라서 내수침수를 방어하기 위한 수단으로 비구조적 방어를 고려한 내수침수를 저감하는 방안이 함께 고려되어야 한다고 판단된다.

내수침수를 저감하는 비구조적 대책으로는 빗물펌프장의 운영 수위를 조정함에 따라 내수침수를 저감하는 방법 등이 있다. 국내에서는 이러한 도시 지역의 우수관망도를 이용하여 최적화 기법을 적용함에 따라 내수침수 저감에 관한 연구가 수행된 바 있다. [1]은 유전자알고리즘을 이용하여 서울시 하계 배수분구의 우수관망도를 재구성함에 따라 유출구에서의 첨두유출량 효과를 분석하였으며, [2]는 첨두 유출량을 최소화하는 목적으로 강우특성별 최적 우수관망도에서의 유출 변화를 분석하였다. [3]은 내수침수 위험을 감소시키기 위하여 유출구 첨두유출량을 최소화하도록 유역의 경계를 설정하고 유출구 첨두유출량과 관망 시설 비용을 도싱에 고려한 최적의 해를 도출하였다. [4]는 유출수문곡선들 간의 중첩효과 제어를 통해 관거 내의 흐름 변화를 우수관망의 구성에 따라서 제어될 수 있는 목적함수로 다룸으로써 최적의 우수관거 설계는 우수관거의 내수침수 저감효과 최대화에 중점을 두고 최소월류량을 가지는 최적 우수관망을 결정하였다. [5]는 지하저류조 설치 시 시설 가능 개수에 따른 도시지하저류조 최적위치 및 규모 선정을 도시에 고려할 수 있는 최적화 모형을 개발하였다. [6]은 분산형 저류시설 하수관망 네트워크 시스템의 최적 운용을 위한 모델 예측 제어기법을 제안하였으며 입자군집 최적화 알고리즘을 이용한 모델 예측 제어기법을 바탕으로 제안된 제어기법의 사용여부에 따른 효과를 비교 분석하고, 이의 타당성을 검증하였다. [7]은 우수관거의 layout 결정이 최소비용 산출을 위한 경로 설정뿐만 아니라 하부 관거의 첨두유출량을 제어하는 내수침수 방재 목적에서의 layout 설정을 통해 맨홀간의 연결방향을 유전자알고리즘을 이용하여 분석하였다. [8]은 도시지역에서의 설계유량을 효율적이고 경제적인 단면 구성과 관망에 따른 우수배제 능력을 극대화시키기 최적화 기법으로 동적계획법의 특수한 방법인 이산미분형 동적계획법을 이용해 최적의 설계조건을 산정하였다. [9]는 관의 용량, 경사, 수위, 위험도, 회수비용 등과 같이 공사비용에 따른 최소비용을 목적함수로 위험도 분석을 통하여 최적화된 조건을 찾는 방법으로 모형을 개발하였다. 이처럼 최적화 기법 등을 이용하여 우수관망 시스템의 최적의 매개변수 및 내수침수저감에 관한 연구가 활발히 이루어져 왔다.

따라서 본 연구에서는 빗물펌프장의 최적운영수위를 결정하기 위해 최적화 기법의 하나인 GA(Genetic Algorithm)를 이용하였으며, 도시유역의 강우-유출 해석 모형인 SWMM(Storm Water Management Model)의 DLL과 연계하여 구성하였다. 유역에서 발생되는 월류량을 최소화하는 목적과 빗물펌프장 실무운영자의 의견이 반영된 제약조건을 적용함에 따라 기계적 무리를 줄이고 실무적 관점에서의 최적 운영수위를 제시하였다.

2. 최적운영수위 산출 방법

빗물펌프장의 최적 운영수위를 결정하기 위해 GA Process와 수리해석모듈로 구성하였다. 최적의 해를 결정하기 위한 반복과정을 최소화하기 위해 GA를 사용하였으며, 수리해석모듈은 수리·수문 해석을 위하여 미국환경보전국(EPA)에서 개발된 도시우수관망 해석 모형인 SWMM을 연계 구성하였다. Fig.1은 빗물펌프장 최적화 모형 설계과정을 나타내었다. GA Process에서는 빗물펌프장의 펌프 운영수위를 변화시켜 상류에서 발생되는 월류량을 합하게 된다.

