韓國水資源學會論文集
第36卷 第6號 · 2003年 12月
pp. 925~936

GIS를 이용한 등시간도 작성의 평가

Evaluation for Constructing Isochrones using a GIS

조 효 섭* / 김 계 호** / 정 관 수*** / 김 재 한****
Cho, Hyo Seob / Kim, Ke Ho / Jung, Kwan Sue / Kim, Jae Han

Abstract

The objective of this study is to suggest new drawing methods of isochrones using GIS. For this purpose the Unit Hydrograph (UH) of studied watershed for instantaneous rainfall suggested by Clark have been determined by routing the time-area curve through a single linear reservoir.

To evaluate constructing methods of isochrones three methods has been examined; Channel Profile and Clark-kict method; Laurenson method; Average velocity method of S.C.S. Also, these methods have been recomposed by GIS in this study.

To apply first method, spatial modeling, the vector based on the stream network and Route_System measuring a distance between points has been used. A raster based on the flow direction grid from burn DEM and the slope grid from original DEM has been applied for the second method. The third method has been applied by a raster based on the landuse grid and a velocity function expressed by slope. Results by these three methods have been evaluated with observed hydrograph, and the method using average velocity method of S.C.S shows more reasonable results comparatively.

Keyword : Travel time, Clark's UH, Isochrones, GIS, Laurenson method, SCS method

요 지

본 연구는 Clark의 도달시간-집수면적도를 이용한 유역추적법에 적용되는 등시간도 작성에 있어 GIS기법을 적용하기 위해 도형자료의 공간 모형화를 수행한 것이다. 기존의 수 작업으로 수행했던 하천종단법 및 Clark-kict법, Laurenson법, SCS법 등의 작업을 일관성 및 재현성을 높일 수 있고, GIS기법이 적용 가능하도록 다음과 같

* 일신하이텍 기술연구소 소장
Chief(Vice Director),Tech.Ins.of ILSHIN HiTech Co.,7th. Samwon B/D,1329-8,Seocho-Dong, Seocho-Gu, Seoul 137-858, Korea
(E-mail : chohs@cnu.ac.kr)
** 일신하이텍 고문
Consulting Chief, ILSHIN HiTech Co.,7th. Samwon B/D,1329-8,Seocho Dong, Seocho Gu, Seoul 137-858, Korea
*** 충남대학교 토목공학과 부교수
Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., ChungNam National Univ. Daejeon 305-764
(E-mail : Ksjung@cnu.ac.kr)
**** 충남대학교 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Engrg., ChungNam National Univ. Daejeon 305-764
(E-mail : Kjh@cnu.ac.kr)

이 공간 모형화를 수행하였다. 하천종단법 및 Clark-kict법은 벡터형태의 실제 하천망도 만을 이용하여 실제 하천망도의 흐름방향과 하천망도의 꼭지점을 점사상 커버리지로 변환하고, 이를 주워진 임의의 두 점 사이의 거리를 흐름방향으로 추적하여 거리를 측정할 수 있는 ARC/INFO의 Route_System을 이용하여 작성할 수 있는 방법을 제시하였다. Laurenson법은 벡터형태의 실제 하천망을 정방형격자의 고도행렬로 표현되는 DEM자료에 위치시켜 실제 하천망을 DEM자료에 정의한 Burn DEM(Equivalent DEM)로부터 유역의 흐름방향과 원본 DEM자료의 경사를 래스터(Raster)기반으로 모형화하였다. S.C.S방법은 토지이용조건과 유속을 경사의 함수로 표시한 공식을 적용할 수 있도록 래스터기반으로 모형화하여 적용하였다. 본 연구에서 제시한 공간 모형화 방법별로 등시간도를 작성하고, HEC-1모형을 이용한 모의 유출수문곡선과 실측 수문곡선를 비교하여 그 적합성을 평가하였다. 평가결과 유역의 토지이용조건과 경사를 고려한 SCS방법이 타 방법에 비하여 비교적 합당함을 보여주웠다.

핵심용어 : 도달시간, Clark의 유역추적법, GIS, 등시간도, Laurenson의 도달시간,SCS방법

1. 서 론

Clark의 유역추적법에 적용되는 도달시간-집수면적도는 유역 응답 시간특성을 이용하여 산정한다. 이 때 사용하는 도달시간은 유역의 수리학적 특성(유속, 조도계수 등)을 이용하게 되며, 등시간도는 이 도달시간을 이용하여 작성하게된다. Clark의 유역추적법은 유역출구에 가상의 단일 선형 저수지를 위치시켜 유역의 저류영향을 고려하게 되고 도달시간-집수면적도 작성에 유역의 특성(모양, 수리학적 길이, 지표면의 조도 등)이 반영되어 유출의 전이와 저류(확산 또는 감쇠)를 포함하기 때문에 유출의 물리적 현상을 구체적으로 기술할 수 있는 방법이다. 그러나 Clark모형을 적용하기 위해서는 등시간도로 구성되는 유역분할과 저류상수(k)의 결정에 어려움이 있다. 특히 등시간도의 작성은 해석자마다 다른 결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 그 작성에 많은 시간 및 노력이 들기 때문에 지루한 작업이 아닐 수 없다. 이러한 관점에서 본 연구는 도달시간에 따른 등시간도 작성에 대하여 GIS기법을 이용함으로서 지루하고 방대한 작업량을 획기적으로 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 그 작성에 있어 가능한 임의성을 배제할 수 있도록 하였다. 기존 연구에서는 대부분이 도달시간의 산정을 유속의 함수로 표현하고 이를 등시간도 작성에 적용하도록 제시되고 있으나, 이들에 대한 공간데이터 모형화에 대한 연구는 부족한 형편이라고 할 수 있다. 그러므로 본 연구는 등시간도 작성에 있어서 GIS기법을 적용하기 위한 도형자료의 공간데이터 모형화 관점에서 기존의 수작업으로 수행했던 방법들을 GIS기법에 적용 가능하도록 이들 방법을 재구성하고, 이들 작성방법에 있어 GIS기법 적용에 어느 방법이 타당한가를 비교 평가 하고자 하였다.

