

섬진강 유역 수문인자 추출을 위한 GIS와 RS의 활용

김지은* · 이근상* · 조기성** · 장영률***

The application of GIS and RS for extracting Sumjin Watershed hydrologic-parameter

Ji-Eun Kim* · Geun-Sang Lee* · Gi-Sung Cho** · Yeong-Yul Jang***

요 약

최근 급속한 인구증가와 산업화로 자연환경이 위협받고 있으며 특히 수자원 부족량과 오염이 큰 문제로 대두되고 있다. 수자원의 효율적인 관리를 위해서는 유역에 대한 정확한 지형인자 및 수문 관련 인자들을 추출해야 한다. 하지만, 아직까지 수문학 분야에서 이와 관련된 자료들이 수작업이나 간단한 연산에 의해 처리되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 GIS와 RS를 활용하여 섬진강 유역에 대한 지형인자 및 수문관련 인자를 추출할 수 있는 알고리즘을 제시함으로써 자료처리 시간의 절감 및 수문자료에 대한 신뢰성을 높일 수 있었다. 유역별 지형특성 및 수문관련 인자 추출 과정은, 먼저 DEM 자료로부터 유역 및 하천을 추출하였고, 토지피복도와 토양도를 중첩하여 유출곡선번호(CN)을 추출하였다. 또한 유역과 하천에 격자연산을 수행하여 유역길이 및 유역길이경사와 같은 지형인자를 추출하였다. 그리고 추출한 지형인자와 평균 곡선번호와의 연산과정을 통해 Muskingum K와 소유역 지체시간과 같은 수문관련 인자를 추출할 수 있는 기법을 제시하였다.

ABSTRACT : Recently, natural environment is being forced by the quick increasing of population and industrialization, and especially, capacity and pollution of water resource is being come to the front. It needs to extract the accurate topological and hydrological parameters of watershed in order to manage water resource efficiently. But, these data are processed yet by manual work and simple operation in hydrologic fields. In this paper, we presented algorithm that could extract topological and hydrological parameters over Sumjin watershed using GIS and RS and it gives the saving of data processing time and

* 순천청암대학 지리정보기술연구소 연구원(Researcher, Research Institute Geographic Information Technology, Suncheon Chongam College, Duckwol-Dong, Suncheon, Chonnam, Korea, 540-260)

** 전북대학교 토목·환경공학부 교수(Professor, Department of Civil and Environment Engineering, Chonbuk National University, Duckjin-Dong, Duckjin-Gu, Chonju, Korea, 561-756)

*** 순천청암대학 지리정보시스템과 교수(Professor, Department of Geographic Information System, Suncheon Chongam College, Duckwol-Dong, Suncheon, Chonnam, Korea, 540-260)

the confidency of data. The extraction procedure of topological characteristics and hydrological parameters is as below. First, watershed and stream are extracted by DEM and curve number is extracted throughout the overlay of landcov map and soil map. Also, we extracted surface parameters like watershed length and the slope of watershed length by Grid computation into watershed and stream. And we gave the method that could extract hydrologic parameters like Muskingum K and sub-basin lag time by executing computation into surface parameters and average SCS curve number being extracted.

1. 서 론

경제성장에 따른 도시화와 산업사회로의 변화와 국민생활수준 향상에 따른 급격한 용수공급의 증가로 인하여 수자원의 적정이용 문제가 심각하게 제기되고 있다. 특히 최근에는 용수의 공급과 적절한 수량의 유지를 위한 관리체계의 개발이 무엇보다도 시급한 실정에 와 있다.(환경처, 1993)

우리나라의 수문 특성은 비교적 건기와 우기의 구분이 확실하고 장마기를 전후하여 강우가 집중되는 현상이 현저하다. 또한 도시화의 영향으로 인한 표면저류의 감소와 배수시설의 확대에 의한 유하시간의 감소로 하류에서 침투유량에 도달하는 시간이 줄어들어 비슷한 호우사상에도 상대적으로 큰 피해가 발생하고 있다.(김덕화, 1996)

따라서, 이러한 피해를 최소화하고 효율적인 유역관리를 위해서는 유역과 관련된 지형적, 수문학적 특성들을 신속하고 정확하게 추출하는 것이 요구되나, 현재까지는 이러한 수문인자들을 수작업이나 간단한 연산과정을 거쳐 추출하고 있어 데이터에 대한 신뢰성이 저하되고 데이터 생성에도 많은 시간이 소요되고 있는 실정이다.(함창학, 1996)

본 연구에서는 유역내의 지형학적 인자들만을 추출해 오던 기존의 연구에 덧붙여 SCS CN 값, 지체시간, Muskingum K 그리고 소유역의 수등과 같은 수문모형에 필요한 수문인자들까지도 최근 부각되고 있는 GIS와 원격탐사(Remote

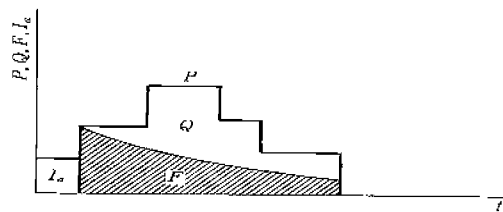
Sensing) 기법을 이용하여 정확하고 객관적으로 추출하는 알고리즘을 소개하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 SCS 유출곡선번호(CN) 산정

1) CN에 의한 직접유출 계산

강우(P)가 발생하면 그 강우가 직접적으로 유출로 발생하는 것은 아니다. 차단, 증발, 침투, 침투의 형태로 강우손실(I_a)이 발생하며 그 후 토양이 수분을 함유하게 되는 실제보류수량(F)를 갖게 되며 F가 최대잠재보류수량(S)에 도달한 후에야 비로서 직접유출(Q)로 나타나게 된다. 그림 1은 강우량의 분리를 나타내고 있다.



[그림 1] 강우량의 분리

직접유출(Q), 초기손실(I_a), 실제보류수량(F)

유출이 시작된 후 강우량 P가 증가함에 따라 Q와 F도 증가하며 이때 F(실제보류수량)는 최대 잠재보류수량 S에 이르게 된다. S는 유역의 잠재보류수량의 크기를 나타내고 이는 유역의 토

양형, 토지이용과 처리상태를 나타내는 수문학적 토양-피복형의 성질을 표시한다.

미국토양보전국(Soil Conservation Service : SCS)은 유역의 토양특성과 지면피복상태에 관한 데이터만을 이용해서 총 강우량으로부터 초과 강우량을 구할 수 있는 SCS CN 기법을 개발했다.

일반적인 관계식은,

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \dots(1)$$

이며, 여기서 $I_a = 0.2S$ 가 된다.

(P : 총강우량, Q : 직접유출, I_a : 초기손실, S : 최대잠재보류수량)

따라서 식 (1)을 이용하면,

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \dots(2)$$

이 된다.

즉 최대잠재보류수량(S)만 알면, 유역에 대한 직접유출을 파악할 수 있다. CN값은 유역의 수문학적 토양형, 토지이용과 처리상태 및 선행토양함수조건의 함수이며 한 유역의 유출능력을 나타내는 무차원수로서 최대잠재보류수량 S와 의 관계는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.(이근상 외, 2000; Peter et al., 1995)

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254, \text{ if } S < (P - Q) \quad \dots(3)$$

2) CN값의 결정

한 유역에 내린 총강우량 중 직접유출은 유역의 토양 특성에 좌우된다. SCS는 토양의 유출 특성을 결정하는 기후, 경사, 생물학적 활동, 구성물질 등과 같은 인자들의 영향을 반영하는 토

양형과 토지이용을 고려하여 침투능의 서술적인 지수로서 토양을 A, B, C, D의 4개 수문학적 토양군(hydrologic soil group)으로 분류하였다.

