

## 빗물펌프장 운영합리화 방안 연구 A Study on the Effective Operation of Pump Stations

심 호\*  
Shim, Ho

---

### Abstract

Recent development booms in urban watersheds have increased impermeable areas and brought about an increase of peak flood. Eventually, some people living in the lower area of an urban watershed, very often and seriously, have suffered from inundation. In this study, for minimization of inundation in urban watersheds, the operational criteria for pump stations are suggested. At first, ILLUDAS has been selected as a runoff model which can explain the past precipitations. Secondly, the operational criteria for pump stations could be suggested by working out an operation program from the relationship between pumping capacity and accumulative hydrographs, and from the Intensity Duration Frequency relationship.

*Keywords* : urban watershed, peak flood, runoff model, operational criteria for pump stations

---

### 요 지

계속되는 도시 개발boom은 유역내 불투수지역을 증가시켜 침투홍수유출량이 늘어나게 되었고, 도시지역 저지대에서 침수피해가 자주 그리고 크게 발생하게 되었다. 본 연구에서는 홍수침수피해를 최소화 하기 위하여 빗물펌프장의 과학적인 운영방안을 제시하였다. 첫째, 연구대상유역에 대하여 기왕의 강우사상에 맞는 도시홍수유출모형으로 ILLUDAS모형을 선정하였다. 둘째, ILLUDAS모형으로 재현기간별 강우사상에 대한 유출수문곡선을 모의한 후 강우지속시간에 따른 펌프가동대수를 구하고 서울지방의 강우강도(I)-지속기간(D)-재현기간(F) 곡선식으로부터 강우강도와 지속시간에 따른 펌프가동대수를 결정하는 펌프장 운영기준을 개발하였다.

**핵심용어** : 도시유역, 침투홍수유출량, 도시홍수유출모형, 펌프장 운영기준

---

\* 감사원 수석감사관

## 1. 서 론

1960년대 이후부터 계속된 경제성장으로 도시근교의 구릉이나 계곡이 절취되고 진답이 매립되어 택지 또는 공업지역이 확대되는 등 도시화가 급진전되었다. 이러한 도시화는 강우가 발생하였을 경우 침투홍수유출량을 증대시키고 유역말단까지의 유출시간을 단축시켜 내수에 의한 침수를 가중시킬 뿐만 아니라 홍수조질을 더욱 어렵게 하는 요인이 되었다. 또한 정부와 각 지방자치단체에서는 도시지역의 침수피해를 최소화하고 홍수를 조절하기 위하여 매년 하수관로, 수문, 우수지, 펌프장 등을 건설하고 있으나 도로, 지하천 등 사업간접자본 건설에 비하여 상대적으로 적은 예산을 투자하고 있다. 따라서 수방시설에 대한 투자에 제한을 받고 있는 현재의 여건 하에서는 기존 수방시설의 효율적인 운영을 통하여 도시유역에서의 홍수조질 능력을 증대시켜 나가는 노력이 필요하다. 본 연구에서는 기존 수방시설의 효율적인 운영에 초점을 맞추어 “우수지 및 펌프장의 효율적인 관리가 도시유역에서 내수침수를 얼마나 저감시킬 수 있는가?”에 대하여 논의하고자 한다. 보다 구체적으로는 첫째, 도시유역에서의 홍수유출량을 결정하는 방법으로 Mulvaney(1850)가 제안한 합리식(Rational Method), Sherman의 단위유량도 이론, Tholin과 Keifer(1960)의 시카고 수문곡선법(Chicago Hydrograph Method), Watkins(1962)가 모의한 BRRI 모형, Terstriep과 Stall(1974)이 모의한 ILLUDAS 모형, U.S. Army Corps of Engineers(1974)에서 도시유역에서의 토사 및 수질의 영향까지 고려하여 강우-유출관계를 모의한 STORM, U.S. Environmental Protection Agency(1971)에서 복합 강우사상 및 유역크기에 관계없이 적용이 가능하도록 개발한 SWMM 등 외국의 논문, 관련자료를 수집하여 각 홍수유출량 결정방법의 특징 및 제한조건을 분석하였으며 서울지방의 대근보 수해원인을 분석정리한 '87 수해백서 보고서(서울특별시, 1988), 한국수문학회(1988)의 도시수문학 심포지움 논문, 한국토지개발공사(1989)의 도시 소규모 단지의 우수유출량 산정기법에 관한 연구, 윤용남 등(1992)이 개발한 도시홍수해 방지를 위한 내수처리 시스템 분석 및 설계기법, 한국수문학회(1993)에서 개최한 수공학 워킹 샵 자료, 원식연(1993)의 유역 및 하도 홍수추적방법을 결합시킨 도시하천의 유출해석 모형 등 국내자료를 수집하여 도시홍수유출모형에 대한 국내 연구동향을 분석하였다. 둘째, Bellmann과 Kalaba(1965),

Larson과 Casti(1982), Grygier와 Stedinger(1985)에 의하여 수행된 동적계획모형에 대한 연구 및 Lakatos(1976), Mays와 Bedient(1982), Ormsbee 등(1994)에 의하여 수행된 우수지의 최적설계방안, 이원환 등(1992)의 퍼지이론을 적용한 우수배제 펌프조작기법, 이김성과 이범희(1995)의 우수체계의 최적 설계방안 등 국내외 연구성과물을 수집하여 빗물펌프 가동프로그램 작성을 위한 이론적 연구를 수행하였다. 이러한 이론적 연구를 통하여 본 연구와 관련된 많은 연구성과가 있음을 알 수 있었으나 빗물펌프장의 실제 운영자료에 근거하여 과학적이고 합리적인 펌프조작방안을 연구한 사례를 찾아 보기는 힘들었다. 따라서 본 연구에서는 서울특별시에서 관리하는 우수지·펌프장 총 89개소중 최근 2~3년동안 우수지의 내·외수위 자료와 펌프가동 기록이 양호한 3개소를 선정하여 기존 강우사상에 대하여 연구대상유역의 유출현상을 잘 설명할 수 있는 도시홍수유출모형을 모의결과와 우수지의 내·외수위 자료 및 펌프가동 기록으로부터 구한 실측 유출자료와 비교하여 선정된 후 선정된 도시홍수유출모형을 이용하여 재현기간별 강우사상에 대하여 홍수유출량을 모의하고 우수지 내 저류량과 펌프가동량과의 관계로부터 펌프를 효율적으로 가동할 수 있는 프로그램을 작성함으로써 내수침수피해를 저감시키기 위한 근원적인 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 효율적인 빗물펌프장 운영체계연구

