

## 내배수시스템 실시간 운영 모형을 이용한 배수펌프장 운영기법 개발

### Development of a Pump Operation Rule in a Drainage Pump Station using a Real Time Control Model for Urban Drainage System

이 정 호\* / 이 양 재\*\* / 전 환 돈\*\*\* / 김 중 훈\*\*\*\*

Lee, Jung Ho / Lee, Yang Jae / Jun, Hwan Don / Kim, Joong Hoon

#### Abstract

An urban drainage system consists of two major systems : flood drainage facilities and operating practices. The facilities are composed of sewer networks, gates, and pumping stations and the operating practice consists of pump or gate operation. Then, a real time simulation system which is able to simulate urban runoff and the pump operation and to consider the backwater effect is required to operate efficiently the pump. With this system, the efficient pump operating rule can be developed to diminish the possible flood damage on urban areas. In this study, a real time simulation system was developed using the SWMM 5.0 DLL and Visual Basic 6.0 equipped with EXCEL. Also, for developing efficient pump operating Rules, two new Rules were suggested. The first Rule is designed to operate pumps considering the condition of sewer networks such as depths of each junction. The second is to discharge all the amount of inflow at each time step. Results obtained by those Rules were compared with one by the current pump operating Rule which is able to consider only the depth of the retard basin. The developed model was applied to Joonggok retard basin and verified their applicability.

**keywords** : real time control, pump operation Rule, urban drainage system, backwater effect

#### 요 지

일반적인 도시 내배수시스템은 시설물과 운영방법으로 구분된다. 시설물은 관거, 수문, 배수펌프장 등으로 구성되며 운영방법은 펌프 및 수문운영으로 구성된다. 이러한 내배수시스템에서 유역의 유출 및 펌프 운영을 실시간으로 모의하고 배수효과를 고려할 수 있는 운영 모형은 펌프를 효과적으로 운영하기 위하여 필요하며, 이러한 실시간 운영 모형을 통하여 도시유역의 침수 위험을 감소시키기 위한 효율적인 펌프 운영 기법의 개발이 가능하다. 본 연구에서는 SWMM 5.0 DLL과 Excel을 포함한 Visual Basic 6.0을 연계하여 실시간 운영 모형을 개발하였다. 또한, 효율적인 펌프 운영을 위한 두 개의 펌프 운영 기법을 제안하였다. 첫째는 각 맨홀의 수위를 통하여 현재 상황을 고려한 펌프의 운영이며, 둘째는 실시간으로 운영되는 각 시간단위별 유입량 전량을 배제하는 기법이다. 제안된 두 개의 기

- \* 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학과 박사과정  
Doctoral Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Eng., Korea Univ., Seoul, Korea  
(e-mail: jungho\_lee@korea.ac.kr)
- \*\* 서울시정개발연구원 디지털도시부 연구원  
Researcher, Dept. of Digital City, Seoul Development Institute
- \*\*\* 교신저자 · 한밭대학교 토목공학과 교수  
Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanbat National University, Deajeon, Korea
- \*\*\*\* 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학과 교수  
Professor, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Eng., Korea Univ., Seoul, Korea

법은 현재의 펌프장 운영 기법인 유수지 수위에 따른 펌프 운영을 모의한 결과와 비교하였으며 개발된 모형은 중극 배수분구에 적용되었다.

**핵심용어 :** 실시간운영, 펌프 운영 기법, 도시 내배수시스템, 배수효과

## 1. 서 론

도시 내배수시스템(Urban drainage system)은 일반적으로 관거, 배수문, 유수지, 배수펌프장 등으로 구성되며, 배수문 및 배수펌프장은 침수를 방지하기 위한 적절한 운영방법에 따라서 운영된다. 특히, 유수지와 함께 운영되는 배수펌프장은 일반적으로 유수지의 수위만으로 펌프를 운영하는데, 이러한 운영방법은 급격한 수위의 변화에 효율적으로 펌프가 운영되지 못하며 침수 가능성에 대한 높은 불확실성을 내포하는 단점을 가지고 있다.

최근 이러한 배수펌프장 운영상의 문제점을 해결하고자 하는 연구가 많이 이루어지고 있으나 구조적인 문제점을 해결하는데 편중되어 있으며 운영기법 등의 연구는 부족한 실정이다. 운영 기법에 대한 연구를 위해서는 강우-유출 해석을 바탕으로 유수지 및 배수펌프장으로 유입되는 유입수에 대한 수리·수문 분석이 이루어져야 하는데 기존의 도시유출모형들은 기 관측된 강우 자료를 바탕으로 결과의 검증 차원에서 이용되어지고 있는 반면 운영 기법의 마련을 위해서는 실시간으로 관측되는 강우에 대한 실시간의 유출 분석이 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 도시유출모형을 이용하여 내배수시스템의 실시간 유출 분석 및 펌프의 실시간 자동 운영이 가능한 내배수시스템 실시간 운영 모형을 개발하였다. 또한, 개발된 모형을 이용하여 유수지 및 빗물펌프장의 실시간 강우-수위-유출 관계 해석을 통하여 호우 발생 시 내수침수를 최대한 억제할 수 있는 펌프 운영 기법을 개발하였다.

본 연구에서 개발된 내배수시스템 실시간 운영모형은 유출 해석을 위하여 SWMM(Storm Water Management Model) 5.0을 이용하였으며 SWMM 5.0의 DLL(Dynamic Link Library)을 연계하여 실시간으로 변화하는 강우에 대하여 유출 분석이 가능하도록 구성되었다. 또한, 유수지 유입구에서의 배수효과(Backwater effect)를 고려하여 주어진 가동 조건하에 펌프의 자동 운영이 가능하도록 구성되었다. 또한, 개발된 모형을 이용하여 펌프의 운영에 있어서 유수지 수위에 따른 운영, 내배수시스템 상황을 고려한 운영 및 시점별 유입량을 고려한 운영 등 세 가지 모의 운영을 실

시함으로써 내수침수에 가장 효과적인 펌프 운영 기법을 제안하였다.

