

## 유수지 배수펌프 운영조작 모형의 개발

### A Study on the Development of the Operation Models for Storm Water Pumps in Detention Pond

윤 세 의\* · 이 종 태\*  
Yoon, Sei Eui · Lee, Jong Tae

---

#### Abstract

Operation models for storm water pumps in detention pond were developed in order to reduce the damage by inundation in urbanized area. The return periods (10, 20, 30 years) of rainfall were selected to estimate inflow discharge to detention ponds. Inflow hydrographs of detention ponds were derived by using the SWMM, and Petri net diagrams were selected to analyze the pump actions. Safety and efficiency of pumps and detention ponds were estimated by penalty index. In order to verify the models, the models were applied to three selected detention ponds in Seoul area. In numerical experimental results, the developed model 3 is more effective in inland flooding prevention than the existing one, and may be used to design and evaluate detention ponds with real time data of rainfall.

---

#### 요 지

본 연구는 도시유역에서 내수에 의한 침수를 경감시키기 위하여 유수지 및 빗물펌프장을 운영함에 있어 배수펌프를 효율적으로 조작할 수 있는 모형을 개발, 제시하였다. 유출량을 산정하기 위하여 설계강우의 재현기간을 10, 20, 30년으로 선정하였으며, 유수지로 유입되는 유출수문곡선은 SWMM모형을 이용하여 구하였고, 펌프의 동작확인을 위하여 페트리네트도 (Petri net diagrams)를 사용하였다. 또한 종합평가지표를 이용하여 펌프의 안정성과 효율성을 평가하였으며, 서울 시내 3개의 유수지에 모형을 적용하여 모형의 적용성을 확인하였다. 설계강우와 실적강우에 대한 수치실험 결과 본 연구에서 제시한 모형 중 모형 3은 기존의 배수펌프 조작모형보다 내수방재 측면에서 우수하였으며, 실시간 펌프운영조작에도 효과적으로 사용될 수 있다고 판단된다.

---

\* 경기대학교 토목공학과 교수

## 1. 서 론

도시화 현상이 심화되기 이전에는 외수의 범람에 의한 농촌형 홍수가 대부분이었으나, 최근 인구집중과 산업의 발달로 도시지역이 하천연변 저지대에 까지 확대되면서 내수에 의한 침수피해 문제가 심각하게 대두되고 있다. 이에 따라 해당 지역 자치단체에서는 내수침수를 방지하기 위해 우수지를 신설하고 보강하여 왔으나, 도시지역의 지가가 급격히 상승하여 우수지 부지를 확대시켜 저류용량을 확장하는 방법에는 막대한 재원이 소요되기 때문에 기존의 우수지에 배수펌프를 증설함으로써 우수지의 수위를 조절하게 되는 경우가 많다.

이에 따라 우수지의 저류공간의 효율화와 배수펌프의 적절한 운영의 중요성이 증대되고 있다. 이는 동일한 설계조건을 가지고 설계된 우수지에 있어서도 배수펌프의 운영조작 방법에 따라서 내수피해의 정도가 증감될 수 있기 때문이다. 다시 말하자면 우수지내 저류공간은 펌프의 적절한 토출조건에 따라서 조절될 수 있으므로 우수지에 의한 치수효과를 극대화시킬 수 있다는 것이다. 우수지에서 발생되고 있는 문제점은 우수지 및 펌프의 용량이 과소 설계됨으로 인한 구조적인 문제와 우수지 시스템 관리운영으로 인한 비구조적 문제로 구분할 수 있으며, 기존의 우수지 배수펌프장에서는 전자보다 후자가 중점적으로 연구되어야 할 과제로 생각된다.

펌프운영기준은 수리·수문학적 모형을 이용하여 우수 유입량을 예측하고 이에 대비한 적정 배수펌프 운전 기준이 설정되어 있어야 하나, 현재까지도 많은 제약조건 때문에 대부분 펌프장에서는 종사원이 수위, 강우의 상태 및 과거의 펌프 운전경험으로 펌프정의 수위를 가능한 낮게 억제하는 경험적인 운영을 하고 있는 실정이다. 그러나 강우조건에 따라 우수지에 설치된 펌프를 가동하여 우수지의 허용수위를 초과시키지 말아야 하고, 우수지의 수위변동을 허용하므로써 배수펌프의 가동, 정지빈도를 가능한 한 억제하여 펌프의 수명을 길게 하고, 운전원의 작업량을 감소시키는 펌프운전 방법이 가장 적절한 방법이라고 생각된다. 즉, 우수 유입상

