

# GIS와 GCUH를 이용한 돌발홍수 기준우량 산정의 타당성 검토 연구

## The Study of the Fitness on Calculation of the Flood Warning Trigger Rainfall Using GIS and GCUH

신 현 석\* / 김 흥 태\*\* / 박 무 종\*\*\*

Shin, Hyun-Suk / Kim, Hong-Tae / Park, Moo-Jong

### Abstract

Using geomorphoclimatic unit hydrograph(GCUH), we estimated the fitness to calculate the mountainous area discharge and flash flood trigger rainfall(FFTR). First, we compared the GCUH peak discharge with the existing report using the design storm at the Dukcheon basin. Second, we compared the HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) model and GCUH with the observed discharge using the real rainfall events at the Taesu stage gage. Third, GCUH and NRCS(Natural Resources Conservation Service) were used for calculating FFTR and proper calculation method was shown.

At the Dukcheon basin, the comparison result of using design storm was shown in Table 11, and it was not in excess of 1.1, except for the 30 year return period. In case of real rainfall events, the result was shown in Table 12, and GCUH discharges were all larger than the HEC-HMS model discharges, and they were very similar to the observed data at the Taesu stage gage.

In this study, we found that GCUH was a very proper method in the calculation of mountainous discharge. At the Dukcheon basin, FFTR was 12.96 mm in the first 10 minutes when the threshold discharge was  $95.59 \text{ m}^3/\text{sec}$ .

**Keywords** : Geomorphoclimatic Unit Hydrograph, Pick Discharge, Flash Flood Trigger Rainfall, Threshold Discharge

### 요 지

본 연구는 지형기후학적 단위유량도(Geomorphoclimatic Unit Hydrograph, GCUH)가 산악지역의 유출량과 돌발홍수 기준우량을 산정하는데 적절함을 검토한 것으로, 우선 산악지역의 유출량을 산정하는데 적절한 방법인지를 덕천강 유역에 대해 확률강우량으로 지형기후학적 단위유량도의 첨두유량과 기존 보고서의 확률 홍수량 자료를 비교하는 방법과 실측 호우사상을 HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) 모형과 지형기후학적 단위유량도에서 산정된 첨두 유량을 태수지점의 실측자료와 비교함으로써 지형기후학적 단위유량도의 타당성을 검증하려 했고 지형기후학적 단위유량도와 NRCS(Natural Resources Conservation Service) 방법을 이용하

\* 부산대학교 공과대학 토목공학과 조교수  
Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Pusan Univ., Busan 609-735, Korea  
(E-mail : hsshin@pusan.ac.kr)

\*\* 부산대학교 토목공학과 박사과정  
(E-mail: htkim8@hanmail.net)

\*\*\* 한서대학교 토목공학과 조교수  
(E-mail: mjpark@hanseo.ac.kr)

여 돌발홍수 기준우량을 산정함으로써 산악지역의 돌발홍수 기준우량 산정 방법을 제시했다.

덕천강 유역에 대해 확률강우량으로 침투 유량을 비교한 경우 표 11과 같이 대체로 30년 빈도를 제외하곤 비율이 1.1을 초과하지 않았고, 실측 호우사상으로 침투유량을 비교한 경우 표 12와 같이 지형기후학적 단위유량도 결과와 HEC-HMS 모형보다 모두 크게 나타났고 태수 수위표의 실측치와 대체로 유사하게 나타났다.

따라서, 본 연구에서 지형기후학적 단위유량도를 이용한 산악지역의 유출량 산정이 타당함을 확인했고 이를 이용해 덕천강 유역의 돌발홍수 기준우량을 산정한 결과 한계유출량이  $95.59 \text{ m}^3/\text{sec}$  일때, 최초 10분 동안에 12.96 mm 가 발생하면 위험한 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 지형기후학적 단위유량도, 침투 유량, 돌발홍수 기준우량, 한계유출량

## 1. 서 론

최근 GIS(Geographic Information System)기법의 연계를 통한 홍수 및 이수 측면에서의 그 응용도는 점점 높아지고 있고 과거 20여년 동안 수문학 분야에서는 정밀한 지형 자료의 분석을 통하여 순수하게 이를 이용하여 유출 특성을 분석하는 수문지형학(Hydrogeomorphology) 분야의 발전이 상당히 진전되었다.

Rodriguez-Iturbe(1979) 등은 Horton 및 Strahler(1957)의 하천의 차수 법칙을 근본으로 하는 지형학적 순간단위유량도(Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH)를 이론적으로 유도하여 지형학과 수문학의 연계를 시도하였다. 이들의 결과가 지형 자료의 정확도에 기인하기 때문에 최근 발달된 GIS기법을 통한 지형 자료의 구축과 수문지형학의 연계는 필수 불가결한 관계에 있으며, 이를 통하여 대상 미계측 유역에서의 보다 이론적으로 정밀하고도 유역 특성에 부합하는 유출 특성의 분석 연구는 더욱 의미를 가지게 되었다.

돌발홍수의 개념은 미국의 국립기상청에서 1970년대 중반에 처음 도입되었으며, 국내에서는 배덕효 등(2001)이 평창강 유역의 각 수위지점별 한계유출량을 산정하여 제시한 바 있으나 국지적인 집중호우에 의한 돌발홍수를 예보하기 위해서는 더욱 세분화된 미소유역에서 한계유출량을 산정할 수 있는 알고리즘의 개발 필요성을 언급하였으며 김운태 등(2002)은 돌발홍수 예경보시스템의 개념을 도입하여 미소유역 규모의 한계유출량을 산정하는 시스템을 Arcview/Avenue 기반의 GUI(Graphic User Interface)시스템을 개발하였다. 외국의 사례를 살펴보면, Sweeney(1992)는 돌발홍수능의 표준적인 산정 알고리즘을 제시 하였으며, Carpenter와 Georgakakos(1993)는 GRASS을 이용한 GIS기반의 미

소유역 한계유출량 산정 알고리즘을 개발하였다. 또한, Carpenter 등(1999)는 돌발홍수능을 산정하는데 있어 중요한 역할을 하는 한계유출량 산정의 4가지 방법에 대한 특성을 분석하였는데, 각각 (1) 제방월류유량과 Snyder단위도법, (2) 제방월류유량과 지형기후학적 단위유량도(Geomorphoclimatic Unit Hydrograph, GCUH), (3) 2년빈도 홍수량과 Snyder단위도법, (3) 2년 빈도 홍수량과 지형기후학적 단위유량도법으로 요약된다.

본 연구에선 지형기후학적 단위유량도를 이용한 산악지역의 유출량 산정이 타당함을 확률강우량과 실측 호우사상을 이용한 타기법과의 비교와 실측치의 비교로 증명하였고 지형기후학적 단위유량도 식과 기준우량을 산정하였다. 우선 덕천강 유역의 지형자료를 GIS기법을 이용해 구축하고 각각의 지형특성자료와 지형학적 순간단위유량도 매개변수를 산정하였다. 확률강우량을 이용한 유출량의 비교에서 기존보고서의 빈도별 확률 홍수량과 지형기후학적 단위유량도 식의 결과를 비교하였고 실측호우사상을 이용해 Clark 단위도법을 이용한 HEC-HMS 모형과 GCUH 식의 결과를 태수 수위표 지점의 실측 유량과 비교하여 지형기후학적 단위유량도 식이 산악지역의 유출량 산정에 보다 적절함을 증명하였다. 지형기후학적 단위유량도 식을 이용한 돌발홍수 기준우량의 산정은 우선 지속시간과 한계수심을 결정하고 Manning 공식으로 한계유출량을 산정하는데 지형기후학적 단위유량도 식에서 침투유량과 한계유출량을 같이 두고 지속시간별 유효유량을 각각 산정한다. 다음으로 NRCS(Natural Resources Conservation Service) 방법에 의해 지속시간별 돌발홍수 기준우량을 각각 결정하였다.

덕천강 유역에 대해 본 연구를 시험한 절차를 정리하면 그림 1과 같다.

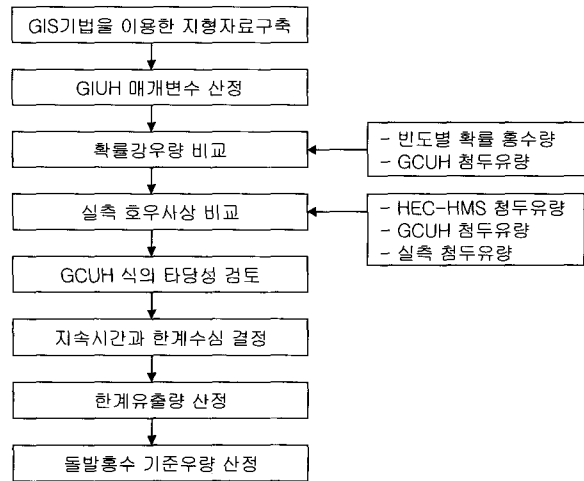


그림 1. 전체 연구 절차

## 2. GIUH 및 GCUH 이론

### 2.1 Horton의 법칙

정량적인 하도망의 해석은 하천을 차수에 의해 분류하는 Horton(1932)의 방법에 의해 제안되었다. Stahler(1957)는 Horton의 방법을 개선하였는데, 그 방법은 Horton의 방법과는 달리 하천의 길이, 형상, 발원 등과 서로의 연관성을 고려하는 것이었다. 그림 1은 가상적인 하도망을 보여주고 있다. 이 하도망은 하나의 출구를 가지고 있다. 내절점(interior node)들은 선으로 표시된 각 하천들이 합쳐지는 지점이다. 외절점(exterior node)들은 그들로부터 발원하는 하나의 하천을 가지는 지점이다. 각 절점 사이는 연결되어 있으며, 내절점들과는 서로 연결되어 있고, 외절점들은 하류측 내절점들과 연결되어 있다. 위의 사항들을 바탕으로 Strahler는 아래와 같은 방법으로 하천을 분류하였다(그림 2 참조).

