

집중호우 시 도시 소유역 배수펌프장 운영을 위한 강우유출모의

Runoff simulation for operation of small urban storm water
pumping station under heavy storm rainfall conditions

길 경 익⁺ / 한 종 옥^{**} / 김 성 근^{***} / 이 창 노^{****} / 김 구 현^{*****}
Kyung-Ik Gil⁺ / Jong-Ok Han^{**} / Sung-Keun Kim^{***} /
Chang-No Lee^{****} / Goo-Hyun Kim^{*****}

:: Abstract ::

In this study, runoff simulation was carried out in order to derive operational improvement of small urban storm water pumping station under heavy storm rainfall conditions. The flood inflow hydrograph of Guri city heavy storm in July, 2001 was successfully simulated by HEC-HMS, a GIS-based runoff simulation model. For the runoff simulation, ArcView, as an effective GIS tool, was used to provide input data of the model such as land use data, soil distribution data and SCS runoff curve number.

Keywords: Geographical information system, HEC-HMS, Heavy storm rainfall, Pumping station, Runoff simulation

:: 요 지 ::

본 연구에서는 도시 소유역에 위치한 배수펌프장의 집중호우 시 운영 개선방안을 도출하기 위한 기초연구로서 강우유출을 모의하고자 하였다. 이를 위해 GIS 근간의 강우유출 모의 모델인 HEC-HMS를 활용하였으며, 2001년 7월 구리시에 발생한 집중호우에 대한 홍수유출수문곡선을 모의 할 수 있었다. 이때 강우유출 모의에 필요한 유역의 토지이용현황, 토양형 및 유출곡선지수 등의 모델 입력 자료는 ArcView GIS 툴과 수치지도 자료를 활용하여 산정할 수 있었다.

핵심용어: 지리정보시스템, HEC-HMS, 집중호우, 배수 펌프장, 강우유출 모의

+ To whom corresponds should be addressed. kgil@snut.ac.kr

* 서울산업대학교 토목공학과 교수·공학박사

** 서울산업대학교 토목공학과 교수·공학박사

*** 서울산업대학교 토목공학과 교수·공학박사

**** 서울산업대학교 토목공학과 교수·공학박사

***** 구리시청 수도과 급수팀장

1. 서론

하절기 고온다습한 북태평양 고기압의 영향으로 인해 연간 총 우량의 85% 이상이 여름철에 집중 발생된다는 것이 우리나라 강우의 주요 특징으로 알려져 있다. 그러나 최근 각 처에서 발생한 대규모 홍수피해 및 여러 침수피해에서 볼 때 이러한 계절적 호우의 특징 보다는 빈발하는 국지성 집중호우로 인한 위험도가 더욱 심각한 것으로 지적되고 있다. 하수관망의 능력을 초과하는 국부적인 집중호우는 하수관거, 우수지, 배수펌프장, 등과 같은 도시 내 배수시스템에 과부하를 일으키고 하수역류 및 우수지 침수 등의 문제를 초래한다. 또한 도시화와 수반되는 각종 개발사업의 증가로 인해 기존 하수관망의 통수능 부족, 하도 복개에 따른 지표면 유출경로의 변경, 하수관망 및 배수펌프장의 운영상의 문제가 가중되어 집중호우 시 도시 소유역의 침수범람 피해가 빈발하고 있는 실정이다. 따라서 내수배제가 곤란한 도시 배수구역의 경우에는 근본적인 침수 방지대책의 수립과 함께 집중호우 시 침수에 대비한 배수펌프장 운영 개선방안이 절실히 요구된다. 또한 도시 소유역의 내수배제 시스템인 배수펌프장이 집중 호우 시 침수 범람에 대비하여 효율적으로 운영되기 위해서는 신뢰성 있는 정확한 강우유출 모의결과의 획득이 필요하다.

