

〈論 文〉

유역응답의 수문학적 유사성해석에 관한 연구(I)

A Study on the Analysis of Hydrologic Similarity
of the Catchment Response(I)

조 홍 제* 이 상 배**
Cho, Hong Je Lee, Sang Bae

Abstract

The problems of hydrologic similarity among river basins was analyzed by a geomorphologic response model using Horton's ordering scheme. The Nash model was used for deriving the geomorphologic response function, and for the optimization of the responsefunction, incomplete gamma function and Rosso's regression equation were used.

The application of this method was tested on some observed flood data of Pyungchang river basin and Wi stream basin and Bocheong stream, and predictions of hydrologic response were compared with that of the Moment method.

The results show that the proposed model and dimensionless instantaneous unit hydrograph can be used for the runoff analysis of an ungauged basin and the analysis of hydrologic similarity.

요 지

Horton의 차수법칙을 이용한 지형학적 수문응답모델로서 하천유역 상호간의 수문학적 유사성 문제를 해석하였다. 지형학적 응답함수의 구성은 Nash 모델을 이용하였으며, 응답함수의 최적화는 불완전 감미함수와 Rosso가 유도한 회귀방정식을 이용하였다.

본 방법의 적용성을 검토하기 위해 평창강 유역, 위천유역 그리고 보정천 유역에 대한 실측치를 이용하였으며, 수문응답에 대한 재현성을 모멘트법과 비교하였다.

분석결과 응답모델과 무차원 순간단위도는 미계측 유역의 유출해석이나 유역의 유사성 해석에 대해 적용할 수 있다고 판단되었다.

1. 序 論

설계수분량의 적절한 설정을 위해서는 강우 및 유출에 대한 신뢰성 있는 충분한 자료의 획득이

필요하지만, 대하천의 주요지점을 제외한 지천이나 중소하천에 있어서는 현재 운영되고 있는 강우 및 수위관측시설로 볼 때 목적에 필요한 자료의 획득이 어려운 실정이다.

* 울산대학교 공과대학 토목공학과 부교수

** 울산대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

이와같은 경우 단순히 인근유역의 관측자료나 유출해석된 결과를 인용하거나 또는 합성방법에 의존하게 되지만, 이론적 근거나 방법상의 타당성이 없는 경우 전혀 다른 결과를 부여할 수 있다.

계측 및 미계측 유역의 유출해석에 있어서 단위도나 합성단위도등의 응답특성을 알 수 있으면, 이를 인근유역이나 동일수계내의 타유역에 적용시킬 수 있다. 이와같은 경우 유역상호간에 수문학적 상사성이 있어야 그 적용성이 높게 되며 이론적 타당성이 있다. 비록 동일수계라 하더라도 상하류에 따라 토지이용도, 식생, 토양종류, 유역형상, 하천수계 조직방등의 공간적 변동성에 의해서 응답 특성이 다를 수 있다. 또 공간적 변동성이 유사하더라도 호우사상의 비상사성이나 선행강우조건 즉, 유출조건등에 의해 유역의 수문응답 또한 다양하게 발생할 수 있다.

홍수빈도해석이나 응답함수해석등에 필요한 평균면적우량등은 지점강우통계치에 근거를 둔 전유역면적에 대해 균일한 강우로 이용하고 있으나, 통계적 수법을 통한 기후학적 상사성 해석이 선행되어야 한다. 지점강우통계치에 근거를 둔 평균면적우량을 사용하여 강우와 유역특성이 홍수빈도분포에 미치는 영향이나 상관관계를 구명코자 하는 경우 그 결과의 모순점이 클 것이며, 또 상기 연구성과를 이용하여 지역내의 홍수빈도분포에 대한 비동질성을 조사하는 경우, 인자들이 너무 많아서 유역 및 기후안자 그리고 홍수빈도분포인자간의 상관관계를 해석하기가 어렵다. 특히 면적의 크기가 다른 유역이 포함된 비교해석의 경우는 더욱 어렵다. 따라서 홍수빈도해석, 강우-유출응답해석을 위해서는 면적강우에 대한 상사성 해석이 우선적으로 이루어 져야 하며, 지수분포나 감마분포등 확률 밀도함수를 이용한 통계적 수법으로 해결할 수 있다.

반면에 유역상호간의 수문학적 상사성을 판단하기 위해서는 강우강도의 공간적 변동이나 사면과 토양특성등 유출조건에 대한 상사성도 있어야

하겠으나, 무엇보다 강우사상에 대한 유출응답특성의 상사성 해석이 주된 내용이 된다. 예로서, 동일한 충격응답함수를 가진 유역은 유효강우에 대한 수문응답이 같다고 가정할 때, 임의 두유역의 순간단위도가 관측치로 부터 유도되었거나 GIUH와 같은 지형학적 특성으로 부터 유도되었거나 또는 Nash모델과 같은 개념적 모델등으로 유도되었거나 상관없이 동일한 순간단위도를 가진 두 유역은 상사성이 있다고 정의할 수 있다.

유역상호간의 수문학적 상사성(Hydrologic Similarity)에 관한 국내외 연구는 매우 희소한 실정이다. 수문학적 상사성을 논하기 위해서는 기후조건, 유역의 시공간적 변동성 그리고 유역 유출응답특성등에 대한 상사성의 검토가 이루어 져야 한다.

기후조건을 대표특성인 강우사상에 대한 모델화가 Eagleson¹⁾에 의해 시도되어 (Chan and Bras²⁾, Hino³⁾, Rodríguez-Itrube et al.⁴⁾, Hebson and Wood⁵⁾, Beven⁶⁾ 등에 의해 활발히 연구되어 왔다.

기후학적 상사성에 기초한 홍수빈도 분포특성에 대한 연구가 Matalas et al.⁷⁾, Reich⁸⁾ 등에 의해 시도되었으며, Eagleson¹⁾이 지수분포로 가정된 강우입력에 대해 V형상의 유출단면으로부터 운동학모델로 유도하였고, Hebson and Wood⁵⁾는 지수분포로 가정된 강우입력에 대해 지형학적 순간단위도 모델로서 유역응답을 구성하였으며, Hebson and Wood⁵⁾는 감마분포로 가정된 강우입력을 이용 지질기후학적 인자로서 무차원 홍수빈도 수문응답함수를 유도한 바 있다.

하천유역의 유출응답특성에 대한 상사성 해석의 기초는 Rodríguez-Itrube et al.⁴⁾이 지표면 유출에 대한 유역 수문응답의 모델화를 정량적 지형법칙과 수문학적 동적특성을 결합시키는 첫 시도로 제안된 지형학적 순간단위도 유도에서 침투유량과 도달시간의 곱인 무차원 상수를 유역상호간의 상사성 판단기준으로 사용할 수 있음을 제안한 바 있다. 지형학적 순간단위도 이론은 유역

특성인자를 유역수문응답의 변수로 포함으로서 강우유출에 대한 수문응답과정을 비교적 잘 표현하는 수단으로 인정되고 있으나, 유역상호간의 수문학적 상사성해석에 직접 적용된 것은 Wang et al.¹⁾, Hebson and Wood²⁾, Sivapalan et al.³⁾, Beven et al.⁴⁾ 등 최근의 일이다.