본 연구와 관련된 국내의 연구는 윤석영(1994) 등이 우리나라 국제수문개발계획(IHP)의 대표유역인 위천유역의 동곡 소유역에 등시간도 작성 및 도달시간-집수면적도로부터 유출량 산정연구가 있으며, 도달시간산정에 있어 kirpich 공식, 수문곡선을 이용한 방법, 유역평균유속을 이용한 방법 등을 사용하여 등시간도 작성에 적용성 평가를 수행한 바 있다. 또한 한국건설기술연구원(1994)에서는 홍수유출예측을 위한 수리 수문학적 인자의 결정에서 등시간도작성은 Clark-Kict 방법이 하천종단도를 이용한 방법, Clark-Johnstone방법 등과 같은 기존 방법 및 경험식을 이용한 방법에 비하여 계산과정이 간단하고 산정된 유속으로 등시간도를 지형도상에 손쉽게 수작업으로 구성할 수 있음을 제시한 바 있다. 윤광원(1994)등은 도달시간-집수면적도의 작성을 위한 소유역 구분방법의 영향을 검토한 바 있으며, 소유역 구분방법을 유역특성에 따른 방법, 선형적인 방법, 비선형적인 방법으로 검토한 결과 소유역 구분방법은 Clark방법에서 비교적 큰 영향을 미치지 못함을 제시한 바 있다. 최근 조효섭(2000)은 분포형 강우-유출모형의 격자 규모결정에 있어 격자 규모별로 Laurenson이 제시한 도달시간 공식을 사용하여 GIS기법으로 등시간도 작성을 수행한 바 있다.

국외 연구로서는 Maidment(1993)가 GIS를 이용한 공간적으로 분포된 단위도 연구에서 도달시간-집수면적도 산정에 있어 등시간도 작성에 유속방법을 이용함을 제시한 바 있으며, Sircar(1991)등은 유속을 토지이용도와 경사도의 함수로 표현하고 이를 이용하여 도달시간-집수면적도를 작성하는데 등시간도 작성을 수행한 바 있다. Muzik(1996)은 Manning의 유속공식과 운동파 방정식에서 주워지는 지표수 흐름의 도달시간을 이용하여 등시간도 작성을 수행한 바 있다.

2. 등시간도 정의 및 기존방법의 검토

2.1 등시간도의 정의

도달시간-집수면적도는 Dooge(1959)에 의해 제시된 등시간도(Isochrones)으로부터 작성된다. 등시간도의 정의는 유역의 출구지점에서부터 동일한 도달시간(Travel Time)으로 표시되는 점들을

연결한 지도로서 등시간선은 서로 교차하지 않으며, 분수계에서 시작하거나 끝나게되는 특성을 갖는다. 도달시간은 흐름거리와 유속으로부터 유도될 수 있다. 만약 하천상의 두 점의 거리가 L이고 이 두 점간의 연결된 경로를 따르는 유속은 $v(l)$이며, 여기서 l은 경로를 따르는 길이이고, 도달시간 t는 다음 식(1)과 같이 주워진다.

$$t = \int_0^L \frac{dl}{v(l)} \tag{1}$$

여기서, 임의의 경로구간 $\triangle l_i$ ($i = 1, 2, 3, \ldots\ldots I$)에서 유속 v_i이 상수라고 가정하면 다음과 같이 이산형으로 쓸 수 있다.

$$t = \sum_{i=1}^{I} \frac{\triangle l_i}{v_i} \tag{2}$$

이러한 등시간도의 작성을 실제로 적용하기 위해서 여러 가지 방법들이 고안되어 왔으며, 본 연구에서는 기존 방법들을 검토하고 GIS기법의 적용을 위해 이 방법들을 재구성하였다.

2.2 기존방법의 검토

2.2.1 Laurenson방법

Laurenson이 제시한 도달시간 공식에서 Manning의 유속이 $S^{1/2}$에 비례하는 점에 근거하여 임의의 유역면적 상에 떨어진 강우입자가 유역출구 지점까지의 흐름경로를 따라서 거리와 경사의 1/2 지수 승 비를 누가시킨 것을 도달시간이라고 정의 한 것이다. 일반적으로 수작업에 의한 작성절차는 지형도를 이용하여 등고선과 흐름경로의 교차점을 표시하고 유역의 최원거리의 흐름경로길이 값을 최대구간 거리 값으로 하고 이를 각 구간거리의 상대비를 구한 다음 도달시간을 곱하여 산정한다.

2.2.2 하천종단도를 이용한 방법

하천종단도를 이용하기 위해서는 지형도가 필요하며, 도달시간 산정은 유효우량이 끝나는 시점과 직접 유출수문곡선의 변곡점의 시간차로 정의되며, 지형도로부터 본류, 지류의 하천길이별 표고자료추출 및 하천종단그래프를 작성하고, 도달시간을 N 개의 간격으로 분할한다. 분할된 시간축과 하천종단그래프의 횡단축(하도거리축)에 N개의 시간간격수로 분할된 도달시간 축을 중첩하여 각 교차점을 읽고 이를 지형도상에 표시하고 이를 연결하고 등시간도를 작성한다.

표 1. Clark -Kict방법의 수행절차

단계	처리내역	비고
1	유효우량과 직접유출수문곡선으로부터 각각의 1차모멘트를 산정	강우-유출자료활용
2	지체시간산정 : $L_t = DRH_m - ERH_m$	L_t : 지체시간 DRH_m : 직접유출수문곡선의 1차모멘트 ERH_m : 유효우량의 1차 모멘트
3	최소이동시간($= ERH_m$) 산정	유효우량 1차 모멘트
4	식(3)을 이용하여 유역평균유속 산정: $V_m = 0.278 \cdot \frac{L_m}{T_m}$ (3)	V_m : 유량의 이동속도(m/s) L_m : 하천의 평균거리(km) T_m : 최소이동시간(hr)
5	식(4)를 이용하여 등시간도 작성 $L_{is} = 3.6 \cdot V_m \cdot \triangle t$ (4) L_{is} : 유역출구에서 $\triangle t$ 에 해당하는 등시간거리 V_m : 유역의 평균유속 $\triangle t$: 등시간도의 시간구간(hr)	평균 최대 유속을 거리로 환산하여 필요한 등시간구간을 $\triangle t$만큼 상류 쪽으로 하천을 따라 표시한 후 유역의 지형조건과 유량의 이동방향을 고려하여 미끈하게 작도

2.2.3 Clark-Kict방법

한국건설기술연구원에서 제안한 방법으로서 Clark모형의 매개변수를 산정하기 위해 유속을 이용하여 등시간도를 작성하는 것으로 다음 표 1과 같은 절차에 따라서 수행한다.

