

중소규모유역의 지형공간적 형상계수를 이용한 Nash 모형기반의 합성단위도 산정

Estimation of Synthetic Unit Hydrograph Using Geospatial Shape Factors and Nash Model in Mid-size Watershed

김진겸* / 김종민** / 강부식***

Kim, Jin Gyeom / Kim, Jong Min / Kang, Boo Sik

Abstract

Improved methodology of Synthetic Unit Hydrograph (SUH) utilized generally in hydrologic design work was suggested. In this study, regression analysis between peak hydrological data and geospatial data was applied to estimate specific peak flow and peak time for determining shape of SUH. Regression formulas for specific peak flow with respect to shape factors show higher coefficient of determination (0.73~0.81) than the ones with geospatial components only (0.52~0.69). The areal limitation of unit hydrograph application is regarded as 500~700 km². The validation through rainfall-runoff simulation shows encouraging results that relative error is 1.7~29.0% (Avg. 11.6%) for the case of using SUH developed in this study and 35.0~64.9% (Avg. 46.7%) for the SUH in the previous study except for the extraordinary cases.

Keywords : synthetic unit hydrograph, nash model, representative unit hydrograph, shape factor

요 지

설계홍수량 산정 시 일반적으로 활용하는 합성단위도법에 대한 개선안을 제시하였다. 본 연구에서는 합성단위도의 형태를 결정짓는 첨두 비유량과 첨두시간의 결정을 위하여 첨두수문량과 유역의 지형공간적 형상계수간의 회귀분석을 시행한 결과, 유역의 단순 공간적 기하요소보다는 형상계수의 결정계수가 뚜렷이 높았으며, 유역의 지형특성영향을 독립적으로 검토할 경우 결정계수가 0.52~0.69에 그쳤으나, 지형특성이 조합된 형상계수를 이용하여 민감도분석을 해보면 결정계수가 0.73~0.81로 개선된 결과를 확인할 수 있었다. 일반적으로 단위도를 적용할 수 있는 적합한 유역의 면적은 대략 500~700 km²이라 볼 때, 이러한 영역에서 유역유출모의를 통한 본 연구의 합성단위도를 검증한 결과, 특이값이 발생하는 유역을 제외하고 본 연구결과의 상대오차가 1.7~29.0% (평균 11.6%)의 수준을 보여주었다. 합성단위도법 적용에 관한 기존사례(KICT, 2000)는 상대오차가 35.0~64.9% (평균 46.7%)를 보여주어 본 연구의 제안식이 기존에 비하여 개선된 결과를 보여주고 있다.

핵심용어 : 합성단위도, Nash 모형, 대표단위도, 형상계수

* 단국대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: jg_kim@dankook.ac.kr)

Ph.D., Course, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook Univ., Yongin 448-701, Korea

** 단국대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정 (e-mail: kimjongmin@dankook.ac.kr)

Master Course, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook Univ., Yongin 448-701, Korea

*** 교신저자, 단국대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수 (e-mail: bskang@dankook.ac.kr, Tel: 031-8005-3471)

Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook Univ., Yongin 448-701, Korea

1. 서 론

1.1 연구배경

유역 내 홍수방어를 위한 구조물을 설계할 경우나 홍수 피해 예방을 위한 제도적인 대책을 수립하기 위해서 설계 강우나, 실시간 혹은 예측강우 사상에 대한 홍수량 및 홍수수문곡선을 산출하는 수문분석 과정이 요구된다. 이를 테면 현업에서 도시계획이나 하천정비계획 또는 하천치수계획에서 유역유출에 의한 홍수량이나 홍수수문곡선을 구하기 위해서 유역평균 강우에 대하여 단위유량도(이하 '단위도')를 적용하여 직접유출수문곡선을 산정하는 경우가 일반적이다.

단위도에 대한 연구는 Clark (1945)에 의하여 개념이 정의 되었고, 그 이후로 다양한 방법을 통하여 단위도 산정에 대한 연구가 진행되었다. Nash (1957)는 개념적인 n 개의 직렬 선형저수지군으로 구성된 가상유역을 제안하였으며, Gamma 분포 확률밀도함수를 이용해 모멘트법에 의한 수학적인 순간단위도의 개념적 접근을 위한 기초를 확립하였다. 이러한 Nash 모형은 일반적으로 구조가 단순하고 유연성이 뛰어나 적용성이 우수한 장점을 가지고 있다. Dooge (1959)는 유역의 저류효과와 전이효과를 분리하여 개념적 순간단위도 모형을 일반화하였다. 이와 같이 순간단위도의 개념은 Clark (1945), Nash (1957), Dooge (1959) 등에 의하여 지속적으로 발전되어 왔다.