유수지 및 배수펌프장을 포함한 내배수시설의 운영에 대한 연구는 지속적으로 이루어져왔다. 이원환 등(1992)은 내수침수 방지를 위한 배수펌프 가동 수위의 결정에 관한 연구에서 기존의 배수펌프장의 펌프가동수위에 대하여 연구하였으며, 심재현 등(1992)은 기존의 배수펌프장의 시설용량으로 적절히 홍수에 대처하기 위한 자기 조정능력을 가진 펌프제어 기법을 개발하였다. 또한, 윤세희와 이종태(1995)은 SWMM 모형을 이용하여 petri net diagram과 종합지표를 이용하여 펌프의 효율적 조작모형을 개발하였으며 길경익 등(2005)은 ArcView와 Hec-HMS 모형을 결합하여 홍수유출수문 곡선의 재현을 통한 도시소유역 배수펌프장의 운영을 개선하는 방안을 제시하였다. Yagi and Shiba(1999)는 Fuzzy 모형과 GA(Genetic Algorithm) 모형을 결합하여 강우량과 유수지의 수위자료를 입력 자료로 배수펌프장의 펌프 토출량을 결정하는 연구를 수행하였다. Yuri et al.(2002)은 기존의 상수관망에 주로 적용되던 신뢰도에 대한 지표를 내배수시스템에 적용하여 펌프의 고장에 따른 영향을 고려한 신뢰도를 분석하였으며, Martine et al.(2007)은 도시 내배수시스템의 관리 방안을 제시하였다. Dubrovin et al.(2002)은 Fuzzy 모형을 이용하여 저수지의 실시간 운영에 대한 연구를 진행하였으며 Zacharof et al.(2003)은 CSOs(Combined Sewer Overflows) 배출과 관련한 하수관거의 실시간 운영을 위하여 SYNOPSIS 모형을 개발하였다. Duchesne et al.(2001)은 내배수시스템의 실시간 운영에서 포괄적 예측 제어를 위한 모형을 제안하였고 Schütze et al.(2004)은 현재의 내배수시스템과 하수처리장 및 방류수역까지 고려한 실시간 운영에 관한 연구들을 종합하였으며 Schroeder and Pawlovsky(2005)는 베를린의 하수관거 시스템을 기반으로 내배수시설의 실시간 운영을 위하여 필요한 사항에 대하여 연구하였다. 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.

따라서 본 연구에서 개발된 내배수시스템 실시간 운영모형은 효율적인 내배수시스템의 운영 기법 마련에 필요한 기본적인 분석 모형을 제공하며, 본 모형을 이용한 모의 운영을 통하여 합리적이고 효율적인 펌프 운영 기법이 제안되었다.

## 2. 내배수시스템 실시간 운영모형

본 연구에서는 실시간으로 변화하는 강우에 대하여 유수지 및 배수펌프장으로 유입되는 유입량을 실시간으로 모의하기 위하여 USEPA의 SWMM 5.0 모형을 이용하였으며, SWMM 5.0의 DLL을 연계하여 배수펌프장의 펌프 제어가 실시간으로 가능한 운영모형을 개발하였다.

### 2.1 SWMM 5.0

1971년 Metcalf and Eddy사에서 개발된 SWMM 모형은 kinematic wave equation과 Dynamic equation 등의 다양한 수리해석 모듈을 포함하고 유역의 유출 해석 및 하수관거내의 흐름에 대한 홍수추적 등이 가능하다. 또한 수공구조물에 의한 월류, 배수, 압력류 등에 대한 계산이 가능하며 최근 USEPA에서는 원도우시스템을 기반으로 한 SWMM 5.0과 함께 이것의 엔진이라고 할 수 있는 DLL 및 GUI(Graphical User Interface) 파일을 함께 제공하여 다른 프로그램 개발도구와의 연계가 가능하다. 특히, SWMM 모형은 St. Venant Equation을 통한 관로내 흐름추적을 통하여 배수효과를 고려할 수 있으므로 유수지 수위에 따른 유입량의 변화를 모의할 수 있다.

맨홀(node)과 관로(link)로 구성된 배수시스템의 흐름 추적에 대한 기본 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V\frac{\partial A}{\partial t} - V^2\frac{\partial A}{\partial x} + gA\frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

흐름추적의 기본방정식인 Eq. (1)은 맨홀에서의 연속 방정식을 나타내는 Eq. (2)를 관로에서의 운동량 방정식인 Eq. (3)을 이용함으로써 유도된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA\frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (3)$$

본 연구에서는 프로그램 개발도구로서 비주얼 베이직(visual basic)을 사용하였고, 입력파일을 제공하여 SWMM 5.0 DLL을 통하여 생성된 결과파일에서 유출 수문곡선을 추출하는 형태로 구성하였다.

### 2.2 실시간 운영모형의 구성

본 연구에서 개발된 실시간 운영모형은 비주얼 베이직을 통하여 엑셀(excel)과 SWMM 5.0 DLL을 연계하였으며 각 구성요소들 간의 관계는 Fig. 1과 같다.

본 모형에서는 시간별 강우자료가 입력되어 유수지 유입량 및 유수지 수위를 모의하며 배수효과를 고려하여 유수지 수위에 따른 유입량의 모의 과정을 반복한다. 따라서 본 모형에서는 임의시간(t=n)의 수위를 기준으로 1단계 진행된 시간(t=n+1)에서의 유입량 및 관거, 절점의 흐름 상태를 모의하며 현행 배수펌프장의 강수량 및 유수지 수위가 분단위로 측정되기 때문에 이들 자료를 이용하여 분단위의 모의가 이루어진다. 임의시간(t=n)에서의 유수지 유입량은 현재(t=n) 유수지의 수위와 현재까지(t=0~n)까지 내린 기존의 강수량에 따라 그 값이 변하게 되며 배수위가 고려될 경우 t=n+1에서의 유입량은 t=n에서의 유수지 수위에 따라 변하게 된다. 즉, 임의시간(t=n)에서의 계산 결과는 전시간대(t=n-1)에서 모의된 결과를 통하여 유도되며 다음시간대(t=n+1)의 모의를 위한 기초자료로 제공된다.

