

지형학적 인자에 따라 군집화된 중소규모유역의 합성단위도법 제시

김진겸* · 김종민** · 강부식***

Kim, Jin Gyeom* · Kim, Jong min** · Kang, Boosik***

Estimation of Synthetic Unit Hydrograph by Cluster Analysis Using Geomorphic Characteristics of Mid-size Watershed

ABSTRACT

The methodology of synthetic unit hydrograph using geomorphic characteristics was suggested. Six geomorphic components over 19 watersheds were used to estimate synthetic unit hydrograph and the test watersheds were classified into two groups on the basis of the area of 200km². The regression formulas between standardized geomorphic characteristics for each group and peak quantities of specific streamflow and time of representative unit hydrograph were suggested and the Nash and the Clark unit hydrographs were derived. For verifying the derived unit hydrographs, the resulting hydrographs were compared with the ones using the existing Clark unit hydrographs based on the empirical parameter estimation for the 145 storm events during 2010 to 2011 for the additional six watersheds. The results showed the relatively higher performance over the existing synthetic unit hydrograph methods, which could be a contribution to the hydrologic estimation in ungauged watersheds.

Key words : Synthetic unit hydrograph, Nash model, Clark model, Geomorphic characteristics, Shape factor

초록

유역의 지형학적특성을 이용한 합성단위도법을 제시하였다. 합성단위도 산정을 위하여 19개 유역에 대하여 6개 지형학적 인자를 사용하였으며, 전체유역을 유역면적 200km²을 기준으로 2개의 군집으로 분류하였다. 19개 유역을 대상으로 군집별로 표준화된 지형학적 인자와 유역별 대표 단위도의 첨두비유량 및 첨두시간과의 회귀식을 제시하였으며, Nash와 Clark 단위도를 유도하였다. 합성단위도의 모의정확도 검증을 위해 추가적으로 선택한 6개 유역에서 2010-2011년에 발생한 145개 강우-유출사상에 적용하여 경험식을 사용한 Clark모형의 적용결과와 비교하였다. 검증결과 기존의 합성단위도법에 비해 높은 정확도를 나타내었으며, 이러한 결과는 미계측 유역에서의 적용 가능성을 보여주었다.

검색어 : 합성단위도, Nash모형, Clark모형, 지형학적특성, 형상계수

1. 서론

1.1 연구배경

유역의 유출특성을 파악하는 것은 유역 내 홍수방어를 위한 구조물의 설계나 대책 수립을 위해서 필수적인 사항이다. 하지만 유역내의 수위관측소가 없는 미계측 유역의 경우 유출수문곡선을 산정하기 어렵기 때문에 합성단위도법을 이용하여 수문곡선을 유도하는 것이 일반적이다.

* 정희원 · 단국대학교 토목환경공학과 박사수료 (Dankook University · jg_kim@dankook.ac.kr)

** 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (Dankook University · kimjongmin@dankook.ac.kr)

*** 종신회원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · Dankook University · bskang@dankook.ac.kr)

Received July 17, 2015/ revised September 14, 2015/ accepted April 28, 2016

단위도는 Sherman (1932)에 의해 최초로 소개되었고, 그 이후로 단위도 산정을 위한 다양한 연구가 진행되었다. Nash (1957)는 유역을 n 개의 선형저수지군으로 가정하고 2변수 Gamma 분포의 확률밀도함수를 이용해 수학적 순간단위도의 개념적 접근을 위한 기초를 확립하였다. 또한 Rodriguez-Iturbe et al. (1979a, 1982)은 Horton의 차수법칙을 이용하여 유역의 단위도를 산정하는 지형학적 순간단위도(Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH)와 지형기후학적 순간단위도(Geomorphoclimatic Instantaneous Unit Hydrograph, GcIUH)를 제안하였다. 또한, Rosso (1984)는 GIUH와 Nash모형을 합성하여 합성단위도를 산정하는 것을 제안한 바 있다.

Bhunya et al. (2003)은 2변수 Gamma분포의 매개변수를 수학적으로 간략화하여 제시하고, 기존에 사용되었던 매개변수 산정식의 결과와 비교하여 간략식의 정확도를 보여준 바 있으며, 2007년에는 2변수 Gamma분포, χ^2 분포, 3변수 β 분포, Weibull분포로 단위도를 산정하여 침투비유량과 침투시간을 알고 있는 경우에는 2변수 Gamma분포가 관측된 수문곡선의 모의가 다른 통계적 분포모형에 비하여 비교적 정확도가 높다는 결과를 발표하였다. Kumar et al. (2007)은 10개의 유역에 대하여 Clark 모형으로 유도된 GIUH, Nash 모형으로 유도된 GIUH를 관측 강우사상에 적용하여 관측된 유출수문곡선과 비교하였고, GIUH를 사용하였을 경우 관측수문곡선 모의가 뛰어나다는 결과를 발표하였다.

국내에서는 Yoon et al. (2004)이 국내 67개 유역을 대상으로 유역면적, 유로연장, 유로경사와 Nakayasu 합성단위도법의 매개변수간 상관도 분석을 수행하여 수계별 경험식을 제시하였으며, Ham et al. (2008)은 Rodriguez-Iturbe (1979a, b)가 제안한 3차 하천에 대한 간략식을 보완하여 4차 하천에 대한 GIUH에 대한 간략식을 유도하였다. 또한, Joo et al. (2011)은 지형학적 순간단위도를 미계측 유역에 적용하기 위해 유역 출구 지점을 결정하기 위한 기준을 제시하였다. 최근에는 Kim et al. (2013)이 Horton의 형상계수를 추가하여 유역의 출구점을 고려한 합성단위도 회귀식을 제시한 바 있다.

합성단위도법은 유역의 관측된 자료와 지형특성을 이용하여 경험적으로 산정하는 것이 일반적이다. 유출특성은 유역의 지형적인 특성뿐만 아니라 유역의 출구 위치에 따라서 침투유량이나 침투시간의 차이가 나타난다. 하지만 과거의 연구들에서는 유역의 형상적인 특성만 반영하였을 뿐, 출구점 위치에 대해 고려한 경우는 많지 않았다. 본 연구에서는 유역의 지형적인 특성과 유역의 출구점 위치를 반영해 줄 수 있는 형상계수 및 유역면심도를 고려한 합성단위도법을 산정하고자 한다.