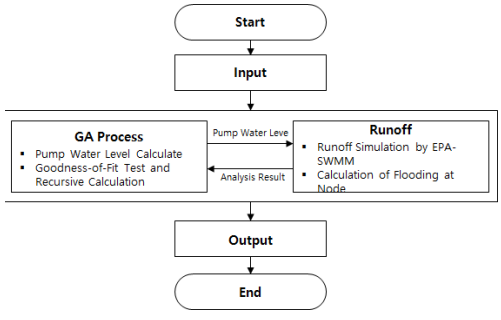

Fig. 1. Water Level Optimization Module Composition of Rain Water Pump Station

이때 발생되는 월류량을 최소로 하는 빗물펌프장 펌프 운영수위를 결정하게 된다. Fig. 2는 GA Process의 흐름도를 나타내었다. 여기서 빗물펌프장 펌프 운영수위를 결정하게 되며, GA 최적화 과정에서 종결조건에 충족 될 때까지 재생산 및 반복계산되어진다.

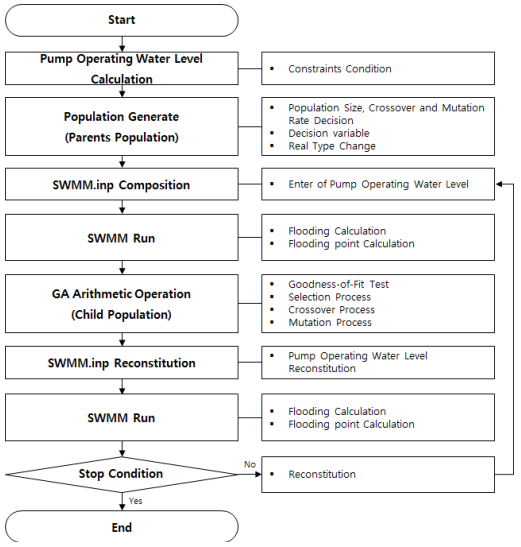

Fig. 2. GA Arithmetic Operation Process

빗물펌프장의 운영수위는 재생산 될 때마다 수정되어지며, 수정된 운영수위는 수리해석모듈로 입력되어 유출해석을 수행하게 된다. 유출해석시 각 절점에서 발생되는 월류량 및 월류발생지점을 산출하게 되며, 위의 반복적인 계산과정이 적합도 평가를 통해 만족하는 조건에 도달하면 최적화 과정을 종료하게 된다. 빗물펌프장 최적화 모형은 월류량을 최소로하는 목적함수를 가지며, 최소의 월류량을 가지는 운영수위를 최적의 운영수위로 결정하게 된다. 목적함수는 다음 식(1)과 같다.

$$\text{Minmize } f(x) = \sum_{i=1}^{n} V_{of_i} \qquad \text{식(1)}$$

여기서 i는 대상유역 절점을 의미하며, V_{of}는 절점에서 발생된 월류량을 의미한다.

연구목적에서 언급한 바와 같이 빗물펌프장의 펌프 운영수위를 변화하여 최소의 월류량을 가지는 최적의 펌프 운영수위를 결정하고자 한다.

본 연구에서는 다음과 같은 제약조건을 설정하였다. 빗물펌프장의 펌프는 유수지 수위에 따라 펌프의 가동여부가 결정되어 지기 때문에 식(2)와 같은 제약조건 설정하였다.

$$\text{Pump_n min} \le \text{Depth} \le \text{Pump_n max} \qquad \text{식(2)}$$

여기서 n은 각 펌프 호기를 의미하며, 각 펌프는 운영 수위 범위 가지게 된다. 또한, 첫 번째 펌프가 운영되고 다음 펌프가 바로 가동되면 유수지에서의 수위가 급격히 저하되어 펌프에 무리를 줄 수 있다. 따라서 대상유역의 일대에 위치하고 있는 빗물펌프장의 실무 운영자를 대상으로 설문조사를 수행하였으며, 각 빗물펌프장 실무 운영자의 의견을 반영하여 위와 같은 제약조건을 추가하였다. 즉, 펌프의 무리를 줄이는 최소의 운영 간격을 설정하였다. 또한, 분당 펌프의 켜짐과 꺼짐의 횟수를 확인함에 따라 펌프의 무리한 운영을 최소화 하고자 식(4)와 같은 제약조건을 설정하였다.

$$\text{Pump}_n - \text{Pump}_{n-1} \ge 0.05\text{m} \qquad \text{식(3)}$$

$$Minmize\ f(x) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} \text{Pump}_{ij} \qquad \text{식(4)}$$
$$(Count\,1\min of\ Pumpon/off)$$

3. 최적운영수위 산출 결과

3.1 대상유역 및 강우선정

연구유역으로 도림1배수분구에 해당하는 대림3빗물펌프장 배수유역을 선정하였다. 연구유역은 지난 2010년 9월 강우로 인해 침수가 발생한 지역으로 유역면적은 248.5ha이다.

