

배수펌프장의 효율적인 운영을 위한 퍼지모형의 적용

Application of the Fuzzy Models for the Efficient Operation of Pumping Station

김 윤 태* / 심 재 현** / 정 재 학*** / 안 재 찬****

Kim, Yun Tae / Shim, Jae Hyun / Chung, Jae Hak / Ahn, Jae Chan

Abstract

Urban flood damage has been caused by drainage deficiency. One of the methods to solve this problem is to construct detention basin and pumping station and to pump out the water to the river. However, because of rapid urbanization, the capacity of drainage pipelines is sometimes not sufficient enough during the rainy season. Therefore, even though we have enough pumping stations, the inflow of surface water never reaches to the detention area, causing floods in urban area. This research is to find improvement of urban drainage system, estimating drainage pipeline risk. Also, eight models for a computer program were developed for practical use. The models were verified changing precipitation duration, intensity, design period, time distribution model, and etc. This verification was processed focusing that the model can regulate the water level in the detention basin and minimize the effect downstream. As a result Fuzzy models were found to be efficient to lower the water level in detention basin, and decreased about 8 cm in water level of downstream.

Key words : Urbanization, Development project, Detention basin, Pumping station, Fuzzy control

요 지

최근 도시지역의 수해요인은 내수침수불량에 기인하기 때문에 우수지 및 배수펌프장을 신설하여 우수지로 유입되는 유출량을 하천으로 강제배수하게 된다. 그러나 하수관거의 용량이 부족하여 우수지로 미처 유입되기 전에 하수관거의 역류로 침수피해가 자주 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 도시 내배수 체계의 조사방법을 제시, 하수관거의 위험도를 평가하고 개선할 수 있는 방안을 제시하였다. 또한 배수펌프의 가동대수를 단순한 수위기준에서 변화시켜 실무에서 전문가가 아니더라도 사용할 수 있는 전산모형 8개를 개발하여 제시하였고, 지속기간, 설계빈도, 시간분포 등을 변화시켜 우수지 수위의 적정 조절여부를 검토하였다. 그리고 강제적인 배수에 의해 하류부의 수위영향이 예견되기 때문에 해당 구역의 수위를 안전하게 유지하면서도 하류부에 수위영향을 최소화할 수 있는 방안에 대해서도 검토하였다. 연구결과 Fuzzy 모형이 기존의 운영방법보다 더 효과적으로 우수지의 수위를 저하시킬 수 있었으며, 하류부 수위는 약 8cm 정도 감소시킬 수 있었다.

핵심용어 : 도시화, 개발사업, 우수지, 배수펌프장, 퍼지제어

1. 서 론

최근 빈발하고 있는 국지성 집중호우는 과거의 강우사상을 매년 경신하면서 해마다 수차례 반복되고 있다. 이러한 집중호우는 1996, 1998, 1999년에 이어 2000,

* 정회원, 국립방재연구소 토목연구사 (E-mail: prooni@nema.go.kr)

** 정회원, 국립방재연구소 토목연구관

*** 정회원, 국립방재연구소 토목연구사

**** 정회원, 국립방재연구소 연구원

2001년에도 지역에 따라 시우량 50~150mm의 강우량을 집중시켜 수많은 인명과 재산피해를 발생하였다.

대표적인 사례는 1996년의 파주 문산, 연천, 동두천 등 경기 북부지역, 1998년 경기도 파주, 지리산 유역, 서울특별시 지역, 1999년 경기북부 및 강원지역, 2000년 경남 및 경북 낙동강 유역, 2001년 서울특별시 지역의 호우피해 등이다. 피해지역을 구체적으로 살펴보면 해당 피해지역은 대부분이 도시지역이며, 특히 최근 택지개발사업 등의 도시화 현상이 매우 두드러진 지역이라는 것을 알 수 있다. 따라서 도시화로 인한 첨두유량 및 총유출량의 증가와 홍수도달시간의 단축은 과거 하천외수가 제방을 월류하여 제내지 측에 피해를 주던 홍수양상을 제내지측의 내수가 원활하게 배제되지 못하여 내수침수가 발생하는 새로운 양상으로 변화시키고 있다.

대부분의 도시지역은 하수 및 우수관거를 통해 지역내에서 발생하는 우수를 하류로 배수하며, 해당 소유역에서 배수하는 수량이 제방의 표고로 인해 자연 방류시키기 어려운 경우 우수지와 배수펌프장을 설치, 운영하고 있는 것이 우리나라 대부분의 도시 내 배수체계이므로, 본 연구에서는 치수안전도를 파악하기 위해 대표유역을 선정하여 설계호우에 대한 침수여부와 개보수 우선순위를 제시하였으며, 우수지 및 배수펌프장을 대상으로 8개의 모형을 적용하여 기존의 배수펌프장 운영방법과 비교하였다. 또한 배수펌프장 운영에 따른 하류부의 수위 최소화 방안 등에 대하여 검토하였다.

2. 대표유역의 수문·수리학적 특성 조사 및 분석

대표유역의 조사와 분석을 통해 얻고자 하는 해석자료로는 해당 유역에서의 강우량에 대한 빈도해석자료, 하수관거로 유입되는 유출량 분석을 위한 하수관거자

료, 우수지 및 배수펌프장으로 유입되는 유출량을 하천으로 배수하였을 때 발생하는 유량별 하천 하류부의 수위변화 등이다. 사전 검토대상 유역은 최근 도시화가 많이 진행되고 있는 수도권의 동두천시, 파주시, 광명시 유역을 대상으로 타당성을 검토하였다.

본 연구의 목적인 도시 내배수 체계의 적정운영을 검토하기 위해 도심지를 관통하는 하천의 유무, 하수관거 배수체계 조사, 우수지 및 배수펌프장의 개소수, 하천정비 기본계획 등의 수립 유무 등을 종합적으로 고려한 결과 상기 3개 유역 중에서 가장 적절한 대표유역을 광명시 유역으로 선정하게 되었다.

2.1 수문·수리학적 특성 조사·분석

본 절에서는 대표유역인 광명시 안양천 및 개화천 유역의 수문·수리학적 특성을 조사·분석하였다.

수문·수리학적 특성분석을 위해 대표 유역의 확률 강우량 산정이 우선되어야 하기 때문에 빈도해석을 실시하였으며, 대표 유역의 치수안전도 분석을 위한 우수지 및 배수펌프장의 설계자료를 수집·조사하였다. 또한 배수구역별 하수관망자료를 ILLUDAS 해석을 위한 전산입력자료로 변환하였으며, 하류부 하천의 수위변화를 검토하기 위해 주요지점의 횡단면자료 및 수위-유량 관계곡선식을 조사·정리하였다.

