

## 시간-면적곡선의 유역유출해석 영향분석 Analysis of Time-Area Curve Effects on Watershed Runoff

정대명\* / 배덕효\*\*

Jeong, Dae Myoung / Bae, Deg Hyo

### Abstract

The objectives of this study are to analyze the effects of time-area curve on Clark's watershed runoff method in addition to propose a GIS-based objective method for creating time-area curve. For the relative comparison of the variation of time-area curve to those of travel time and storage coefficient of Clark method, runoff sensitivities are performed on Soyang- and Chungju-dam watersheds for 1990. 9. 10 ~ 9. 14 event. The dimensionless time-area curve in HEC-1 that can be utilized in the case that the curve is not supplied is also tested in this study. The important results obtained in this study are as follows: The effects of time-area curve created by either GIS-based objective method or dimensionless curve are not significant for runoff analysis; The storage coefficient (K) and travel time( $t_c$ ), Clark's other two model parameters, are more sensitive than time-area curve for peak flow simulation. Therefore, it can be concluded that the parameters K and  $t_c$  are more carefully estimated rather than time-area curve, when Clark method is used for runoff analysis.

**Keywords** : HEC-1, Clark unit hydrograph, time-area curve, travel time, storage coefficient

### 요 지

본 연구에서는 Clark 방법으로 유역유출해석을 수행할 때 요구되는 시간-면적곡선을 GIS 기법을 이용하여 객관적으로 산정할 수 있는 방법을 제안하고, 이와같은 시간-면적곡선이 유출해석에 미치는 영향을 검토하는데 있다. Clark 방법의 세 매개변수인 시간-면적곡선, 저류상수 및 도달시간의 상대적인 비교를 위해 1990. 9. 10 ~ 9. 14 홍수사상을 선택하여 소양댐 및 충주댐 유역에 대해 유량의 민감도 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 특정유역의 시간-면적곡선 산정이 여의치 않을 경우 사용 가능한 HEC-1에서 제공되는 무차원 시간-면적곡선의 영향도 분석하였다. 본 연구에서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다. 시간-면적곡선의 경우 본 연구에서 제안된 GIS를 이용하여 산정된 시간-면적곡선을 사용한 경우와 HEC-1 무차원 곡을 이용하여 유출해석을 수행한 경우를 비교한 결과 유출해석 결과에는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 또한, Clark 방법에서 시간-면적곡선 이외의 매개변수인

\* 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

Grad, Student, Dept. of Civil & Environmental Engr., Sejong Univ., 98 Kunja Dong, Kwangjin-Gu, Seoul 143-747, Korea (E-mail: sign007@nate.com)

\*\* 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 부교수

Associate professor, Dept. of Civil & Environmental Engr., Sejong Univ., 98 Kunja-Dong, Kwangjin-Gu, Seoul 143-747, Korea (E-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

도달시간과 저류상수의 변화가 유출량 산정에 미치는 영향을 분석한 결과 두 값 모두 침투홍수량의 크기와 발생 시간에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 Clark 방법을 이용하여 유역 유출량을 산정할 경우 시간-면적곡선 산정보다 도달시간 및 저류상수 산정에 특히 주의가 필요한 것으로 판단된다.

**핵심용어** : HEC-1모형, Clark 합성단위도, 시간-면적곡선, 도달시간, 저류상수

## 1. 서론

하천유역에서 유출과정을 정확히 이해하는 것은 수 자원의 효율적 활용 및 보존에 대단히 중요한 일이다. 특히 하천유역의 이수 및 치수계획 수립 시 확률홍수량은 하천 시설물의 규모 결정의 기초자료로 활용되어 그 의미는 매우 크다고 할 수 있다. 통상 하천유역의 특정 지점에서 확률홍수량을 산정하는 방법은 기왕에 발생된 홍수기록으로부터 직접 산정하거나, 유량 자료가 존재하지 않는 경우 강우자료 및 강우-유출모형을 이용하여 확률강우에 대한 발생가능 홍수량을 추정함으로써 계획된 지점의 침투 및 시간별 홍수량을 구하고 있다. 국내의 경우 하천의 시간별 확률홍수량 산정을 위하여 지금까지 이용된 방법은 단위도 및 합성단위도가 대부분이며, 이 중에서도 Clark의 합성단위도법이 많이 이용되고 있다.

Clark 합성단위도법은 유역출구에 가상의 선형저수지가 있다는 가정하에 해당유역을 등도달시간-유역면적으로 구분하여 선형저류방정식과 저수지 홍수추적에 의해 유역출구의 단위도를 산정하는 방법으로 3개의 매개변수인 시간-면적곡선, 도달시간, 저류상수를 포함하고 있다. 통상 이들 매개변수는 유출량 산정에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있어 하천 실무에서는 이들 매개변수 산정에 세심한 주의를 기울여 왔다. 특히 3 매개변수 가운데 시간-면적곡선은 지형도 상에서 작성하므로 오랜 시간과 노력을 요할 뿐만 아니라 사용자의 주관에 개입될 소지가 많은 특징이 있다. 또한, 시간-면적곡선의 작성이 여의치 않는 경우 HEC-1 모형에서 제공되는 무차원 시간-면적곡선을 사용하고 있으나 이에 대한 유출해석 영향을 검토한 적이 없는 실정이다.

한편, Clark 방법을 이용한 국내 연구동향을 살펴보면 윤광원 등(1994)이 Clark 방법에 의한 매개변수의 민감도분석을 함에 있어서 시간-면적곡선 작성시 유역 구분방법에 따라 산정된 침투홍수량 값을 비교하였고, 윤석영과 홍일표(1995)는 도달시간-집수면적도를 평균 유속을 이용하여 구성할 수 있도록 Clark-KICT방법을 제안한 바 있다. 성기원(1999)은 유역의 상사성을

이용하여 Clark 방법의 시간-면적곡선을 해석적 방법으로 유도하였고, 조효섭 등(2002)은 GIS를 이용하여 등시간도를 작성함에 있어서 Laurenson 방법, 하천중단도를 이용한 방법, Clark-KICT 방법 등을 검토한 바 있다.