황에 두 가지의 상반되는 목표인 안정성과 효율성을 잘 조화시킨 펌프운영 조작방법이 필요하다. 따라서 종래의 경험적인 펌프운영조작 수준에서 탈피하기 위하여 자동제어방식에 기초를 둔 제어모형의 도입이 필요하다. 현재 서울시 관내 모든 배수펌프는 펌프가동수위를 지정하고 유입량이 증가하여 지정수위에 도달하게 되면 모든 펌프를 동시에 가동시켜서 최대펌프트출량에 도달하였다가 유입량이 감소하여 수위가 다시 지정수위에 도달하면 모든 펌프를 중단시키는 알고리즘으로 설계되고 있다. 이는 지정수위를 하향 조정할수록 안정성은 증대되지만, 적정한 지정수위를 설정하기 어렵고 갑작스러운 수위 상승에 대처할 수 없고, 펌프 및 우수지의 효율성을 저하시킨다. 최근에는 우수지내의 수심을 여러 개의 구간으로 구분하여 수위가 증가함에 따라서 펌프가동대수를 선형적으로 증가시키다가 수위의 감소에 따라 펌프 가동대수를 다시 선형적으로 감소시키는 방법이 펌프장 설계에 사용되었다('87 수해백서, 1988 : '90 수해백서, 1992). 그러나 실제 배수펌프의 조작은 우수지 내의 수위를 기준으로 하여 펌프장에 배치된 조작자의 경험에 크게 의존하고 있으며(이원환 1991, 서울특별시 1991), 배수펌프 운영조작에 관한 합리적인 설계기준이 아직은 미흡한 실정이다. 현재까지 우리나라에서 발표된 우수지의 계획 및 설계에 관한 연구로는 고재웅(1988), 이종태 등(1988, 1991, 1992), 최성열 등(1992), 서울특별시(1991, 1993) 등이 있다. 우수지의 배수펌프 조작기법은 심재현(1992), 이원환 등(1992 a, b)에 의하여 발표된 바 있다. 이 논문에서 유출수문곡선을 구하기 위하여 ILLUDAS모형이 사용되었으며, 퍼지제어기법이 배수펌프 운영조작에 응용되었는데, 이 기법을 배수펌프 조작에 도입하기 위하여서는 많은 경험적 자료를 필요로 한다. Seki 등(1986)은 유입유량 계산에서는 RRL모형을 사용하고, 배수펌프의 운영방법에 PN도(Petri Net Diagram) (Peterson 1981, Murata 1989)와 종합평가지표를 적용하였다. Kodate와 Seki (1987)는 펌프대수 변경회수를 최소화하는 알고리즘을 배수펌프조작 설계에 적용하였다. 이 논문에서는 배수펌프 조작방법을 일반화하지는 못하고 우수지별로 제약조

건을 주고 있다. 국내에서는 우수지의 배수펌프의 관리·운영에 관한 연구가 매우 미흡하며 그에 관한 기초적 자료가 충분히 정리되어 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 서울지역을 중심으로 우수지 및 배수펌프장에 관한 현황과 운영실태를 조사하고, 우수지로 유입되는 유입유량을 예측하는데 비교적 합리적이라고 알려진 SWMM(Huber와 Dickinson, 1988)모형을 사용하였으며, PN도와 종합평가지표를 이용하여 안정성과 효율성을 동시에 고려할 수 있는 배수펌프 운영조작모형을 제시하여 도시화 지역내에서의 내수침수에 의한 피해를 감소시키는 데 그 목적이 있다.

## 2. 우수지 현황과 유입 수문곡선

### 2.1 우수지 현황

서울 시내의 우수지 및 배수펌프장의 수는 1993년을 기준으로 총 66개소로 펌프조작기준의 척도는 대부분 수위에 의존하고 있다. 66개소의 총 유역면적은 15,404 ha, 저수용량은 4,177,633m<sup>3</sup>, 물리세대수는 339,285, 물리인구는 1,515,756명에 달한다. 최근 도시화 현상으로 수리 수문학적 특성이 변화되므로 인한 문제가 있다고 판단되어 기존 우수지의 가동 기준수위를 변경하거나(뚝도, 옥수, 신정, 도림3 등), 펌프용량을 확충(한남, 옥수, 군자, 마포, 신정, 신도림, 신구로, 도림3 등)하고, 우수지를 준설하여 저류용량을 확충(옥수, 구로1, 구로2 등)하였다. 우수지 및 배수펌프장의 문제점

을 요약하면 아래와 같다(서울특별시, 1993).

- 1) 우수지 및 펌프장의 설계기준의 이론적 근거가 약하다.
- 2) 우수지 및 펌프장의 용량이 부족하다.
- 3) 배수펌프의 합리적인 운영방안이 확립되어 있지 않다.
- 4) 규모가 큰 펌프가 설치되어 고장발생시 급격히 토출량이 감소한다.
- 5) 펌프간의 흡입구 간격이 좁아 와류에 대한 위험이 있다.
- 6) 퇴사로 인한 바닥표고가 상승되었다.
- 7) 우수지 만수위가 주거지역의 표고와 같거나 높은 곳이 있다.
- 8) 비홍수기시 우수지에서 심한 악취가 발생된다.
- 9) 우수지 내로 부유물이 유입되어 펌프토출능력을 저하시킨다.
- 10) 우수지를 복개한 경우 우수지 관리에 어려움이 커진다.

본 연구에서는 배수유역면적과 유역형상을 고려하여 서울시내의 3개 유역을 선정하였다. 이들의 제원은 표 1과 같다.(서울특별시, 1993)

### 2.2 유입수문곡선

연구대상의 우수지로 유입하는 우수량을 산정하기 위하여 설계강우량을 10년, 20년, 30년의 3가지 재현기간을 선택하였다. 확률강우강도식은 서병하 등(1989)이 발표한 식을 사용하였으며, 이를 표로 나타내면 다음과 같다.

표 1. 대상 우수지 및 펌프장의 제원

우수지명	유역면적 (ha)	펌프규모 (HP×대수)	저류용량 (m <sup>3</sup> )	우수지면적 (m <sup>2</sup> )	최대펌프 토출량 (m <sup>3</sup> /min)
마 포	298.5	450×3 1,000×4	72,542	24,000	1,750
탄 천	525.6	650×1 600×3 850×4	26,100	87,000	1,992
망 원	182.3	650×3 550×4	162,000	54,000	1,340

표 2. 재현기간별 확률강우강도식

재현기간 (년)	10	20	30	비 고	
계 수					
c	651.1	753.8	811.8	$I = \frac{c}{T^e + f}$	I: 강우강도식(mm/hr) T: 강우지속시간 (min) c, e, f: 계수
e	0.5	0.5	0.5		
f	1.014	1.023	1.016		