본 연구에서는 광명시 인근에 위치한 서울관측소의 40년(1961년~2000년)간의 강우자료를 사용하였으며, 산정된 확률강우량은 표 1과 같다. 기존에 발표된 서울시의 5가지 확률강우량(이원환(1967), 이원환 등(1969), 건교부(1988), 허준행 등(1999), 건교부(2000))과 비교한 결과 유사한 경향을 보인다. 그리고, 건설교통부(2000)의 확률강우량과 편차도 5%이내로 크지 않고 지속기간별-재현기간별 변화도 적정하다고 볼 수 있으므로 금회 산정된 확률강우량은 합리적인 값이라고 판단된다.

표 1. 강우지속기간별-재현기간별 확률강우량

(단위 : mm)

재현기간 지속기간	5년	10년	20년	30년	50년	80년	100년	200년	500년
1시간	56.4	66.0	75.4	80.7	87.5	93.5	96.4	105.4	117.3
2시간	84.7	99.2	112.8	120.8	130.8	139.8	144.2	157.6	175.4
3시간	106.6	124.9	142.7	152.9	165.5	177.0	182.6	199.5	221.9
6시간	140.1	164.5	187.9	201.4	218.2	233.7	241.0	263.6	293.5
12시간	174.3	206.6	237.6	255.5	277.7	298.1	307.8	337.8	377.3
24시간	198.5	237.0	273.8	295.1	321.6	345.9	357.4	393.1	440.1

2.2 유수지 및 배수펌프장 설계자료 수집 및 제원조사

본 연구의 대표유역으로 선정된 광명시의 안양천 유역과 개화천 유역의 유수지 및 배수펌프장별 제원을 조사하였다. 광명시 관내 7개 배수펌프장별 유수지중 4개(철산, 하안, 소하, 광명) 유수지는 저류지의 형태를 갖추고 있으며, 3개(광명1, 광명2, 광명3) 펌프장 유수지는 집수정의 형태를 갖추고 있다. 또한 서울시 관내에 위치한 개봉1 배수펌프장의 유수지는 홍수시 개화천 합류부 수문을 안양천 수위 상승시 폐쇄하여 안양천으로 배제하므로 광명 배수펌프장을 포함한 본 유수지는 개화천 유역전체라고 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 집수정 형태를 이루고 있는 광명1, 광명2, 광명3 배수펌프장과 저류형태가 상이한 개봉1 배수펌프장의 수위-저류량 관계분석을 제외한 광명, 철산, 하안, 소하 배수펌프장에 관하여 조사·분석하였으며 수위별 저류량 관계를 조사하였으나, 지면관계상 본 고에 수록하지는 못하였다.

3. 배수펌프장 펌프제어 모형의 개발

배수펌프장에는 수리·수문학적 모형을 이용하여 우수 유입량을 예측하고 이에 대비한 적정 배수펌프운전 기준이 설정되어 있어야 하나, 현재까지 많은 제약 조건 때문에 대부분 펌프장에서는 관리자가 수위, 강우의 상태 및 과거의 펌프 운전경험으로 유수지의 수위를 가능한 낮게 억제하는 경험적인 운영을 하고 있는 실정이다. 그러나 강우조건에 따라 유수지에 설치된 펌프를 가동하여 유수지의 허용수위를 초과하지 말아야 하고, 유수지의 수위를 허용함으로서 배수펌프의 가동, 정지빈도를 가능한 한 억제하여 펌프의 수명을 길게 하고, 관리자의 작업량을 감소시키는 펌프운전방법이 가장 적절한 방법이라고 생각된다.

즉, 우수 유입상황에 두 가지의 상반되는 목표인 안전성과 효율성을 잘 조화시킨 펌프운영조작방법이 필요하다. 따라서 종래의 경험적인 펌프운영조작 수준에서 탈피하기 위하여 자동제어방식에 기초를 둔 제어모형의 도입이 필요하다. 기존에 배수펌프장에서 사용하고 있는 조작방법과 효율적으로 배수펌프장을 운영하기 위하여 개발된 펌프제어모형에 간단히 살펴보면 다음과 같다.

3.1 기존의 조작방법

현재 국내에서 많이 사용되고 있는 배수펌프 조작방법은 배수펌프장의 유수지 유효수심을 여러 개의 구간으로 구분하여 수위가 증가하면 펌프가동대수를 선형

적으로 증가시키다가 수위의 감소에 따라 펌프 가동대수를 선형적으로 감소시키는 방법이다(Old Operation으로 표기). 초기 펌프가동수위와 모든 펌프가 가동되는 수위를 낮게 책정하면 할수록 높은 안정성을 얻을 수 있으나 적절한 펌프가동 수위를 결정하기가 어렵다는 단점이 있다. 본 조작방법을 개발된 모형의 적용결과와 비교하기 위하여 최대펌프가동수위는 유수지의 만수위와 펌프의 최초가동수위 차의 80%로 가정한다.

3.2 개발모형 1

개발모형 1은 기존의 펌프조작방법이 갑작스럽게 증가하는 유입량에 대처하기가 어렵다는 판단에 의해 수문곡선의 상승부와 하강부에 대한 조작방법에 차등을 둔 모형이다. 유입수문곡선의 상승부는 유입량이 증가하고 있는 경우로서 조작기준 시각 이전의 유수지 유입량에 비해 조작기준시각의 유입량이 많은 위험시기이다. 이 시기의 조작기준은 유입되는 양을 보유하고 있는 펌프대수로 전량배제한다는 기준으로 펌프를 조작하는 것이다(New Operation으로 표기). 유입수문곡선의 하강부는 상승부에 비해 위험성이 적은 시기이다. 유수지 유입량에 대한 전량배제보다는 유수지 또는 집수정에 저류되어 있는 저류량을 배제시키는 것을 목표로 배수펌프를 조작하는 방법을 채택한다.