단위도의 기본가정에는 강우가 유역 내에서 시공간적으로 균일성을 갖는다는 조건이 있다. 즉, 강우지속기간 동안 강우강도가 일정해야하며 공간적으로도 균일하게 분포해야한다. 그러나 실제 자연강우의 경우 시간적 또는 공간적으로 다양하게 변화하기 때문에 이 가정은 일반적으로 부합되지 않고(Singh, 1988), 유역면적이 커질수록 오차가 급격히 증가한다. 이렇듯, 실제 강우-유출모의에 대한 적용성 논란에도 불구하고 비선형 유출해석의 어려움에 비하여 단위도 이론의 간편성 때문에 국내에서도 단위도를 이용한 연구가 많이 진행되어 왔으며 실무에서도 활발하게 활용되고 있다. KICT (1993)에서는 능형회귀법을 이용하여 단위도의 산정과 합성단위도를 개발하였고, Yoon (1994)은 Nash 모형과 Tank 모형을 이용하여 순간단위도의 비교연구를 수행하였다. 2000년대에 들어와서도 KICT (2000), Kim (2003), Kim et al. (2003), Jung (2007)에 의해 순간단위도의 산정 및 대표단위도에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 최근 Choi(2010)는 지형학적 순간단위도를 이용한 합성단위도의 산정에 관한 연구를 수행한 바 있다.

하지만 많은 연구에도 불구하고 단위도의 적용한계인 중소규모이하 유역에서 충분한 신뢰도를 확보한 단위도 산정은 여전히 개선의 여지가 많다는데 인식을 함께하고 있다. 이는 단위도의 형태를 결정짓는데 민감한 변수인 유역의 형상계수가 적절히 고려되지 못하고 있고, 기존에 검토되었던 형상계수가 유역의 기하학적 형상만을 반영할 뿐 유역의 출구위치를 기준으로 달라지는 유출특성이 반영되어 있지 못하다는데 주요한 원인이 있다. 이에 본 논문에서는 유역의 출구조건이 반영된 형상계수를 이용하여 개선된 단위도 산정기법을 제시하고자 한다.

1.2 연구목적

단위도를 산정하는 방법으로는 실제 강우-유출자료를 이용하는 법과 유역특성을 이용한 합성단위도법이 있는데, 실관측자료를 이용하는 법이 신뢰도가 높은 방법이지만 적용의 간편성 혹은 미계측지역에서의 자료가용성의 한계 때문에 현업에서는 합성단위도법이 매우 활발하게 활용되고 있다. 강우-유출 관측자료를 이용하여 단위도를 유도할 수 있는 검증된 프로그램의 부재도 중요한 이유 중의 하나이다. 또한 기본설계단계에서는 정밀한 수문곡선보다는 합리식과 같은 개략식을 사용한 침투유량 산정에 그치는 경우도 많다.

우리나라는 현재 수문자료와 검증된 방법론의 부재로 인하여 임의의 유역에 대한 대표단위도를 결정하기 어려운 상황이기 때문에, 주로 유역특성을 변수로 하여 해당 유역의 단위도를 결정하는 합성단위도법을 주로 사용하고 있다. 국내에서는 Clark, Nakayasu, Snyder, SCS 단위도법 등을 많이 사용하며, 설계실무에서는 설계홍수량산정에 있어서 Clark 합성단위도를 활발하게 사용하고 있다.

기존 연구에서는 과거 국내유역의 공간특성을 반영한 합성단위도법을 개발한 바가 있다(KICT, 2000). 개발된 합성단위도법은 미계측유역에서의 적용에 있어 기존의 단위도법보다 향상된 결과를 보여주었지만, 유역의 규모에 따라 달라지는 유출의 비선형적 특성을 고려하지 못하였다. 특히, 적용된 유역의 규모면에서 볼 때 5~4,500 km^2 의 매우 광범위한 유역에서 산출된 결과로부터 회귀식을 유도함으로써, 오히려 단위도 적용의 한계면적이라고 인식되는 1,000 km^2 이하 중소규모유역에서의 적용성에 대한 집중적인 연구가 필요한 이유도 있어왔다.

