

都市 低地帶 浸水被害防止를 위한 빗물펌프장의 運營改善模型 開發 (Ⅱ)

- 페트리네트 圖를 利用한 制御模型을 中心으로 -

A Study on the Development of Control Models in Inland Pumping Stations for
Improvement of Flood Control Efficiency (Part Ⅱ)

- In the case of Control Models using Petri Net Diagram -

沈 在 鉉

(韓國地方行政研究院 責任研究員)

尹 世 儀

(京畿大學校 土木工學科 教授)

李 鍾 泰

(京畿大學校 土木工學科 教授)

<目 次>

I. 序論	IV. 排水펌프 運營模型의 開發
II. 遊水池 現況과 流入 水文曲線	V. 比較考察
III. 基本假定 및 評價指標	VI. 結論

<ABSTRACT>

Operation models for storm water pumps in detention pond were developed in order to reduce the damage by inundation in urbanized area.

Inflow hydrographs of detention ponds were derived by using the Storm Water Management Model and ILLUDAS Model, and Petri net diagrams were selected to analyze the pump actions.

In this paper, the four control models of pumping stations to improve pumping capacity with existing facilities are developed. To compare the efficiency of developed models, the evaluation indices, including number of inundation, total energy used, and number of changes of pumps, are used.

In these results, the developed models are more effective in inland flooding prevention than the exist model.

Consequently, the developed control models show lower high water levels and penalty scores than existing operation criteria. It means that the developed models have efficiency and economy in inland flooding protection program.

I. 序 論

都市化 現狀이 심화되기 이전에는 外水의 氾濫에 의한 農村型 洪水가 대부분이었으나, 최근 인구집중과 개발사업의 증가로 인해 도시지역이 河川沿邊 低地帶까지 확대되면서 內水에 의한 피해문제가 심각하게 대두되고 있다. 이에 따라 해당 지역 自治團體에서는 內水浸水를 방지하기 위해 遊水池를 新設하거나 補強하여 왔으나, 도시지역의 地價가 급격히 상승하여 遊水池 敷地를 확대시켜 貯留容量을 확장하는 방법에는 막대한 財源이 소요되기 때문에 기존의 유수지에 排水펌프를 增設, 稼動하여 유수지 수위를 조절하는 것이 都市地域 內水浸水 防止對策의 일반적인 경향이다.

따라서 유수지의 저류용량과 배수펌프의 조작에 대한 적절한 운영의 중요성이 대두되고 있는데, 이는 동일한 設計條件을 가진 유수지에서도 排水펌프 運營操作 技法에 따라 내수 피해의 정도가 增減될 수 있기 때문이다. 즉, 遊水池內 貯留量은 펌프의 적절한 吐出條件에 따라서 조절될 수 있기 때문에 유수지에 의한 治水效果를 극대화시킬 수 있다는 것이다. 유수지에서 발생되고 있는 문제점은 유수지 및 빗물펌프의 용량이 過少設計되었거나 혹은 잘못 설계된 경우와 같은 構造的인 問題와 遊水池 시스템 管理運營에 대한 非構造的 問題로 구분할 수 있는데, 기존의 유수지 배수펌프장에서는 前者보다 後者의 문제가 중점적으로 연구되어야 한다.

원칙적으로는 水理·水文學的 模型을 이용하여 雨水 流入量을 예측하고 이에 대비한 排水펌프運轉이 이루어 져야 하지만, 현재까지 많은 制約條件 때문에 완전자동화할 수 없었던 펌프장에서는 관리인이 수위와 강우의 상태, 우수펌프 운전상태 등과 같은 情報와 과거의 펌프 運轉經驗으로 펌프정의 수위를 가능한 낮게 억제하는 안전한 운전관리를 하고 있는 실정이다. 그러나 강우조건에 따라 유수지에 설치된 펌프를 가동하여 遊水池의 許容水位를 초과시키지 말아야 하며, 유수지의 수위변동을 허용하므로써 배수펌프의 稼動, 停止頻度を 가능한 한 억제하여 펌프의 수명을 길게하고 운전원의 작업량을 감소시키는 펌프운전 방법이 가장 적절한 조작이라고 생각된다. 즉 雨水 流入狀況에 두가지의 相反되는 목표인 安定性和 效率性을 모두 확보할 수 있는 펌프운영조작기법이 필요한 것이다. 따라서 종래의 경험적인 펌프운영조작 수준에서 탈피하기 위하여 自動制御方式에 기초를 둔 制御模型의 도입이 선행되어야 한다. 그러나 현재 서울특별시 관내 모든 排水펌프는 펌프稼動水位를 지정하고 유입량이 증가하여 指定水位에 도달하게 되면 모든 펌프를 동시에 가동시켜서 최대펌프吐出量에 도달하였다가 유입량이 감소하여 수위가 다시 지정수위에 도달하면 모든

펌프를 중단시키는 알고리즘으로 설계되고 있다. 이는 지정수위를 下向調整할 수록 安全性은 증대되지만, 적절한 지정수위를 설정하기 어렵고 갑작스러운 水位上昇에 對處할 수 없고, 펌프 및 遊水池의 效率性を 저하시킨다.