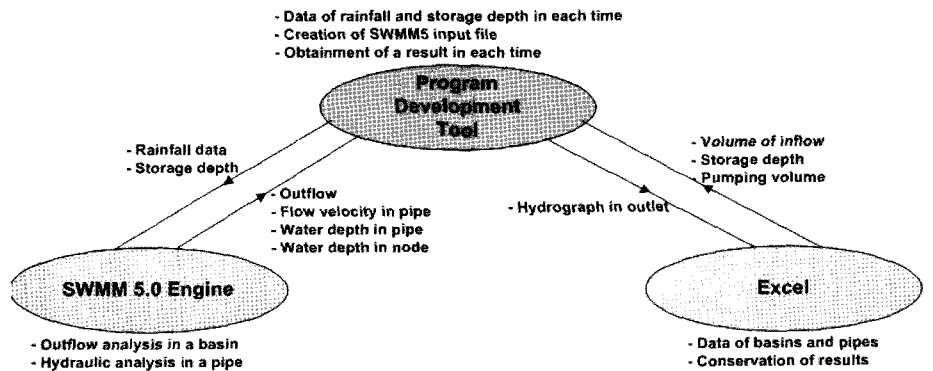


Fig. 1. Structure of a developed model

Table 1. Factors of input, output, computation in a developed model (t=n)

Input	Output of SWMM	Computation data
Rainfall (Rn) (t=0~n) Storage depth (Dn)	Hydrograph Output of each link Output of each node	Cumulative inflow (t=1~n+1) Storage (t=n+1) Pumpage (t=n+1) Amount of freefall (t=n+1)

위의 Table 1은 임의시간(t=n)에서의 입출력 구성요소를 나타내며, Fig. 2는 이때의 유수지 유입수문곡선을 개략적으로 보여준다.

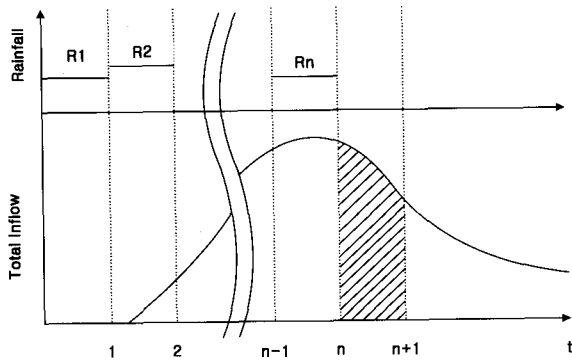


Fig. 2. Hydrograph at t=n

이때, t=n+1의 유수지 수위는 t=n의 수위를 고려한 유입수문곡선에서 t=n~n+1의 유입수문곡선의 누가 유입량에 대하여 Eqs. (4)~(7)을 통하여 산정 된다.

$$\begin{aligned}
 & \text{누가 유입량}_{(t=n+1)} & (4) \\
 & = \text{누가 유입량}_{(t=n)} + \text{유입수문곡선 면적} \\
 & = \text{Cum. Inflow}_{(t=n)} + \int_n^{n+1} \text{Total inflow} dt \\
 & = \text{Cum. Inflow}_{(t=n+1)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{저류량}_{(t=n+1)} & (5) \\
 & = \text{저류량}_{(t=n)} + \text{저류량 증가량} \\
 & = \text{Volume}_{(t=n)} + \Delta(\text{Volume}) \\
 & = \text{Volume}_{(t=n+1)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{저류량 증가량} & (6) \\
 & = \text{유입량} - \text{자연배수량} - \text{펌프트출량} \\
 & = \int_n^{n+1} \text{Total inflow} dt \\
 & \quad - \int_n^{n+1} \text{Grav. flow} dt - \int_n^{n+1} \text{Pumped flow} dt \\
 & = \Delta(\text{Volume})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{유수지 수위}_{(t=n+1)} & (7) \\
 & = f(\text{유수지 저류량}_{(t=n+1)}) \\
 & = f(\text{Volume}_{(t=n+1)}) = D_{(n+1)}
 \end{aligned}$$

### 3. 펌프 운영 기법 (Pump Operation Rule)

배수펌프장의 운영은 배수문의 개폐를 통한 자연배수량의 조절과 배수펌프장의 펌프 운영 조건에 따르는 펌프의 운영을 통해 이루어진다. 특히, 자연배수방식은 외수위의 조건에 영향을 받기 때문에 대부분의 배수펌프장은 펌프를 통한 강제배제 방식이 유수지의 수위를 조절하는 역할을 한다. 기존의 배수펌프장의 운영은 유수지의 기준 수위에 따라서 운영되도록 설정되어 있으며 상황에 따라서 운영자의 정성적인 경험에 의하여 운영되기도 한다. 따라서 보다 실제적인 배수펌프장의 정량적 운영을 위해서는 배수펌프장의 운영조건을 고려하여 실시간 운영 모형을 통한 효율적인 펌프 운영 기법이 마련되어야 한다.

본 연구에서는 개발된 실시간 운영 모형을 이용하여 세 가지 운영 조건 즉, 유수지 수위에 따른 운영(Rule 1), 내배수시스템의 상황을 고려한 운영(Rule 2) 및 시점별 유입량을 고려한 운영(Rule 3) 등에 대하여 고려하였다.