### 2.1 연구대상 유역

연구대상유역으로는 먼저 1984, 1987, 1990년 홍수시 2회 이상 침수피해를 입은 지역중 자료수집결과 펌프가동일지, 펌프가동기록지, 수위기록지 등 수문자료가 잘 관리되고 있는 반포천 주변 반포, 서초, 잠원빗물펌프장 유역을 선정하였다. 반포천의 유역면적은 29.10 km<sup>2</sup>, 유로연장은 5.25 km이며 하구로부터 0.9 km되는 지점에서 사당천과 합류된다. 반포천 주변지역은 지반고가 비교적 낮아 지지대의 배수를 위하여 하류에 반포우수지 및 빗물펌프장, 상류에 서초빗물펌프장을 시설하였으며 일부유역의 배수는 잠원빗물펌프장을 이용하여 한강분류로 물을 강제배제 하도록 하고 있다. 표 1은 연구대상 유역에 시설되어 있는 빗물펌프장현황이다.

표 1. 연구대상구역의 빗물펌프장 현황

펌프장명	유역면적 (ha)	펌프규모	배수량 (m <sup>3</sup> /min)	유 수 지	
				용량(m <sup>3</sup> )	면적(m <sup>2</sup> )
반포빗물펌프장	347.0	650 HP × 1대 650 PS × 2대 450 HP × 6대	1,373	168,000	56,000
서초빗물펌프장	106.0	700 HP × 5대	1,403	2,600	685
잠원빗물펌프장	210.0	1,000 HP × 7대	2,375	2,500	830

2.2 홍수유출모형 선정

연구대상 유역에 대하여 효율적인 펌프가동 프로그램을 개발하기 위해서는 진단개로 유역내 유출현상을 가장 잘 표현하여 주는 홍수유출모형 선정이 필수 불가결한 요소이다. 본 연구에서는 유역 및 하도홍수주적 방법을 결합시킨 도시하천의 유출해석모형(원석연, 1993)의 연구에서와 같이 우리나라 도시유역에서 모의결과가 양호하지 못하였던 시카고 수문곡선법(Tholin과 Keifer, 1960), 소유역의 유출현상을 설명하기 어렵고 기저유출과 복합강우 해석이 불가능한 STORM(U.S. Army Corps of Engineers, 1974)모형 및 수치안정조건이 문제가 될 경우 계산시간 간격을 매우 작게 잡아야 하는 등 적용이 손쉬워 않은 SWMM(U.S. Environmental Protection Agency, 1971)모형을 제외시키고 합리식(Mulvaney, 1850), BRRL(Watkins, 1962)모형 그리고 ILLUDAS(Terstriep과 Stall, 1974)모형의 3가지 방법만을 대상으로 실제홍수유출량과 비교하여 적정모형을 선정하였다. 본 연구에 사용된 강우사상은 표 2와 같다.

2.2.1 합리식에 의한 모의

합리식이란 수문곡선을 이등변삼각형으로 가정하여

표 2. 강우사상 현황

유역	일자	총강우량(mm)	지속기간(min)
반포, 서초	'90. 9. 11	163	480
잠원빗물 펌프장	'95. 7. 9 ~ 7. 10	222	2,700
	'95. 8. 8	168	970
	'95. 8. 19 ~ 8. 20	146	1,500

침투홍수유출량을 구하는 공식이다.

$$Q_p = 0.2778 C_f C I A \quad (1)$$

여기서  $Q_p$ 는 침투홍수유출량(cms),  $C_f$ 는 재현기간에 따라 1.0~1.25의 수를 갖는 빈도조정계수(한국수문학회, 1993),  $C$ 는 유역의 유출특성을 대표하는 유출계수,  $I_p$ 는 강우강도(mm/hr),  $A$ 는 유역면적(km<sup>2</sup>)이다. 빈도조정계수는 빗물펌프장이 주로 재현기간 10년의 강우사상에 대하여 설계되어 있는 점을 감안하여 1.0을 적용하였다. 유역의 유출계수는 하천연안 수공구조물 안전진단 및 관리대책 조사연구보고서(서울특별시, 1991)에서 제시된 수치를 인용하여 반포빗물펌프장 유역의 경우 0.73, 서초빗물펌프장 유역의 경우 0.80, 잠원빗물펌프장 유역의 경우 0.62를 사용하였다. 강우강도는 본 연구목적에 기존의 도시홍수유출모형중 해당 유역에 가장 적합한 모형을 비교·검토하여 선정하는 것이므로 표 2와 같이 연구대상 유역을 관할하는 서초구청에서 최소 10분 단위로 기록관리하고 있는 자기강우기록지 자료로 부터 실측 강우자료를 구하고 이를 5분 단위로 분할한 후 각 유역의 강우지속기간에 내린 가장 큰 강우량을 택하여 강우사상별로 구하였다. 강우의 지속기간은 유역의 도달시간과 같다는 가정에 따라 하수도 기본계획 재정비보고서 부록(서울특별시, 1992b)을 참고하여 반포빗물펌프장의 경우 30분, 서초 및 잠원빗물펌프장의 경우 25분으로 정하고 마지막으로 식 (1)에 의하여 침투홍수유출량을 계산하였다.