1.2 연구목적

국내의 강변저류지 등 많은 수의 수공구조물들은 중소규모유역에 설치되어진다. 수공구조물의 설계나 치수능력의 검증을 위해서는 해당 유역의 유출특성을 확인할 수 있는 수문자료가 필요하나, 국가하천에 비하여 중소규모유역을 포함하고 있는 지방하천은 수위관측소의 설치가 미비한 상황이다. 하천설계기준(MLTMA, 2009)에 따르면 중소규모 자연하천유역의 설계홍수량은 단위유량도법, Snyder 합성단위도법, 미국토양보전국의 합성단위도법, Clark 유역추적 등을 사용하여 산정한다고 명시되어있으며, 미계측 유역은 Sabol과 Kraven-II경험식을 사용한 Clark단위도법이 주로 사용되고 있다. 하지만 경험식을 사용한 단위도법 매개변수를 보정 없이 사용한다면 신뢰성 있는 유출수문곡선을 얻지 못할 것이라 판단된다.

KICT (2000)에서는 과거 국내 단위도 연구성과들을 종합하고, 설마천 유역의 2개 지점과 IHP유역의 17개 지점을 추가하여 총 70개 유역의 단위도 유도결과와 유역특성의 다중회귀분석을 통해 Nash모형 기반의 합성단위도법을 개발한 바 있다. 해당 연구는 기존의 합성단위도법보다 향상된 결과를 보여주었지만, 유역면적 범위가 5-5,000km²인 70개 유역에 대하여 한 개의 식만으로 유역의 유출특성과 유역특성의 회귀식을 산정하였기 때문에, 유역의 다양한 특성을 반영하기에는 한계가 있을 것이라 사료된다. Viessman and Lewis et al. (2003)은 단위도 산정을 위한 유역면적의 크기가 2,600km² 정도로 보고 있고, 국내 유역종합치수계획에서는 대규모 자연하천 유역의 분할된 소유역 면적은 가급적 50-1,000km²의 이내가 되도록 권장하고 있다.

이에 따라, 본 연구에서는 유역면적이 700km²이하를 갖는 19개 유역을 선택하였고, 유역의 지형학적특성과 유출특성의 관계를 좀 더 명확히 살펴보고자 유역면적 200km²을 기준으로 유역을 2개로 군집시켰다. 또한 유역의 유출특성은 유역의 크기나 형태뿐만 아니라 유역의 출구점을 기준으로 한 형상에도 영향을 받기 때문에 이를 고려하기 위해 수정유역면심도와 형상계수를 추가하여, 지형학적 인자와 단위도 침투특성간의 침투량회귀식을 산정하였고, 침투량회귀식의 결과를 Nash모형 및 Clark모형에 적용한 합성단위도법을 제시하고자 한다.

2. 지형학적특성 분석 및 합성단위도법 산정

본 연구에서는 유역의 지형학적특성과 단위도 침투특성간의 관계를 살펴보고, 두 특성간의 관계를 적용한 합성단위도법을 제시하고자 한다. 총 19개 유역에 대하여 6개의 지형학적 인자와 유출특성의 관계를 분석한 결과, 각 유역의 크기 및 형상이 다양하여 지형학적 인자와 유출특성의 상관성이 거의 나타나지 않았다. 이를

보완하기 위하여 지형학적 인자에 따라 유역을 2개의 군집으로 분류하였다. 유역의 지형학적 인자와 유역별 단위도 침투특성간의 회귀분석을 수행하여 침투량회귀식을 산정하였으며, 침투량회귀식으로부터 산정된 침투비유량과 침투시간을 Nash모형 및 Clark 모형에 적용하여 최종적으로 유역의 합성단위도를 산정하였다.

Table 1. Comparison of Geomorphological Parameters by Various Methods

Method	Parameters
GIUH (1979)	R_A : Area ratio for stream order R_B : Bifurcation ration for stream order R_L : Stream length ratio for stream order L_{Ω} : Stream length for the highest stream order V : Peak velocity (m/s)
GcIUH (1982)	i_r : Averaged effective rainfall intensity (mm/hr) L_{Ω} : Stream length (km) A_{Ω} : Watershed area (km ²) R_L : Stream length ratio for stream order n : Manning's roughness coefficient S_{Ω} : Stream slope for highest stream order (m/m) b_{Ω} : Stream width for highest stream order (m)
This Study	A : Watershed area (km ²) L : Stream length (km) P : Watershed perimeter (km) S_s : Stream slope (m/m) τ^* : Modified watershed eccentricity F_H : Horton's shape factor

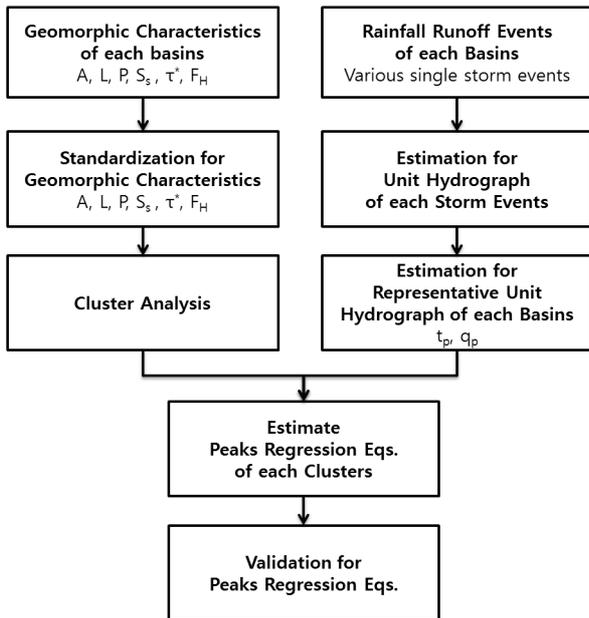


Fig. 1. Procedure of Derivation of Geomorphical Synthetic unit Hydrograph

기존 GIUH 방법에서는 침투유량 발생시의 유속이 매개변수로 사용되며, GcIUH에서는 하천의 조도계수가 사용되고 있으나 이러한 매개변수는 계측자료를 기본으로 하거나 경험식 등으로 추정해야 하는 상황이다. 본 연구에서는 미세측 유역에서의 지형학적특성과 단위도 침투특성과의 관계를 살펴보기 위해 계측이 수반되어야 하는 매개변수는 제외한 뒤 수치지형도에서 도출할 수 있는 지형학적 인자만을 사용하였다. Table 1에 기존 GIUH 및 GcIUH에서 사용한 매개변수와 본 연구에서 사용한 변수를 비교하였으며, Fig. 1은 침투량회귀식을 산정하는 흐름도이다.