#### 3.1 유수지 수위에 따른 운영 (Rule 1)

일반적인 배수펌프장의 펌프 운영은 다음의 Fig. 3과 같이 유수지 혹은 집수정의 수위에 따라서 펌프가 가동되도록 구성되어있다. 펌프의 순차적 가동에 대한 기준은 수리·수문학적 분석 및 현장 운영자의 경험을 바탕으로 설정되며 실제 운영시 상류 관거의 상태나 유역의 상황, 현재의 내배수시스템 상황 등에 대한 가변적인 대처는 이루어지지 않고 있다.

유수지의 수위를 기준으로 하는 펌프의 운영은 가동기준이 명확하나 유수지 수위 변화의 경향이나 강우의 상태를 고려하지 못한다. 특히, 상류지역의 침수 발생을 확대시키는 유수지 내 배수효과에 대한 고려가 없는 고정된 펌프 가동 기준은 다양한 호우 사상의 발생 및 유역 상황에 능동적으로 대처하기에 무리가 있다. 본 연

구에서는 개발된 실시간 운영모형을 이용한 효율적인 펌프 운영 기법 마련을 위하여 현행 일반적인 펌프 운영 기법에 대하여 우선적으로 모의하였다.

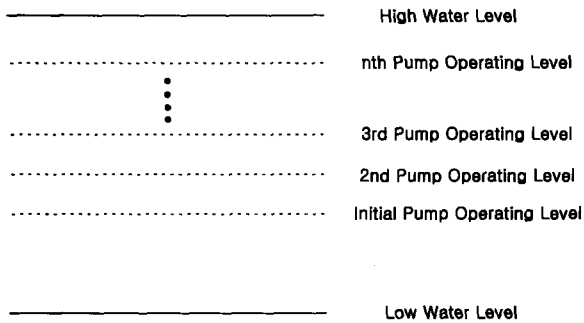


Fig. 3. Pump operation Rule controlled according to storage depth

### 3.2 내배수시스템의 상황을 고려한 운영 (Rule 2)

본 모형에서 이용된 SWMM은 각 맨홀에서의 수위와 시간별 침수량을 제공한다. 따라서 보다 안정적인 내배수시스템 운영을 위해서는 기존의 우수지 수위에 따른 운영에 비하여 각 맨홀의 수위백터를 고려한 운영이 보다 실질적인 안정성을 마련할 것으로 기대된다. 이를 고려하여 펌프의 운영 기법을 제안하였으며, 이것은 기존의 우수지 수위에 따른 펌프 운영에 우수지 수위 백터의 증가 혹은 감소 여부에 따라 펌프의 추가 가동여부를 결정하는 운영 조건이다.

수위백터는 전 시간단계( $t=n-1$ )의 수위에 비해 현 시간단계( $t=n$ )의 수위가 증가한 경우를 의미하며 이것은 내배수시스템내의 지점별 침수 위험도가 증가하는 것을 의미한다. 따라서 내배수시스템의 운영 목적에 부합되게 침수피해를 최소화하기 위해서는 가능한 자연배수조건과 같은 조건을 만들어주어야 한다. 본 연구에서는 맨홀에서의 과부하 발생시점을 내배수시스템의 침수위험도가 증가하는 시점으로 고려하여 과부하 발생시점부

터는 우수지의 수위를 초기 펌프가동수위와 같은 형태로 유지하도록 펌프를 운영하였다. 맨홀에서의 과부하란 다음의 Fig. 4와 같이 절점과 연결된 관거의 유량이 가득 차거나 수위가 절점에서의 연결된 관로 중 관 상단고보다 높고 지반고보다 낮은 상태를 의미한다 (Schmitt et al., 2004).

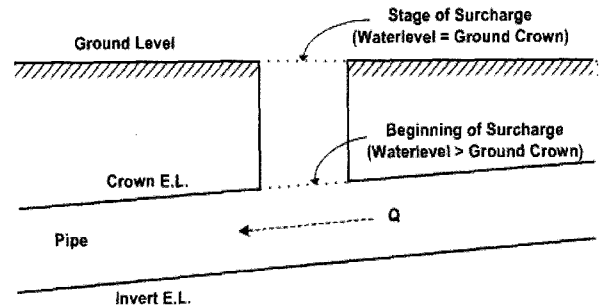


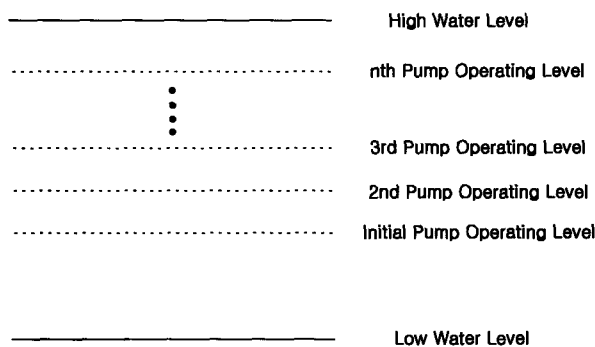
Fig. 4. Surchage in drainage system (Schmitt et al., 2004)

Fig. 5(a) 및 Fig. 5(b)는 평상시 및 과부하 발생 시의 펌프 운영 조건을 나타내며, Fig. 6은 펌프 제어 흐름도를 나타낸다.

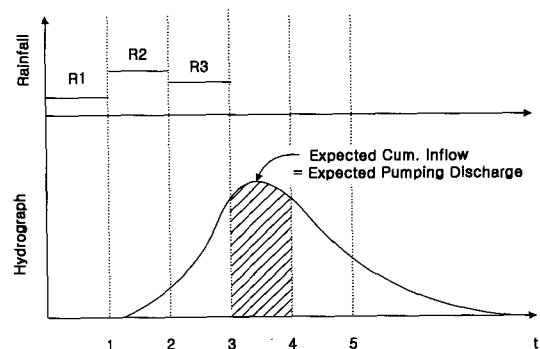
여기서, 과부하 발생시점 이후에 유입되는 유량에 대해서는 우수지의 수위를 낮추어서 배수효과의 영향을 받지 않도록 우수지로 유입되는 유량을 전량 배제하고 초기 가동수위 이상으로 올라간 우수지의 수위를 초기 가동수위로 낮추도록 모의하였다. 따라서 과부하가 발생하지 않는 경우는 우수지의 수위에 따른 운영을 실시하고 과부하가 발생한 경우는 유입유량을 전량 배제하는 운영조건을 바탕으로 모의하였다.