본 모형은 유수지 유입 수문곡선의 상승부와 하강부의 두가지 경우에 따라 펌프조작을 달리 하면서 유입 상황에 따라 신속성 있는 대처가 가능하고, 기존의 펌프용량으로 더 많은 우수를 배제시킬 수 있어 기존의 조작기준에 비해 매우 우월한 홍수대처능력을 갖는다고 볼 수 있다. 본 모형에 대한 조작방법을 수식으로 표시하면 식 (1)과 같다.

$$Q_p = C_I P ([Q_{in}/D_P] + 1) + C_D (a + bH_s) \quad (1)$$

여기서, Q_p : 펌프에 의한 배수량 (CMS)

C_I : 유입수문곡선 상승부 정수 (= 1)

P : 배수펌프 1 대의 용량 (CMS)

Q_{in} : 유수지 유입유량 (CMS)

D_P : 배수펌프 1 대가 담당하는 유입량의 범위 (CMS)

C_D : 유입수문곡선 감수부 정수 (= 1) a, b: 계수

H_s : 유수지의 수위 (EL.m, $\geq H_{sc}$)

H_{sc} : 배수펌프 가동을 위한 유수지 한계 최저수위 (EL. m)

[] : Gauss 함수

홍수발생시 유수지 유입량이 증가하면 C_I 는 1이고,

CD는 0이 된다. $[Q_{in}/DP]$ 는 증가되는 유수지 유입량에 대해 가동해야 할 펌프의 대수가 되어 $CIP([Q_{in}/DP] + 1)$ 이 조작기준 시각에서의 펌프 배출량이 된다. 만약 유입량이 감소하게 되면 CI는 0이 되고 CD는 1이 되어 유입량이 증가할 때의 조작기준과는 달리 유수지 수위에 따른 조작기준으로 변하게 된다. 식 (1)에서 a, b는 유수지 수위와 펌프용량과의 회귀분석을 통해 구할 수 있는 상수로 유수지의 수위와 펌프용량에 따라 달라지는 고유특성계수이다. 즉, 유입량이 감소되는 상황에서 배제되는 우수량은 $CD(a + bH_s)$ 가 되는 것이다(심재현, 1993).

3.3 개발모형 2

펌프조작모형중 펌프의 작동 또는 정지결정이 복잡 한 경우에는 PN도(Petri Net Diagram)를 이용하여 펌프의 동작을 확인하면 편리하다고 알려지고 있다. PN도는 복잡한 시스템에도 자연스럽게 간단한 방법으로 시스템의 동시성, 비동시성, 논리적 선행관계, 구조적 내부 연관 등을 모델링 할 수 있을 뿐만 아니라 계층적, 구조적 성분분석도 가능한 강력한 모델링 도구이다 (Petri Net으로 표기). 본 연구의 PN도는 표준구조로서 장소 P(place), 천이 T(transition), 입력 I(input), 출력 O(output)로 구성되고 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

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

여기서, P: 장소의 집합으로 원으로 표시

T: 천이의 집합으로 막대나 박스 형태로 표시

I: 장소에서 천이로 향하는 아크(arc)들의 합수

O: 천이에서 장소로 향하는 아크들의 출력합수

장소는 천이가 일어나기 위한 조건, 시스템의 각 동작상태 등을 나타내고, 천이는 수행되는 시각과 종료, 또는 상태를 변화시키는 사건 등을 나타낸다. 이들은 서로 방향성을 가진 아크로 연결된다.

이 모형은 유입량을 예측할 수 있어야 사용 가능하며, 예측된 유입량 형태에 따라서 종합평가지표가 가장 작은 펌프조작 방법을 찾아낸다. 이 모형은 실시간 유입수문 곡선이 계산되면 그 유입량을 가장 합리적으로 배제시킬 수 있는 펌프가동 조건을 추정할 수 있어 내수 침수방지에 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. 안정성뿐만 아니라 효율성도 동시에 고려할 수 있는 모형이다(심재현, 1993).

3.4 개발모형 3

일반적인 제어이론에서 결정되는 제어량은 연속적인 수치변화를 나타내지만 본 연구와 같은 펌프대수의 제어는 Gauss 함수의 형태처럼 이산적인 제어가 될 수밖에 없다. 기존의 유수지 및 배수펌프장에 대한 국·내외의 연구를 살펴보면, 대부분이 이산적인 펌프용량을 고려하지 않고 연속적으로 제어가 가능하다고 전제하여 펌프제어를 하고 있다. 그러나 제어모형에 의하여 결정되는 연속적인 제어량을 이산적인 펌프대수로 변환시켜야만 실제 적용이나 이론적인 전개가 합리적이라고 생각되므로 본 연구에서는 연속적인 제어량을 이산적인 펌프대수로 변환하였다(심재현, 1993).

유수지와 배수펌프장에서 퍼지제어기법을 적용하기 위해 펌프조작자가 홍수상황시 고려할 수 있는 정보는 6가지로 요약할 수 있는데, ① 펌프조작시각에서의 유수지 수위, ② 펌프조작시각에서 유수지로 유입되는 유입량, ③ 홍수도달시간에 해당하는 이전시각에서의 강우량, ④ 펌프조작시각과 이전시각에서의 유입량의 차, ⑤ 펌프조작시각에서의 강우량, ⑥ 펌프조작시각과 이전시각에서의 수위 차이이다. 본 연구에서는 이중 해당 배수유역에 대한 강우와 실측유량자료가 선행되어야 하는 조건을 제외한 ①, ②, ④, ⑥의 사항으로 퍼지제어모형을 설정하였다. 개발모형 3은 초기조건부의 입력정보량으로 펌프조작시각에서의 유수지 수위와 유입량을 고려하여 설정된 제어규칙을 펌프조작시각마다 상황에 따라 조절해 가는 자체조정기법(self tuning control)을 사용한 모형이다(Fuzzy Rule 1~6으로 표기).