유속의 산정은 이동거리가 중요한 변수이며, 유역내 발생한 유효우량은 유역내에 무작위적으로 입력되므로 이로 인해 발생한 홍수파의 이동거리는 유역출구 근처의 짧은 거리에서 유역 최원점 거리에 이르기까지 다양한 이동경로를 택하게 되며 결국 홍수파는 유효우량 효과가 유역의 평균거리를 이동하면서 형성된 결과라고 할 수 있다. 따라서 홍수파의 이동거리는 유역출구에서 1차수하천까지의 길이를 각각 측정하고 이를 합하고 총 1차수하천의 수로 나눈 것이 하천의 평균거리라고 정의하여 사용한다.

2.2.4 SCS방법

SCS의 유속법(Upland or Velocity Method)은 물 입자의 이동하는 흐름경로를 유속으로 나눈 것으로 정의한 시간을 이용한다. 이때 사용되는 것은 토지이용도 및 경사도를 고려하여 유속을 산정한다. 토지피복도(토지이용도) 및 경사도를 이용하는 유속법은 표 2에서 보는 바와 같이, 토지이용 및 피복조건과 지형의 경사를 유속의 함수로 표현한 것으로서 SCS방법에서 제시된 그래프를 식으로 표현한 것이다.(출처: 참고문헌 13) 이것은 기존 방법 대부분이 하천과 지형도의 등고선 등을 이용하여 유속의 개념을 이용하는 반면 토지이용 및 토지피복상태 등을 고려하기에는 너무도 많은 작업을 수행하여야 하기 때문에 등시간도의 작도에 있어서 실무적으로 적용하기에는 너무나도 곤란점이 많았다.

3. GIS의 적용

앞서 기술한 각 방법별로 GIS를 적용하기 위하여 공간데이터를 모형화 하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 모형화를 위하여 각 방법별로 공간데이터 모형은 격자방법(Grid)를 사용하였으며, 이러한 모형화를 검토하기 위해서 국제수문개발계획(IHP)의 대표시험유역인 보청천유역의 소유역인 산성교지점을 통하여 검토하였다.

3.1 각 방법별 공간데이터의 모형화 및 등시간도작성

등시간도 작성을 위해서 필요한 공간데이터는 등고선도, 하천망도의 벡터도형자료를 이용한다. 등고선도 및 하천망도는 국립지리원의 1/5,000의 수치지도를 이용하였으며, 원시자료의 가공은 GIS소프트웨어인 ARC/INFO을 이용하여 다음과 같은 절차에 의하여 기본적인 가공을 수행하고, 각 방법별로 등시간도를 작성하였다. 하천망도는 수치지도로부터 추출한 실제 하천망도를 이용할 수 있고, 등고선도를 이용하여 작성된 DEM으로부터 생성된 하천망도를 이용할 수 있다. DEM으로부터 생성된 하천망도를 사용할 경우에는 실제 하천망도와 불일치하는 부분이 발생되며, 특히 평탄한 지역의 경우 오류가 발생한다. 이를 최소화하기 위한 수문학적 DEM 생성 기법으로는 Agree DEM(동일수치표고모형)과 Burn DEM(Equivalent DEM)을 사용한다. Agree DEM(동일 수치표고모형)을 사용할 경우 대상유역의 실제 하천망과 유사한 하천망을 추출하기 위해서는 실제 하천망과 Agree를 적용하지 않은 원본 DEM으로부터 추출한 하천망을 중첩하여 두 하천망의 불일치되는 거리 값인 버퍼크기(Buffer size)를 결정하

표 2. 토지이용 및 피복조건과 지표면경사(S)에 따른 평균 속도(m/s)

토지이용 및 피복조건		Class 번호	$V=aS^b$	
			a	b
지표면흐름	산지(울창한 수목지역)	1	0.7572	0.4933
	잡종지로서 비경작지 또는 약간의 경작지: 좁고 긴 농경지나 숲	2	1.4394	0.4933
	목초지(짧은 풀)	3	2.0525	0.4958
	경작지(논, 밭)	4	2.6601	0.4955
지표면 흐름이고 충적선상지	거의 대지 또는 비경작지	5	2.9121	0.4960
초생 수로	식물로 덮힌 수로	6	3.8071	0.4692
천수흐름	포장지역(작은 협곡하천)	7	7.6957	0.5486

여 실제 하천망과 Agree DEM로부터 생성되는 하천망과 일치되도록 불일치되는 거리 값인 버퍼크기를 반복적으로 조정하여 처리한다. 이때 버퍼크기를 너무 크게 설정할 경우 유역의 상류지역에 DEM의 외곡이 심하게 나타날 수 있기 때문에 적용되는 수문분석의 수준에 따라서 적절하게 처리하여야한다. 본 연구에서는 유역 전체에 걸친 래스터(Raster)형태의 유역 흐름방향을 실제 하천망의 흐름방향에 집수될 수 있도록 하기 위한 것이 목적이므로 벡터형태의 실제 하천망을 정방형 격자의 고도행렬로 표현되는 DEM자료에 실제 하천망을 위치시켜 하천망을 DEM자료에 정의한 Burn DEM를 생성하고 이로부터 흐름방향도를 작성하였다. 이의 전 과정을 흐름도로 나타낸 것이 그림 1이며, 그림 2는 DEM에 하천망을 정의하여 표시한 Burn DEM이며, 그림 3은 Burn DEM으로부터 생성된 유역의 흐름방향과 벡터 형태의 실제 하천망도의 흐름방향을 중첩하여 표시한 것을 확대하여 보여주는 그림으로서 생성된 유역의 흐름방향과 실제 벡터형태의 하천망도의 흐름방향이 잘 정의되었는지를 확인할 수 있다.

또한 벡터자료의 하천망도를 이용한 등시간도를 작성하기 위해서는 유역출구로부터 유역내 하천의 임의의 지점까지 등거리인 지점을 연결한 등거리도 작성이 필요하다. 벡터 자료의 실제 하천망에서 유역경계로 향하는 1차수 하천 중 유역경계까지 충분한 하천길이를 가지고 있지 못한 1차수 하천은 등고선에 직각방향이 되도록 유역경계까지 확장하고, 벡터자료의 하천망 꼭지점(vertex)을 점 사상의 커버리지로 변환하였다. 이렇게 변환된 벡터형태의 하천 점사상 커버리지(Coverage)를 실제 하천망의 흐름방향을 가지고 각 하천의 임의의 점에 대하여 유역의 출구지점까지 경로를 추적하여 각 하천지점과 유역출구지점까지의 거리를 계산하는 Route_System을 이용하여 하천의 점사상 커버리지의 누가거리도를 작성하였다. 이의 전 흐름과정을 나타낸 것이 그림 4이며, 그림 5는 Route_System을 이용하여 생성된 유역내 임의의 하천 점에 대한 누가거리를 측정한 결과를 보여준다. 그림 6은 그림 5에서와 같이 유역출구로부터 임의의 하천 점까지의 누가거리를 측정한 점사상의 커버리지를 TIN(불규칙삼각망: Trian- gulated Irregular Network)을 이용하여 유역 전체에 걸쳐 유역출구로부터의 등거리도를 작성한 것이다.

