

GIS를 利用한 수리학적 홍수추적 모형 개발

배종찬*, 김경숙**, 이상호***, 이한구****★

1. 序 論

1.1 研究의 背景 및 目的

GIS(Geographic Information System, 地理情報시스템)는 컴퓨터 Hardware, Software, 지형 자료 및 人的 資源의 集合理로서 각종 형태의 지형 자료로부터 다양한 정보를 효율적으로 抽出, 貯藏, 更新, 操作, 解析하고 그 결과를 Graphic으로 보여주어 시각적 효과를 높일 수 있다(ESRI, 1991). 이렇게 다양한 기능을 갖는 GIS는 1980년대부터 컴퓨터 기술의 혁신적인 발전에 便乘하여 토목, 환경, 지리학, 農學, 林學, 항공측량, 도시계획, 遠隔探查 등 여러 분야에 활용되고 있다.

다목적댐 건설 및 관리, 內陸舟運, 廣域上水道, 調査事業 등의 수자원 사업은 관련 자료의 체계적이고 종합적인 관리가 선행되어야 하며 이러한 작업은 GIS를 활용하므로써 더욱 더 큰 효과를 기대할 수 있다. 본 연구에서는 홍수시 분산형 강우-유출 모형을 개발하고 그에 필요한 입력자료들을 GIS를 이용하여 생성하였으며, 하도추적 모형과 함께 홍수추적 모형을 구성하였다. 그리고 이를 소양강댐 유역에 적용하여 홍수시 댐 유입량을 모의하였다.

1.2 강우-유출 분야의 GIS 활용

최근 고성능 개인용 컴퓨터 보급이 확대되면서 다양한 GIS Software들이 개발되었으며 이 제는 工學 분야 뿐만 아니라 經營學 분야에까지 GIS가 활용되고 있다. 그 중에서 강우-유출 분야에 한정해서 GIS의 기술 개발 동향과 활용에 대한 최근 추세를 요약하면 표 1과 같다. 이러한 연구들은 대부분 강우-유출 모형의 입력자료를 GIS로 처리하는 것들이다.

표 1. 강우-유출 분야에 대한 GIS 적용사례

연구자	년도	연구내용
Hill 등	1987	LANDSAT data를 이용하여 토지이용도를 추출한 후 유효 강우 산정을 위한 Curve Number 계산
Muzik Wolfe 등	1988	Curve Number와 설계홍수량 산정 위한 직접 유출량 계산
	1988	GRASS와 AutoCAD를 이용하여 강우-유출 모형에 적용하기 위한 Hydrologic Response Unit 추출
Vieux 등	1988	Vector GIS를 이용하여 TIN을 생성하고 FEM을 적용하여 유출해석

2. GIS 시스템 및 資料變換 技法 開發

GIS Software 중 현재 세계적으로 널리 사용되고 있는 상업용 Software로는 ARC/INFO, ERDAS, Intergraph, Geovision, IDRISI 등이 있고 共用 Software로는 美 陸軍에서 개발한 GRASS가 있다. 상업용 Software들은 기능이 아주 우수하지만 대단히 高價이며 柔軟性(flexibility)이 부족한 단점이 있다. 共用 Software는 상업용 보다는 다소 기능이 뒤지나 Source code가 전부 공개되어 있고 低價 또는 거의 무료로 보급되고 있는 장점을 가지고 있다. 현재 公社는 ARC/INFO를 보유하고 있으며 GRASS는 시스템공학연구소의 도움을 받아 수자원연구소에 설치하여 본 연구에 활용하였다. 한편 본 연구의 공동 수행자인 시스템공학 연구소에서는 Digitizer, Scanner 등의 장비를 지원하였으며 GIS 자료 구축을 수행하였다.