한편 강우유출을 모의하기 위한 시스템의 구축 과정에서 어려운 점의 하나는 유역의 토지이용현황, 토양형 및 유출곡선지수 등의 중요 모델 입력 자료를 획득하고 결정하는 것이다. 본 연구에서는 강우유출 모의 과정에서 주관적일 수 있는 이러한 중요 모델 입력자료의 결정을 일관성을 가지고 수행하는 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 ArcView GIS 툴과 수치지도 자료의 활용과 같은 GIS 기법을 도입하였다.

2. 연구방법

2.1 적용 모형

강우유출을 모의하기 위한 모형으로는 GIS 기

반 수문모형인 HEC-HMS(Hydrologic Modeling System)을 사용하였는데, GIS (Geographical Information System) 기법은 대상 지역의 제한을 받을 필요가 없고 필요한 정보만을 다양한 포맷으로 활용할 수 있기 때문에 최근 여러 학문분야에서 그 적용에 관한 관심이 고조되고 있다(김계현, 2000; 김채승과 윤창진, 1999). HEC-HMS 모형은 미공병단 수공연구센터(Hydrologic Engineering Center)의 차세대 Software 개발 프로젝트에 의해 1998년에 개발되었다(US Army Corps of Engineers, 1998).

HEC-HMS는 모의를 위한 시간관련 정보 등을 구성하는 Control model, 유역과 유로의 특성, 수문구성요소간의 연계성에 대한 자료를 포함하고 있는 Basin model, 강우자료를 포함하고 있는 Meteorological model로 구성되어 있다. 또한 강우자료로부터 유출량을 산정하는 방법으로서 Clark 합성단위도법, Snyder 합성단위도법, SCS 합성단위도법 및 사용자가 입력한 단위도법을 선택하여 이용할 수 있다. 강우자료는 총강우량을 입력하여 특정한 분포형태를 선택하거나 우량관측소 자료를 시계열형태로 입력할 수 있으며, 유역내의 강우분포가 다를 경우 여러 개의 우량관측소 자료를 동시에 모의에 적용할 수도 있다. HEC-HMS의 주요 입력 자료로는 유역면적, 유로연장, 유로경사, 조도계수, 손실량 계산방법과 매개변수, 강우-유출계산방법과 매개변수, 강우자료, 하도단면자료 등이 있다.

HEC-HMS는 최근의 PC발전과 추세를 같이 하여 Windows 운영체제하의 GUI 체계를 이용한 것으로 각종 조건의 입력이 용이하여 다양한 모의 조건하에서 손쉽게 출력을 비교분석 및 보정할 수 있으며 한번 구축한 유역 및 하도의 특성이 변하지 않는 한 간단한 조작으로 실시간대 강우-유출 모의 및 예상 강우에 대한 홍수량의 모의가 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 HEC-HMS 내부 Module로는 GIS 공간자료를 이용할 수 없는 단점이 있는 데, 최근 미국의 Texas 대학에서 개발되어 사용하고 있는

Arcview Script인 CRWR-PrePro를 이용하여 Arcview 프로그램에서 DEM(Digital Elevation Model)과 국립지리원 수치지도(DXF)로부터 HEC-HMS 입력파일을 생성하여 사용할 수 있다. Fig. 1은 CRWR-PrePro가 Arcview Extension으로 사용되어 수치지도 자료로부터 추출된 유역특성을 포함하여 HEC-HMS에서 사용될 Map File과 Basin File을 생성하는 절차를 간단히 나타낸 것이다.

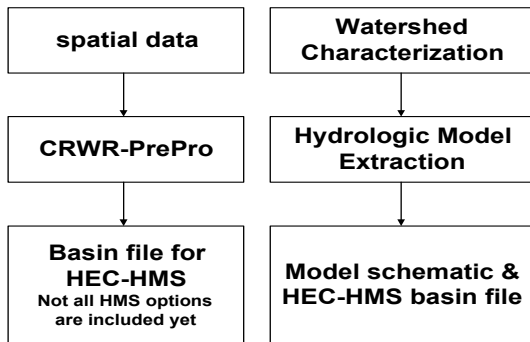


Fig. 1 Processes of CRWR-PrePro

2.2 연구 대상 호우 및 연구절차

본 연구에서는 경기도 구리시 수택배수펌프장 지역에 2001년 7월 14일과 15일 이틀에 걸쳐 발생한 설계빈도를 초과하는 기록적인 집중호우를 연구대상으로 하였다. 당시 시간당 최대 89.5mm의 집중호우가 내림에 따라 배수펌프장 설계용량을 초과하는 홍수량이 유입되었고, 도심 주택가가 침수되었다.

