

지형정보자료를 이용한 유역인자 결정

The Determination of Basin Parameters Using GIS Data

강인준* · 최현** · 이병걸***

Kang, In Joon · Choi, Hyun · Lee, Byung Gul

1. 서론

유역해석을 위한 자료 추출은 여러 가지 특장관계가 성립되어 유량산출 및 홍수해석등에 중요한 수단으로 작용하고 있다. 현재까지 하천유역에 대한 수문지형정보를 취득하던 방법은 표본기법이나 일반측량기법에 의존하였기 때문에 오차가 많이 발생하고 있으며 정확하지 않은 자료로 인하여 유역해석에 많은 어려움이 발생한 것이 사실이다. 그러나, 컴퓨터와 지형공간정보시스템의 개발로 수리수문해석에 필요한 수계망해석, 경사방향, 유역경사, 유역면적, 유역표고 등 하천에 관련된 지형정보인자의 정확한 획득이 가능해졌다¹⁾. 수문지형학에서의 정량적·정성적 하도망해석은 하천을 차수에 의해 분류하는 Horton이론을 주로 이용한다. Strahler는 유역해석을 위한 하도망구축은 Horton이론을 적용하여 하천의 길이, 형상 및 발원 등을 추출하여 하천과 유역과의 위상관계에 관한 이론을 제시하였다²⁾. Valdes는 Horton-Strahler의 하천차수를 기본으로 지형학적 및 지형 기후학적 순간단위도를 유도하였다³⁾. 수치표고모델은 1950년대 후반에 개발되었으나⁴⁾, 1980년대에 이르러 각종 건설분야 및 측량 및 지형공간정보 분야에 이용되었다. 지표면의 높이값을 표현하는 방식에는 주로 격자별로 높이값이 부여된 수치표고모델을 많이 이용하는데, 수치표고모델은 격자크기에 따라서 해상도의 값이 달라진다. 격자크기가 작은 수치표고모델은 정밀도가 정확해지는 반면에 이를 계산하는데 많은 시간이 걸린다⁵⁾. 특히 수문지형학에서는 지형공간정보시스템의 발달로 인하여 하도망추출, 유역면적, 유역경사, 수문학적 모형, 유출경로등의 추출을 위해 수치표고모델이 이용되고 있다⁶⁾. 이러한 연구를 기반으로 수치표고모델을 이용하여 실시간 홍수예측시스템의 개발⁷⁾, 그리고 수문모델분포에 따른 수치표고모델로부터 토사이동에 관한 연구가 수행되었다⁸⁾. 국내에서는 수치표고모델을 이용한 각종 수문지형인자추출을 위해 지형공간정보시스템을 적용하였으며⁹⁾, 지형정보시스템을 이용한 수문지형정보추출이 발표되었다¹⁰⁾. 기존의 연구를 바탕으로 지형공간정보를 이용한 수문지형인자의 결정 및 퇴사량예측에 대한 연구가 수행되었다¹¹⁾. 수치표고모델에서의 수문지형인자추출은 기존의 전통적인 이용방식보다 경제적이고 정밀하며, 추출된 각종 수치자료들은 지형공간정보를 이용한 수문학적 분석 및 처리가 더욱 간단해졌으며¹²⁾, 위성영상에서 추출된 수치표고모델을 이용한 수문지형정보추출에 관한 연구가 시도되었다¹³⁾. 위성영상에서 수치표고모델의 추출은 아직까지는 쉽게 접근할 수 있는 방법이 아니기 때문에, 수문지형인자해석을 위해서 1:50,000 일반지도(paper map)로부터 추출된 자료를 이용하여 수치표고모델을 형성하였다¹⁴⁾. 그러나 기존의 방법은 등고선 및 표고인자를 추출하는 과정에서부터 오차가 발생하여 비교적 정확한 수치표고모델을 추출할 수가 없었다. 수치지도를 이용한 수문지형인자를 추출하기 위한 기본적인 연구는 아직까지 초기 단계에 이르고 있으나, 앞으로는 수치지도를 이용할 것으로 사료된다. 따라서, 본 논문에서는 1:25,000 축척을 가지는 수치지도에서 추출된 수치표고모델의 격자크기를 10m~150m까지 10m간격으로 형성하여 유역면적, 하도길이, 총하도길이, 유역고도값, 유역평균경사값 등을 산출하고 유역해석에 적절한 해상도를 가지는 수치표고모델의 격자크기를 제공하고자 하는데 연구목적이 있다.