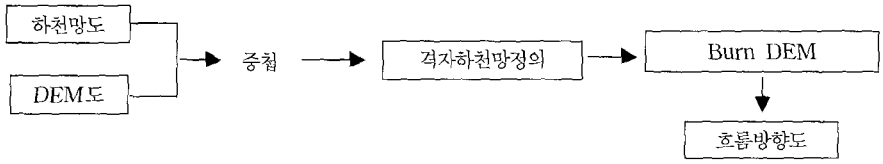


그림 1. 유역의 흐름방향 및 Burn DEM 구성 흐름도

그림 2. 유역의 Burn DEM

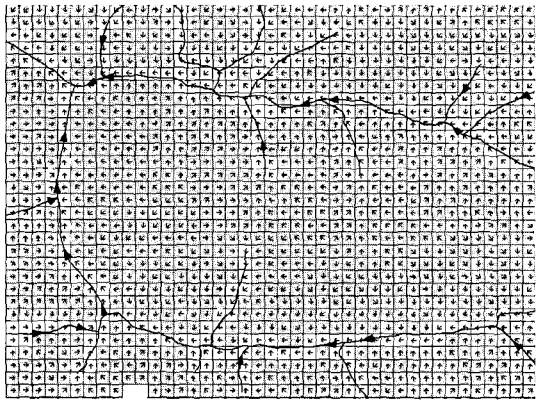


그림 3. 유역의 흐름방향 및 하천망도-일부확대

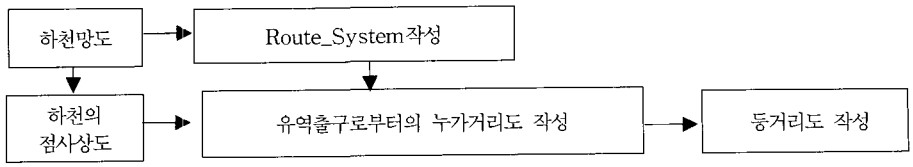


그림 4. 등거리도 작성 및 등시간도 구성 흐름도

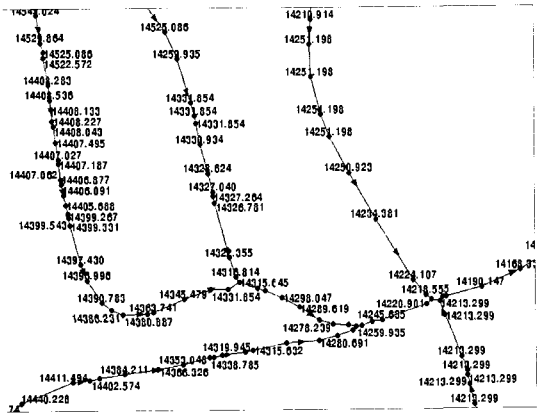


그림 5. Route_System을 이용한 누가거리도

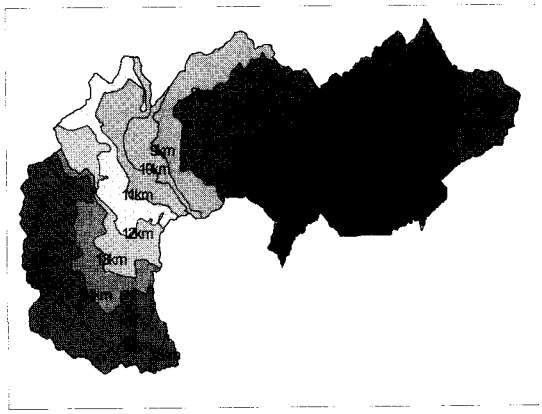


그림 6. 실제 하천망으로부터 생성된 등거리도

3.1.1 Clark-kict 및 하천종단도를 이용하는 방법의 모형화

Clark-kict방법에서 필요로하는 자료는 하천망도의 도형자료와 강우 및 실측 유출 수문곡선 자료가 필요하며, 도형자료는 그림 1의 수치지형도의 실제 하천망도를 사용하여 유역의 출구지점에서 소유역별 1차수 하천까지의 거리를 각각 구하여 1차수하천의 총수로 나누어 하천의 평균거리를 구한다. 이를 식(3)에 의하여 유역의 평균유속을 계산한 후 하천을 따라서 일정시간간격($\triangle t$ =1시간)으로 상류쪽으로 같은 도달시간을 갖는 등시간거리를 식 (4)에 의하여 등시간거리도를 작성하여 등시간도를 작성하게 된다. 또한 하천종단도를 이용하는 방법은 수작업으로 수행할 경우 하천종단도 그래프를 이용한다. 이 두 방법은 모두가 1차수 하천내지는 본류 및 지류의 연장 측정의 방법에 너무나 많은 시간이 소요되는 단점이 있을 뿐만 아니라, 각 방법에서 사용되는 공간자료의 처리에 일관성을 갖기에는 너무나 어려운 단점이 있다. 물론 지형정보시스템이 없을 경우에는 두 방법이 매우 훌륭한 방법이라고 할 수 있을 것이다. 다만, 공간정보의 처리관점에 볼 때에는 두 방법 모두가 같은 개념에 속한다고 볼 수 있다. 따라서 그림 4의 절차에 따라서 생성된 그림 6의 등거리도에서 최대거리를 이용하여 각 셀에 대한 무차원화된 도달시간도를 구하고 여기에 강우-유출로부터의 도달시간 값을 곱하여 등시간선도를 작성하였다.(그림 9. 참조)

3.1.2 Laurenson 방법의 모형화

식 (1)을 Laurenson이 제시한 도달시간 공식인 식 (5)을 사용하였다. 이 방법은 앞 두 방법이 하천연장만을 이용한 방법이지만, 여기서는 흐름을 따르는 경사를 고려하여 작성하는 방법으로 앞의 두 방법과는 약간의 차이가 있다.

$$T_{i0} = \sum_{j=1}^{N} \frac{l_j}{(S_j)^{1/2}} \qquad (5)$$

여기서, l_j : 격자요소의 흐름길이,
S_j : 격자요소의 흐름경사,
T_{i0} : 격자요소의 도달시간

식 (5)로부터 계산된 각 격자 속의 도달시간 T_{i0} 중 최대도달시간 T_{max}를 추출하고 이를 전 유역의 격자에 대하여 상대적인 도달시간도를 작성(무차원화된 도달시간도)하고 실측 수문곡선으로부터 산정한 도달시간(Ttrue)를 전 유역에 다시 분포시켜서 등시간도를 작

성하였다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$T_i = \frac{T_{셀}}{T_{max}} T_{true} \quad (6)$$

그림 10은 식(6)에 의하여 작성된 등시간도이다.