최근에는 우수지내의 수심을 여러 개의 구간으로 구분하여 수위가 증가함에 따라서 펌프 가동대수를 선형적으로 증가시키다가 수위의 감소에 따라 펌프 稼動臺數를 다시 線形的으로 감소시키는 방법이 펌프장 設計에 사용되었다(서울특별시, 1987). 그러나 실제 배수펌프의 조절은 우수지 내의 수위를 기준으로 하여 펌프장에 배치된 조작자의 경험에 크게 의존하고 있지만(이원환, 1991; 서울특별시, 1991), 배수펌프 운영조작에 관한 설계기준이 아직은 未備된 실정이다. 현재까지 우리나라에서 발표된 遊水池의 計劃 및 設計에 관한 연구로는 고재웅(1988), 이종태(1991), 최성열(1992), 서울특별시(1987, 1991) 등이 있으며 우수지의 배수펌프 操作技法은 심재현, 이원환(1992)에 의하여 발표된 바 있다. 이 연구에서 流出水文曲線을 구하기 위하여 ILLUDAS모형이 사용되었으며, 貯水制御技法이 배수펌프 조작에 응용된 바 있다. Seki(1986)는 流入流量 계산에서는 RRI模型을 사용하였고, 최초로 배수펌프의 운영방법에 Petri Net圖(Peterson, 1981; Murata, 1989)와 綜合評價指標를 적용하였다. Kodate(1987)는 펌프대수 變更回數를 최소화하는 알고리즘을 배수펌프조작 설계에 적용하였다. 이 논문에서는 배수펌프 조작방법을 일반화하지는 못하고 우수지별로 制約條件을 주고 있다. 국내에서는 遊水池의 排水펌프의 관리·운영에 관한 연구가 매우 미흡하며 그에 관한 기초적 자료가 정리되어 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 서울지역을 중심으로 遊水池 및 빗물펌프場에 관한 現況과 運營失態를 조사하고, 우수지로 유입되는 유입유량을 예측하는데 비교적 합리적이라고 알려진 SWMM모형과 ILLUDAS 모형을 도입하고, Petri Net Diagram을 적용, 합리적인 排水펌프 運營操作模型을 제시하여 都市化된 地域에서의 內水浸水에 의한 피해를 減少시키는 데 그 목적이 있다.

II. 遊水池 現況과 流入 水文曲線

1. 遊水池 現況

서울 시내에 있는 우수지 및 배수펌프장의 수는 1993년을 기준으로 총66개이며, 펌프조작기준은 대부분 遊水池 水位에 의해 가동하고 있다. 66개의 總流域面積은 15,404ha, 貯水容量은 4,177,633m³에 달한다. 최근 도시화 현상으로 水理·水文學的 特性이 변화되어 이에

따른 治水安全度에 문제가 있다고 판단된 유수지중에는, 기존 유수지의 稼動基準水位를 변경하거나(뚝도, 옥수, 신정, 도림3 등), 펌프容量을 확충(한남, 옥수, 군자, 마포, 신정, 신도림, 신구로, 도림3 등)하고, 유수지를 浚渫하여 貯留容量을 확충(옥수, 구로1, 구로2 등)한 바 있다. 유수지 및 빗물펌프장의 문제점을 요약하면 아래와 같다(서울특별시, 1993).

- 1) 遊水池의 設計基準에 관한 연구가 未洽하다.
- 2) 遊水池 및 펌프場의 容量이 不足하다.
- 3) 排水펌프의 합리적인 運營方案이 確立되어 있지 않다.
- 4) 규모가 큰 펌프가 설치되어 고장발생시 급격히 吐出量이 감소한다.
- 5) 펌프간의 吸入口의 간격이 좁아 渦流에 대한 위험이 있다.
- 6) 堆砂에 의해 바닥표고가 상승되었다.
- 7) 遊水池 滿水位가 住居地域의 標高와 같거나 높은 곳이 있다.
- 8) 非洪水期에는 유수지에서 심한 惡臭가 발생된다.
- 9) 遊水池內로 浮遊物이 유입되어 펌프吐出能力을 저하시킨다.
- 10) 유수지를 覆蓋하는 경우 遊水池 管理에 어려움이 커진다.

본 연구에서는 排水流域面積과 流域形狀을 고려하여 서울시내의 7개 유역을 선정하였다. 이들의 諸元은 <표 1>과 같다.

<표 1> 대상 유수지 및 펌프장의 제원

유수지명	유역면적 (ha)	펌프규모 (HP×대수)	저류용량 (m ³)	유수지면적 (m ²)	최대펌프토출량 (m ³ /min)
마 포	298.5	450×3 1000×4	72542	24000	1750
신 천	369	600×11	92000	23700	2216
망 원	182.3	650×3 550×4	162000	54000	1340
탄 천	525.6	650×1 600×3 850×4	26100	87000	1992
군 자	89.8	300×1 225×1 500×4	7103	1776	1005
구로 1	136	300×2 250×3	29100	13261	536
구로 2	46.7	250×3 120×3	1700	163	690

2. 流入水文曲線

연구대상의 遊水池로 유입되는 雨水量을 算定하기 위하여 設計降雨量을 10년, 20년, 30년의 3가지 再現期間을 선택하였다. 確率降雨強度式은 건설기술연구원(1988)에서 발표한 식을 사용하였으며, 이를 표로 나타내면 다음과 같다.

<표 2> 재현기간별 확률강우강도식

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

일반적으로 우수지 설계에 사용되고 있는 120분 持續時間의 豪雨事象을 해당 지역의 降雨分布基準으로 설정하였으며, 설계강우량의 분포는 서울지방에 적합하다고 알려진 Huff의 제2분위를 선정하였다.

또한 유출모형은 다른 都市流出模型보다 비교적 수리학적으로 精巧한 것으로 알려져 있는 SWMM(Storm Water Management Model) 모형과 ILLUDAS 모형을 사용하였다.