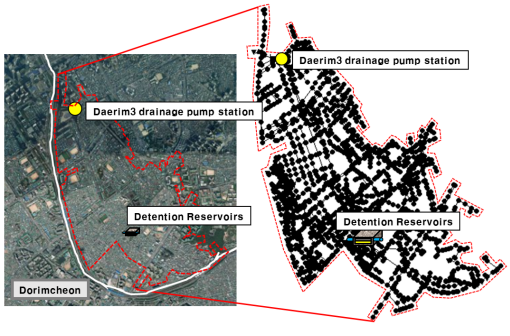

Fig. 3. Location of Daerim3 Stormwater Pumping Station

대상유역은 영등포구와 동작구의 경계에 위치하며, 유역 내에는 대림3, 대림2, 신대방간이 빗물펌프장 등 3개소의 빗물펌프장이 있다. 대상유역은 Fig. 3과 같이 대부분 아파트 및 주거공간이 밀집된 전형적인 도시유역이다. 본 연구에서는 서울시 확률강우량을 이용하였으며, 2년빈도부터 100년빈도 지속시간 60분 설계강우를 사용하였다. 대림3 유역의 도달시간은 약 30분~40분이기 때문에 지속시간 60분 설계강우를 사용하였으며, 대림3 빗물펌프장 보고서(Seoul City, 2010)에 따르면 Huff의 4분위중 Huff 2분위로 채택되어 설계되었기 때문에 Huff 2분위로 강우분포하여 사용하였다. 또한, 실제 대상유역에 피해를 유발한 2010년 9월 및 2011년 7월의 실강우사상을 적용하여 분석을 수행하였다.

3.2 최적화 기법을 통한 빗물펌프장 최적운영 수위 결정

본 연구에서는 GA 알고리즘을 이용하여 대림3빗물펌프장 배수분구 유역의 최적의 펌프 운영수위를 결정하였다. 대림3빗물펌프장의 경우 유수지의 L.W.L부터 H.W.L.까지 2.2m이고, 사용되는 펌프의 개수는 12개이다. 이를 바탕으로 모든 경우의 수를 고려할 경우 22^{12}(1.2855E+16)로 모든 경우의 수를 고려한 최적의 운영조건을 찾는데 어려움이 있어 최적화 기법 중 근삿값에 가까운 해답을 신속하게 찾아낼 수 있는 GA기법을 이용하여 빗물펌프장의 최적 운영수위를 산정하였다. 최적화 수행시 유역내의 월류량을 최소로하는 목적함수를 가지며, 대상유역이 포함되어 있는 도림천 유역의 빗물펌프장 실무진들을 대상으로 설문조사를 수행하여 제약조건을 설정하였다. 실무진의 의견에 따르면 펌프 운영이 극대화 되는데 까지 걸리는 시간 5분정도 걸린다고 한다. 따라서, 분단위 해석을 통해 5분미만의 펌프 운영 횟수를 확인하고 운영횟수가 가장 적은 펌프 수위를 결정하였다. 또한, 첫 번째 펌프가 운영되어지고 다음 펌프가 운영되기 위한 적정 운영간격은 0.05m이며, 이러한 설문의견을 반영하여 제약조건에 추가하였다.

최적의 펌프 운영수위 산출하기 위한 최소 월류량을 산출하는 과정을 Fig. 4와 같이 나타내었으며, 최적의 펌프 운영수위 및 이에 따른 월류특성을 Table 1 및 Box polt. 형태인 Fig. 5와 같이 나타내었다. 분석결과 고빈도인 80년 및 100년빈도로 갈수록 초기 펌프인 6호기의 운영수위가 낮게 산출됨을 확인 하였다. 이는 강우빈도가 증가할수록 총강우량은 커지고, 이에 따른 유수지로 유입되는 유입량이 증가함에 따라 운영수위를 낮게하여 펌프의 효율을 늘리기 위함이라 판단된다.

대부분의 펌프호기의 최적운영수위는 펌프운영범위의 가장 낮은 운영수위로 결정이 되었으며, 초기 운영을 기존 운영보다 낮게 운영함에 따라 월류량 감소를 확인하였다. 최적운영수위에 따른 월류특성을 분석한 결과 1.23%~2.51%의 저감효율을 보였다. 이러한 결과는 대상유역에 피해를 유발한 2010년 및 2011년 실강우 사상에서도 나타났으며, 실강우 사상 적용시 1.84%~2.51%의 저감효율을 보였다.