GIS의 급속한 발전과 보편화에 따라 보다 효율적인 정보 관리 및 시스템 운영에 대한 관심이 증가되고 있으며 자료들과 시스템간의 기능을 互換的으로 共有할 수 있는 방법이 여러 가지로 모색되고 있다. 자료 공유에 있어서 기존에 구축된 Database들을 그대로 사용할 수 있다면 많은 시간과 노력을 절감할 수 있을 것이다. 그러나 초기의 GIS Software들이 개발 되던 시기에는 이러한 문제들이 심각하게 고려되지 않았으므로 대개의 경우 Software마다 다양한 고유의 Data 구조를 가지게 되었다. 그러나 Software간에 공통 Data Format(common

*, ***, **** 한국수자원공사 수자원 연구소 연구원, 선임연구원, 연구원
** 시스템공학연구소 선임연구원

data transfer format, CDTF)이 존재하는 경우는 상당히 편리하게 자료 공유가 가능해진다. 본 연구에서는 ARC/INFO 자료를 GRASS Data Format으로 변환시키는 방법을 개발하였으며 실제로 강우-유출 모형에 필요한 입력 자료들을 ARC/INFO와 GRASS를 동시에 사용하여 生成하였는데 이렇게 함으로써 ARC/INFO와 GRASS 두 Software가 가지는 기능상의 장점들을 충분히 활용할 수 있었다.

3. 洪水追跡 模型의 開發

3.1 模型의 構成

현재 水資源公社는 각 다목적댐의 홍수시 저수지 관리를 위해 概念的 模型 (conceptual model) 中 집중형(Lumped) 모형인 貯溜函數法에 의한 모형을 사용하고 있다. 그러나, 위 모형은 소양강댐, 충주댐과 같은 大流域에 적용하는 것은 무리가 있다. 실제로 이 모형은 기록된 강우와 유출량만을 기본으로 하여 모형의 媒介變數를 推定하기 때문에 사용되는 홍수 사상에 따라 모형의 매개변수가 바뀌어 유출량 예측에 있어서 信賴性이 뒤떨어진다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 유역의 지형적 特性因子를 최대한 고려하는 分散型 모형을 개발하였다.

分散型 모형을 위한 기본적인 이론들은 잘 정립되어 있지만 大流域에 적용하기에는 필요한 입력자료들이 과다하기 때문에 현실적으로 거의 불가능했던 것도 사실이다. 하지만 최근 GIS 기술의 발달로 GIS가 가지는 탁월한 기능들을 활용한다면 입력자료 문제는 쉽게 해결할 수 있기 때문에 分散型 모형도 대유역에 적용시킬 수 있는 여건이 조성되었다고 하겠다.

일반적으로 홍수사건에 대한 模型(event model)에 의한 유출량 산정은 강우 관측, 有效降雨量 算定, 流出 計算, 模型 補正 등의 순서를 거쳐 이루어진다. 각 과정마다 다양한 방법들이 개발되어 있지만 본 연구에서는 GIS의 기능을 최대한 활용하기 위해서 그림 1과 같이 강우-유출 모형을 구성하였다. 模型 自動 補正 Module은 이번 연구에서는 고려되지 않았지만 Pattern Search 기법이나 Shuffled Complex Evolution 기법 같은 우수한 Algorithm들이 컴퓨터 프로그램으로 개발되어 있기 때문에 장래 쉽게 추가시킬 수 있을 것이다. 각 Module은 FORTRAN으로 작성되었으며 각각의 기본 개념은 다음과 같이 요약된다.