### 3.3 시점별 유입량을 고려한 운영 (Rule 3)

내배수시스템에서의 내수침수는 관거내 통수능 부족으로 인하여 일정유량 이상의 유출이 발생하지 않거나



(a) Normal pump operation



(b) Pump operation for surcharge

Fig. 5. Pump operation Rule considering conditions of drainage system

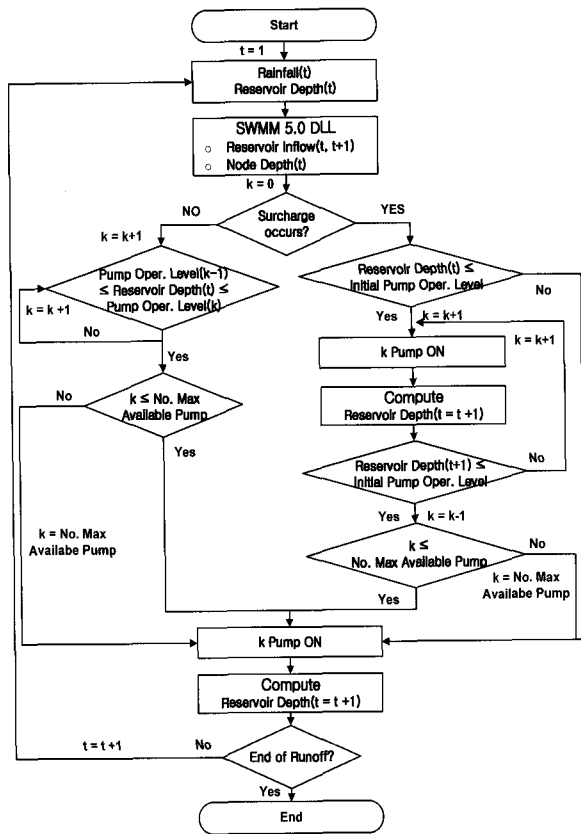


Fig. 6. Flowchart of pump operation (Rule 2)

유수지의 수위가 상승하면서 배수효과에 따른 유출량 감소에 의하여 발생한다. 통수능 부족 관거의 경우 개량 사업을 통하여 통수능 부족 등의 문제점이 있는 관거를 개량함으로써 해결할 수 있으며, 유수지 수위 상승에 따른 침수는 하류단의 수위를 최소화시켜 배수효과를 최소화시켜야만 한다.

본 연구에서 개발한 실시간 운영모형은 현재의 상황을 고려하여 다음시간 단계의 유입량 산정이 가능하므로 이를 바탕으로 내배수시스템을 운영하기 위해서는 유수지의 유입량을 전량 배제하는 것이 가장 안전한 방법이다. 따라서 배수효과에 의한 유수지 유입유량을 감소시키기 위해서 유수지의 수위가 최초 펌프가동수위 이상이 될 경우 실시간으로 산정된 유입량을 전량 배제시키도록 시점별 유입량을 고려하여 모의 운영하였다.

시점별 유입량을 고려한 운영 조건은 기존의 유수지 수위에 따른 펌프 운영에 비하여 다음 시간단계까지의 유입량을 배제시키기 때문에 실질적인 유수지 수위는 초기 가동수위와 크게 차이가 발생하지 않으며, 앞서 언급된 운영 조건들에 비하여 배수효과에 영향을 받지 않도록 유수지 수위를 낮게 운영할 수 있다.

Fig. 7은 시점별 유입량을 고려한 펌프 제어 흐름을 나타낸다.

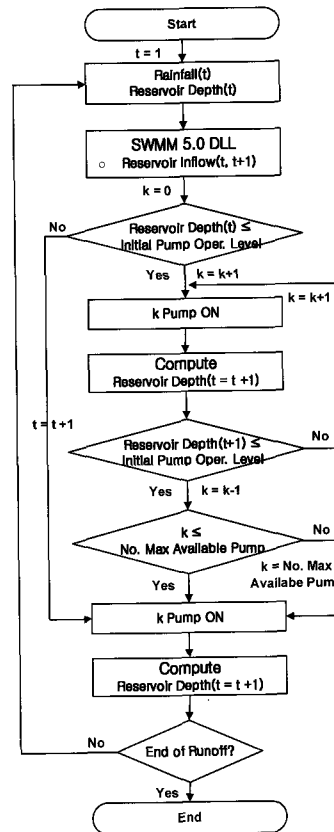


Fig. 7. Flowchart of pump operation (Rule 3)

#### 4. 모형의 적용 및 결과

본 연구에서는 실시간으로 변화하는 강우에 대하여 유수지 및 배수펌프장에서의 강우-수위-유출 관계를 배수효과를 고려하여 실시간으로 모의하고 펌프 운영 조건들에 따른 자동 운영을 모의하였다.

##### 4.1 대상유역 현황 및 적용 강우

본 연구에서 적용된 유역은 서울시 광진구에 위치한 중곡 배수펌프장 유역으로서 4개의 유입 관거와 8개의 펌프, 1개의 유수지로 구성되어있다.

다음의 Fig. 8은 중곡 배수펌프장의 유수지 유입관거를 나타낸다. 유입토구는 4개가 존재하며 4개의 유입관거 모두 관저고는 10m로 펌프의 초기 가동수위 11.8m와 H.W.L(High Water Level) 13m에 비해 비교적 낮게 설치되어 있으므로 배수효과에 영향을 많이 받는다.