* 정회원 · 부산대학교 토목공학과 교수교수 · 051-510-2353 · (kangprof@hanmail.net)
 ** 정회원 · 부산대학교 토목공학과 박사과정 · 051-510-3209 · (xhyun@pusan.ac.kr)
 *** 정회원 · 제주대학교 해양토목공학과 조교수

2. 이차원 평면 지형인자

2.1 Horton의 법칙

하도망분석의 정량적 해석은 Horton에 의해 차수에 따른 하도망구축기법이 소개되었으며¹⁵⁾, Strahler는 Horton분류와 다른 하천의 길이, 형상 발원을 고려하는 방식을 개선시켰다. Strahler 하천 차수방식에 따른 하도망구축을 보면 내절점은 선이나 하천의 결합점이고, 외절점은 이들로부터 선이나 하천으로부터 발원하는 하나의 하천에 대한 유출구를 의미한다. 각각에 대한 외절점과 내절점은 서로 연결되어 있고, 외절점은 하류측 내절점들과 연계되어있다. 먼저, 수원에서 발원하는 하도망을 1차 하도망이라 정의하고, 차수가 ω 인 두 개의 하천이 합류하면 $\omega + 1$ 이 된다. 다른 차수가 합류될 때는 하류에 따르는 차수는 상류하천중 차수가 큰 차수를 따르게 된다. 유역차수는 가장 높은 하천차수(Ω)와 같다. 1차 이상의 차수를 갖는 Strahler차수는 몇 개의 연결고리로 구성된다.

하천차수의 법칙은 주어진 차수의 흐름수는 하천차수(N_ω)와 반대되는 기하학적인 관계를 가진다. 이는 식 (1)과 같이 나타낼 수가 있다.

$$N_\omega = R_B^{\Omega - \omega} \quad (1)$$

여기서 Ω 는 하도망의 최대차수이며, ω 는 관심지역의 하도망차수이며, R_B 는 주어진 하도망에 대한 상수이며 분기율이라 한다. 식 (1)로부터 하도망의 총합은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{\omega=1}^{\Omega} N_\omega = 1 + R_B + R_B^2 + R_B^{\Omega-1} = \sum_{\omega=1}^{\Omega} R_B^{\Omega-\omega} = \frac{R_B^{\Omega}-1}{R_B-1} \quad (2)$$

또한, 하도분기율 $R_B = \frac{N_{\omega-1}}{N_\omega}$ 로 나타내며 이것은 차수 $\Omega - 1$ 의 하도분기율의 평균이 R_B 개라는 것을 나타내고 있다. 하도길이와 하도면적의 법칙에 대한 개념은 각절점에 대한 하도수의 법칙, 길이비 R_L 와 면적비 R_A 로 구성되는 연속비와 같다. 하도의 차수에 대한 각각의 길이 \overline{L}_ω 와 각차수에 대한 평균 하도 면적 \overline{A}_ω 는 식 (3), (4)와 같다.

$$\overline{L}_\omega = \frac{1}{N_\omega} \sum_{i=1}^{N_\omega} L_{\omega i} \quad (3)$$

$$\overline{A}_\omega = \frac{1}{N_\omega} \sum_{i=1}^{N_\omega} A_{\omega i} \quad (4)$$