2.2.2 BRRL 모형에 의한 모의

BRRL 모형은 도시 소유역에서의 직접유출량이 하수관거에 직접 연결되어 있는 불투수지역(directly connected impervious area)에서만 발생한다는 것과 하수관거에 직접 연결되어 있는 불투수지역으로 부터의 유출은 투수지역으로 부터의 유출보다 속도가 빨라 침투홍수유출량

의 크기에 결정적인 영향을 미친다는 기본가정에 근거하여 Watkins(1962)에 의해 만들어졌다. 먼저 하수관거에 직접 연결되는 불투수지역, 하수관거에 간접 연결되어 있는 불투수지역 및 투수지역으로 구분하여 각각의 면적을 결정하고 하수관거에 직접 연결되어 있는 불투수지역에 대하여 서로 다른 도달시간 영역별로 소유역으로 분할하여 도달시간 면적관계 곡선을 작성한다. 이때 각 소유역에 대한 등유하시간선은 Izzard(1944) 공식 등에 의하여 작성하였다. 한편 강우지속기간 강우강도 관계곡선, 즉 우량주상도는 해당강우에 대하여 서초구청에서 10분 단위로 기록관리하고 있는 자기우량기록지의 실측자료를 활용하여 5분단위로 작성하고 최종적으로 두 관계곡선들을 합성시켜 유출량을 계산하였다. 각 소유역의 발달부에서 유출수문곡선의 합성은 식 (2)에 의하여 계산한다.

$$Q_i = C \cdot \sum_{j=0}^i A_{j+1-i} I_j \quad (2)$$

여기서  $t = 0$ 일 때  $Q_0 = 0$ ,  $t = t_1$ 일 때  $Q_1 = CA_1I_1$ ,  $C$ 는 상수,  $I_i$ 는 설계우량주상도의 종가 ( $\text{mm/hr}$ ),  $A_{j+1-i}$ 는  $i$  시간의 도달시간을 가지는 등유하시간면적( $\text{km}^2$ )이다. 유역 발달부에서의 유출수문곡선의 합성이 이루어지면 하수관거를 통하여 유수지까지 이르게 되는 과정에서 발생하는 저류효과를 고려하기 위하여 홍수추적을 한다. 관거를 통한 흐름은 연속방정식 및 Manning 공식을 사용하여 계산하며 식 (3)에 의한다.

$$\frac{1}{2}(I_1 + I_2)\Delta t + S_1 - \frac{1}{2}O_1\Delta t = S_2 + \frac{1}{2}O_2\Delta t \quad (3)$$

여기서  $O = (1/n_0)A_0R_0^{2/3}S_0^{1/2}$ ,  $S_0 = A_0/l$  이며  $I_i$ 는 유입량,  $O_i$ 는 유출량,  $S_i$ 는 저류량,  $n_0$ 는 조도계수,  $A_0$ 는 흐름의 단면적,  $R_0$ 는 동수반경,  $S_0$ 는 관로의 경사,  $l$ 은 관의 길이이다. 이 모형은 불투수지역의 면적이 투수지역의 면적에 비하여 작은 비중을 차지할 때에는 전체 유역을 대표할 수 없어 시간별 유출량 및 유출용적 등의 계산시에 정확한 결과를 얻지 못한다.

### 2.2.3 ILLUDAS 모형에 의한 모의

Terstriep과 Stall(1974)은 BRRL모형을 미국내 도시배수시스템에 적용한 결과 하수관거에 직접 연결된 불투수지역 뿐만 아니라 투수지역(*grassed area*)으로부터의 유출도 경우에 따라서는 도시홍수유출에 크게

기여하는 것을 발견하고 ILLUDAS모형을 개발하였다. 이 모형은 전체유역을 하수관거에 직접 연결된 포장지역, 투수지역에 간접 연결된 포장지역, 투수지역 및 유출에 기여하지 않는 지역 등 4가지 지역으로 구분, 해석하는 것으로 하수관거를 설치하고자 하는 지점 또는 주요 간선관거의 합류지점을 기준으로 소유역을 구분하고 각 소유역별로 포장지역과 투수지역의 유출량을 BRRL 모형처럼 합성한 후 하수관거를 통한 홍수추적을 실시함으로써 유역발달부에서의 유출수문곡선을 얻는다. 포장지역에서의 시간-면적 관계곡선 작성을 위하여 필요한 도달시간 계산식은 다음과 같다.

$$t_c = \frac{L}{60V_0} + 2.0, \quad L(\text{inch 또는 feet}) \quad (4)$$

여기서,  $V_0 = (1.486/n_0)R^{2/3}S_0^{1/2} = (1.486/0.02)(0.2)^{2/3}S_0^{1/2}$ ,  $V_0$ 는 지표면을 통한 흐름의 유속 ( $\text{ft/sec}$ ),  $L$ 은 지표면의 흐름길이( $\text{ft}$ )이며 ILLUDAS 모형에서는 지표면의 조도계수를 0.02, 흐름의 동수반경을 0.2  $\text{ft}$ 로 가정하여 계산하고 있다. 한국수문학회(1993)의 제1회 수공학익습에서 소개된 ILLUDAS모형의 기본이론과 같이 프로그램에서 도달시간-누가면적 관계는 선형으로 가정하며 우량주상도작성시에는 연구대상유역에 적합한 도시홍수유출모형의 선정을 위해서는 서초구청에서 10분 단위로 기록관리하고 있는 실측 강우자료를 활용하고 펄프운영 프로그램 작성을 위해서는 설계강우의 시간분포를 Huff(1967)의 First Quartile Median Curve 분포로 채택하고 설계강우의 지속기간을 60분(임계지속기간)으로 고정하여 작성하였다. 포장지역의 초기강우 손실량은 2.54  $\text{mm}$ 로 가정하였다(한국수문학회, 1993). 이와같이 시간-면적 곡선 및 우량주상도가 결정되면 식 (2)에 의하여 유출량을 계산한다. 투수지역에 간접 연결된 포장지역에 내리는 강우는 초기손실만을 고려한 후 투수지역에 내리는 강우와 합산하여 그 값을 투수지역에서의 총강우량으로 한다. 투수지역에서의 시간-면적곡선 작성을 위하여 필요한 도달시간은 Izzard공식을 사용하여 식 (5)와 같이 구한다.