단위도법에 대한 적용은 유역의 규모에 따라 유출특성이 달라지고 유출계산 방법에도 다소 차이가 있는데, 이 중 유역규모에 대한 기준이 연구문헌이나 기관마다 다소 상이하게 제시되는 부분이 있다. NRCC (1989)에서는 유

역의 규모에 따른 강우특성과 유출특성을 고려하여 설계 홍수수문곡선의 결정을 위한 유출계산방법을 Table 1과 같이 제시하였다.

국내 유역종합치수계획상에는 대규모 자연하천 유역의 분할된 소유역 면적은 가급적 50~1,000 km²의 이내가 되도록 권장하고 있고, Viessman and Lewis (1995)는 단위도의 산정을 위한 면적의 상한치를 약 2,600 km² 정도로 보고 있다. 그러나 한강 유역종합치수계획 보고서(MLTM, 2009)에서 산정한 소유역 분할을 분석한 결과 183개의 소유역 중 181개의 소유역에서 700 km² 이하의 면적을 갖는 특성이 있었다. 대유역의 유출계산은 전체유역을 적절한 개수의 소유역과 하도구간으로 분할하여 소유역에 단위도를 적용하고, 하도구간에서는 홍수추적을 축차적으로 수행하여 수문곡선을 합성해 나가야 한다. 대유역의 경우 소유역 분할을 통한 각각의 중소규모 유역별로 단위도를 적용하기 때문에 국내에서 개발된 합성단위도법의 적용 범위 축소를 통해 경험식의 신뢰성을 높일 필요가 있다고 판단된다. 본 연구에서는 국내의 수문특성을 반영하여 700 km² 이하의 유역의 특성을 이용하여 합성단위도 산정 기법을 개선하였다.

2. 연구방법 및 이론

2.1 기존의 합성단위도법

KICT (2000)은 과거 국내 단위도 연구성과들을 종합하고, 건기연에서 운영중인 설마천 시험유역의 2지점과 IHP 유역 17개 지점의 단위도 유도 결과를 추가하여 총 70개 지점의 단위도 유도 결과와 유역특성인자와의 단계별 다중회귀분석을 이용하여 Nash 모형 기반의 합성단위도법을 제시하였다. KICT (2000)의 연구에서 이용된 대상지점의 유역면적은 5~4,500 km²로서 소유역이 다수 포함되어 있고 70개 지점의 결과를 포괄하고 있다.

대상지점에 대한 유역특성인자와 단위도 특성치(침투

비유량, 침투시간)간의 다중회귀식을 제안하였으며, 제안된 식을 이용하여 단위도의 침투 비유량과 침투시간을 산정할 수 있도록 하였다. 이 때 제시된 회귀식은 유역면적의 경우 5~4,500 km²이며, 유로연장의 경우 3.10~219.53 km, 유로경사는 0.000757~0.040570의 범위를 갖는다.

$$t_p = 0.9580A^{0.255}L^{-0.037}S_c^{-0.136} \quad (1)$$

$$q_p = 0.2395t_p^{-0.637} \quad (2)$$

여기서, A는 유역면적(km²), L은 유로연장(km), S_c는 유로경사이며 Eq. (1)을 통해 계산되는 침투시간 t_p의 단위는 시간(hr)이다. 그리고 Eq. (2)를 통해 산정되는 침투 비유량 q_p의 단위는 cm/hr이며, 단위환산과정을 거치면 유량 단위(m³/s)로 환산할 수 있다.

합성단위도의 종거를 계산하기 위해서는 Nash 모형을 이용하였다. Nash 모형에 의하면 유역은 N개의 선형저수지의 조합으로 표현되며, 첫 번째 저수지에 대한 입력단위에 의해 생기는 N번째 저수지의 출력은 다음 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_n(t) = \frac{1}{K} \left(\frac{t}{K}\right)^{N-1} \frac{e^{-t/K}}{\Gamma(N)} \quad (3)$$

여기서, q_n(t)는 t 시간에서의 비유출량(cm/hr), N은 저수지의 개수, K는 저류상수(hr)이며, Γ(N)는 Gamma 함수이다. 이 식을 미분하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{N-1}{t} (N-1)^{N-1} e^{-(N-1)t/K} = q_p \cdot t_p \quad (4)$$

여기서, q_p와 t_p는 각각 단위도의 침투 비유량(cm/hr)과 침투시간(hr)이다. Eq. (4)를 이용하여 저수지의 수 N을 결정할 수 있고, N이 결정되면 다음의 관계식을 이용하여 저류상수 K를 결정할 수 있다.