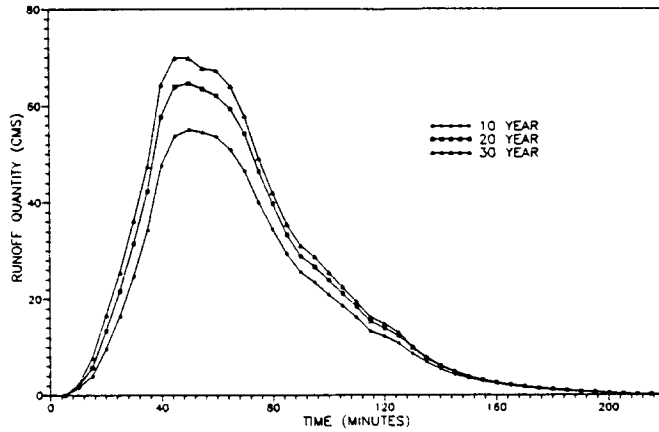


그림 1. 연구대상 유수지의 유입수문곡선 (마포)

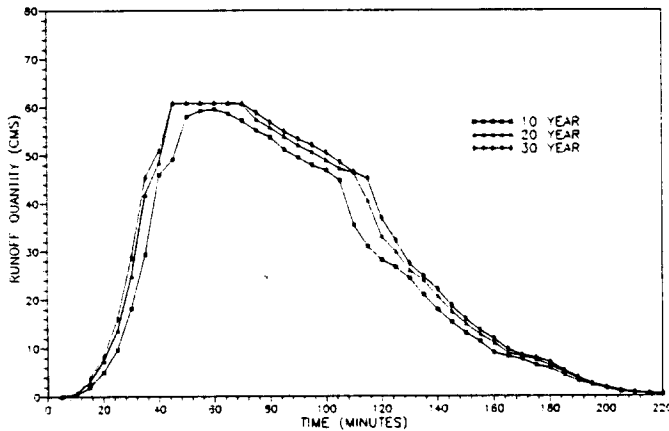


그림 2. 연구대상 유수지의 유입수문곡선 (탄천)

일반적으로 유수지 설계에 사용되고 있는 지속시간 120분의 호우사상을 해당 지역의 강우분포기준으로 설정하였으며, 설계강우량의 분포는 서울지방에 적합하다고 알려진 Huff의 제2분위를 선정하였

다.

또한 유출모형은 수리학적으로 다른 도시유출모형보다 비교적 수리학적으로 정교한 것으로 알려져 있는 SWMM(Storm Water Management

Model) 모형을 사용하였다.

SWMM에서 표면유출량은 RUNOFF BLOCK으로 관거내 흐름추적은 EXTRAN BLOCK을 이용하였다. SWMM모형의 기본개념과 적용에 관하여서는 이종태 등(1992, 1994)에 의하여 소개된 바 있다. 재현기간별 계획강우로 인하여 우수지로 유입되는 유입수문곡선을 SWMM모형을 사용하여 계산한 결과를 마포와 탄천 유역의 경우에 대하여 나타내면 그림 1과 그림 2과 같다. 그림 2에서 탄천 지역이 재현기간 20년과 재현기간 30년에 대한 침투유량이 거의 같게 나타나는 것은 하수관거의 용량이 부족하여 상류지역에서 이미 국부적인 침수가 발생한다는 것을 의미한다.

### 3. 기본가정 및 평가지표

본 연구에서는 배수펌프 조작모형의 안정성과 효율성을 동시에 고려할 수 있는 종합평가지표를 도입하는 새로운 배수펌프운영 모형을 개발하고 기존 모형들과의 특성을 비교·분석하였다. 우수배제펌프는 아래와 같은 조건으로 운영된다고 가정하였다.

- 1) 펌프는 용량이 다른 여러 대가 설치되어 있다.
- 2) 펌프정에는 수위계가 설치되어 있다.
- 3) 우수지로의 유입량은 계속되지 않는다.
- 4) 펌프토출량은 작동대수가 변화함에 따라서 조정된다.
- 5) 펌프의 작동정지 명령은 자동제어 장치를 이용하여 전달할 수 있다.

펌프조작 방법을 비교할 때, 평가지표는 여러 가지가 고려될 수도 있으나, 본 연구에서는 다음과 같은 세 가지 지표를 이용하였다.

- 1) 지표 A : 펌프정 상한 수위 초과 회수
- 2) 지표 B : 펌프운전 변경대수의 총계
- 3) 지표 C : 연산 주기마다의 펌프운전 대수의 총계

지표 A는 수십 년에 한번밖에 발생하지 않을 강우사상을 제외할 때 한가지 펌프운전법이 가능하게 된다. 즉, 지표 A는 안정성을 고려하여 0이 되어야 한 가지의 펌프조작법으로 채택한다. 지표 A가

0이 아니면서 펌프를 가동하는 경우인 비상시에는 주위여건이 허락하는 한 펌프는 최대토출량으로 가동한다. 지표 B는 펌프변경대수의 총계이며, 이는 연산주기별의 변경대수를 시뮬레이션 시간에 걸쳐서 모두 가산한 값이다. 이 지표는 강우분포에 따라 크게 좌우되기 때문에 절대치보다 모형들 사이의 상대치가 중요하며 작은 값이 바람직하다. 지표 C는 펌프가동한 총대수이므로 펌프에 의해 토출된 총유량과 소비전력에 직접 비례한다. 이 값 역시 모형 상호간의 상대치에 의미가 있으며 작을 수록 좋으나 지표 B보다는 그 중요도가 낮다고 볼 수 있다. 따라서 세 가지 지표의 중요도의 순서는 지표 A, B, C가 되며 모두가 작은 값을 나타낼 수록 바람직한 운영이므로 되므로 일종의 벌점(penalty)으로 파악할 수 있다.

즉, 종합평가지수 T는 다음과 같이 표시되며 이 값이 작을 수록 바람직한 펌프운영이 된다.

$$T = xA + yB + zC \quad (1)$$

여기서, x, y, z는 각각 A, B, C의 가중치이다.