본 연구의 절차에 있어서는 먼저 대상 호우의

특성 파악과 함께 GIS에 의해 지형, 토양, 토지 피복, 등 유역특성을 분석하였다. 다음으로 유효 우량 산정을 위해 유출곡선지수(CN)를 결정하고, SCS 단위도법의 매개변수를 산정하였다. 마지막으로 강우-유출 모의를 위해 구축한 HEC-HMS를 이용하여 유역 최하류단에 위치한 배수펌프장으로 유입되는 홍수량을 산정함으로써 홍수수문곡선을 유도하였다. 한편 본 연구에서 유출곡선지수는 유역분할도와 토지이용도 및 수문학적 토양도 3개 레이어를 ArcView에서 Geoprocessing Wizard로 Intersection 시킨 후 역시 ArcView의 확장프로그램으로 미국 Brigham Young University에서 개발한 WMS-HYDRO Ver. 2.0을 이용하여 각 소유역별 유출곡선지수를 산정하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 유역의 토지이용현황

수택배수펌프장이 위치한 인창천 유역의 면적은 3.985km²로서 소유역에 해당된다. 유역의 동쪽은 산지이고 서쪽 평지는 왕숙천에 인접한 저지대로서 침수피해를 입을 가능성이 높은 지역이다. 유역의 형상은 깔대기(funnel)형으로서 동쪽 산지에서 서쪽 왕숙천쪽 저지대 방향으로 거의 동시에 홍수가 빠른 속도로 집중될 수 있는 유역 형상을 나타내고 있다.

수택배수펌프장 유역의 토지이용현황을 분류 요약하면 Table 1과 같다.

Table 1. Land use of Sutak pumping station watershed

토지이용형태	점유 면적 (m ²)	점유 비율 (%)	비 고
도시	2,190,131	54.95	Built-up area
하천 및 홍수터	14,973	0.38	Common open water and land subject to inundation
논	244,925	6.14	Rice field
산지	1,535,826	38.53	Trees
합 계	3,985,855	100.00	-

Table 1에 나타난 바와 같이 수택배수펌프장 유역은 전체 유역면적중 도시지역이 차지하는 면적이 55%로서 도시화율이 매우 높음을 알 수 있다. 이와 같이 도시화율이 높아지게 되면 불투수 면적의 증가와 더불어 유역내의 자연 하천이 하수관망으로 대체됨으로 인하여 유출을 증가와 홍수도달시간의 단축을 초래하여 궁극적으로 홍수량 증가 및 침투홍수량 증가로 침수가능성을 높이는 결과를 가져오게 된다.

3.2 유역의 토양특성

토양의 특성은 유역특성 및 토지이용과 더불어 강우유출에 결정적인 영향을 미치게 된다. Fig. 2는 수택배수펌프장유역의 토양도를 추출한 것이고, 수택배수펌프장유역의 토양을 특성에 따라 구분하면 Table 2와 같다.