Table 1. Discharge Estimating Method by Watershed Scale

Subject	Small size	Mid size	Large size
Watershed area	Less than 25 km ²	20~250 km ²	Above 250 km ²
Rainfall intensity	Constant	Variety	Variety
Rainfall distribution	Uniform	Uniform	Non uniform
Discharge type	Ground discharge	Ground and channel discharge	Ground and channel discharge, Storage effect
Discharge estimating method	Rational formula, Unit hydrograph	Unit hydrograph	Unit hydrograph (Routing and synthetic)

$$K = \frac{t_p}{N-1} \quad (5)$$

따라서 Eqs. (1) and (2)를 이용하여 단위도의 침투 비유량과 침투시간을 결정하면 Eqs. (4) and (5)를 이용하여 매개변수 N, K를 결정할 수 있고, 이를 Eq. (3)에 대입하면 시간에 따른 비유출량의 변화, 즉 단위도의 종거를 계산할 수 있다.

2.2 합성단위도 개선을 위한 연구수행 방법

KICT (2000)에서 개발된 합성단위도는 시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구과업의 일환으로 17개의 대상유역에 대한 수문분석과 과거 국토해양부와 건기연에서 수행되었던 대표단위도의 연구결과를 이용하여, 유역특성 인자와 단위도의 특성치와의 단계별 회귀분석을 통한 합성단위도법을 제시하였다. 합성단위도의 개발을 위해 기수행된 과업의 연구결과들은 강우사상, 유효우량 산정, 기저유량 분리, 강우사상별 단위도, 대표단위도 산정기법 등으로 다른 연구수행방법의 결과이므로 그 결과 역시 일관된 성격을 띄고 있다고 보기 어렵다. 이에 본 연구에서는 기 개발된 합성단위도의 산정방법과 동일한 과정을 갖지만, 주요인자들을 산정하는데 있어서 차별성을 두고 연구를 진행하였으며, Table 2와 같은 방법을 적용하여 연구를 수행하였다.

강우사상별 단위도의 산정은 Nash 모형의 순간단위도를 이용하여 1 cm-1 hr 단위도를 산정하였으며, 강우사상별 단위도의 침투 비유량 및 침투시간의 평균을 다시 Nash 모형에 적용하여 지점별 대표단위도를 산정하였다. 각 지점에서 산정된 대표단위도의 특성인자와 유역특성 인자간의 다중회귀식을 이용하여 침투 비유량과 침투시간을 결정한 후, Nash 모형의 적용을 통하여 최종적으로 합성단위도를 산정하였다.

3. 대상유역의 선정 및 분석

Table 2. Comparison of Methodologies for Developing Synthetic Unit Hydrograph

Items	KICT (2000)	This study
Baseflow separation	Constant line method	Local Minimum Method
Unit hydrograph	Ridge regression method	Nash model
Rainfall event	Complex rainfall events	Single rainfall events
Parameter of synthetic unit hydrograph	Area, Stream length, Stream bed slope	Area, Stream length, Stream bed slope, Shape factors
Range of watershed area	5~4,500 km ²	Less than 700 km ²

3.1 대상유역선정

본 연구에서 단위도의 실제적인 적용이 가능한 범위라고 판단되는 약 700 km² 이하의 유역을 선택하여 연구를 진행하였으며, 대상유역은 한강수계인 각시교, 흑천교, 평창, 금강수계인 천천, 탄부, 낙동강수계인 효령, 미성, 영산강 수계인 고산유역을 선택하였다.

특히, 각시교, 흑천교, 천천, 고산유역의 면적은 4개의 유역 모두 약 300 km²로 비슷하지만 유로연장은 각각 25.2~42.8 km 범위를 보인다. 수문분석에서 가장 흔히 사용하는 형상계수는 Horton 형상계수(F_H), Snyder 형상계수(F_S), 그리고 원형면적비(F_{CA})이다. 4개 유역에 대한 Horton 형상계수(F_H)는 0.16~0.45, Snyder 형상계수(F_S)는 4.32~7.23, 그리고 원형면적비(F_{CA})는 0.173~0.269로 산정되었다. F_H와 F_S는 형상계수산정에 있어서 하천연장을 활용함으로써 자연스럽게 출구위치가 고려되었고, 따라서 변화의 패턴이 유사하다. 유역출구를 기준으로 판단하면 평창유역이 가장 세장형이고, 고산유역이 가장 부채꼴에 가까운 형태이다. F_H와 F_S는 이러한 형상특성을 잘 반영하고 있다. 그러나 F_{CA}는 출구와 관계없이 기하학적 형상만으로 산정된 계수이기 때문에 형상계수와 유출간의 분산도가 F_H 및 F_S에 비하여 매우 큰 경향을 보이고 있다. F_{CA}의 경우 각시교유역에서 최소값을, 효령유역에서 최대값을 보이고 있다. 전체 대상유역의 특성인자는 Table 3에 나타나 있으며, 형상특성 인자는 Table 4에 정리하였다.