본 연구에서는 x는 10,000, y는 10, z는 1로 가정하였다. 종합평가지표가 작은 값이 되는 펌프조작 방법을 선정하는 것이 유리하다. 펌프조작 방법이 내장된 자동제어기로부터 종합평가지표가 작은 방법을 선택하도록 설계하면, 이에 따라서 자동제어기는 선택된 펌프조작 방법에 따라 펌프토출량을 계산하게 되며, 필요에 따라 펌프의 작동·정지 명령을 내린다.

## 4. 배수펌프운영 모형의 개발

### 4.1 펌프작동의 도식화

펌프조작모형 중 펌프의 작동 또는 정지결정이 복잡한 경우에는 페트리네트 도 (Petri Net Diagram)를 이용하여 펌프의 동작을 확인하면 편리하다. PN 도는 복잡한 시스템에도 자연스럽고 간단한 방법으로 시스템의 동시성, 비동시성, 논리적 선행관계, 구조적 내부 연관 등을 모델링 할 수 있을 뿐만 아니라 계층적, 구조적 성분분석도 가능한

강력한 모델링 도구이다. 본 연구에서 이용한 PN 도는 표준구조(standard structure)로서 장소 P(place), 천이 T(transition), 입력 I(input), 출력 O(output)으로 구성되고 이를 식으로 표시하면 식 (2)와 같다.

$$PN = (P, T, I, O) \quad (2)$$

여기서, PN은 페트리네트 도이고, P는 장소의 집합으로 원으로 표시되고, T는 천이의 집합으로 막대나 박스 형태로 표시되고, I는 장소에서 천이로 향하는 아크(arc)들의 입력함수이고, O는 천이에서 장소로 향하는 아크들의 출력함수이다.

장소는 천이가 일어나기 위한 조건, 시스템의 작동상태 등을 나타내고, 천이는 수행되는 시작과 종료, 또는 상태를 변화시키는 사건 등을 나타낸다. 이들은 서로 방향성을 가진 아크로 연결된다. 예를 들면 “수위가 제1영역에 있다가 펌프를 가동하여 수위가 제2영역으로 변화된다”를 장소와 천이로 표시하면 표 3과 같다.

표 3. 장소와 천이의 예

장 소	천 이	장 소
수위 제1영역	펌프 가동	수위 제2영역

#### 4.2 펌프 운영모형

본 연구에서는 현재 국내에서 사용되고 있는 펌프 운영모형과 이를 보완한 모형들의 기본개념에 대하여 기술하면 다음과 같다.

##### (1) 모형 1

현재 국내에서 많이 사용되고 있는 배수펌프 조작방법으로 유수지 유효수심을 여러 개의 구간으로 구분하여 수위가 증가하면서 펌프가동대수를 선형적으로 증가시키다가 수위의 감소에 따라 펌프 가동대수를 선형적으로 감소시키는 모형이다. 초기 펌프가동수위와 펌프가 모두 가동되는 수위를 낮게 책정하면 할수록 높은 안정성을 얻을 수 있으나, 이들을 너무 낮게 책정하면 유수지의 효율성에 문제가 있기 때문에 적절한 펌프가동 수위를 결정하

기가 어렵다.

##### (2) 모형 2

기존 선형 펌프조작방법을 개선하기 위하여 수문 곡선이 상승할 때는 유입량을 전량 배제할 수 있도록 펌프를 조작하고, 수문곡선의 하강시에는 기존의 펌프운영방법에 따르는 모형이다.

##### (3) 모형 3

모형 4와 더불어 PN도와 종합평가지표의 개념을 도입한 모형이다. 배수펌프가 3대인 유수지의 예를 들어 펌프 가동의 조합을 PN도로 표시하면 그림 3과 같다. 그림 3에서 장소(place)는 16개이며, 천이(transition)의 수는 26개 이다. 그림 3에서 장소의 설명은 표 4와 같다. 이러한 동작확인이 끝나면 프로그램을 작성하고 프로그램이 완성되면 모의과정에서는 주어진 입력자료를 이용하여 펌프 운영을 평가하게 된다. 각각의 펌프 용량을 계산하고 1개의 펌프가 담당하는 유수지 수위역을 계산한다. 즉, 펌프가 n개이면 분할 수위구역의 수는 n+1개가 된다. 각각의 수위에 펌프를 가동할 수 있는 모든 가능성을 고려하여 펌프토출량을 계산한다. 이를 일반화시키기 위하여 진법의 개념을 이용하였다. 즉, n개의 펌프일 때, n+1진법에서 발생될 수 있는 모든 숫자를 계산하여, 각각의 수위에 진법에서 발생된 숫자를 펌프가동대수로 가정하였다. 가동대수가 결정되면 유수지내의 홍수추적을 실시하여, 홍수추적 결과 유수지 수위를 초과하는 경우는 벌점이 크므로 제외시키고 벌점이 가장 작은 경우 즉 경제성과 안정성이 크다고 판단되는 펌프 가동조건만을 출력한다. 이를 흐름도로 표시하면 그림 4와 같으며, 여기서 j는 펌프작동의 한가지 경우이다.