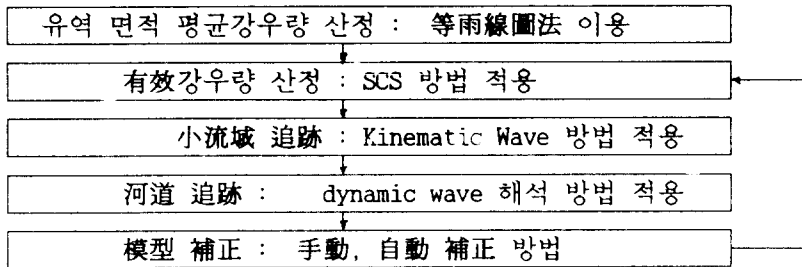


그림 1. 分散型 洪水追跡 模型의 構成圖

3.2 有效 降雨量 算定

강우 관측소에서 관측된 강우자료는 點雨量이므로, 유역을 여러개의 小流域으로 분할하여 강우-유출 해석을 할 때에는 소유역별로 點雨量으로부터 면적 평균 강우량을 산정하여야 한다. 이 방법에는 여러가지가 있지만 현재는 Thiessen網法을 가장 많이 사용하고 있다. 한편 等雨線圖法은 前者보다는 더 정확한 방법이라고 알려져 있지만 현실적으로 이 방법을 적용하기는 대단히 어려웠다. 하지만 이번 연구에서는 GIS Software인 GRASS를 사용하여 等雨線圖法을 쉽게 적용할 수 있는 방법을 개발하였으며 이 방법을 실제 강우-유출 해석에 사용하였다.

면적 평균 강우량으로부터 소유역별 유효 강우량 산정은 잘 알려진 美 土壤 保存局의 SCS 방법으로 실시하였다. 이 방법은 그동안 大流域에 적용하기에는 문제가 있었지만 GIS를 활용함으로써 쉽게 해결하였다.

3.3 小流域 追跡

不定流인 洪水波의 이동을 수학적으로 표시한 St. Venant 방정식의 하나인 운동량 방정식은 慣性力과 壓力, 重力, 摩擦力 및 側方流의 운동량 변화에 지배되지만 경사가 비교적 급한 유역에서의 흐름은 주로 중력과 마찰력에 의해 지배되기 때문에 餘他 項을 무시하더라도 큰 오차를 피할 수 있다. 따라서 Kinematic wave 방법을 이용하여 小流域 追跡을 실시하였다.

3.4 河道 追跡

小流域 追跡으로부터 결과되는 流出量은 하천으로 유입되고 하천을 따라 이동한 후 유역 出口에서의 流出 水文曲線을 형성한다. 자연 하천에서의 흐름은 일반적으로 不定流이며 이러한 현상은 연속 방정식과 운동량 방정식으로 이루어진 St. Venant式을 풀므로써 해석할 수 있다. 본 연구에서는 公社에서 개발한 不定流 해석 프로그램인 LOOPNET(이환기, 1987)를 근간으로 하여 河道 追跡을 실시하였는데 小流域 追跡으로부터 산정되는 각 소유역의 유출 수문곡선은 LOOPNET에서 境界條件 또는 側方유입량으로 사용되도록 하였다.

4. GIS를 이용한 分散型 降雨-流出 模型의 入力 資料 生成

4.1 수치고도도, 유역경사도, 하천망도

본 연구에서 사용된 DEM 자료는 미국의 Defence Mapping Agency에서 제작 보급한 자료를 사용하였으며, 경위도가 3秒 단위로 되어 있다. 이 자료는 비교적 좁은 지역에 사용할 때에는 문제가 없으나, 넓은 지역의 경우에는 영상이 왜곡되므로 幾何學的 補正이 필요하다. 본 연구에서는 GRASS를 사용하여 소양강댐 유역을 포함하는 DEM을 추출해 내고 이 자료를 TM(Transverse Mercator) 좌표계로 변환시킨 후 기하학적 보정을 거쳐 解像度 100m 크기의 DEM을 생성하였다. 유역경사도는 GRASS 상에서 'r.slope, aspect' 명령어를 수행하면 DEM으로부터 바로 생성된다. 또한, 하천망도는 'r.watershed' 명령어를 사용하면 바로 생성된다. 이렇게 생성된 하천망도를 'r.line' 명령어를 사용하여 Vector 형태로 변환시킨 후 ARC/INFO의 line 화일로 만들어 ARCEDIT에서 수정한 후 연구목적에 적합한 하천망도를 생성하였다(그림 2).