X, Y의 초기 정보량으로 Z라는 펌프제어량을 산출하기 위한 6가지 퍼지 제어규칙(RULE)을 설정하였으며, 이는 가장 보편적이라고 생각되는 제어규칙 3을 기준으로 펌프제어량을 증가, 감소해 가며 확장한 것이다. 제어규칙의 수가 커질수록 같은 초기조건부의 퍼지 입력량에 대하여 출력되는 제어량이 커지고 있으며, 이는 후기조건부의 퍼지변수의 수치를 제어규칙상에서 크게 설정했기 때문인 것을 쉽게 알 수 있다. 즉 상태가 위험해 질수록 제어규칙의 수치가 큰 제어규칙을 사용하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

4. 배수관거체계의 치수안전도 분석

유역에 강우가 발생하게 되면 우수는 유출량으로 변화되어 우수관 또는 하수관을 거쳐 유역 하구부에 위치한 유수지로 유입된다. 따라서 대부분의 도시지역에서 치수안전도를 판단하기 위해서는 하류부 유수지의 유입량에 의한 침수여부를 판단하기에 앞서 배수관거의 침수여부를 판단하는 작업이 선행될 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 대표유역인 광명시 안양천 유역의 소배수유역인 철산, 하안 1, 하안 2, 하안 3, 소하 유역 등 5개 소유역에 대한 배수관거체계의 안전도를 분석하였다. 분석에 사용된 강우-유출모형은 ILLUDAS 모형으로 프로그램내 내장된 입력치 변환만으로도 관거별 침수여부를 판단할 수 있는 평가모드(evaluation mode)와 침수방지에 필요한 관거확충용량 및 저류용량을 산정하는 설계모드(design mode)를 활용할 수 있기 때문이다. 기존 우수 또는 하수관거의 설계호우에 대한 침수여부를 판단하기 위해 설계호우는 5년, 10년, 20년 빈도의 확률강우량을 사용하였는데, 이는 대부분의 하수관거 체계가 지선에서는 5년, 간선에서는 10년 빈도로 설계되기 때문이며, 20년 빈도에 대해서는 추가적인 해석을 실시, 우수 및 하수관거의 위험정도를 파악하기 위하여 선정하였다.

강우의 시간분포는 Huff의 4분위법에서 제2분위 및 제3분위를 사용하였다. 또한 강우의 지속시간은 배수 유역이 매우 작은 유역에서부터 중규모까지 대상 유역 내 존재하기 때문에 30분, 60분의 2가지 유형으로 구분하여 사용하였다. 각 배수유역별 침수상황을 강우의 시간적 분포에 따라 살펴본 결과 Huff의 4분위법중 가장 위험한 경우는 제2분위(H2)가 가장 크며, 순간강우강도법에서는 0.5의 침두위치(I2)가 가장 크게 나타났다.

따라서 본 연구에서는 침수위험구역의 기준은 이러한 두 가지 분위에 대해 침수되는지의 여부를 안전도의 기준으로 채택하기로 한다. 특히 우리 나라의 경우

강우지속시간의 중간위치에서 침두우량이 발생하는 경우가 가장 많은 것으로 한국건설기술연구원의 연구(1989) 및 이근후(1983)의 연구결과에도 제시되어 가장 보편적인 강우사상이므로 본 연구에서 안전도 판단의 기준으로 설정하였다.

철산, 하안, 소하 각 소유역별 산정결과를 활용하여 설계호우별로 우선적으로 침수되어 가장 위험하다고 판단되는 상습침수구역과 설계호우와 강우 지속시간에 따라 침수상황이 변하는 침수위험구역, 설계호우와 강우지속시간의 변화에도 안전한 안전구역 등 세 가지 유형으로 구분하여 파악하였고 각 관거의 체계는 번지 또는 특정위치 등과 함께 제시하여 일선 실무자가 쉽게 파악하고 하수관거 확충 등의 개·보수 작업의 우선순위를 파악할 수 있도록 하였다. 본 결과중 5년빈도에 대하여 철산유역의 강우분포와 지속시간에 따른 침수위험구역을 예로 나타내면 표 2와 같다. 표에서 ○는 설계호우에 대해 침수되지 않는 지역, ×는 침수위험이 있는 지역을 의미하며, 하수관거의 정확한 위치는 표기하지 않았다.

5. 우수지 및 배수펌프장 운영결과분석

우수지로 유입되는 유출량을 배수펌프를 사용하여 배수하는데 있어 가장 커다란 목표는 해당 유역의 침수방지이다. 그러나 유출량의 증감에 따라 배수펌프장을 적정 운영하여 하류부로 유하되는 배수량을 적정 조정하는 것 또한 하류부 수위가중요인을 제거하기 위

표 2. 철산유역의 강우분포와 지속시간에 따른 침수위험구역(5년 빈도)

관번호	지속시간 및 강우시간분포						개보수 우선 순위	위 치
	30분		60분		120분			
	H2	I2	H2	I2	H2	I2		
2-0	×	×	×	×	○	×	1	000 000회관
3-0	×	×	○	×	○	×	2	철산 000 000~000동
4-0	×	×	×	×	○	×	1	광명 000병원 일대
6-4	×	×	○	×	○	×	2	철산 0동 000 ~ 000주유소
6-8	×	×	○	×	○	×	2	철산 0동 000 일대
13-1	×	×	×	×	○	×	1	철산 000아파트 000~000동
6-11	×	×	○	×	○	×	2	철산 000 000단지
2-6	×	○	○	○	○	○	3	철산 000 000단지
20-1	×	×	×	×	○	×	1	광명 000 ~ 000 일대
21-0	×	×	○	×	○	×	2	광명 000 ~000 일대
26-0	×	×	○	×	○	×	2	000타운 일대
25-3	×	○	○	×	○	×	3	철산 0동 000번지 일대
25-4	○	○	○	○	○	×	3	철산 0동 000번지 일대
28-1	×	×	×	×	○	×	1	000 유치원 일대
30-2	×	×	○	×	○	×	2	철산 0동 000번지 일대
32-2	×	×	○	×	○	×	2	광명000 일대
37-0	×	○	○	○	○	○	3	000 아파트 일대

해 필요하다. 즉, 해당 상류지역의 내수침수방지를 위한 배수펌프 운영이 우선목표이나 이를 달성하기 위해 지나치게 많은 수량을 하류부에 유하시킬 경우 하류부 하천의 홍수위를 증가시켜 또 다른 홍수피해의 원인이 될 수 있기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 기존 유입량을 배수펌프 기계 자체에 무리를 주더라도 그대로 배수시키는 운영모형을 개선할 수 있는 모형을 개발, 제시하였다. 가상운영을 위한 모형은 기존 수위별 가동펌프대수를 고정한 Old Operation, 수문곡선의 변화를 고려하여 펌프대수를 변화시키는 New Operation 모형과 유수지 수위를 최대한 활용하여 하류부 수위를 저감시키고자 하는 Petri Net 모형, 유수지 유입량과 수위의 시간적 변화에 따라 자동적으로 펌프대수를 조정해가는 Fuzzy 모형 등 9개 모형을 적용하였고, 지속시간 30, 60분의 2가지 유형과 설계빈도 10, 20년의 2가지 유형에 대해 배수펌프장 3개소를 가상운영하였다

5.1 철산 배수펌프장

적용결과는 그림 1과 같이 모든 재현기간과 강우 지속시간에 대해 9개 모형 모두 유수지 만수위를 일류하지 않아 지역 내수 침수를 방지할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 유수지 수위차는 각각의 모형에 따라

달라져서 가장 수위를 낮출 수 있는 모형의 순으로는 Fuzzy 모형, New Operation 모형, Old Operation 모형, Petri Net 모형 순으로 나타났다.