$$t_c = \frac{41.025(0.0007I + C_0)L^{1/3}}{S_0^{1/3}I^{2/3}} \quad (5)$$

여기서,  $C_0$ 는 0.007부터 0.046 사이의 값을 가지는 지체상수이다. 프로그램에서 도달시간-누가면적 관계는

선형으로 가정하며 우량주상도를 작성할 때에는 전 투수지역에 대한 우량주상도에 투수지역에 간접 연결된 불투수지역의 유출고 주상도를 더한 값에서 투수지역의 초기손실 및 침투로 인한 손실을 고려하여 유효강우량을 결정한다. 이 때 투수지역에 간접 연결된 불투수지역으로 부터의 유출량은 발생강우가 곧바로 투수지역에 기여한다고 가정하여 투수지역에 간접 연결된 불투수지역의 강우량에 투수지역의 면적대비 투수지역에 간접 연결된 불투수지역의 면적 비율을 곱하여 구하며, 투수지역에서의 초기강우손실량은 5.08 mm로 가정하고 침투손실량은 식 (6)과 같은 Horton 공식에 의하여 침투능  $f$ 로 계산한다(한국수문학회, 1993).

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \exp[-kt] \quad (6)$$

최종침투량  $f_c$ 와 최초침투량  $f_0$  및 형상계수  $k$ 는 흙의 종류에 따라 결정되는 상수이며  $t = 0$ 일 때  $f = f_0$  값을,  $t = \infty$ 일 때는  $f = f_c$  값을 가진다. 포장지역 및 투수지역의 도달시간 면적관계와 우량주상도가 작성되면 이를 합성하여 소유역별 유출수문곡선을 계산하며 이를 다시 하수관거를 통해 홍수추적함으로써 홍수유출량을 산정할 수 있다.

### 2.2.4 모의결과와 분석 및 적정모형의 선정

도시홍수유출모형의 적정성을 판단하기 위하여 침투홍수유출량의 상대오차, 유출용적의 상대오차, 그리고 유출수문곡선의 평균자승오차 등이 활용된다(Yen, 1981). 그러나, 본 연구에서는 홍수유출량에 대한 실측치를 얻을 수 없어 펌핑량을 실측 유출용적으로 가정하였으므로 빗물펌프 작동전에 선행강우로 인한 유출의 일부가 수문을 통하여 하천에 자연배수되는 실정

때문에 유역에서 발생한 전체 강우량에 대한 유출용적을 펌핑량과 바로 비교할 수 없어 침투홍수유출량과 유출수문곡선의 경향에 대한 분석을 실시하여 적정모형을 선정하였다. 모의된 침투홍수유출량을 실측치와 비교한 결과는 표 3에 정리하였다. BRRL 및 ILLUDAS모형에 의하여 연구검토된 강우사상에 대하여 계산한 유출수문곡선 및 실측치의 비교 그림은 그림 1(a)~(j), 누가유출수문곡선과 실측치의 비교 그림은 그림 2(a)~(j)와 같다.

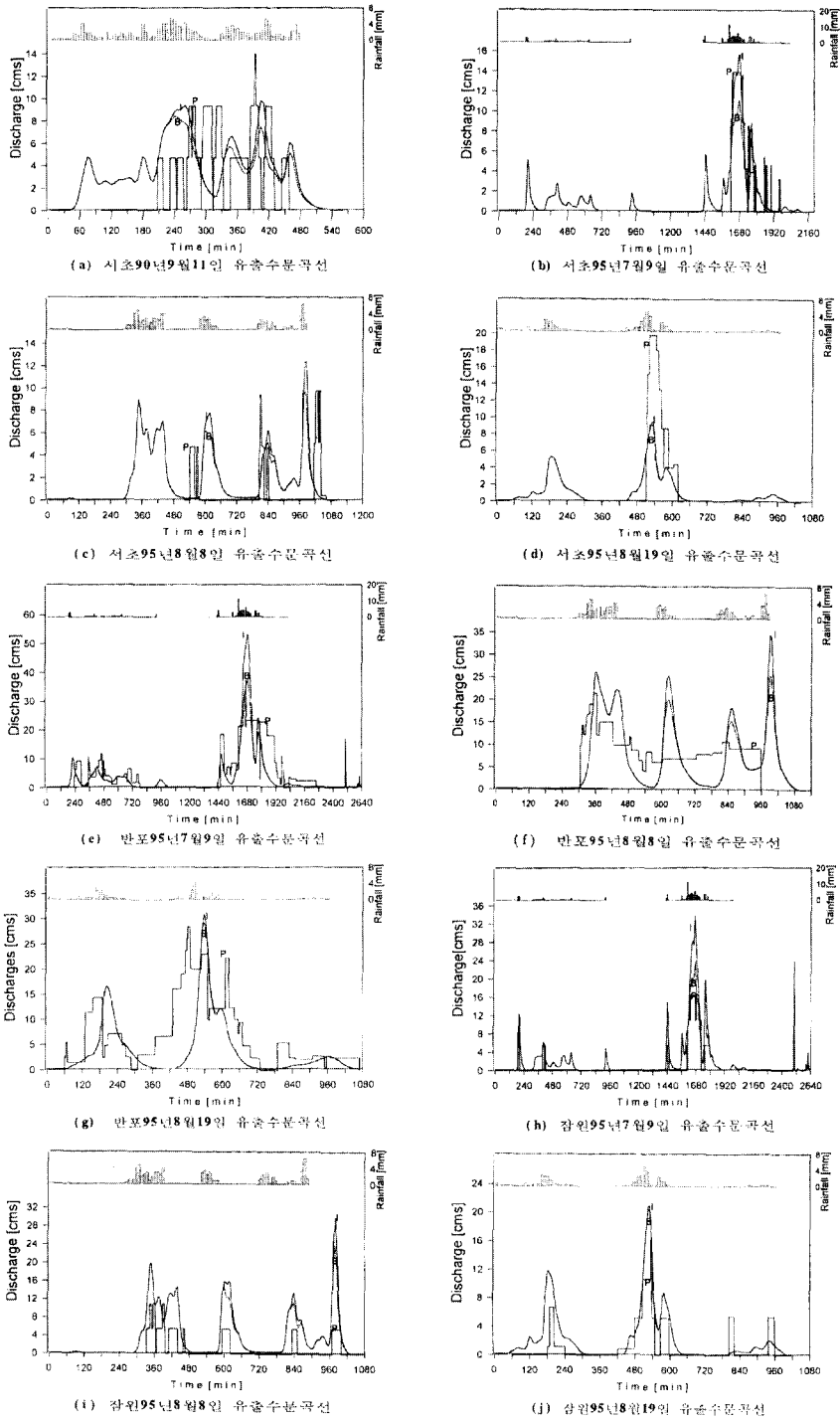
BRRL 모형에 의하여 모의된 침투홍수유출량의 크기가 연구검토된 3개 모형의 모의결과 중 가장 많은 경우에서 실측홍수유출량의 크기에 근접하였으나 해당 유역의 실제 홍수유출량 자료를 구할 수 없어 우수지 및 침수정 저류량의 증감분에 펌프토출량을 합산하여 이를 실측 홍수유출량으로 가정한 점과 초기강우로 발생된 홍수유출량의 일부는 수문폐쇄전에 수문을 통하여 자연배수되고 우수지 및 펌프침수정에 일시 저류되는 홍수유출량의 일부도 곧바로 펌프토출량에 기여하지 못하게 된다는 점을 감안하면 해당유역에서 발생하는 홍수유출량이 실측 홍수유출량으로 가정한 펌프토출량보다 다소 클 것이므로 안전한 펌프운영을 위하여 운영프로그램 개발에 활용할 도시홍수유출모형으로는 ILLUDAS 모형을 선정하는 것이 더 합리적이라고 판단되었다.