지난 십여년간 연구된 지형학적 순간단위도 이론은 강우의 유역내 평균대기시간을 Horton—Strahler 차수법칙으로 나타낸 방법과 Shreve의 Link분류법으로 나타낸 방법으로 대별된다. 전자의 방법은 Rodríguez—Itrube⁵⁾, Wang et al.⁶⁾, Cheng, Rosso⁷⁾, Caroni et al.⁸⁾, Carradini et al.⁹⁾, Diax-Granados et al.¹⁰⁾, Beven et al.¹¹⁾ 등의 연구가 있으며, 후자의 방법은 Waymire et al.¹²⁾ 이 Rodríguez—Itrube et al.이 제안한 GIUH는 Horton-Strahler의 차수법칙의 부적합성에 의해 적용이 낮다고 지적하고, Shreve의 link 분류법에 의한 GIUH 이론의 타당성을 설명하여 장래 GIUH 해석의 주된 해석기법으로 제시하였으며, Troutman et al.¹³⁾, Mesa et al.¹⁴⁾, Gupta et al.¹⁵⁾ 등의 연구가 있다.

유역의 시공간적 변동성에 대한 연구는 많은 기법으로 연구되었으며 Dunne¹⁶⁾, Freeze¹⁷⁾ 등에 의해 방법론이 정리된 바 있다. 사면형태, 토양 및 강우의 변동성의 상호관계를 이용한 사면이나 유역단위의 개념모델에 대한 연구가 Beven and Kirby¹⁸⁾에 시도 되었으며, 침윤지역의 변동성을 고려한 지형지수법을 제안하였다. Smith et al.¹⁹⁾은 지하수위와 지형형태를 인자로 한 유출모델을 그리고 Beven²⁰⁾은 최근 Sivapalan et al.³⁾은 유역형태, 강우의 공간적 변동성 및 토양특성의 상호관계를 이용한 무차원화된 개념적 유출모델을 연구한 바 있다.

국내 연구에 있어서 유역상호간의 유출응답특성에 대한 수문학적 상사성 연구는 전무하지만, 본 연구에서 이용하고자 하는 수문응답함수인 GIUH이론에 대한 연구는 조홍제²¹⁾, 이순탁²²⁾, 이정식²³⁾, 전민우²⁴⁾, 조홍제, 이상배²⁵⁾ 등의 연

구가 있다.

이와같은 관점에서 본 연구는 유역의 공간적 변동특성과 강우사상의 공간적변동성 및 수문응답에 대한 상관관계를 이용하여 유역상호간의 수문학적 상사성을 판단할 수 있는 이론적 근거나 방법을 제시하고자 하는데 주된 목적을 두었다.

2. 이론적 배경

2.1 지형학적 순간단위도(Geomorphologic IUH)와 Nash모델과의 관계

자연상태의 모든 하천유역은 수문기상학적 인자 및 지질학적 인자에 의해 형태학적 특성을 달리할 뿐만 아니라 강우에 대한 수문응답특성 또한 다양하게 발생한다. 유출은 강우에 대한 유역의 반응이라 할 수 있는데 강우가 유역에 발생하면 지형학적 요소들로 구성된 복잡한 유역시스템을 통과하면서 시간에 따라 다양하게 발생한다.

유역상호간의 수문학적 상사성 해석을 하기 위해서는 기후조건, 유역의 공간적 변동성, 유역유출응답특성등 주요 인자에 대한 검토가 필요하다.

유역응답의 상사성 해석에 있어서 기후학적 상사성이 있는 호우가 발생하더라도 공간적 지형인자 및 수문학적 인자의 변동성에 의해 수문응답이 다양하게 발생하므로 유역응답의 상사성 여부를 정의할 수 있는 판단기준이 먼저 설정되어야 한다. 유역응답은 강우사상이 유역에 발생할 때 유역내의 모든 공간적 변동성이나 수문학적 인자의 특성이 반영되어 나타나는 최종결과이므로 동일한 충격응답함수를 가진 유역은 유효강우에 대한 수문응답이 같다고 가정할 때, 순간단위도 유도기법에 관계없이 동일한 순간단위도를 가진 임의의 두유역은 상사성이 있다고 정의할 수 있다.

수문곡선의 해석은 순간단위도인 핵함수에 대한 적절한 표현기법이 주된 내용이 된다.

핵함수 결정방법에는 집중정수모델 및 분포정수모델등으로 대별되는 여러가지가 있으며 본 연

구에서는 Rodriguèz-Itrube(1979)등이 제안하여 Agnese et al.(1988)에 이르기 까지 많은 연구가 진행중에 있는 GIUH의 응답모델을 이용코자 한다.

지형학적 순간단위도란 유역내에 내린 강우가 도달하는 동안 유역내에 머무르는 시간 즉, 유역 응답을 지형인자, 지형법칙 및 동적특성으로 표현한 것으로 개념적 모델화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} GIUH &= f(\text{Basin Geomorphology, Channel Dynamics}) \\ &= f(\text{Horton Order Ratio, Holding Time}) \\ &= f(\text{Shreve Link Separation, Holding Time}) \end{aligned} \quad (1)$$

따라서 GIUH는 무작위로 선택된 경우 입자가 출구에 도달하는 시간의 확률밀도함수로 정의되며, 지형인자나 지형법칙의 인자를 변수로 포함한다.

본 연구에서는 응답의 상사해석에 주된관심을 두었으며 유역의 수문학적 응답해법인 GIUH 해석은 Nash모델을 이용하였다.

유역에 대한 강우의 유출현상은 이러한 각각의 인자에 대해 다양한 응답특성을 나타낸다. 수문학적 선형계에 있어서 강우-유출관계는 단위충격함수를 이용하면 아래와 같은 회귀적분함수로 표현된다.

$$Q(t) = \int_0^t h(t-\tau) i(\tau) d\tau \quad (2)$$

여기서 $h(t)$ = 핵함수로 순간단위도

$i(t)$ = 유효우량

$Q(t)$ = 직접유출량

유역의 수문응답인 순간단위도는 유역전반에 균등하게 내린 순간적 단위유효우량이 유역출구에 도달하는 시간의 분포함수로서 설명되어 진다.

자연하천에서의 강우-유출현상을 해석하기

위해서는 핵함수 $h(t)$ 의 적절한 표현기법이 주된 내용이 되며 핵함수의 결정방법에는 집중정수모델 및 분포정수모델등으로 대별되는 여러가지가 있다. 집중정수모델 방법으로는 가장 일반화되어 있는 n 개의 선형저수지 모델이 있으며, lumped system, linearity, time invariant의 3가지 가정하에 식(2)와 같은 2변수 감마 확률밀도함수로 정의되는 Nash모델이다.

$$h(t) = [1/k \Gamma(n)] (t/k)^{n-1} \text{EXP}(-t/k), t > 0 \quad (3)$$

여기서, n = 형상계수

k = 저유계수

하천유역의 다양한 형태나 구성인자들은 몇가지의 분류된 지형학적 법칙에 의해 설명될 수 있다. Rodriguèz-Itrube등은 분류된 지형법칙으로 표현된 유역의 지형학적 특성이 변수로 포함된 순간단위도를 유역의 순간적 단위유효우량이 유역출구에 도달하는 시간의 분포함수로서 설명하였다.

유역에 내린 강우가 출구에 도달하는 동안 유역내에 머무르는 시간(Holding Time)은 유역의 강우에 대한 수문응답으로서 순간단위도를 의미한다. 이는 사면과 하천유로를 통과하는 강우입자의 유출속도로서 정의될 수 있으며, 유출속도는 사면 및 하천유로의 경사, 길이, 단면적, 조도계수등의 물리적 인자에 의해 변화하고, Strahler의 차수법칙에 따라 하천을 분류할 때 하천차수의 증가에 따라서도 유속이 변한다. Rodriguèz-Itrube 등은 강위입자가 i 차 하천에서 머무르는 시간 즉, 수문응답이 차수분포를 따른다고 가정하였다. Fig.1은 3차 하천유역의 개념적 모델을 나타낸다. 강우입자가 1차, 2차 또는 3차 하천유역의 해당면적 크기내에 강우가 내릴때, 우수입자는 하천유로를 통하여 출구에 도달하게 된다. Fig.1에서 $p_{ij}(i < j; i, j = 1, 2, \dots, \Omega; \Omega$: Ω 는 하천차수)란 i 차 유역에 내린 강우입자가 j 차 유역에 유입하는 과정을 나타내는 전이확률을 의미한다.