이 모형은 유입량을 예측할 수 있어야 사용 가능하며, 예측된 유입량 형태에 따라서 종합평가지표가 가장 작은 펌프조작 방법을 찾아낸다. 이 모형은 실시간 유입수문 곡선이 계산 또는 추정되면 그 유입량을 가장 합리적으로 배제시킬 수 있는 펌프 가동조건을 추정할 수 있어서 내수 침수방지에 효율성이 크다. 즉, 예측된 유입량을 펌프로 배제할 경우 많은 펌프조작 방법이 가능하게 되며, 이 중

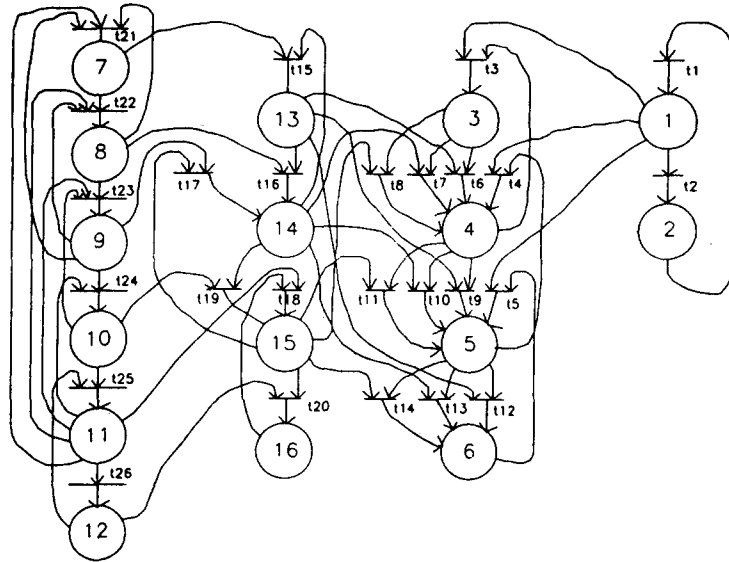


그림 3. 펌프작동의 PN 도

표 4. 장소의 설명

장소번호	내 용	장소번호	내 용
1	강 우	9	제2펌프 가동
2	무 강 우	10	제2펌프 중지
3	제1수위 구역	11	제1펌프 가동
4	제2수위 구역	12	제1펌프 중지
5	제3수위 구역	13	펌프 3대 운전
6	제4수위 구역	14	펌프 2대 운전
7	제3펌프 가동	15	펌프 1대 운전
8	제3펌프 중지	16	펌프 0대 운전

에서 종합평가지표가 가장 작은 방법을 선택할 수 있어서, 안정성 뿐만 아니라 효율성도 동시에 고려한 모형이다.

#### (4) 모형 4

이 모형에서는 펌프운전대수의 변경을 감소시키기 위하여 수위변화를 안정성이 허락되는 범위에서 억제시킨다. 수위변화를 억제시키기 위하여서는 각각의 연산주기시간마다 유입량과 펌프토출량을 같게 하면 되지만, 일반적으로 펌프토출량을 유입량과 항상 같게 놓고 수위변화를 계산할 수는 없다. 연산주기 동안에 최대펌프토출량이 허용하는 범위

에서 유입량에 가장 가까운 펌프토출량을 구하게 된다. 따라서 수위변동은 유입량과 펌프토출량의 차이로 발생되며, 연산주기내에 수위 수정분에 대한 고려가 필요하다. 펌프토출량은 유입량과 수위 수정분의 합으로 한다. 수위의 허용변동 범위를 수면에서부터 위로 제1상위역, 제2상위역, 제2하위역, 제1하위역으로 구분하였다. 여기서 수위 수정은 중간수위(제2상위역, 제2하위역)에서는 필요없다고 가정하고, 1주기 전과 비교하여 펌프가동대수의 증가 혹은 감소는 수위가 제1상위역과 제1하위역에 있을 때만으로도 제한한다. 펌프대수를 3대로 가정하고 이를 PN도로 표시하면 그림 5와

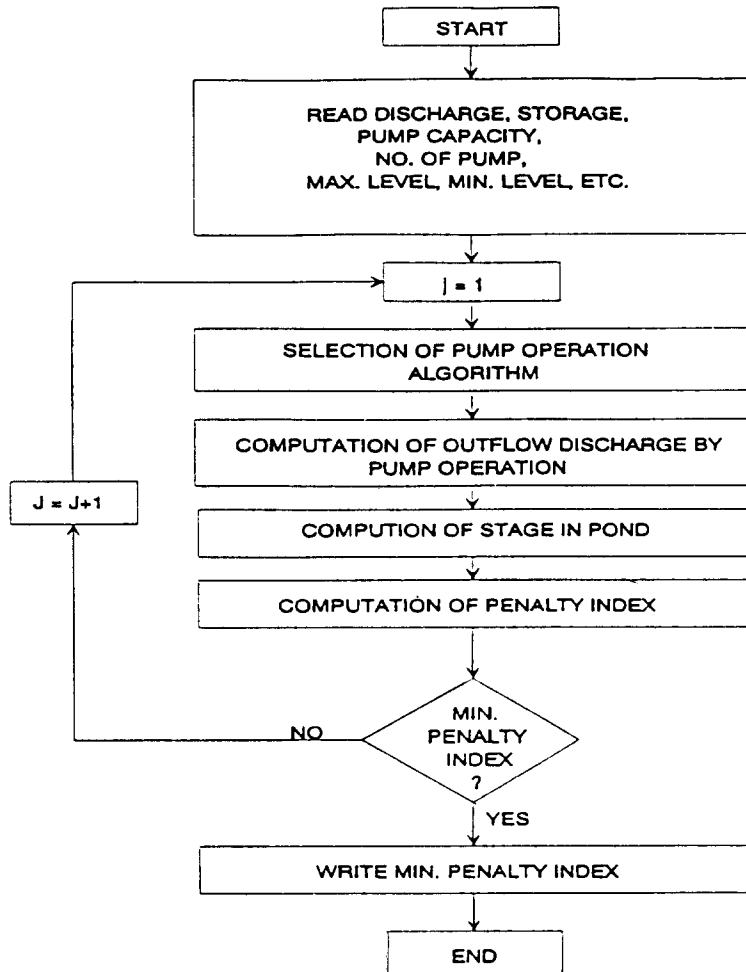


그림 4. 모형의 흐름도

같으며 여기서 장소의 설명은 표 5와 같다.