SWMM에서 表面流出量은 RUNOFF BLOCK으로, 管渠內 흐름추적은 EXTRAN BLOCK을 이용하였다. RUNOFF BLOCK과 EXTRAN BLOCK에서 표면유출과 관거내 홍수추적에 사용된 기본식은 각각 식 (1)과 식 (2)이다.

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dh}{dt} = A \times i - Q \tag{1}$$

여기서 V : 소유역에서의 체적 (m³)

h : 수심 (m)

A : 수표면의 면적 (m²)

i : 초과강우량 (CMS)

Q : 유출량 (CMS)

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_I + Q_W + Q_{GW} - Q_O \tag{2}$$

여기서 S : 저류량 (CMS)

QI : 유입량 (CMS)

QW : 측방유입량 (CMS)

QGW : 지하수 유입량 (CMS)

QI : 유출량 (CMS)

ILLUDAS 모형은 유역을 直接連結 鋪裝地域, 間接連結 鋪裝地域, 直接連結 透水地域, 및 유출에 기여하지 않는 유역으로 구분하고 있다. 또한 이러한 4가지 유역에 대하여 損失量과 흐름상태를 각각 구분하여 해석한다. 모형의 계산절차는 크게 다음과 같은 4가지 절차로 구분된다.

- 1) 對象流域의 區分 및 小流域別 入力資料 決定
- 2) 鋪裝流域의 流出量 計算
- 3) 透水流域의 流出量 計算
- 4) 水文曲線(hydrograph)의 合成 및 管路의 追跡(routing)

해당유역 최상류지점에 내린 강우가 유출되어 최하류단에 도달하는데 소요되는 시간을 到達時間(travel time)이라 정의한다. ILLUDAS모형에서 사용하는 포장유역의 도달시간은 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$t_0 = \frac{L}{60 V_0} + 2.0 \quad (3)$$

$$V_0 = \frac{1.486}{n} R^{2/3} S_0^{1/2} = \frac{1.486}{0.02} (0.2)^{2/3} S_0^{1/2} \quad (4)$$

여기서 t_0 는 도달시간(min) 이며, V_0 는 지표면을 통한 흐름의 유속(ft/sec), L 은 지표면의 유하거리(ft) 이다.

또한 투수지역에서의 도달시간은 다음 식으로 산정한다.

$$q_e = 0.0000231 I L \quad (5)$$

$$t_e = 0.033 K L q_e^{-0.67} \quad (6)$$

$$K = (0.0007 I + c) S^{-0.33} \quad (7)$$

여기서 I 는 강우강도 (in/hr)이며, S 는 흐름의 斜面傾斜(ft/ft), c 는 지표면에 대한 특성계수로 잔디지역에서는 0.046을 사용한다.

ILLUDAS모형은 강우가 유출로 변할 때 발생하는 초기손실과 지하로의 침투손실을

Holtan과 Chow식을 사용하여 계산한다.

<Holtan의 식>

$$f = a(S - F)^n + f_c \quad (8)$$

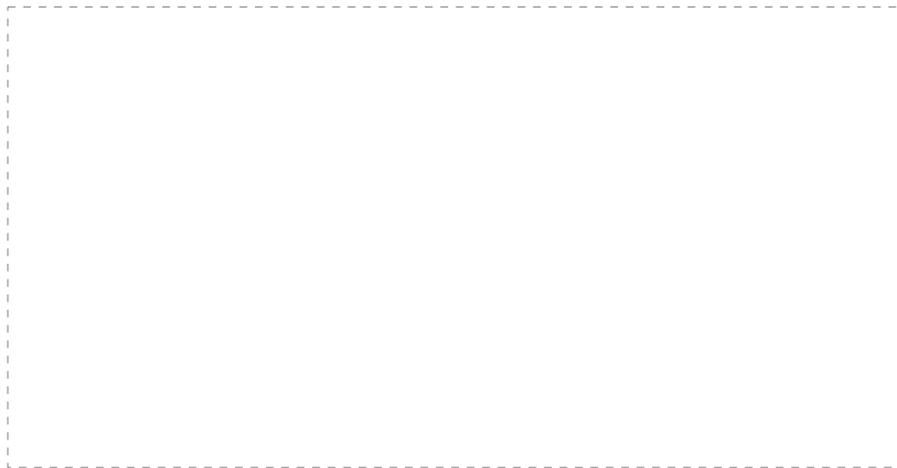
<Chow의 식>

$$f = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad (9)$$

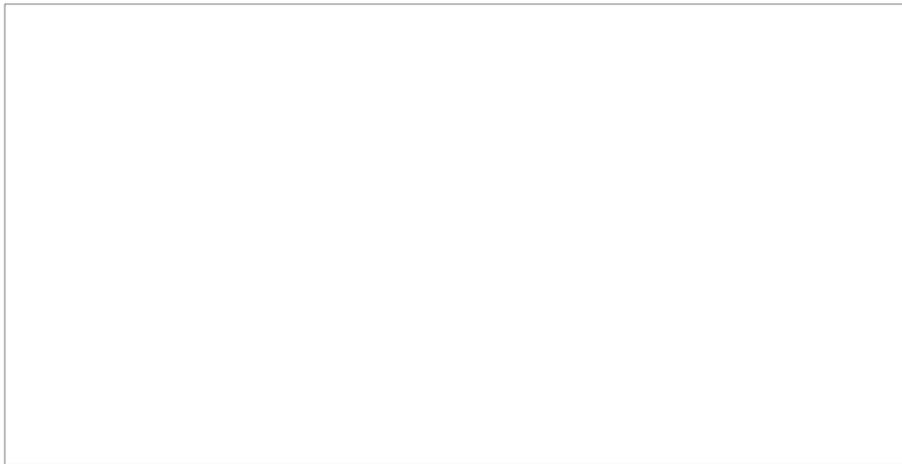
여기서 f 는 浸透能(infiltration rate)으로 단위는(in/hr)이며, a 는 토양특성계수로 무차원 이고, n 은 Manning의 粗度係數로 1.4의 상수로 설정하였다. 또한 S 는 토양의 貯留量 (in/hr), F 는 累加浸透量(in/hr), f_c 는 최종 침투능(in/hr), k 는 形狀係數(shape factor)이다.