Rodriguèz-Itrube 등은 식(1)으로 표현되는 개념적 모델을 Fig. 1과 같은 3차 하천에 적용시켜, 지형인자 및 동적인자가 고려된 GIUH의 주된 특성인 침투유량 q_p 와 도달시간 t_p 에 대한 회귀관계식 식(4), (5)를 유도하였다.

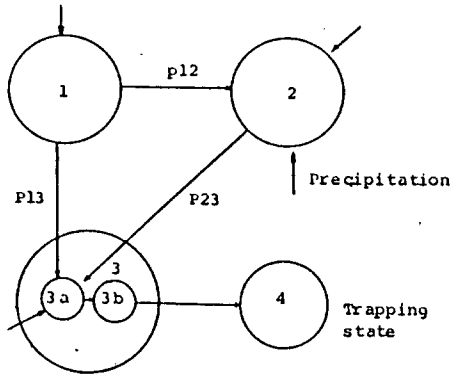


Fig. 1 Representation of a third-order Basin as a Continuous Markovian Process

$$q_p = 0.364 R_L^{-1} V L^{-1} \quad (4)$$

$$t_p = 1.584 (R_H/R_A)^{-1} R_L^{-1} V^{-1} L \quad (5)$$

침투유량을 나타내는 식(4)와 도달시간을 나타내는 식(5)의 곱인 식(6)과 같이 동적인자 V 와 무관한 지형인자만의 함수로 나타낼 수 있다.

$$G_* = q_p \cdot t_p = 0.58 (R_H/R_A)^{-1} R_L^{-2} \quad (6)$$

침투유량과 도달시간에 주안점을 둔 수문응답 해석에 있어, 식(2)와 같은 Nash모형을 지형학적 합성으로 표현하기 위해서는 형상계수 n 와 자유계수 k 에 대한 관계식이 필요하다.

$$q_p = \frac{(n-1)^{n-1}}{k \Gamma(n)} \exp(n-1) \quad (7)$$

$$t_p = k(n-1) \quad (8)$$

침투유량 q_p 와 도달시간 t_p 의 곱인 부차원 함수는 식(9)와 같이 나타내어 진다.

$$H_* = q_p \cdot t_p = (n-1)^n \exp(1-n) / \Gamma(n) \quad (9)$$

Rosso¹¹는 침투유량과 도달시간의 곱인 부차원 함수 식(6)과 식(9)를 식(10)과 같이 가정하여

$$G_* = H_* \quad (10)$$

형상계수 n 을 식(11)과 같이 나타내었다.

$$(n-1)^n \exp(1-n) / \Gamma(n) = 0.58 (R_H/R_A)^{-1} R_L^{-2} \quad (11)$$

식(11)에 대해서 R_H , R_A , R_L 이 각각 $3 < R_H < 5$, $3 < R_A < 6$, $1.5 < R_L < 3.5$ 범위에서 변하는 독립변수로 n 을 종속변수로 취급하여 모의발생시킨 126개 조합에 대해 회귀분석을 실시하여 식(12)와 같이 나타내었다.

$$n = 3.29 (R_H/R_A)^{-0.1} R_L^{-0.1} \quad (12)$$

식(12)를 식(7)에 대입하면 자유계수 k 는 식(13)과 같이 된다.

$$k = 0.7 [R_A / (R_H \cdot R_L)]^{-0.1} V^{-1} L \quad (13)$$

실제유역에 대한 적용에 있어서, 유역의 지형 특성을 Horton의 지형법칙으로 정의할 때 Nash모형로 정의되는 순간단위도의 형상계수 n 는 식(12)에 의해 일정하게 나타난다. 반면에 식(13)으로 표현되는 자유계수 k 는 동적인자인 V 항을 포함하고 있어 간단히 정의하기 어려우며, 유출속도를 수치적으로 표현할 수 있는 적절한 수단이 선택되면 자유계수 k 를 결정할 수 있다.

Rodriguèz-Itrube 등이 처음 GIUH 이론을 제시했을 때, 각 차수별 하천에 대해 평균속도로서 전유역에 일정하게 가정한 바 있으며 Bras et al.¹²은 Pilgrim이 실측을 통해 제안한 최대유속으로서 일정하게, Agnese et al.¹³은 유효유출속도 등으로 해석한 바 있으나, 실제유역에 대해 적용성이 있는 수치적 수단을 제시하지는 못하였다.

2.2 최적해법에 의한 순간단위도의 매개변수 결정

실제유역에 있어서 관측된 호우사상이나 유출

자료로부터 강우-유출의 수문응답을 해석하는 방법으로는 강우-유출현상을 선형-시불변 집중정수계로 취급하거나, 호우 및 유출특성에 따라 변하지는 않지만 계절적으로 또는 선형함수조건에 따라 각 호우사상별 수문응답의 시변수가 변하는 선형-시변 집중정수계로 취급하는 방법, 그리고 강우강도나 유출속도등 호우 및 유출특성의 변화를 고려하여 강우-유출현상을 비선형-시변 집중정수계로 취급하는 방법등이 있다.

전절에서 논한바와 같이 Nash모델로 정의한 수문응답함수의 매개변수를 결정하기 위해 강우-유출현상을 선형적으로 가정하면 형상계수 n은 식(12)에 의해 유역별로 일정한 값을 가진다. 반면에 저유계수 k는 식(13)에서 보이는 바와 같이 동적인자 V가 포함되어 있는 관계로 단순하게 결정될 수 없다.

수문응답해석 방법에 따라 k를 거의 일정한 상수로 간주하거나, 호우 및 유출 특성에는 무관하지만 계절성이나 선형 토양함수 조건에 따라 변하는 변수로, 또는 호우 유출특성에 따라 변하는 변수로 취급하여 해석할 수 있다.

Rao et al.은 저유계수 k를 유역면적, 도시화 비율, 유효우량 및 강우지속 시간등의 회귀함수로 나타내었으며, Dooge는 k를 유역면적, 주하천유로연장 그리고 주하천경사의 회귀함수로 표현하였다. 또 침투시간, 침투유량, 모멘트 등의 인자로서 회귀분석한 경험 공식등이 있다. 최근에는 Rodríguez-Itrube et al.은 삼각형 단위도로서, Sukekawa 등¹⁰⁾은 사다리꼴 단위도로서 간단한 저유계수 결정법을 제시한 바 있다. 여기서 주목할 것은 저유계수를 결정짓는 유출속도 V를 정의할 적절한 수치적 수단이 없으므로 비교적 표현이 용의하고 타당성있는 물리적 특성인자나 지형인자로서 저유계수를 나타내고자 한 점이다.

이와같은 관점에 있어서, 불완전 감마함수를 이용한 최소자승법을 사용하면 Nash모델로 정의되는 순간단위도의 매개변수 k의 최적해를 결정할 수 있다. 조등¹¹⁾에 따르면 이는 강우-유출에

대한 수문응답의 재현성이 뛰어난 결과를 준다고 알려져 있으며 본 연구에서도 이 방법을 이용하였다.