3.1.3 SCS 방법의 모형화

SCS방법을 적용하기 위해서는 벡터로 되어 있는 토지이용도를 래스터 파일 형태로 작성한다. 작성 시에는 표 2에서 보는바와 같이 토지이용의 조건에 Class번호를 부여하고, 토지이용의 조건에 해당하는 지형의 경사값을 표 2에서 제시한 공식으로 각 셀에 유속을 할당하여 평균유속도를 작성한다. 본 연구의 적용지역의 토지이용현황은 대부분이 산지이며 약간의 잡종지와 논, 밭, 작은 협곡하천으로 구성되어 있다. 따라서 표 2의 토지이용 조건에 부합되는 Class번호 부여 시 논, 밭은 경작지로 구분하여 적용하였다. 그림 1에서 산출된 흐름방향도와 그림 7의 평균유속도를 이용하여 도달시간도를 작성한다. 도달시간도에서 최대값을 가지고 무차원화된 도달시간도를 작성한 후에 강우-유출로부터 산정된 도달시간을 곱하여 등시간도를 작성한다. 이의 전과정을 흐름도로 표현하면 그림 8과 같으며, 그림 7은 SCS방법에 적용한 그리드 자료이다.

3.2 각 방법별 등시간도 작성결과 및 시간별 누가면적의 비교

등시간도(도달시간-집수면적도)의 가장 중요한 변수 중 하나는 도달시간의 산정이나, 본 연구에서는 도달시간의 산정에 중점적인 것보다는 지형정보를 이용한 등시간도의 구성에 대한 것이므로 표 3에서 보는 바와 같이 각 방법별로 국제수문개발계획(IHP)의 대표시험유역인 보청천유역의 소유역인 산성교지점의 실측 수문곡선 자료를 사용하였다.