- 1) 근원(source)에서 시작되는 하도는 일차하천(first-order stream)이라 정의한다.

- 2) 차수가 w인 두 하천이 합류하면 합류된 하류의 하천의 차수는 (w+1)이 된다.
- 3) 만약 차수가 각기 다른 두개의 하천이 합류될 때는 하류의 하천의 차수는 상류 두 하천 중 큰 차수를 따른다.
- 4) 유역의 차수 (order of basin)는 최대 하천차수와 같다.

일차 이상의 차수를 갖는 Strahler하천은 여러 개의 링크(links)들로 구성될 것이다.

하천차수 법칙은 주어진 차수에서의 하천수 N은 하천차수와 유역의 지형적인 관계를 갖는다는 것으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

이때는  $\Omega$ 는 하도망내 하천의 최고 차수,  $\omega$ 는 알고자 하는 하천차수, 그리고  $R_B$ 는 주어진 하도망에서 상수이며 분기율(bifurcation ratio)이라고 한다.

결과적으로 식 (1)로부터 총 하천수(total number of streams)는 식 (2)와 같이 표현된다.

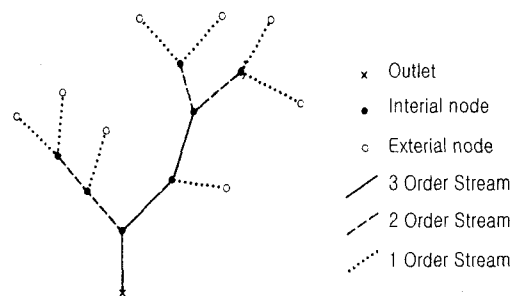


그림 2. Strahler의 하천-차수매김법을 설명하기 위한 가상적인 하천망도

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

또한 분기율  $R_B$ 는 식 (3)과 같이 표현되며, 이 식은 평균적으로 차수가  $\omega-1$ 인 하천은  $R_B$ 개라는 것을 의미한다.

$$R_B = \frac{N_{\omega-1}}{N_{\omega}} \quad (3)$$

하천 길이와 면적의 법칙은 하천수 법칙과 같이  $R_B$  대신에 연장비  $R_L$ 과 면적비  $R_A$ 를 사용할 뿐 동일한 개념이며, 이때  $R_L$ 과  $R_A$ 는 아래와 같이 계산된다. 먼저 각 하천 차수에 해당하는 평균 하천 길이와 평균 하천 면적은 식 (4), 식 (5)로 계산되며,

$$\bar{L}_{\omega} = \frac{1}{N_{\omega}} \sum_{i=1}^{N_{\omega}} L_{\omega i} \quad (4)$$

$$\bar{A}_{\omega} = \frac{1}{N_{\omega}} \sum_{i=1}^{N_{\omega}} A_{\omega i} \quad (5)$$

이때  $L_i$ 는 하천차수를 갖는 각 하천의 길이이고,

$A_i$ 는 하천차수의 각 하천과 그 지천들의 유출에 기여하는 소유역 면적이다. 예를 들어,  $A$ 는 유역의 총면적이 된다.

결과적으로 Horton의 법칙을 요약하면 아래 식 (6), 식 (7), 식 (8)과 같다.

하천수 법칙,

$$R_B = \frac{N_{\omega-1}}{N_{\omega}}, \quad N_{\omega} = R_B^{\omega-1} \quad (6)$$

하천길이 법칙,

$$R_L = \frac{\bar{L}_{\omega}}{\bar{L}_{\omega-1}}, \quad \bar{L}_{\omega} = R_L^{\omega-1} \bar{L}_1 \quad (7)$$

하천면적 법칙,

$$R_A = \frac{\bar{A}_{\omega}}{\bar{A}_{\omega-1}}, \quad \bar{A}_{\omega} = R_A^{\omega-1} \bar{A}_1 \quad (8)$$

경험적으로 자연 유역에서 일반적으로  $R_B$ 는 3~5,  $R_L$ 은 1.5~3.5, 그리고  $R_A$ 는 3~6의 값을 갖는다고 알려져 있다. 그림 3은 임의 유역의 하천 차수에 대한 하천 수, 길이, 면적관계를 예시한 것이다.

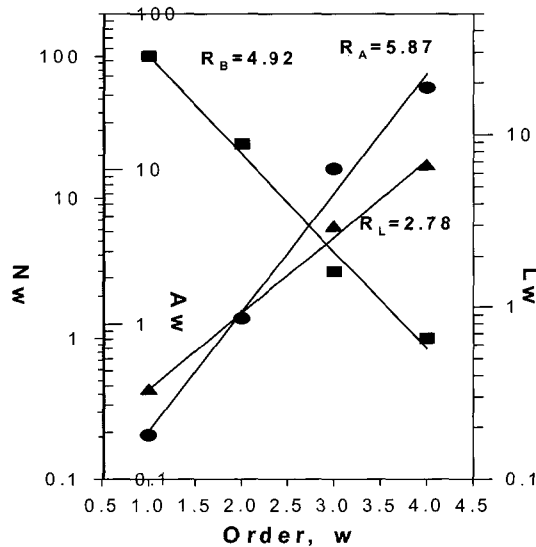


그림 3. 하천 차수에 대한 하천 수, 길이, 면적관계

## 2.2 지형학적 순간단위유량도

### (Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH)

수문학자들은 유역의 지형적 또는 위상적 특징을 유출과 관련시키기 위하여 노력해 왔다. 가장 최근의 수문지형학적 노력은 수문학과 지형학 사이의 이론적 관계에 치중하는 과거와는 달리 어떠한 지형학적 특징을

가진 유역의 총체적인 평균적 반응을 발견하는데 치중한다. 유역의 유출반응과 지형학 사이의 이론적 관계는 선형적 상관성의 평균적인 반응으로 순간단위유량도의 존재 가정 하에 이루어지고, 순간단위유량도는 유역의 강우의 운반시간의 확률적 분포로 해석되어진다.

기존의 결과들을 설명하기 앞서 지형학의 불규칙한 위상 모델을 생각해 보는 것은 유용하고 유도된 수문학적 결과는 Shreve[1967]에 의해 제시되고 Gupta와

Waymire[1983]에 의해 수정된 2가지 가정에 기초한다.

1. 환경적인 조절이 없다면 자연 하도망은 위상적으로 불규칙하다. 즉 하도 시작점과 연결점은 서로 무관하게 발생하고 각각의 확률적 발생빈도는 반반이다. 이것은 주어진 크기의 모든 하도망은 동등하게 비슷하다는 것을 암시한다.
2. 균등한 환경을 가지는 배수유역에서 외부, 내부 링크의 길이와 이와 관련된 유역 면적은 독립된 확률밀도함수를 가지고 한 유역 내에서 위치에 독립적인 불규칙한 변수들이다.

Rodriguez-Iturbe와 Valdes[1979]는 수문지형학을 새롭게 인도하는 지형학적 순간단위유량도를 처음 소개하였다. 이 개념은 Gupta[1980]등에 의해 다시 시작되었는데 유역의 순간단위유량도를 결정하기 위해서는 무한한 숫자의 물방울로 구성된 단위부피의 강우가 유역에 내린다고 가정하고, 분석을 위해서 불규칙하게 선택된 한 방울의 빗방울의 이동에 관심을 둔다. 빗방울은 낮은 차수의 하천으로부터 높은 차수의 하천으로 흘러 들어가서 유역을 통하여 이동할 것이고, 이 이동은 물방울이 여행하는 하천의 차수상태의 변화와 관련되어 질 것이다. 이 과정의 상태는 시간  $t$ 일 때 물방울이 위치하게 되는 계곡경사지역  $a_\omega$  또는 차수  $\omega$ 인 하천  $r_\omega$ 로 정의되어질 것이다. 물방울의 이동은 다음의 법칙 등에 의해 지배받게 된다.

법칙1: 물방울이 아직 언덕 경사구간에 존재한다면, 상태  $a_\omega$ 는 지표 배수가 직접 일어나게 하는 하천의 차수이다.

법칙2: 상태  $a_\omega$ 에서 벗어나는 단 하나의 가능한 이동은 연관된  $r_\omega$ 로 흘러 들어가는 것이다.

$r_\omega$ 에서  $j > \omega$  ( $j = \omega + 1, \dots, \Omega$ )인 경우  $\omega \rightarrow j$ 의 형태의 이동이 가능하다.

법칙3: 유역출구를  $\Omega + 1$ 의 상태로 정의할 때 물방울의 최종상태인  $\Omega + 1$ 에서는 이동이 불가능하다.