최소자승법에 대한 목적함수는 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \sum \epsilon_i^2 \tag{14}$$

여기서 $\epsilon_i = q_i - \hat{q}_i$

q_i = 관측된 직집유출량

\hat{q}_i = 모의발생시킨 직집유출량

임의 시간간격 ΔT 동안 강우강도가 일정하다고 가정하면

$$\hat{q}_i = \sum (r_i / \Delta T) U_{i-1+i} \tag{15}$$

여기서 r_i 는 i번째 유효 강우량이고, U 는 finite duration unit hydrograph로서 식(16)과 같이 쓸 수 있다.

$$U_{i-1+i} = I_{i-1+i} - I_{i-1} \tag{16}$$

여기서 I_m 은 불완전 감마함수(incomplete gamma function)이며 다음과 같이 정의된다.

$$I_m = \int_0^m \frac{1}{\Gamma(n)} t^{n-1} e^{-t} \exp(-t) dt \tag{17}$$

n는 Rosso¹²⁾가 모의발생자료에 의해 회귀분석한 결과인 식(13)을 이용하고, 식(14)의 S를 최소화하는 규모계수 k를 구하기 위해 $dS/dk = 0$ 으로 둘 수 있다. 즉,

$$2 \sum \epsilon_i d \epsilon_i / dk = 0 \tag{18}$$

여기서

$$\begin{aligned} d \epsilon_i &= -d \hat{q}_i / dk \\ &= \sum (r_i / \Delta T) d U_{i-1+i} / dk \\ &= \sum_i (r_i / \Delta T) (d I_{i-1+i} / dk - d I_{i-1} / dk) \end{aligned}$$

또

$$\begin{aligned} H_m &= d I_m / dk \\ &= \int_0^m \frac{1}{\Gamma(n)} t^{n-1} e^{-t} \exp(-t) dt \\ &= - \int_0^m \frac{1}{\Gamma(n)} (m \Delta T / k) \exp(-m \Delta T / k) \end{aligned} \tag{19}$$

따라서

$$d \epsilon / d k = - \sum (r_i / \Delta T) (H_{i+1} - H_i) \quad (20)$$

식(20)를 식(18)에 대입하면 자유계수 k에 대한 최적해를 구할 수 있다. Nash 등은 모의발생된 직접유출수분곡선의 관측된 직접유출수분곡선에 대한 재현정도를 나타내는 효율계수 E (Coefficient of Efficiency)를 구하는 관계식을 다음과 같이 제안하였으며 이를 인용하였다.

$$E = 1 - \sum (q_i - \bar{q}_i) / \sum (q_i + \bar{q}_i) \quad (21)$$

여기서 \bar{q}_i : 평균 관측직접유출량

3. 실제유역에 대한 적용성 검토

3.1 강우·유출자료

지형학적 수문응답 함수의 적용성을 검토하기 위한 수치예를 위하여 국제수문개발 대표시험유역인 한강수계의 평창강 유역과 낙동강 수계의 위천유역 그리고 금강수계의 보청천 유역을 대상 유역으로 선정하였다. 강우량 및 유출량 자료에 있어서 적용대상유역으로 선정한 평창강유역과 위천유역 그리고 보청천 유역은 1982년부터 관측이 실시되었으며 1984~1988 IHP보고서¹⁾에 수록된 자료의 신뢰성을 인정하고 사용하였다.

3.2 대상유역의 지형학적 특성

평창강 대표유역은 유역면적이 523.114km², 최상 유로연장이 51.85km인 유역으로서 수위관측지점에 따라 이북정, 장평, 백옥포, 하반정, 상안미 및 방립등 6개의 소유역으로 나누어져 있다.

위천 대표유역은 유역면적이 472.534km², 최상 유로연장이 42.83km인 유역으로서 수위관측지점에 따라 동곡, 고노, 미성, 병천, 무성 및 효령등 6개의 소유역으로 나누어져 있다.

보청천 대표유역은 유역면적이 475.63km², 최상 유로연장이 51.75km인 유역으로서 수위 관측지점에 따라 산계, 기대, 탄부, 이평 및 산성등 5개의 소유역으로 나누어져 있다.

연구대상의 지형학적 인자를 분석하기 위하여 1/50,000 지형도를 사용하였으며, Strahler 하천차수법칙에 의한 Horton의 지형법칙 분석결과²⁾는 [표 1]과 같다.

표 1 Horton의 지형법칙 분석표

구분 유역	분기비 R _B	유역면적비 R _A	유로연장비 R _L	하천차수 Ω	
평창강	방립	4.47	5.26	2.63	5
	하반정	4.09	5.00	2.17	4
	상안미	4.24	5.00	2.56	5
	백옥포	3.27	3.85	1.82	5
	장평	4.65	5.56	2.94	4
	이북정	3.88	4.55	2.38	4
위천	무성	4.88	4.72	2.18	5
	병천	4.46	5.17	2.07	5
	미성	4.05	4.67	1.27	5
	고노	4.57	5.39	2.56	4
	동곡	3.05	3.70	1.62	4
	효령	5.40	6.58	2.72	4
보청천	산계	3.40	3.77	1.88	6
	기대	3.13	3.47	1.14	6
	탄부	4.17	5.02	2.31	4
	이평	3.49	4.14	2.39	4
	산성	3.79	4.67	2.10	4

[표 1]의 결과중 위천 및 평창강 유역은 인용하였다. [표 1]에서 보이는 바와 같이 분석대상 유역의 R_B, R_A, R_L의 값이 식(12), 식(13) 등 기본 이론식 유도에 사용된 범위내에 있으므로 이 식들은 분석없이 사용할 수 있다.

3.3 관측치와 계산치의 비교분석

직접 유출 수분곡선에 대한 재현성을 검토하기 위해 식(1)을 각 소유역에 대해 적용하였다.

최적해법의 적용성은 조동³⁾의 연구에서 평창강 및 위천 유역에 대해 검토된 바 있으며, 수분곡선의 재현성이 우수하다고 알려져 있다. 본 연구에서는 보청천의 자료를 추가적으로 분석하여 제시하였으며 비교적 단일 수분곡선의 재현성이 높다고 인정되고 있는 모멘트 법을 사용하여 모의발생시키고 계산치와 비교하기 위해 Fig 2에

도시하였다. 분석자료에 대한 결과의 비교는 [표 2]와 같다. 여기서 최대오차 및 최소오차는 각 유역의 분석자료중 첨두유량 q_p 와 도달시간 t_p 및 수문곡선 재현정도 E의 계산치 및 실측치에 대한 최대 및 최소오차를 의미하며, 평균 오차는 전체자료의 평균적인 오차를 나타낸다.

보정전의 경우최소자승법에 의한 직접유출 수문곡선의 재현에 있어서, 첨두유량의 최대오차가 산성유역이 14.7%로서 가장 작고 산계 소유역이 15.4%로서 가장 크다. 도달시간은 산계 소유역이 10%로서 가장 작고 탄부 소유역이 166.1%로서 가장 크다. 그리고 수문곡선의 재현정도를 나타내는 E의 최대오차는 33.5%에서 66.6%까지 보였다. 반면에 첨두유량 및 도달시간의 최소오차는 기대 소유역의 한 경우사상에 대한 15.1%를 보이는 것 외에 모두 10.0% 이하로서 아주 좋은 결과를 나타낸다. 수문곡선의 재현정도인 E의 최소값은 4.6%에서 22%까지 보이나, 효율계수 E의 값이 전체 수문곡선의 재현성을 나타내는 것을 감안하면 높은 정도를 나타내는 것으로 사료된다. 평균적으로 첨두유량이 약 14%, 도달시간이 약 30%, 수문곡선 재현성이 약 30% 정도의 오차를 보인다. 모멘트법에 비해서는 높은 정도를 나타내지만 실측치에 대한 재현성으로는 정도가 다소 비흡하다고 하겠다. 그러나, 단순히 첨두유량이나 도달시간만이 비교가 아니라 전체 수문곡선의 재현성을 검토한 관점에서 보면 본 방법의 우수성이 인정된다.