수문학적 토양군과 함께 지면피복상태를 나타내는 토지이용 상태를 알면 이에 대한 CN값을 구할 수 있다. 그러나, CN값은 토양의 수분상태가 건조하거나 습하지 않은 중간의 평균상태이므로 강우이전 토양의 수분상태(건조 혹은 습윤)에 따라 CN값을 조정할 필요가 있다. 이와 같은 필요에 의해서 선행함수조건(antecedent moisture condition ; AMC)를 설정하였다. 평균수분상태인 AMC-II 의 조건에 대한 CN을 결정한 후 건조상태 AMC-I과 습윤상태 AMC-III 에 대한 CN값은 식(4)에 의하여 구한다.

$$N(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad \dots(4)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

표 1은 토지피복 및 수문학적 토양군을 고

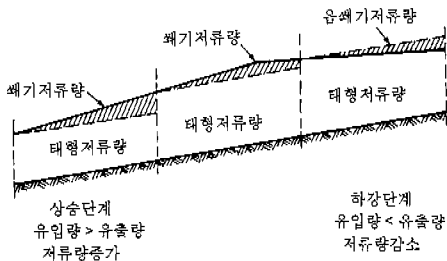
<표 1> AMC에 따른 CN값

토지 피복	AMC	유출수문곡선(CN)			
		A	B	C	D
산지	I	18	40	54	63
	II	35	60	72	80
	III	55	78	87	91
논	I	53	64	75	80
	II	72	81	88	91
	III	86	92	95	97
밭	I	42	52	60	64
	II	62	71	78	81
	III	79	86	90	92
주거지	I	59	70	78	81
	II	77	85	90	92
	III	89	94	96	97
불모지	I	59	72	80	83
	II	77	86	91	94
	III	89	94	97	98
수계		98			

려한 유출곡선번호(CN)를 AMC 조건에 따라 나타낸 것이다.(이근상외, 2000; 전형섭, 1996)

2.2. Muskingum 하도추적법

저수지에서 저류량과 유출량과의 관계는 저수지 수면이 수평으로 되기 때문에 저류량은 유출량에 의하여 결정될 수 있으나 자연하도에서의 저류량은 수문곡선의 상승부분 또는 하강부분에 따른 loop를 형성하게 된다. 이는 자연하도의 저류가 하상과 평행이 되는 태형 저류와 수면의 상승 하강으로 인한 썰기저류로 구성되며, 썰기저류는 그림 2와 같이 여러 가지 형태로 이루어지기 때문에 썰기저류를 간단히 정의내릴 수는 없다.



[그림 2] 태형 및 썰기 저류량

일반적으로 저류량과 유량과의 사이에는 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$S = \frac{b}{a} [XI^{\frac{m}{n}} + (1-X)O^{\frac{m}{n}}] \dots (5)$$

여기서 S는 저류량, a와 n은 수위-유량 관계 ($Q = ah^n$: h는 수위)에서의 계수, b와 m은 수위-저류량과의 관계($S = bh^m$)에서의 계수이다. X는 유입량과 유출량이 상대적으로 저류량에 미치는 영향을 고려하기 위한 가중값이다. Mc Carthy(1938)는 Muskingum 유역의 홍수 추적을 실시하기 위하여 $\frac{m}{n} = 1$, $\frac{b}{a} = K$ 로 가정하여

식 (5)를 다음과 같이 재정리하였다.

$$S = K[XI + (1-X)O] \dots (6)$$

K는 저류계수라고 하며, 저류량과 유량과의 비를 나타내 주는 상수로서 시간의 단위를 갖고 있다. 식(6)에 의한 방법을 Muskingum 방법이라고 한다.

X의 값은 수위가 상승 또는 하강하는가에 관계없이 저류량이 일정하도록 선택되어야 한다. 저수지의 경우에 저류량이 단순히 유출량에만 의존하기 때문에 X=0이 되나 하도에서 홍수파가 평행 이동하는 경우에는 X=0.5의 값을 갖는다. 따라서 $0 < X < 0.5$ 의 값을 가지며 보통 0.25에 접근할 때가 많다. X의 값은 수리학적으로 결정할 수 있는 방법은 없으며, 추적구간에서의 유입수문곡선과 유출수문곡선 데이터로부터 얻어질 수 있는 값이다. K는 시간의 차원을 가지며 저류량과 유량과의 그림에서 직선의 경사이다. 즉 식(6)에서 유량은 $[XI + (1-X)O]$ 의 값이므로 K는 식 (6)의 경사가 된다. 일반적으로 홍수파의 분석에 의하면 K는 홍수의 유하시간과 같다고 한다. 즉, 홍수의 유하시간은 홍수파의 질량중심이 추적구간 상류지점을 통과하여 하류지점까지 도달하는데 소요된 시간을 말한다.(윤태훈, 1997)

2.3 원격탐사를 활용한 토지피복분류

1) Landsat TM 영상

Landsat TM 위성은 미국에서 발사된 민간 목적의 원격탐사위성으로 1972년 제 1호가 발사된 이래 현재 5호 위성에 이르기까지 인공위성 원격탐사의 대표적인 데이터 공급체 역할을 하고 있다. 원격탐사에서 정보를 얻는 과정은 태양에너지나 센서에서 방출되는 에너지에 대해 목표물에서 반사되는 에너지를 측정해서 목표물에 대한 특성치를 나타내는 영상을 획득하는 단계

와 획득된 영상을 여러 가지 영상처리 기법을 이용하여 처리 및 분석하는 영상처리 단계로 크게 나눌 수 있다. 본 연구에서는 영상의 해상도, 파장영역의 폭과 종류, 에너지를 감지할 수 있는 센서의 민감도 그리고 데이터 획득의 용이성 등을 고려하여 미국의 Landsat TM 영상을 이용하기로 결정하였다.(유복모, 1996; 유복모 사진측정학등등)

2) 영상분류

수치영상에서 원하는 정보를 추출하는 것을 영상분류라 한다. 영상분류는 하나의 파장대에서 얻어진 영상에서 정보를 추출하는 것이 아니라 다양한 파장대에서 물체의 특성에 따라 독특한 형태로 얻어진 영상값들을 조합하여 추출한다. 특히, 식물 같은 경우에는 가시광선영역보다는 근적외선 영역에서 반사율이 훨씬 크게 나타나는 특성을 가지고 있다. 영상을 분류하는 방법에는 분석자가 가지고 있는 사전지식, 대상지역에 대한 이용가능한 참고자료의 존재여부 및 영상을 분류하는데 사용되어지는 알고리즘에 따라 다양한 방법이 존재한다.

영상분류 알고리즘에는 크게 감독분류(supervised classification)와 무감독분류(unsupervised classification)로 나누어진다. 감독분류는 분석자의 사전지식이나 참고자료 등을 이용하여 사용자가 영상에서 특정 지표물에 대해서 일정한 사이트를 정한다. 그런후 사이트에서 얻어진 여러 가지 통계 데이터를 기반으로 해서 전체 영상 각각의 픽셀값들의 통계값들과 비교해서 비슷한 값을 가지고 있는 사이트에 할당된 지표물로 분류하는 방법이다.

무감독분류는 크게 두가지 절차로 이루어지는데 첫 번째는 전체영상을 읽어들여서 군집을 만들고 각각의 군집에 대해서 평균벡터를 구하는 과정이다. 두 번째 과정은 앞의 과정에서 구하여진 평균벡터를 기준으로 해서 각각의 영상의 픽셀들과의 거리를 구한 후 가장 가까운 거

리를 가지고 있는 평균 벡터에 영상의 픽셀들을 할당하는 과정이다. 본 연구에서는 연구지역에 대한 사전지식과 참고자료가 있는 관계로 무감독분류 기법에 비해 정확도가 좋은 감독분류 방법을 이용하여 영상을 분류하였다. 감독분류에는 최대우도법(Maximum Likelihood Classification), 최소거리법(Minimum Distance to means Classification), 평행육면체 분류 그리고 Mahalanobis 거리분류기법이 있으며 본 연구에서는 최대우도법을 이용하였다.