위의 법칙들은 유역출구까지 이동하는 유역에 불규칙하게 떨어진 빗방울의 가능한 이동 경로의 유한한 집합으로 결정된다. 예를 들면, 그림 4과 같이 3차의 관심대상인 유역을 가정하면, 가능경로의 집합들로 이루어진 차원  $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ 가 다음과 같이 주어진다.

경로  $s_1: a_1 \rightarrow r_1 \rightarrow r_2 \rightarrow r_3 \rightarrow$  출구

경로  $s_2: a_1 \rightarrow r_1 \rightarrow r_3 \rightarrow$  출구

경로  $s_3: a_2 \rightarrow r_2 \rightarrow r_3 \rightarrow$  출구

경로  $s_4: a_3 \rightarrow r_3 \rightarrow$  출구

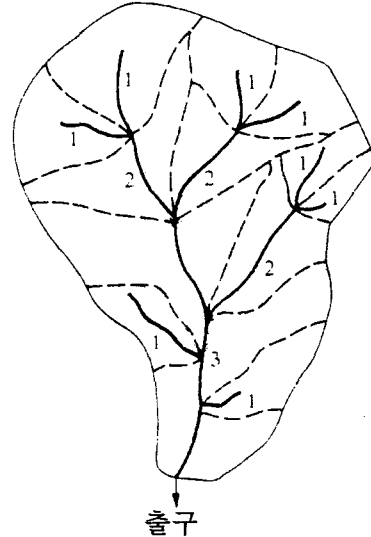


그림 4. Strahler의 차수매김에 의한 3차 하천

빗방울은 항상 언덕경사위로 떨어진다고 가정한다. 즉, 경로에서 초기상태의 하나인  $a_\omega$ 를 의미한다. 항상 차수  $\omega$ 인 언덕경사로부터 차수  $\omega$ 인 하천경사로의 내재된 전이가 있다.

Gupta[1980]등에 의하면 빗방울이 유역출구까지 이동하는데 걸리는 시간의 누가밀도함수는 식 (9)와 같이 주어진다.

$$P(T_B \leq t) = \sum_{s \in S} P(T_s \leq t) P(s) \quad (9)$$

여기서,  $P(\cdot)$ 는 ( )안의 내용에 대한 확률을 의미하고,  $T_B$ 는 출구까지의 이동시간,  $T_s$ 는 특정경로  $s$ 를 따른 이동시간,  $P(s)$ 는 경로  $s$ 로 이동할 빗방울의 확률, 그리고  $S$ 는 유역 위에 떨어진 빗방울이 택할 수 있는 경로들의 집합을 말한다. 특정경로  $a_i \rightarrow r_i \rightarrow r_j \rightarrow \dots \rightarrow r_\Omega$ ,  $i < j < \Omega$ 를 따르는 이동시간  $T_s$ 는 식 (10)과 같이 경로를 따른 각각의 요소들의 이동시간의 합과 같아야만 한다.

$$T_s = T_{a_i} + T_{r_i} + T_{r_j} + \dots + T_{r_\Omega} \quad (10)$$

여기서,  $T_{a_i}$ 는 언덕경사 지역에서의 이동시간 그리고  $T_{r_i}$ 는 차수  $i$ 의 하천에서의 이동시간이다. 주어진 차수의 많은 언덕경사와 하천들 그리고 그것들의 다양한 특성들이 주어진다. 상대적으로 다양한 시간들이 확률밀도함수  $f_{T_{a_i}}(t)$  또는  $f_{T_{r_i}}(t)$ 와 함께 불규칙한

변수로 구해질 것이다. 더욱이 시간들은 결코 독립적으로 분산된 불규칙 변수가 아니라고 의심할 이유도 없다. 모든 경로의 이동시간  $T_s$ 의 확률밀도함수는 식 (11)과 같이 경로  $s$ 의 모든 요소들에 관한 확률밀도함수  $f_{T_{ai}}(t)$  또는  $f_{T_{ri}}(t)$ 의 곱이다.

$$f_{T_s}(t) = f_{T_{ai}}(t) * f_{T_{ri}}(t) * \dots * f_{T_{r\Omega}}(t) \quad (11)$$

예를 들면, 경로 위의  $s_2$ ,  $a_1 \rightarrow r_1 \rightarrow r_3 \rightarrow \text{outlet}$ 의  $P(T_{s_2} \leq t)$ 는 식 (12), 식 (13)과 같이 주어진다.

$$f_{T_{s_2}}(t) = \int_0^t \int_0^{t-t'} f_{T_{a1}}(t') f_{T_{r1}}(t-t') dt' \quad (12)$$

$$P[T_{s_2} \leq t] = \int_0^t f_{T_{s_2}}(t) dt \quad (13)$$

Rodriguez -Iturbe와 Valdes[1979]가 최초 제안할 때 유역 내에서 빗방울이 소모하게 되는 전체 시간에 비교해 상대적으로 미소한 언덕경사의 이동시간은 무시하였다. 식 (10)과 식 (11)은 다음 식 (14), 식 (15)와 같이 단순화된다.

$$T_s = T_{ri} + T_{rj} + \dots + T_{r\Omega} \quad (14)$$

$$f_{T_s}(t) = f_{T_{ri}}(t) * f_{T_{rj}}(t) * \dots * f_{T_{r\Omega}}(t) \quad (15)$$

주어진 경로  $s$ 의 확률  $P(s)$ 는 식 (16)과 같다.

$$P(s) = \theta_i P_{ij} P_{jk} \dots P_{l\Omega} \quad (16)$$

여기서,  $\theta_i$ 는 빗방울이 차수  $i$ 의 하천으로 흘러가는 어떤 언덕경사에서 이동을 시작할 확률이고,  $P_{ij}$ 는 차수  $i$ 의 하천에서 차수  $j$ 의 하천으로 이동할 확률이다. 앞서 말한 법칙1에 의해 빗방울은  $i$ 차 하천으로 흘러들어갈 지역에 떨어지고  $i$ 차 하천의 확률은 1이 된다.

Rodriguez -Iturbe와 Valdes[1979]는 초기상태확률  $\theta_i$ 와 이동확률  $P_{ij}$ 는 단지 하천유역의 지형학적 특성과 기하학적 특성에만 관련된 함수임을 나타냈다. 확률들의 물리적인 해석은 다음 식 (17), 식 (18)과 같다.

$$\theta_i = \frac{(\text{차수 } i\text{인 하천으로 직접 배수되는 총 유역면적})}{(\text{전체 유역면적})} \quad (17)$$

$$P_{ij} = \frac{(\text{차수 } j\text{인 하천으로 들어가는 차수 } i\text{인 하천의 수})}{(\text{차수 } i\text{인 하천의 전체 수})} \quad (18)$$

Gupta[1980]등에 의해 주어진 다음과 같은 일반적인 식을 이용하여, 이동확률은 식 (19)와 같이 각 차수의 Strahler 하천수  $N_i$ 의 함수로 추정되어진다.

$$P_{ij} = \frac{(N_i - 2N_{i+1})E(j, \Omega)}{\sum_{k=i+1}^{\Omega} E(k, \Omega) N_i} + \frac{2N_{i+1}}{N_i} \delta_{i+1, j}, \quad 1 \leq i \leq j \leq \Omega \quad (19)$$

여기서,  $j = i + 1$ 이면  $\delta_{i+1, j} = 1$  아니면 0이다.  $E(i, \Omega)$ 는 차수  $\Omega$ 로 한정된 하도망에서의 내부링크의 평균 개수를 의미한다.

Smart[1972]에 의해 발표된  $E(i, \Omega)$ 의 계산식은 식 (20)과 같다.

$$E(i, \Omega) = N_i \prod_{j=2}^i \frac{N_{j-1} - 1}{2N_j - 1}, \quad i = 2, \dots, \Omega \quad (20)$$

유사하게 빗방울이 차수  $\omega$ 인 지역에 떨어질 확률은 식 (21)과 식 (22)와 같은 일반식을 이용하여 추정되어질 수 있다.

$$\theta_1 = \frac{N_1 \bar{A}_1}{A_\Omega} \quad (21)$$

$$\theta_\omega = \frac{N_\omega}{A_\Omega} \left[ \bar{A}_\omega - \sum_{j=1}^{\omega-1} \bar{A}_j \left( \frac{N_j P_{j\omega}}{N_\omega} \right) \right], \quad \omega = 2, \dots, \Omega \quad (22)$$

한 유역에서의 빗방울의 이동시간에 관한 확률함수  $P(T_B \leq t)$ 은 주어진 하도  $T_{ri}$ 에서 빗방울의 이동시간에 관련된 확률함수들  $f_{T_{ri}}(t)$ 와 지형학적 유역 특성의 항목으로 잘 정의되어졌다. 전술한 바와 같이 순간단위유량도는 식 (23)과 같이  $T_B$ 의 확률밀도함수로 정의된다.

$$h_B(t) = dP(T_B \leq t) / dt = \sum_{s \in S} f_{T_{ri}}(t) * \dots * f_{T_{r\Omega}}(t) P(s) \quad (23)$$

여기서,  $f_{T_{ri}}(t)$ 는  $T_{ri}$ 의 확률 밀도 함수이다. 결과적으로 순간단위유량도는 초기에 주어진 차수의

하도로 유입되는 유역면적에 떨어질 빗방울들의 확률의 함수이다. 한 차수의 하천에서 다른 차수의 하천으로의 이동 확률은 유역의 지형학적 특성치  $R_A$ 와  $R_B$  그리고 주어진 차수의 이동시간 분포 함수이다. 초기 확률과 이동 확률은 정량적인 지형학과 수문학 간의 상관성과 수계망에 대한 확률적인 설명을 제시한다.