검토한 결과는 다음과 같다.

### 5. 비교 및 고찰

본 연구에서는 제시한 모형의 적용성을 검토하기 위하여 설계강우 뿐만 아니라 복합강우의 형태를 가진 실측자료와 유역면적의 대소, 펌프 보유대수의 다소 등을 구분하여 대상유역을 선정하였다. SWMM 모형을 사용하여 유입수문곡선을 계산하였으며, 유수지별 각각의 모형의 적용 결과를 비교

#### 1) 실측자료에 대한 적용결과

본 연구에서는 독립사상 호우뿐만 아니라 복합강우사상에도 모형들의 적용성을 입증하고 상대적인 평가를 하기 위하여, 1987년 7월 26~27일의 실제 우량자료로부터 추산된 망원 유수지의 유입수문곡선을 이용하였다. ('87 수해백서, 1988) 그림 6은 망원 유수지의 유입수문곡선을 나타낸 것이다.



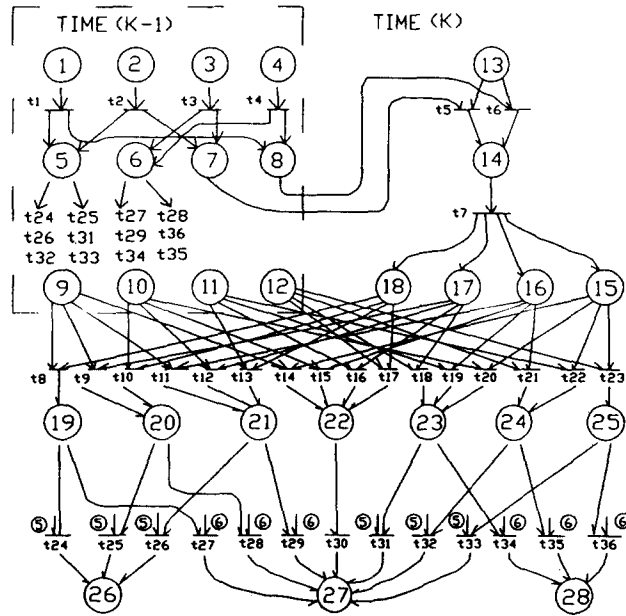


표 5. 장소의 설명

장 소	내	용
P1	시각(K-1) 때 유수지 수위	제 1하위역
P2	시각(K-1) 때 유수지 수위	제 2하위역
P3	시각(K-1) 때 유수지 수위	제 2상위역
P4	시각(K-1) 때 유수지 수위	제 1상위역
P5	시각(K-1) 때 유수지 수위	하위역
P6	시각(K-1) 때 유수지 수위	상위역
P7	시각(K-1) 때 유수지 수위	수위조정분고려
P8	시각(K-1) 때 유수지 수위	수위조정분 불고려
P9	시각(K-1) 때	펌프 3대 운전
P10	시각(K-1) 때	펌프 2대 운전
P11	시각(K-1) 때	펌프 1대 운전
P12	시각(K-1) 때	펌프 0대 운전
P13	시각(K) 때의 유입유량	
P14	시각(K) 때	펌프운전대수계산
P15	시각(K) 때	펌프 3대 운전
P16	시각(K) 때	펌프 2대 운전
P17	시각(K) 때	펌프 1대 운전
P18	시각(K) 때	펌프 0대 운전
P19	시각(K-1)과 비교하여 시각(K)에서	펌프 3대 감소
P20	시각(K-1)과 비교하여 시각(K)에서	펌프 2대 감소
P21	시각(K-1)과 비교하여 시각(K)에서	펌프 1대 감소
P22	시각(K-1)과 비교하여 시각(K)에서	증감무
P23	시각(K-1)과 비교하여 시각(K)에서	펌프 1대 증가
P24	시각(K-1)과 비교하여 시각(K)에서	펌프 2대 증가
P25	시각(K-1)과 비교하여 시각(K)에서	펌프 3대 증가
P26	시각(K)에서	펌프운전대수 1대 감소 결정
P27	시각(K)에서	펌프운전대수 증감무 결정
P28	시각(K)에서	펌프운전대수 1대 증가 결정

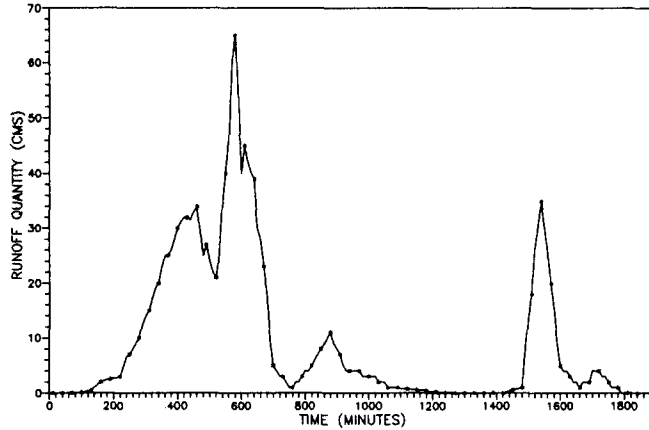


그림 6. 망원 유수지의 유입수문곡선('87 수해백서, 1988)

이 유입량에 대한 각 모형들의 펌프제어 결과를 종합평가지표를 사용하여 나타내면 표 6과 같다.