이 알고리즘은 영상의 각각의 픽셀값에 대하여 등급에 따라 특성벡터들에 대해서 분류될 확률을 구한후에 가장 큰 확률값을 가지는 등급으로 픽셀값들을 분류하는 방식이다. 즉 처리하고자 하는 픽셀 x 가 등급 k 에 속할 확률 $P_k(x)$ 라고 할때 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$P_k(x) = -\frac{1}{2}(x - M_i)^T COV_i^{-1}(x - M_i) \\ = -\frac{d}{2} \log(2\pi) - \frac{1}{2} \log(|COV_i|) + \log(C_i)$$

여기서, x 는 화소의 텐드별 화소값 벡터, M_i 는 i 번째 분류등급의 평균벡터, COV_i 는 분류등급의 공분산 행렬, d 는 영상분류에 사용되는 텐드수, C_i 는 각 분류등급의 사전확률을 의미한다.(김경탁, 1998; 전성우, 1999)

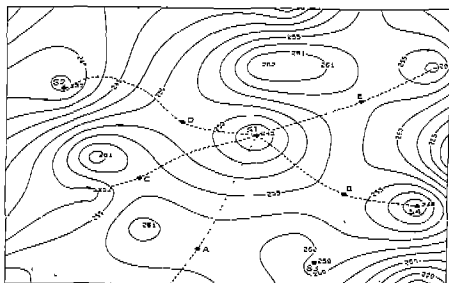
2.4 강제배수 알고리즘

위성 DEM을 활용하여 유역경계를 추출할 때, 가장 중요한 문제는 얼마나 유역추출에 적합한 DEM을 생성하는가에 달려 있다. 특히 실제 지형에는 없는 함몰(SINK; 이하 모두 함몰)이 데이터 내에 존재할 경우 하천흐름에 장애요인이 되어 유역경계를 추출하는데 많은 오류를 가져오게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 하천흐름을 방해하는 함몰을 최소화하기 위해 강제배수 알고리즘을 적용하였다.

공간데이터 입력과정에서 저수지와 같은 지형은 데이터내에서 함몰로 지정하여 저수지의 지형적 특성을 표현하게 된다. 배수강제 알고리즘은 입력과정 중 공간데이터를 함몰로 지정하지 않았음에도 불구하고 출력 DEM서 생성되는 함몰을 제거하는데 목적을 두고 있다. 즉 각각의 함몰을 둘러싸고 있는 배수지역내에서 가장 낮은 안부점을 경유하는 하천을 추론하여 DEM을 수정함으로써 불필요한 함몰을 제거하게 된다.

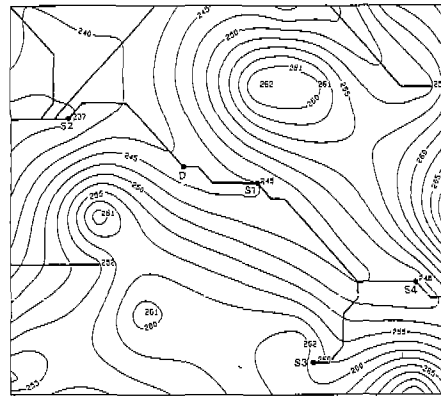
Grid 보간과정 중 함몰과 안부점의 특징을 살펴보면, 함몰이란 처리하고자 하는 셀이 인접한 8개의 셀에 비해 가장 낮은 표고값을 갖는 반면, 안부점은 인접한 8개의 셀중 최소한 2개 이상이 처리하고자 하는 셀보다 높은 표고값을 갖는다.

배수강제 알고리즘의 핵심은 데이터보간 과정에서 발생하는 각각의 함몰은 최소한 하나 이상의 안부점을 포함하고 있는 유역 분수계로 둘러싸여져 있다는 것을 인식하는 것이다. 만약 함몰이 표고와 관련이 있고 가장 낮은 안부점이 표고와 관련이 없다면, 가장 낮은 안부점은 함몰을 제거하기 위하여 수정되는 Grid영역을 확인하게 된다. 반면에, 가장 낮은 안부점이 표고와 관련이 있지만 함몰과는 관련이 없다면, 함몰과 직접 접하고 있는 격자는 안부의 표고만큼 표고가 높아지게 된다. 만약 함몰과 가장 낮은 안부 모두가 표고점과 관련이 없다면, 함몰과 가장 낮은 안부 주위에 있는 격자점들은 유역을 나타내도록 수정되어진다.



[그림 3] 함몰과 안부점과의 관계

그림 3은 안부점들인 A, B, C, D, E가 점선으로 표시된 유하선을 경유하여 함몰 S1과 관련되는 과정을 설명하는 그림으로서, 보간시 함몰 S1은 주위의 안부점 중 가장 낮은 표고값을 갖는 안부점인 D와 연결되어지며 D는 다시 함몰 S2로 연결된다. 이때 함몰과 안부점간의 구간은 최대경사방향으로 선형보간됨으로서 함몰이 제거되는 효과를 가져온다.



[그림 4] 선형보간 예

그림 3의 예에서 함몰 S1과 관련된 가장 낮은 안부점은 D이며 이점은 표고 데이터와 관련이 없기 때문에 S1보다 낮은 함몰 S2에 도달하도록 DEM이 수정되어 진다.

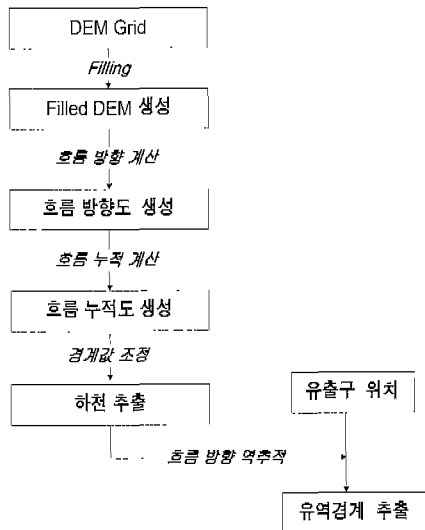
그림 4는 안부점 D를 경유하여 함몰 S2로 선형보간되는 과정을 보여주는 것으로서 연차적인 선분이 D를 경유하여 S1부터 S2까지 삽입된다.

그림 4에 있는 각 선분은 연속적인 표고점들 사이에서 선형의 경사를 유지하도록 선분아래에 있는 격자들의 값들을 수정한다. 이와 같이 함몰과 안부점을 탐지하고 연차적인 선분을 삽입시키는 과정은 상당히 효과적이며 기본적인 보간 알고리즘보다 컴퓨터 처리시간 또한 줄어들게 된다.(김동인, 1999; Hutchinson. M. F. and T. I. Dowling, 1991; Peucker T. K. and Douglas D. H., 1975)

3. 수문인자 추출

3.1 유역추출 알고리즘

강제배수 알고리즘으로 보간된 수치표고모델 (DEM)로부터 유역의 경계를 추출하는 과정은 그림 5와 같은 단계로 이루어진다.