본 연구에서 선정한 유역중 마포와 탄천유수지로 유입되는 유입수문곡선을 SWMM모형을 사용하여 구한 결과를 再現期間別로 그림으로 나타낸 것이 <그림 1>과 <그림 2>이다. <그림 2>에서 탄천지역이 재현기간 20년과 재현기간 30년에 대한 침투유량이 같게 나타나는 것은 下水管渠의 容量이 부족하여 상류지역에서 이미 局部的인 浸水가 발생한다는 것을 의미한다.

<그림 1> 연구대상 유수지의 유입수문곡선 (마포)



<그림 2> 연구대상 유수지의 유입수문곡선 (탄천)



Ⅲ. 基本假定 및 評價指標

본 연구에서는 배수펌프 조작모형의 安定性과 效率性을 동시에 고려할 수 있는 綜合評價指標를 도입하여 새로운 배수펌프운영 모형을 개발하고 기존 모형들과의 특성을 比較·分析하였다. 雨水排除펌프는 아래와 같은 조건으로 운영된다고 가정한다.

- 1) 펌프는 容量이 다른 여러 대가 설치되어 있다.
- 2) 펌프井에는 水位計가 설치되어 있다.
- 3) 遊水池로의 流入量은 計測되지 않는다.
- 4) 펌프吐出量은 作動臺數가 변화함에 따라서 조정된다.
- 5) 펌프의 작동정지 명령은 自動制御裝置를 이용하여 전달할 수 있다.

펌프조작 방법을 비교할 때, 평가지표는 여러가지가 고려될 수도 있으나 본 연구에서는 다음과 같은 세가지 지표를 이용하였다.

- 1) 지표 A : 펌프정 上限水位 超過 回數
- 2) 지표 B : 펌프運轉 變更臺數의 總計
- 3) 지표 C : 매 演算週期の 펌프 運轉臺數의 總計

지표 A는 수십년에 한번 밖에 발생하지 않을 降雨事象을 제외할 때 한가지 펌프운전법이 가능하게 된다. 즉, 지표 A는 안정성을 고려하여 0이 되어야 한가지의 펌프조작법으로 채택된다. 지표 A가 0이 아니면서 펌프를 가동할 경우에는, 즉 비상시에는 주위여건이 허락하는 한 펌프는 最大吐出量으로 稼動된다. 지표 B는 변경대수의 총계이며, 이는 演算週期別 變更臺數를 시뮬레이션 시간에 걸쳐서 모두 加算한 값이다. 이 지표는 降雨分布에 따라 크게 좌우되기 때문에 절대치보다 모형들 사이의 상대치가 중요하며 작은 값이 바람직하다. 지표 C는 펌프가동한 총대수이므로 펌프에 의해 도출된 총유량과 所費電力에 직접 비례하게 되며, 이 값 역시 모형 상호간의 상대치에 의미가 있으며 작을 수록 좋으나 지표 B보다 덜 중요하다. 따라서 세가지 지표의 중요도 순서는 지표 A, B, C가 되며 모두가 작은 값을 나타낼 수록 바람직하게 되므로 일종의 罰點(penalty score)으로 파악할 수 있다.

綜合評價指數 T는 다음과 같이 표시되며 이것이 작을 수록 바람직한 펌프운전법이 된다.

$$T = xA + yB + zC \tag{10}$$

여기서, x, y, z 는 각각 A, B, C의 加重置

본 연구에서는 x 는 100000, y 는 100, z 는 1 로 가정하였다.

펌프조작 방법이 내장된 自動制御機로 부터 종합평가지표가 작은 방법을 선택하도록 설계하면, 이에 따라서 자동제어기는 선택된 펌프조작 방법에 따라 펌프吐出量을 계산하게 되며, 필요에 따라 펌프의 作動·停止 命令을 내린다.

IV. 排水펌프 運營模型의 開發

1. 펌프作動的 圖式化

펌프조작모형중 펌프의 작동 또는 정지결정이 복잡한 경우에는 PN圖(Petri Net Diagram)를 이용하여 펌프의 동작을 확인하면 편리하다고 알려지고 있다. PN도는 복잡한 시스템에도 자연스럽게 간단한 방법으로 시스템의 同時性, 非同時性, 論理的 先行關係, 構造的 內部 聯關 등을 모델링 할 수 있을 뿐만 아니라 階層的, 構造的 成分分析도 가능한 강력한 모델링 도구이다. 본 연구에서 이용한 PN도는 標準構造(standard structure)로서 場所 P(place), 遷移 T(transition), 入力 I(input), 出力 O(output)으로 구성되고 이를 식으로 표시하면 식 (11)과 같다.

$$S = (P, T, I, O) \tag{11}$$

여기서, P : 장소의 집합으로 원으로 표시

T : 천이의 집합으로 막대나 박스 형태로 표시

I : 장소에서 천이로 향하는 아크(arc)들의 함수

O : 천이에서 장소로 향하는 아크들의 출력함수

장소는 천이가 일어나기 위한 조건, 시스템의 각 동작상태 등을 나타내고, 천이는 수행되는 시작과 종료, 또는 상태를 변화시키는 사건 등을 나타낸다. 이들은 서로 方向性을 가진 아크로 연결된다. 예를 들면 “수위가 제1영역에 있다가 펌프를 가동하여 수위가 제2영역으로 변화된다” 를 Petri Net로 표시하면 <표 3>과 같다.