2.1 지형학적특성 분석

유역의 지형학적특성과 유출특성의 관계를 분석하기 위해 선택된 지형학적 인자는 유역면적(A , km²), 유로연장(L , km), 유역둘레(P , km), 유로경사(S_s , km/km), 수정 유역편심도(τ^* , km/km), Horton의 형상계수(F_H , km²/km²)로 총 6가지이다. 여기서 유역면적, 유로연장, 유역둘레는 유역의 규모와 관계가 있으며, 유로경사는 도달시간과 관계가 있다. 수정 유역편심도와 Horton의 형상계수는 유역의 출구점을 기준으로 넓고 긴 형상을 나타내는 지형학적 인자이다. 수정 유역편심도는 Black (1972)이 제시한 유역편심도를 수정하여 0.25에서 유역의 형상이 원에 가까운 형상을 나타내고, 0.25이상으로 커질수록 유역출구를 기준으로 긴 형상의 유역, 그리고 0.25에서 0에 가까워질수록 유역 출구를 기준으로 폭이 넓은 형상의 유역을 나타낸다(Eq. (1)).

$$\tau^* = \frac{L_c^2 - w_c^2}{w_c^2} + 1 \tag{1}$$

여기서 L_c 는 유역중심으로부터 하천 출구까지의 직선길이(km), w_c 는 유역중심에서 출구방향의 직선과 직교하는 하천 폭(km)이다.

Horton의 형상계수는 1을 중심으로 값이 작을수록 유역이 긴 형상을 나타내고, 클수록 유역의 폭이 넓은 형상을 나타낸다. 각 유역별 지형학적 인자는 다음과 같다(Table 2).

2.2 지형학적 인자의 표준화

회귀분석은 인자들의 단위와 크기에 민감하기 때문에, 본 연구에서 사용되는 지형학적 인자들을 그대로 사용하기에는 무리가 있다. 따라서 각 지형학적 인자들을 표준화하여 인자간의 단위나 상대적인 크기에 대한 영향을 없애고 분석을 수행하였다. 표준화 방법은 다음과 같다.

$$z = \frac{x - \bar{x}}{s} \tag{2}$$

Table 2. Geomorphic Characteristic Components of Test Watersheds

Basin	Watershed	A (km ²)	L (km)	P (km)	S _s (km/km)	τ* (km/km)	F _H (km ² /km ²)
Han River	Imokjung	53.9	15.1	46.6	0.0184	0.98	0.24
	Wonju	92.3	19.0	58.0	0.0191	0.50	0.26
	Baekokpo	140.7	24.8	76.7	0.0132	0.22	0.23
	Dopyeong	152.5	28.7	87.3	0.0073	0.24	0.19
	Imgye	157.1	17.5	97.9	0.0078	0.07	0.52
	Maeil	160.3	18.3	88.7	0.0084	0.14	0.48
	Toegyewon	201.1	27.3	107.0	0.0071	0.85	0.27
	Jungnang Br.	204.6	27.3	126.6	0.0121	2.41	0.27
	Gyeongang	266.3	34.6	120.3	0.0166	0.88	0.22
	Heukcheon Br.	306.7	39.6	122.7	0.0060	0.76	0.20
	Hoengseong	440.7	47.4	152.5	0.0085	0.31	0.20
	Hwachon	516.8	55.6	183.4	0.0061	0.30	0.17
	Chungmi	520.5	52.8	220.7	0.0021	0.29	0.19
	Pyeong Chang	695.9	79.6	178.9	0.0071	1.09	0.11
Nakdong River	Misung	171.5	34.5	88.00	0.0064	0.72	0.14
	Hyoryeong	152.6	25.4	77.0	0.0130	0.65	0.24
Geum River	Tanbu Br.	78.6	22.9	71.8	0.0064	0.74	0.15
	Cheoncheon	291.3	33.0	122.3	0.0196	0.26	0.27
Mankyong River	Gosan	288.5	25.2	116.1	0.0144	0.04	0.45

※ A : Area, L : Stream length, P : Perimeter, S_s : Stream slope, τ* : Modified-watershed eccentricity, F_H : Horton's Shape Factor(A/L²)

여기서, z 는 표준화된 지형학적 인자 값, x 는 지형학적 인자의 기본 값, \bar{x} 는 지형학적 인자의 평균, s 는 지형학적 인자의 표준편차이다.

2.3 Nash모형

Nash모형은 유역을 가상의 n 개 선형저수지로 표현하고, n 번째 저수지의 유출을 다음 Eq. (2)와 같이 표현한다.

$$q(t) = \frac{1}{K} \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} \frac{e^{-\frac{t}{K}}}{\Gamma(n)} \quad (3)$$

여기서 K 는 저류상수(hr), n 은 가상저수지의 수, t 는 시간(hr)이다. Eq. (3)을 시간에 대해 미분하고 정리하게 되면, 저류상수는 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있으며,

$$K = \frac{t_p}{n-1} \quad (4)$$

Eqs. (3) and (4)을 이용하여 침투비유량과 침투시간의 곱에 대한 식으로 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{n-1}{\Gamma(n)} (n-1)^{(n-1)} e^{-n+1} = q_p \cdot t_p \quad (5)$$

Eqs. (4) and (5)에 의하여 Nash 단위도의 매개변수 n , K 가 결정되면, 이를 Eq. (3)에 대입하여 단위도의 종거를 계산한다.

