

# 規模問題를 考慮한 水文應答의 解析: 1. 모형이론의 유도

## Hydrologic Response Analysis Considering the Scale Problem: Part 1. Derivation of the Model

성 기 원\* · 선 우 중 호\*\*  
Seong, Kee Won · Sonu, Jungho

---

### Abstract

The objective of this study is to explore scale problem and to analyze the relations between scale and geomorphologic parameters of the rainfall-runoff model. Generally, measurement and calculation of geomorphologic parameters rely on and are sensitive to the resolution of source information available. Therefore, rainfall-runoff models using geomorphologic parameters should take account of the effects of the map scale used in their development. The derived rainfall-runoff model considering scale problem in this research is the GIUH type model, that is a basin IUH consisting of the channel network response and hillslope response. The channel network response is computed by means of the diffusion analogy transformed from linearized St. Venant equation and hillslope response is calculated by 2-parameter gamma distribution function. Representing geomorphologic structure of the channel network and initial distribution of its response is width function. This width function is derived by fractal theory and Melton's law to consider scale problems and is weighted by the source location function (SLF) proposed in this research to increase the applicability.

---

### 요 지

강우-유출모형의 유도와 적용에 고려되어야 할 規模問題를 검토하여 모형의 지형매개변수와 해상도간의 관계를 분석하고자 한다. 일반적으로 지형인자들의 측정과 계산은 주어진 정보의 해상도에 의존하며 또한 민감하다. 따라서 지형인자를 적용하는 강우-유출 모형은 분석에 이용한 해상도의 영향을 반영할 수 있어야 한다. 본 연구에서 유도된 강우-유출모형은 규모문제가 고려될 수 있는 GIUH 모형으로 이 모형은 유역의 수문응답을 하도망응답과 사면응답으로 분리하여 모의한다. 하도망응답의 계산은 선형화된 St. Venant 식으로부터 유도한 확산근사법을 이용하였고 사면응답은 2모수 gamma 분포식을 사용하였다. 하도망의 지형적 특성과 응답의 초기분포는 폭함수에 의하여 나타내어진다. 본 연구에서는 규모문제를 고려하여

---

\* 한국건설기술연구원 수자원연구실  
\*\* 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

Fractal 이론 및 Melton의 지형법칙을 이용하여 폭함수를 유도하였고 이를 유원위치함수를 이용하여 가중치를 부가하였다.

## 1. 序 論

### 1.1 研究의 背景 및 目的

본 연구에서는 규모문제의 범위를 보다 확장하여 해상도에 의존하는 수문지형인자들의 변화와 이들이 강우-유출 모형에 미치는 영향에 대하여 논하고자 한다. 수문지형인자들은 분석자료(예를 들면 지도, DEM 자료 등)의 해상도에 따라 민감하게 변화한다는 것은 주지의 사실이다. 따라서 수문지형인자들은 사용되는 해상도에 의존하지 않도록 하는 이론과 절차가 필요하다. 이에 본 연구에서는 분석해상도를 고려하여 이를 조정할 수 있는 개념적 GIUH 모형을 유도하고자 한다.

### 1.2 研究의 方法

일반적으로 행하여지는 유역분석은 작업의 편의성을 고려하여 지도의 축척을 임의로 선택하게 되는데 이로 인하여 작은 면적을 갖는 유역으로부터는 정밀하게 표시된 하도망 구조를 얻을 수 있는 반면 넓은 지역에 대해서는 재현성이 상대적으로 낮은 하도망에 의존하여 유역을 분석하게 된다. 그런데 이 과정에서 반드시 고려하여야 하는 두 가지 문제가 있다. 첫째로 측정방법에 관한 문제이다. GIUH 모형에 있어서 하도의 길이와 유역면적 등과 같은 측정값들은 유역의 지체시간에 영향을 미치는 민감한 요소이다. 따라서 이들 값에 대한 정확한 측정이 요구되는데 이때 기존의 Euclidean 방식으로 이들 측정값을 얻을 경우 지도의 해상도나 축척에 따라 차이를 보이게 된다. 이로 인한 결과는 같은 대상유역의 응답이 일관성을 잃게 한다. 따라서 폭함수, 하도길이, 하천밀도와 같은 GIUH 모형의 구성요소들은 축척의 변화에 의존하지 않아야 한다. 이에 본 연구는 하도망을 Fractal 이론을

통해 해석하는 최근의 연구를 GIUH 모형에 적용하여 축척변화에 의존하지 않는 GIUH를 유도하였다. 둘째로 연구에서 중요하게 고려해야 하는 또다른 문제는 적용대상의 규모에 관한 것이다. 이것은 동수역학적 규모(hydrodynamic scale)나 사면규모(hillslope scale)에서 유도된 정밀한 응답모형을 유역해석에 사용하는 대신 유역규모(basin scale)에서 사용할 수 있는 응답에 관한 연구를 의미한다. 이에 본 연구에서는 유역규모의 하도 추적모형으로 일반형 확산근사모형을 적용하여 해석적인 응답모형을 얻고자 하였으며 사면에서의 응답모형으로 기존의 지수분포모형보다 재현성이 높은 2모수 gamma 함수모형을 사용하였다.