<표 3> Petri Net Diagram의 예

장 소	천 이	장 소
수위 제 1 영역	펌프 가동	수위 제 2영역

2. 펌프 運營模型

1) 모형 1

현재 국내에서 많이 사용되고 있는 排水펌프 操作方法으로 유수지 有效水深을 여러 개의 구간으로 구분하여 수위가 증가하면서 펌프가동대수를 선형적으로 증가시키다가 수위의 감소에 따라 펌프 가동대수를 선형적으로 감소시키는 모형이다. 초기 펌프가동수위와 펌프가 모두 가동되는 수위를 낮게 策定할 수록 높은 安定性을 얻을 수 있으나 적절한 펌프稼動水位를 결정하기가 어렵다.

2) 모형 2

既存 線形 펌프操作方法을 개선하기 위하여 水文曲線이 상승할 때는 유입량을 全量 排除할 수 있도록 펌프를 조작하고, 수문곡선의 하강시에는 기존의 펌프운영방법에 따르는 모형이다.

3) 모형 3

배수펌프가 3대인 유수지를 예를 들어 펌프 稼動의 組合을 Petri Net圖로 표시하면 <그

림 3>과 같다.

<그림 3> 펌프작동의 Petri net 도

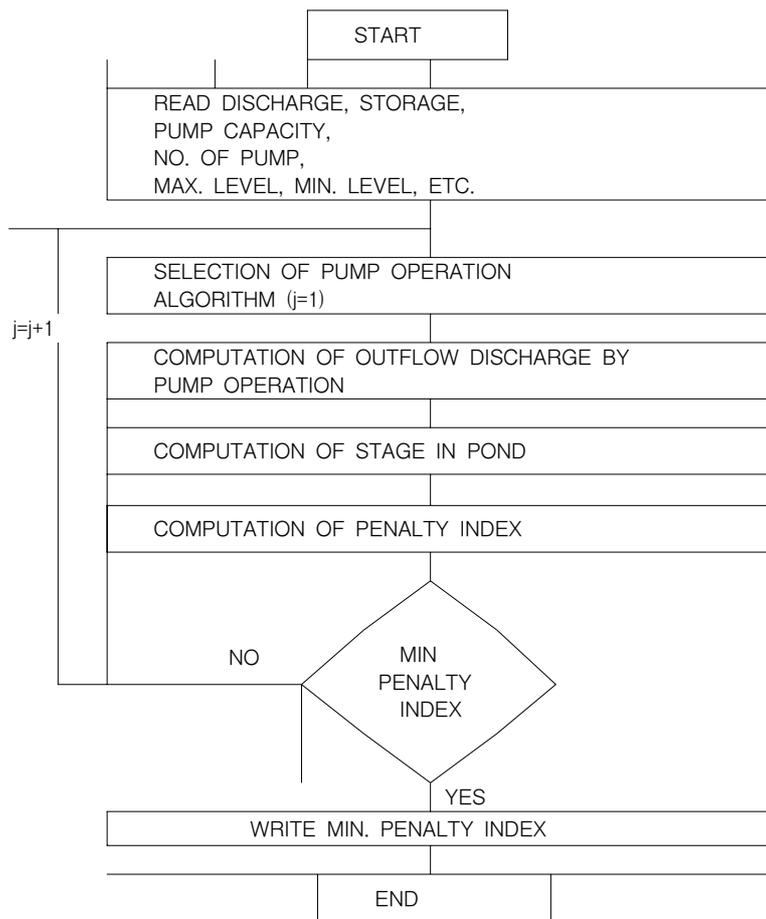
<그림 3>에서 場所(place)는 16개이며, 遷移(transition)의 수는 26개 이며, 장소와 천이에 대한 설명은 <표 4>와 같다.

<표 4> 장소와 천이의 설명

장소번호	내 용	장소번호	내 용
1	강 우	9	제2펌프 가동
2	무강수	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

이러한 동작확인이 끝나면 프로그램 작성을 하고, 模擬過程에서는 주어진 입력자료를 이용하여 펌프운전을 평가하게 된다. 각각의 펌프 용량을 계산하고 1개의 펌프가 감당하는 유수지 수위역을 계산한다. 즉 펌프가 n개이면 분할 수위구역의 수는 n+1개가 된다. 각각의 수위에 펌프를 가동할 수 있는 모든 가능성을 고려하여 펌프吐出量을 계산한다. 이를 일반화시키기 위하여 진법의 개념을 이용하였다. 즉, n개의 펌프일 때, n+1진법을 계산하여 각각의 수위에 진법에서 발생된 숫자를 펌프가동대수로 가정하였다. 가동대수가 결정되면 遊水池內 洪水追跡을 실시하고, 洪水追跡 결과 유수지 수위를 초과하는 경우는 벌점이 크므로 제외시키고 罰點이 가장 작은 경우 즉 經濟性和 安定性이 크다고 판단되는 펌프稼動條件만을 출력한다. 이를 흐름도로 표시하면 <그림 4>와 같다.