본 연구에서는 지형정보시스템(GIS) 기법을 이용하여 일관성 있는 시간-면적곡선의 작성 방법을 제시하고, 시간-면적곡선이 유역 유출량 산정의 정확도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 시간-면적곡선 작성이 여의치 않아 HEC-1에서 제시하는 무차원 시간-면적곡선을 사용하는 경우를 포함한 시간-면적곡선과 도달시간 및 저류상수의 변화가 유출량 산정에 미치는 상대적인 영향을 검토하여 국내에서 Clark 방법 적용시 매개변수 추정의 상대적 중요도를 제시하고자 한다.

## 2. 기본이론

### 2.1 Clark 합성단위도

유역의 도달시간-누가면적 관계로부터 자연하천 유역에 순간적으로 내리는 단위유효우량으로 인한 유역출구에서의 직접유출 수문곡선인 순간단위유량도를 유도하는 방법인 Clark 단위도법은 강우로 인한 유수의 전이(translation)뿐 아니라 유역의 저류효과도 고려하는 방법이다. 이 방법은 가상의 단일 선형저수지가 유역말단에 존재하고 유역을 n개의 등도달시간 소유역으로 구분할 수 있다고 가정하면 유역에 순간적으로 내리는 단위유효우량(1cm)으로 인해 유역출구에 도달하는 유입량은 다음 식 (1)과 같고, 저수지로부터의 유출량  $O_t$  ( $m^3/sec$ )는 저수지 홍수추적에 의해 식(2)와 같이 표현된다는 것이다.

$$I_t = 2.78 \frac{A_t}{\Delta t} \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$O_t = m_0 I_t + m_1 I_{t-1} + m_2 O_{t-1} \quad (2)$$

여기서  $I_t$ 는 t 시간의 가상 저수지로의 유입량( $m^3/sec$ )이며,  $A_t$ 는 t번째 시간구간에 포함되어 있는 소유역 면적( $km^2$ ),  $\Delta t$ 는 등시간선의 시간간격(hour)이다.

이 때 식 (2)의  $m_0, m_1, m_2$ 는 홍수추적 계수로서 다음 식에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} m_0 &= \frac{0.5\Delta t}{K + 0.5\Delta t} \\ m_1 &= \frac{0.5\Delta t}{K + 0.5\Delta t} \\ m_2 &= \frac{K - 0.5\Delta t}{K + 0.5\Delta t} \end{aligned} \quad (3)$$

위 식은 저수지의 저류량( $S_t$ )과 유출량( $O_t$ )의 선형성 가정, 즉  $S_t = KO_t$ 에 근거한 것으로서 유역의 저류상수  $K$  및  $\Delta t$ 를 결정하면 계수  $m_0, m_1, m_2$ 를 계산할 수 있으며, 식 (2)를 사용하여 유입수문곡선을 추적기간별로 축차적으로 추적함으로써 유역출구점에서의 순간단위유량을 얻을 수 있다 (윤용남, 2001).

## 2.2 Clark 모형의 매개변수

Clark 방법을 이용하여 유출량을 산정하기 위해서는

시간-면적곡선, 도달시간( $t_c$ ) 및 저류상수( $K$ )의 결정이 선행되어야 한다. 도달시간과 저류상수의 경우 실측수문곡선이 존재하면 그림 1과 같이 실측곡선으로부터 그 값을 산정할 수 있으나 실제 정확한 값을 구하는 것은 매우 어려운 것으로 알려져 있으며, 또한 일반적으로 해당 유역의 모든 소유역에서 유출수문곡선이 존재하는 것이 아니므로 대부분의 경우 경험공식을 이용하여 산정하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 도달시간을 산정함에 있어 먼저 국내에 잘 알려진 Kirpich, Rziha, Kraven 공식을 검토하였으며, 이에 대한 관련 식 및 적용특성을 요약하면 표 1과 같다. 표 1의 도달시간 산정을 위한 하천길이( $L$ )와 유역평균경사( $S$ )는 지형도 또는 수치표고모델(DEM)을 이용하여 산정이 가능하다.

저류상수 역시 그림 1과 같이 실측수문곡선이 존재하는 경우 실측수문곡선을 이용하여 결정할 수 있으나 이 경우 숙련도 높은 경험을 요구하고, 또한 사용자의 주관에 따라 결정될 소지가 많아 Sabol(1988)에 의해 제안된 식 (4)를 이용하여 계산하는 경우가 많다.

$$t_c/K = 1.46 - 0.0867 L^2/A \quad (4)$$

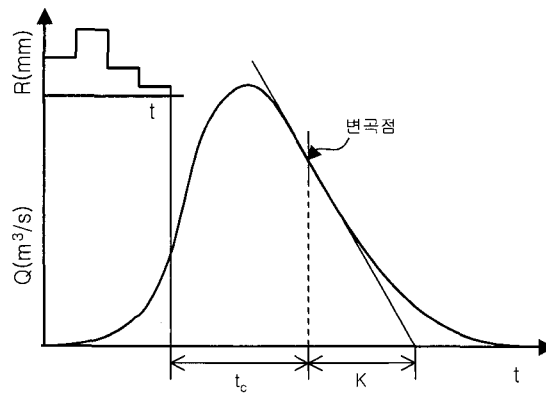


그림 1. 도달시간( $t_c$ )과 저류상수( $K$ )의 산정

표 1. 도달시간 산정 경험공식 및 적용특성

|            |  |
|------------|--|
| Kirpich 공식 | $t_c = 3.976L^{0.77}S^{-0.385}$  |
|            | 지표면 흐름이 지배적인 농경지 소유역, 하도경사 3~5%, 유역면적이 0.453km <sup>2</sup> 이하인 유역에 적합 |
| Rziha 공식   | $t_c = 0.833LS^{-0.6}$   |
|            | 지표면 흐름이 지배적인 상류유역, 하도경사 1/200 이상인 유역에 적합                               |
| Kraven 공식  | $t_c = 0.444LS^{-0.515}$   |
|            | 지표면 흐름이 지배적인 중·상류 유역, 하도경사 1/200 이하인 유역에 적합                            |

주)  $t_c$  : 도달시간(min),  $L$  : 유로연장(km),  $S$  : 평균경사

여기서,  $t_c$ 는 도달시간(hour),  $L$ 은 유로연장(km),  $A$ 는 유역면적( $km^2$ )이다. 이 식은 Clark 방법의 도달시간과 저류상수의 관계를 유역면적과 유로연장으로 회귀분석하여 나타낸 식으로써 유역의 특성이 반영된 것이다.