2.4 Clark모형

Clark모형은 유역 출구점에 1개 저수지가 있다고 가정하고, 시간면적 곡선과 선형저수지 개념을 이용하여 단위도를 추정하는 기법이다. 시간면적곡선은 도달시간이 시간구간별로 기여하는 면적을 결정하여 작성하게 되며, 총 도달시간에 대한 구간별 도달시간의 비를 이용하여 계산한다.

$$T_i = \frac{t_i}{t_c} \quad (6)$$

$$TA_i = 1.414 T_i^{1.5} \quad (0 \leq T_i < 0.5) \quad (7)$$

$$1 - TA_i = 1.414(1 - T_i)^{1.5} \quad (0.5 \leq T_i < 1.0) \quad (8)$$

여기서, t_i 는 고려되는 시간구간(hr), t_c 는 도달시간(hr), TA_i 는 시간면적곡선의 누가값, T_i 는 총 도달시간에 대한 i 시간구간의 비이다. 시간면적 곡선이 계산되면, 단위도의 시간별 중거를 계산하기 위한 추적계수를 Eq. (9)에 의해 계산한다.

$$C = \frac{2\Delta t}{2K + \Delta t} \quad (9)$$

여기서, C 는 선형추적계수, K 는 저류상수(hr), Δt 는 시간구간(hr)이다. 시간면적곡선을 계산하기 위한 도달시간과 추적계수는 일반적으로 관측값을 사용하여 산정하지만, 미계측 유역의 경우에는 Kraven-II와 Sabol 경험식을 사용하고 있다.

시간면적곡선과 추적계수가 산정되면, Eq. (10)에 의해 순간단위도를 계산한다.

$$IUH_i = C \overline{TA}_i + (1 - C)IUH_{i-1} \quad (10)$$

3. 합성단위도 산정

3.1 유역의 대표단위도 산정

유역의 지형학적 인자와 유출특성의 관계를 분석하기 위하여

19개 유역별 대표단위도를 산정하였다(Table 3). 유역의 대표단위도는 2002-2009년 동안 관측된 호우사상 중 선행강우의 효과가 거의 없다고 판단되는 4-11개의 단일호우 사상을 선택하여 강우사상별 단위도를 산정하고, 산정된 단위도들의 시간별 중거를 산술평균하여 평균된 단위도의 첨두비유량 및 첨두시간을 모의하는 단위도를 유역별 대표단위도로 결정하였다.

19개 유역을 대상으로 지형학적 인자와 유출특성사이의 상관관계를 분석한 결과, 대표단위도의 첨두비유량($q_{p,r}$)과의 결정계수(R^2)는 0.00-0.32(평균 0.20)의 값을 나타내었고, 첨두시간($t_{p,r}$)과의 결정계수는 0.00-0.41(평균 0.25)의 값을 나타내었다. 전체적인 결정계수 값이 낮게 산정되었으며, 유출특성과의 상관관계가 거의 나타나지 않는 인자들도 있었다. 이는 다양한 형상의 유역들을 한번에 분석하였기 때문이라 판단되었으며, 이를 개선하고자 지형학적 인자를 기준으로 군집분석을 수행하였다.

3.2 군집분석

군집분석은 객체들을 인자로부터 계산된 유사성을 통해 군집화하는 방식으로, 크게 계층적 군집분석과 비계층적 군집분석으로 구분된다. 계층적 군집분석은 유사성이 높은 객체부터 낮은 객체까지 순차적으로 군집화하는 방식으로 객체들간의 군집화결과로 군집 내에 또 다른 군집이 소속되는 형태로 나타나며, 비계층적 군집분

Table 3. Storm Events Used for Deriving Synthetic unit Hydrograph

Watershed	Rainfall-discharge events	$q_{p,r}$ (mm/hr)	$t_{p,r}$ (hr)
Imokjung	Jun. 18, 2008 and 3 events	0.060	4.9
Wonju	Jul. 11, 2005 and 4 events	0.058	6.6
Baekokpo	May, 24, 2007 and 4 events	0.051	6.1
Dopyeong	May, 16, 2007 and 5 events	0.058	7.5
Imgye	Sep. 18, 2005 and 5 events	0.026	12.3
Maeil	May, 6, 2006 and 7 events	0.049	12.1
Toegyewon	Sep. 30, 2005 and 6 events	0.052	4.6
Jungnang Br.	Jul. 19, 2002 and 6 events	0.084	4.6
Gyeongang	May, 8, 2003 and 5 events	0.064	5.9
Heukcheon Br.	Jun. 27, 2003 and 9 events	0.035	7.8
Hoengseong	May, 7, 2003 and 6 events	0.046	12.3
Hwachon	May, 24, 2007 and 5 events	0.033	15.9
Chungmi	Jul. 28, 2005 and 6 events	0.043	10.5
Pyeongchang	May, 6, 2006 and 5 events	0.025	14.6
Misung	May, 19, 2006 and 8 events	0.054	6.1
Hyoryeong	May, 19, 2006 and 8 events	0.058	7.0
Tanbu Br.	Jul. 7, 2004 and 9 events	0.059	7.0
Cheoncheon	May, 18, 2008 and 5 events	0.040	5.4
Gosan	Jul. 17, 2004 and 7 events	0.058	3.9

※ $q_{p,r}$: Representative Specific Peak Flow, $t_{p,r}$: Representative Peak Time

석은 특정 조건에 부합되는 객체만을 군집에 소속되는 형태로 군집들은 서로 독립이 된다. 본 연구에서는 객체들이 특정한 군집에만 소속되는 비계층적 군집분석이 연구에서 수행하는 군집분석의 목적에 적합하다 판단되었다.

본 연구에서는 비계층적 군집분석 중 K-Means Clustering 기법을 선택하여 연구를 진행하였다. K-Means Clustering 기법은 분석 시작 전 원하는 군집의 수를 먼저 지정하고, 임의로 나누어진 군집별 인자들의 평균값을 계산하는 방식이다. 계산된 평균값과 객체간의 유사성을 계산하여, 소속된 군집과의 유사성이 다른 군집과의 유사성보다 높다면 해당 군집에 포함되어 있는 상태로 두고, 반대의 경우 유사성이 높은 군집으로 이동시킨 후 군집별 인자들의 평균값을 재계산하게 된다. 위의 과정을 반복하여 더 이상 객체들의 이동이 없다면 군집분석을 완료하게 된다.