조등¹⁾의 연구에 따르면, 평창강은 평균적으로 첨두유량 약 20%, 도달시간이 10%, 수문곡선의

재현성이 약 20% 정도를 보이며, 위천의 경우 첨두유량이 약 15%, 도달시간이 7%, 수문곡선의 재현성이 약 10% 정도의 오차를 나타낸다. 그러나 평창강의 분석자료중 약 절반은 유출시간이 100시간 넘는 복합수문곡선임을 감안하면 본 최적해법의 우수성이 인정된다.

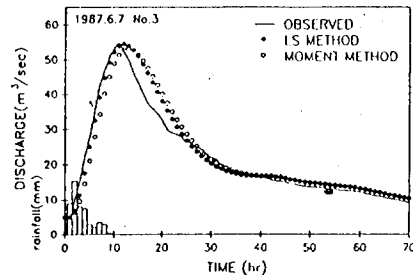


Fig. 2 Comparison between observed and two simulated hydrographs by the Nash model estimated by the methods of moments and least square for event of JUN 7, 1987 on the TANBU station of BOOHEONG stream.

3.4 수문응답 모델의 민간도해석

전절에서 본한 기본 이론은 수문응답함수를 Nash모델로 가정할 때 매개변수 n 및 k의 결정방법에 주안점이 있다. 형상계수 n은 식(12)에서 지형인자로서 결정되며, 지유계수 k는 식(17)의 최적해에 의해 결정된다. 선택되는 n과 k의 값에 따라 수문곡선의 주요특성인 첨두유량 q_p 와 도달시간 t_p 와 재현성과 수문곡선의 재현정도 E의 값이 좌우된다.

최소자승법에 의한 매개변수의 결정에 따른 수문응답의 변화정도를 검토하였다. 실측치에 대한 분석으로 선택된 최적해 k에 대해 $\pm 20\%$ 의 인위적 오차를 발생시켜 첨두유량, 도달시간 및 수문

표 2 관측치에 대한 각 방법별 오차

구분 유역	최소자승법						모멘트법											
	최대오차(%)			최소오차(%)			평균오차(%)			최대오차(%)			최소오차(%)			평균오차(%)		
	Q_p	t	E	Q_p	t	E	Q_p	t	E	Q_p	t	E	Q_p	t	E	Q_p	t	E
산계	45.1	10.0	33.5	10.1	5.0	16.0	25.8	7.7	20.5	47.2	15.0	74.8	31.8	33.3	38.5	39.2	38.3	47.9
기대	22.3	12.9	60.1	8.9	15.4	22.0	14.1	27.8	38.5	25.5	57.1	77.5	3.8	30.8	37.8	18.5	41.0	59.2
탄부	31.8	166.1	66.6	0.3	8.3	6.0	9.2	18.1	28.0	39.0	133.3	104.2	4.2	18.2	11.5	16.3	55.4	12.6
이령	35.1	41.7	44.0	2.2	10.0	6.7	12.1	19.2	22.8	19.3	50.0	13.4	0.7	19.3	36.8	7.5	33.8	34.4
산성	11.7	88.9	71.6	1.1	0.0	4.6	7.0	36.3	27.8	31.0	111.1	81.2	0.8	20.0	54.9	12.5	53.7	57.7

표 3 매개변수 k 및 n의 변화에 따른 수분응답 특성치($\Delta Q_p, \Delta t_p, \Delta E$), 평균변화율(%)

구역	구분	k												n					
		-20%			-10%			+10%			+20%			-10%			+10%		
		ΔQ_p	Δt_p	ΔE	ΔQ_p	Δt_p	ΔE	ΔQ_p	Δt_p	ΔE	ΔQ_p	Δt_p	ΔE	ΔQ_p	Δt_p	ΔE	ΔQ_p	Δt_p	ΔE
평 창 장	방 립	17.7	4.7	22.7	8.2	0.3	7.9	6.9	6.5	2.5	13.3	8.6	4.7	4.8	7.9	10.6	10.2	11.9	10.4
	하반성	21.2	8.1	15.9	9.5	3.7	3.8	8.1	4.4	9.2	14.6	10.4	16.3	9.7	10.9	8.6	5.3	4.2	8.0
	상안미	18.9	5.0	7.9	8.8	1.7	1.6	6.7	5.8	4.3	14.1	7.9	9.7	6.2	2.6	3.0	8.2	6.5	3.5
	백옥포	18.4	9.7	10.2	8.8	4.4	2.7	7.2	2.9	3.4	13.8	7.9	7.9	11.0	9.2	5.9	4.9	2.9	1.8
	상 평	19.3	8.8	18.6	8.8	4.4	2.7	7.9	4.6	4.4	14.5	10.7	8.8	6.7	6.5	6.5	5.8	8.4	4.9
위 천	어목정	18.6	7.6	6.2	8.4	4.0	1.8	7.7	7.6	6.8	14.0	7.6	13.2	5.6	7.2	7.2	4.9	7.6	3.6
	무 성	18.0	11.4	15.8	8.6	4.9	6.6	6.5	11.4	6.1	12.5	11.5	10.7	5.6	7.1	6.8	3.9	5.5	2.5
	병 천	18.8	4.1	10.3	10.8	4.5	4.7	6.8	2.1	6.9	10.2	6.2	10.7	6.0	6.4	4.4	5.4	6.2	2.5
	미 성	15.8	4.9	5.1	7.6	5.9	1.1	6.5	3.9	8.4	12.4	8.7	11.5	5.2	4.9	3.1	4.5	5.6	2.1
	코 도	19.2	8.1	5.5	10.1	4.3	1.8	7.7	2.2	4.3	11.4	4.2	10.6	9.2	4.9	1.5	8.6	6.0	1.9
보 청 천	동 곡	18.5	8.3	6.7	10.1	3.9	3.7	6.1	3.3	2.6	9.4	11.6	5.6	10.3	8.3	5.0	8.7	8.1	2.2
	효 령	20.1	9.2	12.3	11.6	4.4	4.1	4.7	1.8	1.6	8.4	4.8	4.1	7.1	5.0	5.7	4.8	3.5	2.8
	산 계	24.3	14.3	22.5	10.8	5.9	4.7	8.9	8.4	3.3	16.4	14.3	11.4	5.0	4.7	2.6	4.3	3.6	2.4
	기 대	24.0	15.0	40.7	10.7	8.0	8.5	8.9	7.0	6.0	16.3	14.4	20.2	5.0	3.9	15.6	4.6	4.1	17.5
	탄 부	23.6	13.0	17.6	10.3	8.4	3.4	8.9	5.6	3.4	16.2	13.9	11.0	3.4	3.7	8.5	4.1	4.6	9.5
이 평 산	이 평	21.9	11.7	27.4	10.2	6.6	5.9	7.9	7.8	4.3	14.8	13.0	15.0	3.7	3.7	8.6	3.3	5.0	9.3
	산 성	21.9	13.6	38.0	9.0	9.4	8.1	9.6	5.3	6.1	17.0	12.2	21.1	5.4	5.4	16.8	2.8	1.5	19.1

곡선의 재현정도의 오차는 전반적으로 k오차의 절반정도의 수준에 머문다. 또 n는 식(12)에서와 같이 지형도에서 분석되는 지형인자에 의해 결정되므로 인자의 추출에 대한 정밀성을 감안하여 $\pm 10\%$ 의 인위적 오차를 발생시켜 침투유량, 도달시간 및 수분곡선의 재현정도에 미치는 효과를 분석하여 [표 3]에 나타내었다. [표 3]에서 보이는 바와 같이 n의 오차정도에 대해 침투유량, 도달시간 및 수분곡선의 재현정도에 미치는 효과를 분석하여 [표 3]에 나타내었다. 여기서 n의 오차정도에 대해 침투유량, 도달시간 및 수분곡선의 재현정도의 오차가 훨씬 못미치는 결과를 준다.