Rodriguez-Iturbe와 Valdes[1979]는 차수  $\omega$  또는 하도에서 이동시간은 아래 식 (24)와 같은 지수 확률 밀도함수의 형태로 관찰된다는 생각을 제안하였다.

$$f_{T_{r\omega}}(t) = K_{\omega} \exp(-K_{\omega}t) \quad (24)$$

여기서,  $K_{\omega}$ 는 차수  $\omega$  또는 하도의 특성으로  $t^{-1}$ 의 단위를 가지는 매개변수이다. 따라서,  $1/K_{\omega}$ 는 또한 위의 분포에서의 평균이동시간이다. Rodriguez-Iturbe와 Valdes[1979]는  $K_{\omega}$ 를 추정하기 위하여 식 (25)를 제안했다.

$$K_{\omega} = \frac{V}{L_{\omega}} \quad (25)$$

여기서,  $V$ 는 동적 매개변수로 특성속도이다. 주어진 시간에서 유역내의 모든 장소에서  $V$ 는 동일한 것으로 가정되었다. Valdes[1979] 등은  $V$ 대신 유역내의 어떤 사상에 대해 추정된 침투 속도를 사용함으로써 충분한 매개 변수화가 된다고 제시하였다.

Rodriguez-Iturbe와 Valdes[1979]는 삼각 단위유량도로 가정해서  $h(t)$ 의 침투 유량과 침투 도달 시간만을 규정하는 것으로 충분하다고 제시하였다. 이들 특성들은 광범위한 매개변수에 대한 식 (23)의 분석적 해인 침투 유량과 침투 도달시간의 회귀분석을 통해 다음 식 (26)과 식 (27)과 같이 단순하게 표현된다.

$$q_p = \frac{1.31}{L_{\omega}} R_L^{0.43} V \quad (26)$$

$$t_p = \left( \frac{0.44L_{\omega}}{V} \right) \left( \frac{R_B}{R_A} \right)^{0.55} R_L^{-0.38} \quad (27)$$

여기서,  $L_{\omega}$ 는 km단위의 가장 높은 차수의 하도 길이이다.  $V$ 는 앞에서 언급한 것과 같이 m/s단위의 예상되어지는 침투 속도이다. 침투 유량  $q_p$ 는  $hr^{-1}$ 의 단위를 가지고,  $t_p$ 는 hr의 단위를 가진다.

## 2.3 지형기후학적 순간단위유량도

(Gromorphoclimatic Instantaneous Unit Hydrograph, GCIUH)와 지형기후학적 단위유량도(Geomorphoclimatic unit Hydrograph, GCUH)

지형학적 순간단위유량도를 사용함에 있어 곤란한 점은 침투 속도  $V$ 에 의존해야하는 점이다. 이것은 주관적으로 결정되는 매개변수이므로 Rodriguez-Iturbe [1982]등은  $V$ 는 유효강우강도와 강우지속기간의 함수로 표시된다고 정의하고  $V$ 를 결과들에서 제거하였다. 가장 유용한  $q_p$ 와  $t_p$ 는 식 (28), 식 (29)와 같이 재정의되었고 이를 지형기후학적 순간단위유량도(Gromorphoclimatic Instantaneous Unit Hydrograph, GCIUH)라 한다.

$$q_p = \frac{0.871}{\Pi_i^{0.4}} \quad (28)$$

$$t_p = 0.585 \Pi_i^{0.4} \quad (29)$$

여기서,

$$\Pi_i = \frac{L_{\omega}^{2.5}}{(i_r A_{\omega} R_L a_{\omega}^{1.5})} \quad (30)$$

$$a_{\omega} = \frac{S_{\omega}^{0.5}}{(n b_{\omega}^{2/3})} \quad (31)$$

$i_r$ 는 평균 유효강우강도이다. 식 (31)은 단순한 광복사각형단면하천의 Manning의 식이다. 위의 식에서  $S_{\omega}$ 와  $b_{\omega}$ 는 유역에서 최고차 하천의 평균경사와 평균폭이다.  $n$ 은 Manning의 조도계수에 해당한다.

특성치  $q_p$ 와  $t_p$ 를 가지는 삼각 순간단위유량도를 가정하고, 이를 유효강우강도  $i_r$ 과 지속기간  $t_r$ 을 가지는 균등한 사각형의 강우를 이용해 회선 적분을 실행하면 유출 수문곡선의 침투치에 대한 다음과 같은 식 (32), 식 (33)을 유도할 수 있다.

$$\frac{Q_p}{Q_e} = t_r q_p \left( 1 - \frac{t_r q_p}{4} \right) \quad , \quad t_r \leq t_c = t_B \quad (32)$$

$$Q_p = Q_e = i_r A \quad , \quad t_r = t_c \quad (33)$$

여기서,  $t_B$ 는 순간단위유량도의 기저시간(hr),  $t_r$ 은 지속시간(hr),  $t_c$ 는 도달시간(hr)  $Q_e$ 는 유역면적(A)의 평형유출량(equilibrium discharge)( $m^3/sec$ )이

다.

이전에 설명한 식 (28)과 식 (29)를 이용하여 나타내면, 식 (34)가 된다.

$$Q_p = 2.42 \frac{i_r A_{\phi} t_r}{\Pi_i^{0.4}} \left( 1 - \frac{0.218 t_r}{\Pi_i^{0.4}} \right) \quad (34)$$

Rodriguez-Iturbe[1982]등은 이 침투 유량에 대한 시간을 식 (35)와 같이 나타내었다.

$$T_p = 0.585 \Pi_i^{0.4} + 0.75 t_r \quad (35)$$

본 연구에선 식 (34)와 식 (35)를 지형기후학적 단위 유량도라고 정의하였고, 이 식들은 강우와 유출관계가 입력치와 출력치를 가지고 행하는 매개변수조정(calibration)에 독립적이고 이론적으로 단지 지형학적 자료와 기후자료만의 함수임을 나타낸다.

또한, 지형기후학적 순간단위유량도와 지형기후학적 단위유량도는 입력치  $i_r$ 에 의존하기 때문에 전통적인 방법들에서의 선형적 가정보다는 상이한 면을 나타낸다.

## 2.4 돌발홍수 기준우량 산정 절차

해당 유역에서의 한계유출량 혹은 유효 강우량의 산정은 돌발홍수 기준우량 산정에 있어 기초가 되는 절차이다. 우선 지속시간에 따른 유효 강우량과 총강우량을 구하고 지속 시간에 따른 총강우량 관계를 산출함으로써 돌발홍수 기준우량 산정에 필요한 자료를 확보하게 되는데 세부절차는 다음 그림 5와 같다.

각 세부 절차를 상세히 기술하면 다음과 같다.

- ▶ 적절한 홍수 가능 기준으로 한계수심 ( $Y_b$ )을 결정한다.  
한계수심은 일반적인 의미로는 하천 범람을 발생시키는 유출량을 의미하므로 강우의 시공간적 특성과 유역과 하천의 지형학적 특성에 따라 결정된다.
- ▶ 하천단면을 그림 6과 같이 구형단면으로 가정하고 Manning 공식을 적용한 다음 식 (36)을 이용해 한계유출량( $Q_d$ )를 산정한다.

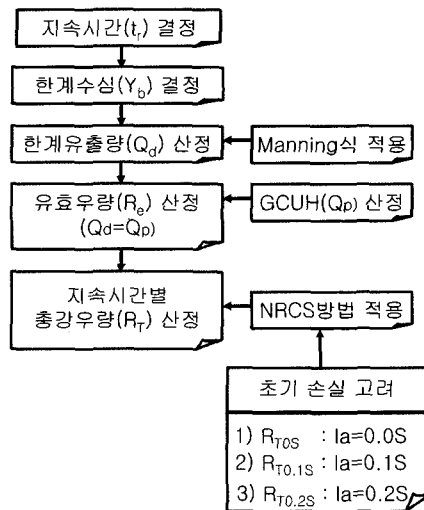


그림 5. 돌발홍수 기준우량 산정 절차도

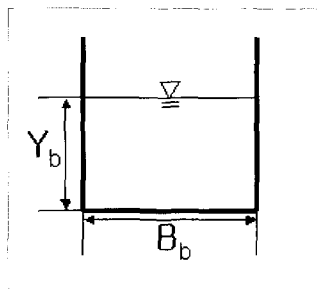


그림 6. 한계유출량 산정을 위한 하천 단면



$$Q_d = \frac{0.288}{n} S_c^{0.5} B_b \left[ \frac{Y_b}{m+1} \right]^{0.38} \quad (36)$$

여기서,  $S_c$  는 유역 하도 경사(m/m),  $B_b$ 는 최대 하폭(m),  $Y_b$ 는 최대 수심(m),  $m$ 은 형상계수(구형:  $m=0$ ),  $n$ 은 Manning 조도계수이며,  $Q_d$  는 한계유출량( $m^3/sec$ )이다.

- ▶ 지형기후학적 단위유량도 식을 이용해서 각 지속시간별 유효우량( $R_e$ )을 산정한다.