K-Means Clustering에서 군집간의 유사성을 결정하는 방법은 Squared Euclidean Distance를 사용하였으며, 산정방식은 다음과 같다.

$$d(i,k) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j^{(k)})^2} \quad (11)$$

여기서, $d(i,k)$ 는 객체 i 와 k -군집 평균까지의 거리이고, n 은 인자의 수, x_{ij} 는 i 객체의 j 변수의 값, $\bar{x}_j^{(k)}$ 는 k -군집의 j 변수의 평균값이다.

군집분석은 본 연구에서 선정한 지형학적 인자를 기준으로 수행하였으며, 19개 유역의 6개 지형학적 인자를 사용하였기 때문에 3개 이상의 군집으로 유역을 분류할 경우 군집당 소속된 유역의 수가 6개 이하로 구성되는 군집이 발생한다. 군집당 유역의 수가 지형학적 인자의 수보다 적거나 같게 되면, 다중회귀분석의 결과의 결정계수가 항상 1.0 이기 때문에 분석하려는 유역이 지형학적 인자의 수보다 많도록 군집의 수는 2개로 결정하였다. 군집의 기준을 선정하기 위하여 6개 지형학적 인자와 단위도의 침투특성과의 상관도 분석을 수행하였으며, 그 결과 유역면적으로 군집을 구분한 경우가 다른 인자로 구분한 결과에 비해 지형학적 인자와 단위도 침투특성과의 상관도가 가장 크게 나타났으며, 각 군집에 소속된 유역의 수가 비슷하게 분류된 200km²을 기준으로 한 분석결과를 선정하였다(Table 4).

3.3 침투량회귀식 산정

침투량 회귀식 산정시 지형학적 인자간의 단위 및 크기의 차이에 의해 발생하는 기여도의 차이를 최소화하기 위하여 지형학적 인자의 표준화를 수행하였다(Table 5). 표준화에 사용된 군집별 지형학적 인자의 통계값은 군집별로 계산하였으며, 표준화된 지형학적 인자를 이용하여 침투량 회귀식을 산정한 후 지형학적 인자를 직접적으로 적용할 수 있도록 회귀식을 수정하였다(Table 5).

Table 4. Performance Evaluation of the Derived Regression Equation of Each Cluster

Cluster	Area Size	Watershed	Averaged R ² with geomorphic components	
			t _{p,r}	q _{p,r}
1	A ≤ 200km ²	Imokjung, Tanbu Br., Wonju, Baekokpo, Hyoryeong, Dopyeong, Imgye, Maeil, Misung	t _{p,r}	0.31
			q _{p,r}	0.40
2	A > 200km ²	Jungnang Br., Gyeongan, Toegyewon, Gosan, Cheoncheon, Heukcheon Br., Hoengseong, Hwachon, Chungmi, Pyeongchang	t _{p,r}	0.35
			q _{p,r}	0.53

Table 5. Statistics of Geomorphic Components for Each Cluster

Cluster	Statistics	A (km ²)	L (km)	P (km)	S _s (km/km)	τ* (km/km)	F _H (km ² /km ²)
1	Average	128.82	22.89	76.87	0.0111	0.47	0.27
	Standard Deviation	42.35	6.18	16.25	0.0050	0.32	0.14
2	Average	373.23	42.23	145.05	0.0100	0.72	0.23
	Standard Deviation	162.90	16.99	37.48	0.0055	0.69	0.09

Table 6. Regression Equations of Peak Time and Specific Flow for Each Cluster

Cluster	Regression equation	
	t _p	$t_p = 8.35 e^{0.0008A - 0.0147L + 0.0025P - 24.6S_s - 0.1531\tau^* + 0.9857F_H}$
1	q _p	$q_p = 0.174t_p^{-0.613}$
	t _p	$t_p = 328.63 e^{0.0156A - 0.1360L - 0.0122P - 16.5S_s + 0.1420\tau^* - 8.80F_H}$
2	q _p	$q_p = 0.126t_p^{-0.503}$

여기서, t_p 는 첨두시간(hr), q_p 는 첨두비유량(mm/hr), A 는 유역면적(km²), L 은 유로연장(km), P 는 유역둘레(km), S_s 는 유로경사(m/m), τ^* 는 수정유역면적도, F_H 는 Horton의 형상계수이다.

3.4 대표 합성단위도 산정

첨두량회귀식으로부터 산정된 첨두시간과 첨두유량을 이용하여 단위도를 산정하기 위해서 본 연구에서는 수학적으로 잘 정리되어 단위도의 첨두 특성으로 매개변수를 산정하기 손쉬운 Nash모형과 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 Clark모형(Clark, 1945)을 선택하였다. Nash모형의 매개변수는 Eqs. (4) and (5)를 사용하여 산정하였으며, Clark모형의 매개변수는 시행착오법을 사용하여 첨두량회귀식으로 산정된 첨두비유량 및 첨두시간을 모의하는 매개변수를 계산하였다. 19개 유역의 Nash모형 및 Clark모형 매개변수는 Table 7과 같다.

3.5 합성단위도의 검증

합성단위도를 검증하기 위하여 유역별로 2010-2011년에 관측된 강우-유출사상 중 선행강우의 효과가 없다고 판단되는 3-8개(총 106개)의 사상을 선택하여 실제 유출수문곡선과 본 연구에서 제안한 합성단위도법으로 산정된 단위도를 적용하였다.

첨두량 회귀식의 적용결과, 관측된 직접유출수문곡선과 Nash 단위도의 첨두유량 절대오차율은 평균 16.52%, 첨두시간의 절대오차는 평균 4.47시간을 보였으며, Clark 단위도와의 첨두유량 절대

오차율은 평균 16.92%, 첨두시간 절대오차는 평균 4.85시간으로 나타났고 관측수문곡선의 형상 모의정도를 나타내는 R²와 NSE (Nash-Sutcliffe model Efficiency coefficient) 또한 양호한 값이 나타나는 것을 확인하였다.

4. 합성단위도법 적용성 검증

본 연구에서 제시한 합성단위도법의 적용가능성을 검증하기 위해 합성단위도법 산정에 사용되지 않은 6개 인의 유역을 선택하여 적용하였으며, 대상유역의 유역도 및 지형학적 인자는 Fig. 2와 Table 9에 정리하였다.