유출수문곡선의 형태분석은 침투홍수유출량의 발생 시점과 누가유출수문곡선의 경향에 대하여 우수지 및 침수정 저류량의 증감분과 펌프토출량의 합산량을 BRRL 및 ILLUDAS모형에 의하여 모의된 수치와 비교하는 것으로 시행하였다. 침투홍수유출량의 발생시점에 대해서는 연구검토된 강우사상 총 10개 중 서초

표 3. 침투홍수유출량 비교

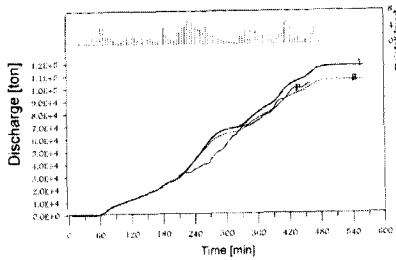
단위 : cms

유역명	강우사상	실측치	합리식		BRRL		ILLUDAS	
			모의	오차	모의	오차	모의	오차
반포빗물펌프장	'95.7.9~7.10	37.140	53.481	16.341	37.270	0.130	53.290	16.150
	'95. 8. 8	21.500	32.370	10.870	26.180	4.680	26.180	4.680
	'95.8.19~8.20	28.370	35.185	6.815	29.270	0.900	30.910	2.540
서초빗물펌프장	'90. 9.11	9.333	11.310	1.977	7.500	-1.833	9.790	0.457
	'95.7.9~ 7.10	14.000	19.223	5.223	11.160	-2.840	15.750	1.750
	'95. 8. 8	9.750	12.156	2.406	9.660	-0.090	12.380	2.630
	'95.8.19 ~8.20	19.860	12.156	-7.704	9.280	-10.58	9.540	-10.32
잠원빗물펌프장	'95.7.9~ 7.10	16.400	29.514	13.114	24.280	7.880	33.770	17.370
	'95. 8. 8	10.933	18.663	7.730	19.950	9.017	19.950	9.017
	'95.8.19 ~8.20	16.170	18.663	2.493	20.570	4.400	20.750	4.580