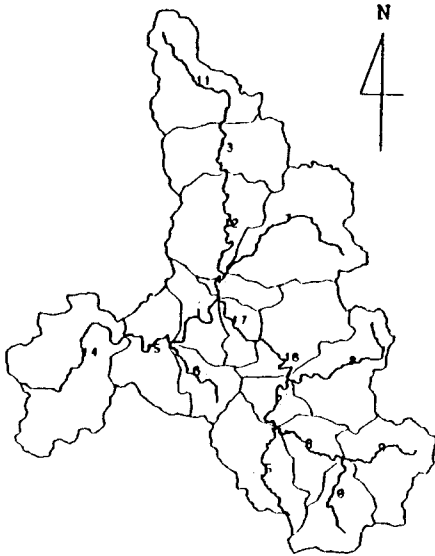


그림 2. 하천망도

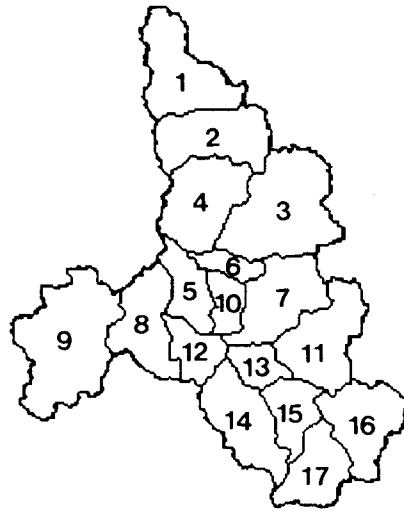


그림 3. 소유역 분할도

4.2 유역경계도, 소유역분할도

소양강댐의 유역경계도는 ARC/INFO에서 clipcoverage로 사용되는 중요한 자료이다. 따라서 이 자료는 1:50,000 지형도 12매를 ARC/INFO를 이용하여 digitizing한 후 mapjoing하여 생성하였다. 소양강댐 유역에 대한 소유역 분할은 1:250,000 지형도에서 유역의 하천망과 지형을 고려하여 실시하였다. 분할된 소유역은 ARC/INFO에서 digitizing한 후 유역경계도로 clipping하여 완전한 소유역분할도를 만들었다(그림 3). 본 연구에서 개발한 모형은 소유역 별로 고유한 매개변수값들을 요구하고 있기 때문에 소유역분할도는 ARC/INFO 나 GRASS에서 소유역별로 입력자료들을 생성하는데 사용된다.

4.3 토양도, 토지이용도

토양도와 토지이용도는 유효강우 산정 방법인 SCS 법의 Curve Number 값 계산을 위한 기본 자료들이다. 본 연구에서는 농촌진흥청 식물환경연구소에서 제작한 개략토양도 (1:50,000, 1971년 版)를 이용하였다. 소양강댐 유역에는 16매의 圖葉이 필요했으며 각 도엽을 tracing하고, scanning한 후 vectorizing하여 ARC/INFO 화일로 만들었다. 한편 소양강

댐 유역에 대한 토지이용도는 과거에 제작된 사례가 없어 환경처 자연환경과에서 제작한 현존식생도(1:50,000, 1990년 版)를 ARC/INFO 화일로 만든 후 일부 보완하여 사용하였다. 현존식생도는 11개가 사용되었는데 각 도엽은 숲, 초지, 기타지역(논, 밭, 물) 등 3개 부류로만 나누어져 있어 토지이용도로 만들기 위해서는 등급을 좀 더 세분할 필요가 있었다.