첨두량회귀식을 적용하기 위하여 6개 검증유역을 유역면적 200km²를 기준으로 분류한 군집에 소속시켰으며, Table 4에 제시되어 있는 군집별 지형학적 인자를 첨두량회귀식에 적용하였다. 각 유역별로 산정된 단위도 첨두특성을 사용하여 산정한 Nash모형 및 Clark모형의 매개변수는 Table 10과 같다.

첨두량 회귀식을 통해 산정된 대상유역의 단위도는 2009-2010년 동안 단일호우사상에 의해 발생한 강우-유출사상에 적용하여 검증을 수행하였으며, 현업에서 사용하고 있는 Sabol, Kraven-II 경험식을 사용한 Clark모형을 적용한 유출수문곡선과 함께 관측된 유출수문곡선과 비교하여 적용성을 평가하였다(Tables 11, 12 and Fig. 3).

적용결과 관측수문곡선과의 첨두유량 절대오차율의 평균은 본

Table 7. Parameters of Unit Hydrographs in Each Watershed

Watershed	Cluster 1				Watershed	Cluster 2			
	Nash model Parameter		Clark model Parameter			n	K (hr)	t _c (hr)	K (hr)
	n	K (hr)	t _c (hr)	K (hr)					
Imokjung	1.85	6.36	4.70	13.11	Jungnang Br.	1.58	7.74	3.60	12.77
Tanbu Br.	2.00	6.68	6.30	14.31	Gyeongang	1.68	8.15	4.70	14.27
Wonju	1.88	6.56	5.20	13.64	Toegyeon	1.61	8.02	4.10	14.72
Baekokpo	2.02	6.75	6.70	14.50	Gosan	1.51	7.52	2.90	9.79
Hyoryeong	1.96	6.80	6.00	14.46	Cheoncheon	1.73	8.03	5.20	15.93
Dopyeong	2.05	7.08	7.30	15.29	Heukcheon Br.	1.86	8.69	7.10	17.93
Imgye	2.56	8.18	13.00	19.76	Hoengseong	2.40	9.35	13.30	21.89
Maeil	2.44	8.08	11.80	18.98	Hwachon	2.44	8.97	13.00	21.09
Misung	1.93	6.80	5.80	14.25	Chungmi	2.29	8.91	11.60	20.48
					Pyeongchang	1.99	14.74	16.00	22.30

Table 8. Performances Evaluation of the Derived UH

Peak flow Averaged Absolute Error (%)		Peak time Averaged Absolute Error (hr)		R ²		NSE	
Nash	Clark	Nash	Clark	Nash	Clark	Nash	Clark
16.52	16.92	7.16	4.85	0.74	0.76	0.61	0.68

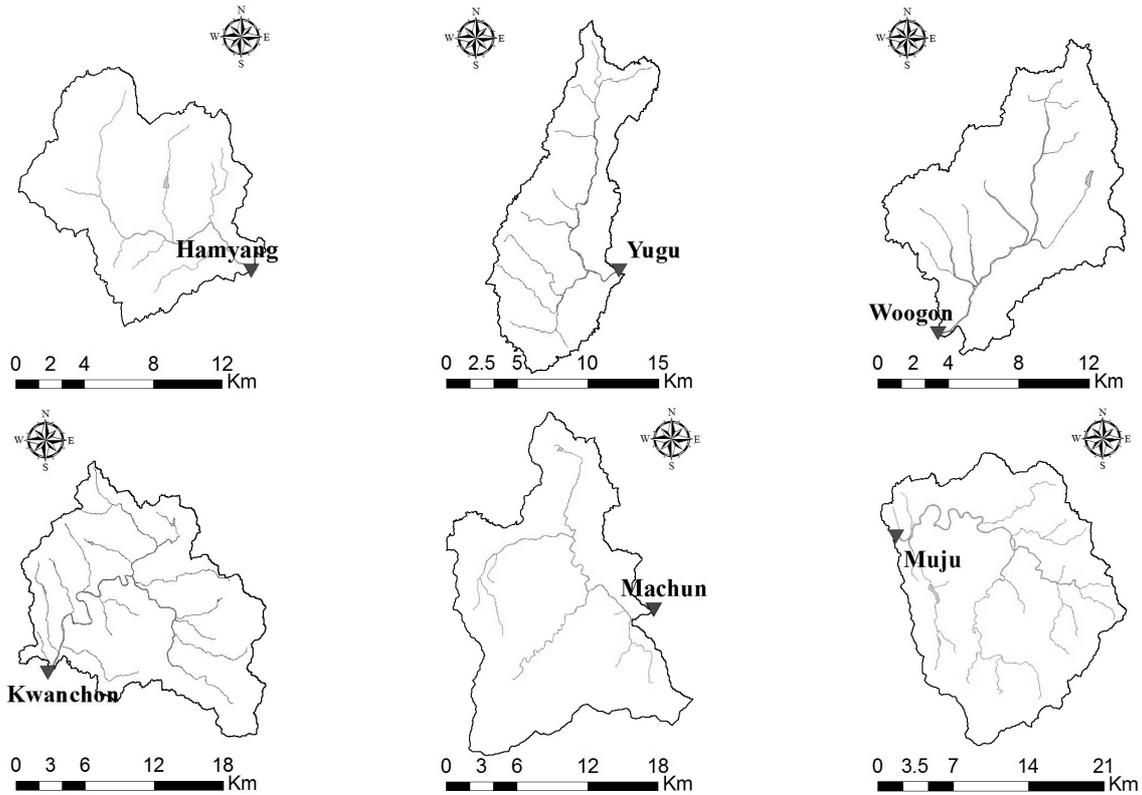


Fig. 2. Location Map of the Watersheds for Verification

Table 9. Geomorphic Components of the Watersheds for Verification

Cluster	Basin	Watershed	A (km ²)	L (km)	P (km)	S _s (km/km)	τ* (km/km)	F _H (km ² /km ²)
1	Nakdong River	Hamyang	123.07	21.11	76.38	0.0285	0.52	0.28
	Geum River	Woogon	131.55	19.17	85.50	0.0013	0.74	0.36
	Geum River	Yugu	144.23	22.25	100.74	0.0084	0.23	0.29
2	Sumjin River	Kwanchon	314.44	33.65	152.40	0.0072	0.20	0.28
	Nakdong River	Machun	322.88	29.90	136.80	0.0206	0.10	0.36
	Geum River	Muju	388.43	49.48	121.32	0.0155	0.22	0.16