식 (34)에서 유효우량( $R_e$ )이 강우강도( $i_r$ )와 지속시간( $t_r$ )의 곱의 관계이므로  $i_r \cdot t_r = R_e$ 로 단순화하고 Manning 식으로 유도된 식 (36)의 한계유출량( $Q_d$ )과 지형기후학적 단위유량도의 침투유량( $Q_p$ )과 같게 두면 식 (37)과 같이 된다. 여기서 지속시간별 한계유출량의 유효우량( $R_e$ )을 각각 산정한다.

$$Q_d = Q_p = 2.42 \frac{R_e A_g}{\Pi_i^{0.4}} \left( 1 - \frac{0.218 t_r}{\Pi_i^{0.4}} \right) \quad (37)$$

- ▶ 유효우량( $R_e$ )은 아래와 같은 NRCS 방법의 총우량( $R_T$ )-유효우량( $R_e$ ) 관계를 이용하여 총우량( $R_T$ )으로 환산한다.

$I_a$ 는  $S$ 와의 관계에 따라 다음의 3가지 경우 ( $I_a = 0.2S$ ,  $I_a = 0.1S$ ,  $I_a = 0.0S$ )로 분류하여 그 값에 따른 상이한 총 강우량을 식 (38)에서

구한다.

$$R_e = \frac{(R_T - I_a)^2}{(R_T - I_a) + S} \quad (38)$$

여기서,  $R_e$  : 유효우량(mm),  $R_T$  : 총우량(mm)  
 $I_a$  : 강우 초기의 손실우량,  $S$  : 유역의 최대잠재보유수량이다.

### 3. 대상유역 적용

#### 3.1 대상유역 자료구축

##### 3.1.1 지형자료구축

본 연구에선 대상유역을 지리산 일대의 유역 중 덕천강 유역으로 결정하였고 유출량 자료를 실측치와 비교하기 위해 태수 수위표를 기준으로 유역을 구분하였다. 본 연구의 지형자료의 구축 및 연산은 모두 GIS 패키지인 ARC/INFO와 Arcview 3.2a로 수행되었다. 우선, 1:50000축척의 DEM을 이용해 각 소유역을 그림 8과 같이 구분하고 유역특성자료인 면적, 유로연장, 경사 등을 표 1과 같이 산정하였다. CN값 산정을 위해 그림 9와 같이 토양도를 구축하고 NRCS 토양형별로 면적분포를 표 2와 같이 정리하였으며, 토지이용도를 그림 10과 같이 인공위성영상을 이용해 분류하였다. 각 소유역별 토지이용현황을 정리하면 표 3과 같다. 이와 같이 구축된 토양도와 토지이용도를 이용해 산정한 덕천강 전체유역의 CN값은 AMC-II 조건에서 62로 나타났고, CN값 산정을 위한 세부절차를 정리하면 그림 7과 같다.

표 1. 덕천강 유역의 특성자료

하천명	유역번호	유역면적 A(km <sup>2</sup> )	유로연장 L(km)	고도차 H(km)	유로 평균경사 S(H/L)	유역 평균폭 A/L(km)	형상계수 A/L <sup>2</sup>	비고
덕천강 유역	DW11	34.640	14.989	1.708	0.114	2.314	0.154	
	DW12	21.811	6.564	0.781	0.119	3.328	0.507	
	DW13	14.843	7.768	0.625	0.080	1.913	0.246	
	DW14	28.525	13.894	1.459	0.105	2.056	0.148	
	DW15	5.594	4.400	0.616	0.140	1.273	0.289	
	DW21	36.533	13.398	1.519	0.113	2.731	0.204	
	DW22	33.383	13.019	1.707	0.131	2.568	0.197	
	DW23	17.899	7.286	0.835	0.115	2.460	0.338	
	DW24	17.815	8.469	0.721	0.085	2.107	0.249	
	DW31	25.974	11.580	0.690	0.060	2.246	0.194	
	DW32	9.133	8.459	0.817	0.097	1.081	0.128	
	전체	246.152	29.031	1.636	0.056	8.490	0.292	

표 2. 덕천강 유역의 NRCS 토양형별 면적 분포(단위: km<sup>2</sup>)

유역명	소유역명	토양 구분				합계
		type A	type B	type C	type D	
덕천강 유역	DW11	31.1148	0.9927	0	2.5326	34.640
	DW12	19.5543	2.2572	0	0	21.811
	DW13	10.1925	4.1472	0	0.5031	14.843
	DW14	21.4128	1.5003	0	5.6124	28.525
	DW15	4.2786	1.3158	0	0	5.594
	DW21	30.9141	2.9997	0	2.619	36.533
	DW22	22.4082	2.5767	0	8.3979	33.383
	DW23	13.7061	2.8872	0	1.3059	17.899
	DW24	14.1849	3.6306	0	0	17.815
	DW31	21.9231	4.0509	0	0	25.974
	DW32	7.9299	1.2033	0	0	9.133
	전체		197.619	27.562	0	20.971

표 3. 덕천강 유역의 토지 이용 현황(단위: km<sup>2</sup>)

유역명	소유역명	토지 이용 현황							합계
		물	주거지	농지	산지	초지	임야	농지	
덕천강 유역	DW11	0.043	0.006	0.006	0	0.188	34.075	0.321	34.640
	DW12	0.001	0.051	0.006	0	0.179	20.595	0.979	21.812
	DW13	0.193	0.069	0.035	0.004	0.291	13.380	0.870	14.843
	DW14	0.029	0.029	0.025	0.003	0.420	27.718	0.301	28.525
	DW15	0.090	0.041	0.033	0.001	0.337	4.190	0.902	5.594
	DW21	0	0.301	0.076	0.033	0.729	34.508	0.886	36.533
	DW22	0	0.078	0.061	0.005	0.603	31.644	0.991	33.383
	DW23	0.001	0.156	0.293	0.005	0.721	16.132	0.591	17.899
	DW24	0.132	0.155	0.218	0.005	0.888	14.488	1.929	17.815
	DW31	0.224	0.109	0.174	0	0.753	23.618	1.096	25.974
	DW32	0	0.007	0.029	0	0.257	8.137	0.702	9.133
	전체		0.714	1.003	0.957	0.057	5.368	228.484	9.568

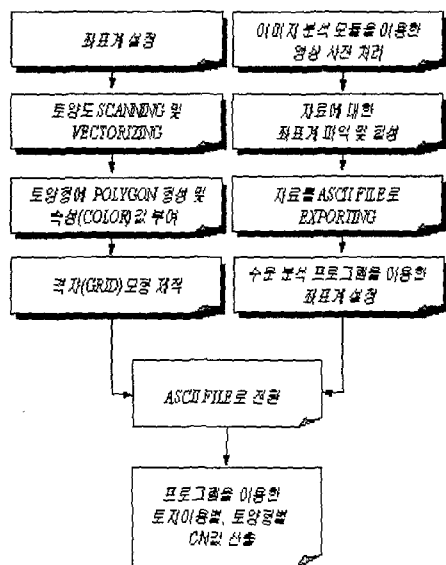


그림 7. GIS기법의 CN값 산정 절차

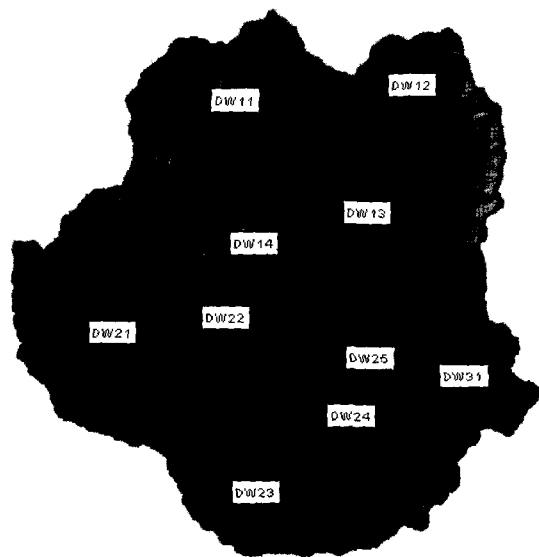


그림 8. 덕천강 소유역 분할도

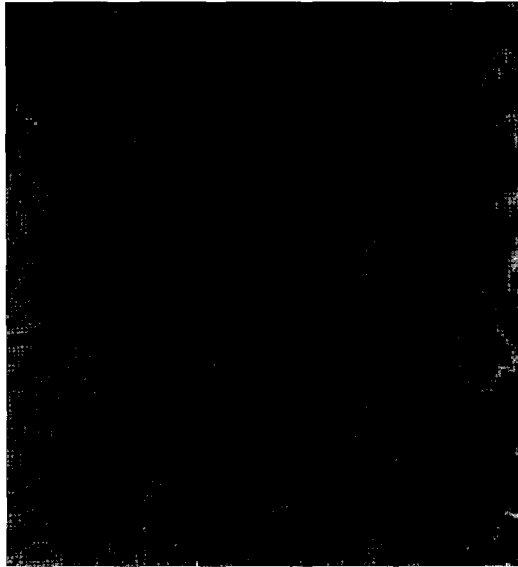


그림 9. 덕천강 유역의 토양도

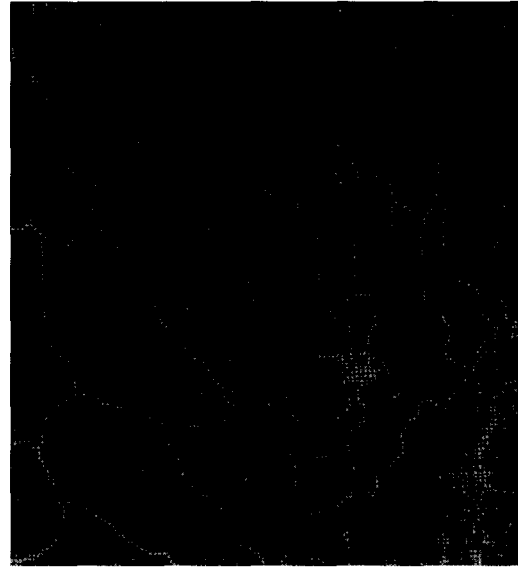


그림 10. 덕천강 유역의 토지이용도

### 3.1.2 지형학적 순간단위유량도 매개변수 산정

지형학적 순간단위유량도 매개변수 산정을 위해 그림 12와 같이 Horton 차수도를 구축하고 덕천강 유역의 차수별 특성치를 표 4와 같이 정리하였다. 또한 덕천강 유역을 하나의 소유역으로 Horton 차수도를 구축하고 유역의 특성치를 각각 산정하여 정리하면 표 5와 같으며 지형학적 순간단위유량도 매개변수를 산정하는 세부