## 2. 本 論

### 2.1 研究動向

Waymire와 Gupta(1983)는 새로운 개념의 GIUH를 도입하였는데 이것이 링크(link) 분류법을 바탕으로한 GIUH이다. Troutman과 Karlinger(1985)는 GIUH 모형의 폭함수(width function)를 나타내는 확률모형을 유도하여 유역의 순간단위 유량도 이론에 적용시켰으며 Mifflin(1984)은 비해석적인 폭함수를 유도하는 절차를 설명하고 지수분포와 1모수 gamma 분포의 지체시간을 갖는 GIUH 모형을 유도하였다. 또한 Mesa와 Mifflin(1986)은 하도에서의 지체시간 모형으로 확산근사방법을 사용하여 하도망응답의 개선을 유도하기도 하였다. 국내에서는 조홍제와 이상배(1990) 그리고 한성희(1991)가 Gupta 등(1980)의 GIUH 모형을 적용한 연구를 발표하였고 윤석영(1993)은 Mesa와 Mifflin(1986)의 모형을 기초로 지역화분석의 도구로서의 GIUH 모형의 가능성을 검토하기도 하였다.

## 2.2 流域構造와 GIUH 모형

링크의 연결구조에 의거한 GIUH는 평면 하도망 구조를 폭함수라는 일차원함수를 통해 표현한다. 폭함수,  $N(x)$ 는 유역의 출구로부터 유하거리가  $x$  만큼 떨어진 곳의 링크의 갯수로 정의하는데 이 폭함수는 수문곡선의 형상을 반영하는 중요한 지형함수가 된다. Gupta 등(1986) 그리고 Mesa와 Mifflin(1986)은 폭함수를 GIUH의 함수로 이용하는 포괄적인 표현을 제안하였는데 이는 다음과 같다.

$$f_n(t) = \int_0^{\infty} h(x, t) N(x) Z^{-1} dx \quad (1)$$

여기서  $f_n(t)$ 는 하도망 응답함수 즉, IUH ( $\text{sec}^{-1}$ ),  $h(x, t)$ 는 유역출구로부터  $x$ 만큼 떨어진 곳의 유입에 대한 응답함수 ( $\text{sec}^{-1}$ ),  $N(x)$ 는 폭함수이며,  $Z$ 는 폭함수의 면적 혹은 링크의 총합 혹은 총 하도망 길이이다.

사면에서 물방울 이동속도( $V_n$ )가 모든 사면에서 일정하다고 가정하고 하도에서의 이동속도( $V_n$ )도 일정하다면 유역출구에서 얻을 수 있는 수문곡선은 사면과 하도망의 응답을 회선적분함으로써 표현할 수가 있다. 즉 사면에서의 이동시간의 분포인 순간 단위유량도를  $f_n(t)$ , 하도망에서의 이동시간의 분포인 순간단위유량도를  $f_n(t)$ 라 하고 모든 사면이 하도망으로의 유출에 같은 비율로 작용한다면 유역의 순간단위유량도,  $U(t)$  또는 유역의 GIUH는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$U(t) = \int_0^t f_n(t-\tau) f_n(\tau) d\tau \quad (2)$$

## 2.3 Fractal 理論과 Horton의 地形法則

개별하도의 길이나 하도의 총길이는 유역의 도달 시간과 밀접하게 연관되어 있기 때문에 정확한 측정값이 요구된다. 그런데 하도망은 자연적인 불규

칙성을 내포하고있기 때문에 측정방법이나 길이의 절대량에 대한 논의가 있어야 한다. 이러한 측정은 Fractal 기하학과 관련이 있다. 이 개념에 의하면 물체의 기본구조는 해상도에 따른 물체의 형상을 제공하며 측정값은 지수법칙을 갖는 규칙에 의존한다는 것이다. 이와 같이 물체의 구성상태가 해상도에 무관하게 보존되는 성질을 자기상사성(self similarity)이라고 부른다. 그리고 Mandelbrot (1983)는 실수로 확장된 차원의 개념을 바탕으로 Fractal의 정의를 자기상사성이 있으며 Fractal 차원을 갖는 기하형태(geometric shape)라고 하였다. 특히 Horton의 지형법칙 등은 自己相似性의 특성을 표현하는 해상도에 무관한 인자(scaling factor)이며 따라서 Fractal 해석의 도구로 사용될 수 있다.