소양강댐 저수지 水城圖는 GRASS에서 DEM으로부터 추출하고 ARC/INFO로 옮긴 후 polygon 화일로 생성하였다. 생성된 수역도를 식생도에 중첩시키면 숲, 초지, 논·밭 및 물 등 모두 4 등급으로 나누어지는데 이것을 토지이용도로 사용하였다. 한편 SCS법의 Curve Number 값은 토양도와 토지이용도가 가지고 있는 등급의 組合에 의해 정해지기 때문에 ARC/INFO에서 두 도면을 중첩시킨 후 각 조합별로 Curve Number 값을 INFO 화일에 입력시켰다.

4.4 강우관측소 위치도, Thiessen망도, 등우선도

강우관측소 위치도는 각 강우관측소의 TM 좌표값을 입력하여 ARC/INFO와 GRASS에서 각각 생성하였다. Thiessen망도는 UNIX용 ARC/INFO에서 강우관측소 위치도와 'Thiessen' 명령어를 사용하여 생성하였다. 등우선도에 의한 평균 강우량 산정은 매시간 강우관측소별로 관측된 강우량 자료를 이용하여 등우선도를 만든 후 소유역별로 평균 강우량을 산정하여야 하기 때문에 대단히 번거로운 작업이다. 따라서 사실 수작업으로 등우선도를 작성한 후 평균 강우량을 산정하는 것은 대단히 비능률적이다. 본 연구에서는 GRASS상에서 shell script를 사용하여 일괄적으로 등우선도를 작성하고 소유역별 평균 강우량을 계산하는 방법을 개발하였다.

5. 水理學的 追跡을 위한 入力資料

5.1 Kinematic wave 降雨-流出 模型의 자료

일반적으로 尖頭홍수량은 기저유출량에 비해 월등히 크기 때문에 추정된 기저유출량의 정확성 여부는 유출분석 결과에 커다란 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 홍수가 시작될 때 댐지점에 유입되는 유입량을 댐지점에서의 基底유출량이라고 가정하고, 각 소유역에 대해서는 유역 면적을 감안하여 댐 지점에서의 기저유출량에 유역면적비를 곱하여 계산된 값을 사용하였다. 이러한 각 소유역의 基底유출량은 kinematic wave 법에 의해 模擬된 유출량에 단순 가산된다.

지표면 및 하천의 조도계수 유출분석에 중요한 매개변수이며 일반적으로 모형 보정단계에서 정확한 값을 결정한다. 소양강댐 유역은 대부분이 산악지역으로 상당히 균일한 지표면의 피복상태를 가지고 있다고 볼 수 있다. 따라서 지표면의 조도계수는 U.S. Army Corps of Engineers(1985)와 유역의 피복상태를 고려, 유역 전체에 대하여 0.4로 추정하였다.

하천의 조도계수는 하상의 구성물질, 식생의 형태 및 밀도, 하천형상, 하천의 굴곡도 등 여러 요인에 의해 결정되기 때문에 실제로 정확한 값을 추정하는 것은 대단히 어렵다. French(1985)는 하상의 구성물질을 조사하여 조도계수를 추정하는 방법을 자세히 설명하고 있으며, 본 연구에서는 실제로 현장에 출장하여 소양강댐 상류 14개 지점에 대하여 하천 횡단 측량과 함께 하상물질을 조사하였다. 현지 답사한 14개 지점에 대하여 French가 제시하는 방법으로 하천 조도계수를 추정하였으며, 이 값들과 발원지로부터 각 측량지점까지의 流路延長과의 상관관계를 분석하였는데 그림 4와 같이 나타났다. 본 연구에서 적용한 kinematic wave 法에서는 소유역별 主水路에 대하여 하나의 대표적인 하천 조도계수를 요구하고 있기 때문에 그림 4의 상관관계 곡선을 이용하여 소유역의 하천 조도계수를 추정하였다.