표 6에서와 같이 종합평가지표는 모형 3이 가장 작게 계산되었으며 모형 2, 모형 1, 모형 4 순으로 작다. 모형3에서는 지표 A가 0이므로 유수지 허용수위를 초과하지 않고 있어서 다른 3개의 모형에 비하여 가장 안정성이 우수하다. 즉, 모형3을 이용하여 펌프운전을 하였을 경우에는 유수지가 넘치지 않으나, 다른 모형을 사용한 경우는 유수지가 넘친다. 지표 C도 모형 3이 가장 작다. 이 지표는 펌프 운전대수의 총합이므로 전기사용료는 모형 3을 이용하였을 경우가 가장 작다. 그러나 지표 B는 모형3이 다른 모형에 비하여 비교적 큰 편이다. 이는 펌프의 작동 변경회수가 증가하여 펌프의 정지 가동 회수가 많음을 알 수 있다. 모형 3은 동일한 유입량을 안전하게 배제시키면서도 유수지 저류능력을 효율적으로 이용하고 있다. 따라서 모형 3이 가장 바람직한 펌프조작 모형임을 알 수 있다. 이러한 결과를 모형별 수위에 대한 수문곡선으로 나타낸 것이 그림 7이다.

가중치의 변화에 따른 종합평가지표의 변동 특성을 개략적으로 분석하기 위하여 망원지역에서 계산된 지표의 값들을 이용하였다. 가중치는 절대적인 크기보다 상대적 중요도를 나타내기 때문에 최대치인 지표 A의 가중치를 10,000, 최소치인 지표 C의 가중치를 1로 고정시키고, 지표 B의 가중치  $y$ 를 5에서 1,000까지 변화시키면서 모형들의 종합평가지표를 계산한 결과가 표 7이다. 표 6의 결과와 같이 여기서도 모형 3의 종합평가지표가 가장 작고, 모형 4의 그 값이 가장 크다. 그러나  $y$ 의 값이 500 이상이 되면, 모형 2의 종합평가지표가 모형 1의 그 값보다 커진다. 유수지가 넘치는 경우의 가중치를 10,000 이라고 가정하였기 때문에 펌프의 변동대수의 가중치를 500이상으로 가정하는 것은 그들의 중요도로 판단하여 무리가 있다고 생각되고, 지표 B의 가중치를 지표 C의 가중치의 500 배 이상으로 계산하는데도 역시 무리가 있다고 판단된다. 따라서 본 연구에서 가정한 가중치는 비교적 합리적이라고 생각된다. 그러나, 앞으로 지표의 가중치에 대한 깊은 연구가 필요하다.

표 6. 망원지역 실측자료에 대한 적용결과 지표

지표 모형	지표 A	지표 B	지표 C	종합지표
모형 1	34	30	512	340,812
모형 2	31	124	507	311,747
모형 3	0	108	238	1,318
모형 4	66	39	429	660,819

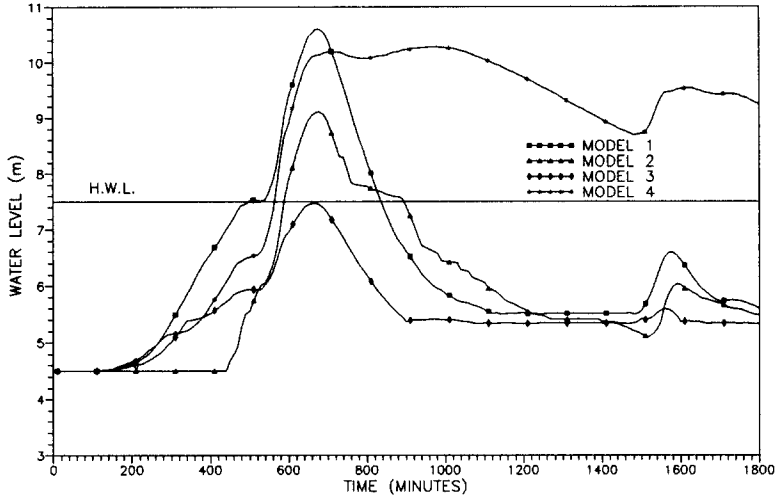


그림 7. 모형별 수문곡선의 비교(망원유수지)

표 7. 가중치의 변화에 따른 종합평가지표의 변동

모형	y의 값					
	5	20	50	100	500	1,000
모형 1	340,662	341,112	342,012	343,512	355,512	370,512
모형 2	311,127	312,987	316,707	322,907	372,507	434,507
모형 3	778	2,398	5,638	11,038	54,238	108,238
모형 4	660,624	661,209	662,379	664,329	679,929	699,429

표 8. 재현기간별 유입량에 대한 모형별 종합평가지수 비교 (마포)

모형	지표				
	지표 A	지표 B	지표 C	종합지표	
재현 기간 10년	모형 1	33	7	249	330,319
	모형 2	32	7	287	320,357
	모형 3	0	3	102	132
	모형 4	0	17	75	245
재현 기간 20년	모형 1	34	7	253	340,323
	모형 2	33	7	289	330,359
	모형 3	0	5	183	233
	모형 4	0	17	110	280
재현 기간 30년	모형 1	35	7	256	350,326
	모형 2	34	7	290	340,360
	모형 3	0	9	237	327
	모형 4	30	17	86	300,256

표 9. 재현기간별 유입량에 대한 모형별 종합평가지수 비교 (탄천)

모형		지표		지표 A	지표 B	지표 C	종합지표
		지표 1	지표 2				
재현 기간 10년	모형 1	0	10	197	297		
	모형 2	0	20	211	411		
	모형 3	0	2	71	91		
	모형 4	0	28	182	462		
재현 기간 20년	모형 1	0	11	214	324		
	모형 2	0	18	229	409		
	모형 3	0	3	115	145		
	모형 4	0	21	126	336		
재현 기간 30년	모형 1	0	11	222	332		
	모형 2	0	18	238	418		
	모형 3	0	4	140	180		
	모형 4	0	23	150	380		