5.2 하안 배수펌프장

적용결과는 그림 2와 같이 모든 지속시간과 설계빈도에 대해 유수지 만수위를 초과하지 않아 내수침수를 방지할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 Petri Net 모형의 경우 유출수문곡선에 따라 수위차가 매우 크게 나타나 안정성이 약간 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 Old Operation 모형에 비해 초기 수위를 낮출 수 있는 효과가 본 연구에서 개발한 모형 모두에서 나타나 최근 국지성 집중호우와 같이 초기 유출량이 많은 경우 기존의 방식보다 내수침수 방지에 적절한 모형인 것으로 나타났다.

최근 도시화가 한창 진행중인 서울 및 수도권 지역에 있어서는 지가상승의 요인이 커져 가급적 배수펌프장의 용량을 확충하고 유수지의 용량은 최소화하려는 경향이 매우 크다. 그러나 운영결과에서 알 수 있듯이 유수지 용량은 해당 구역의 내수침수를 방어할 뿐만 아니라 하류부로 유하하는 유출량을 지체하는 효과도 크기 때문에 해당 구역내 동일한 치수안전도를 확보한다 하더라도 하류부 피해가중요인을 줄이기 위해서 유수지 용량이 어느 정도 확보되어야 한다. 즉, 많은 배

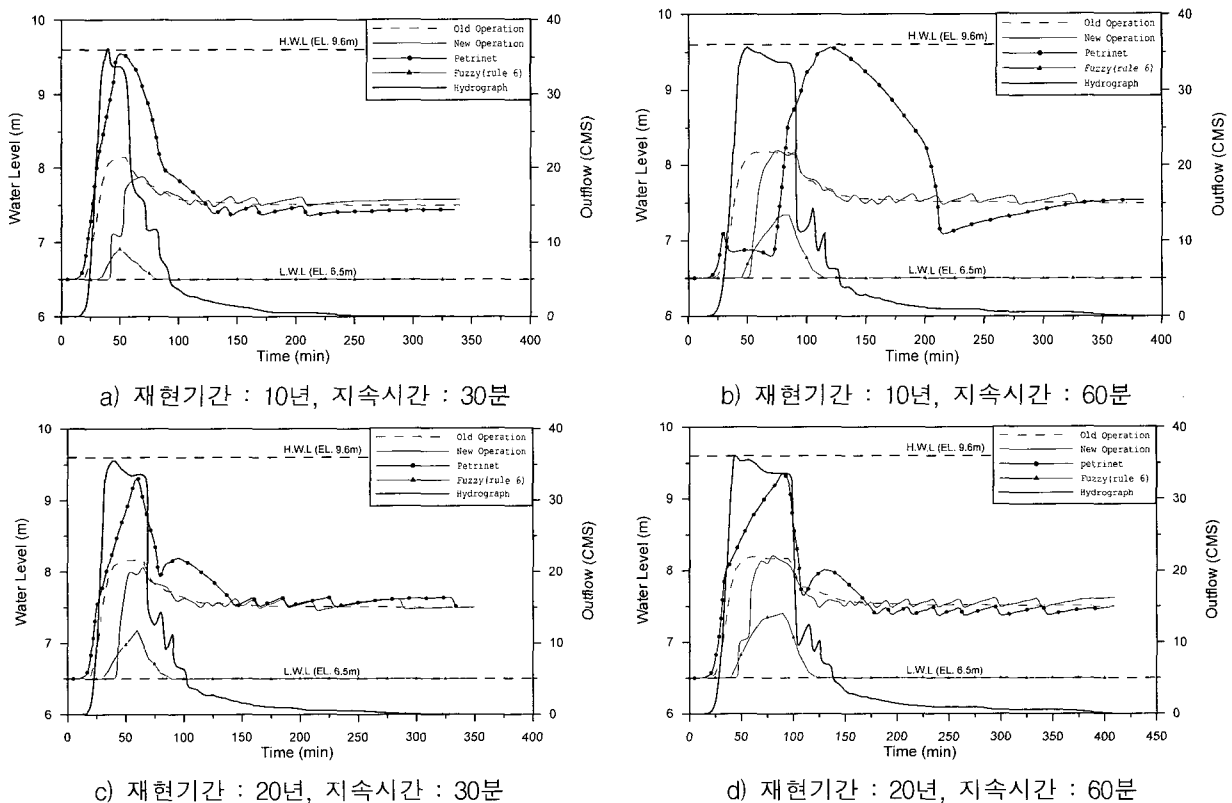


그림 1. 철산 배수펌프장 유수지 수위 비교

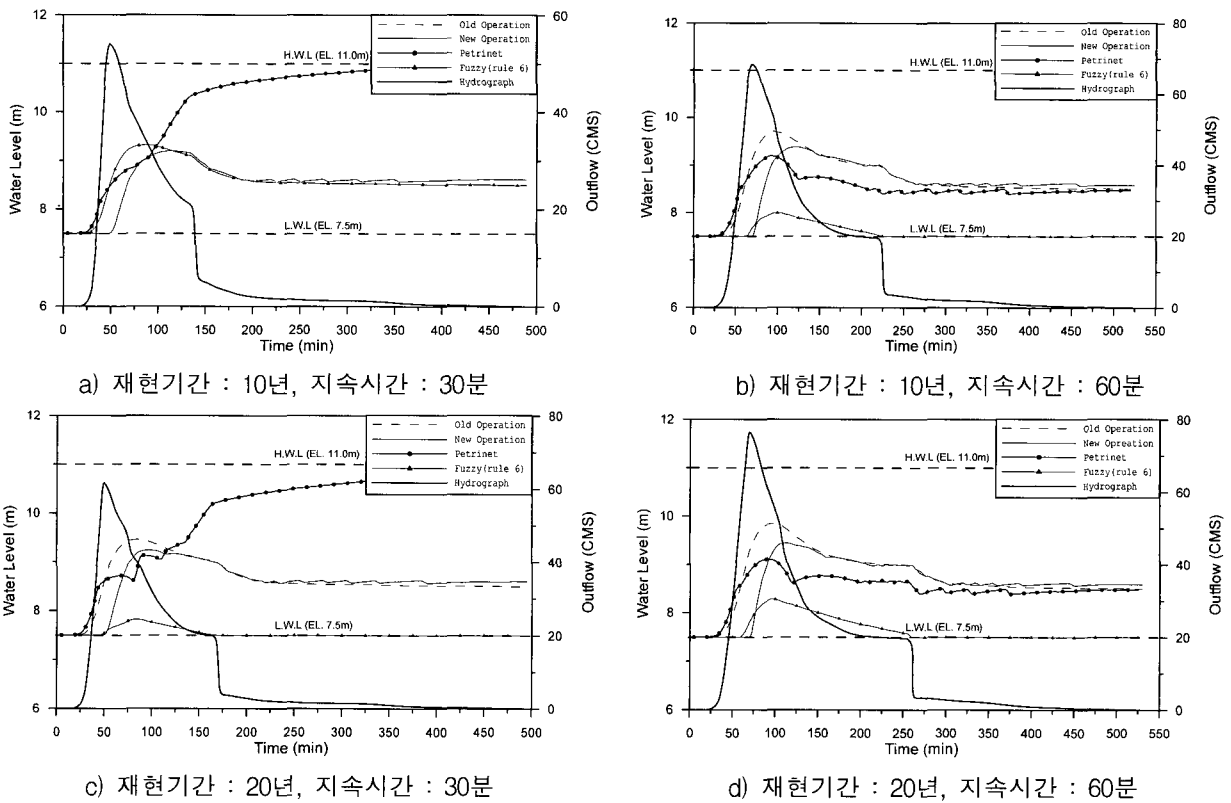


그림 2. 하안 배수펌프장 유수지 수위 비교

수펌프용량은 유수지 또는 집수정의 양정확보에도 실질적으로 어려워 설계도출량을 원활하게 배출할 때에도 문제를 야기시키기 때문이다.

5.3 소하 배수펌프장

소하 배수펌프장은 그림 3에서 제시한 바와 같이 유수지로 유입되는 유출수문곡선이 다른 배수펌프장의 수문곡선에 비해 매우 뾰족한 양상을 보이고 있다. 이는 여러 가지 원인이 있을 수도 있으나 타 배수구역에 비해 배수유역이 좁거나 주 관로가 짧은 형상을 가지고 있어서인 것으로 파악된다.