한편, 시간-면적곡선을 작성하기 위해서는 등시간선에 의한 소유역을 분할하여야 하며, 이를 위해서는 먼저 전 유역의 홍수도달시간( $t_c$ )을 결정하여야 한다. 전 유역의 도달시간을 결정하고 나면 유로연장을 도달시간으로 나눔으로서 평균유속을 계산하고, 유로를 따라 홍수류의 평균유속이 전 하도구간에 걸쳐 대체적으로 일정하다고 가정하고 분류를 따라 등시간 구간으로 구분한다. 지표면을 통한 유하속도는 하도에서의 유하속도보다 느리고, 경사가 대체로 큰 지류하천에서의 유속은 분류에서보다 빠르다는 점을 감안하여 등시간선을 작성한다. 또한, HEC-1 모형에서는 Clark 단위도법으로 유출해석을 하고자 할 때 시간-면적곡선이 주어지지 않는 경우 다음과 같은 무차원 식으로 시간에 대한 누가면적비를 결정하여 단위도를 계산하는 법을 제안한 바 있다.

$$AI = \begin{cases} 1.41 T^{1.5} & 0 \leq T \leq 0.5 \\ 1 - 1.414(1 - T)^{1.5} & 0.5 \leq T \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

여기서 AI는 등시간으로 나누어진 소유역 내의 누가면적비, T는 등시간에 의해 나누어진 소유역의 도달시간에 대한 시간비이다.

### 2.3 GIS를 이용한 시간-면적곡선의 산정

통상 시간-면적곡선은 2.2절에 언급한 기법으로 도상에서 작성하고 있으나, 이는 사용자의 주관에 개입될 소지가 많다. 따라서 본 연구에서는 전유역에 대해 객관적이고 일관성 있는 시간-면적곡선을 산정하기 위해 GIS를 이용한 시간-면적곡선 작성방법을 다음과 같이 제안한다.

위와 같은 방법으로 각 단위유역을 등시간선으로 구분하고, 구분된 등시간과 이에 대응하는 유역면적간의 관계를 이용하여 등시간-면적곡선을 산정하게 된다. 그리고 이와 같이 구분된 등시간에 도달시간을 고려해 줌으로써 실제 유역의 시간-면적곡선이 산정된다.

## 3. 사례연구

### 3.1 대상유역 및 호우사상의 선정

본 연구에서는 Clark 방법의 시간-면적곡선, 도달시간, 저류상수 등이 유출량 산정에 미치는 영향을 검토하기 위하여 그림 3과 같이 한강유역을 선정하였으며, 특히 북한강의 최대지류인 소양강 유역과 남한강 유역의 충주댐 상류유역(빗금천부분)을 대상으로 유출량을 산정하였다. 검정대상 호우사상은 1990. 9. 10~ 9. 14 호우사상(90년 9월 호우사상)을 선정하였으며, 시우량 자료와 댐 유입량 및 방류량 자료는 한강홍수통제소(<http://www.hrfco.go.kr>) 자료를 이용하였다. 강우손실률 계산은 SCS(Soil Conservation Service) 유출곡선법을 사용하였으며 하도추적은 Muskingum-Cunge 방법을 사용하였다.

### 3.2 유역 및 하도자료

각 단위유역의 면적, 유로연장 및 평균경사 등을 나타내는 유역특성 자료는 DEM(Digital Elevation Model; 수치표고모델) 자료로부터 GIS 프로그램인 Arc/Info와 ArcView를 이용하여 산정하였으며, CN값은 한강수계 유출프로그램 개선 방안(건설교통부, 1991) 보고서에서 제시한 값을 이용하였다. 표 2의 유로연장 및 유역평균경사는 각 단위유역별 도달시간 산정에 활용되며, CN값은 총강우량에 대한 손실량 산정에 이용되는 값이다.

하도추적에 사용되는 하도특성 자료에는 주하도의 길이와 분류경사, 평균하폭 및 조도계수가 있다. 주하도

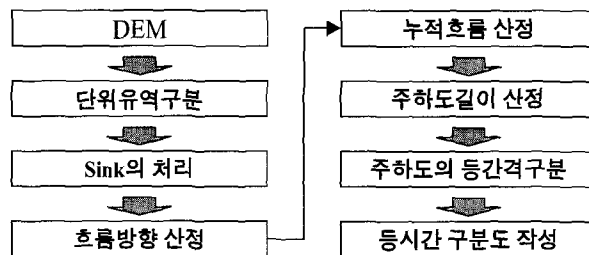


그림 2. GIS를 이용한 시간-면적곡선 산정 흐름도

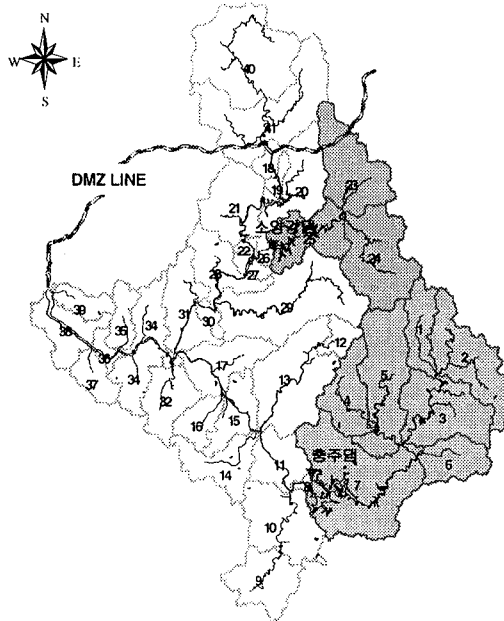


그림 3. 한강유역의 단위유역 및 하도구분

표 2. 단위유역별 유역특성자료

| 단위유역 번호 | 유역면적 (km <sup>2</sup> ) | 유로연장 (km) | 유역평균 경사 | CN   | 단위유역 번호 | 유역면적 (km <sup>2</sup> ) | 유로연장 (km) | 유역평균 경사 | CN   |
|---------|-------------------------|-----------|---------|------|---------|-------------------------|-----------|---------|------|
| 1       | 451.79                  | 55.32     | 0.0114  | 68.2 | 6       | 495.26                  | 53.34     | 0.0229  | 70.0 |
| 2       | 973.39                  | 84.35     | 0.0114  | 67.9 | 7       | 1947.09                 | 103.27    | 0.0108  | 73.9 |
| 3       | 1020.67                 | 118.94    | 0.0249  | 73.5 | 23      | 939.45                  | 69.43     | 0.0114  | 68.9 |
| 4       | 607.35                  | 86.69     | 0.0132  | 73.9 | 24      | 1084.37                 | 79.00     | 0.0119  | 64.5 |
| 5       | 1166.03                 | 146.75    | 0.0226  | 73.4 | 25      | 678.76                  | 56.26     | 0.0476  | 74.0 |