어떤 종류의 선(하천이나 해안선 등)의 길이를 환산길이가  $R$ 인 측정자로 선을 따라 길이를 측정할 경우 이 선의 길이는 근사적으로  $L=NR$ 이다. 여기서  $N$ 을 측정자의 사용횟수라 할 때  $R$ 이 0으로 접근함에 따라 정확한 길이로 수렴할 것이다. 즉

$$L = \lim_{R \rightarrow 0} NR \quad (3)$$

그러나 Richardson(1961)은 이와 같은 식은 대부분 수렴하지 않는데 그 이유는  $R$ 의 지수가 1이기 때문이라 하고 만일 이 지수 1대신에 실수  $d (>1)$ 라고 하는 지수를 적절히 대입하여 적용하면 식은 수렴한다고 하였다.

$$L_{exact} = NR^d \quad (4)$$

여기서 exact는 수렴값을 나타내는 첨자이다. 이 식은  $d$  값에 의하여 수렴된 값이며 Mandelbrot는 이  $d$ 를 Fractal 차원이라 하였다. 이 식으로부터 다음의 중요한 두개의 관계식을 얻어낼 수 있다.

$$N \sim R^{-d} \quad (5)$$

그리고 식 (4)와 식 (5)로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$L \sim R^{1-d} \quad (6)$$

따라서 Fractal 차원을 얻으려면 식 (6)으로부터 측정길이의 측정자의 크기의 log-log 그래프를 그린 후 직선의 기울기를 얻으면 된다. 즉 Richardson 방법이라 불리는 다음의 관계식을 사용하는 것이다.

$$\log L = \log K + (1-d)\log R \quad (7)$$

여기서 log K는 회귀분석식의 절편이다.

#### 2.4 流域面積과 主河川 流路延長과의 關係

유역의 면적(A)과 주하천 유로연장(l)의 관계는 Euclidian 차원해석에 의한 경우 다음식을 만족하여야 한다.

$$l \sim A^{1/2} \quad (8)$$

여기서 l은 주하천 유로연장이며, A는 유역면적이다. 식 (8)은 기하학적 상사성을 갖고 있는 관계를 표현한다. Mesa와 Gupta(1987)는 하도망의 구성 관계가 random 모형을 따르고 각 링크의 길이가 지수분포를 갖는다고 가정하면 식 (8)은 성립한다고 하였다. 그러나 관찰에 의하면 유역면적과 주하천유로연장간의 관계는 다음식을 따르고 있음이 확인되었다.

$$l \sim A^\theta \quad (9)$$

여기서  $\theta$ 는 지수이다.

자료분석을 통해 Mueller(1973)는  $\theta$ 의 변화의 범위를 얻어내었다. 그에 의하면 8000 mi<sup>2</sup>이내의 유역면적에 대하여  $\theta$ 는 대략 0.6이고 8000~10<sup>5</sup> mi<sup>2</sup> 사이의 유역면적에 대하여  $\theta$ 는 0.5로 급격히 떨어진다. 그리고 면적이 10<sup>5</sup>mi<sup>2</sup>보다 큰 유역면적

에 대하여  $\theta$ 는 다시 0.47로 떨어진다고 하였다. Mandelbrot(1983)는 이 문제에 대하여 측정자 해상도를 함수의 매개변수로 사용하여 하도길이에 대한 Fractal 해석을 하였다. 그 결과  $\theta > 1/2$ 라고 가정할 때 하도는  $d=2\theta$ 라는 Fractal 차원을 갖는다고 하였다. Hjelmfelt(1988)는 Richardson 방법을 이용하여 Missouri의 8개 강을 분석한 후 Fractal 차원은 1.036~1.291 사이에 있으며 평균은 1.158이라 하였다. 이것은 Mandelbrot(1983)에 의하여 가설로 제기된 Fractal 차원인 1.136과 거의 일치한다. 우리 나라의 경우 하천정비기본계획에 따라 수집된 220개의 중소하천의 유역면적과 유로연장의 자료를 분석(오규창과 이동률, 1992)하여 얻은 회귀식은 식 (10)과 같다.

$$l = 1.8553A^{0.5869} \quad (10)$$

따라서 우리나라 중소하천 유역의 유로연장의 Fractal 차원은 1.1738이며 Missouri 자료보다 약간 높다. 이것은 우리나라 하천이 굴곡이 상대적으로 심하다는 것을 의미한다.

#### 2.5 河道網의 Fractal 解析과 Horton의 法則

하도망 구조의 구성을 Strahler의 하도차수 개념을 바탕으로 정의할 경우 해상도의 변화에도 불구하고 유역구조의 자기상사성의 지속성은 여전히 유지된다(Tarboton 등, 1988). 이것은 하도망의 전체 길이는 Fractal이며 Horton의 지형법칙이 해상도에 관계없이 정확히 지켜지는 것을 의미한다. 따라서 Horton의 법칙은 해상도에 무관한 값 (scaling property)으로 간주한다. 따라서 이처럼 하도망에서는 두개의 명백한 Fractal 영역이 관측되는데 한가지는 앞 절에서 언급한 바가 있는 개개 하도들의 굴곡에 의한 영역이며 다른 하나는 하도망의 分岐특성에 의한 영역이다(Tarboton 등, 1988, 1990; La Barbera와 Rosso, 1989). 그러나 본 연구에서 이용되는 GIUH 모형의 경우 하도망의 분기특성이 폭함수를 통해 반영되어있다고 간주할 수 있으므로 하도망의 Fractal 차원과 개별 링크의 그것(d)을 구별할 필요가 없다. 따라서 이

후의 논의에서 하도망의 총길이라는 용어는 링크 길이의 총합과 같은 의미이며 서로 호환적으로 사용된다.