여기서 $L_{\omega i}$ 는 하도차수 ω 의 길이이고 $A_{\omega i}$ 는 하도차수 ω 와 지류의 유출에 기여하는 면적이다. 예를 들어 \overline{A}_Ω 는 유역의 총면적이다. 따라서, Horton의 법칙에 따른 하류 개수 R_B , 길이비 R_L 와 면적비 R_A 는 식(5)와 같이 계산된다.

$$R_B = \frac{N_{\omega-1}}{N_\omega} \quad (5)$$

$$R_L = \frac{\overline{L}_\omega}{\overline{L}_{\omega-1}} \quad (6)$$

$$R_A = \frac{\overline{A}_\omega}{\overline{A}_{\omega-1}} \quad (7)$$

일반적으로 R_B 의 값은 자연유역에서 3~5의 값을 가지고, R_L 은 1.5~3.5, R_A 는 3~6의 값을 가진다고 알려져 있다¹⁶⁾. 하도개수와 길이법칙은 하도차수 ω 의 총길이를 식(8)과 나타낼 수 있으며 하도의 총길이는 식(9)로 나타낼 수가

있다.

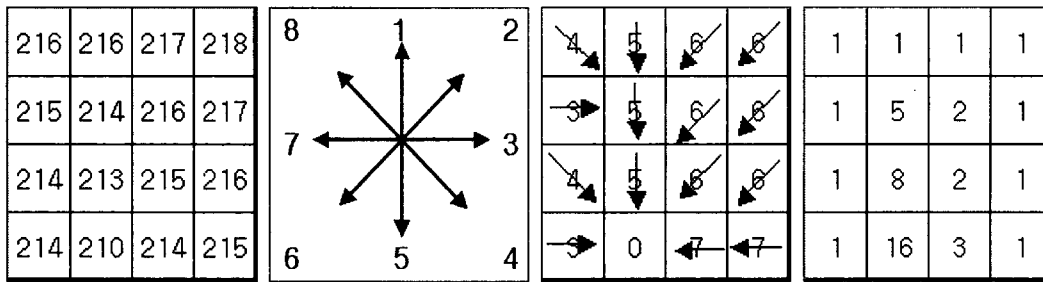
$$\sum_{i=1}^{N_{wi}} L_{wi} = \bar{L}_{wi} R_B^{\Omega-1} R_L^{\Omega-1} \quad (8)$$

$$\sum_{\omega=1}^{\Omega} \sum_{i=1}^{N_{wi}} L_{wi} = \bar{L}_{wi} R_B^{\Omega-1} \frac{R_B^{\Omega}-1}{R_{LB}-1} \quad (9)$$

여기서, \bar{L}_1 은 일차하도망의 길이이며, $R_{LB} = \frac{R_L}{R_B}$ 이다.

2.2 수치표고모델로부터 유역인자 결정

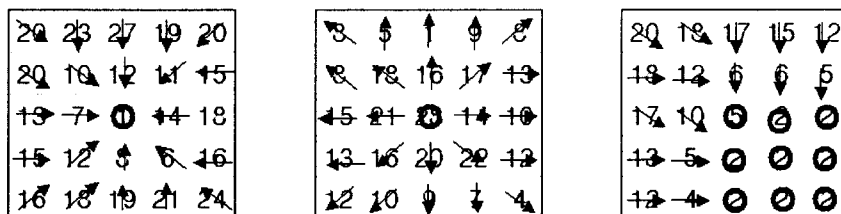
수치표고모델(DEM: Digital Elevation Model)이란 실제지형에 나타나는 연속적인 기복변화를 수치적으로 표현하는 방법이다. 유역특성은 수치표고모델로부터 흐름 방향을 결정할 수가 있는데 흐름방향에는 4개의 방위에 따라 흐름방향을 결정하는 4방향 모델과 그림 3과 같이 8개의 방위에 따라 흐름방향을 결정하는 8방향 모델이 있는데 본 논문에서는 8방향모델을 적용하였다. 8방향모델에서는 그림 1의 b와 같이 셀 주위에 인접해 있는 8개의 격자로부터 가장 낮은 표고값을 가지는 격자방향으로 흐름방향이 정해진다.