[그림 5] 유역추출 과정

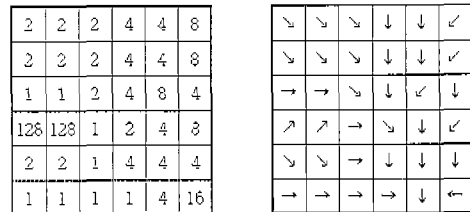
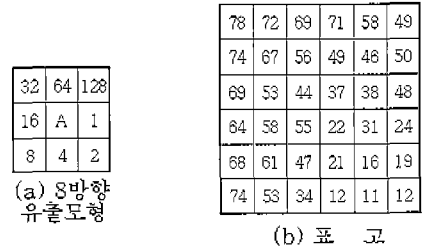
먼저, DEM Grid에서 유역경계 추출에 장애가 되는 부분적인 함몰을 검사하여 제거하는 Filling 과정을 거친후 하천흐름방향을 결정하는 흐름방향도를 생성하게 된다. 다음 단계로는 상대적으로 낮은 셀로 유입되는 모든 셀의 합을 분석하여 계산하는 흐름누적도를 생성하고 유출구 위치를 확인하여 유출구로부터 경사를 역추적하여 유역 경계를 추출하게 된다. (이근상외, 1999 ; Ferdinand Leberect Hellweger and David Maidment)

1) 흐름방향(Flowdirection) 계산

흐름방향계산 과정은 수치표고모델내의 모든 셀로부터 물의 흐름방향을 결정하는 것으로,

지표를 흐르는 물의 방향은 각 지점에서의 경사에 의하여 결정되며 경사는 각 셀로부터의 최대 경사변화율의 방향이 된다.

수치표고모델로부터 유역경계를 추출하는 방법은 그림 6의 (a)와 같은 8방향 유출모형을 사용하여 결과값을 1에서 255까지의 정수값으로 할당하는데 중심셀의 각 방향에 대한 정수값은 그림 6의 (c)와 같이 주어진다. 이 모형에서는 임의의 셀을 중심으로 인접한 8개 셀의 표고값을 비교하여 최대경사를 갖는 셀 방향을 결정하게 된다. 예를 들어, 최대경사의 셀 방향이 왼쪽이라면 흐름의 방향은 16이 된다. 또한 표고값의 변화가 같은 경우 결과값은 8방향 유출모형에 표현된 값의 합이 되는데 이런 경우 흐름의 방향은 정의되지 않는 것으로 간주된다.



(c) Flowdirection

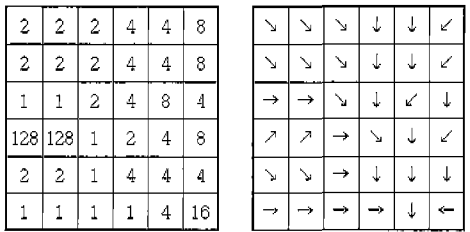
[그림 6] 흐름 방향도 모형

예를 들어, 처리되는 셀의 최대 경사의 방향이 오른쪽과 아래쪽이 같다면 그 셀에 할당되는 값은 1+4 인 5가 되며 이와 같이 정의되지 않은 값을 갖는 셀은 함몰로 표시되어 있다. 만약 인접한 모든 셀의 경사가 같다면 최대경사의 셀이 발견될 때까지 확장되어진다. 그림 6의 (c)는 흐름 방향도 모형을 물의 흐름 방향과 함께 셀

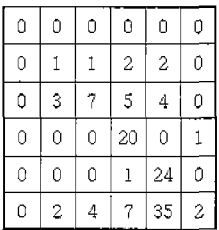
단위로 표현하고 있다.(이근상외, 1999 ; Ferdinand Leberect Hellweger and David Maidment, 1997)

2) 흐름누적(Flowaccumulation) 계산

흐름누적 계산과정은 상대적으로 표고가 낮은 임의의 셀로 유입되는 상류방향의 셀 숫자를 결과값으로 할당한다. 할당된 값이 높은 셀은 지표수가 집수되는 지역으로서 자연하천을 추출하는데 이용된다. 또한 할당된 값이 0인 격자는 극부적으로 지형이 높은 곳으로서 능선으로 간주될 수 있다. 그림 7은 흐름 누적도 모형을 나타내고 있다.(이근상외, 1999 ; Ferdinand Leberect Hellweger and David Maidment, 1997)



(a) Flowdirection



(b) Flowaccumulation

[그림 7] 흐름 누적도 모형

3) 하천 추출

흐름 누적도에 임의의 경계값을 부여하여 집수된 셀의 숫자가 높은 셀을 선택함으로써 하천을 추출할 수 있다. 예를 들어 경계값을 100으로 설정한다면 유입되는 셀의 수가 100이상이 되는

셀들에 1이라는 값이 할당되며 그 이외의 셀들에는 NODATA가 할당된다. 즉 경계값들이 작아짐에 따라 생성되는 하천은 보다 상세하게 표현된다.

DEM으로부터 누적된 흐름을 추출하는 방법은 Jenson과 Dominique에 의하여 제안되었으며, 하천을 추출시 적절한 경계값을 설정하는 것이 매우 중요하다.(Jenson S. K. and Dominique J. O., 1988)

4) 유역경계추출

유역이란 동일한 유출구로 물이 배수하는 지역으로 유출구는 임의의 지역으로부터 물이 유입되는 지점으로써 유역경계선에 연결되는 가장 낮은 지점이다. 유역의 경계를 추출하는 과정은 먼저 선택한 유출구를 중심으로 3×3의 유동창을 이용한다. 만약 주변셀의 방향이 중심셀을 향하거나, 경사가 사용자에 의하여 선택된 초기값보다 작으면 주변셀은 같은 유역의 상류로 간주된다. 알고리즘을 반복적으로 수행하여, 일단 상류방향의 인접셀이 발견되면 그 셀은 같은 유역에 속하는 것으로 표시되며, 3×3 유동창은 인접셀의 처리를 위해 다음셀로 이동하게 된다. 이 단계에서 알고리즘은 인접셀들을 분석하여 다시 상류방향의 셀을 검사하기 시작한다. 알고리즘은 유역의 경계선을 만나거나 또는 Grid의 경계에 접할 때까지 반복된다.(이근상외, 1999 ; Ferdinand Leberect Hellweger and David Maidment, 1997)

3.2 수문요소들의 벡터화

추출된 각각의 유역과 하천은 격자데이터이며 유역과 하천에 대한 지형적 수문학적 인자들을 입력하기 위해서는 벡터화되어야 한다. 격자를 벡터로 전환하여 하천과 유역에 대한 벡터 도면을 생성하게 된다. 소유역을 선추적(vectorizing) 할 때,

각각의 소유역이 하나의 폴리건에 의해서 표현되는 것이 중요하다. 격자를 벡터화 할 때 경계부분의 오류로 인해 생기는 매우 작은 폴리건인 dangle 폴리건은 인근 유역 폴리건으로 통합하게 된다.

그림 8은 dangling 폴리건을 갖는 유역을 나타내고 있다.

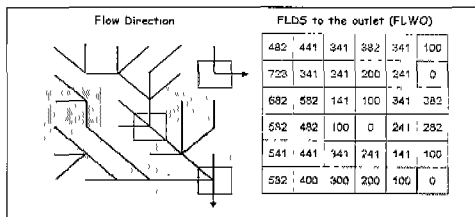


[그림 8] dangling 폴리건을 갖는 유역

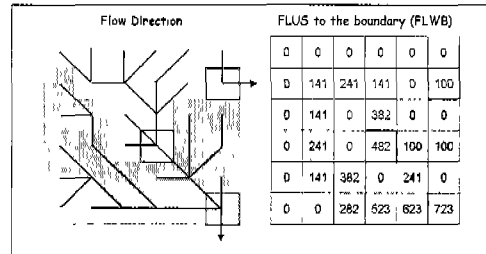
3.3 유역관련 수문인자 추출

1) 유역길이(Watershed length)

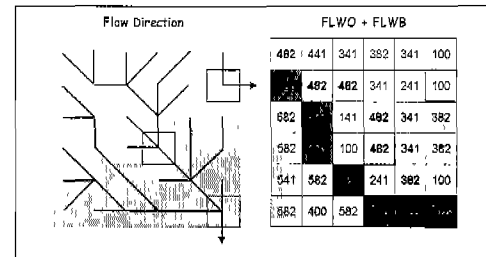
유역길이는 유역의 유출구에서 주수로를 따라 유역의 분수령까지의 거리로 정의되며, 유역의 유출구로부터 유역 경계선까지의 하류방향 흐름의 길이인 FLWO(flow length downstream to the watershed outlet)와 유역경계까지의 상류방향 흐름의 길이인(FLWB: flow length upstream to the watershed boundary)의 합으로 정의된다. 그림 9, 그림 10 그리고 그림 11은 각각 FLWO, FLWB 그리고 유역길이 추출 모형을 나타내고 있다.