3.2 강우-유출 사상

계측된 하천유역에 대한 단위도를 유도하기 위해서는 호우사상별 강우량과 하천유량 자료가 필요하다. 단위도를 산정하기 위해서 유역내의 수위관측소와 유역의 유출에 영향을 미치는 강우관측소의 강우사상을 선택하였다. 유역의 강우-유출에 영향을 미치는 강우관측소가 2개 이

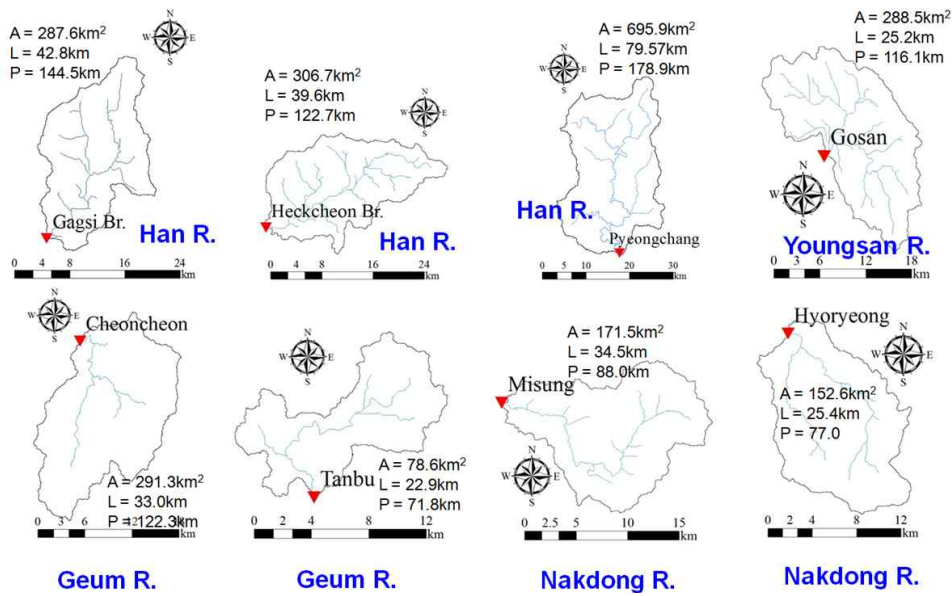


Fig. 1. Plane of Target Watershed

Table 3. Watershed Characteristics

River	Watershed	Area (km ²)	Stream length (km)	Stream length of watershed centroid (km)	Stream bed slope (m/m)	Watershed perimeter (km)
		A	L	LCA	S	P
Han	Gagsi Br.	287.6	42.80	17.09	0.021	144.5
	Heukcheon Br.	306.7	39.56	17.06	0.018	122.7
	Pyeongchang	695.9	79.57	44.83	0.016	178.9
Geum	Cheoncheon	291.3	32.95	13.38	0.024	122.3
	Tanbu Br.	78.58	22.93	12.78	0.028	71.82
Nakdong	Hyoryeong	152.6	25.37	15.29	0.037	77.04
	Misung	171.5	34.51	23.17	0.016	87.96
Youngsan	Gosan	288.5	25.19	5.22	0.018	116.1

Table 4. Watershed Shape Characteristics

River	Watershed	Horton's Shape Factor, F_H	Snyder's Shape Factor, F_S	Circularity Area Ratio, F_{CA}
		$\frac{A}{L^2}$	$(LL_{ca})^{0.3}$	$\frac{A}{A_0}$
Han	Gagsi Br.	0.157	7.23	0.173
	Heukcheon Br.	0.196	7.06	0.256
	Pyeongchang	0.110	11.63	0.273
Geum	Cheoncheon	0.268	6.21	0.245
	Tanbu Br.	0.149	5.50	0.191
Nakdong	Hyoryeong	0.237	5.98	0.323
	Misung	0.144	7.43	0.279
Youngsan	Gosan	0.455	4.32	0.269

A_0 : The area of a circle having a perimeter equal to the perimeter of watershed.