4. 유역응답의 수문학적 상사성

계측 및 미계측 유역의 유출해석에 있어서 단위도나 합성단위도 등의 응답특성을 알 수 있으면, 이를 인근 유역이나 동일 수계내의 타 유역에 적용시킬 수 있다. 이와같은 경우 유역상호간에 상사성이 있어야 그 적용성이 높게 되며 이론

적 타당성이 있다. 비록 동일수계라 하더라도 상하류에 따라 토지이용도, 식생, 토양종류, 유역형상, 하천수계 조식망 등의 공간적 변동성에 의해 응답특성이 다를 수 있다. 또 공간적 변동성이 유사하더라도 호우사상의 비상사상이나 선행강수조건 등, 유출조건 등에 의해 수분응답 또한 다양하게 발생할 수 있다.

동일한 충격응답함수를 가진 유역은 유효강우에 대한 수분응답이 같다고 가정할 때, 임의 두 유역의 순간단위도가 관측치로부터 유도되었거나 GIUH와 같이 지형학적 특성으로부터 유도되었거나 또는 Nash 모델과 같은 개념적 모델 등으로 유도되었거나 상관없이 동일한 순간단위도를 가진 두 유역은 상사성이 있다고 정의할 수 있다.

침투유량과 도달시간에 주안점을 둔 수분응답 해석에 있어서 침투유량 q_p 와 도달시간 t_p 의 곱인 부차원량을 식(6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G^* = t_p \cdot q_p$$

$$= 0.58(R_B / R_A)^{0.55} R_L^{0.05} \quad (6)$$

R_L 의 지수가 아주 작으므로 무시하면 식(22)와 같이 쓸 수 있다.

$$G * 0.58(R_B / R_A)^{0.55} \quad (22)$$

두 식에서 (R_A/R_B) 의 값은 각 유역에 대해 특정한 값으로서 일정하며, t_p 나 q_p 중 한개의 값만 알게 되면 나머지 한개의 값은 쉽게 구할 수 있으므로 IUH해석은 1변수 문제로 간략화 된다.

수문곡선에 주안점을 둔 해석에 있어서는 순간 단위도가 같으면 두 유역이 상사성이 있으므로, Nash 모델로 정의한 응답함수는 형상계수 n 와 저유계수 k 의 관계로 귀결된다.

즉 두유역의 n 와 k 가 모두 같거나 n 및 k 의 변화에 대한 IUH가 유사하면 두 유역이 상사성이 있다고 정의할 수 있다. n 는 식(12)에서 나타낸 바와 같이 (R_A/R_B) 및 R_L 의 함수로서 각 유역에 따라 특정한 값으로서 일정한 값을 가지며, 저유계수 k 는 식(13)으로 나타낸 바와 같이 R_A , $(R_B \cdot R_L)$, L 및 V 의 함수로서 동적특성 V 에 따라 공간적, 시간적으로 다양한 값을 갖는다. 전

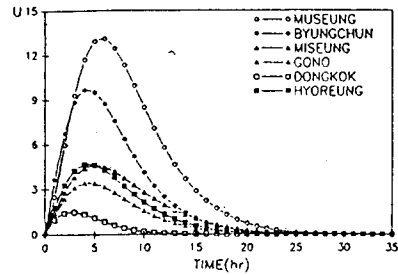


Fig. 3 Comparison between observed and two simulated hydrographs by the Nash model estimated by the methods of moments and least square for event of JUN 7, 1987 on the WI stream basin (6 station) station of BOICHEONG stream.

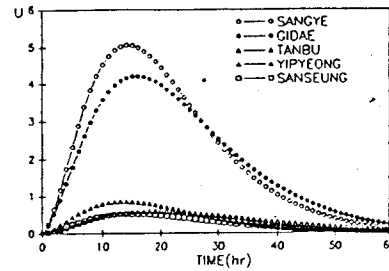


Fig. 4 Comparison between observed and two simulated hydrographs by the Nash model estimated by the methods of moments and least square for event of JUN 7, 1987 on the BO-CHUNG stream basin station of BOICHEONG stream.

표 4 각 호우사상에 대한 수문곡선의 매개변수

유역		구분 n	호우사상 1		호우사상 2		호우사상 3		호우사상 4		호우사상 5	
			k	ir	k	ir	k	ir	k	ir	k	ir
평 창 강	방 립	3.11	-	-	3.71	3.31	3.29	5.12	4.00	4.64	5.50	5.54
	하반정	2.97	-	-	3.80	4.41	4.94	2.45	2.99	5.33	1.50	4.78
	상안미	3.09	-	-	3.51	6.69	2.77	4.65	3.87	4.99	4.89	5.27
	백옥포	3.08	-	-	3.70	10.62	3.19	9.81	2.50	6.61	5.00	7.41
	장 평	3.09	-	-	4.83	2.30	3.78	6.65	2.80	6.31	3.69	6.93
	이목성	3.09	-	-	2.30	5.70	3.47	5.29	3.50	5.68	2.47	5.81
위 천	무 성	3.57	2.28	3.93	2.40	7.86	2.65	3.88	4.74	4.87	3.83	4.15
	병 천	3.09	2.36	4.93	2.29	4.78	2.37	3.95	4.22	5.24	3.25	3.82
	미 성	2.99	2.76	3.00	2.80	5.79	2.61	4.32	4.06	5.24	3.23	3.74
	고 노	3.09	2.81	4.31	2.34	4.79	2.40	4.19	4.07	5.00	3.12	4.31
	동 곡	2.84	2.21	3.51	1.74	5.29	2.34	4.26	4.18	5.89	3.16	3.78
	효 령	3.02	2.84	6.02	2.40	8.17	2.67	3.89	4.59	5.70	3.53	4.09
보 청 천	산 계	3.17	-	-	6.82	1.79	8.20	3.53	6.73	3.75	7.27	4.68
	기 대	3.06	-	-	7.68	0.99	7.58	4.15	5.59	3.04	5.46	4.18
	탄 부	3.02	-	-	9.60	2.24	5.26	5.21	4.50	4.77	2.41	4.95
	이 평	3.05	-	-	6.82	2.90	6.31	6.43	3.64	5.42	4.54	5.62
	산 성	2.95	-	-	7.48	2.5	6.41	3.76	3.58	3.86	2.00	3.15

질 2항의 최적해법에 의해서 결정된 평창강, 위천 및 보청천 유역에 발생한 각 호우사상에 대한 k 값과 식(12)를 이용한 n 값은 [표 4]과 같다.

[표 4]에 나타난 바와 같이 n 의 값은 위천에서 2.84~3.57을 나타내지만 부정지점의 3.57을 제외하면 비슷한 값을 보인다. 식(12)와 식(22)에 있어서 (R_{II}/R_{VI}) 의 값은 0.821~1.034 범위를 나타낸다. 평창강에서는 2.97~3.09로 거의 일정한 값을 보이며 (R_{II}/R_{VI}) 는 0.812~0.9의 범위를 나타낸다. 이는 동일 수계내의 소유역은 지형학적 특성이 크게 차이가 없음을 의미한다.