<그림 4> 모형 3의 계산흐름도



이 모형은 유입량을 예측할 수 있어야 사용 가능하며, 예측된 유입량 형태에 따라서 종합평가지표가 가장 작은 펌프조작 방법을 찾아낸다. 이 모형은 實時間 流入水文 曲線이 계산되면 그 유입량을 가장 합리적으로 排除시킬 수 있는 펌프가동 조건을 추정할 수 있어 內水浸水防止에 크게 도움을 줄 수 있다고 판단된다. 즉 예측된 유입량을 펌프로 배제할 경우 많은 펌프조작 방법이 가능하게 되며, 이 중에서 종합평가지표가 가장 작은 방법을 선택할 수 있다. 安定性 뿐만 아니라 效率性도 동시에 고려할 수 있는 모형이다.

4) 모형 4

이 모형은 펌프運轉臺數의 變更를 감소시키기 위하여 수위변화를 안정성이 허락되는 범위에서 억제시킨다. 수위변화를 억제시키기 위하여서는 각각의 演算週期時間마다 유입량과 펌프吐出量이 같게하면 되지만, 일반적으로 펌프吐出量を 유입량과 항상 같게 놓고 水位變化를 계산할 수 없다.

<그림 5> 펌프작동의 PN도

연산주기 동안에 최대펌프吐出量이 허용하는 범위에서 유입량에 가장 가까운 펌프吐出量을 구하게 된다. 따라서 수위변동은 유입량과 펌프吐出量의 차이로 발생되며, 연산주기내에 수위수정분에 대한 고려가 필요하게 된다. 펌프吐出量은 유입량과 수위수정분의 합으로 한다. 수위의 許容變動 範圍를 위에서부터 제1상위역, 제2상위역, 제2하위역, 제1하위역으로 구분하였다. 여기서 水位修正은 中間水位(제2상위역, 제2하위역)에서는 필요없다고 가정하고, 1주기 전과 비교하여 펌프稼動臺數의 增加, 減少는 수위가 제1상위역과 제1하위역에 있을 때만으로 제한한다. 이를 PN도로 표시하면 <그림 5>와 같으며, 장소설명은 <표 5>와 같다.

<표 5> 장소 및 천이의 설명

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

V. 比較考察

본 연구에서는 제시한 모형의 적용성을 검토하기 위하여 複合降雨의 형태를 가진 實測資料와 유역면적의 대소, 펌프보유대수의 대소 등을 구분하여 대상유역을 선정하였으며, 유출 모형 역시 SWMM 모형과 ILLUDAS 모형을 사용하여 수문곡선을 다양한 형태로 구하였으며, 이에 대한 적용결과를 비교하면 다음과 같다.

1. 實測資料에 대한 適用結果

본 연구에서는 獨立事象 뿐만 아니라 複合降雨事象에도 모형들의 적용성을 입증하고 상대적인 평가를 하기 위하여 1987년 7월 26~27일의 실제 우량자료로부터 추산된 망원 遊水池에 대하여 모형들을 적용하였다. (수해백서, 1988) <그림 6>은 유입수문곡선을 나타낸 것이다.

<그림 6> 망원 유수지로의 실측 유입수문곡선



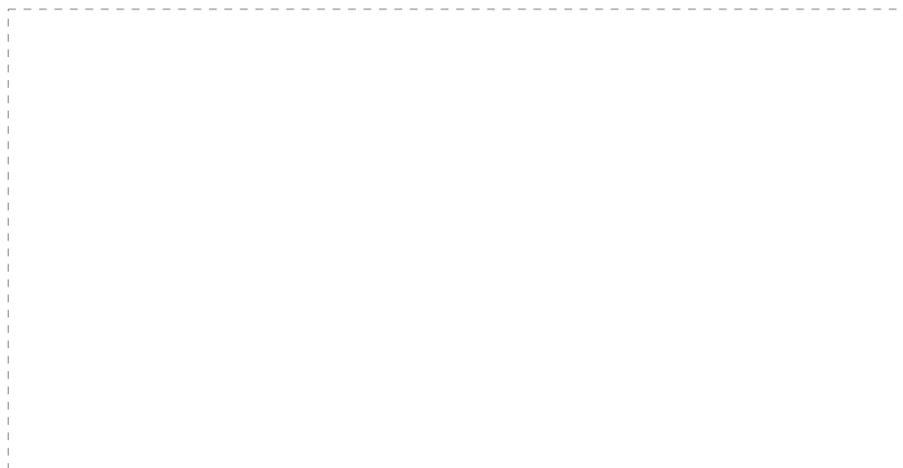
이러한 유입량에 대한 각 모형들의 펌프制御結果를 종합평가지표를 사용하여 나타내면 <표 6>과 같다.