하천형상, 하천바닥폭, 하천 兩사면 경사도 소유역마다 하나의 대표적인 값을 필요로 하며, 본 연구에서는 직접 14개 지점의 횡단 측량 성과를 기초로 하여 이 값들을 결정하였다. 측량성과를 이용하여 각 지점의 횡단도를 작성하였으며 작성된 횡단도를 감안하여 하천형상은 梯形으로 가정하였고 이에 따라 하천바닥폭, 하천 兩岸 사면경사를 산정하였다. 하천바닥폭도 발원지로부터 각 지점까지의 유로연장과의 상관관계를 분석하여(그림 5) 입력자료 작성에 이용하였다. 하천 兩岸 사면경사는 14개 지점의 평균값 1:2.3을 일률적으로 사용하였다.

5.2 Dynamic wave 河道追跡 模型의 자료

하도 추적을 위한 LOOPNET 프로그램의 주요 입력자료는 支流유입량, 하천 형상자료 및 하천 조도계수이다. 지류 유입량은 kinematic wave 법에 의해 모의된 각 소유역의 유출 수문곡선이 사용된다. 소양강댐 유역에 대한 하천 횡단자료는 소양강댐 저수지 수심측량 자료(산업기지개발공사, 1983), 인북천(강원도, 1991) 및 내린천(강원도, 1991)의 일부 구간에 대한 하천측량 자료가 있지만 최상류지역에는 기존 자료가 없다. 그래서 최상류지역은 현지

측량을 통하여 획득한 횡단자료로 일부 보완하였다. 하천의 조도계수는 앞의 소유역 추적 단계에서 설명한 방법으로 값을 추정하여 사용하였다.

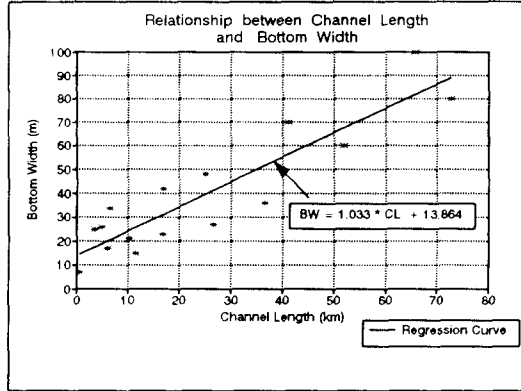
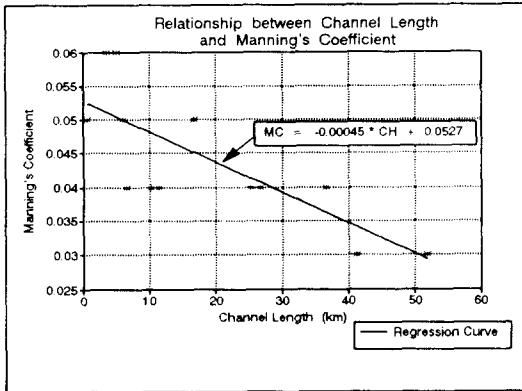


그림 4. 하천 조도계수와 발원지까지의 거리 상관관계 곡선

그림 5. 하천 바닥폭과 발원지까지의 거리 상관관계 곡선

6. 模型 適用

水資源公社는 현재 충주댐을 포함하여 9개의 다목적댐을 관리하고 있다. 본 연구에서는 국내 최대 댐이며 가장 대표적 다목적댐인 소양강댐 유역을 연구 대상 유역으로 선정하였다. 소양강댐은 유역면적이 2,703 km²이며, 높이는 125 m인 砂礫댐이다. 총저수용량은 29 억 m³, 洪水調節容量은 5 억 m³으로서 매년 홍수기에 한강 하류 지역 홍수피해 輕減에 커다란 기여를 하고 있다.

본 연구에서 개발한 강우-유출 모형은 아직 하나의 Package로 완성되지는 못하였다. 따라서 유효강우량 산정, 소유역 추적, 하도 추적 등이 각각 독립적으로 수행되는데, 상위 단계에서 계산된 결과는 하위 단계의 입력자료로 이용된다.