[그림 9] FLWO 모형도



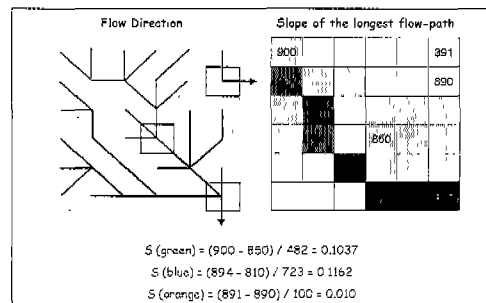
[그림 10] FLWB 모형도



[그림 11] 유역길이 추출 모형

2) 유역길이 경사(Slope of watershed length)

유역길이 경사는 유역길이에 해당되는 두점 간의 거리에 대한 표고의 비로 결정되어지며 단위는 %로 표현된다. 그림 12는 유역길이 경사 추출 모형이다.



[그림 12] 유역길이 경사 추출모형

3) SCS 유출곡선번호(CN)

소유역의 평균 SCS 유출곡선번호(CN)는 소유역 폴리건의 유출곡선번호(CN)의 평균으로 계산되어

진다. 유출곡선번호(CN)를 갖는 격자는 Anderson의 토지이용코드에 의한 토지이용데이터를 이용하여 계산되어지며 STATS 토양 데이터에 따라 각각의 수문토양그룹(A, B, C, D)을 %로 계산하며 토지이용과 유출곡선번호(CN)를 갖는 토양그룹을 서로 연결해주는 lookup 테이블로서 계산되어진다.

유역의 평균 SCS 유출곡선번호(CN)의 계산은 식 (7)과 같다.(윤태훈, 1997)

$$\text{유역평균 CN} = \frac{\sum A_i \text{CN}_i}{\sum A_i} \quad \dots \quad (7)$$

A_i : 토지이용별 면적

CN_i : 토지이용별 유출곡선번호

4) 지체시간

소유역 지체시간은 SCS공식으로 계산되어지며 식 (8)과 같다. (이근상, 2000; Ferdinand Leberect Hellweger and David Maidment, 1997)

$$t_p = \frac{L_w^{0.8} [(1000/CN) - 9]^{0.7}}{31.67 S^{0.5}} \quad \dots \quad (8)$$

t_p : 지체시간(lag time): 분(minute)

L_w : 유역길이 (feet)

CN: 유출곡선번호

S: 유역길이의 경사 (%)

3.4 하천관련 수문인자 추출

1) 하천의 길이(m)

하천길이는 유역경계 추출과정에 생성된 격자형의 하천데이터를 벡터화하여 계산하게 된다.

2) Muskingum K

임의의 소유역을 흐르는 하천흐름시간(L_s/V_s)

은 소유역 크기에 따라 달라지게 되나 본 연구에서는 중분류 체계의 유역을 기준으로 하고 있으므로 일반적인 흐름분석시간(Δt)인 1시간보다는 크게 된다.

Muskingum기법은 수치적으로 불완전한 문제는 있지만 대부분의 하천추적에 이용되며 식 (9)와 같이 계산된다.(이근상의, 2000; Ferdinand Leberect Hellweger and David Maidment, 1997)

$$K = \frac{L_s}{3600 V_s} \quad \dots \quad (9)$$

K: Muskingum K(hr), L_s : 하천길이,

V_s : 하천평균속도(m/s)

3) 소하천의 수(n)

Muskingum기법을 사용시 수치적 불완전을 피하기 위해, 긴 하천들은 동일한 길이를 갖는 소하천으로 분류되며 그들 각각에 대한 흐름시간은 $k/3 < \Delta t < k$ 조건을 만족하게 된다.

k 는 소하천에서의 흐름시간으로 식 (10)과 같이 계산된다.

$$k = \frac{K}{n} = \frac{(L/v)}{n} \quad \dots \quad (10)$$

K: 하천에서의 흐름시간, n: 소하천의 수

따라서, 소하천의 수(n)는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{L}{3\Delta t v} < n < \frac{L}{\Delta t v} \quad \dots \quad (11)$$

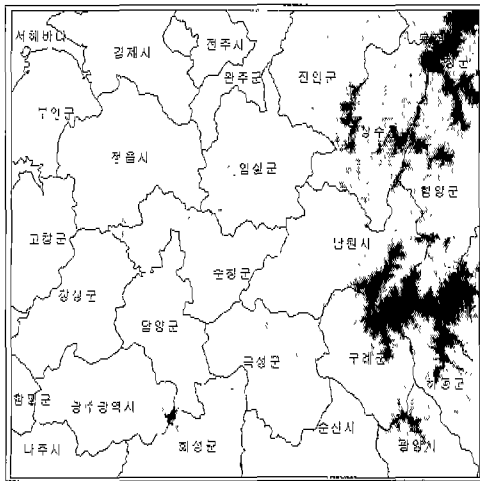
여기에서, n은 적어도 1이 되어야 하기에, Muskingum기법을 만족하기 위해서는 L/v 는 Δt 보다는 커야 된다. 추가적으로 하천이 여러개의 소하천으로 나누어 질 수 있는 소하천의 최소 수는 식 (12)와 같다.(이근상의, 2000; Ferdinand Leberect Hellweger and David Maidment, 1997)

$$n = \text{int} \left(\frac{L}{3\Delta t v} \right) + 1 \quad \dots \quad (12)$$

4. 적용 및 고찰

4.1 연구대상지역

본 연구에서는 섬진강 유역 일부지역인 동경 126° 36' ~ 127° 48', 북위 35° 00' ~ 35° 52' 를 연구대상지역으로 선정하였다.



[그림 13] 연구대상지역

전북지역 행정구역으로는 김제시, 전주시, 완주군, 진안군, 무주군, 임실군, 순창군, 남원군, 정읍시, 고창군 그리고 부안군 등을 포함하고 있으며 전남지역으로는 장성군, 담양군, 곡성군, 구례군, 광주광역시, 나주시, 화성군, 광양시, 순천시 등을 포함하고 있다. 또한 경남 함양군, 하동군, 거창군, 산청군 일부지역이 포함되어 있다. 그림 13은 연구대상지로서 DEM위에 행정구역도를 표현하였다.

4.2 데이터베이스 구축

본 연구를 수행하기 위해 구축한 데이터베이스는 표 2와 같다.

먼저, 대상지역의 표고와 경사데이터를 얻기

위해 U.S.G.S(United States Geology Survey)의 DEM데이터를 그리고 토지피복도 추출을 위해 RESTEC (Remote Sensing Technology Center of Japan)의 Landsat TM 영상을 이용하였다. 또한 토양도는 1/50,000 개략토양도로부터 구축하였고 수계망도는 1/250,000 수계망도를 이용하여 구축하였다.