(a) 수치표고모델 (b) 8방향모델 (c) 흐름 방향 (d) 누가 흐름량

그림 1. 8방향모델

일반적으로 수치표고모델은 3차원 지형분석시에는 별다른 수정이 필요 없으나 수문해석에서 이용되는 수치표고모델은 수렴점이나 발산점에 대한 고려를 해야 한다. 수렴점이란 그림 2의 (a)와 같이 중앙으로 수로가 형성되는 지점으로서 어느 지점의 높이값이 주변의 모든 값보다 작을 경우 생성되며 이로 인하여 유로가 형성되지 않는 점을 말한다. 특히 작은 웅덩이나 저수지에서 수렴점의 발생으로 인하여 유역면적을 산출하지 못하는 경우가 발생한다. 발산점이란 그림 2의 (b)와 같이 어느 한지점이 주변의 모든 값보다 높을 경우 발생하며 이로 인하여 유로가 발산하는데 산봉우리 외에는 발생하면 안된다. 평지점이란 그림 2의 (c)와 같이 흐름방향이 발생하지 못하는 경우 발생하며 정확한 유로값을 생성 할 수가 없다. 본연구에서는 이러한 그림 2와 같은 지역의 웅덩이나 산꼭대기, 평지점을 제외한 지역에서 오차는 표고자료의 정확성을 평가하여 항공사진, 인공위성영상이나 수치지도에 나타나있는 하천의 형상에 따라 적절한 높이값을 부여하여 올바른 유로가 형성되도록 하였다.



(a)수렴점 (b)발산점 (c)평지점

그림 2. 수치표고모델의 수문해석시 발생하는 오차

3. 하도망구축을 위한 지형분석

3.1 연구대상지역 선정

본 논문에서 이용된 수치지도는 국립지리원에서 제작한 1:25,000이며, 연구대상지역은 경남 양산에 위치한 양산천의 일부 유역으로서 유역형상에는 직사각형, 반원형 그리고 역삼각형 등이 있는데 연구지역은 역삼각형의 형상을 하고 있다. 누가흐름량의 임계치(threshold)는 유역의 생성 및 개수에 영향을 미치게 되는데 일반적으로 지수함수적으로 감소하는 경향을 보인다. 누가흐름 임계치는 유역면적을 표현하기 때문에 유역의 크기와 유역의 개수는 지수함수적으로 반비례하는 경향이 있다¹⁷⁾. 유역분할은 누가흐름도와 경사방향도를 이용하여 누가흐름량의 연산임계치를 변화시켜 수치표고모델의 격자크기별로 하나의 유역이 형성되도록 임계치를 설정하였다. 대규모지역에 대한 지형특성인자를 추출할 때는 1:50,000 지도를 주로 이용하고 있으나, 국립지리원에서는 2001년 현재까지 1:50,000 수치지도를 공급하지 않기 때문에 1:25,000 수치지도로 분석하였다. 수치지도에서 연구대상지역을 추출하여 각종 정보를 추출한 결과값은 표 1에 나타나있다. 연구대상지역에 대한 좌표계는 TM좌표계이며 동부원점을 사용한 좌표값과 불규칙삼각망에서 추출된 각종지형정보에 대한 값들이다. 수치지도에서 구축한 수치표고모델의 격자크기에 따른 각종 지형특성에 관한 인자값에 대한 비교분석이므로 토양도 및 토지이용도는 작성하지 않았다. 1:25,000 수치지도는 평면위치에서 5.0m, 등고선은 3.0m, 그리고 표고점은 1.5m의 표준편차를 보이고 있다.