표 3. 하도추적구간별 특성자료

| 하도의유역번호 | 하천명 | 본류장(km) | 본류경사   | 평균하폭(m) | 조도계수   |
|---------|-----|---------|--------|---------|--------|
| 3       | 한강  | 88.31   | 0.0044 | 200     | 0.0530 |
| 7       | 한강  | 103.27  | 0.0013 | 286     | 0.0424 |
| 25      | 소양강 | 56.26   | 0.0015 | 666     | 0.0438 |

의 길이는 ArcView GIS를 이용하여 산정하였으며, 본류경사는 상하류단의 높이차를 하도길이로 나누어 산정하였다. 또한 평균하폭 및 조도계수는 한강수계 유출 프로그램 개선 방안 보고서에 수록된 값을 이용하였다. 이들 특성자료를 요약하면 표 3과 같다.

### 3.3 매개변수의 산정

#### 3.3.1 시간-면적곡선의 산정

Clark 방법을 적용하기 위해서는 먼저 시간-면적곡선을 작성하여야 한다. 본 연구에서는 사용자의 주관이

개입되지 않고 일관성 있는 작업이 되도록 그림 2에서 제시된 방법으로 GIS를 이용하여 시간-면적곡선을 한 강유역의 각 소유역을 대상으로 산정하였다. 이들 가운데 소양강댐 상류의 3 소유역과 충주댐 상류의 7 소유역에 대한 등시간 구분도를 나타내면 그림 4와 같고, 소양강댐 직상류유역(그림 3의 25번 유역)과 충주댐 직상류유역(그림 3의 7번 유역)의 시간-면적곡선을 도시하면 그림 5와 같다.

### 3.3.2 도달시간( $t_c$ ) 및 저류상수(K)의 산정

각 경험공식별 도달시간 산정결과와 홍수파의 평균 속도에 의한 도달시간을 표 4와 같이 산정하였다. 경험

공식으로 산정된 도달시간과 홍수파의 평균속도(3m/s로 가정)에 의한 도달시간을 비교한 결과 북한강 유역인 소양강댐 상류유역은 Rziha 공식에 의한 도달시간이, 남한강 유역인 충주댐 상류유역은 Kraven 공식에 의한 도달시간이 홍수파의 평균속도에 의한 도달시간과 비교적 잘 일치하므로 본 연구에서는 도달시간 산정에 있어 Rziha 공식과 Kraven 공식을 각각 적용하였다. 저류상수는 Sabol(1988)에 의해 제안된 식 (4)를 이용하여 계산하였다.