절차는 그림 11과 같다. 한편, 덕천강 유역의 면적은 246km<sup>2</sup>로 대체로 큰 편이다. 따라서 하천의 조도계수 (n)는 대하천의 자연하천에 적합한 표 6의 하천설계기준(수자원학회,2000)에서 제시한 기준으로 산지 지역임을 고려하여 덕천강 유역의 최고차수 하도인 6차하도의 조도계수를 0.035로 산정하였다.

표 4. 덕천강 유역의 하천차수별 특성

차수 구분	차수별 하천수 ( $N_w$ )	차수별 평균하천연장 ( $L_w$ , km)	차수별 평균경사 ( $S_w$ , %)	차수별 평균유역면적 ( $A_w$ , km <sup>2</sup> )
1	669	0.377	28.447	0.206
2	152	0.806	21.958	1.184
3	30	1.932	16.035	6.896
4	7	5.573	8.952	32.292
5	2	9.130	4.093	117.035
6	1	5.381	2.472	246.152

표 5. 덕천강 유역의 지형학적 순간단위유량도 매개변수

유역명	특성치			최고차수 하도연장 ( $L_n$ , km)	최고차수 하도경사 ( $S_n$ , %)	최고차수 유역면적 ( $A_n$ , km <sup>2</sup> )	조도계수 (n)	최고차수 하도폭 ( $B_n$ , m)
	분기비 ( $R_p$ )	연장비 ( $R_L$ )	면적비 ( $R_A$ )					
덕천강 유역	3.83	1.86	4.24	5.38	0.025	246.152	0.035	127

표 6. 조도계수 사용값

		조도계수(n)의 범위
자연 하천	평야의 소하천, 잡초 없음	0.025 - 0.033
	평야의 소하천, 잡초와 관목 있음	0.030 - 0.040
	평야의 소하천, 잡초 많음, 잔자갈 하상	0.040 - 0.055
	산지 하천, 골재, 호박돌	0.030 - 0.050
	산지하천, 호박돌, 큰호박돌	0.040 - 이상
	큰하천, 점토, 사질하상, 사행이 적음	0.018 - 0.035
	큰하천, 자갈, 하상	0.025 - 0.040

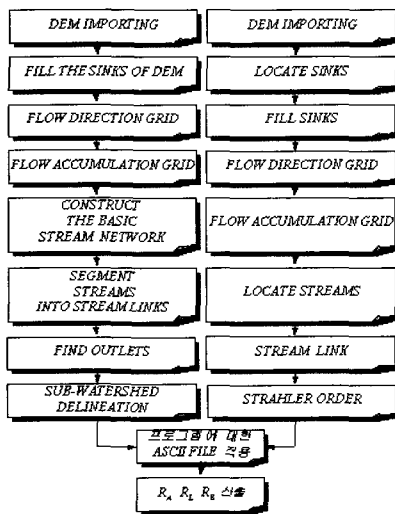


그림 11. GIS기법의 GIUH 매개변수 산정절차

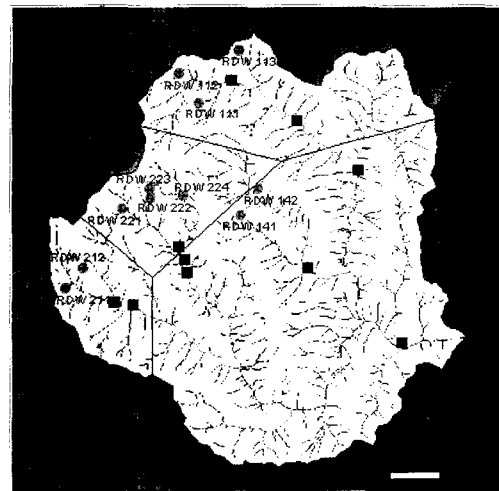


그림 12. 덕천강 유역의 Horton 차수도

### 3.1.3 HEC-HMS 모형 구축

HEC-HMS 모형을 이용하여 태수지점(덕천강 유역)에 Clark 모형을 적용하기 위하여 각 소유역을 분할하고 합성하였으며, HEC-HMS 모형에서 각 소유역의 명칭은 각 유역의 유역구분명과 동일하며, 하도구간에 대해서는 Kinematic Wave 방법으로 하도 추적을 실시하였다. 그림 13은 Clark 모형을 적용하기 위한 유역분할도 및 하천망을 나타낸다.

Clark 모형을 적용하기 위해 각 표 1의 덕천강 유역 특성치를 이용하여 소유역의 도달시간( $T_c$ )과 저류상수(K)를 산정 하였는데, 이때 도달시간( $T_c$ )은 식 (39)와 같이 Kirpich식을, 저류상수(K)는 식 (40)과 같이Sabol식(USACE, 1994)을 각각 사용하였다.

$$T_c = 0.0663 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (39)$$

$$K = \frac{T_c}{1.46 - 0.0867 \frac{L^2}{A}} \quad (40)$$

이때,  $A$ 는 유역 면적(  $\text{km}^2$ ),  $L$ 은 유로연장(km),  $S$ 는 무차원 유로경사(m/m)이다.

기저유량( $Q_t$ )은 식 (41)과 같은 지수감소식(Chow, Maidment, Mays, 1988)을 사용하여 산정하였으며 초기 유량( $Q_0$ ) 및 지수감소상수( $k$ )는 유역 크기를 고려하여 적절히 가정하여 산정하였다.

$$Q_t = Q_0 k^t \quad (41)$$

여기서,  $t$ 는 시간(hr)을 나타낸다.

표 7은 각 소유역별 계산에 사용될 도달시간( $T_c$ )과 저류상수(K) 및 기저유량 결정 매개계수를 나타낸다.

유역추적을 통하여 산정된 홍수량이 하천에 유입된 경우 적용된 하도추적을 단면을 구형으로 가정하여 Kinematic Wave 방법으로 수행하기 위한 특성계수는 표 8과 같다. 본 연구에선 2000년 홍수량의 실측치를 이용하여 덕천강 유역의 유역 및 하도의 매개변수를 결정 한 후 각 홍수량을 산정하였다.

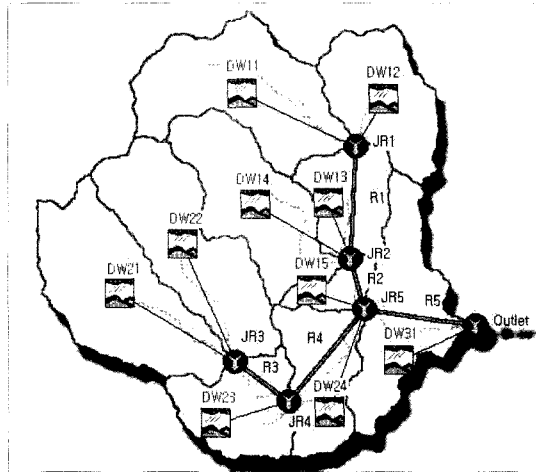


그림 13. HEC-HMS 적용을 위한 유역분할도 및 하천망도

표 7. 각 소유역별 매개계수

유역 구분	특성치	포집시간, T <sub>c</sub> (hr)	지류상수, K (hr)	초기유량, Q <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> /sec)	지수감소상수, k
DW11		1.6095	6.4824	5	1
DW12		1.1915	5.6164	5	1
DW13		0.9278	4.9846	5	0.66
DW14		1.4186	6.1036	5	0.45
DW21		1.6661	6.5902	5	1
DW22		1.5713	6.4085	5	0.45
DW23		1.0179	5.2825	5	1
DW15		0.4921	3.6836	10	0.03
DW24		1.0451	5.2758	5	1
DW31		1.3349	5.9292	5	1

표 8. 하도 추적을 위한 특성 계수

구간명	단면 형상	구간길이 (m)	에너지 경사 (m/m)	바닥폭(m)	유역 면적 (km <sup>2</sup> )	조도 계수
R1	구형	7768	0.024	51	71.29	0.055
R2	구형	4400	0.037	66	105.41	0.055
R5	구형	11580	0.025	127	237.02	0.035
R3	구형	7286	0.038	52	72	0.055
R4	구형	8469	0.044	60	105.63	0.040

### 3.2 확률홍수량 비교

본 연구의 확률홍수량 비교를 위해 덕천강 하천정비 기본계획(건교부, 2001)에서 산정된 빈도별 확률강우량을 사용하였고 표 9와 같다. 표 9에서 기본계획 수립 시 사용된 관측소 중 지리산 지점은 지리산 국립공원 내에 있고, 수곡과 마천 지점은 국립공원 외에 위치하고, 지리산 지점이 3개의 강우관측소의 확률강우량 중 중간값

을 나타내고 있어 확률강우량을 이용하여 지형기후학적 단위유량도를 적용할 때는 지리산지점의 빈도별 강우량을 적용하였다. 지리산 지점의 확률강우량을 Huff 제2분위 호우구간의 50% 확률 무차원 누가곡선을 6차 회귀식으로 식 (42)와 같이 산정하였다. 표 10은 식 (42)의 회귀식으로 시간 분포시킨 결과이다.

$$Y = 0.0267836 + 0.873322X - 0.127677X^2 + 0.008004X^3 - 0.000163306X^4 + (1.39626E - 08)X^5 + (4.26002E - 09)X^6 \quad (42)$$

여기서, Y는 강우량(mm), X는 지속시간(hr)이다.