표 1. 연구대상지역의 좌표값 및 각종 정보값 (단위 : m)

	x	y	z
최 소 값	393,199.559	197,286.712	40.000
최 대 값	399,539.880	203,113.797	540.000
평 균	396,249.570	200,211.653	207.905

그림 3에서 A곡선은 청년기, B곡선은 장년기, 그리고 C곡선은 노년기 지형의 대표적인 곡선을 보여주고 있다¹⁸⁾. 연구대상지역의 지형은 장년기에서 노년기로 많이 접어들고 있는 상태로서 침식이 둔화되고 있다는 것을 알 수가 있었다. 표 2는 격자크기에 따른 하도의 지형특성을 나타낸 것으로서, 격자크기별로 최대하도경사, 평균하도경사 및 주하도길이 및 표고값을 나타내었다.

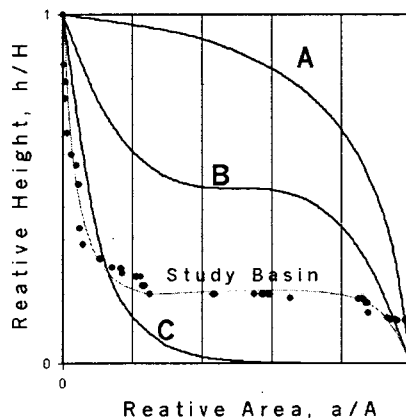


그림 3. 연구지역의 Hypsometric Curve

표 2. 격자크기에 따른 주하도의 길이와 경사 및 표고값

격자간격 (m)	하도경사(%)		표 고 값(m)		하도길이(km)	유역면적(km ²)
	최대값	평균값	최대값	최소값		
150	38.578	3.824	402	41	9.838	25.828
140	24.984	3.000	425	43	9.833	26.532
130	36.245	3.469	476	41	10.338	26.712
120	32.950	3.771	439	43	9.557	26.436
110	48.189	3.970	408	42	9.683	26.450
100	48.772	3.778	442	41	10.318	26.622
90	45.031	3.880	450	45	9.700	26.562
80	41.236	3.787	451	42	10.143	26.637
70	49.853	4.237	476	43	10.256	26.371
60	48.275	4.020	466	45	10.195	26.748
50	45.787	4.280	473	47	10.234	26.745
40	42.500	4.206	476	41	10.317	26.603
30	46.609	4.140	468	42	10.527	26.857
20	59.928	3.885	456	42	10.732	26.897
10	59.928	3.463	462	42	10.946	26.983

3.2 Horton 차수에 따른 하도망 분석

그림 4는 100m 수치표고모델에서 추출된 하도망이며, 그림 5는 격자 크기별로 Horton 하천망을 구축하여 각 차수별 하천수와 Horton 하천차수를 그래프화 한 것이다. 150m 격자간격에서는 Horton 하도 차수가 5차수까지 형성되었으며, 140m에서부터 50m 까지는 6차수 그리고, 40m 에서는 7차수 , 30m, 20m에서는 8차수까지 형성되었고, 10m에서는 9차수 까지 형성되었으나 실제 유역해석에서 큰영향을 미치지 못하는 부분의 잔가지는 제거하여 하도망을 구축하였다. 그림 5을 보면 격자별로 하도망을 구축한 결과 상위 차수로 갈수록 지수선형으로 감소함을 나타내고 있으며, 격자크기별로 하도망의 개수에 차이가 많았다.