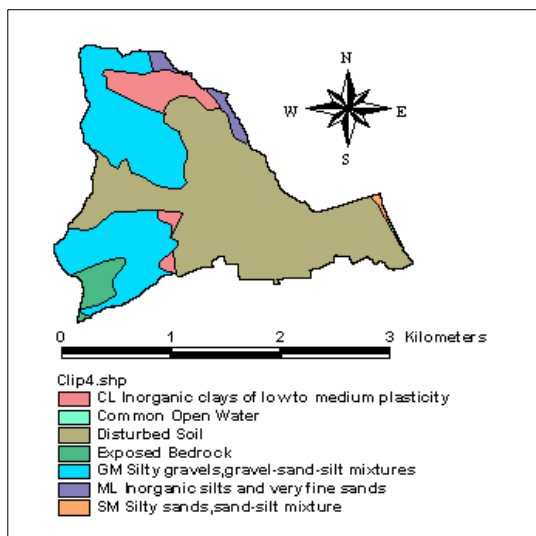


Fig. 2 Soil map of Sutak pumping station watershed

또한 수택배수펌프장유역의 토양형을 미국 토양보존국에서 제시한 4개의 수문학적 토양형으로 분류한 결과 Type A가 전체의 32.2%, Type B가 0.4%, Type C는 2.1%, Type D는 65.3%를 점유하는 것으로 나타났다. 배수가 거의 안되는 Type D가 가장 높은 점유율을 보인 수택

배수펌프장유역의 토양 특징이 집중호우 시 홍수 유출을 증가시키는 요인이 된 것으로 판단된다.

3.3 유역 지체시간 및 하도추적계수

유역 지체시간 (watershed lag time)을 구하는 방법은 매우 다양한 바, 자연유역과 도시유역의 구분 및 도시화율을 고려할 수 있는 미공병단 Tulsa District에서 개발한 방법을 적용하여 지형적인 특성과 도시화율을 고려하여 산정하였다. Tulsa District 방법은 다음과 같다.

1) 자연 유역

$$T_L = 1.42 \left(\frac{L \times L_{ca}}{\sqrt{s}} \right)^{0.39} \quad (1)$$

여기서,

- T_L : watershed lag in hours,
- L : watershed length in miles,
- L_{ca} : length to centroid in miles,
- S : watershed slope in feet per mile

2) 도시 유역

도시유역에 대해서는 도시화 정도에 따라 2개의 공식으로 세분되어 있다.

- 50% 도시화된 유역

$$T_L = 0.92 \left(\frac{L \times L_{ca}}{\sqrt{s}} \right)^{0.39} \quad (2)$$

- 100% 도시화된 유역

$$T_L = 0.59 \left(\frac{L \times L_{ca}}{\sqrt{s}} \right)^{0.39} \quad (3)$$

Fig. 3은 이와 같은 방법으로 각 소유역 별로 산정된 지체시간을 나타내고 있다.

Table 2. Soil composition of Sutak pumping station watershed

토양형	점유 면적 (㎡)	점유 비율 (%)	비 고
CL	290,387	7.29	Inorganic clays of low to medium plasticity
GM	1,283,078	32.19	Silty gravels, gravel-sand-silt mixture
ML	84,340	2.12	Inorganic silts and very fine sands
SM	14,349	0.36	Silty sands, sand-silt mixture
암반	128,335	3.22	Exposed bedrock
하천	2,063	0.05	Common open water
도시 불투수층	2,183,128	54.77	Disturbed soil
합 계	3,985,680	100.00	-

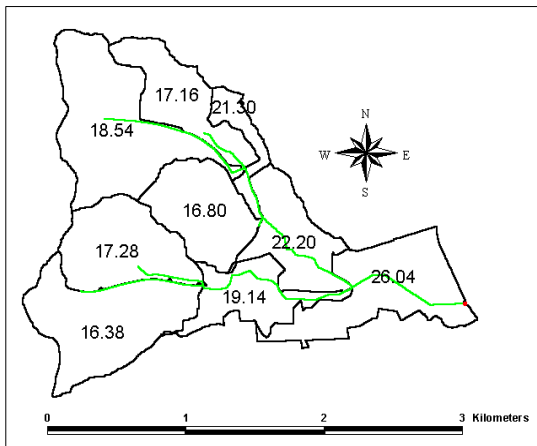


Fig. 3 Lag times for sub-basins (Unit : min)

Fig. 3에 나타난 바와 같이 하류부에 위치한 소유역들은 유역경사가 완만한 평지를 형성하고 있어서 산지 유역들에 비하여 유역지체시간이 비교적 길게 나타나고 있다. 유역 최하류단에 위치한 수탁배수펌프장으로 유입되는 홍수량을 산정할 때에는 Fig. 3에 제시된 바와 같이 지체시간을 산정하여 홍수수문곡선을 계산하게 된다.