철산, 하안 배수펌프장의 경우와 마찬가지로 소하 배수펌프장에서도 본 연구에서 개발한 9개 운영모형을 가상운영한 결과, 유수지 수위를 가장 낮출 수 있는 모형은 Fuzzy 모형이며, 가장 높은 유수지 수위를 유지하는 것은 Petri Net 모형이었다. 또한 Old Operation 모형은 초기 수위증가에 대해 적절하게 대응하지 못하여 유수지 만수위를 월류하지는 않으나 초기 우수집중 현상에 대응할 수 있는 모형은 아닌 것으로 판단된다.

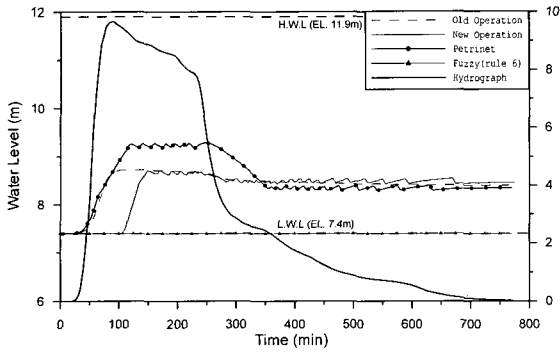
특히 최근과 같이 국지성 집중호우가 빈발하고 있는 도시호우 양상은 무엇보다도 초기에 강우강도가 큰 호우가 집중되는 경향이 크기 때문에 이에 대한 적정 모

형개발이 하류부 도시지역 호우방재대책에 관건이 될 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 개발한 모형의 특성인 수문곡선의 상승부와 하강부를 구분하여 펌프 대수를 조절하는 방법과 상류 강우사상과 유수지의 시간적 변화를 병행하여 고려하는 모형의 실무 적용이 어느 때보다 필요하다고 생각한다.

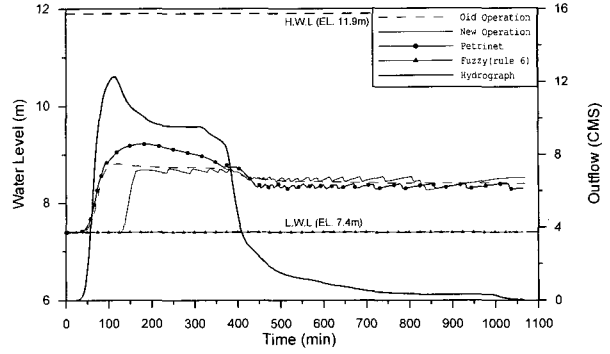
그러나 본 연구에서 개발된 모형은 이론적으로는 타당하나 각 배수펌프장의 펌프 이격거리, 집수정의 형상, 유수지로의 유입구 형상 등과 같은 다양한 지형 및 기하학적 요인을 함께 고려할 수 있어야 하며, 이러한 부분에 대한 연구가 국내 실정상 전무한 상황에서는 실제 펌프장 운영시 각종 매개변수들을 현장에서 실측, 조정하는 시행오차법(trial and error)이 장기간 소요되어야 할 것으로 판단된다.

6. 펌프운영에 따른 하류부 수위영향 검토

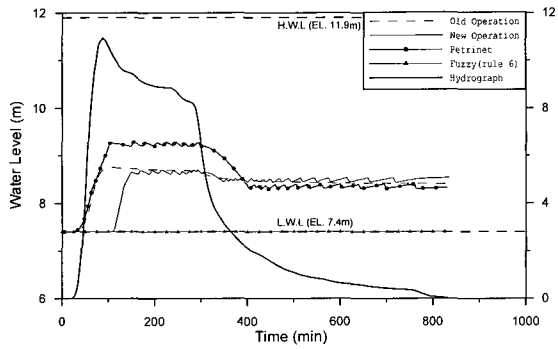
본 절에서는 앞에서 설명한 펌프의 운영모형에 따른 하천에서의 수위양상을 살펴보기 위하여 미육군공병단에서 만든 HEC-RAS 모형을 사용하였고 하천의 중·횡단면자료는 건교부의 「안양천 하천정비기본계획, 2000」을 사용하였다.