<표 6> 망원유역 실측자료에 대한 적용결과 지표

지표 모형	지표 A	지표 B	지표 C	종합지표
모형 1	34	30	512	340832
모형 2	31	124	507	311747
모형 3	0	108	238	1318
모형 4	66	39	429	660819

<표 6>에서와 같이 綜合評價指標는 모형 3이 가장 작게 계산되었으며 모형 2, 1 순으로 작다. 또한 運轉變更臺數의 합이 모형 3에서 가장 작기 때문에 그것들의 종합평가지표의 값도 작게 계산되었다. 모의시간 중에 펌프가동대수의 합도 모형 3이 가장 작다. 지표 C는 펌프排水量 및 電氣 使用量에 비례하므로 전기사용료는 모형 3이 가장 작다. 모형 1은 효율성에서 가장 저조한 모형이고, 모형 3은 동일한 유입량을 안전하게 배제시키면서도 遊水池 貯留能力을 효율적으로 이용하고 있다. 모형 2에서는 지표 B와 C의 값이 모형 1과 모형 3의 중간을 나타내고 있다. 따라서 모형 3이 가장 바람직한 펌프조작 모형임을 알 수 있다. 이러한 결과를 모형별 수위에 대한 수문곡선으로 나타낸 것이 <그림 7>이다.

<그림 7> 1987년 망원 유수지 실측자료에 대한 모형별 수문곡선 비교



2. SWMM모형을 사용한 設計降雨에 대한 適用結果

설계강우에 대한 모형의 적용성을 파악하기 위하여 SWMM모형을 사용하여 마포, 신천, 탄천 우수지 및 빗물펌프장에 본 연구에서 제시한 모형들을 적용하였으며, 그 결과중 종합평가지표에 대한 것을 비교한 것이 <표 7>~<표 9>이다.

<표 7> 재현기간별 유입량에 대한 모형별 적용 종합평가지수 비교표 (마포)

모형		지표			
		지표 A	지표 B	지표 C	종합지표
재현 기간 10년	모형 1	33	7	249	330319
	모형 2	32	7	287	320357
	모형 3	0	3	102	132
	모형 4	0	17	75	245
재현 기간 20년	모형 1	34	7	253	340323
	모형 2	33	7	289	330359
	모형 3	0	5	183	233
	모형 4	0	17	110	280
재현 기간 30년	모형 1	35	7	256	350326
	모형 2	34	7	290	340360
	모형 3	0	9	237	327
	모형 4	30	17	86	300256

<표 8> 재현기간별 유입량에 대한 모형별 적용 종합평가지수 비교표 (신천)

모형		지표			
		지표 A	지표 B	지표 C	종합지표
재현 기간 10년	모형 1	11	13	237	110367
	모형 2	0	20	253	453
	모형 4	18	21	131	180341
재현 기간 20년	모형 1	18	11	247	180357
	모형 2	18	13	277	180407
	모형 4	18	21	189	180399
재현 기간 30년	모형 1	19	11	250	190360
	모형 2	17	11	280	170390
	모형 4	20	21	137	200347

<표 9> 재현기간별 유입량에 대한 모형별 적용 종합평가지수 비교표 (탄천)

모형		지표			종합지표
		지표 A	지표 B	지표 C	
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

표에서 신천지역에 대한 모형 3의 적용결과는 펌프대수가 11대여서 컴퓨터 running time 이 상당히 소요되기 때문에(Pentium 100MHz 기종으로도 20일 이상 소요되는 것으로 파악 됨)생략하였다.

그러나 펌프대수가 7~8대인 타유역에 적용한 결과와 비교해 볼 때 모형의 優秀性에 대한 순서는 모형 3, 모형 2, 모형 1, 모형 4인 것으로 파악되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 모형 2와 모형3은 實測降雨 뿐만 아니라 設計降雨에 대한 運營操作側面에서도 안정성과 효율성이 있는 것으로 파악되었다.

3. ILLUDAS 模型을 사용한 設計降雨에 대한 適用結果

본 연구에서는 다양한 流入量에 대해 모형의 적응성을 파악하기 위해 ILLUDAS모형에 의한 流出量을 遊水池로의 유입량으로 산정, 이에 대해 각 모형을 적용하였다.

<표 10>은 적용결과에 대한 綜合評價指標를 對象流域別, 設計降雨의 再現期間別로 비교한 것으로서 모형 2와 모형 4가 다른 모형에 비해 경제성이 있는 것으로 파악되었으며, 기존의 제어모형 1에 비하면 약간의 수치가 높은 경우도 있으나 우수지 수위를 낮추는 治水安全度의 확보와 經濟性의 확보라는 두가지 기준을 모두 충족시키는 모형이라 사료된다.

<표 10> 설계강우별, 유수지별 모형의 유수지의 종합평가지수 비교표

유수지 구분		뚝 도	군 자	신도림	구로 1	구로 2
모형 1	10년	270	181	110091	190267	710
	20년	319	125	170102	260299	743
	30년	60343	167	200107	290314	30568
모형 2	10년	321	358	91	10277	688
	20년	259	202	102	70312	598
	30년	10344	426	50107	120328	487
모형 3	10년	350	527	60096	100284	497
	20년	379	500	110106	160320	387
	30년	20544	568	150112	220335	50609
모형 4	10년	191	309	170119	350226	220180
	20년	10221	303	170110	330279	220191
	30년	140205	299	180114	450194	270177

內水浸水防止라는 목표를 달성하기 위해서는 설정된 설계강우에 의한 遊水池로의 유입량을 적절하게 排水시켜 수위를 낮출 수 있는 가의 여부가 가장 중요한 모형의 적용성 판단 기준이라 할 수 있다. 따라서 이를 확인하기 위해 본 연구에서 제시한 각 모형에 의한 제어결과중 최고수위만을 設計降雨의 再現期間別, 流域別로 나타낸 것이 <표 11>이다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 제시한 모형중에서는 모형 2와 모형 3이 기존의 제어모형과 모형 4에 비해 우수한 것으로 나타났으며, 모형 2와 모형 3중에서는 모형 3이 치수안전도 확보에 유리한 모형으로 나타났다.