유역에서 발생한 홍수는 하도를 따라 하류로 전파되게 되는데 이를 모의하기 위해서는 하도홍수추적을 수행해야 한다. 하도추적을 수행하는 구간은 상류 유역으로부터 홍수량이 유입되는 하류부 유역의 하도들로서 본 연구에서 분할한 수탁배수펌프장유역의 경우 4개의 하도추적구간이 생긴다. 본 연구에서는 Muskingum 하도추적기법을 이용하여 하도홍수추적을 수행하였다.

Muskingum 저류상수 K는 HEC-CRWR

Prepro에서 유로연장과 하도경사 및 평균유속을 이용하여 자동으로 산정하였고, 유입량이 하도저류량에 미치는 효과를 나타내는 계수 x 는 추적구간에 대한 유출기록이 없을 경우에 일반적으로 적용하는 값 0.2를 적용하였다. 그리고 하도홍수추적 시 하도구간에서의 홍수와 유하시간에 따라 구간을 세분하여 하도홍수추적을 수행하게 되는 바, 본 연구에서 홍수추적을 10분 간격으로 수행할 경우에 대하여 하도 세분을 위한 구간수를 산정한 결과 1개 하도구간을 제외하고는 모두 2개의 구간으로 세분하여 하도홍수추적을 수행하도록 하였다. Fig. 4는 각 하도홍수추적구간별로 Muskingum K, 하도구간분할 수, Muskingum x 를 나타낸 것이다.

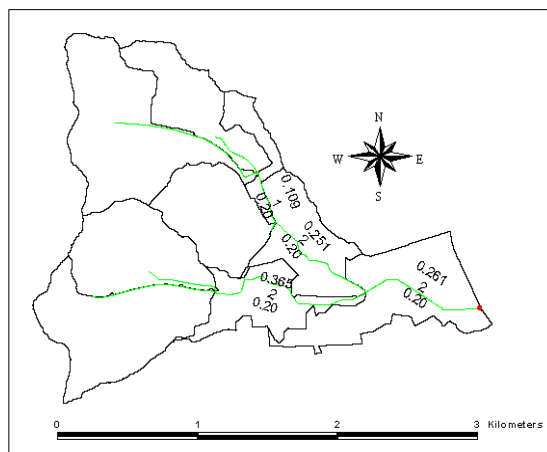


Fig. 4 Muskingum K, number of segments, and x

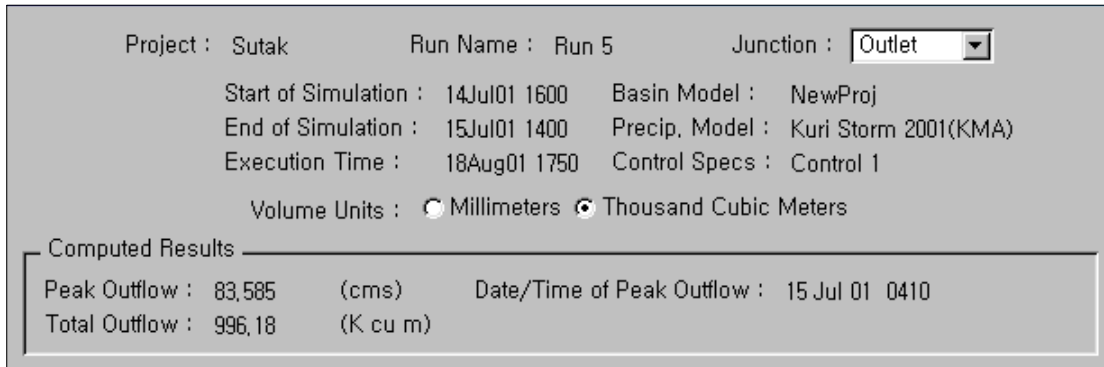


Fig. 5 Summary of flood hydrograph simulation

본 연구에서 산정된 유역 지체시간과 하도추적 계수를 이용하여 유역 최상류단으로부터 인창천 하구 최하류단 까지 홍수가 유입되는데 소요되는 시간을 산정한 결과 37분으로서 기존 수택배수 펌프장 설계시 적용한 유입시간 35분과 비슷한 결과가 나타났다.