## 4. 계산결과 및 비교분석

본 연구에서는 Clark 방법의 시간-면적곡선이 유출

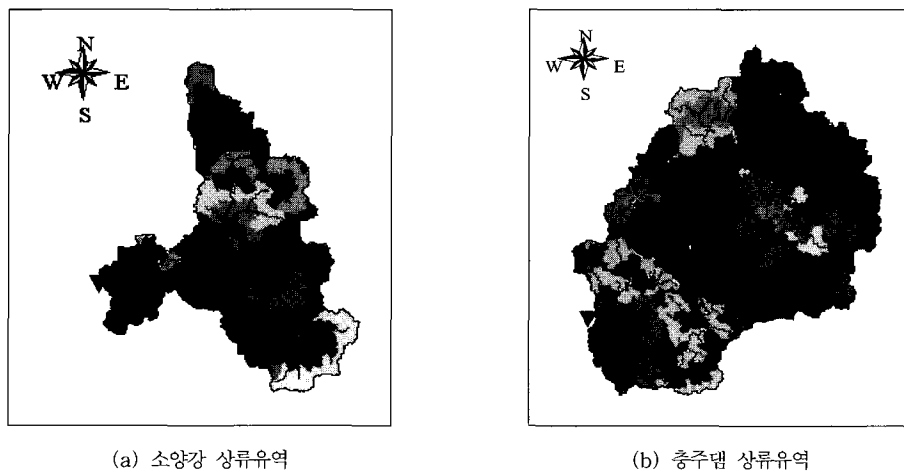


그림 4. GIS를 이용한 등시간 구분도

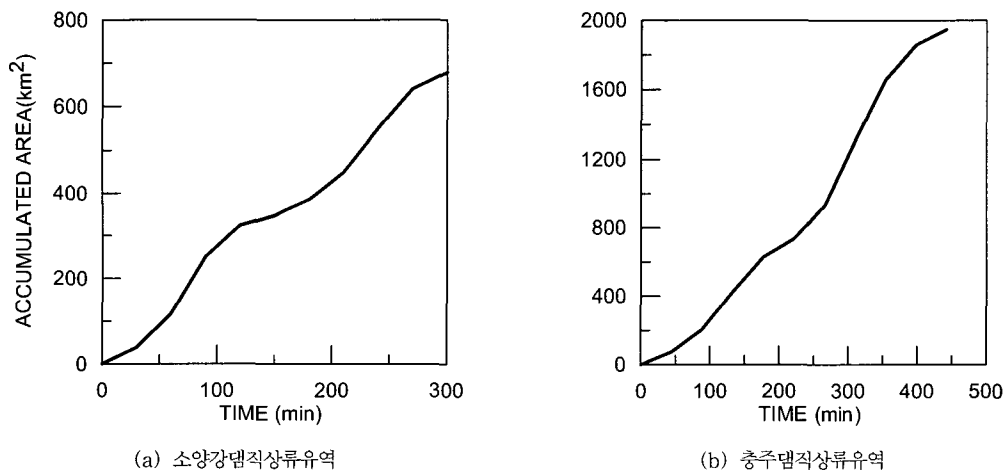


그림 5. GIS를 이용하여 산정된 시간-면적곡선

표 4. 충주댐, 소양강댐 지역의 소유역별 도달시간 및 저류상수 산정결과

| 유역명     | 유역 번호 | 하도 정사  | 유로연장 (km) | 경험공식에 의한 도달시간(hr) |       |        | 평균속도에 의한 도달시간(hr) |       |       | 저류상수 |
|---------|-------|--------|-----------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|-------|------|
|         |       |        |           | Kirpich           | Rziha | Kraven | 1m/s              | 2m/s  | 3m/s  |      |
| 충주댐 유역  | 1     | 0.0114 | 55.32     | 8.14              | 11.23 | 4.09   | 15.37             | 7.68  | 5.12  | 4.69 |
|         | 2     | 0.0114 | 84.35     | 11.27             | 17.12 | 6.24   | 23.43             | 11.72 | 7.81  | 7.55 |
|         | 3     | 0.0249 | 118.94    | 10.89             | 15.15 | 5.90   | 33.04             | 16.52 | 11.01 | 4.15 |
|         | 4     | 0.0132 | 86.69     | 10.90             | 16.16 | 5.96   | 24.08             | 12.04 | 8.03  | 3.80 |
|         | 5     | 0.0226 | 146.75    | 13.28             | 19.79 | 7.64   | 40.76             | 20.38 | 13.59 | 4.92 |
|         | 6     | 0.0229 | 53.34     | 6.06              | 7.13  | 2.76   | 14.82             | 7.41  | 4.94  | 2.87 |
|         | 7     | 0.0108 | 103.27    | 13.47             | 21.71 | 7.87   | 28.69             | 14.34 | 9.56  | 7.99 |
| 소양강댐 유역 | 23    | 0.0114 | 69.43     | 5.60              | 5.99  | 2.46   | 19.29             | 9.64  | 6.43  | 2.43 |
|         | 24    | 0.0118 | 79.00     | 6.31              | 7.03  | 2.88   | 21.94             | 10.97 | 7.31  | 3.00 |
|         | 25    | 0.0476 | 56.26     | 4.86              | 5.00  | 2.05   | 15.63             | 7.81  | 5.21  | 1.94 |

량 산정에 미치는 영향을 분석하기 위해서 도식적 평가 기법과 통계적 평가기법을 사용하였다. 도식적 평가기법은 관측유량과 계산유량을 동일 시간축에 도시하여 상대적인 오차를 직접 육안으로 확인할 수 있게 하는 방법이며 주로 단기 홍수사상의 정확도 평가에 많이 활용하는 방법이다. 통계적 평가기법은 관측유량과 계산유량의 통계 특성치를 산정하여 계산의 정확도를 평가하는 기법으로 식 (6)~(8)의 상관계수(correlation coefficient), 평균제곱근오차(RMSE), 유출용적오차 등이 많이 사용된다. 상관계수는 -1과 +1 사이의 값을 가지는 무차원 계수로서 표준편차의 비율을 이용하여 두 수문곡선의 크기와 모양의 일치정도를 동시에 파악할 수 있게 한다. 상관계수 값이 +1에 가까울수록 모의 수문곡선이 실측 수문곡선에 잘 일치하고 있다고 평가된다. 평균제곱근오차는 자료의 개수에 무관하고 차원이 해석하고자하는 변량과 같은 차원을 갖는 지표로 모형수행 결과 평균적으로 어느 정도의 유량만큼 오차가 발생하는지를 나타내는 지표로 일종의 평균치라 할 수 있다.

$$CC = \frac{\sum Q_o(i) \times Q_c(i)}{n} - \frac{\sum Q_o(i)}{n} \times \frac{\sum Q_c(i)}{n} \quad (6)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\left| \frac{\sum Q_o(i)^2}{n} - \left( \frac{\sum Q_o(i)}{n} \right)^2 \right|}$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\left| \frac{\sum Q_c(i)^2}{n} - \left( \frac{\sum Q_c(i)}{n} \right)^2 \right|}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{n}} \quad (7)$$

$$E_Q = \frac{\sum Q_{cal} - \sum Q_{obs}}{\sum Q_{obs}} \times 100(\%) \quad (8)$$

#### 4.1 시간-면적곡선의 영향분석

시간-면적곡선이 Clark 방법의 유출량 산정에 미치는 영향을 분석하기 위해서 본 연구에서는 그림 7과 같이 다섯가지 경우를 선정하여 각각의 영향을 비교하고자 한다. 그림 7의 Case-C는 특정 지역에 시간-면적곡선 산정이 곤란한 경우 사용 가능한 경우로 이는 HEC-1의 무차원 식 (5)를 도시한 것이다. Case-B와 Case-D는 그림 3의 한강유역 각 소유역에 대해 작성된 시간-면적곡선을 동일 시간축상에 중첩시켜 나타낸 그림 6에서 Case-C와 최대편차를 갖는 두 시간-면적곡선을 선택한 것이다. 따라서 한강유역의 소유역을 그림 3과 같이 구분할 경우 Case-B와 Case-D에 의한 유출량 산정 결과는 특정 소유역의 시간-면적곡선 산정 오차가 유출량에 미칠 수 있는 최대오차라 할 수 있다. Case-A와 Case-E는 Case-B와 Case-D를 극단적으로 확대시킨 경우로 유역도달시간의 50%에 해당하는 누가유역면적이 약 92% 및 8%에 해당하는 경우이다 (표 5 참고). 즉 Case-A는 유역출구점에 가까운 지점에서 최원점까지 점점 멀어질수록 유역면적이 작아지는 형상이고, Case-E는 Case-A와 반대로 유역출구점에 가까운 지점에서 최원점까지 멀어질수록 유역면적이 커지는 형상을 나타낸 것이다. 이들 각각의 경우에 대해서 소양강댐 및 충주댐 지점에서 선택된 90년 9월 홍수사상의 모의된 결과는 그림 8~9와 같으며, 이들에 대한 통계 특성치는 표 6~7과 같다. 이들 표 및 그림에서 알 수 있듯이 각각의 경우에 대한 침투유량 및 침투유량의 발생시간의 차이를 비교해 보면 침투유량의 크기 변화보다 침투시간의 변화폭이 비교적 크게 나타남을 알 수 있다.