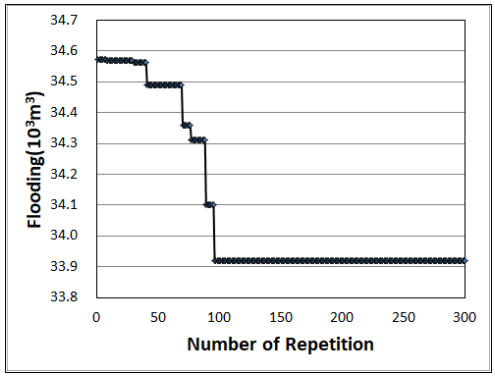

Fig. 4. Minimum Flood Volume Calculation Result using GA(2-year frequency)

Table 1. Optimization Operating Water Level Calculation Result of Pumps

Rainfall Distribution	Optimization Pump Operating Water Level												Flooding (10^3m^3) / Reduction rate(%)	No. of flood points
	No. 6	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 7	No 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12		
2yr.	0.41	0.50	0.71	0.91	1.10	1.30	1.52	1.63	1.78	1.95	2.05	2.10	33.92 (1.89%)	123
5yr.	0.41	0.50	0.71	0.92	1.12	1.30	1.52	1.63	1.78	1.95	2.05	2.10	38.73 (2.00%)	261
10yr.	0.38	0.51	0.71	0.91	1.12	1.30	1.52	1.63	1.78	1.91	2.03	2.10	33.90 (1.84%)	356
30yr.	0.33	0.50	0.71	0.91	1.13	1.30	1.50	1.63	1.72	1.91	2.03	2.10	53.33 (1.95%)	500
50yr.	0.38	0.50	0.70	0.90	1.10	1.30	1.50	1.62	1.75	1.90	2.00	2.10	66.10 (2.15%)	560
80yr.	0.33	0.50	0.70	0.90	1.10	1.30	1.50	1.62	1.75	1.90	2.00	2.10	132.55 (1.23%)	596
100yr.	0.33	0.50	0.71	0.90	1.11	1.30	1.52	1.63	1.78	1.90	2.01	2.10	148.02 (1.40%)	639
2010	0.33	0.50	0.71	0.90	1.10	1.30	1.50	1.62	1.78	1.90	2.05	2.10	41.35 (2.51%)	115
2011	0.38	0.50	0.71	0.90	1.10	1.30	1.50	1.63	1.72	1.90	2.03	2.10	56.55 (1.84%)	73

실무적 제약조건을 바탕으로 펌프의 운영 개선만으로는 내수침수 저감을 줄이는데 크게 기여하기는 어렵다고 판단된다. 그러나, 실제 빗물펌프장에서 근무하고 있는 실무자의 설문내용을 살펴보면 펌프장 운영 수위조정이 필요하다고 응답하였으며, 실무자의 의견이 반영된 제약조건을 고려하였기 때문에 기계적 및 실무적 관점에서 효과적인 운영이라 판단된다.

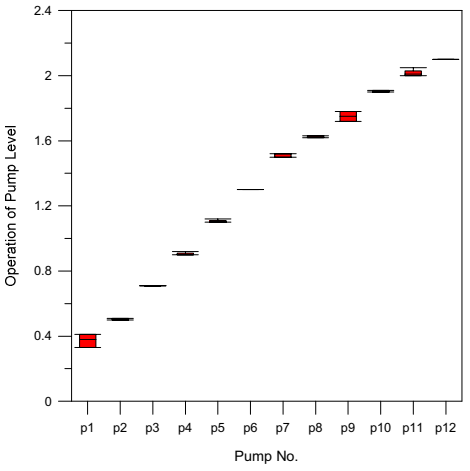

Fig. 5. Box Plot for Determining Pump Operation water level of Rain water Pump Station

4. 결론

최근 기후변화 및 도시화로 인한 도시유역의 침수위험은 증가하고 있으며, 이를 저감하기 위한 방법으로 도시유역 내 지하저류조 설치가 논의되고 있다. 이에 따라 도시유역에서의 구조적 방어 대책이 이루어지고 있으나 구조적 설계가 이루어짐에 따라 막대한 예산과 인력이 필요하며, 오랜 시간이 소요 된다. 따라서 내수침수를 방어하기 위한 수단으로 비구조적 방어가 함께 고려되어 내수침수를 저감해야 한단고 판단된다.

본 연구에서는 빗물펌프장의 최적의 운영수위를 결정하기 위해 최적화 기법의 하나인 GA(Genetic Algorithm)와 도시지역 유출해석 모형인 SWMM을 연계하였다. 최저의 월류량을 가지는 펌프의 운영수위를 결정하기 위해 빗물펌프장 실무 운영자의 조언을 참고하여 제약조건을 추가하였다.