## 2.6 降雨-流出模型의 改善

### 2.6.1 幅函數와 Fractal

Fractal 이론을 폭함수 산정에 적용하여 규모분계를 해결하는 과정을 위해 먼저 유출구조에 기여하는 하도망이 충분히 표시되어 있는 지도를 선정한다. 이 지도에서 명확히 표시되어있는 두 지점을 선택한다. 이 두 지점사이를 求長器(curvimeter) 혹은 방안지 등을 이용하여 측정한다. 그리고 대수 방안지에 구장기의 해상도에 해당하는 길이와 두 점 사이의 거리를 차례로 도시하고 이 점들을 회귀 분석한다. 그리고 식 (6)으로부터 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$L_2 = L_1 \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{1-d} \quad (11)$$

여기서  $L_2$ 는 측정자의 크기가  $R_2$ 일 경우의 측정길이 [L]이며,  $L_1$ 은 측정자의 크기가  $R_1$ 일 경우의 측정길이 [L]이다. 따라서 식 (11)과 식 (7)을 이용하여 원하는 해상도에 해당하는 길이를 얻을 수 있다. 그런데 비록 식 (7)에 의하여 측정거리가 어떤 값에 수렴한다고 하더라도 이 값을 사용할 수는 없다. 왜냐하면  $R_2$ 을 무한히 작게 할 경우에 발생시킨  $L_2$ 값은 매우 크며 물리적인 의미도 이미 상실했기 때문이다. 따라서  $L_2$ 의 적정값을 찾아야 하는데 이 적정값은 실제 유역에서 얻을 수 있는 관련된 정보를 이용함이 타당할 것이다. Melton(1958)은 다양한 범주의 유역크기, 기후, 기복(relief), 표면상태 그리고 지질조건을 갖는 156개의 유역분석을 통하여 하도빈도와 배수밀도와와의 상관관계를 규명하였다.

$$F = 0.694D^2 \quad (12)$$

여기서  $F$ 는 하도빈도( $\text{km}^{-2}$ )이며,  $D$ 는 배수밀도( $\text{km}^{-1}$ )이다. 그런데 하도빈도의 정의는 다음과 같

다.

$$F = \sum_{\omega=1}^{\Omega} N_{\omega} / N_{\Omega} \quad (13)$$

여기서  $N_{\omega}$ 는 차 하도의 갯수이며,  $A_{\Omega}$ 는 전체 유역 면적( $\text{km}^2$ )이다. 또한 배수밀도의 정의는 다음과 같다.

$$D = \frac{Z}{A_{\Omega}} \quad (14)$$

여기서  $Z$ 는 하도망의 총길이(km)이다. 따라서 유역의 하천의 갯수와 유역의 면적을 알면 Melton의 식으로부터 총 하도길이를 얻을 수가 있다. 그런데 Melton의 법칙으로부터 Fractal 제어를 도모하려는 의도는 다음과 같은 이유와 중요성에 근거한다. 기존의 GIUH 모형은 유역내 하도망과 사면의 관찰에서 발견되는 연관성을 반영하지 못하고 있다. 이 연관성이란 하도망의 분기특성이라던지 배수밀도와 관련된 사면거리 등을 의미한다. 따라서 이러한 연관성이 반영된다면 모형해석의 신뢰성이 증가될 것이다. 이 역할을 Melton의 법칙이 담당하게 된다.

### 2.6.2 河道網 應答模型

유역 하도망의 응답모형을 구성하기 위해 먼저 비압축성 난류상태의 자유흐름을 갖는 하도에서 흐르는 물에 대한 방정식을 수립하면 다음과 같다. 횡방향유입이 없을 경우 단위폭의 하도에 적용되는 연속방정식은 식 (15)와 같다.

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} \quad (15)$$

여기서  $y$ 는 수리수심(m)이고,  $q$ 는 유량( $\text{m}^2/\text{sec}$ )이다. 그리고 운동량방정식은 식 (16)과 같다.

$$S_o - S_f = \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (16)$$

여기서  $V$ 는 유속 (m/sec),  $S_e$ 는 에너지선의 경사이며,  $S_o$ 는 바닥경사이다.

그런데 식 (16)의 마찰경사항은 Chezy 식에 의해 식 (17)로 대치할 수 있다.

$$S_e = \frac{V^2}{u_c^2 C^2 R} \quad (17)$$

여기서  $C$ 는 Chezy 계수,  $u_c$ 는 단위조정계수이며,  $R$ 은 동수반경(m)이다.