표 5. CASE별 시간에 대한 누가면적비(%)

| 시간비<br>면적비<br>(%) | 0.0 | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0   |
|-------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Case-A            | 0.0 | 22.8 | 58.7 | 79.1 | 88.0 | 92.0 | 95.5 | 97.0 | 98.0 | 99.0 | 100.0 |
| Case-B            | 0.0 | 12.7 | 25.7 | 47.4 | 61.5 | 71.5 | 80.2 | 87.5 | 95.3 | 98.6 | 100.0 |
| Case-C            | 0.0 | 4.5  | 12.7 | 23.2 | 35.8 | 50.0 | 64.2 | 76.8 | 87.4 | 95.5 | 100.0 |
| Case-D            | 0.0 | 2.1  | 6.9  | 13.8 | 20.5 | 29.6 | 43.0 | 60.2 | 74.8 | 85.2 | 100.0 |
| Case-E            | 0.0 | 1.0  | 2.0  | 3.0  | 4.5  | 8.0  | 12.0 | 20.0 | 41.3 | 77.2 | 100.0 |

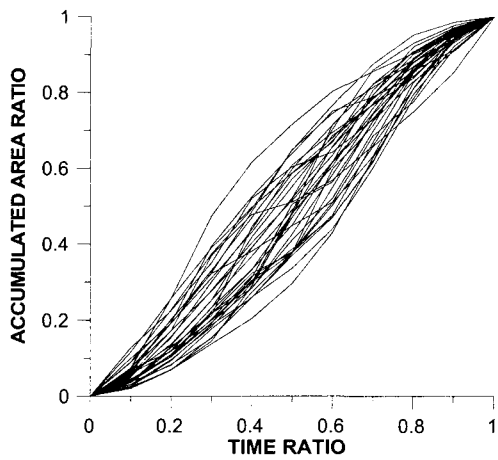


그림 6. 중첩된 한강전체 시간-면적곡선

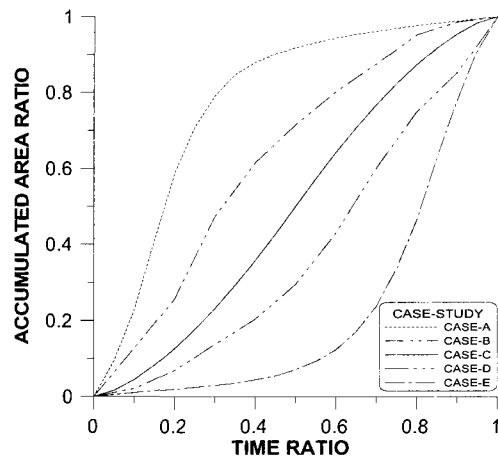


그림 7. CASE별 시간-면적 곡선

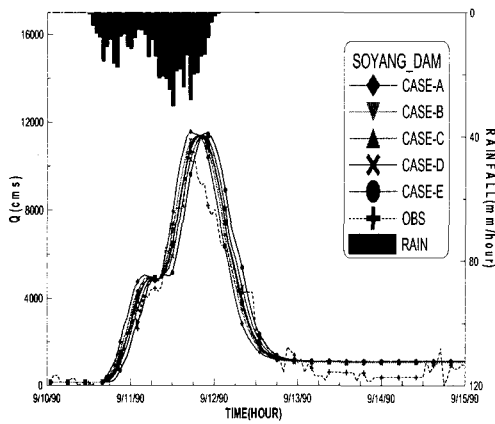


그림 8. CASE별 결과 비교(소양강댐)

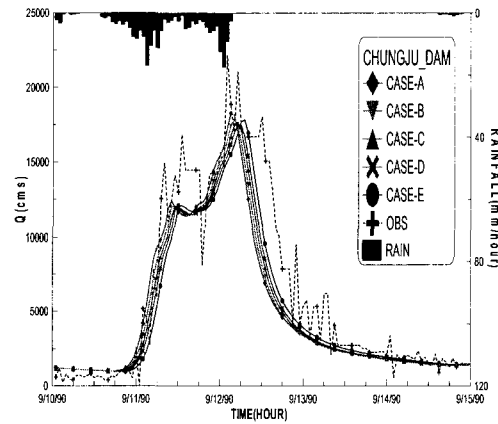


그림 9. CASE별 결과 비교(충주댐)



표 6. CASE별 결과 비교(소양강댐)

|                       | Obs.   | Case-A            | Case-B            | Case-C            | Case-D            | Case-E            |
|-----------------------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $Q_p$<br>(상대오차:%)     | 10653  | 11565<br>(8.57)   | 11375<br>(6.78)   | 11402<br>(7.03)   | 11394<br>(6.96)   | 11475<br>(7.71)   |
| $\bar{Q}$<br>(상대오차:%) | 2069   | 2393<br>(15.61)   | 2361<br>(14.11)   | 2360<br>(14.02)   | 2364<br>(14.26)   | 2378<br>(14.89)   |
| 유출용적<br>(상대오차:%)      | 310385 | 358876<br>(15.62) | 354130<br>(14.09) | 353925<br>(14.03) | 354564<br>(14.23) | 356648<br>(14.90) |
| $t_p$                 | 39     | 40                | 42                | 43                | 43                | 44                |
| $\sigma$              | 2866   | 3161              | 3140              | 3130              | 3123              | 3141              |
| RMSE                  | -      | 863               | 782               | 780               | 864               | 1054              |
| CC                    | -      | 0.9711            | 0.9764            | 0.9744            | 0.9683            | 0.8491            |

주)  $Q_p$ : 첨두유량(cms),  $\bar{Q}$ : 평균유량(cms),  $t_p$ : 첨두시간(hour),  $\sigma$ : 표준편차, RMSE: 평균제곱근오차, CC: 상관계수