3.4 강우유출모의 결과

본 연구에서 산정된 소유역별 유출곡선지수, 유역지체시간, 하도추적계수, 기록 강우자료 등을 입력하여 2001년 7월 14일 16:00부터 7월 15일 14:00까지 22 시간에 대하여 강우유출량을 산정하였다. Fig. 5는 수택배수펌프장 지점의 홍수수문곡선 산정 결과에 대한 사항을 요약하여 제시한 HEC-HMS 출력 도표이다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 첨두유출량은 7월 15일 04:10에 84m³/sec가 발생한 것으로 나타나 수택배수 펌프장 설계 시 적용했던 홍수유입수문곡선의 첨두유출량 72m³/sec의 117%에 해당하며(구리시, 1991), 총 유출용적은 996,180m³(평균 유출고 250mm)로서 유출계수는 0.80으로 나타났다.

그리고 유역 총 유출용적은 99만 6천톤으로서 우수지용량 3만7,000톤(구리시, 1991)의 27배를 넘는 양이었으며, 특히 호우가 집중된 7월 15일 새벽 02시에서 04시 사이에 2시간 동안 158mm의 강우가 내렸고, 이때 2시간 30분 동안 유입된 최대 홍수량만 하더라도 61만톤에 이르러 같은 시간 동안에 유입되는 설계홍수유입량

28만톤의 218%에 해당하는 양이었던 것으로 나타났다.

4. 결 론

2001년 7월 구리시에 발생한 집중호우를 대상으로 강우유출을 모의하였다. 집중호우 시 도시 소유역 배수펌프장 운영 개선안을 도출하기 위해 기본정보가 되는 강우유출 모의를 HEC-HMS 모형과 GIS 기법을 활용하여 수행할 수 있었다. HEC-HMS 모형과 GIS 기법을 적용하여 본 연구에서 얻은 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 수택배수펌프장유역의 토양형을 미국 토양 보존국에서 제시한 4개의 수문학적 토양형으로 분류한 결과, 배수가 거의 안 되는 Type D가 가장 높은 점유율을 보인 특징이 집중호우 시 홍수유출을 증가시키는 요인이 된 것으로 판단되었다.
- 2) 산정된 유역 지체시간과 하도추적계수를 이용하여 유역 최상류단으로부터 인창천 하구 최하류단 까지 홍수가 유입되는데 소요되는 시간을 산정한 결과 37분으로서 기존 수택배수펌프장 설계 시 적용한 유입시간 35분과 비슷하였다.
- 3) 첨두유출량은 7월 15일 04:10에 84m³/sec가 발생한 것으로 나타났고, 총 유출용적은 99만 6천톤으로서 우수지용량 3만

7천톤의 27배를 넘는 양이었다. 호우가 집중된 시기는 7월 15일 새벽 02시에서 04시 사이였다.

- 4) 유출곡선지수, 유역지체시간과 하도추적계수 등 강우유출 모의 과정에 필요한 매개변수의 산정을 위해 수문모형구축과정에서 GIS 기법을 적용할 수 있었다.

참고문헌

1. 김계현, GIS 개론, 대영사 - 제1장 GIS 특성

및 제3장 GIS 의 주요활용분야, pp. 1-49, 2000

2. 김채승, 윤창진, ESRI ArcView 지리정보체계, 대영사 pp. 355-370, 1999
3. US Army Corps of Engineers, *HEC-HMS User's Manual*, Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, pp. (1-1)-(10-7), 1998
4. 구리시, 수탁배수펌프장 시설공사 보고서 - 제5장 수리수문 검토 및 홍수량산정, pp. 53-60, 1991