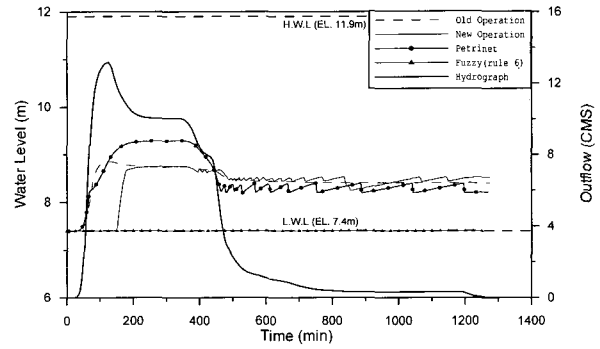
a) 재현기간 : 10년, 지속시간 : 30분



b) 재현기간 : 10년, 지속시간 : 60분



c) 재현기간 : 20년, 지속시간 : 30분



d) 재현기간 : 20년, 지속시간 : 60분

그림 3. 소하 배수펌프장 유수지 수위 비교

HEC-RAS 모형에서는 안양천의 상류단에 있는 기아대교를 기점으로 하류단의 오금교까지 8.3 km의 거리를 가지는 지점을 검토대상으로 선정하였고, 안양천에 있는 소하펌프장, 하안펌프장, 철산펌프장 등 3개 배수펌프장의 펌프토출량에 따른 펌프 운영모형별 수위양상을 검토하였다. 단, 개화천이 안양천에 합류하는 부분 및 개봉1 펌프장은 본 모형에서는 없는 것으로 가정하여 순수하게 각 배수펌프장에서의 토출량과 계획홍수량이 하류부에 미치는 영향을 검토하고자 하였다. 또한, 모의를 위해 배수펌프장에 유입되는 수문자료는 Huff의 2분위, 지속시간 120분인 유출량 자료를 이용하였으며, 현재 우리 나라 대부분의 배수펌프장 계획빈도인 10~20년 빈도의 자료를 이용하였다.

6.1 모형별 최초 최대방류량 발생시간의 검토

펌프토출량에 따른 하류부의 수위검토를 위해서 본 연구에서 제시된 8개 펌프가동모형에 따른 최대 토출량의 발생시점을 파악하였으며, 각 배수펌프 운영모형별로 가상운영하였을 경우 최대 토출량이 발생하는 시간을 별도로 산정하여 각 토출량이 하류부에 미치는 수위영향을 검토하였다.

표 3에서 알 수 있는 바와 같이 각 배수펌프장별로

최대 방류를 하는 시각은 동일한 경우사상과 시간분포에서도 각 운영모형별로 다양하게 나타나고 있다. 또한 배수펌프 가동모형별로 다양하게 나타나는데 이러한 특성이 바로 해당 구역의 내수침수방어에는 적정하나 하류부에 영향을 미칠 수 있는 중요한 인자로 작용될 수 있기 때문에 본 연구에서는 이 특성을 정량화하게 되었다.

펌프장의 위치는 상류단에서 소하, 하안, 철산펌프장이 각각 위치한다. 상기의 표를 살펴보면 평균적으로 철산배수펌프장이 가장 빠른 최초 최대방류량이 발생하며 하안 배수펌프장, 소하 배수펌프장의 순으로 나타나는 것을 살펴볼 수 있다. 이는 각각의 배수구역의 특성에 의한 배수펌프장으로의 유입수문곡선에 의한 영향과 배수펌프장의 저류용량 등의 문제로 인해 발생하는 것으로 생각된다.

또한, 하안과 철산의 경우 최대방류량 발생후 지속시간이 계속되는 경우가 많아 결국, 하안과 철산이 동시에 최대방류량을 방류하는 경우가 종종 발생하는 경향이 있는 것을 볼 수 있었다.

6.2 하류부 영향검토를 위한 가상사상

본 연구에서 사용한 HEC-RAS 모형을 통해 각 배

표 3. 펌프 운영모형별 최초 최대방류량 발생시간

(단위 : 분)

모형 \ 펌프장	소 하		하 안		철 산	
	10년빈도	20년빈도	10년빈도	20년빈도	10년빈도	20년빈도
Old operation	180	180	130	115	90	85
New operation	95	150	95	85	60	55
Fuzzy-1	185	200	110	100	55	60
Fuzzy-2	185	200	110	105	65	60
Fuzzy-3	185	195	130	115	70	70
Fuzzy-4	185	195	135	120	80	75
Fuzzy-5	100	95	135	145	100	95
Fuzzy-6	165	160	135	145	100	140
Petrinet	145	-	80	-	50	-

수펌프장에서 펌프조작에 의해 하천으로 유입되는 토출량에 따라 하류부 침투유량이 어떻게 변화되는지를 살펴보기 위해 아래와 같은 4가지 경우를 가정하여 검토하였다.

가. 모든 배수펌프장이 최대토출량을 나타낼 경우

안양천 유역에 설계호우 또는 그 이상의 호우가 발생하여 각 배수펌프장에서 최대 토출량을 안양천으로 배수하는 경우, 즉 가장 위험한 상황이 발생하였을 때 하류부에서의 홍수위 변화를 파악하고자 하였다. 홍수위 변화는 해당 구간에서 가장 하류부에 속하는 오금교에서의 수위-유량 관계곡선식을 사용하여 홍수량을 홍수위로 환산하였다. 이 경우를 다른 가정사항과 비교하기 위해 CASE 1으로 명칭하였다.

나. 각 배수펌프장에서 최대방류량을 나타낼 경우

가장 하류측에 위치하고 있는 철산 배수펌프장에서 가장 최대의 토출량이 발생하고 나머지 펌프장에서는 철산 배수펌프장에서 최대 방류량이 나타나는 시각에서의 각 배수펌프 가동 운영모형에 의해 토출량이 방류될 경우를 CASE 2로 가정하여 철산 배수펌프장에 의한 하류부 영향을 검토하였다.

그리고, 이와 같이 하안, 소하 배수펌프장에서 최대 방류량이 발생하는 시점을 각각 CASE 3, CASE 4로

가정하여 하류부 수위 영향을 검토하였다.

6.3 배수펌프장 운영에 따른 하류단에서의 수위 변화 검토

모형 적용구간의 가장 하류단에 위치한 오금교 구간에서 위에서 설명한 각 Case 별로 모의하여 수위변화를 살펴보았다. 표 4는 배수펌프장으로 유입하는 수문곡선의 빈도가 10년일 경우로서 CASE 1의 경우가 가장 큰 수위를 가지는 것을 볼 수 있는데 이는 모든 펌프장이 최대 방류량을 나타내는 경우이므로 당연한 결과라고 판단된다.