그리고 각 호우사상에 대한 최적해로서 k 값은 [표 4]에 보이는 바와 같이 그 변화의 폭이 크며 호우사상이나 선행 강수시수 등 배수로망의 유출 조건에 따른 응답특성이 다양하게 발생함을 알 수 있다. 반면에 평창강, 위천 및 보청천의 각 소유역에 있어서, 같은 날짜에 동일한 호우사상에 대한 k 의 값은 큰 차이가 없다. 이는 일의 수계내에서 동일한 호우사상에 대한 각 소유역의 수문응답특성이 유사하다는 것을 의미한다. 이에 대한 정도를 파악하기 위하여 평창강, 위천 및 보청천에 대해 각 호우사상에 대한 지형학적 순간단위도를 계산하여 비교하였다. 대표적으로 위천의 한 호우사상 그리고 보청천의 두 호우사상에 대한 순간단위도를 Fig 3-Fig 4에 도시하였다. Fig 3-Fig 4에 도시한 바와 같이 순간단위도가 모두 유사한 형태를 나타내며, 면적의 크기에 따라 특성치가 비례해서 증가하고 있다.

수계내 각 소유역의 지형법칙은 거의 일정하므로, 유역의 토지이용상태가 비슷한 유역의 순간단위도는 면적크기에 비례해서 고려할 수 있다는 하나의 중요한 사실을 얻을 수 있다. 즉 수계내 한 관측지점에서 지형학적 순간단위도를 알 수 있으면, 동일수계내 임의 지점을 기준으로 한 소유역내에서의 단위도를 구할 수 있음을 의미한다.

지형학적 순간단위도의 일반성을 검토하기 위

해 Fig 5-Fig 7과 같이 부차원 단위도를 작성하였다. Fig 5-Fig 7에서 보이는 바와 같이 평창강에 내린 한 호우사상에 대해서 백옥포 및 하만정 소유역이 다소된차를 보이지만 거의 일치하고 있다. 너무나 특이할 사항은 Strahler의 ordering scheme에 준할 때 동일한 차수의 유역

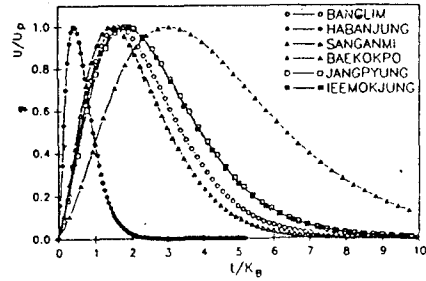


Fig. 5 The dimensionless IUH of the PYUNGCHANG river basin (6 station). K_B is the basin lag. U_p is the IUH peak values.

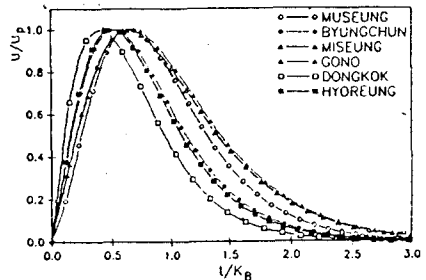


Fig. 6 The dimensionless IUH of the WI stream basin (6 station). K_B is basin lag. U_p is the IUH peak values.

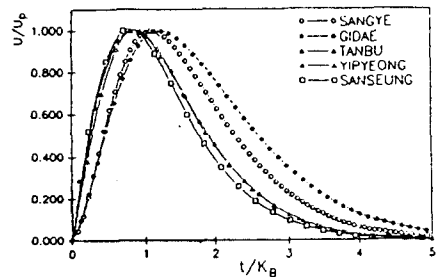


Fig. 7 The dimensionless IUH of the BOECHEONG stream basin (5 station). K_B is the basin lag. U_p is the IUH peak values.

은 유역면적의 대소에 관계없이, 무차원 단위도가 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 즉, 평창강 유역(Fig 5)에서 4차하천인 하반정, 장평 및 이복정 소유역과 5차 하천인 방림, 상안마 그리고 백옥포 소유역의 무차원 단위도, 위천유역(Fig 6)에서 4차 하천인 고노, 동곡, 효령 소유역 그리고 보청천 유역(Fig 7)에서 4차하천인 탄부, 이평, 산성 소유역, 6차 하천인 산계, 기대 소유역 등의 무차원 단위도가 거의 일치하며, 지형학적 순간단위도는 면적크기에 비례한다. 그러므로 유역의 수문학적 응답특성을 해석하는 방법에 관계없이 비슷한 수문응답을 나타내는 유역은 수문학적으로 상사성이 있다고 판단할 때, 평창강, 위천 그리고 보청천 각 소유역은 수문학적 상사성이 있다고 볼 수 있다.

상사성이 인정되는 각 유역에 있어서 유도된 대표단위도는 동일수계내의 수문응답을 정의할 수 있는 수단이 될 수 있다. 미계측 유역에 대한 대표 단위도를 합성할 수 있는 수단을 제공하기 위해 유효강우강도 ir , 형상계수 n 및 저유계수 k 의 상관관계식을 회귀분석으로 나타내었으며 그 결과는 식(23)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{평창강} : k &= -0.115n - 1.425ir + 8.74 \\ \text{위 천} : k &= 0.044n - 0.405ir + 1.544 \\ \text{보청천} : k &= 10.753n - 0.772ir + 24.083 \end{aligned} \quad (23)$$

형상계수 n 를 식(12)에서, 저유계수 k 를 식(23)에서 결정하면, 하천이나 유역의 수문응답함수를 감마분포로 가정할 때, 이를 이용해서 미계측유역의 유출해석이 가능한 합성단위도를 유도할 수 있게 된다.

5. 결론

본 연구는 유역의 수문학적 상사성을 판단할 수 있는 이론적 근거를 얻고자 하는 것으로서, 수문응답함수로서는 Nash 모델을 이용하였다.

선택된 Nash 모델의 매개변수 결정은 지형학적 순간단위도 이론과 최적해법을 사용하였다. 한강수계의 평창강 대표시험 유역과 낙동강수계의 위천대표시험유역 그리고 금강수계의 보청천 대표 시험 유역의 시간유출 자료를 사용하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. Nash 모델을 이용한 GIUH의 매개변수인 형상계수 n 는 유역의 지형특성에 의해 결정될 수 있으며 각 유역에 따라 일정한 값을 가진다. 저유계수 k 는 동적특성인 V 를 포함하고 있어 호우사상이나 선행강수지수에 따른 배수량의 유출조건에 따라 다양하게 변하지만, 상사성이 있는 유역상호간에는 일정한 값을 갖는다.
2. 매개변수 n 와 k 에 대한 민감도 해석에 있어서 n 와 k 의 오차에 대한 침투유량, 도달시간 및 수문곡선 재현 정도의 오차가 약 절반수준에 머물렀으며, 비교적 정확한 매개변수의 산정이 요구되었다.
3. 동일한 수계내의 각 소유역이 같은 호우사상에 대해 비슷한 수문응답 특성(GIUH)을 나타내는 경우, 유역 상호간에 유역상호간에 수문학적 상사성이 있는 것으로 정의할 수 있으며, 이를 미계측 유역의 유출해석에 적용할 수 있다.
4. 수계내 각 소유역의 지형법칙은 거의 일정하며, 유역의 공간적 변동성이 유사한 경우 순간단위도는 면적크기에 비례해서 증가된다. 따라서 수계내 한 관측 지점에서의 지형학적 순간단위도를 알 수 있으면, 동일수계내 임의 지점을 기준으로 한 소유역내에서의 단위도를 구할 수 있다.