상인 유역은 티센 가중치를 이용하여 유역의 평균강우를 산정하였다.

4. 합성단위도의 개선

4.1 대표단위도 산정을 위한 특이값 제거

유역의 강우사상별 단위도를 산정하여 도시한 결과, 단위도의 형상이 해당유역의 일반적인 형상과 상이한 형상을 보이는 특이값이 대표단위도의 형태를 왜곡시킬 수 있다고 판단되었다. 특이값을 갖는 강우사상의 단위도는 강우의 발생으로 인한 유출이 끝나기 전에 새로운 강우의 발생으로 인하여 충분한 기저시간의 확보가 이루어지지 않기 때문에 단일호우사상의 특성과는 다른 형태를 보이고 있다. 대상유역 중 각시교, 평창, 탄부교, 천천, 고산유역에서의 특이값 제거를 통한 단위도의 오차율을 감소시켜 대표단위도를 산정하였다. 나머지 유역의 경우는 일반적인 단위도의 패턴과 상이하게 나타나는 강우사상들은 없다고 판단하여 산정된 모든 단위도를 적용하여 대표단위도를 산정하였다.

각시교유역의 경우 특이값을 제거하여 대표단위도를

산정할 시 침투 비유량의 RMSE가 감소하였으나, 침투시간은 약간 증가하였다. 평창, 탄부교, 천천, 고산유역은 침투시간과 침투 비유량에 대한 RMSE값이 모두 감소하였다.

단위도는 다양한 강우사상에 대해 산정하게 되는데, 강우사상을 선택하고, 직접유출량을 산정하는 방법에 따라서 단위도의 형태가 달라질 수 있기 때문에 신중한 수문분석이 필요하다. 최대한 연구자의 주관적인 기준을 배제하고자 동일한 기법으로 단위도를 산정하였음에도 불구하고 여러 패턴을 갖는 단위도가 산정되었다. 특이값들의 제거 결과, 대부분의 지점에서 침투시간과 침투 비유량의 RMSE의 값이 감소하였는데, 침투 비유량의 경우 최저 10.3%에서 최고 65.0%의 감소를, 침투시간의 경우 각시교와 고산을 제외하고는 9.2~24.8%의 감소를 보여주고 있다.

4.2 유역별 대표단위도의 비교

대상유역으로 선정된 유역의 강우사상을 바탕으로 유역의 유출특성을 나타낼 수 있는 대표단위도를 산정하였다. 단위도의 기본가정에 따르면 유역전체에 대하여 시공

Table 5. Rainfall-discharge Events for Deriving Unit Hydrograph

River	Watershed	Rainfall-discharge events
Han	Gagsi Br.	May. 7, 2003 and 10 events
	Heukcheon Br.	Jun. 27, 2003 and 9 events
	Pyeongchang	May. 6, 2006 and 4 events
Geum	Cheoncheon	May. 18, 2008 and 5 events
	Tanbu Br.	Jul. 7, 2004 and 9 events
Nakdong	Hyoryong	May. 19, 2006 and 8 events
	Misung	May. 19, 2006 and 8 events
Youngsan	Gosan	Jul. 17, 2004 and 7 events

Table 6. RMSE of Specific Peak Discharge and Peak Time by Outlier

Watershed	Outlier included		Outlier excluded			
	RMSE _{q_p}	RMSE _{t_p}	RMSE _{q_p}	RMSE _{t_p}	Improvement, % (RMSE _{q_p})	Improvement, % (RMSE _{t_p})
Gagsi Br.	0.0113	5.4553	0.0071	5.9214	37.2	-8.5
Heukcheon Br.	0.0156	3.0071	0.0156	3.0071	0.0	0.0
Pyeongchang	0.0088	7.3742	0.0041	6.4515	53.4	12.5
Cheoncheon	0.0097	2.4920	0.0087	2.2623	10.3	9.2
Tanbu Br.	0.0160	2.9196	0.0056	2.1951	65.0	24.8
Hyoryong	0.0065	3.4350	0.0065	3.4350	0.0	0.0
Misung	0.0064	4.4242	0.0064	4.4242	0.0	0.0
Gosan	0.0253	3.1466	0.0158	3.1152	37.5	1.0

간적으로 균일한 강우사상을 선택하여야 하며 유역면적의 제한, 직접유출량의 범위 등을 바탕으로 산정하여야 한다. 단위도를 유도하기 위한 최적의 강우형태는 실제 사상에서 거의 발생하지 않으며, 만일 발생한다 하더라도 자료의 표본수가 부족할 수밖에 없다. 본 연구에서는 최대 단위도 유도에 적합한 단일호우사상에 대하여 단위도를 산정하였다.