<표 11> 설계강우별, 유수지별 모형의 유수지내 최고수위 비교표

유수지 구분		뚝 도	군 자	신도림	구로 1	구로 2
모형 1	10년	8.51	10.37	7.88	9.39	8.43
	20년	8.41	10.37	8.71	9.82	7.99
	30년	12.26	10.35	8.93	9.99	11.14
모형 2	10년	8.51	9.00	6.26	8.65	8.49
	20년	8.41	9.00	6.96	8.65	8.49
	30년	10.78	9.00	7.42	8.92	8.49
모형 3	10년	8.51	10.05	7.42	8.84	8.31
	20년	8.04	10.47	8.12	9.24	8.37
	30년	11.01	10.21	8.47	9.53	11.74
모형 4	10년	24.21	21.44	10.14	9.99	15.16
	20년	10.54	10.95	8.71	9.65	17.35
	30년	11.90	10.96	8.82	13.17	28.03

또한 <그림 8>~<그림 9>는 신도림과 구로 1 지역에 대해 본 연구에서 제시한 모형들

을 적용하여 얻은 水文曲線의 變化를 나타낸 것이다.

<그림 8> 모형별 제어에 따른 유수지 수위 비교 (신도림, 재현기간 10년)



<그림 9> 모형별 제어에 따른 유수지 수위 비교 (구로1, 재현기간 20년)



VI. 結 論

본 연구에서는 內水浸水防止를 위하여 현재 설치·운영되고 있는 遊水池 및 빗물펌프장에서 排水펌프의 安定性和 效率性を 增進시키기 위하여 배수펌프 운영모형을 제시하였으며 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 배수펌프자동화를 위하여 Petri Net도의 개념을 도입하여 새로운 배수펌프운영모형을 개발하였다.
2. 綜合評價指標을 사용하여 기존의 모형과 비교하여 개발된 모형의 優秀性和 汎用性を 입증하였다.
3. 模擬過程을 통하여 선택된 最適模型은 遊水池 設計時 펌프吐出量의 결정 뿐만 아니라 기존펌프장의 배수펌프 능력 검토에도 도움을 줄 수 있다고 판단된다.
4. 개발된 모형의 특성을 더욱 깊게 파악하기 위해서는 앞으로 여러가지의 降雨條件, 流域特性, 流出特性 등을 고려한 모의과정이 필요하다.

參 考 文 獻

- 고재웅, “유수지 운영의 문제점과 개선방향”, 1988년 도시수문학 심포지움 논문집, 한국수문학회, 1988, pp. 6~16.
- 서울특별시, 하천연안 수공구조물 안전진단 및 관리대책 조사보고서, 1991.
- 서울특별시, 빗물펌프장, 수문관리지침, 1993.
- 심재현, “유수지 배수펌프장의 적정운용을 위한 퍼지제어모형에 관한 연구”, 연세대학교 대학원 박사학위 논문, 1992, p. 220.
- 이원환, “한강홍수특성을 고려한 내배수 처리기법”, 대한토목학회 논문집, 제11권, 제1호, 1991, pp. 99~108.
- 이원환·박상덕·심재현, “우수배제펌프의 조작기준에 따른 서울특별시 유수지의 안전검토”, 대한토목학회 논문집, 제12권 제1호, 1992, pp. 141~150.

- 이원환·조원철·심재현, “퍼지제어기법을 사용한 우수배제펌프의 조작기법 개발”, 대한토목학회 논문집, 제12권, 제3호, 1992, pp. 107~114.
- 이종태, “도시유출의 특성 및 모형화”, 1988년 도시수문학 심포지움 논문집, 한국수문학회, 1988, pp. 65~80.
- 이종태·윤세의·이재준·윤용남, “도시화 영향을 고려한 우수지 계획 모형”, 한국수문학회지, 제24권, 제4호, 1991, pp. 73~83.
- 이종태·윤세의·이재준, 「우수지의 수문·수리 설계 및 설계기법의 표준화: 제3세부과제」, 한국과학재단(KOSEF 90-0700-05), 1992.
- 최성열·심재현·이원환, “등위험도선이론에 의한 우수지 안전도평가”, 대한토목학회 논문집, 제12권, 제2호, 1992, pp. 131~140.
- 한국수문학회, 서울특별시, '87 수해백서, 1988.
- 한국수문학회, 서울특별시, '90 수해백서, 1992.
- Huff, F.A., "Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms", 「Water Resources Research」, Vol.3, No.4, 1967, pp. 1007~1019.
- Kodate H. and Seki N., "A New operational algorithm of storm-water pumps to decrease at most total number of changing pump sets," 「The IEE Japan」, Vol.107, No.7, 1987, pp. 860~866.
- Peterson, J. L., 「Petri Net Theory and the Modeling of System」, Prentice-Hall INC., 1981.
- Seki, N., H. Kodate and S. Yabuuchi, "Operational method for storm-water pumps utilizing urban runoff analysis," 「Toshiba Review」, vol. 41, No. 5, 1986, pp.425~428.
- Tadao Murata, "Petri nets: properties, analysis and applications," 「Proceedings of The IEEE」, Vol. 77, No.4, 1989, pp. 541~580.
- Huber, H. C. and Dickinson R.E., 「Storm water management model(SWMM) Version 4」, Part A and B, EPA/600/3-88/001a-b, 1988.