중곡 배수펌프장 유수지의 유효수심은 1.2m로 현행 펌프의 운영은 유효수심을 7개의 구간으로 순차적으로 가동되도록 되어있다. 다음의 Fig. 9는 유수지의 수위에 따른 중곡 배수펌프장의 펌프 운영 조건으로 이것은 유수지 수위에 따른 운영(Rule 1) 기준이 되며 내배수시스템의 상황을 고려한 운영(Rule 2)과 시점별 유입량을 고려한 운영(Rule 3)에서의 평시 운영 기준이 된다.

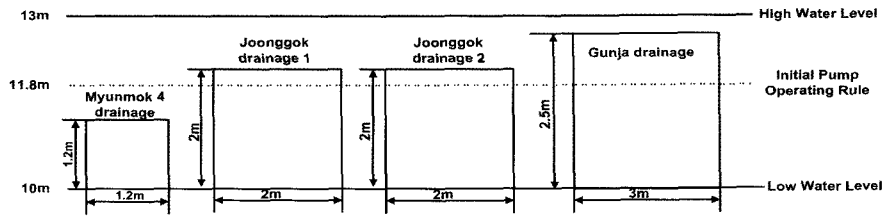


Fig. 8. Structure of inflow pipes in Joonggok drainage pump station

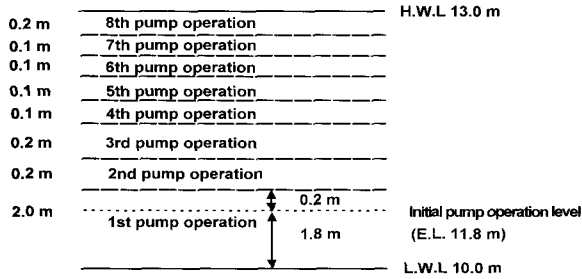


Fig. 9. Pump operation Rule in Joonggok pump station

대상유역에 대한 강우조건으로는 재현기간 5년, 10년 및 20년에 대하여 강우지속기간 60분, 120분 및 180분을 각각 적용하여 강우의 분포형태는 Huff 1, 2, 3, 4분위를 적용하였다. 또한, 본 모형에 적용된 강우는 발생빈도에 따르는 확률강우량을 사용하였으나 현재의 시점

을 기준으로 현재까지의 강우만을 알고 있다고 가정하여 현재까지의 강우와 이에 따르는 수위기록만을 입력하여 시간별로 유수지 상황에 맞는 유입량을 모의하였다. 확률강우량은 1960년부터 2004년까지의 44개년 강우자료에 대한 분석을 통하여 산정되었으며 다음의 Table 2는 재현기간별 지속기간에 따른 확률강우량 산정 결과를 나타낸다.

Fig. 10은 대상유역의 관망 모식도를 나타내며 Table 3은 펌프장 시설개요를 나타낸다.

#### 4.2 적용 결과

개발된 실시간 운영모형을 적용 유역에 대하여 시간대별로 모의한 결과 배수효과의 영향을 고려한 유수지 유입수문곡선이 산정되었으며 펌프 운영 조건별 침수지역 및 침수량, 과부하 발생 관거 및 발생 지속기간, 시

Table 2. Probability rainfalls estimated in durations of each frequency

Duration	Frequency	5 years	10 years	20 years
60 min.		63.17 mm	75.28 mm	86.87 mm
120 min.		95.04 mm	114.42 mm	133.16 mm
180 min.		108.00 mm	127.14 mm	145.53 mm

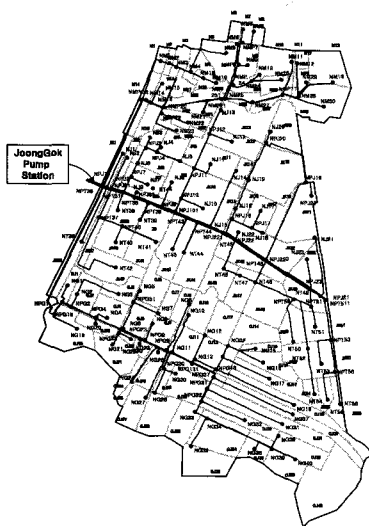


Fig. 10. Sewer system

Table 3. Overview about facilities of Joonggok pump station

Basin area		200.4ha
Reservoir	Control depth	H.W.L = 13.00m L.W.L = 10.00m
	Area	2,037m <sup>2</sup>
	Storage	7,175m <sup>3</sup>
Pump	Total capacity	2,330m <sup>3</sup> /min(total)
	Capacity of each pump	D1200×202m <sup>3</sup> /min×400HP×5 D1650×440m <sup>3</sup> /min×850HP×3
Pipe	Inflow pipe	1.2m×1.2m×1, 2.0m×2.0m×2 1.3m×3.0m×2, 3.0m×2.5m×1
	Outflow pipe	1.3m×3.0m×2

간별 펌프 가동 대수 및 펌프의 시동·정지 횟수가 산출되었다. 또한 강우의 재현기간, 지속시간 및 분포형태를 달리하여 모의한 결과 배수효과의 영향이 가장 잘 나타난 강우사상은 10년 빈도 120분 지속시간의 Huff 4분위 확률강우량이었다. 이 경우 우수지 유입구에서의 침투 유량은 Rule 1 적용 시 46.75 cms, Rule 2 적용 시 48.21 cms, Rule 3 적용시 48.13 cms로 Rule 1에 따른 펌프 운영 시 우수지의 수위 상승에 따른 배수효과가 가장 크게 작용하였음을 알 수 있다.

Fig. 11 및 Fig. 12는 모의 시간대별 우수지 수위 및 펌프 가동 대수를 나타낸다.

우수지의 수위는 Rule 1에 따라 운영한 경우 가장 높게 운영되었고 Rule 3의 경우 초기 가동수위와 거의 유사하게 운영되었다. Rule 2에 의하여 운영된 경우는 유입의 초기에는 Rule 1과 유사하게 운영되었으나 유입이 집중되는 침투유량 부근에서는 Rule 3과 유사하게 운영되었다. 또한, 우수지의 수위가 높게 운영되는 경우 배수효과의 영향을 많이 받는 것으로 모의되었다.