각 배수펌프 운영모형으로 비교하면 기존 배수펌프 운영모형과 같이 수위에 따라 배수펌프 대수를 변화시키면서 가동할 때의 최대수위 12.51m보다 Fuzzy 1 모형인 경우가 12.43m로서 약 8cm의 하류부 수위 감소 효과를 보이고 있다. 물론 이 결과는 계획홍수량에 대해 미미하다고 판단될 수 있으나 상류부에 배수펌프장이 많이 설치되어 있고 대유역일 경우에 대해 적용하면 매우 큰 저감효과를 가져올 수 있을 것으로 판단된다. 또한 CASE 2, CASE 3의 경우 가장 수위를 낮출 수 있는 펌프가동모형은 우수지 수위 및 수위차를 고려한 개발모형 1의 경우로 나타났고, CASE 4의 경우에도 CASE 1의 경우와 같이 Fuzzy 1 모형이 적절한 것으로 나타났다.

표 4. 모형에 따른 각 CASE별 하류단 수위(10년 빈도)

(단위 : EL. m)

모형 \ 종류	Old	New	Fuzzy1	Fuzzy2	Fuzzy3	Fuzzy4	Fuzzy5	Fuzzy6	Petrinet
CASE1	12.51	12.48	12.43	12.46	12.47	12.49	12.50	12.50	12.53
CASE2	12.37	12.37	12.41	12.43	12.45	12.45	12.47	12.44	12.46
CASE3	12.50	12.50	12.41	12.43	12.45	12.44	12.45	12.46	12.41
CASE4	12.38	12.50	12.36	12.36	12.37	12.37	12.47	12.39	12.47

설계빈도 20년의 경우는 설계빈도 10년의 경우와 또 다른 양상을 보이고 있는데 대부분의 개발 운영모형이 하류부 수위를 기존 운영보다 낮게 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

이러한 결과를 바탕으로 향후 개선되어야 할 배수펌프장의 운영모형은 다음과 같은 사항을 사전에 고려하여 운영하여야 할 것으로 판단된다.

- ① 무조건적으로 우수지 수위를 낮추고자 펌프가동 대수를 조절하기 보다는 하류부의 수위영향을 고려하여 우수지와 펌프용량을 고려한 배수펌프 운영이 타당하다.
- ② 펌프장 운영요인이 비전문가인 현 시점에서 지금까지 배수펌프장을 설계할 때 펌프운영모형을 고려하지 않고 합리식의 형태로 침두유량만을 고려한 배수펌프 설계보다는 펌프대수조절을 위한 자동운영모형을 함께 제시하여 설계하는 것이 반드시 고려되어야 한다.
- ③ 펌프운영시 펌프에 의한 하류부 수위영향을 사전에 고려하여야 한다.

7. 결 론

본 연구는 최근 빈번하게 발생하고 있는 도시형 수해에 대비하기 위한 방안으로서 주요 도시 내배수시설인 하수관거의 치수안전도 검토와 우수지 및 배수펌프장의 효율적인 운영방안을 검토하였다. 하수관거의 치수안전도 분석을 위하여 광명시 안양천 유역을 시범유역으로 설정하고, 안양천으로 내수를 배제하는 소유역별 하수관거별로 설계호우에 대한 침수여부를 통해 치수안전도를 정량화하여 제시하였다.

또한 우수지로 유입되는 유출수량을 무조건적으로 하천으로 배제시키던 배수펌프장 운영방식을 개선하여 우수지 수위와 유입수량의 변화에 대응할 수 있는 펌프가동 전산모형을 개발, 제시하였다. 이렇게 하천 외수로 배제되는 수량이 하류부 수위에 미치는 영향을 최소화하여 하류부를 안전하게 홍수로부터 방어할 수 있는 방안 또한 본 연구에서 고려하여 제시하였다.

참 고 문 헌

건설교통부 (2000) 안양천 하천정비기본계획.

- 건설교통부 (2000) 수자원 관리기법개발연구조사보고서, 제1권 한국확률강우량도 작성, p.96.
- 건설부 (1988) 수자원관리기법개발연구조사보고서, 제2권 한국확률강우량도의 작성.
- 심재현 (1993) 우수지 및 배수펌프장의 적정 운영을 위한 퍼지제어모형에 관한 연구, 연세대학교 대학원 박사학위논문.
- 이근후 (1983) 폭우의 시간적 분포에 관한 연구, 박사학위 논문, 서울대학교.
- 이원환, 박상덕, 심재현 (1992) 우수배제펌프의 조작기준에 따른 서울특별시 우수지의 안전검토, 대한토목학회 논문집, 제12권 제1호, pp. 141~150.
- 이원환, 조원철, 심재현 (1992) 퍼지제어기법을 사용한 우수배제펌프의 조작기법 개발, 대한토목학회 논문집, 제12권 제3호, pp. 107~114.
- 이원환 (1967) 국내지역별 강우특성과 확률강우량 산정에 관한연구(요지), 대한토목학회지, 제15권 제3호, pp. 28~38.
- 이원환, 변근주 (1969) 중소하천 및 도시하수도 계획설계에 필요한 확률강우강도식의 유도, 대한토목학회지, 제16권 4호, pp. 1~11.
- 조원철, 심재현 (1992) Fuzzy 이론의 수문학에서의 응용 (I), 한국수문학회지, 제25권 제1호, pp.59~63.
- 조원철, 심재현 (1992) Fuzzy 이론의 수문학에서의 응용 (II), 한국수문학회지, 제25권 제3호, pp.47~52.
- 허준행, 김경덕, 한정훈 (1999) 지속시간별 강우자료의 적정분포형 선정을 통한 확률강우강도식의 유도, 한국수자원학회논문집, 제32권 제3호, pp. 247~254.
- 한국건설기술연구원 (1989) 지역별 설계강우의 시간적 분포.
- Kosko, B. (1992) *Neural Networks and Fuzzy Systems*, Prentice Hall.
- Zadeh, L. A. (1965) *Fuzzy Sets, Information and Control*, Vol. 8, pp. 338~353.

◎ 논문접수일 : 2004년 9월 08일

◎ 심사의뢰일 : 2004년 9월 08일

◎ 심사완료일 : 2004년 9월 16일