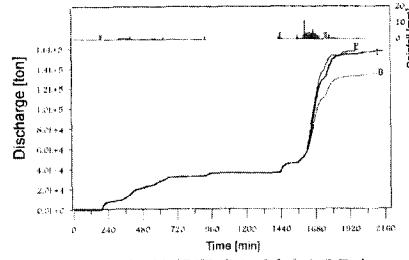


(부제) I : ILLUDAS, B : BRRL, P : Pump 토출량 · 저류량 증감분

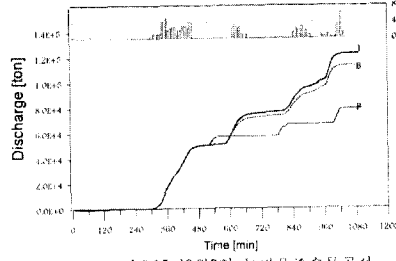
그림 1. 홍수유출수문곡선 비교



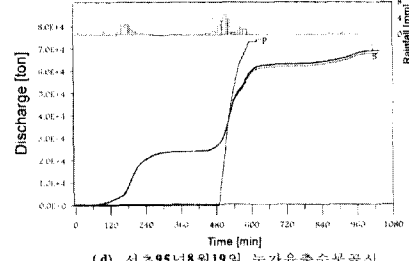
(a) 서호90년11월11일 누기유출수분곡선



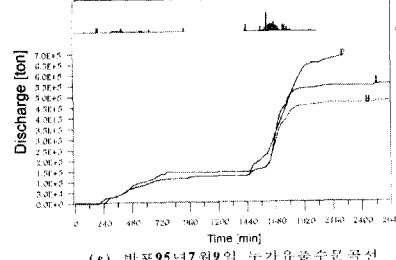
(b) 서호95년7월9일 누기유출수분곡선



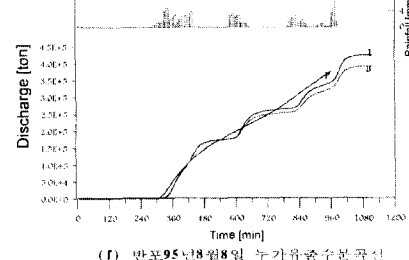
(c) 서호95년8월8일 누기유출수분곡선



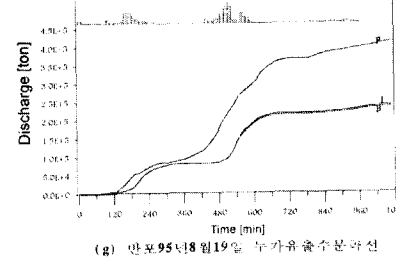
(d) 서호95년8월19일 누기유출수분곡선



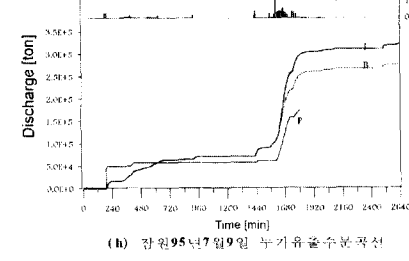
(e) 만포95년7월9일 누기유출수분곡선



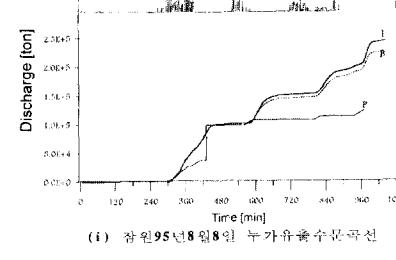
(f) 만포95년8월8일 누기유출수분곡선



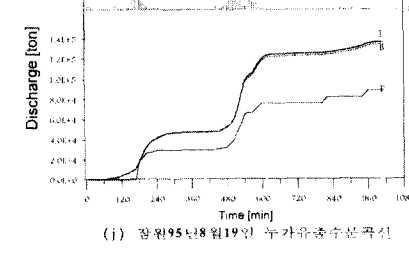
(g) 만포95년8월19일 누기유출수분곡선



(h) 강원95년7월9일 누기유출수분곡선



(i) 강원95년8월8일 누기유출수분곡선



(j) 강원95년8월19일 누기유출수분곡선

(범례) I : ILLUDAS, B : BRRL, P : Pump 토출량 + 저류량 증감분

그림 2. 누기유출수분곡선 비교

빗물펌프장 유역에 1995. 8. 8 발생한 강우사상과 반포빗물펌프장 유역에 1995. 8. 19 발생한 강우사상의 경우에서 실측 수문곡선의 형태와 모의된 수문곡선의 형태가 상이할 뿐 나머지의 경우에는 모두 일치하였다. 또한 누가유출수문곡선의 경향에 대해서는 서초빗물펌프장 유역에 1990. 9. 11, 1995. 7. 9, 1995. 8. 19 각각 발생한 강우사상과 반포빗물펌프장 유역에 1995. 7. 9, 1995. 8. 8, 1995. 8. 19 각각 발생한 강우사상의 경우에서 실측 누가홍수유출량이 BRRL모형에 의하여 모의된 누가홍수유출량보다 큰 경향을 보이고 있음을 확인하였고 수위기록지의 자료상태가 양호하지 않아 실측 홍수유출량 계산시 침수정의 저류량 증가를 고려하지 못한 잠원빗물펌프장 유역에 1995. 7. 9, 1995. 8. 8 각각 발생한 강우사상의 경우에서도 실제 홍수유출량은 펌프토출량보다 다소 크게 될 것이므로 안전한 펌프운영을 위하여 반포, 서초, 잠원빗물펌프장 유역에 적용할 도시홍수유출모형을 ILLUDAS 모형으로 선정하였다.

## 2.3 빗물펌프장 운영프로그램

### 2.3.1 목적함수 및 시스템 제약조건

본 연구의 목적함수인 펌프가동대수  $n$ 은 강우강도  $I$  및 강우지속기간  $t$ 의 함수로 표시할 수 있다. 동시에 펌프가동대수  $n$ 은 특정시간대에 해당유역에서 발생한 유출량을 펌프로 일부 배제할 때 남는 저류량의 크기에 영향을 받으므로 강우지속기간중 특정시간대에 유수지내로 유입되는 홍수량  $V_t$  및 펌핑을 통한 토출량  $[P_i]_t$ 의 함수로 표시할 수 있다.

$$n = f(I, t) = f(V_t, \sum_{i=1}^n \Sigma(P_i)_t) \quad (7)$$

빗물펌프장의 펌프가동운영모형에서 고려하여야 할 제약조건은 다음과 같다. 첫째, 유수지내 저류능가량이 최대저류량  $V_{max}$ 를 넘을 수 없다.

$$\int_0^t (V_t - [P_i]_t) dt \leq V_{max} \quad (8)$$

둘째, 펌핑을 통한 토출시 하도의 수위가 설계홍수위보다 낮아야 하고 하도의 수위가 설계홍수위와 같게 되는 시점에서 펌핑을 멈추어야 하며, 하도의 수위가 설계홍수위보다 낮아질 때 다시 펌핑을 재개할 수 있다. 또한,

유수지 수위가 수문바닥 수위보다 적어지기 시작할 때 다시 펌핑을 멈춘다.

$$[P_i]_{t-end} \begin{cases} \text{펌핑시 } h_{out}(h_{out})_{max} \\ h_{in} = \text{수문바닥수위 } (h_{in})_d, (h_{in})_d \approx 0 \end{cases} \quad (9)$$

여기서,  $h_{out}$ 은 하도수위,  $(h_{out})_{max}$ 는 설계홍수위,  $h_{in}$ 은 유수지 수위,  $(h_{in})_d$ 는 유수지 수위와 수문바닥 수위와의 차이이다. 또한 서울시 관내 하천제방 안전도검토 및 치수종합대책수립 기본계획보고서(서울특별시, 1992a)에 의하면 서울특별시에서는 관내 한강에 대하여 계획홍수위 보다 높은 제방을 축조함으로써 홍수시 외수범람에 의한 침수피해를 예방할 수 있게 되었으므로 위수에 의한 피해를 고려하지 않았다.