따라서 폭이 넓은 직사각형수로에 대하여 식 (16)의 각 항의 유속을 유량과 수위로 대치하고 각 관성항의 고려 유무를 표현하기 용이하도록 국부관성항에 상수  $a$ 를 이류관성항에 상수  $b$ 를 삽입한다. 이 상수들은 1 혹은 0의 값만 가능하다. 예를 들어 국부관성모형은 상수  $a$ 는 1,  $b$ 는 0을 대입함으로써 얻을 수 있다. 이 상수들을 적용하여 정리하면 식 (18)을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} & \left(1 - b \frac{q^2}{gy^3}\right) \frac{\partial y}{\partial x} + \left(b \frac{q}{gy^2}\right) \frac{\partial q}{\partial x} + \left(a \frac{1}{gy}\right) \frac{\partial q}{\partial t} \\ & - \left(a \frac{q}{gy^2}\right) \frac{\partial y}{\partial t} = S_o - \frac{q^2}{u_c^2 C^2 y^3} \end{aligned} \quad (18)$$

비선형식인 식 (18)을 선형화하기 위해 섭동법을 사용한다. 섭동요소는 유량과 수위이다.

$$q = q_o + q^* \quad (19a)$$

$$y = y_o + y^* \quad (19b)$$

여기서  $q_o$ 와  $y_o$ 는 정상동류상태의 유량 및 수위이고  $q^*$ 와  $y^*$ 는 섭동이다. 그런데 정상동류상태에서 Chezy의 계수  $C$ 는 식 (20)을 이용할 수 있다.

$$C^2 = \frac{V_o^2}{u_c y_o S_o} \quad (20)$$

식 (19)와 식 (20)을 식 (18)에 적용하고 정리하면 식 (21)을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial q^*}{\partial t} + \frac{3}{2} V_o \frac{\partial q^*}{\partial x} &= \left( \frac{V_o y_o}{2S_o} - b \frac{V_o^3}{2gS_o} \right) \frac{\partial^2 q^*}{\partial x^2} \\ &- (a+b) \left( \frac{V_o^2}{2gS_o} \right) \frac{\partial^2 q^*}{\partial x \partial t} - a \frac{V_o}{2gS_o} \frac{\partial^2 q^*}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)의 우변 두 번째 그리고 세 번째 항들의 미분항을 공간미분항으로 전환시키기 위해 식 (21)을  $x$ 와  $t$ 에 대하여 미분한 후 삼차미분 이하의 항들을 무시한다. 그리고 식 (22)와 식 (23)을 정의하여 이용한다.

$$D_w \equiv \frac{V_o y_o}{2S_o} \quad (22)$$

$$Fr \equiv \frac{V_o}{(gy_o)^{1/2}} \quad (23)$$

식 (22)와 식 (23)은 각각 수리확산계수와 Froude수이다. 이상의 관계식을 식 (21)에 적용하여 정리하면 식 (24)를 얻게된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial q^*}{\partial t} + \frac{3}{2} V_o \frac{\partial q^*}{\partial x} \\ = D_w \left[ 1 - b Fr^2 + \frac{3}{2} (a+b) Fr^2 - \frac{9}{4} a Fr^2 \right] \frac{\partial^2 q^*}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (24)$$

그런데 Ponce(1990)의 연구에 의하면 낮은 Froude수를 갖는 물의 거동에서는 비관성형모형이 이류관성모형이나, 국부관성모형보다도 관성모형에 더욱 근사하는 결과를 보인다고 밝히기도 하였다. 이 때문에 본 연구에서는 관성모형의 해석해를 하도망 추적함수로 사용하기로 하였다. 즉 추적함수의 지배방정식은 식 (25)와 같다.

$$\frac{\partial q^*}{\partial t} + \frac{3}{2} V_o \frac{\partial q^*}{\partial x} = \left(1 - \frac{1}{4} Fr^2\right) D_w \frac{\partial^2 q^*}{\partial x^2} \quad (25)$$

식 (25)를 식 (1)에 적용하기 위해서는  $q^*$ 대신  $h$ 로 치환하면 된다. 그런데 식 (25)는 단위충격입력(unit impulse)에 대한 응답함수로 식 (26)과 같은 가우스분포함수형의 해석해를 가질 수 있다.

$$h(x, t) = \frac{x}{\sqrt{4\pi\psi_2^2 t^3}} \exp\left[-\frac{(x-\psi_1 t)^2}{4\psi_2 t}\right] \quad (26)$$

여기서  $\psi_1 = \frac{3}{2}V_0$ ,  $\psi_2 = (1 - \frac{1}{4}Fr^2)D_w$ 이다.

식 (26)은 단일하도에 대한 응답함수로서 하도 망응답모형에서 이용된다.