※ A : Area, L : Stream length, P : Perimeter, S_s : Stream slope,
 τ* : Modified-watershed eccentricity, F_H : Horton's Shape Factor (A/L²)

Table 10. Synthetic UH Parameters of the Watersheds for Verification

Cluster	Watershed	q _p (mm/hr)	t _p (hr)	Nash model Parameter		Clark model Parameter	
				n	K (hr)	t _c (hr)	K (hr)
1	Hamyang	0.066	4.9	1.80	6.11	11.98	4.2
	Woogon	0.041	10.6	2.34	7.92	18.36	10.7
	Yugu	0.045	9.1	2.23	7.50	16.30	9.0
2	Kwanchon	0.051	6.0	2.44	8.05	18.98	11.8
	Machun	0.054	5.3	1.66	8.03	14.79	5.3
	Muju	0.045	7.8	1.47	7.52	11.20	2.5

※ q_p : Specific peak flow, t_p : peak time, n : Number of linear reservoirs, K : Storage coefficient, t_c : Concentration time

Table 11. Performance (Average Absolute Error) Comparison of the Peak Flow and Time for the Three Different UH

Watershed	Number of Events	Peak flow Averaged Absolute Error (%)			Peak time Averaged Absolute Error (hr)		
		Nash	Clark	Clark _{em}	Nash	Clark	Clark _{em}
Hamyang	9	15.76	16.36	81.27	1.78	1.78	4.89
Woogon	5	16.80	20.36	129.98	2.80	3.00	10.20
Yugu	5	17.59	17.47	219.03	4.40	4.40	2.60
Kwanchon	6	20.95	19.33	117.34	14.50	14.33	24.33
Machun	7	11.85	6.16	22.26	4.14	4.29	5.00
Muju	7	27.11	17.37	117.06	15.57	15.71	16.86
Average	39	18.34	16.17	114.49	7.20	7.25	10.65

※ Clark_{em} : Clark method using empirical equation

Table 12. Performance (R², NSE) Comparison of the Three Different UH

Watershed	Number of Events	R ²			NSE		
		Nash	Clark	Clark _{em}	Nash	Clark	Clark _{em}
Hamyang	9	0.62	0.66	0.23	0.45	0.58	-1.82
Woogon	5	0.91	0.92	0.12	0.90	0.89	-1.32
Yugu	5	0.83	0.81	0.29	0.73	0.75	-2.76
Kwanchon	6	0.63	0.65	0.14	0.41	0.49	-3.33
Machun	7	0.77	0.85	0.71	0.72	0.85	0.65
Muju	7	0.18	0.17	0.04	-0.84	-0.51	-3.73
Average	39	0.66	0.68	0.25	0.40	0.51	-2.05

※ Clark_{em} : Clark method using empirical equation

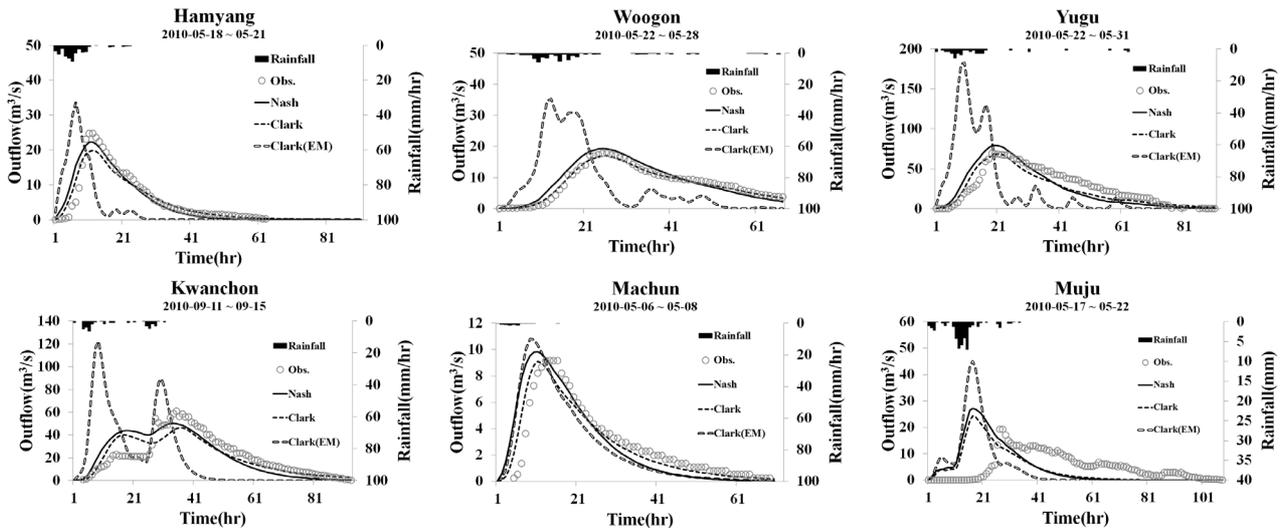


Fig. 3. Hydrograph Comparison of Real Events for Each Watershed

연구에서 제안한 Nash 및 Clark 단위도에서 각각 18.34%, 16.17%로 경험식을 사용한 Clark 단위도법에 비해 높은 모의정확도를 보였으며, 첨두시간의 절대오차 평균값은 비슷한 수준인 것을 확인

하였다. 그리고 관측수문곡선의 형상 모의도를 나타내는 R²와 NSE도 본 연구에서 제시한 합성단위도 법에서 높은 값을 나타낸 것으로 보아 미세측 유역에 대한 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