설계강우 2년빈도부터 100년빈도, 실제 침수필해를 발생시킨 2010년 9월 및 2011년 7월 실강우를 이용하여 분석하였다. 분석 결과 기존의 운영수위보다 낮은 운영수위에서 월류량이 감소됨을 확인 할 수 있었다. 또한, 초기 펌프 1~6호기 운영수위에 따라 월류량이 저감되었으며 이 후 펌프 운영 조건 변경을 하여도 월류 저감에 변화는 없는 것으로 나타났다. 분석결과 1.23%~2.51%의 저감효율을 보였으며, 실무적 제약조건을 바탕으로 펌프의 무리한 가동을 줄임에 따라 월류량 저감효과는 미미하지만, 기계적 및 실무적 관점의 접근에 따른 효과적인 운영이라 판단된다. 또한, 내수침수의 발생은 유역 중상류의 침수원인이 빗물펌프장만에 의한 것이 아니기 때문에 향후 유역 중류에 위치하는 빗물저류조와의 연계를 통해 최적의 운영을 한다면 내수침수 저감에 큰 도움이 되리라 판단된다.

References

[1] J. H. Lee, Y. H., Song, D. J. Jo, “Determination of Optimal Locations of Urban Subsurface Storage considering SWMM Parameter Sensitivity”, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.,* Vol.13, No.4, pp.295-301, 2013.

[2] J. H. Lee, “Analysis of flow change in optimal sewer networks for rainfall characteristics”, *Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.12, No.4 pp.1976-1981, 2011.

[3] J. H. Lee, “Determination of Urban Watershed Boundary and Optimal Design of Sewer Networks using Multi-objective Optimal Technique”, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol.12, No.4, pp.303-307, 2012.

[4] J. R. Park, J. H. Lee, W. J. Choi, S. M. Jeong, “Analysis of Overflow Volume Reduction Effect by Sewer Networks Optimization in Urban”, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.,* Vol.11, No.6, pp.249-257, 2011.

[5] J. H. Lee, J. H. Kim, H. D. Jun, “An Optimal Sewer Layout Model to Reduce Urban Inundation”, *Korea Water Resources Association,* Vol.44, No.10, pp.249-257, 2011.

[6] H. W. Baek, J. N. Ryu, T. H. Kim, J. I. Oh, “Model Predictive Control for Distributed Storage Facilities and Sewer Network Systems via PSO”, *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems,* Vol.22, No.6, pp.722-728, 2012.

[7] Kim, J.H., Joo, J.G., Jun, H.D., Lee, J.H. (2009), A Study of Sewer Layout to Control a Outflow in Sewer Pipes, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.,* Vol.9, No.1, pp.1-7.

[8] S. H. Jang, S. W. Park, “Development of Optimal Design Simulation Model for Least Cost Urban Sewer System Considering Risk(Ⅰ)”, *Korea Water Resources Association,* Vol.38, No.12, pp.1021-1028, 2005.

[9] S. W. Park, S. H. Jang, “Development of Optimal Design Simulation Model for Least Cost Urban Sewer System Considering Risk(Ⅱ)”, *Korea Water Resources Association,* Vol.38, No.12, pp.1029-1037, 2005.

[10] Seoul City, “Report of basic and detailed design for improved pump station facilities capacity(Area 3):Daelim 3 Pump Station” 2010.

심 규 범(Kyu-Bum Sim) [정회원]

- 2011년 2월 : 선문대학교 토목공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 선문대학교 토목공학과 (공석석사)
- 2018년 2월 : 선문대학교 토목공학과 (공석박사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 박사 후 연구원

<관심분야>
수공학, 수자원

유 도 근(Do-Guen Yoo) [정회원]

- 2007년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2009년 2월 : 고려대학교 건축사회환경공학부 (공학석사)
- 2013년 2월 : 고려대학교 건축사회환경공학부 (공학박사)
- 2016년 5월 ~ 2017년 8월 : K-water융합연구원 선임연구원
- 2017년 9월 ~ 현재 : 수원대학교 건설환경에너지공학부(건설환경공학) 조교수

<관심분야>
수자원시스템, 상하수도 관망시스템, 최적화기법

김 응 석(Eung-Seok Kim) [정회원]

- 1995년 2월 : 동국대학교 토목공학과 (공학사)
- 1997년 2월 : 고려대학교 토목환경공학 (공학석사)
- 2002년 2월 : 고려대학교 토목환경공학 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 교수

<관심분야>
수자원시스템, 상하수도 관망시스템