표 9. 관측소별 확률강우량 (단위: mm)

구분	년도별				
	30년	50년	80년	100년	150년
수곡	361.5	398.3	432.3	448.9	476.8
지리산	355.9	390.0	421.6	437.0	462.9
마천	318.1	346.7	373.4	386.0	408.2
평균	345.2	378.3	409.1	424.0	449.3

표 10. Huff 방법에 의해 시간 분포된 강우(지속 시간: 1일)(단위: mm)

구분	30년	50년	80년	100년	150년
1	14.78	16.19	17.52	18.14	19.22
2	11.6	12.71	13.75	14.24	15.09
3	12.12	13.27	14.36	14.87	15.76
4	14.8	16.22	17.55	18.17	19.25
5	18.38	20.14	21.79	22.56	23.91
6	21.91	24.01	25.97	26.9	28.5
7	24.75	27.11	29.33	30.38	32.18
8	26.5	29.03	31.41	32.52	34.46
9	26.99	29.57	31.99	33.13	35.1
10	26.24	28.75	31.11	32.21	34.13
11	24.41	26.74	28.93	29.96	31.74
12	21.75	23.83	25.79	26.7	28.29
13	18.61	20.39	22.06	22.85	24.21
14	15.34	16.81	18.19	18.83	19.95
15	12.3	13.48	14.59	15.1	16
16	9.81	10.74	11.63	12.04	12.75
17	8.08	8.85	9.58	9.92	10.51
18	7.23	7.92	8.57	8.87	9.4
19	7.2	7.89	8.54	8.84	9.36
20	7.75	8.49	9.19	9.51	10.08
21	8.39	9.19	9.95	10.3	10.92
22	8.38	9.18	9.93	10.28	10.89
23	6.63	7.27	7.86	8.14	8.63
24	2.05	2.24	2.43	2.51	2.66
총강우량(mm)	356	390	422	437	463

표 11은 지형기후학적 단위유량도를 적용하여 산정한 첨두유량(확률홍수량)이다. 지형기후학적 단위유량도에 의한 첨두유량은 덕천강 하천정비기본계획 보고서

상의 첨두유량에 비해 0.96~1.16의 비율로 백분율로 표시하면 -4~16%의 범위 내에 유사성을 나타내었다.

표 11. 침투유량( $Q_p$ )과 침투유량 발생시간( $T_p$ )의 비교

빈도	GCUH		보고서상의 침투유량, $Q_p$ ( $m^3/sec$ )	비율
	침투유량 발생시간, $T_p$ (hr)	침투유량, $Q_p$ ( $m^3/sec$ )		
30년	11.5	1835	1580	1.16
50년	11.5	1955	1787	1.09
80년	11.3	2047	1981	1.03
100년	11.3	2084	2075	1.00
150년	11.3	2139	2235	0.96

### 3.3 실측 홍수량 비교

1997년 8월, 1999년 9월과 2000년 9월에 발생한 총 3개의 강우 사상을 이용하여 지형기후학적 단위유량도와 HEC-HMS에 의한 침투 유량 및 침투 유량 도달 시간을 산정하였다. 표 12는 덕천강 태수지점에서의 계산결과와 실측값을 나타낸 것으로 1999년과 2000년의 결과는 지형기후학적 단위유량도, 실측값, HEC-HMS의 크기로 나타났으며, 1997년은 각각의 값이 서로 상이하게 나타났다. 이들을 도시하면 그림 14~그림 16과 같다.

2000년 9월에 발생한 강우에 의한 결과가 가장 근사한 결과를 나타내며, 각 소유역의 출구에서의 유출량을 비교한 결과는 표 13과 같다. 표 13의 결과에서 지형기후학적 단위유량도를 적용하여 산정한 각 소유역의 홍수량은 태수지점의 홍수량을 동시에 만족한다. 따라서 지형기후학적 단위유량도를 이용한 각 소유역별 홍수량 산정이 적정함을 파악할 수 있으며, 각 소유역에 대한 홍수량을 산정하기 위하여 지형기후학적 단위유량도를 덕천강 유역의 소유역과 동일하게 적용하였다.

표 12. 태수지점의 강우사상별 침투유량( $Q_p$ )과 침투유량 발생시간( $T_p$ )의 비교

사상	구분	계산값				태수 수위표	
		HEC-HMS		GCUH		실측값	
		침투유량 발생시간, $T_p$ (hr)	침투유량, $Q_p$ ( $m^3/sec$ )	침투유량 발생시간, $T_p$ (hr)	침투유량, $Q_p$ ( $m^3/sec$ )	침투유량 발생시간, $T_p$ (hr)	침투유량, $Q_p$ ( $m^3/sec$ )
2000년 9월		195	466	191.5	703	197	647
1999년 9월		76	591	71.5	805	74	658
1997년 8월		88	354	87.5	604	88	1624

표 13. 소유역에서의 유출량 비교(2000년 9월)

유역	구분	GCUH		HEC-HMS		태수수위표	
		침투유량 발생시간, $T_p$ (hr)	침투유량, $Q_p$ ( $m^3/sec$ )	침투유량 발생시간, $T_p$ (hr)	침투유량, $Q_p$ ( $m^3/sec$ )	침투유량 발생시간, $T_p$ (hr)	침투유량, $Q_p$ ( $m^3/sec$ )
DW11		191.75	103	195	75	-	-
DW12		203	35	194	56	-	-
DW11+DW12+DW13		191.75	215	195	160	-	-
DW14		191.75	89	194	62	-	-
DW11+DW12+DW13 +DW14+DW15		191.75	310	200	213	-	-
DW21		191.5	112	202	75	-	-
DW22		191.5	105	194	37	-	-
DW21+DW22+DW23 +DW24		191.75	322	203	187	-	-
DW11+DW12 + . . . + DW24+DW31		191.5	703	195	466	197	647

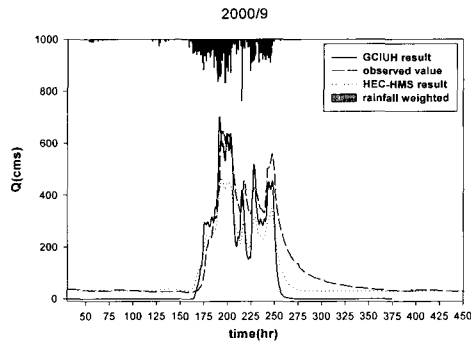


그림 14. 2000년 9월의 홍수수문곡선

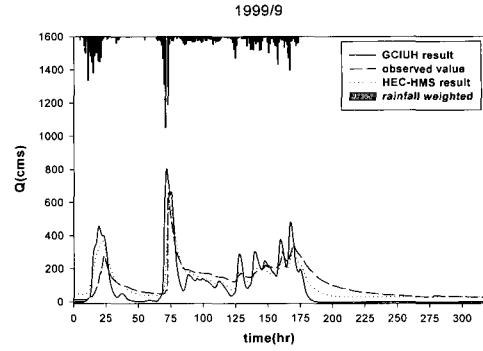


그림 15. 1999년 9월의 홍수수문곡선

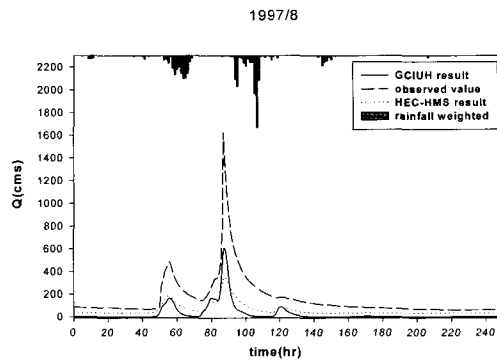


그림 16. 1997년 8월의 홍수수문곡선

#### 4. 돌발홍수 기준우량 산정

##### 4.1 덕천강 유역특성 및 지속시간 결정

덕천강 유역은 유역면적이 246.15 km<sup>2</sup> 이며, 고도차는 1636m, 유역경사는 0.056으로 유역면적에 비해 산악 지역의 비율이 높으므로 비교적 급한 편이다. NRCS의 CN값은 AMC-II 조건에서 62로 나타났고 하천은 전체적으로 부채꼴 형태로 구성되어 있으며 본류는 덕천강을 향하여 남동쪽으로 흐르고 있다. 덕천강 유역의 돌발홍수 기준우량을 산정하기 위한 지속시간은 10분에서 120분 까지 10분 단위의 지속시간을 정하고 해당 유역에서 기준이 될만한 지속시간을 결정하도록 했다.