각 유역의 특성과 대표단위도의 특성인자는 Table 7과 같으며 유역별 대표단위도의 형상은 Fig. 2와 같다. 유역별 대표단위도의 특성을 살펴보기 위하여 단위도의 형상을 결정짓는 첨두 비유량 및 첨두시간과 유역의 지형특성(유역면적, 하천연장, 유역경사, 하천경계연장 등) 및 유역형상계수와와의 상관성을 비교하였다. 먼저 유역의 지형특성과의 상관성분석결과(Fig. 3), 첨두 비유량은 하천연장 혹은 하천중심연장과 비교적 뚜렷한 비례관계를 보이고 있었다. 반면에 유역면적과 유역경계연장과는 반비례관계를 보이는 듯하지만 결정계수는 매우 낮은 편이었다. 이는 첨두 비유량 자체가 단위면적에 대한 수문량을 나타내기 때문에 어느 정도 면적에 대한 표준화가 되어있는 수치이기 때문인 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 특이점으로 판단할 수 있는 유역을 제외한다면 대체로 첨두

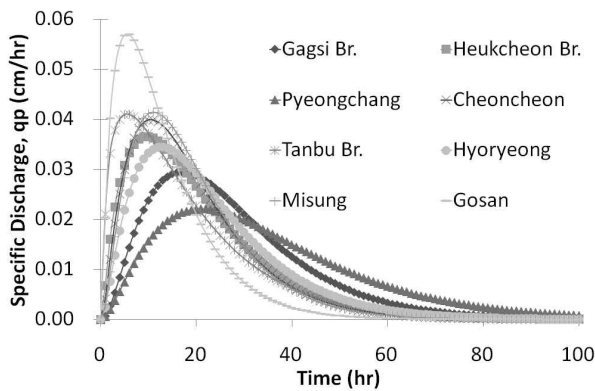


Fig. 2. Comparison of Representative Unit Hydrograph

Table 7. Characteristics of Representative Unit Hydrograph

River	Watershed	q_p (cm/hr)	t_p (hr)	N	K
Han	Gagsi Br.	0.029	17.1	2.667	9.963
	Heukcheon Br.	0.037	9.7	1.856	10.73
	Pyeongchang	0.022	21.2	2.468	14.10
Geum	Cheoncheon	0.041	5.7	1.402	12.72
	Tanbu Br.	0.040	10.6	2.166	8.620
Nakdong	Hyoryeong	0.035	12.7	2.270	9.610
	Misung	0.033	13.9	2.377	9.721
Youngsan	Gosan	0.057	5.6	1.675	7.551

비유량이 유역면적에 대하여 반비례함을 보여주는데 이는 시사점이 있는 것으로 판단된다. 다시 말해 첨두유량은 유역면적이 작을 때는 면적에 따라 급격히 감소하지만, 유역이 일정규모 이상이 되면 매우 완만하게 감소함을 의미한다. 이는 하천경계연장과의 민감도분석에서도 마찬가지로 나타나고 있다.

Fig. 4는 형상계수에 대한 첨두 비유량의 상관성분석 결과이다. 앞서 언급했듯이 형상계수와 유출간의 분산도 측면에서 F_{CA} 에 비하여 F_H 나 H_S 가 훨씬 유출과 뚜렷한 상관관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 유역면적이 동일한 유역일 경우에는 F_H 가 커짐에 따라서 유역의 유출반응이 빠르게 일어나 첨두유량은 증가하며 첨두시간은 짧아지는 형상을 보이고 있다. 유역의 지형특성영향을 독립적으로 검토할 경우 결정계수가 0.52~0.69에 그쳤으나, 지형특성이 조합된 형상계수를 이용하여 상관성분석 수행 시 결정계수가 0.73~0.81로 훨씬 개선된 결과를 확인할 수 있다.