<표 2> 데이터베이스 구축

데이터형태	데이터 내용
DEM	셀크기(3" × 3")
토지피복도	Landsat TM 영상 (30m×30m)
수계망도	1/250,000 수계망도
토 양 도	1/50,000 개략토양도

4.3 유역경계 및 하천 추출

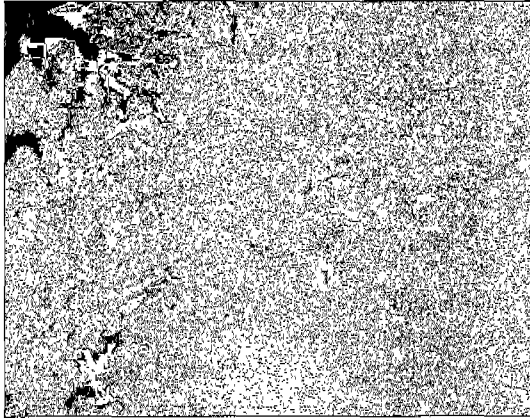
1) 강제배수알고리즘 적용

DEM과 수계망도로부터 강제배수 알고리즘을 이용하여 유역경계 추출에 적합한 DEM을 생성하였다. 그림 14는 강제배수알고리즘을 적용하여 함몰을 제거한 DEM이며 그림 15는 제거된 함몰을 나타내는 그림이다.

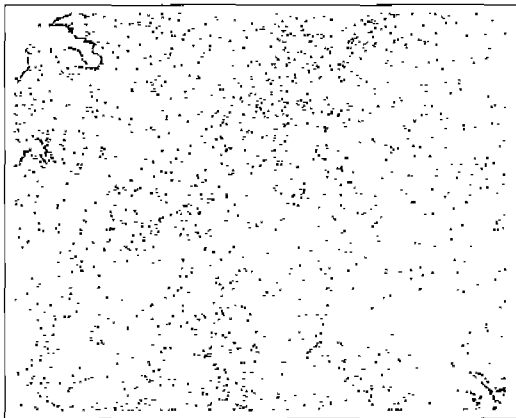
2) 흐름방향도 및 흐름누적도 생성

강제배수 알고리즘으로 보간된 DEM으로부터 8방향 물의 흐름을 분석하여 흐름방향도를 생성하게 되며 흐름방향도로부터 임의의 셀로 유입되는 상류방향의 셀을 계산하여 흐름누적도를 생성하였다.

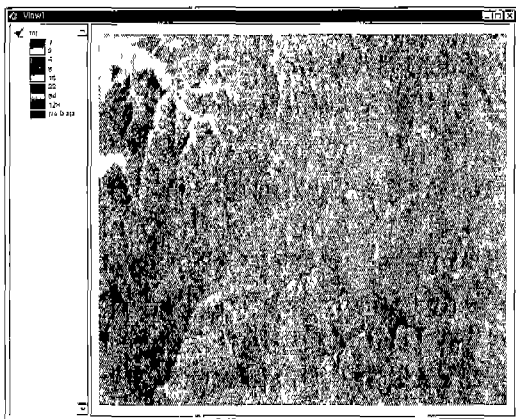
그림 16은 흐름방향도를 나타내고 있다.



[그림 14] 강제배수알고리즘으로 보간한 DEM



[그림 15] 강제배수알고리즘으로 제거된 함물



[그림 16] 생성된 흐름방향도

3) 주하천 추출

흐름누적계산과정을 거친 흐름누적도에는 임의의 셀로 유입되는 상류방향의 셀숫자가 기록되어 있으며 이러한 흐름누적도에 경계값 15000을 적용하여 유역에 영향을 미치는 하천을 추출하였다.

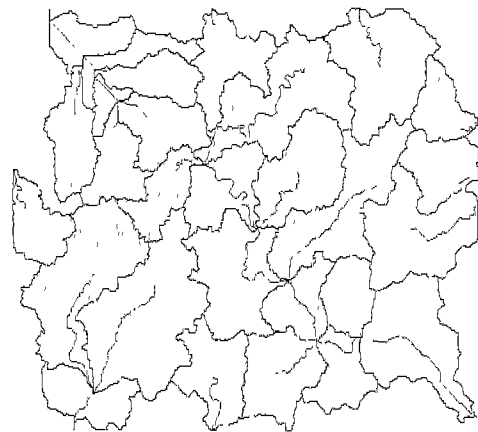
경계값을 15000으로 설정한 이유는 본 연구의 유역규모를 결정하기 위한 기준으로서, 수자원공사에서 수행한 “수자원단위지도사업”의 결과로 나온 섬진강 중규모 유역의 형상과 일치시키기 위해서이다.

추출된 유역과 “수자원단위지도사업”의 결과로 나온 섬진강 중규모 유역과의 면적비율을 비교한 결과 약 98.4%의 정확도를 확보할 수 있었다.

4) 유역경계 추출

유역내의 물은 최종적으로 하나의 유출구로 유입되게 되는데, 본 과정에서는 유출구로부터 주위셀의 경사를 역추적하여 유역을 추출하게 된다.

그림 17은 추출한 유역과 유역내의 주하천을 나타내고 있다.

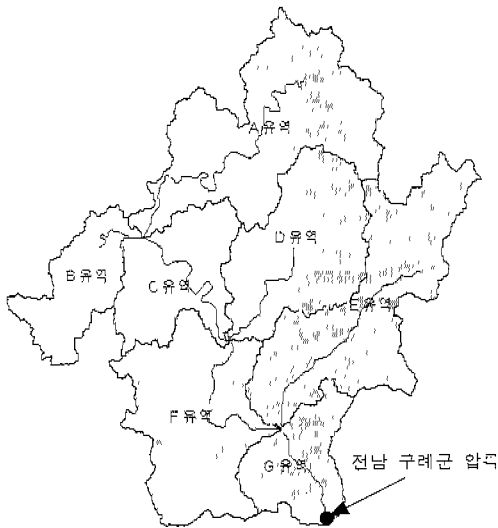


[그림 17] 추출한 유역과 주하천

5) 최종 유역경계 및 주하천 추출

본 연구에서는 섬진강 유역내 섬진강 본류와 보성강이 만나는 전남 구례군 압록을 유출구로 하여 이곳에 영향을 미치는 유역을 추출하였다.

그림 18은 압록을 유출구로 한 최종 유역경계 및 주하천이며 각 유역별로 유역명을 A - G까지 부여 하였다.

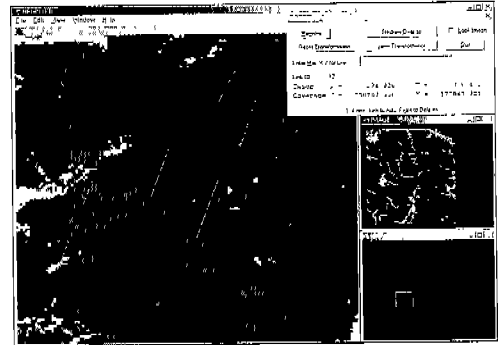


[그림 18] 최종 유역경계 및 주하천

4.4 SCS 유출곡선번호(CN) 추출

1) 토지피복도 생성

연구대상지역의 Landsat TM영상에서 최대우도법(Maximum Likelihood Method) 영상분류(Image Classification)를 수행하여 토지피복도를 추출하였으며 실제좌표로의 위치보정을 위해 GCP (Ground Control Point) 작업을 수행하였다. GCP 작업을 위해 위치확인이 용이한 수계도를 지도에서 디지털화하여 이용하였다.

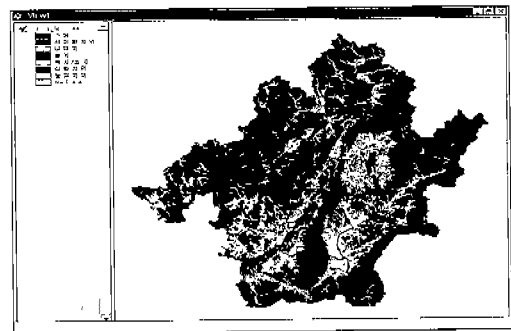


[그림 19] 토지피복도 GCP 작업

그림 19는 추출한 토지피복도와 디지털이징한 수계도를 이용하여 GCP 작업을 수행한 그림이며, GCP작업을 수행한 토지피복도는 토양도와와의 분석을 위해 격자형으로 변환하였다. 표 3은 대상유역내의 토지피복 현황을 셀수와 백분율(%)로 나타낸 것이며, 그림 20은 토지피복도를 나타내고 있다.