표 7. CASE별 결과 비교(충주댐)

|                       | Obs.   | Case-A            | Case-B            | Case-C            | Case-D            | Case-E            |
|-----------------------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $Q_p$<br>(상대오차:%)     | 22164  | 18276<br>(17.54)  | 17886<br>(19.30)  | 17676<br>(20.25)  | 17475<br>(21.15)  | 17842<br>(19.50)  |
| $\bar{Q}$<br>(상대오차:%) | 6188   | 5033<br>(18.67)   | 4953<br>(19.06)   | 4949<br>(20.02)   | 4957<br>(19.89)   | 5024<br>(18.81)   |
| 유출용적<br>(상대오차:%)      | 734104 | 603957<br>(17.73) | 594384<br>(19.03) | 593881<br>(19.10) | 594826<br>(18.97) | 602899<br>(17.87) |
| $t_p$                 | 49     | 50                | 51                | 52                | 53                | 54                |
| $\sigma$              | 6114   | 4972              | 4932              | 4925              | 4922              | 4958              |
| RMSE                  | -      | 2706              | 2588              | 2463              | 2371              | 2261              |
| CC                    | -      | 0.9203            | 0.9346            | 0.9454            | 0.9526            | 0.9575            |

주)  $Q_p$ : 첨두유량(cms),  $\bar{Q}$ : 평균유량(cms),  $t_p$ : 첨두시간(hour),  $\sigma$ : 표준편차, RMSE: 평균제곱근오차, CC: 상관계수

#### 4.2 도달시간( $t_c$ ) 및 저류상수(K)의 영향 분석

Clark 방법에서 시간-면적곡선, 저류상수 및 도달시간이 유출량 산정에 미치는 상대적 영향을 분석하기 위하여 도달시간과 저류상수의 민감도 분석을 수행하였다. 이는 다른 제 조건들을 고정시킨 상태에서 해당 매개변수의 값을 변화시켜 그에 따른 영향을 소양강댐 유역에 대해서 분석하였으며, 그 결과를 나타내면 각각 그림 10 및 11, 표 8 및 9와 같다.

그림 10, 11 및 그림 8의 비교에서 알 수 있듯이 도달시간 또는 저류상수 산정의 오차는 시간-면적곡선의 산정오차에 비해 첨두유량 크기의 변화폭이 크게 나타났다. 또한, 표 8 및 9에 제시된 바와 같이 K 값의 변화에 대한 첨두유량의 관측치에 대한 상대오차는  $t_c$  값의 변화에 대한 상대오차보다 크게 나타남을 알 수 있

다. 그러나 K 및  $t_c$ 의 변화에 대한 첨두유량의 발생시간에 대한 오차는 미미한 것으로 판단된다. 또한 이들 결과와 표 6의 결과를 상대적으로 비교하면 시간-면적곡선의 오차는  $t_c$  및 K값의 오차에 비해 유출모의에 덜 민감함을 알 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 유역유출 해석시 Clark 방법을 이용할 경우 요구되는 시간-면적곡선이 유출량 해석에 미치는 영향을 분석·제시하였다. 이를 위해 한강유역의 각 소유역의 시간-면적곡선을 GIS 기법을 이용하여 객관적으로 산정할 수 있는 방법을 제안하고, HEC-1의 무차원 곡선과 상대적인 비교분석을 하였다. 또한 한강유역의 소유역 구분에 따라 발생할 수 있는 시간-면적곡선의 한계치를 포함하여 다양한 형태의 시간-면적곡선

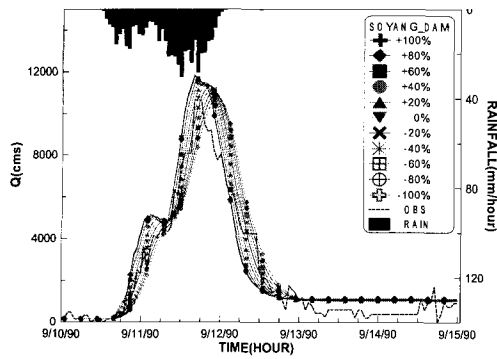


그림 8.  $t_c$  값의 영향 분석

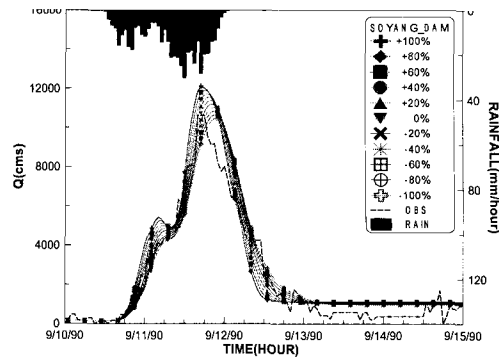


그림 9. K 값의 영향 분석

표 8.  $t_c$  값의 영향 분석

|                      | Obs.   | -100%             | -80%              | -60%              | -40%              | -20%              | ±0%               | +20%              | +40%              | +60%              | +80%              | +100%             |
|----------------------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $Q_p$<br>(상대오차%)     | 10653  | 11863<br>(11.36)  | 11776<br>(10.54)  | 11667<br>(9.52)   | 11528<br>(8.21)   | 11464<br>(7.61)   | 11402<br>(7.03)   | 11307<br>(6.14)   | 11186<br>(5.00)   | 11051<br>(3.73)   | 10880<br>(2.13)   | 10724<br>(0.67)   |
| $\bar{Q}$<br>(상대오차%) | 2069   | 2417<br>(16.82)   | 2417<br>(16.82)   | 2405<br>(16.19)   | 2387<br>(15.37)   | 2370<br>(14.55)   | 2360<br>(14.02)   | 2348<br>(13.49)   | 2338<br>(12.95)   | 2331<br>(12.66)   | 2325<br>(12.37)   | 2317<br>(11.99)   |
| 유출용적<br>(상대오차%)      | 310385 | 362560<br>(16.81) | 362520<br>(16.80) | 360697<br>(16.21) | 358038<br>(15.35) | 355509<br>(14.54) | 353925<br>(14.03) | 352180<br>(13.47) | 350631<br>(12.97) | 349697<br>(12.67) | 348743<br>(12.36) | 347613<br>(11.99) |
| $t_p$                | 39     | 39                | 39                | 40                | 41                | 42                | 43                | 44                | 44                | 45                | 45                | 46                |
| $\sigma$             | 2866   | 3179              | 3171              | 3168              | 3158              | 3147              | 3130              | 3111              | 3091              | 3066              | 3040              | 3014              |
| RMSE                 | -      | 991               | 964               | 886               | 828               | 799               | 800               | 828               | 883               | 952               | 1031              | 1116              |
| CC                   | -      | 0.9598            | 0.9623            | 0.9695            | 0.9739            | 0.9756            | 0.9744            | 0.9707            | 0.9643            | 0.9560            | 0.9458            | 0.9340            |