SCS 법의 先行 土壤含水量 條件(AMC)을 II로 가정하여 소양강댐 유역의 '90년 9월 홍수를 분석한 결과 그림 6의 CASE 1과 같이 유출 수문곡선이 模擬되었다. 계산된 尖頭流入量은 11,312 CMS로서 관측치와 비교할 때 약 6% 오차가 있으며 尖頭流入量 발생시각은 29시간째로 관측치와 일치한다. 그리고 총 유출량은 관측된 것의 약 81% 정도가 된다. 그림 4의 유출 수문곡선을 살펴보면 유입량이 증가하는 초기단계에는 모의된 유입량이 관측치보다 적다. 이는 초기손실이 과다하게 평가된 것에 기인된 것으로 판단되며 尖頭유입량이 관측치보다 큰 것은 지표면이나 하천의 조도계수가 실제보다 작게 가정된 결과라고 생각된다.

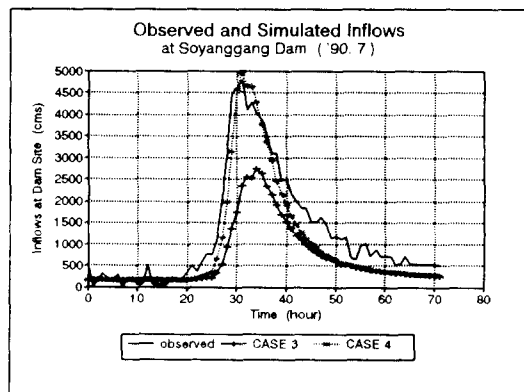
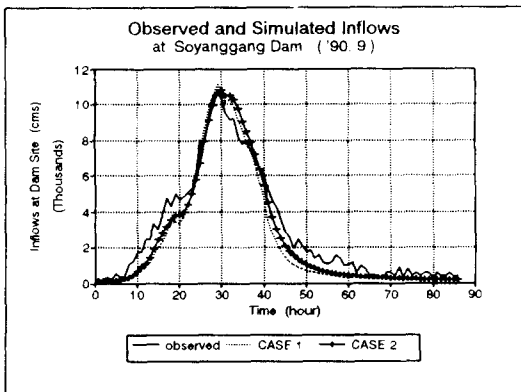


그림 6. 모형 보정 수문곡선('90년 9월 홍수) 그림 7. 모형 검증 수문곡선('90년 7월 홍수)

그림 6의 CASE 1 유출 수문곡선을 보면 초기손실이 과다하게 평가된 것으로 보이므로 SCS 법에서 초기손실량(Ia) 계산부분을 수정하여야 한다. 또한 모의된 유출 수문곡선을 관측된 것과 비교해 볼 때 훨씬 뾰족한 삼각형 형상을 가지므로 지표면이나 하천의 조도계수를 증가시켜 流達시간을 늘려야 한다. 이러한 보정기준을 바탕으로 하여 SCS 법의 초기손실량 부분과 지표면의 조도계수를 수정하여 手動補正을 실시하였는데, 가장 잘 맞는 모의 유출수문곡

선은 그림 6의 CASE 2와 같았으며 이때 $I_a = 0.05S$ 와 지표면 조도계수는 0.7이었다.

이렇게 보정된 모형을 檢證하기 위해서 '90년 7월 홍수를 대상으로 유출 수문곡선을 모의하였다. 先行降雨條件 II 상태로 가정하여 모의한 결과는 그림 7의 CASE 3 곡선과 같았다. 그림에서 보는 바와 같이 모의된 값이 전반적으로 관측치보다 작으므로 流出率을 실제보다 너무 적게 가정한 것이 분명하다. 이번에는 선행강우조건을 III으로 가정하여 유효강우량을 산정한 후 유출 수문곡선을 모의하였는데 그림 7의 CASE 4와 같았으며, 관측된 것과 비교해 볼 때 비교적 잘 일치하는 결과를 낳았다.