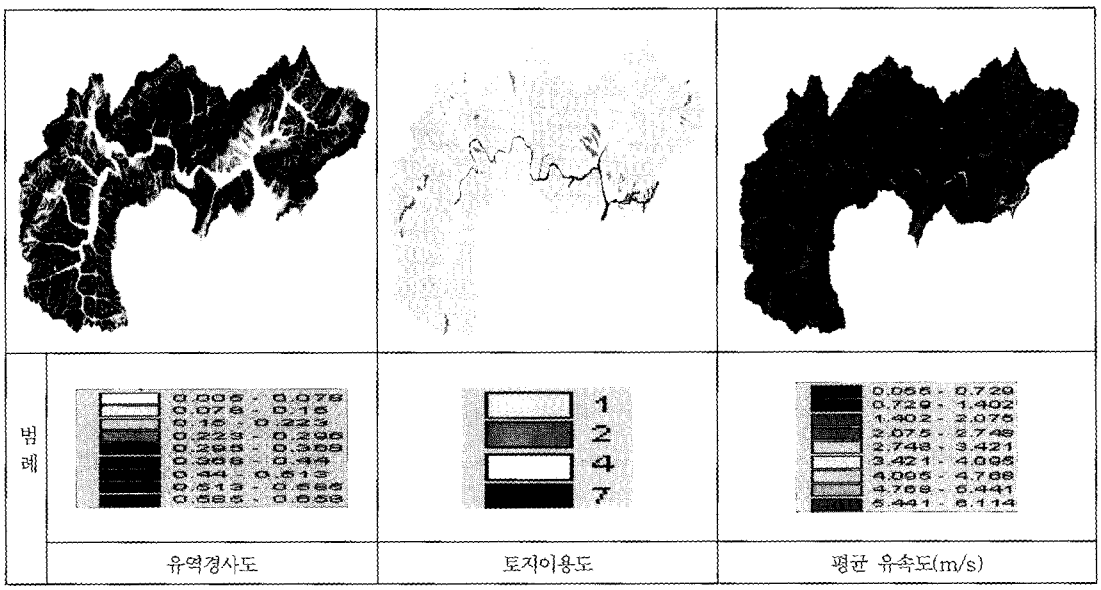


그림 7. SCS방법 적용에 사용된 셀 자료

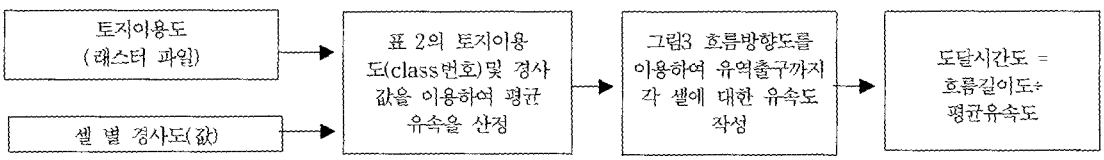


그림 8. SCS방법을 이용한 등시간선도 구성 흐름도

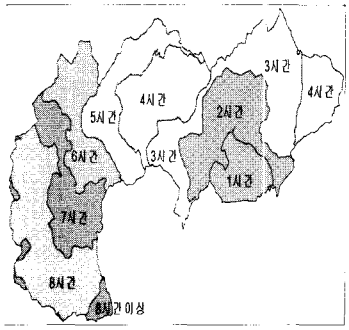


그림 9. Clark-kict/하천종단도법

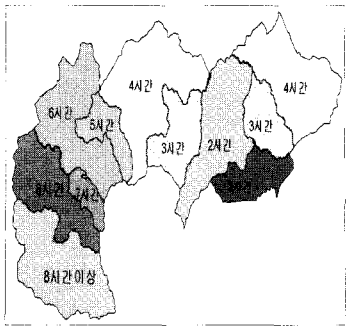


그림 10. Laurenson법

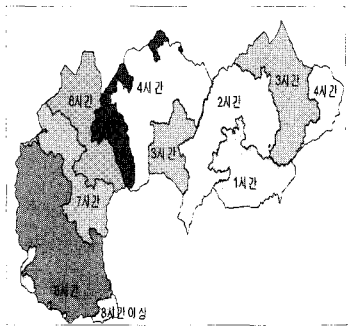


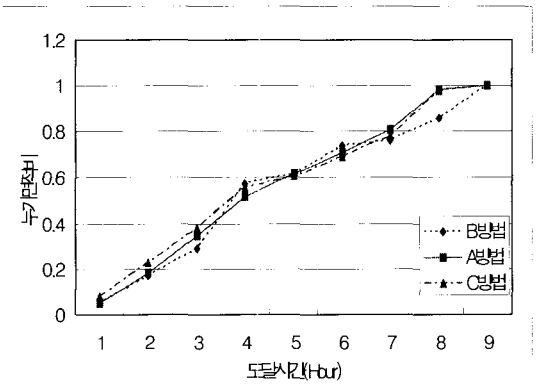
그림 11. SCS 방법

상기 그림 9, 10, 11은 각 방법별로 1995년도의 호우사상 적용 시 작성된 등시간도이다. 그림 9와 11을 비교하여보면 등시간의 분포가 유사하게 나타남을 알 수 있다. 그림 10과 그림 9. 11를 비교하여 보면 그림 10은 전체 유역에 대하여 유출지점을 중심으로 등시간이 계산되는 반면에 그림 9, 11은 유출지점과 하천망의 형상을 고려하여 등시간의 분포가 계산되어짐을 알 수 있다.

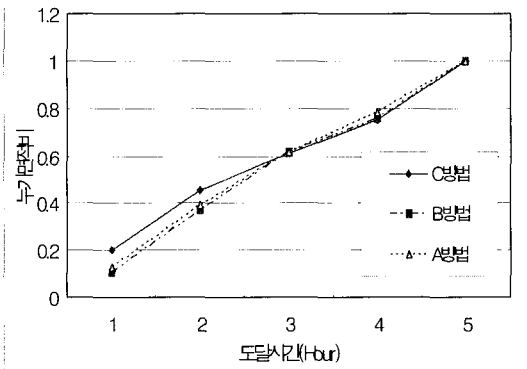
표 3과 그림 12는 등시간도 작성 방법별, 호우사상별로 적용할 경우에 작성되는 도달시간-누가면적비

표 3. 호우사상별 도달시간-면적의 비교

방법 구분	등시간도 작성 방법별 시간(hour)-면적(㎢)	호우사상 별 도달시간(Tc) 및 저류상수(R)													
		1992년8월 사상 Tc(5), R(11.27)					1995년8월 사상 Tc(8.16), R(5.96)								
		시간(Hour)					시간(Hour)								
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	8이상
A	Clark-Kict/ 하천종단법의 면적	6.376	12.792	11.339	8.106	10.636	2.706	6.300	8.178	8.226	5.007	4.565	4.854	8.487	0.929
B	Laurenson법의 면적	5.307	12.985	12.144	6.812	12.001	2.607	5.881	5.799	14.122	1.998	6.130	1.103	4.659	6.951
C	SCS 방법의 면적	9.789	12.670	7.615	6.974	12.202	4.014	7.183	7.485	8.719	2.519	4.383	4.045	9.952	0.951



(a) 1995년 호우사상 일 때



(b) 1992년 호우사상 일 때

그림 12. 방법별 도달시간-누가면적비의 비교

를 비교한 것이다. 그림 12(a)는 1995년 호우사상의 8.16시간의 도달시간에 대한 것이고, 그림 12(b)는 1992년 호우사상의 5시간의 도달시간인 경우로서 그림 12(a)와 그림 12(b)를 비교하여 보면, 등시간도 방법별로 도달시간이 길수록 각 등시간도 작도방법에 따라서 누가면적비의 변화 폭이 비교적 크게 나타남을 알 수 있다.

4. Clark의 유역 추적법에 의한 등시간도의 평가

Clark의 유역추적법은 등시간도로부터 작성되는 도달시간-집수면적도 관계를 이용하여 자연하천유역에 내리는 순간단위유효우량으로 인한 유역출구에서의 직접유출수문곡선인 순간단위도를 유도하는 방법으로서 강우로 인한 흐름의 전이 뿐만 아니라 유역의 저류효과도 고려할 수 있다. Clark은 유역의 출구에 1개의 선형저수지가 존재한다고 가정하고 매시간 구간별 유입량은 도달시간구간별 면적상에 내린 유효우량을 유량으로 환산한 값으로 보았다. 만약 단위유효우량(1cm)이 유역전반에 걸쳐 순간적으로 내린다면 저수지로 등시간간격 $\triangle t$ 동안 유입하는 유입량은 다음과 같다.

$$I_i = 2.778\frac{A_i}{\triangle t} \tag{7}$$

여기서, I_i : i 번째 유입량(㎥/sec)
A_i : i째 도달시간-집수면적도의 면적 (㎢)
$\triangle t$: 시간구간(hr)

또한 유역출구지점에서 선형저수지의 저류량(S)는 다음 식(8)과 같이 유출량(Q)에 비례한다고 가정하였다.

$$S = K \cdot Q \tag{8}$$

여기서, K : 저류상수

Clark의 유역추적법은 저류방정식에 기초를 두고 있으며, 이를 임의 구간내의 저류량의 변화률을 식(9)으로 나타낼 수 있으며 이를 이산화한 식으로 표현하면 식(10)과 같이 구성된다.

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \tag{9}$$

$$\frac{I_1 + I_2}{2}\triangle t - \frac{Q_1 + Q_2}{2}\triangle t = S_1 - S_2 \tag{10}$$

여기서 I_1, I_2 : 추적기간 Δ t에서의 각각 시점 및 종점 유입량
Q_1, Q_2 : 추적기간 Δ t에서의 각 각 시점 및 종점 유출량
S_1, S_2 : 추적기간 Δ t에서의 각각 시점 및 종점 저류량

상기 식(10)에 식(8)을 대입하고 Q_2에 대하여 정리한 후, 추적기간 $\triangle t$의 시점 및 종점 유입량이 동일하므로($I_1 = I_2 = I$) 식(10)는 다음 식(11)과 같이 주워진다.

$$Q_2 = C_0 I + (1 - C_0)Q_1, \quad C_0 = \frac{\triangle t}{K + 0.5 \cdot \triangle t} \tag{11}$$

상기 유도된 식(11)은 순간 단위유량도이기 때문에 임의의 지속기간을 갖는 단위도를 유도하기 위해서는 순간단위유량도를 t 만큼 오른쪽으로 지체시켜 2개의 순간단위유량의 t 시간간격 종거를 평균하여 t 시간간격 종점에서의 단위도 종거로 축차적으로 산정하여 나가면 된다. 실제 사용에 있어서는 임의의 지속기간을 갖는 t 시간의 단위도로 환산하여 사용한다. 본 연구에서는 1976년 미 육군 공병단의 수문연구소에서 개발한 HEC-1모형을 사용하여 평가하였다.