## 2) 설계강우에 대한 적용 결과

설계강우에 대한 모형의 적용성을 파악하기 위하여 마포 및 탄천 유수지에 본 연구에서 제시한 모형들을 적용하였으며, 그 결과를 종합평가지표로 비교하면 표 8~9과 같다. 마포 유수지에서는 재현기간이 10년과 20년 인 경우 모형3, 모형4, 모형2, 모형1 순으로 종합평가지표가 작게 계산되었다. 모형1과 모형2는 지표 A가 0이 아니므로 유수지 허용수위를 초과하며, 따라서 이 모형들은 안정성에 문제가 있다. 재현기간이 30년인 경우는 모형 3만이 최고수위를 초과하지 않고 있어서 다른 모형에 비하여 우수한 모형으로 판단된다. 즉 동일한 강우조건, 유입수문곡선 및 유수지 규모에 대하여도 펌프의 운영조각모형에 따라 내수피해의 규모가 달라진다. 탄천 유수지에서는 재현기간 30년까지 모든 모형들의 안정성이 유지되고 있으나 효율적인 면에서는 종합평가지표가 가장 작은 모형 3이 가장 유리하다. 따라서 본 연구에서 제시한 모형 3은 복합강우 뿐만 아니라 설계강우에 대한 운영조각 측면에서도 안정성과 효율성이 가장 크다고 판단된다.

## 6. 결 론

내수 침수방지를 위하여 설치 운영되고 있는 유

수지 및 펌프장의 배수펌프의 안정성과 효율성을 증진시키기 위하여 기존의 운영개념을 포함한 다양한 배수펌프운영 모형을 정리하여 제시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Petri Net도와 종합평가지표의 개념을 도입하여 새로운 배수펌프 운영모형을 개발 하였다.
- (2) 개발된 배수펌프 운영모형을 서울시내 유수지의 배수펌프운영에 적용하여 모형의 범용성과 우수성을 입증하였다.
- (3) 모의과정을 통하여 선택된 최적모형은 유수지 설계시 펌프토출량의 결정뿐만 아니라 기존펌프장의 배수펌프 능력 검토에도 도움을 줄 수 있다고 판단된다.
- (4) 개발된 모형의 특성을 더욱 깊게 파악하기 위해서는 앞으로 여러 가지의 강우조건, 유역특성, 유출특성 등을 고려한 충분한 모의과정이 필요하다.

## 감사의 글

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제(자유공모) 연구비에 의하여 연구되었으며, 지원기관에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 고재웅 (1988). “유수지 운영의 문제점과 개선방향.” 1988년 도시수문학 심포지엄 논문집, 한국수문학회, pp. 6~16.
- 하천연안 수공구조물 안전진단 및 관리대책 조사보고서, (1991). 서울특별시.
- 빗물펌프장, 수문관리지침. (1993). 서울특별시.
- 심재현 (1992). “유수지 배수펌프장의 적정운용을 위한 퍼지제어모형에 관한 연구” 박사학위 논문, 연세대학교 대학원.
- 이원환 (1991). “한강홍수특성을 고려한 내배수 처리 기법.” 대한토목학회 논문집, 제11권, 제1호, pp. 99~108.
- 이원환, 박상덕, 심재현 (1992a). “우수배제펌프의 조작기준에 따른 서울특별시 유수지의 안전검토.” 대한토목학회 논문집, 제12권 제1호, pp. 141~150.
- 이원환, 조원철, 심재현 (1992b). “퍼지제어기법을 사용한 우수배제펌프의 조작기법 개발.” 대한토목학회 논문집, 제12권, 제3호, pp. 107~114.
- 이종태 (1988). “도시유출의 특성 및 모형화.” 1988년 도시수문학 심포지엄 논문집, 한국수문학회, pp. 65~80.
- 이종태, 윤세의, 이재준, 윤용남 (1991). “도시화 영향을 고려한 유수지 계획 모형.” 한국수문학회지, 제24권, 제4호, pp. 73~83.
- 이종태, 윤세의, 이재준 (1992). “유수지의 수문·수리 설계 및 설계기법의 표준화: 제 3세부과제.” (KOSEF 90-0700-05), 한국과학재단.
- 이종태, 윤세의, 김정환 (1994). “지표면유출 해석방법이 도시 유역의 홍수량 산정에 미치는 영향.” 대한토목학회 논문집, 제14권, 제5호, pp.1167~1176.
- 최성열, 심재현, 이원환 (1992). “등위험도선이론에 의한 유수지 안전도평가.” 대한토목학회 논문집, 제12권, 제2호, pp. 131~140.
- 서병하, 김남원 (1989). “지역별 계획강우의 시간적분포.” 연구보고서, 건기연 89-WR-111, pp. 103-108.
- ’87 수해백서. (1988). 한국수문학회, 서울특별시.
- ’90 수해백서. (1992). 한국수문학회, 서울특별시.
- Huber, H.C., and Dickinson, R.E. (1988). “Storm water management model(SWMM) Version 4, Part A and B.” EPA/600/3-88/001a-b.
- Kodate, H., and Seki, N. (1987). “A New operational algorithm of storm-water pumps to decrease at most total number of changing pump sets.” *The IEEE Japan*, Vol. 107, No. 7, pp. 860~866.
- Murata, T. (1989). “Petri nets: properties, analysis and applications.” *Proceedings of The IEEE*, Vol. 77, No. 4, pp. 541~580.
- Peterson, J.L. (1981). *Petri Net theory and the modeling of system*. Prentice-Hall INC.
- Seki, N., Kodate, H., and Yabuuchi, S. (1986). “Operational method for storm-water pumps utilizing urban runoff analysis.” *Toshiba Review*, Vol. 41, No. 5, pp. 425~428.

〈접수: 1995년 9월 28일〉