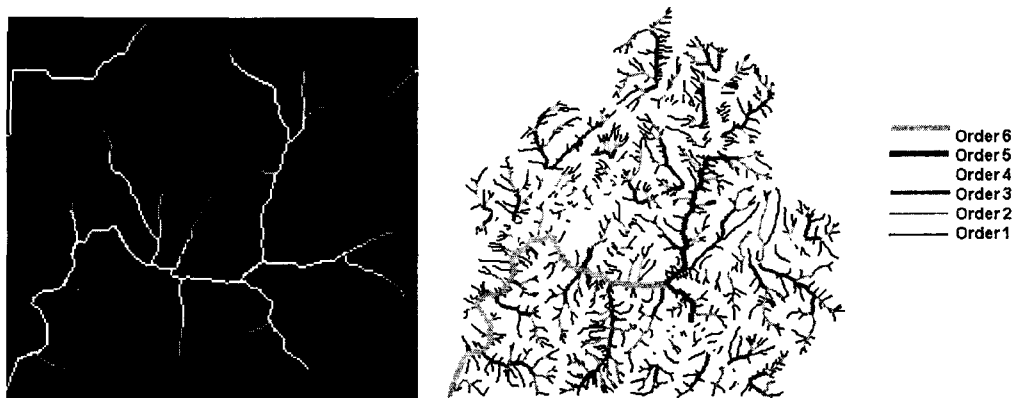


그림 4. 100m 격자크기로부터 추출된 Horton 차수

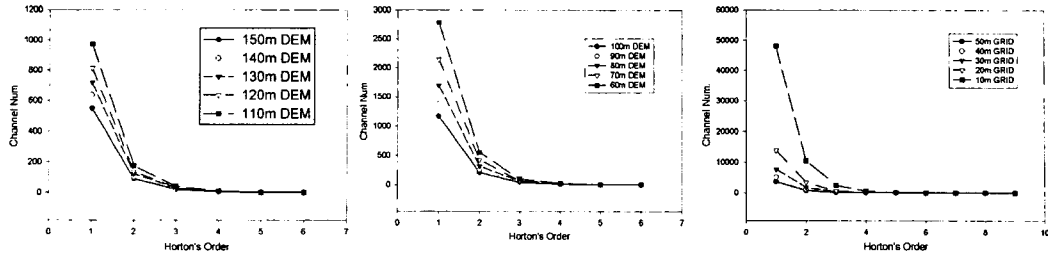


그림 5. 격자크기에 따른 하천수와 Horton 하천차수

표 3. 격자크기에 따른 Horton 하천차수 개수

하천차수	수치	D E M (m)														
		150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
1	42	90	99	123	138	39	42	47	66	74	104	148	217	365	658	507
2	12	21	20	29	31	10	11	12	19	18	26	33	47	87	142	120
3	3	6	6	7	7	2	2	3	3	5	5	8	13	19	38	34
4	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	3	5	8	9
5	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

표 3은 격자크기에 따른 Horton 하천차수의 개수를 나타내고 있는데 1: 25,000 수치지도에서 추출한 하도망이 4차수로 나타났으며, 하도망의 개수는 격자크기에 따라 많은 차이를 나타내고 있었다. 1: 25,000 수치지도에서의 하도망에 대한 차수는 4차수이었다. 따라서 적절한 해상도를 가지는 하천차수를 4차수라 할 때 표 3 내의 굵은 실선은 유효 차수를 나타낸 것이며, 음영이 있는 부분은 수치지도와 비슷한 하천분포를 나타내고 있는 격자크기를 나타내는데, 110m, 100m, 90m, 40m 그리고 20m 격자크기에서 자연하도망과 비슷하게 형성이 되었으며, 하도망 추출을 위해서 적절한 하도망의 크기는 대략 100m 정도의 격자임을 알 수가 있었다.

3.3 수치표고모델 격자 크기에 따른 하천인자 분석

그림 6은 최대폭합수와 격자간격간의 상관관계로써 모두 지수함수적인 경향을 보이고 있었다. 그림 7는 연구대상지역에 대한 격자간격별 최대하도 길이의 관계를 나타내고 있으며, 0m ~ 80m에서는 선형적으로 감소되고, 80m ~ 150m에서는 하도길이가 불규칙하게 나타났다. 격자별 최대하도길이는 10m 격자간격에서 10.946km이었으며, 최소하도길이는 120m 격자 간격에서 9.556km으로 나타났다. 또한 격자크기별로 하도길이를 보면 선형적으로 감소하는 경향이 있으나 격자크기에 따라서 하도길이가 일률적으로 감소하는 것이 아니라는 것을 알 수가 있었다. 1:25,000 수치지도에서 측정된 최대하도길이의 길이는 10.364km이다. 여기에서 하도길이의 측정은 래스터 GIS로 구성된 하도망을 벡터화를 실시하여 하도길이를 측정하였다. 최대하도길이에 따른 적절값은 그림 8에서의 선형식 $f(x)$ 에서 격자거리가 60m에서 가장 적절한 것으로 나타났다. 본 논문에서는 40m ~ 80m에서는 비교적 하도길이가 균일하게 분포되었다.