4.1 실측 수문곡선과 등시간도 작성 방법별 유출량의 비교

본 연구에서 작성한 등시간도 작성 방법과 도달시간-집수면적이 주워지지 않는 경우에 적용 되어왔던 방법으로서 그 간 실무진에서 많이 사용해 온 HEC-1의 무차원 식에 대한 유출모의를 수행하였다. HEC-1의 무차원식은 다음 식 (12), (13)과 같이 주워진다.

$$AI = 1.414\,T^{1.5}, \quad 0 \le T \le 0.5 \tag{12}$$

$$1 - AI = 1.414\,(1 - T)^{1.5}, \quad 0.5 \le T \le 1 \tag{13}$$

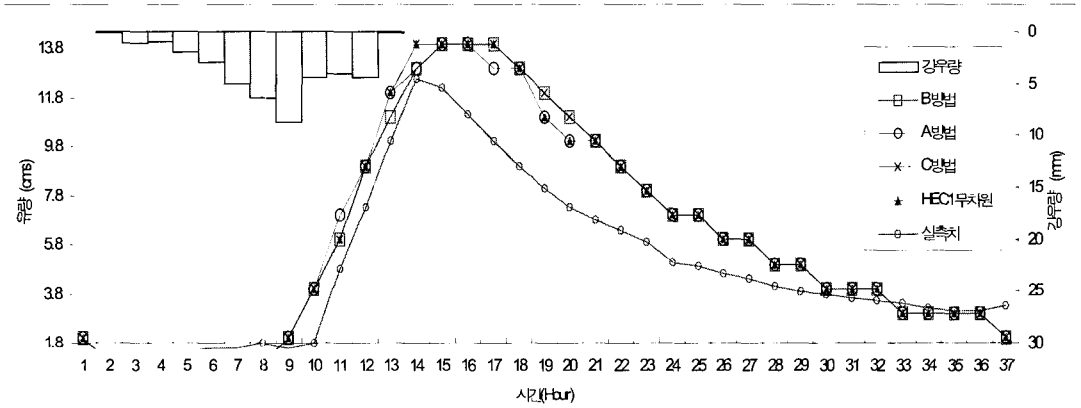
여기서, AI : 등시간에 의해 나누어진 소유역 내의 누가면적비
T : 등시간에 의해 나누어진 소유역의 도달

시간에 대한 시간비

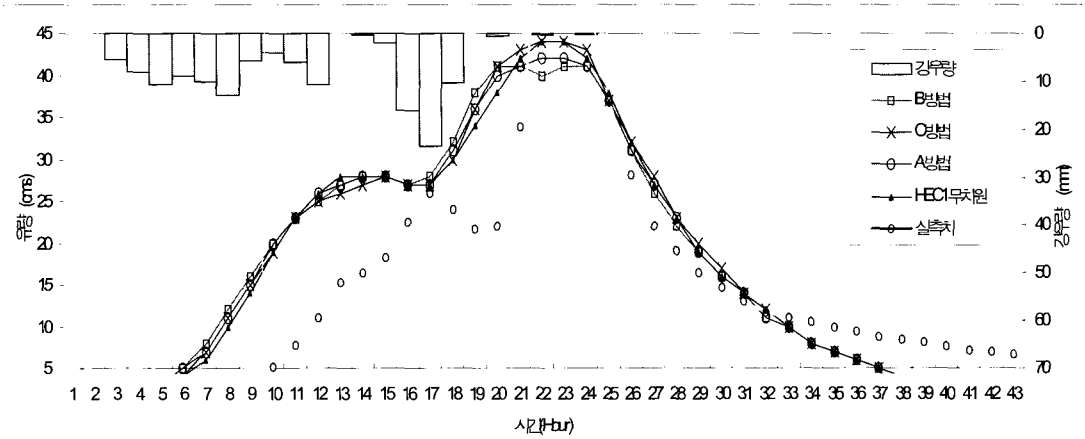
등시간도 작성 방법별, 호우사상별로 실측 수문곡선의 상승부, 첨두부, 하강부 등에 대하여 실측치에 대한 모의치의 최소자승오차(Root Mean Square error)에 대한 평균치를 각각 계산하면 다음 표 4와 같다.

표 4. 등시간도 작성방법별 실측치에 대한 모의치의 최소자승오차에 대한 평균치 비교

수문 곡선부문 \ 방법 구분	1995년호우사상				1992년호우사상			
	A	B	C	HEC1 무차원	A	B	C	HEC1 무차원
상승부	10.779	11.154	10.641	10.296	1.527	1.527	1.783	1.527
첨두부	15.319	16.432	13.427	13.602	2.593	2.400	2.228	2.593
하강부	3.482	3.362	3.612	3.464	0.919	0.919	0.684	0.684
전체	8.072	8.386	7.780	7.611	2.630	2.579	2.425	2.486



(a) 1992년 8월 호우사상 (확대)



(b) 1995년 8월 호우사상(확대)

그림 13. 각 방법별 모의 및 실측 수문곡선의 비교

표 4에서 보는 바와 같이 전체적으로 방법C가(SCS 방법) 타 방법에 비하여 비교적 수문곡선의 첨두부와 하강부에서 잘 묘사되는 것으로 평가되었다. 방법C의 경우는 유역의 토지이용조건과 경사를 고려한 방법으로서 타 방법에 비하여 유역의 물리적 인자를 더욱 많이 반영한 방법이기 때문이다. 방법B(Laurenson법)는 유역의 임의 지점에서의 경사와 흐름길이를 고려한 것 방법으로서 방법 A(clark-kict/하천종단도법)보다는 비교적 우수한 편이다. 또한 HEC-1의 무차원 식에 의한 방법도 다른 방법에 비하여 우수한 것으로 판단된다.