### 2.6.3 幅函數의 改善과 流源位置函數

배수밀도는 유역내의 통수능에 관련된 개념적인 지표이다. 그리고 이 값은 수문응답의 비선형성, 유사이동 등과 밀접한 관련이 있다. 그러나 이미 배수밀도의 중요성은 Horton에 의하여 제기하여 GIUH 모형에서 사용하는 평균사면거리의 개념을 수립하였다. 즉 평균사면이동거리는 식 (27)로 나타낼 수 있다.

$$L_h = \frac{1}{2D} \quad (27)$$

여기서  $L_h$ 는 평균사면이동거리이며,  $D$ 는 배수밀도이다. 그러나 식 (27)을 이용하여 평균사면이동거리를 계산할 경우의 문제점을 검토해보기 위하여 Fig. 1을 살펴본다. Fig. 1(a)와 같은 가상유역을 GIUH 모형에 적용한다고 가정한다. 이 경우 유역의 면적은  $4a^2$ 이며 하도의 길이는  $a$ 이다. 따라서 배수밀도는  $1/4a$ 이 되며 이에 따라 평균사면이동거리는  $2a$ 이다. 따라서 GIUH 모형은 유역을 Fig.

1(b)와 같은 유역으로 취급하게 된다. 두 번째 문제는 다음과 같다. Fig. 2(a)는 어떤 가상 유역의 폭함수를 나타낸다. 그리고 Fig. 2(b)와 2(c)는 이 폭함수로부터 유도할 수 있는 무수한 하도망들 가운데 두 가지의 예를 든 것이다. 이 예는 기존의 GIUH 모형을 적용할 경우 이 하도망을 가진 유역은 면적만 같다면 같은 응답분포를 보이게 된다는 것을 의미한다. 하지만 이들간의 유출의 시간분포는 틀림없이 다를 것이다.

이와 같은 문제를 모형화 관점에서 분석할 때 전자는 GIUH 모형의 구조가 유역보다는 하도망의 형상에 의존하기 때문이고 후자는 평면 2차원적 하도망 구성특징을 1차원 함수로 제한된 표현을 하기 때문이다.

Fig. 3(a)에 나타낸 가상유역에서 평균사면도달거리는 기존의 개념을 이용할 경우 단순히  $2a$ 가 되며 유원의 역할은 없다. 그리고 사면유입은 하도의 횡방향으로 모두 유입된다고 계산한다. 그러나 실제로 유역의 상당부분의 어떤 지점에서 가장 가까운 하도망성분은 유원내지는 외부 링크이다. 따라서 유원으로 유입되는 외부사면의 유출을 고려하는 것이 타당하다. 유원으로 입력되는 응답을 모사하기 위해 유원위치함수를 설정하였다. Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이 이 함수는 출구로부터 유원까지의 거리로 표시한다. 외부 링크의 외부에 위치한 사면을 외부사면이라 하고 내부에 위치한 사면을 내부사면이라고 정의할 때 외부사면으로부터의 하