<표 3> 토지피복 분포

토지이용	셀수	백분율(%)
수계	51,926	1.702
시가화지역	31,547	1.034
나대지	19,800	0.649
습지	104	0.001
녹지/초지	146,791	4.811
산림지역	2,291,012	75.094
농업지역	509,758	16.709
합 계	3,050,938	100.00



[그림 20] 토지피복도

2) SCS 수문학적 토양도 생성

SCS 수문학적 토양군은 먼저 1/50,000 개략 토양도를 디지털화하여 벡터형태의 토양도를 구축한 후 토양구성형태나 배수상태에 따라 SCS 수문학적 토양군인 A, B, C, D로 분류하였다.

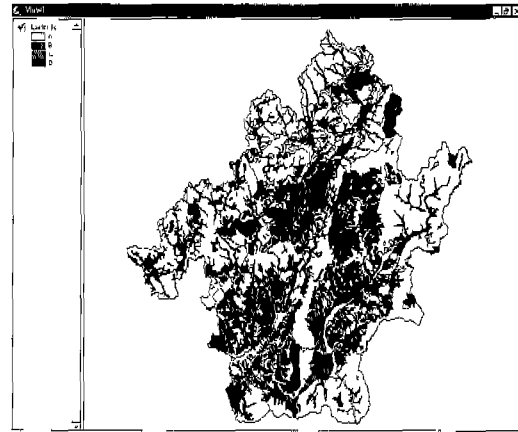
표 4는 SCS 수문학적 토양군 A, B, C, D로 분류한 토양명을 나타내고 있다. 분류된 벡터형 토양도는 격자분석을 수행하기 위해 격자데이터로 변환하여 SCS 수문학적 토양군을 생성하였다. 표 5는 유역내의 SCS 수문학적 토양군 분포현황을 셀수와 백분율(%)로 나타낸 것이며, 그림 21은 SCS 수문학적 토양도를 보여 주고 있다.

<표 4> SCS 수문학적 토양군

토양군	토양명
A	Afd, Mab, Mac, Mla, Mlb, Mma, Mmb, Msa, Msb, Mub, Rea
B	Afa, Anb, Anc, And, Apb, Apc, Apg, Maa, Raa, Rab, Rac, Rad, Rla, Rlb, Rva, Rvb, Rvc
C	Afb, Ana, Apa, Rxa
D	Ro

<표 5> SCS 수문학적 토양군 분포

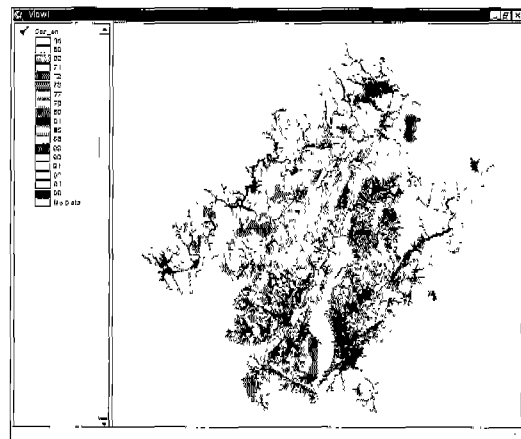
토양도	셀수	백분율(%)
A형	1,719,334	56.354
B형	636,056	20.848
C형	247,971	8.128
D형	447,577	14.670
합계	3,050,938	100.000



[그림 21] SCS 수문학적 토양도

3) SCS CN값 추출

SCS CN값을 추출하기 위해 Landsat TM 영상에서 추출한 토지피복도와 1/50,000 개략 토양도에서 추출한 SCS 수문학적 토양도에 대해 격자 중첩 분석을 수행하였다. 중첩한 격자데이터를 비교·분석하여 토지피복도와 토양도간의 점유면적 비율을 산정함으로써 SCS CN값을 추출하였다. 그림 22는 추출된 SCS 유출곡선번호(CN)를 나타내고 있다.



[그림 22] SCS 유출곡선번호(CN)

4.5 유역관련 수문인자 추출

1) 유역면적(km²)

연구대상지에 대한 유역면적은 유역경계 추출과정에서 생성된 벡터 형태의 데이터로부터 얻었으며 그 결과는 표 6과 같다.

<표 6> 유역 면적(km²)

유역명	면적(km ²)
A 유역	549.34
B 유역	187.61
C 유역	259.27
D 유역	372.70
E 유역	485.22
F 유역	424.62
G 유역	194.44
합계	996.220

2) 유역길이(km) 및 경사(%)

유역길이는 그림 9에서 그림 11까지의 유역길이 추출 모형을 이용하여 유역길이의 경사는 그림 12의 유역길이경사 추출 모형을 이용하여 생성하였다.

그림 23은 각 유역에 대한 유역길이 현황도이며, 유역길이 및 유역길이 경사값은 표 7과 같다.



[그림 23] 유역길이 현황도

<표 7> 유역길이(km) 및 유역길이 경사(%)

유역명	유역길이(km)	경사(%)
A 유역	77.598	0.8
B 유역	43.354	0.61
C 유역	38.140	1.23
D 유역	44.774	1.21
E 유역	61.512	1.4
F 유역	38.647	0.76
G 유역	28.425	1.74

3) 유역별 평균 SCS CN값

4.4에서 추출한 SCS CN값에 대해 식 (7)을 이용하여 유역 평균 SCS 유출곡선번호(CN)를 추출하였다. 표 8은 추출한 유역 평균 SCS 유출곡선번호(CN)이다.

<표 8> 유역별 평균 SCS CN값

유역명	SCS CN값
A 유역	49.0613
B 유역	48.6693
C 유역	52.0865
D 유역	56.2171
E 유역	50.0243
F 유역	58.5798
G 유역	50.2572

4) 지체시간(t_b)

유역별 지체시간(t_b)은 강우가 유출구까지 도달하는데 소요되는 시간으로 홍수로 인한 피해를 볼 때, 강우강도보다 중요한 인자로 간주된다. 지체시간(t_b)은 유역길이와 경사 그리고 유역 평균 SCS CN값에 대해 식 (8)의 연산을 수행하여 추출할 수 있었다.

표 9는 추출한 유역별 지체시간(t_b)이다.

<표 9> 지체시간(t_p)

유역명	지체시간(분)
A 유역	4091.75
B 유역	2970.92
C 유역	1731.19
D 유역	1787.99
E 유역	2506.21
F 유역	1889.44
G 유역	1205.09

<표 11> Muskingum K(hr)

유역명	Muskingum K(hr)
A 유역	15.4107
B 유역	3.0335
C 유역	8.3740
D 유역	5.7197
E 유역	9.7807
F 유역	7.8431
G 유역	4.7336

4.6 하천 인자 추출

1) 주하천 길이(km)

대상지역의 하천길이는 위성 DEM에서 추출한 격자형의 하천데이터를 벡터형태로 변환하여 추출하였다.

표 10은 주하천별 길이를 나타내며 주하천의 형상은 그림 18과 같다.

<표 10> 주하천 길이(km)

유역명	주하천 길이(km)
A 유역	55.478
B 유역	10.920
C 유역	30.146
D 유역	20.590
E 유역	35.210
F 유역	28.235
G 유역	17.040

2) Muskingum K

하천흐름 분석시간은 1시간을 기준으로 하는 것이 일반적이며 본 연구에서 제시한 각 유역의 하천흐름시간은 분석시간인 1시간보다 모두 길게 나타나므로 Muskingum 추적기법이 이용되었고 Muskingum K를 식(9)를 이용하여 추출하였다. 이때 하천속도(v)는 1m/s로 가정하였다.