주)  $Q_p$ : 첨두유량(cms),  $\bar{Q}$ : 평균유량(cms),  $t_p$ : 첨두시간(hour),  $\sigma$ : 표준편차, RMSE: 평균제곱근오차, CC: 상관계수

표 9. K 값의 영향 분석

|                      | Obs.   | -100%             | -80%              | -60%              | -40%              | -20%              | ±0%               | +20%              | +40%              | +60%              | +80%              | +100%             |
|----------------------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $Q_p$<br>(상대오차%)     | 10653  | 12126<br>(13.82)  | 12085<br>(13.44)  | 11890<br>(11.61)  | 11738<br>(10.18)  | 11556<br>(8.48)   | 11402<br>(7.03)   | 11219<br>(5.32)   | 11033<br>(3.56)   | 10855<br>(1.89)   | 10669<br>(0.15)   | 10474<br>(-1.68)  |
| $\bar{Q}$<br>(상대오차%) | 2069   | 2427<br>(17.30)   | 2424<br>(17.16)   | 2413<br>(16.63)   | 2385<br>(15.71)   | 2379<br>(14.98)   | 2360<br>(14.02)   | 2339<br>(13.00)   | 2323<br>(12.23)   | 2305<br>(11.36)   | 2296<br>(10.92)   | 2285<br>(10.39)   |
| 유출용적<br>(상대오차%)      | 310385 | 364098<br>(17.31) | 363648<br>(17.16) | 361967<br>(16.62) | 359204<br>(15.73) | 356882<br>(14.98) | 353925<br>(14.03) | 350804<br>(13.02) | 348380<br>(12.24) | 345696<br>(11.38) | 344343<br>(10.94) | 342710<br>(10.41) |
| $t_p$                | 39     | 40                | 40                | 41                | 42                | 42                | 43                | 43                | 44                | 44                | 44                | 45                |
| $\sigma$             | 2866   | 3254              | 3244              | 3220              | 3192              | 3162              | 3130              | 3096              | 3058              | 3018              | 2975              | 2932              |
| RMSE                 | -      | 984               | 973               | 911               | 860               | 824               | 800               | 789               | 789               | 799               | 822               | 851               |
| CC                   | -      | 0.9647            | 0.9652            | 0.9698            | 0.9728            | 0.9741            | 0.9744            | 0.9734            | 0.9916            | 0.9689            | 0.9654            | 0.9611            |

주)  $Q_p$ : 첨두유량(cms),  $\bar{Q}$ : 평균유량(cms),  $t_p$ : 첨두시간(hour),  $\sigma$ : 표준편차, RMSE: 평균제곱근오차, CC: 상관계수

에 대한 유출량 해석의 영향을 분석하였으며, Clark 방법의 매개변수인 도달시간과 저류상수의 유출해석 민감도와 상대적인 비교를 실시하였다. 본 연구에서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 적용 대상유역에 대해 GIS 기법을 이용해 실제 시간-면적곡선을 작성하여 사용한 경우와 HEC-1 무차원 식을 이용하여 유출해석을 수행한 경우를 비교한 결과, 침투홍수량의 발생시간에는 영향을 미치지 않지만 침투홍수량의 크기에는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.
2. Clark 방법에서 시간-면적곡선 이외의 매개변수인 도달시간과 저류상수의 변화가 유출량 산정에 미치는 영향을 분석한 결과 두 값 모두 침투홍수량의 크기와 발생시간에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이 중에서도 저류상수 K 값이 도달시간  $t_c$  값보다 유출량 산정에 기여하는 바가 더 큰 것으로 나타났다.
3. Clark 방법을 이용하여 유역의 유출량을 산정할 경우 시간-면적곡선보다 도달시간 및 저류상수가 유출량 해석에 더 민감한 것으로 판단되어 이들 매개변수 산정에 특히 주의가 필요함을 알 수 있었다. 즉 기존 실무에서 Clark 방법에 의해 유출 해석을 수행할 경우 보다 정확한 시간-면적곡선을 작성하기 위해 많은 시간과 경비를 소모하고 있으나, 상황이 여의치 않는 경우 시간-면적곡선은 HEC-1의 무차원 곡선으로 대체하고 저류상수 및 도달시간 산정에 시간을 할애하는 것이 효율적이라 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의

지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-3-1)에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. 건설교통부 (1991). **한강수계 유출 프로그램 개선 방안.**
2. 건설교통부 (2001). **하천 수리·수문분석 시스템 개발.**
3. 성기원 (1999). "유역의 상사성을 이용한 Clark 모형의 매개변수 해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제4호, pp. 427-435.
4. 윤광원, 원석연, 윤용남(1994). "CLARK 유역추적법에 의한 계획홍수량 산정에 미치는 매개변수의 민감도 분석." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제27권, 제4호, pp. 85-94.
5. 윤석영, 홍일표(1995). "Clark 모형의 매개변수 산정 방법 개선." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제15권, 제5호, pp. 1287-1300.
6. 윤용남 (2001). **공업수문학**, 청문각, pp. 350-351.
7. 조효섭, 정관수, 윤석영, 김선민(2002). "GIS를 이용한 등시간도 작성." **한국수자원학회 학술발표회 논문집II**, 한국수자원학회, pp. 861-866.
8. 한국수자원공사 (1999). **소양강댐 관리연보.**
9. Sabol, G.V. (1988). "Clark unit hydrograph and R-parameter estimation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No.1, pp. 103-111.
10. U.S. Army Corps of Engineers. (1990). *HEC-1 Flood Hydrograph Package, User's Manual.*

(논문번호:02-84/접수:2002.10.12/심사완료:2003.03.08)