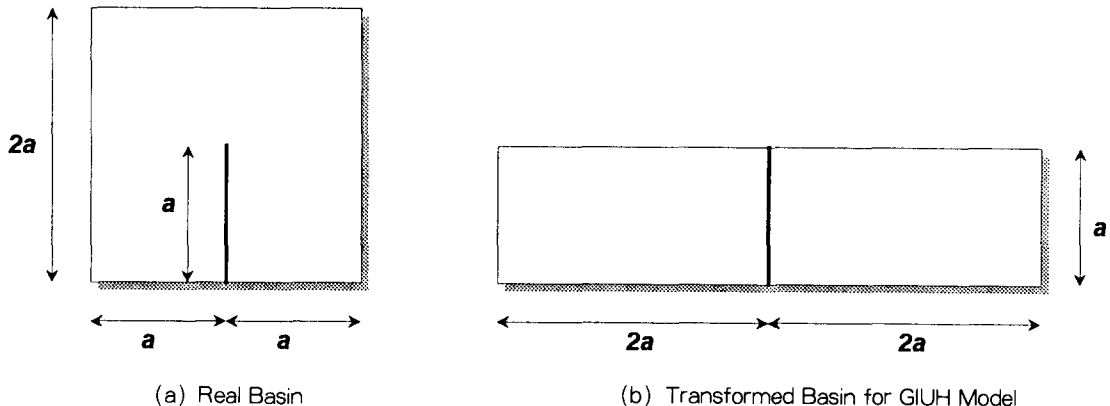


Fig. 1. Change of Basin Shape according to GIUH Modeling

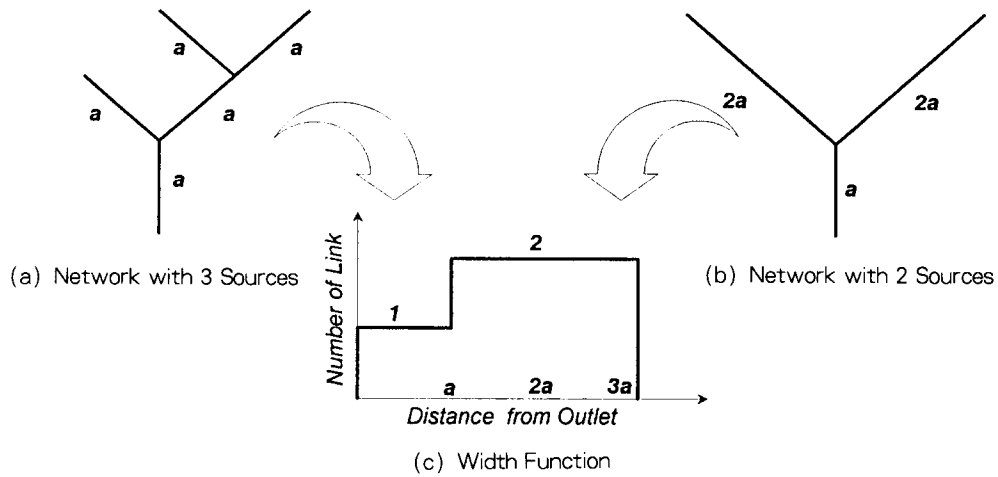


Fig. 2. Ambiguity of Presentation of Network via Width Function

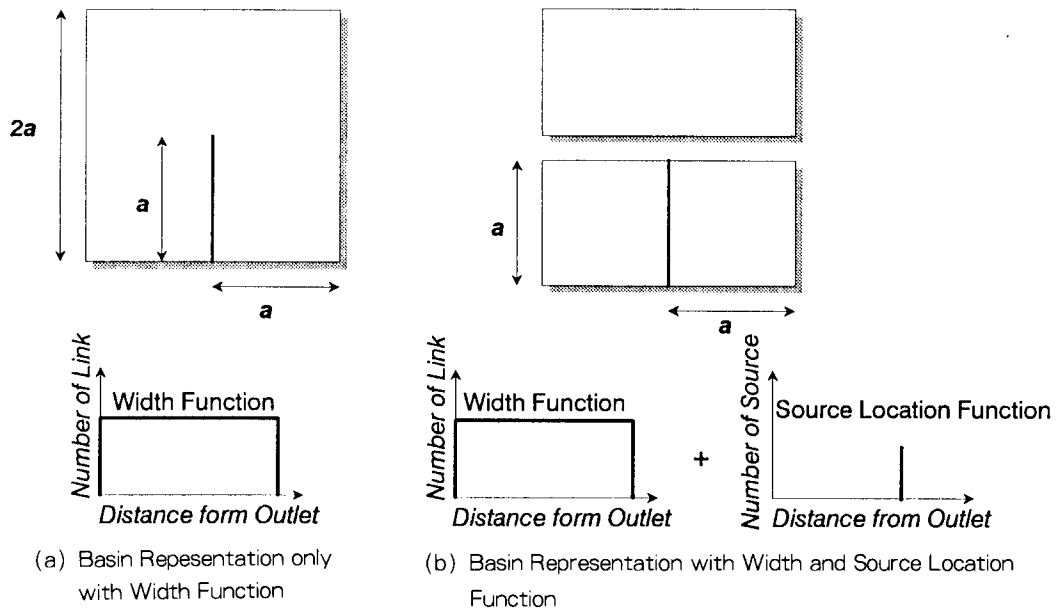


Fig. 3. Representation of Basin and Network of This Research

도망 유입은 유원위치함수로 내부사면으로부터의 하도망 유입은 폭함수로 표현하여 하도망 추적을 한다. 이 경우 유원위치함수와 폭함수의 면적의 합은 1이어야 하고 각각의 가중치는 각기 유입에 기여한 사면의 면적비로 정한다.

$$NW(x) = \pi W(x) + (1 - \pi)SLF(x) \quad (28)$$

여기서  $NW(x)$ 는 새로운 정규화된 폭함수,  $W(x)$ 는 기존의 정규화된 폭함수,  $SLF$ 는 유원위치함수이며,  $\pi$ 는 가중치(=내부사면면적/유역면적)이다. 따라서 식 (28)을 적용할 경우 기존의 폭함수 대



신에 유원의 위치와 갯수에 대하여 가중치가 부여된 폭함수를 얻게 되는 것이다.

### 2.6.4 斜面應答 模型

기존의 연구에 의하면 사면에서 하도망의 한 점으로 유입되는 유입량의 시간적 분포를 의미하는 사면의 IUH는 다양한 형태로 표현되어 왔다. Wyss(1988)와 윤석영(1993)은 지수함수형 모델을 Mifflin(1984)과 van der Tak과 Bras(1990)는 Erlang 분포를 유도한 바 있다. 따라서 이와 같은 모형에서는 매개변수 한 개에 모든 유출영향 인자가 집중되어 있다. 그런데 다양한 사면의 유출 특성을 모사하기 위해서는 유연한 형상특성을 갖고 있는 분포선택이 필요하다고 본다. 이런 관점에서 식 (29)로 나타낼 수 있는 2모수 gamma 분포모형을 사면유출모형으로 선택하였다.

$$f_h(t) = \frac{y^{-m}}{\Gamma(m)} t^{m-1} e^{-\frac{t}{y}} \quad (29)$$

여기서  $m$ 은 형상모수이고,  $1/y$ 는 규모모수이다.

## 3. 결 론

분석 해상도에 의존하지 않는 강우-유출 모형을 제시하기 위하여 유역의 자기상사성과 경험적 지형법칙을 모형구성에 도입하였다. 현 단계에서 제시 가능한 결론은 다음과 같다.