### 2.3.2 운영프로그램 개발

펌프가동을 효율적으로 하기 위하여 작성하는 운영프로그램은 펌프장의 시설능력 한계를 검토한 후 여러 종류의 강우사상에 따라 가동하여야 할 펌프의 대수를 정하는 과정으로 이루어진다. 첫째, 펌프장의 시설능력한계를 검토하기 위하여 연구대상유역의 홍수유출모형으로 선정된 ILLUDAS모형으로 재현기간 10, 20, 30, 50, 100년의 강우사상에 대하여 유출수문곡선을 모의한 후 누가유출수문곡선으로부터 일정시간 간격마다의 누가유출량을 입력자료로 활용하였으며 펌프를 모두 가동할 경우 유수지나 침수정에 저류된 물이 최대저류량  $V_{max}$ 를 초과하는 시점의 강우강도 및 강우지속기간을 재현기간별로 구하였다. 이 때 강우지속기간  $t$ 는 유출지속기간과 동일하다고 가정하였다. 둘째, 여러 종류의 강우사상에 따라 가동하여야 할 펌프의 대수를 정하기 위하여 먼저 유수지나 침수정에 저류된 물의 양이 각 펌프장에서 보유하고 있는 펌프 중 가장 작은 용량의 펌프로 배제할 수 있는 물량 이상이 되는 시점부터 가장 작은 용량의 펌프 하나를 가동하면서  $\Delta t$  시간 후에 유수지 및 침수정의 저류량을 그 다음 크기의 용량을 갖는 펌프 1대의 펌프토출량과 비교하여 저류량이 이보다 작을 때에는 펌프의 가동운영을 기존대로 계속하고 다시  $\Delta t$  시간후에 저류량이 이보다 같거나 많을 때에는 그 다음 크기의 용량을 갖는 펌프를 1대 더 가동하고 이 때의 펌프가동 총대수와 펌프를 하나 더 가동하게 된 시점을 구하였다. 이러한 작업은 재현기간별로 각 펌프장에서 보유하고 있는 펌



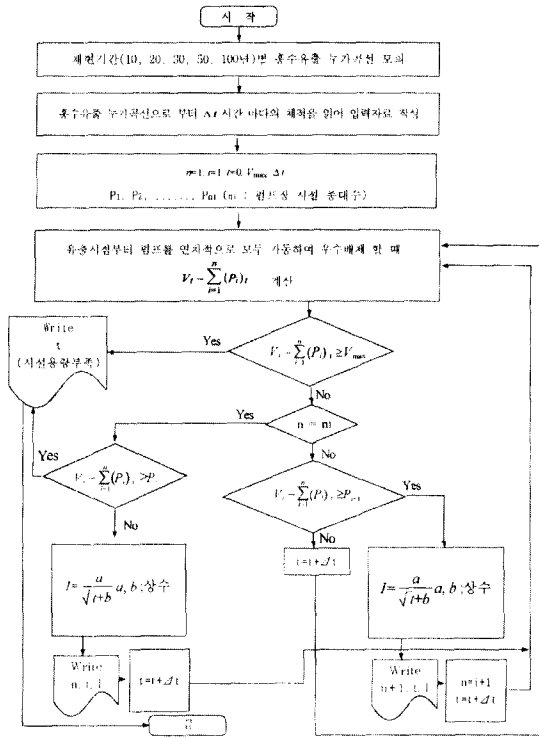


그림 3. 펌프운영 프로그램 흐름도

프를 모두 가동할 때까지를 가정하여 반복적으로 행하여졌다. 셋째, 이렇게 구해진 재현기간별 펌프가동대수(n)와 강우지속기간(t)을 이용하여 강우강도 지속기간-재현기간 관계식으로부터 재현기간별 지속기간에 따른 강우강도(D)를 구하는 작업을 시행하였다. 이때 강우지속기간(t)은 재현기간 10~100년의 강우사상을 입력하여 ILLUDAS 모형으로 유출수문곡선을 모의한 결과 강우시점으로 부터 약 5분 후부터는 유출이 시작되는 것으로 확인되었으므로 강우시점과 유출시점이 별로 차이가 없다는 점을 감안하여 곧바로 유출지속기간과 동일하다고 보았다. 그림 3은 펌프운영 프로그램 흐름도는 펌프대수 결정을 위한 프로그램 작성과정을 잘 설명해 주고 있다.

여기서, P<sub>i</sub>는 작은 용량의 펌프부터 큰 용량의 펌프순으로 i번째의 펌프토출량을 말하며 I는 강우강도, t는 강우지속기간, a, b는 강우강도식의 상수이다. 마지막으로 이러한 작업으로부터 얻은 결과를 이용하여 강우강도와 지속기간에 따른 펌프가동대수를 결정하는 펌프운영기준표를 작성하였다. 펌프운영기준표 작성시에는 재현기간 10, 20, 30, 50, 100년의 강우사상을 선

정하여 강우와 유출량, 유출량과 펌프가동대수의 관계 프로그램으로 부터 각 재현기간마다 강우지속기간에 따른 강우강도와 펌프가동 필요대수를 계산하였으며 방안지제 t와 I 및 n의 관계로 도시 한 후 등가동펌프대수선을 선형보간(linear interpolation)하여 연결하는 방법으로 작성하였다. 각 펌프장에서 보유한 펌프 규모와 용량은 표 1과 같으며 재현기간별 지속기간에 따른 강우강도식은 한국건설기술연구원에서 조사분석하고 '87수해백서보고서(서울특별시, 1988)와 하수도 기본계획 재정비 보고서(서울특별시, 1992b)에서 추천한 강우강도식을 사용하였다. 표 4~6은 각각 반포, 서초, 잠원빗물펌프장의 경우 강우강도와 지속기간에 따라 결정된 펌프 가동대수를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 앞으로 있을 수 있는 어떤 특정 강우강도 및 지속기간을 갖는 강우사상에서도 안전하게 빗물펌프를 가동할 수 있도록 펌프운영 프로그램을 개발하였으며, 근본적으로는 펌프장의 자동화된 운영시스템의 구축을 전제로 연구를 수행하였다. 따라서 강우가 발생하면 해당유역을 대표하는 지점에 설치된 강우량계 등으로 부터 일정시간 간격별로 강우량을 실시간(real time)으로 진송받아