謝 辭

이 논문은 1990년도 문교부지원 학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Agnese, C., D' Asaro, F. and Giordano, G.(1988). *Estimation of the Time Scale of the Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph From Effective Streamflow Velocity*. WATER RESOURCES RESEARCH Vol.24, No.7, pp.969-978
2. Beven, K.I.(1988). *Runoff production and flood frequency in catchments of order n: An alternative approach*. IN SCALE PROB IN HYDROLOGY, edited by I. Rodríguez-Iturbe, V.J. Gupta, and E. F. Wood, D. Reidel, pp.353-375
3. Beven, K.I. and Wood, E.F.(1988). *On Hydrological Heterogeneity-Catchment Morphology and Catchment Morphology*. JOURNAL OF HYDROLOGY, vol.100, pp.353-375
4. Bras, R.L. et al.(1982). *A Geomorphoclimatic Theory of the Instantaneous Unit Hydrograph*. WATER RESOURCES RESEARCH Vol. 18, No.4 pp.877-886
5. Caroni, E. and Rosso, R.(1986). *Nonlinearity and Time-Variance of the Hydrologic Response of a Small Mountain Creek*. SCALE PROB IN HYDROLOGY, pp.19-38.
6. Chan, S. and Bras, R.(1979). *Urban stormwater management: Distribution of flood volumes*. WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.15(2), pp.371-382.
7. Cheng, B.L.(1982). *A study of Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph*. PH. D THESIS, University of Illinois.
8. Corradini, C., Melone, F., Ubertini, L. and Singh, V.P.(1986). *A Geomorphologic Approach to Synthesis of Direct Runoff Hydrograph from the Upper Tiber River Basin, Italy*. SCALE PROB IN HYDROLOGY pp.39-56.
9. Diaz-Granados, M., Bras, R.L. and Valdeps, J.B.(1986). *In Corporation of Channel Losses in the Geomorphologic GIUH*. SCALE PROB. IN HYDROLOGY, pp.217-244.
10. Dooge, I.C.I.(1973). *Linear Theory of Hydrologic Systems*. TECHN. BULL. No.1468, U.S Dept. Agriculture, Washington, pp.327.
11. Dunne, T.(1978). *Field studies of hillslope flow processes*, in Hillslope Hydrology, edited by M.J. Kirkby, pp.227-293. JOHN WILEY, New York
12. Freeze, R.A.(1980). *A stochastic conceptual analysis of rainfall-runoff processes on a hillslope*. Water Resources Research, Vol.16(2), pp.391-408
13. Gupta, V.K. and Wang, C.T.(1981). *A Representation of an Instantaneous Unit Hydrograph from Geomorphology*. WATER RESOURCES RESEARCH Vol.17, No.3, pp.545-554.
14. Gupta, V.K., Waymire, E. and Rodríguez-Iturbe, I.(1986). *On Scale, Gravity and Network Structure in Basin Runoff*. SCALE PROB IN HYDROLOGY, pp.133-158.
15. Gupta, V.K. and Mesa, O.J.(1987). *Runoff Generation and Hydrologic via Channel Network Geomorphology*. JOURNAL OF HYDROLOGY.
16. Gupta, V.K. and Waymaire, E.(1989). *Statistical Self-Similarity in River Network Parameterized by Elevation*. WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.15, No.3, pp.463-476
17. Hebson, C., and Wood, E.F.(1982). *A derived flood frequency using Horton order ratio*. WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.18(5), pp.1509-1518
18. Hebson, C., and Wood, E.F.(1986). *A study of scale effects in flood frequency response*. IN SCALE PROB. IN HYDROLOGY, edited by I. Rodríguez Iturbe, V.I. Gupta, and E.F. Wood, D. Reidel, Hingham, Mass.
19. Hino, M., and Sunada, K.(1977). *A study on Response Characteristics of Surface Runoff due to periodically Fluctuating Rainfall*. ISCE, Vol. 262, No.6, pp.55-66.
20. Matalas, N.C., Slack, J.R., and Wallis, I.R.(1975). *Regional skew in search of a parent*. WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.11(6), pp.815-826
21. Mesa, O.J. and Mifflin, E.R.(1986). *On the Relative Role of Hillslope and Network Geometry in Hydrologic Response*. SCALE PROB. IN HYDROLOGY, pp.1-18
22. Mesa, O.J.(1987). *On the Main Channel Length Area*

- Relationship for Channel Network*, WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.23, No.11, pp.2119-2122
23. Reich, B.(1977). *Lysenkoism in U.S. flood determination*, EOS TRANS, AUG, vol.58(11), pp.1135
24. Rodríguez-Iturbe and Valdés IB(1975). *The Geomorphologic Structures of Hydrologic Responses*, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL.15, No.6, pp.1422-1434
25. Rodríguez-Iturbe, I., Gonzalez-Sanabria, M., and Bras, R.L.(1982). *A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph*, WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.18(4), pp.877-886
26. Rodríguez-Iturbe and Valdés IB.(1979). *A Rainfall-Runoff Analysis of Geomorphologic UH*, WATER RESOURCES RESEARCH, vol.15, No.6, pp.1421-1434
27. Rodríguez-Iturbe and Valdés IB(1979). *Discharge Response Analysis and Hydrologic Similarity: The Interaction Between the Geomorphologic UH and the Storm Characteristics*, WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.15, No.6, pp.1435-1444
28. Rodríguez-Iturbe, I., and Bras, R.L.(1982). *The Geomorphoclimatic Theory of the Instantaneous Unit Hydrograph*, WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.20, No.7, pp.914-920
29. Rosso R.L.(1984). *Nash Model Relation to Morton order Ratio*, WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.20, No.7, pp.914-920
30. Smith, R.E., and Hebbert, H.P.(1986). *Mathematical simulation of inter dependent surface and subsurface hydrologic processes*, WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.19(4), pp.987-1001
31. Troutman, B.M. and Karlinger, M.R.(1986). *Averaging Properties of Channel Networks Using Method in Stochastic Branching Theory*, SCALE PROD. IN HYDROLOGY, pp.185-216.
32. Wang, C.T.(1981). *A Geomorphologic Synthesis of Non-linearity in Surface Runoff*, WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.17, No.3, pp.545-554
33. Waymire, E. and Gupta V.K.(1983). *On the formation of an Analytical Approach to Hydrologic Response and Similarity at the Basin scale*, JOURNAL OF HYDROLOGY, Vol.65, pp.95-123
34. Wood, E.F. and Hebson, C.S.(1986). *On Hydrologic Similarity 1. Derivation of the Dimensionless Flood Frequency Curve*, WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.22, No.11, pp.1549-1554
35. Wood, E.F., Beven, K. and Sivapalan M.(1987). *On Hydrologic Similarity 2. A Scale Model of Storm Runoff Production*, WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.23, No.12, pp.2266-2278.
36. 鮮川倉, 北川善廣, 1982, "都市化流域の洪水流出モデル", 日本土木學會論文集, 第325號, pp.51-59.
37. 이순탁, 박종권, 1987, "하천 유출량산정을 위한 GIUH모델", 한국수문학회지, 제20권, 제1호.
38. 김민우, 1989, "수로망 크기를 고려한 직분형수영 유출예측모형", 연세대학교 대학원 박사학위논문.
39. 조흥재, 1985, "지형기후학적 실험직수직 모델에 의한 유출해석", 한국수문학회지, 제18권, 제2호, pp.113-152.
40. 조흥재, 1987, "지형학적 수분응답특성에 의한 실험직수직 모델해석", 한국수문학회지, 제20권, 제2호, pp.117-126.
41. 조흥재, 1990, 이상배, "하도망의 지하학적 특성을 이용한 지형학적 순간 단위도 해석", 한국수문학회지, 제23권, 제1호, pp.89-98.
42. 조흥재, 이상배, 1990, "수분응답의 지형학적 합성방법에 관한 연구", 대한토목학회지, 제10권, 제1호, pp.99-108.
43. 이상식, 1987, "유역의 지형 및 강우특성 인자를 고려한 순간단위도에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교.
44. 건설부, 1982-1988, "국토 수문 개발 계획(HIP) 대표유역 조사 보고서".