(1) Fractal 이론을 이용하면 유역의 분석 해상도를 임의로 조정할 수 있는 효과를 발생시킬 수 있다. 만일 실질적인 해상도의 증가가 저해상도 분석시 감지되지 않던 분기 하천들의 출현을 의미한다고 할지라도 본 GIUH 모형의 폭함수는 이와 같은 현상을 이미 반영하고 있다. 이는 지류 발생이 모든 하도망에 균일하게 발생한다면 폭함수의 형태는 해상도에 관계없이 일치하기 때문이다.

(2) 하도망의 분기특성을 폭함수가 나타낼 수 있기 때문에 GIUH 모형에 Fractal 이론의 적용은 타당하다.

(3) 본 연구에서는 분석 해상도의 조정을 사면

과 하천간의 연관을 표현하는 유일한 지형법칙인 Melton의 지형법칙을 이용하였다. Melton의 지형법칙은 분석해상도에 무관한 경험식이기 때문에 사면과 하도망의 차원적 연관과 물리적 연관을 적절하게 반영하지 못하는 기존의 GIUH 모형의 불합리성을 개선시키는데 효과적이라 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 오규창, 이동률 (1992). "수문모형 평가에 관한 연구." 연구보고서, 건기연92-WR-111-1, 한국건설기술연구원.
- 윤석영 (1993). "수로망응답과 사면응답을 고려한 홍수유출 해석," 박사학위논문, 충남대학교.
- 조홍제, 이상배 (1990). "하도망의 기하학적 특성을 이용한 지형학적 순간단위도 해석." 한국수문학회지, 제23권, 제1호, pp. 89-99.
- 한성희 (1991). "배수망에 의한 순간단위도 유도," 석사학위논문, 충남대학교.
- Gupta, V.K., Waymire, E., and Wang, C.T. (1980). "Representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology." *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 5, pp. 855-862.
- Gupta, V.K., Waymire, E., and Rodriguez-Iturbe, I. (1986). "On scales, gravity and network structure in basin runoff." *Scale problems in hydrology*, V. Gupta, I. Rodriguez-Iturbe, and E. Wood, eds., D. Reidel, Dordrecht, Holland, pp. 159-184.
- Hjelmfelt, A.T. (1988). "Fractals and the river length-catchment area ratio." *Water Resour. Bull.*, Vol. 24, pp. 455-459.
- La Barbera, P., and Rosso, R. (1989). "On the fractal dimension of stream networks." *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 4, pp. 735-741.
- Mandelbrot, B.B. (1983). *The fractal geometry of nature*. W.H. Freeman, New York.
- Melton, M.A. (1958). "Geometric properties of mature drainage systems and their representation in an  $E_4$  phase space." *J. Geol.*, Vol.

- 66, pp. 35-54.
- Mesa, O.J., and Mifflin, E.R. (1986). "On the relative role of hillslope and network geometry in hydrologic response." *Scale problems in hydrology*, V. Gupta, I. Rodriguez-Iturbe, and E. Wood, eds., D. Reidel, Dordrecht, Holland, pp. 1-18.
- Mesa, O.J., and Gupta, V.K. (1987). "On the main channel length-area relationship for channel networks." *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 11, pp. 2119-2122.
- Mifflin, E.R. (1984). "On the role of network geometry in basin response," Master thesis, Univ. of Mississippi.
- Mueller, J.E. (1973). "Re-evaluation of the relationship of master streams and drainage basins." Reply, *Geoi. Soc. Am. Bull.*, Vol. 84, pp. 3127-3130.
- Ponce, V.M. (1990). "Generalized diffusion wave equation with inertial effects." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 5, pp. 1099-1101.
- Richardson, L.F. (1961). "The problem of contiguity: An appendix of statistics of deadly quarrels." *Gen. Syst. Yearb.*, Vol. 6, pp. 139-187.
- Tarboton, D.G., Bras, R.L., and Rodriguez-Iturbe, I. (1988). "The fractal nature of river networks." *Water Resources Research*, Vol. 24, No. 8, pp. 1317-1322.
- Tarboton, D.G., Bras, R.L., and Rodriguez-Iturbe, I. (1990). Comment on "On the fractal dimension of stream networks," by P. La Barbera and R. Rosso, *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 9, pp. 2243-2244.
- Troutman, B.M., and Karlinger, M.R. (1985). "Unit hydrograph approximation assuming linear flow through topologically random channel network." *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 5, pp. 743-754.
- van der Tak, L.D., and Bras, R.L. (1990). "Incorporating hillslope effects into the geomorphic instantaneous unit hydrograph." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 10, pp. 2393-2400.
- Waymire, E., and Gupta, V.K. (1983). "On the formulation of an analytical approach to hydrologic response and similarity at the basin scale." *J. Hydrol.*, Vol. 65, pp. 95-123.
- Wyss, J. (1988). "Hydrologic modelling of New England river basins using radar rainfall data," M.S. thesis, MIT.

〈접수 : 1995년 4월 18일〉