간과 강우량을 전단계의 자료들과 합산하고 새로운 강우강도를 결정하여야 하며 변화된 저류량  $V_t - [R]_t$ 를 토출하기 위한 펌프 가동대수 결정을 위하여 펌프운영기준표를 다시 참고하여야 하는 번거로움이 있을 수 있다. 그러나 이러한 방법조차 그동안 빗물펌프가동을 직관에만 의존하여 행하여왔던 펌프장 관리인들에게는 펌프장 운영을 더욱 효율적으로 수행하기 위한 객관적인 수단으로 활용되어질 것으로 기대된다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 빗물펌프의 가동이 펌프장 관리인의 직관에 의하여 시행되는 등 주먹구구식으로 이루어지고 있어 홍수시 내수침수피해를 가중시킬 수 있다는 판단 아래 과학적이고 합리적인 펌프장 관리를 유도하기 위하여 반포, 서초, 잠원빗물펌프장 유역에 대하여 우수지·펌프장의 운영프로그램을 작성함으로써 적절한 운영대안을 제시하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 도시유역에서의 홍수유출량 산정을 위하여 이미 개발되어 있는 합리식, BRRL 모형 그리고 ILLUDAS 모형의 3가지 방법을 연구대상유역인 반포, 서초, 잠원빗물펌프장 유역에 적용하여 검증한 결과, 이 중 ILLUDAS 모형이 가장 좋은 결과를 보여 위 3개 유역에 대하여 ILLUDAS 모형을 홍수유출량 산정을 위한 적정 모형으로 선정하였다.

(2) 동적모의방법에 의하여 작성된 펌프운영프로그램으로 반포, 서초 및 잠원빗물펌프장의 펌프가 동시점 및 가동대수 등을 정량화 함으로써 펌프관리인으로 하여금 운영지침으로 활용할 수 있도록 하였다. 운영프로그램은 우수지 저류량 및 펌프 토출량의 상관관계에 의하여 작성된 것으로 과학적이고 효율적인 우수지·펌프장 관리에 기여할 것으로 판단된다. 다만, 서울특별시의 경우만 하더라도 1995년 현재 89개의 우수지·펌프장을 운영하고 있고 유역별로 지형학적, 기상학적 인자가 상이하므로 우수지·펌프장별로 펌프운영프로그램을 작성하여 적정한 운영기준을 마련해 나아가는 노력이 필요하다. 또한, 본 연구는 근본적으로 펌프장의 자동화된 운영시스템 구축을 전제로 수행된 것으로서, 가까운 미래에 우수지·펌프장 운영체계의 전자통화가 실현되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

서울특별시 (1988). '87 수해백서 보고서.

서울특별시 (1991). 하천연안 수공구조물 안전진단 및 관리대책 조사연구 보고서.

서울특별시 (1992a). 서울시 관내 하천제방 안전도검토 및 치수종합대책수립 기본계획 보고서.

서울특별시 (1992b). 하수도 기본계획 재정비 보고서 부록(우수배제 펌프장편).

서울특별시 (1992c). '90 수해백서 보고서.

윤용남, 전병호, 이종태 (1992). 도시홍수 재해방지를 위한 내수처리시스템 분석 및 설계기법의 개발. 한국과학재단.

원석연 (1993). 유역 및 하도 홍수추적방법을 결합시킨 도시하천의 유출해석모형. 박사학위논문, 고려대학교.

이길성, 이범희 (1995). "동적계획법을 이용한 우수체계의 최적설계." 한국수문학회지, 제28권, pp. 153-168.

이원환, 조원철, 심재현 (1992). "퍼지 제어기법을 사용한 우수배제펌프의 조작기법 개발." 대한토목학회 논문집, 제12권, 제3호, pp. 107-114.

한국수문학회 (1988). 도시수문학, 1988년도 도시수문학 심포지움 논문집.

한국수문학회 (1993). 제1회 수공학 워크샵.

한국토지개발공사 (1989). 도시수규모 단지의 우수유출량 산정기법에 관한 연구. 한국건설기술연구원.

Bellmann, R. and Kalaba, R. (1965). *Dynamic Programming and Modern Control Theory*. Academic Press, New York.

Grygier, J.C. and Stedinger, J.R. (1985). "Algorithms for optimizing hydropower system operation." *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-10.

Huff, F.A. (1967). "Time distribution of rainfall in heavy storms." *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.

Izzard, C.F. (1944). "The surface profiles of overland flow." *Trans. Amer. Geophysical Union*, Part IV.

Lakatos, D.F. (1976). "Penn state runoff model for the analysis of timing of subwatershed response to storms." *Proc. of the Nat'l Symp. on Urban Hydrology, Hydraulics, and Sediment Control*, Univ. of Kentucky, Lexington, Ky.

- Larson, R.E. and Casti, J.L. (1982). *Principles of Dynamic Programming*. Marcel Dekker.
- Mays, L.W. and Bedient, P.B. (1982). "Model for optimal size and location of detention." *J. Water Resources Planning and Management Div.*, ASCE, Vol. 108, No. WR3, pp. 270-285.
- Mulvaney, T.J. (1850). "On the use of self registering rain and flood gauges in making observations on the relation of rainfall and of flood discharges in a given catchment." *Trans. Inst. Civ. Eng.*, Ireland.
- Ormsbee, L.E., Houck, M.H. and Delleur, L.W. (1987). "Design of dual purpose detention systems using dynamic programming." *J. Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 113, No. WR 4, pp. 471-484.
- Terstrick, M.L. and Stall, J.B. (1974). *The Illinois urban drainage area simulator*. ILLUDAS, Illinois State Water Survey Bulletin 58.
- Tholin, A.L. and Keifer, C.J. (1960). "Hydrology of urban runoff." *Trans. ASCE*, Vol. 125, pp. 1308-1379.
- U.S. Army Corps of Engineers (1974). *Urban stormwater runoff-STORM*. Computer Program 723-58 L2520, Hydrologic Engineering Center, Davis, California.
- U.S. Environmental Protection Agency (1971). *Storm water management model*. Vol. 1.
- Watkins, L.H. (1962). *The design of urban sewer systems*. Road Res. Lab., Tech. Paper 55.
- Yen, B.C. (1981). "Some measures for evaluation and comparison of simulation models." *2nd International Conference on Urban Storm Drainage*, Urbana, Illinois.

<최종본 접수일 : 1998년 1월 20일>