표 11은 추출한 Muskingum K를 나타낸다.

3) 소하천의 수(n)

Muskingum 방법을 사용하기에는 너무 큰 유역에서는 Muskingum K값과 실제 Muskingum K값 사이에 많은 차이가 발생하게 되므로 긴 하천은 소하천으로 나누어야 한다. 소하천의 수는 식 (12)를 이용하여 추출하였으며 추출한 각 유역별 소하천의 수는 표 12와 같다.

<표 12> 소하천의 수(n)

유역명	소하천의 수(n)
A 유역	7
B 유역	2
C 유역	4
D 유역	3
E 유역	4
F 유역	4
G 유역	2

5. 결 론

본 연구는 GIS와 RS를 이용하여 전남 구례군 압록을 유출구로 가정한 섬진강 유역내의 수문 인자를 효과적으로 추출하는 알고리즘을 소개하였다.

먼저, DEM 데이터로부터 유역추출 알고리즘을 이용하여 유역경계 및 하천을 효과적으로 추출할 수 있는 기법을 제시하였는데 이 기법은 유역추출에 영향을 미치는 하천의 밀도개념을

도입하여 이용한 것이다. 유역경계 추출시 가장 중요한 단계는 유역추출에 유리한 DEM 데이터를 생성하는 것으로 유역내의 불필요한 함몰을 제거해야 한다. 이러한 함몰 제거 방법으로, 과거에는 함몰이 존재하는 격자의 표고값을 이웃하는 표고값 중 최저 표고값을 해당 격자의 표고값으로 부여하는 Filling 기법을 이용하였으나 경사가 완만한 준평야지에서는 Filling 기법이 비효율적이기 때문에 본 연구에서는 강계배수 알고리즘을 적용하여 유역추출에 효과적인 DEM을 생성하여 유역추출 알고리즘에 이용하였다.

또한 추출한 유역경계와 하천에 대해 격자연산을 수행하여 유역길이 및 유역경사 등과 같은 지형관련 수문인자들을 추출할 수 있는 기법을 제시하였다. 이러한 지형관련 수문인자는 과거, 수작업에 의한 계산으로 이루어졌으며 그 결과 유역전체를 하나의 동일한 공간분포로 간주하는 집중형 모델에서는 비교적 효과적으로 적용할 수 있었으나 유역을 일정한 격자분포로 간주하는 분포형 모델에는 적용하지 못하였다. 본 연구에서는 분포형 모델에도 적용할 수 있도록 지형관련 수문인자들을 격자형으로 제시하였으므로 그 효용성이 클 것으로 기대된다.

대상지역내의 토지피복은 1999년 3월에 촬영한 LANDSAT TM 영상에서 최대우도법을 이용하여 분류하였으며 분석을 위해 GCP 작업을 실시하였다. 영상에서 판독이 가장 용이한 것이 수계도이기 때문에 GCP 작업을 위해 구별이 용이한 부분의 수계도를 디지털화하여 영상과의 위치보정에 이용하였다. GCP 작업을 실시한 토지피복도는 토양도와의 중첩을 통해 점유면적비율을 분석함으로써 유역평균 SCS 유출곡선번호(CN)를 추출할 수 있었다. SCS 유출곡선번호(CN)은 홍수발생시 유출량을 산정하는데 결정적인 인자로 이용된다.

추출한 지형인자와 유역평균 SCS 유출곡선번호(CN)에 대해 연산을 수행하여 하도추적인자인 Muskingum K, 지체시간(t_b) 그리고 소하천의

수(n)와 같은 수문관련 인자들을 추출할 수 있었다.

수문인자 추출에 이용된 각종 연산식은 주로 GIS에 활용할 목적으로 지형인자와 기타 수문인자가 결합된 형태로 미국에서 개발되었는데, 이러한 식을 우리나라에 적용하여 실무에 사용하기 위해서는 먼저 우리나라 지형에 맞는 수문인자의 정립이 필요하고 대상유역을 선정하여 정확한 실험 분석을 통해 우리나라에 적합한 연산식을 제시하는 것이 선행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 김덕화, “도시유역에서의 하도추적방법에 따른 유출량 변화에 관한 연구”, 연세대학교 대학원 석사논문, pp. 23~34, 1996.
- 남현욱, 박경운, 조성익, “원격탐사기법에 의한 소유역의 홍수 수문곡선 결정”, 대한원격탐사학회지 제 5권 제 1호, pp. 13~27, 1989
- 농어촌진흥공사, 농어촌 종합 지형정보시스템(2년차) 개발 보고서, 농림수산부, 농어촌진흥공사, 92-11-22, pp. 7~8, 1992
- 엄무섭, “지형정보시스템을 활용한 Kinematic 모형의 적용”, 서울대학교 대학원 석사논문, 1991
- 유복보, “지형공간정보론”, 동명사, 1996
- 윤태훈, “응용수문학”, 청문각, pp. 449~454, pp. 561~565, 1997
- 김동인, 이근상, 이환주, 조기성, “Topogrid를 이용한 준평야지의 유역자동추출에 관한 연구”, 한국측지학회, 1999. 9
- 이근상, 채효석, 박정남, 조기성, “GIS를 이용한 수문모형 입력매개변수 추출에 관한 연구”, 한국지형공간정보학회지, 2000. 6
- 전라북도, “섬진강 하천정비 기본계획”, 1991. 11
- 전성우, “인공위성영상자료를 이용한 토지피복

- 분류”, , 환경부 보고서, 1999. 11
- 전형섭, “GIS를 이용한 비점오염의 원인지역 추출에 관한 연구”, 전북대학교 대학원 석사논문, pp. 20~27, 1996.
- 정보통신교육원, “공간 데이터베이스”, 한국정보통신대학원, 1998
- 한국수자원공사, “GIS를 이용한 수자원관리 및 계획에 관한 연구”, 수자원연구소, 1993. 12
- 함창학, “GIS를 이용한 수문지형정보추출에 관한 기초적 연구”, 충북대학교 대학원 박사논문, 1996. 2
- 환경처, “GIS 및 원격탐사 기법을 이용한 환경 정보 추출 및 수질관리응용 시스템 개발”, 수질정보종합관리시스템 개발 제1차년도 연차보고서, 1993. 11
- 한의정 등, GIS를 이용한 도시개발사업의 환경 영향평가기법에 관한 연구, 국립환경연구원 보고서 제 17권, pp. 51~66, 1995
- Ferdinand Leberect Hellweger and David Maidment, “A GIS Pre-processor for Lumped Parameter Hydrologic Modeling Program”, CRWR Online Report 97-8, 1997
- Francisco Olivera, Seann Reed and David Maidment, “An Arcview Pre-Processor for HEC's Hydrologic Modelling System”, University of Texas, 1998
- Garbrecht, E. J., L. W. Martz, “Digital landscape parameterization for hydrological application in Application of GIS in Hydrology and Water Resource Management” : Proceeding of HydroGIS '96 Conference held in Vienna, pp. 169-173, 1996
- Hutchinson. M. F. and T. I. Dowling, “A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia”, Hydrological Processes, pp. 45-58, 1991
- Jenson S. K., Dominique J. O., “Extracting Topographic Structure from DEM for Analysis”, PE & RS, vol. 54, 1988
- Peter Neil, Hynd Smith and David Maidment, “Hydrologic Data Development System”, CRWR online Report 95-1, pp.57-75, 1995
- Peucker T. K., Douglas D. H., Detection of surface specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data, Comput. Graph. Image Proc., vol. 4, 1975