다음의 Table 4는 10년 빈도 강우에 대한 침수 발생 모의 결과를 나타낸다.

113개의 지점(node)로 구성된 전체 유역에 대하여 세 가지 운영 조건에 따라 펌프 가동을 모의한 결과 Rule 2와 Rule 3의 경우 현행 배수펌프장 운영 기준에 해당

하는 Rule 1보다 내수침수 발생이 감소하는 결과를 나타냈다.

또한, Table 5에 나타나는 바와 같이 과부하 발생 관거의 개수 및 발생 시간은 강우의 시간분포가 후반부에 집중될수록 Rule 2와 Rule 3의 결과는 거의 동일하였다. 특히 Huff 4분위의 경우 과부하 발생 관거의 개수는 각 강우 지속시간별로 Rule 1의 28개, 49개 및 51개에 비하여 Rule 2 및 Rule 3는 20개, 34개 및 37개로 약 28~31% 감소하였다.

Table 6은 모의 운영에 따른 펌프의 시동 및 정지 횟수를 나타내며 Rule 2에 의하여 운영하는 경우 일반적으로 펌프의 가동 정지 횟수가 적게 산정되었다. 펌프의 시동과 정지가 잦을수록 펌프의 안정적인 운영이 어려우며 고장의 위험성이 높아진다. 또한, 펌프의 시동 즉시 100% 효율을 발휘하지 않기 때문에 펌프의 가동 횟수는 가능한 범위 내에서 적게 운영되는 것이 좋다.

일반적으로 펌프의 운영에 따라 우수지의 수위는 직접적인 영향을 받는다. 우수지의 수위는 내배수시스템에 배수효과로 영향을 미치고, 배수효과는 유출을 저해하는 역할을 수행한다. 따라서 우수지의 수위를 낮게 운영하는 것이 내수침수의 방지 측면에서는 유리하다. 그러나 펌프의 가동측면에서는 안정성을 확보하기 위한 최소수심이 있으므로 이를 고려하여야 한다. 본 연구에

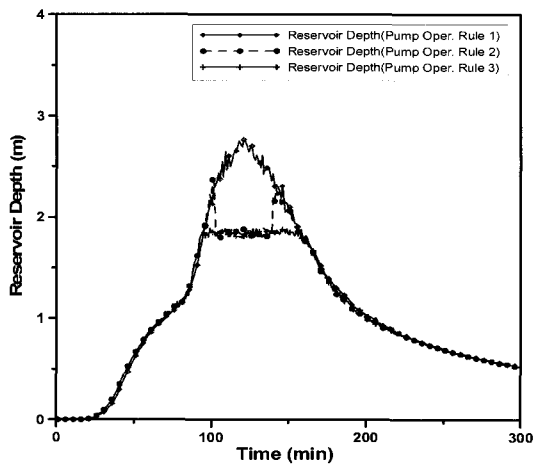


Fig. 11. Reservoir depth

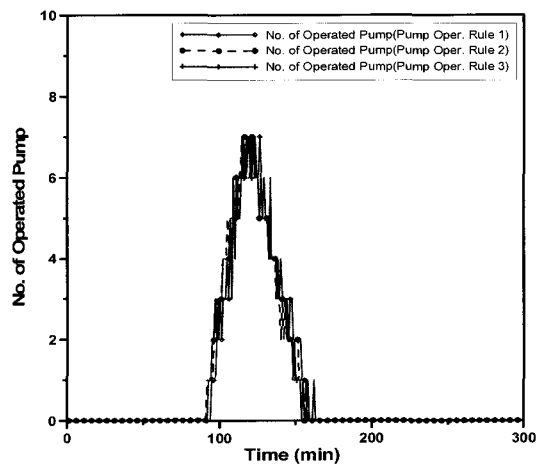


Fig. 12. Pump operation report

Table 4. Simulation results about inundation (10years)

Rainfall Duration	Rainfall Distribution	Number of inundation nodes (/113)			Amount of inundation (ha-mm)			Duration of inundation (min)		
		Rule1	Rule2	Rule3	Rule1	Rule2	Rule3	Rule1	Rule2	Rule3
60 min.	Huff 4	5	5	5	7.16	5.02	4.74	24	20	20
120 min.	Huff 3	1	0	0	10.38	0	0	5	0	0
	Huff 4	5	3	3	154.89	47.38	43.84	50	32	31
180 min.	Huff 4	5	5	5	218.21	71.36	68.22	50	43	42



Table 5. Simulation results about insufficient carrying capacity of pipe

Rainfall duration	Rainfall distribution	Insufficient carrying capacity					
		Number of pipe			Duration (min)		
		Rule 1	Rule 2	Rule 3	Rule 1	Rule 2	Rule 3
60 min.	Huff 1	7	7	6	165	162	139
	Huff 2	9	9	9	216	207	201
	Huff 3	17	13	13	243	229	229
	Huff 4	28	20	20	287	254	254
120 min.	Huff 1	7	7	7	273	260	250
	Huff 2	15	9	9	419	376	371
	Huff 3	22	13	13	620	475	471
	Huff 4	49	34	34	900	660	656
180 min.	Huff 1	13	9	9	392	361	356
	Huff 2	19	10	10	602	521	510
	Huff 3	27	15	15	826	640	633
	Huff 4	51	37	37	1302	979	974

Table 6. Number of pump operating

Rainfall distribution	Rainfall duration								
	60 min.			120 min.			180 min.		
	Rule1	Rule2	Rule3	Rule1	Rule2	Rule3	Rule1	Rule2	Rule3
Huff 1	12	15	22	20	29	38	44	35	37
Huff 2	23	13	21	36	22	29	53	37	40
Huff 3	16	11	16	28	19	23	31	30	32
Huff 4	15	13	15	22	20	20	27	27	24

서 개발된 모형을 실제 유역에 모의 적용한 결과 내배수시스템의 상황을 고려하여 펌프를 운영하는 Rule 2와 시점별 유입량을 고려한 Rule 3에 의해 운영하는 경우 모두 기존의 펌프 운영 방법(Rule 1)에 비하여 우수지의 수위가 비교적 낮게 운영되었으며 침수피해 역시 작게 산정되었다. 그러나 Rule 2에 따라 운영하는 경우 Rule 3에 비하여 침수 및 과부하의 지감 정도는 비슷한 반면 펌프의 가동 정지 횟수가 적게 산정되는 것으로 나타났다.