##### 4.2 한계수심 결정

한계수심은 일반적인 의미로는 하천 범람을 발생시키는 유출량을 의미하므로 강우의 시공간적 특성과 유역과 하천의 지형학적 특성에 따라 결정된다. 그러나 본 연구에서는 계곡에서 인명의 안전 확보를 위한 수심 0.5m를 한계수심( Y<sub>p</sub> )으로 정했다.

#### 4.3 한계유출량 산정

덕천강 유역의 대표 단면을 이용하여 수심이 50cm가 되는 경우의 홍수량을 Manning 공식을 이용하여 한계 유출량( Q<sub>d</sub> )을 산출하였다. 홍수량 산정시 하폭은 결과에 상당한 영향을 주는데, 본 연구 지역의 단면은 자연 하천으로 하천의 구분이 애매모호한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 덕천강 하천정비기본계획(건교부, 2001)에 수록된 보고서 상의 단면과 현장조사를 통해 확인한 계획 하폭을 고려하여 표 14와 같이 정리하였고, 이를 이용해 하천시설기준(1993)의 하폭 결정 회귀식을 참조하여 식 (43)과 같이 홍수량 산정 단면의 하폭(B)과 해당 유역면적(A)간의 회귀식을 산출하였다. 표 5의 각각의 하도특성 자료와 하폭 127m를 식 (34)에 대입하여 계산한 결과 한계유출량은 95.59 m<sup>3</sup>/sec 이었다.

$$B = 1.8735 \times A^{0.7666} \quad (43)$$

( A : 기여 면적( km<sup>2</sup> ), B : 단면의 평균 하폭 )



#### 4.4 지형기후학적 단위유량도식을 이용한 지속시간별 유효우량 산정

10분 간격으로 강우지속시간을 고려하여 각 지속시간에서 한계수심 0.5m의 한계유출량( $Q_d$ )을 초과하게 되는 강우량인 유효우량( $R_e$ )을 지형기후학적 단위유량도식의 변형식인 식 (37)을 이용하여 각 지속시간별로 표 15와 같이 산정하였다.

#### 4.5 NRCS 방법을 이용한 총우량 산정

NRCS 방법의 총우량-유효우량 관계를 이용하여 총우량으로 환산하였는데,  $I_a$ 는 S와의 관계에 따라 3가지 경우( $I_a = 0.2S$ ,  $I_a = 0.1S$ ,  $I_a = 0.0S$ )로 분류하여 그 값에 따른 상이한 총 강우량을 표 16과 같이 구했다. 수심 0.5m의 한계유출량은  $95.59m^3/sec$ 이며, 이때의 돌발홍수 우량은 최초 10분 동안에 12.96mm가 발생하면 위험한 것으로 나타났으며, 침투유량 발생시간은 식 (35)에서 0.76시간(45.6분)으로 예상된다.

표 14. 하폭과 기여면적의 관계

	236	232	232	231	230	222	214	212	102	101	101	71	69	67	63	61	57	34	33
	150	145	100	130	120	110	100	95	60	80	56	50	42	55	50	50	40	25	23

표 15. 덕천강 유역의 지속시간별 유효우량( $R_e$ )

	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	$Q_d(m^3/sec)$
$R_e$ (mm)	2.08	2.58	2.93	3.22	3.47	3.70	3.90	4.10	4.29	4.46	4.63	4.80	95.59

표 16. 덕천강 유역의 지속시간에 따른 총강우량

	총강우량(BT, mm), $Y_b=0.5m$		
	$I_a=0$	$I_a=0.1S$	$I_a=0.2S$
10	12.96	19.73	26.50
20	14.55	21.32	28.09
30	15.62	22.39	29.16
40	16.46	23.22	29.99
50	17.16	23.93	30.70
60	17.77	24.54	31.31
70	18.33	25.09	31.86
80	18.83	25.60	32.37
90	19.31	26.08	32.85
100	19.75	26.52	33.29
110	20.18	26.95	33.71
120	20.58	27.35	34.12
$Q_d(m^3/sec)$	95.59		

## 5. 결 론

본 연구는 지형기후학적 단위유량도식이 산악 지역 유출량 산정에 적합함을 증명하고 돌발홍수 기준우량

료를 기준으로 지형기후학적 단위유량도식의 유출량 크기 비율이 표 11과 같이 30년 빈도만 1.16의 비율로 조금 차이가 나고 나머지는 0.1이하의 비율 차이로 매우 유사하게 나타나 지형기후학적 단위유량도식이 확률 강우량을 적용한 산악지역의 유출량 산정에 적합함을 보였다.

둘째, 실측 호우사상을 이용한 태수지점 실측 자료의 비교 결과는 표 12와 같이 지형기후학적 단위유량도식의 결과가 HEC-HMS 결과보다 모두 크게 나타났고, 1997년 호우사상을 제외하면 실측치와 근사함을 보였으며, 특히 2000년의 결과는 실측치 첨두유량이 647 m<sup>3</sup>/sec, 첨두유량 발생시간이 197hr이고, 지형기후학적 단위유량도식의 첨두유량이 703m<sup>3</sup>/sec, 첨두유량 발생시간이 191.5hr로 매우 유사하게 나타나 지형기후학적 단위유량도식이 실측 강우에 대해서도 산악지역의 유출특성을 잘 나타냄을 알았다.

셋째, 돌발홍수 기준우량은 한계수심 0.5m에서 한계 유출량은 95.59m<sup>3</sup>/sec 이었으며, 이때의 돌발홍수 우량은 최초 10분 동안에 12.96mm 가 발생하면 위험한 것으로 나타났는데 유역의 규모나 지역 여건을 고려해 보다 적절한 한계수심과 지속시간을 정하여 합리적이고 실용적인 돌발홍수 기준 설정이 가능하다.

이상의 결과에서 지형기후학적 단위유량도식이 산악 지역의 유출특성을 가장 잘 반영함을 타 모형 및 자료의 비교나 실측치의 비교로 증명하였고 덕천강 유역의 돌발홍수 기준우량 산정의 적절성을 시험하였는데, 이를 바탕으로 타 산악지역에도 보다 합리적이고 정확한 돌발홍수 기준우량의 산정이 요구된다.

## 참 고 문 헌

- 건교부 (1993). 하천시설기준. 건교부, pp 690-691.
- 김운태, 배덕효, 조천호 (2002). "돌발홍수예보를 위한 미소유역의 한계유출량 산정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제 35권 제 5호, pp. 553-561.
- 배덕효, 최지혜, 장기호 (2001). "평창강 유역의 한계 유출량 산정." **한국수자원학회 학술발표회 논문집(I)**, 한국수자원학회, pp. 286-291.
- 건교부(2001). **함안천·덕천강 하천정비기본계획(보완)**. 건교부, pp 144-160.
- Carpenter, T.M., and Georgakakos, K.P. (1993). *GIS-*

산정의 기본식으로 타당함을 덕천강 유역을 통해 시험한 것으로 위의 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 확률강우량을 이용한 지형기후학적 단위유량도식의 결과는 기존 덕천강 하천정비기본계획 보고서 자

*based Procedures in Support of Flash Flood Guidance*. IIHR Report No. 366, Iowa Institute of Hydraulic Research The University of Iowa, Iowa City, pp. 1-27.

Carpenter, T.M., Sperfslage, J.A., Georgakakos, K.p., Sweeney, T., and Fread, D.L. (1999). "National Threshold Runoff Estimation Utilizing GIS in Support of Operational Flash Flood Warning Systems." *Journal of Hydrology*, Vol. 224, pp. 21-44.

Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill, New York, NY., pp. 132-135.

Horton, R.E. (1932). "Drainage Basin Characteristics." *Trans. Amer. Geophys. Union* 13, pp. 350-361.

Gupta, V.K., and E. Waymire (1983). "On the Formulation of an Analytical Approach to Hydrologic Response and Similarity at the Basin Scale." *J. Hydrol.* 65:95-123.

Rodriguez-Iturbe, I. and J. B. Valdes. (1979). "The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1420.

Rodriguez-Iturbe, I., M. G. Sanabria, and R. L. Bras. (1982a). "A Geomorphoclimatic Theory of the Instantaneous Unit Hydrograph." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 877-886.

Rodriguez-Iturbe, I., M. G. Sanabria, and G. Camaano. (1982b). "On the Climatic Dependence of the IUH: A Rainfall-Runoff Analysis of the Nash Model and the Geomorphoclimatic Theory." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 887-903.

Shreve, R.L. (1967). "Infinite Topologically Random Channel Networks." *J. Geol.* 75:178-186.

Strahler, A.N. (1957). "Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology." *Trans. Am. Geophys. Union* 38(6), pp. 913-920.

Sweeney, T.L. (1992). *Modernized Areal Flash Flood Guidance*, NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO44.

(논문번호:03-92/접수:2003.10.23/심사완료:2004.04.29)