5. 결론

한강, 낙동강, 금강, 만경강 수계의 19개 유역에 대하여 국내 유역의 지형학적 인자를 반영한 합성단위도법을 제시하였고, 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Viessman and Lewis (2003)는 단위도 산정을 위한 유역면적의 상한을 $2,600\text{km}^2$ 으로 제시하였고, 한강 유역종합치수계획 보고서의 소유역 분할 결과에 따르면, 183개 소유역 중 181개의 소유역의 면적이 700km^2 이하로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 유역면적이 700km^2 이하이고, 다양한 형상을 가진 유역의 지형학적 인자와 2002-2009년의 강우-유출자료를 수집하여 유역의 대표단위도를 산정하였다.
- (2) 유역의 지형학적특성에 따라 유출특성이 변하기 때문에 지형학적 인자별로 군집을 2개로 구성하였으며, 군집의 기준은 유출특성과 지형학적 인자의 상관도가 가장 높게 나타나는 유역면적 200km^2 으로 결정하였다.
- (3) 유역의 지형학적 인자와 유출특성의 관계를 표현하기 위하여 군집별 다중회귀분석을 수행하였으며, 지형학적 인자들의 단위 및 크기에 의해 발생하는 기여도 차이를 최소화하기 위하여 군집별로 표준화를 선행하였다.
- (4) 침투량회귀식으로부터 산정된 침투시간과 침투비유량은 Nash 모형 및 Clark모형에 적용하여 유역별 합성단위도를 산정하였으며, 2010-2011년에 발생한 강우-유출사상에 적용하여 검증을 수행하였다.
- (5) 미계측 유역에 대한 적용성을 판단하기 위하여 6개 유역에 대해 적용하였으며, Nash 및 Clark 방법으로 산정된 단위도는 2009-2010년에 관측된 유역별 5-7개의 강우-유출사상에 검증하였다. 침투유량의 오차를 평균은 Nash방법에서 18.34%, Clark 방법에서 16.17% 침투시간 오차의 평균은 각각 평균 7.20시간, 7.25시간이며, 결정계수는 각각 0.66, 0.68이다.
- (6) 검증을 수행 결과, 연구에서 제안한 합성단위도법을 통해 모의된 유출수문곡선은 신뢰성 있는 결과를 나타낸다고 판단되며, 미계측 유역을 가정된 추가 유역에 대한 검증결과도 현업에서 사용하는 경험식 기반의 Clark 기법에 비해 높은 모의 정확도를 나타냈다.

본 연구를 통해 제안된 침투량 회귀식은 관측 수문곡선에 대한 높은 모의정확도를 보이는 것을 확인하였으며, 이는 미계측 중소규모 유역에 설치될 수공구조물의 설계나 평가에 사용될 유출수문곡선을 유도하는데 도움이 될 것이라 판단된다.

향후, 분석 유역을 추가한다면 침투량회귀식을 개선할 수 있으며,

제안한 침투량회귀식에서 산정되는 침투시간과 침투비유량은 Nash모형 및 Clark모형 외에도 Beta분포, Weibull 분포 등의 분포형 모형을 적용한 합성단위도 산정이 가능하기 때문에 특정 유역이나 지역적인 특성에 맞는 합성단위도법을 제시 할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구개발사업의 연구비지원(13AWMP-B066744-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bhunya, P. K., Berndtsson, R., Ojha, C. S. P. and Mishra, S. K. (2007). "Suitability of gamma, chi-square, weibull, and beta distribution as synthetic unit hydrographs." *Journal of Hydrology*, Vol. 334, No. 1-2, pp. 28-38.
- Bhunya, P. K., Mishra, S. K. and Berndtsson, R. (2003). "Simplified two-parameter gamma distribution for derivation of synthetic unit hydrograph." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 226-230.
- Black, P. E. (1972). "Hydrograph responses to geomorphic model watershed characteristics and precipitation variables." *Journal of Hydrology*, Vol. 17, pp. 309-329.
- Clark, C. O. (1945). "Storage and the unit hydrograph." *Trans. ASCE*, Vol. 110, pp. 196-223.
- Ham, D. G., Joo, J. G., Jeon, H. D. and Kim, J. H. (2008). "Study on derivation of fourth-order GIUH and revision of initial state probability." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 2, pp. 231-241 (in Korean).
- Joo, J. G., Yang, J. M. and Kim, J. H. (2011). "GIUH variation by estimating locations." *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 11, No. 1, pp. 85-91 (in Korean).
- Kim, J. G., Kim, J. M. and Kang, B. S. (2013). "Estimation of synthetic unit hydrograph using geospatial shape factors and nash model in mid-size watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 5, pp. 547-558 (in Korean).
- Korea Institute of Civil Engineering and building Technology (KICT) (2000). *Operation and Research on the Hydrological Characteristics of the Selma-Cheon Experimental Catchment-Development of Synthetic Unit Hydrograph* (in Korean).
- Kumar, R., Chatterjee, C., Singh, R. D., Lohani, A. K. and Kumar, S. (2007). "Runoff estimation for an ungauged catchment using geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) models." *Hydrological processes*, Vol. 21, pp. 1829-1840.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2009). *River design criteria* (in Korean).
- Nash, J. E. (1957). "The form of the instantaneous unit hydrograph." *IASH General Assembly of Toronto*, Vol. 45, pp. 114-121.

- Rodriguez-Iturbe, I., Devoto, G. and Valdes, J. B. (1979a). "Discharge response analysis and hydrologic similarity: The interrelation between the geomorphologic IUH and the storm characteristics." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1435-1444.
- Rodriguez-Iturbe, I., Gonzalez-Sanabria, M. and Bras, R. I. (1982). "A geomorphoclimatic theory of instantaneous unit hydrograph." *Water Resources Research*, Vol. 18, pp. 877-886.
- Rodriguez-Iturbe, I. and Valdes, J. B. (1979b). "The Geomorphologic structure of hydrologic response." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1420.
- Rosso, R. (1984). "Nash model relation to horton order ratios." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 7, pp. 914-920.
- Sherman, L. K. (1932). "Streamflow from rainfall by unit hydrograph method." *Engineering News Records*, Vol. 108, pp. 501-505.
- Viessman, W. and Lewis G. L. (2003). *Introduction to hydrology 5th edition*, Prentice Hall, New jersey, N.J.
- Yoon, T. H., Kim, S. T. and Kim, I. D. (2004). "Redefining of parameters of nakayasu synthetic unit hydrograph." *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 24, No. 5, pp. 403-412 (in Korean).