### 5. 결 론

내배수시스템의 운영에서 정량적으로 활용 가능한 자료는 시간별 강우량, 시간별 유입량, 시간별 우수지 수위 그리고 도달시간 이내의 예측 가능한 유입량 등이다. 내배수시스템의 운영자 측면에서 가장 필요로 하는 자료는 현재 우수지의 유입량과 우수지의 수위 및 앞으로 발생할 유입량이다. 그러나 현재의 유입량은 유입관거에 유량계를 설치하여 획득 가능하지만 앞으로의 유입량은 현재의 우수지 상황 및 유역상황에 영향을 받기 때문에 시시각각 변하는 문제점이 있다. 또한, 기존의 내배수시스템에 관한 연구에서는 도시유출해석모형을 이용하여 시간별 유입량을 산정하고, 산정된 유입량을

기준으로 우수지 및 내배수시스템을 운영하였다. 그러나 우수지로의 유입량은 우수지와 연계된 배수문과 배수펌프장의 운영조건에 따라 변하는 우수지의 수위에 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 실시간으로 변하는 우수지의 수위를 고려하여 산정된 유입량을 바탕으로 우수지 및 배수펌프장을 운영하는 실시간 운영 모형을 개발하였다.

본 연구에서는 기존의 연구에서 사용되지 않았던 SWMM 5.0 DLL을 이용하여 visual basic과 연계한 실시간 운영모형을 개발하였으며, 우수지의 수위에 따른 배수효과의 영향을 고려하여 실시간으로 변하는 우수지의 상황을 갱신함으로써 펌프 운영조건에 따른 자동 제어가 가능하도록 구성되었다. 펌프의 운영 조건으로는 현행 일반적인 배수펌프장 운영 조건인 우수지 수위에 따른 운영 조건(Rule 1)과 본 연구에서 제안된 내배수시스템의 상황을 종합적으로 고려하여 상류 절점에서의 과부하 발생 여부에 따른 운영(Rule 2) 및 우수지 초기 가동수위 이상 시 발생하는 유입량을 전량 배제하는 운영 조건(Rule 3)을 모의하여 비교 검토하였다.

모의 결과 펌프의 운영 조건에 따라서 침수지역 및 침수량을 제어할 수 있었으며 펌프의 운영 조건은 우수지의 수위에 직접적인 영향을 미치지므로 우수지 수위를

낮게 운영할수록 침수지역 및 침수 발생량이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 우수지의 초기 가동수위 이상의 수위 발생 시 유입량을 전량 배제하는 경우(Rule 3)는 펌프의 가동이 빈번한 반면 내배수시스템의 상황을 종합적으로 고려한 운영 조건(Rule 2)은 안정성과 합리적인 측면 모두를 만족하는 효율적인 운영 방법으로 모의되었다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

길경익, 한종욱, 김구현 (2005). "도시 소유역 배수펌프장 운영개선 방안 연구(1)-GIS 기반 수문모형에 의한 홍수유출수문곡선의 재현." **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제21권, 제6호, pp. 682-686.

심재현, 조원철, 이원환 (1992). "자기 조정력을 가진 퍼지 제어기법에 의한 우수배제펌프의 적응제어" **한국수자원학회 수공학연구발표회논문집**, pp. 291-299.

윤세의, 이종태 (1995). "우수지 배수펌프 운영조작 모형의 개발" **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제28권, 제6호, pp. 203-215.

이원환, 조원철, 심재현 (1992). "퍼지제어기법을 사용한 우수배제 펌프의 조작기법 개발" **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제12권, 제3호, pp. 107-114.

Duchesne, S., Mailhot, A., Emeric D. and Villeneuve, J.P. (2001). "Mathematical modeling of sewers under surcharge for real time control of combined sewer overflows" *Urban Water*, Vol 3, No. 4, pp. 241-252.

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.

Martin, C., Ruperd, Y. and Legret, M., (2007). "Urban stormwater drainage mangement: The development of a multicriteria decision aid approach for best management practicies" *European Journal of Operational research*, Vol. 181, No. 1, pp. 338-349.

Schütze, M., Alberto, C., Hubert, C., Wolfgang, S. and Vanrolleghem, P.A. (2004). "Real Time Control of Urban Wastewater Systems-Where do we stand today?" *Journal of Hydrology*, Vol. 299, No. 3, pp. 335-348.

Schmitt, T.G., Thomas, M. and Ettrich, N. (2004). "Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems" *Journal of Hydrology*, Vol. 299, No. 4, pp. 300-311.

Schroeder, K. and Pawlowsky, E. (2005). "Current state and development of the real-time control of th Berlin sewage system" *Water Science and Technology*, Vol. 52, No. 12, pp. 181-187.

Yagi, S. and Shiba, S. (1999). "Application of genetic algorithms and fuzzy control to a combined sewer pumping station" *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 9, pp. 217-224.

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.

Zacharof, A.I., Schütze, M. and Butler, D. (2003). "A methodology for assessing the operational potential of the urban wastewater system using integrated modelling" *Water Science and Technology : Water Supply*, Vol. 3, No. 1, pp. 271-277.

(논문번호:07-99/접수:2007.09.27/심사완료:2007.10.23)