각 방법별 작성된 등시간도로부터 도달시간-집수면적을 이용한 모의 유출량과 실측 수문곡선과 비교한 것이 그림 13이다. 그림 13의 방법별 비교에 있어 그림 13(a)의 도달시간이 짧은 1992년의 호우사상은 각 방법별로 큰 차이를 나타내지 못하고 있지만, 도달시간이 긴 1995년의 호우사상인 그림 13(b)에서는 각 방법별로 모의 유출량의 차이가 나타남을 알 수 있다. 이는 그림 12에서 본 바와 같이 도달시간이 긴 경우 도달시간-집수면적 곡선의 변화 폭에 따른 영향임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Clark의 유역추적법에 사용되는 도달시간-면적의 작성에 필요한 등시간도 작성을 하천종단도법, Clark-Kict방법, Laureson방법, SCS방법 등으로 작성하고 비교 평가하였다. 본 연구는 상기 방법들이 기존에 지형도상의 수 작업으로 시행되었던 것을 GIS가 적용가능 하도록 공간 모형화와 작성방법을 제시하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 공간 모형화를 통하여 등시간도를 작성한다면, 일관성을 유지할 수 있으며 실무자들마다 적용시 나타나는 임의성을 배제할 뿐만 아니라, GIS를 이용함으로서 작성방법에 있어서도 뛰어난 재현성을 갖을 수 있다. 따라서 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 등시간도 작성의 공간 모형화 방법을 다음과 같이 3가지 방법으로 제시하였다.

   Clark-kict 및 하천종단도법의 경우에는 벡터형태의 실제 하천망의 흐름방향과 하천망의 점 사상자료를 이용하였다. 이 때 각 하천의 임의의 점에 대하여 유역의 출구지점까지 경로를 추적하여 각 하천지점과 유역출구지점까지의 거리를 계산하는 Route_System을 이용하여 하천의 점 사상 커버리지의 누가거리도를 작성하였으며, 작성된 누가거리도로부터 등시간도를 작성할 수 있었다.

   Laurenson방법의 경우는 래스터(Raster)기반의 공간모형화로서 벡터형태의 실제 하천망을 DEM에 위치시켜 생성한 Burn DEM으로부터 유역 전체에 대한 흐름방향 자료와 원본 DEM의 경사자료를 이용하여 등시간도를 작성할 수 있었다.

   SCS방법의 경우는 래스터(Raster)기반의 공간모형화로서 토지이용조건에 따른 유역의 경사함수로 표현되는 평균유속공식을 적용하여 등시간도를 작성할 수 있음을 제시할 수 있었으며, SCS방법의 경우 그간 실무에서 적용하기 어려운 방법이었지만 GIS를 이용함으로서 손쉽게 등시간도를 작성할 수 있음을 알 수 있었다.

2) 등시간도 작성 방법별로 유출량을 모의하여 실측치와 비교한 결과 지형의 경사인자를 고려한 Laurenson방법, 하천망의 등거리 및 평균유속을 고려한 하천종단도법 및 Clark-Kict법 보다는 물리적 인자를 비교적 더 많이 반영하고 있는 SCS방법이 타 방법에 비하여 비교적 우수 함을 보여 주었다. 또한 토지이용도가 없는 경우 등시간도 작성 측면에서 충분한 벡터형태의 하천망도를 확보한 경우에는 하천종단법 및 Clark-Kict 방법을 적용할 수 있을 것으로 보이며, 하천망도와 등고선도의 벡터자료를 확보 할 수 있는 경우에는 Laurenson방법을 적용할 수 있을 것이다.

3) 본 연구결과를 이용하여 공간적으로 분산된 유효강우량과 결합할 경우, 공간적으로 분산된 수문단위도에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용한 호우사상의 경우 단일호우사상과 복합호우사상의 두 경우를 적용한 것으로 단일호우사상은 복합호우사상에 비하여 경우 도달시간이 짧고, 저류상수는 길게 나타나고 있는데, 이에 대한 관계규명과 저류상수의 공간적 분산화 모형에 대한 연구가 향후 지속적으로 연구되어야 한다. 또한 본 연구의 적용 대상지역인 경우 산지가 지배적인 경우로서 SCS방법의 토지이용조건의 경우에 논, 밭을 구분하지 않고 경작지로 취급하여 적용하였으나, 국내 농촌지역의 경우에는 논, 밭이 지배적인 경우가 대부분이므로 논, 밭을 구분하여 평균유속을 경사만의 함수로 표시할 수 있는 평균유속공식에 대한 개선연구도 지속적으로 이루워져야 할 것이다.

참 고 문 헌

윤석영, 홍일표(1994). "소유역의 응답시간특성 산정방법에 따른 시간 면적도의 작성과 적용." **제 36회 수공학연구발표회 논문집**, pp.279-283

윤석영(1993). **수로망 응답과 사면응답을 고려한 홍수유출해석.**박사학위논문, 충남대학교.

조효섭(2000). **분포형 강우-유출모형의 격자 규모 결정.** 박사학위논문, 충남대학교.

건설교통부(1983-2000). 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서.

한국건설기술연구원(1994). **홍수유출 예측을 위한 수리·수문학적 인자의 결정,** 건기연 94-WR-113

윤광원, 원석연, 윤용남(1994). "Clark 유역추적법에 의한 계획홍수량산정에 미치는 매개변수의 민감도 분석." **한국수문학회지,** Vol.27, No.4,pp.85-94

Chow, V.T., Maidment. D. R. and Mays, L. M.(1988) *Applied Hydrology*, Mcgraw-Hill Book Company, pp164~166.

American Association of State Highway and Transportation Officials(1991), *Model Drainage Manual*. pp. 7-D-1~7-D-6.

Maidment, D.R.(1993), "Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS." *Application of Geographic information Systems in Hydrology and Water Resources Management, IAHS Publication* No.211, pp.181-192

Sircar, J. K., Ragan, R.M, Engman, E.T., and Fink, R.A.(1991), "A GIS based geomorphic approach for the digital computation of time-area curves." *Proc. ASCE Symposium on Remote Sensing Applications in Water Resources Engineering.*

Muzik, I (1996), "A GIS-derived distributed Unit Hydrograph." *Application of Geographic information Systems in Hydrology and Water Resources Management, IAHS Publication* No.235, pp.453-460

Dooge, J. C. I.(1959), "General Theory of the Unit Hydrograph." *J. Geophys. Res.*, Vol.64, pp.241-256

U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service(1986.6), "Urban Hydrology for Small Watersheds." *Tech. Release* No.55, Washington DC.

U.S. Army Corps of Engineers(1990) HEC-1 Flood Hydrograph Package, *User's Manual.*

(논문번호:03-71/접수:2003.08.16/심사완료:2003.10.21)