7. 結論 및 向後課題

본 연구에서는 기존의 集中型 降雨-流出 模型이 가지는 한계들을 최대한 극복하기 위해서 分散型 模型을 개발하였다. 일반적으로 分散型 강우-유출 모형은 방대한 입력자료를 필요로 하기 때문에, 그동안 기본 이론은 잘 정립되어 있었으나 실제로 대유역을 대상으로 사용할 때에는 대단히 현실성이 결여되어 있었다. 그러나 본 연구에서는 GIS가 가지는 탁월한 기능들을 이용하여 이러한 입력자료 작성 문제를 어느 정도 해결할 수 있었다.

다수의 洪水事象을 대상으로 모형 檢證이 이루어지지는 못했지만, 소양강댐 유역의 '90년 7월 및 9월 홍수로 유출 수문곡선을 모의한 결과를 감안해 볼 때, 모형과 입력자료가 다소 보완된다면 개발된 모형을 現業에서도 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

비록 개발된 모형에 필요한 입력자료들은 많은 부분에서 GIS의 탁월한 기능을 이용하여 용이하게 준비되었지만, 아직도 LOOPNET에 사용되는 하천 횡단자료의 求得은 현지 측량 수단을 동원하지 않고는 어려운 실정이다.

앞으로 본 연구에서 사용된 입력자료 중 가정되었거나 부정확한 자료는 계속적으로 보완되어야 하며, 모형 자동보정 기법도 추가되어 매개변수 추정이 용이하도록 하여야 할 것이다. 또한 개발된 모형에서는 각 단계의 Module이 독립적으로 존재하기 때문에 하나로 연결시켜 Package化하는 것이 필요하고, 각 단계마다 다양한 입력자료들을 용이하게 준비하고 수정할 수 있도록 使用者 連結機能(Graphic User Interface)를 추가하여 사용자들이 본 모형을 실제 업무에서 편리하게 이용할 수 있도록 보완하여야 할 것이다.

參 考 文 獻

강원도, 소양강 하천정비 기본계획, 1991.

강원도, 인북천 하천정비 기본계획, 1991.

산업기지개발공사, 소양강다목적댐 저수지 퇴사량 조사 및 경계표석 설치, 1983.

이환기, "수치모형에 의한 개수로 Network의 부정류 해석," 제8회 한국대담학회 학술발표회, 한국대담학회, 1987.

ESRI(Environmental Systems Research Institute, Inc.), Understanding GIS: The ARC/INFO Method, Redlands, CA, 1991.

French, H. R., Open-channel Hydraulics, McGraw-Hill, pp. 115-158, 1985.

Hill, J.M., V.P. Singh and H. Aminian, "A Computerized Database for Flood Prediction Modeling", *Water Resources Bulletin*, Vol.23, No.1, 1987.

Muzik, I., "Application of GIS to SCS Procedure for Design Flood Hydrographs," *Proceedings of the International Symposium on Modeling in Agricultural, Forest, and Rangeland Hydrology*, Chicago, American Society of Agricultural Engineers, Michigan, 1988.

U. S. Army Corps of Engineers, HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual, The Hydrologic Engineering Center, Davis, CA., 1985.

Vieux, B.E., V.F. Bralts, and L.J. Segerlind, "Finite Element Analysis of Hydrologic Response Areas Using Geographic Information Systems," *Proceedings of the International Symposium on Modeling in Agricultural, Forest, and Rangeland Hydrology*, Chicago, American Society of Agricultural Engineers, Michigan, 1988.

Wolfe, M.L. and C.M.U. Neale, "Input Data Development for a Distributed Parameter Hydrologic Model," *Proceedings of the International Symposium on Modeling and Agricultural, Forest, and Rangeland Hydrology*, Chicago, American Society of Agricultural Engineers, Michigan, 1988.