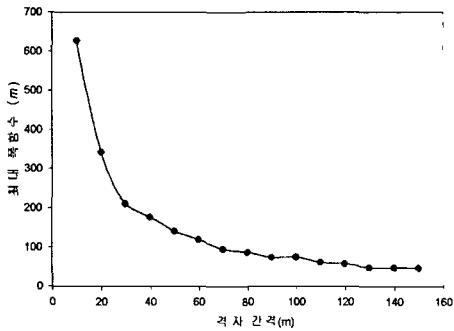


그림 6. 최대 폭람수와 격자크기별 상관관계

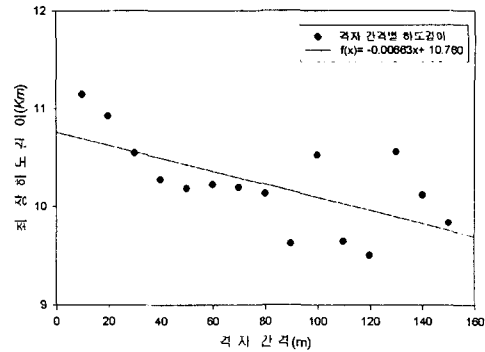


그림 7. 격자크기별 최대 하도길이

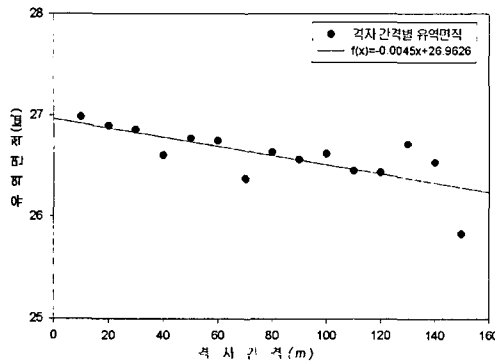


그림 8. 격자크기별 유역면적

그림 8은 격자크기에 따른 유역면적을 나타낸 것이다. 수치지도에서 측정한 유역면적은 26.607km²로 나타났으며, 표 2에서 수치표고모델을 이용한 유역면적은 최소 25.828km²에서 최대 26.984km²로 나타났다. 격자크기가 클수록 유역면적은 대략 선형적으로 감소하지만 격자크기는 유역면적에 커다란 영향을 미치지 않음을 알 수가 있었다. 본 연구에서 수치지도에서 측정한 유역면적과 가장 비슷한 결과를 보이는 수치표고모델의 격자크기는 50m일 때 과 비슷하게 나타났다. 이러한 연구결과를 볼 때 하도형상, 유역면적, 하도길이등은 격자 크기에 따라 서로 다르게 나타남을 알 수 있었다. 수문지형학에 지형공간정보를 이용할 때 유역분할은 누가흐름에 대한 양에 따라서 결정되어지는데 적절한 유역수를 결정하기 위해서는 유역형상과 유역면적을 고려하여야 한다. 연구결과 수치표고모델의 격자크기는 하도망특성에 많은 영향을 미치고 있다는 것을 알 수가 있는데, 이는 하도구간내의 지형기후학적 단위유량도의 침투유량, 침투도달시간, 퇴사량등에 많은 영향을 미칠 것으로 사료된다.

4. 결론

지형정보자료를 이용한 유역인자 산출에 관한 연구에서 다양한 격자크기에 따른 유역특성인자의 분석을 실시한결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 1: 25,000 수치지도에서 추출한 하도망은 4차수로 나타났으며, 수치지도와 가장 유사한 하천이 형성되는 수치표고모델의 격자크기는 100m로 나타났다.

둘째, 격자크기에 따라서 Horton 하도망 최대 차수가 다르게 나타났으며, 상위 차수로 갈수록 지수선형으로 감소함을 알 수가 있었으며, 격자크기별로 하도망의 개수가 상당히 많은 차이를 보이고 있었다.

셋째, 격자크기별로 하도길이를 보면 대체적으로 선형적으로 감소하는 경향이 있으며, 하도길이에 대한 적절한 격자크기는 50m정도로써, 40m ~ 80m에서는 비교적 하도길이가 균일하게 분포됨을 알 수가 있었다.

앞으로 유역형상과 지형에 대하여 지속적인 연구를 실시하여 우리나라에 적절한 수치표고모델의 격자값을 제시하는 지속적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R.(1991) "Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications", *Hydrological Processes*, No. 5, pp. 3-30.
- 2) Strahler, A.N.(1950), "Equilibrium Theory of Erosional Slopes Approached by Frequency Distribution Analysis", *Am. J. sci* NO. 248, pp. 673-695.
- 3) Valdes J.B., Y Fiallo and I. Rodriguez-Iturbe(1979), "A Rainfall-runoff analysis of the geomorphologic IUH", *Water Resour. Res.*, No.15, pp. 1412-1434.
- 4) Miller, C.L., Laflamme, R.A.(1958), "The digital terrain model - theory and application", *Photogrammetric Engineering*, No. 24, pp. 433-442.
- 5) Shearer, J.W. (1990), "The Accuracy of Digital Terrain Models", Chapter 24, *Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering*, Whittles Publishing, London, pp. 315-336.
- 6) Hogg, J., J. E. McCormack, S. A. Roberts, M. N. Gahegan, and B. S. Hoyle (1993), "*Automated derivation of stream-channel networks and selected catchment characteristics from digital elevation models*", In Mather, P.M. (ed.) *Geographic Information Handling - Research and Applications*. John Wiley and Sons, New York. pp. 207-235.
- 7) R. L. Bras and Garrote, L.(1995), "A distributed model for real-time flood forecasting using digital elevation models", *Journal of Hydrology*, vol. 167, pp 279-306.
- 8) Moussa, R. (1997), "Geomorphological transfer function calculated from digital elevation models for distributed hydrological modelling", *hydrological Processes*, No. 11, pp. 429-229.
- 9) 강인준, 최현, 최철웅 (1998) "수문학용 지형공간정보의 하도망 구축", 1998년도 학술발표회 논문집 (IV), 대한토목학회, pp.497-500.
- 10) 함창학 (1996) "지형정보시스템(GIS)를 이용한 수문지형정보추출에 관한 기초적 연구", 박사학위논문, 충북대학교.
- 11) 강인준, 최현, 최철웅 (1999), "지형공간정보 데이터를 이용한 퇴사량 예측기법", 1999년도 학술발표회 논문집(IV), 대한토목학회, pp.597-599.
- 12) Xinhao Wang and Zhi-Yong Yin (1998), "A comparison of drainage networks derived from digital elevation models at two scales", *Journal of Hydrology*, No. 210, pp. 221-241.
- 13) 어수영 (1998), "수치위성영상을 이용한 수문지형정보추출에 관한 연구", 석사학위논문, 연세대학교.
- 14) 최철웅 (1999) "지형공간정보체계를 이용한 수문지형인자 결정에 관한 연구", 박사학위논문, 부산대학교.
- 15) Horton, R. E.(1945) "*Erosional development of stream and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology*", *Geological Society of America Bulletin*, vol. 56, 275-370.
- 16) Smart, J. S(1968), "Statistical properties of stream lengths", *Water Resources Res.* V1o.4, No.5, pp 1001-1014.
- 17) 정휘철 (1999), "지형공간정보 시스템의 하천지형학에 대한 적용" 석사학위논문, 부산대학교.
- 18) Rafael L. Bras (1990), "Hydrology : An introduction to Hydrologic Science, Statistical Properties of Stream Lengths", Addison Wesley, pp. 584-587.