4.3 합성단위도 유도를 위한 다중회귀분석

합성단위도를 산정하기 위해서 KICT (2000)에서는 각 지점에 대한 유역특성인자와 지점별 대표단위도의 특성치와 단계별 다중회귀분석을 통하여 가장 상관성이 높은 인자들에 대한 회귀식을 산정하였다. 본 연구에서는 8개 소유역의 유역특성을 이용한 새로운 합성단위도 회귀식을 산정하여 적용성을 판단하였다.

$$t_p = 2.936F_H^{-0.116}F_S^{2.327}L^{-0.466}S^{-0.005} \quad (6a)$$

$$q_p = 1.245t_p^{-0.056} \quad (6b)$$

$$t_p = 2.048A^{0.524}F_H^{-0.750}S^{0.628} \quad (7a)$$

$$q_p = 0.2395t_p^{-0.367} \quad (7b)$$

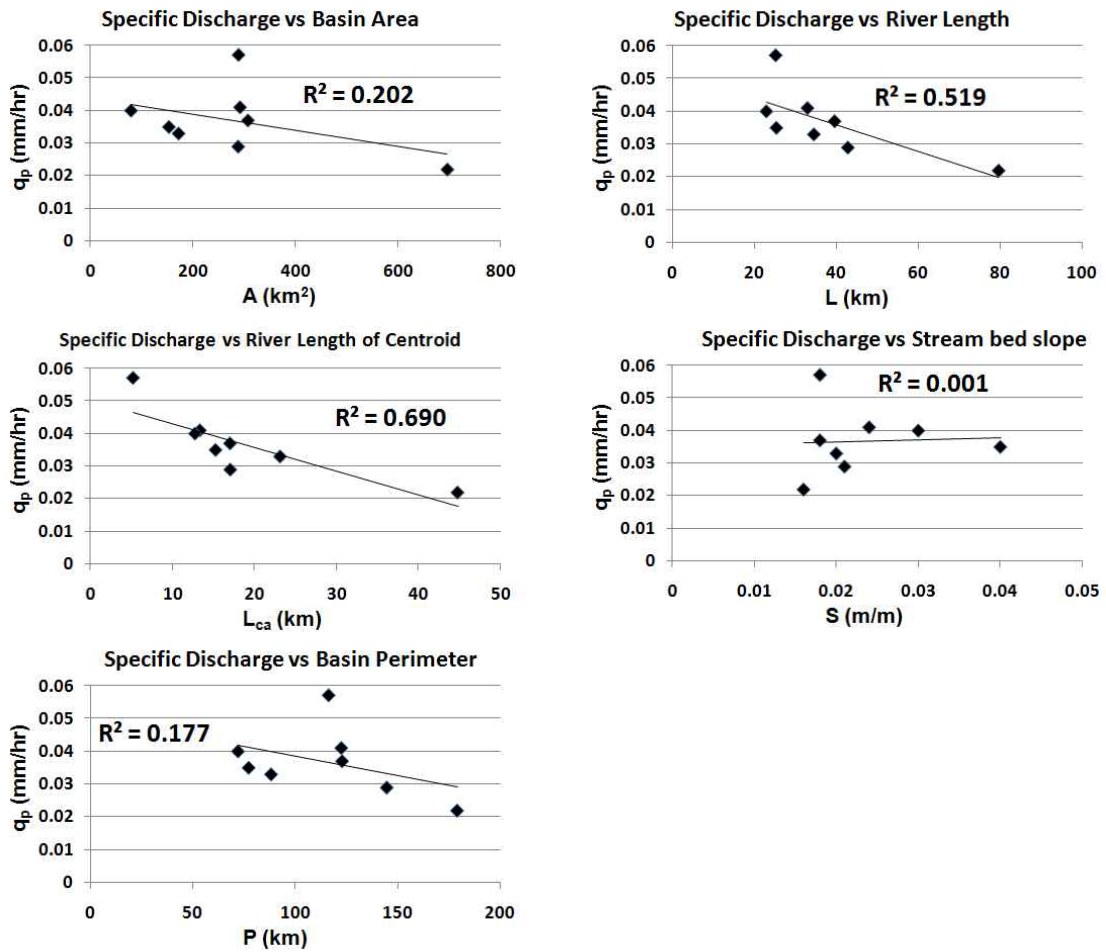


Fig. 3. Correlation Analysis of Specific Peak Discharge and Watershed Characteristics

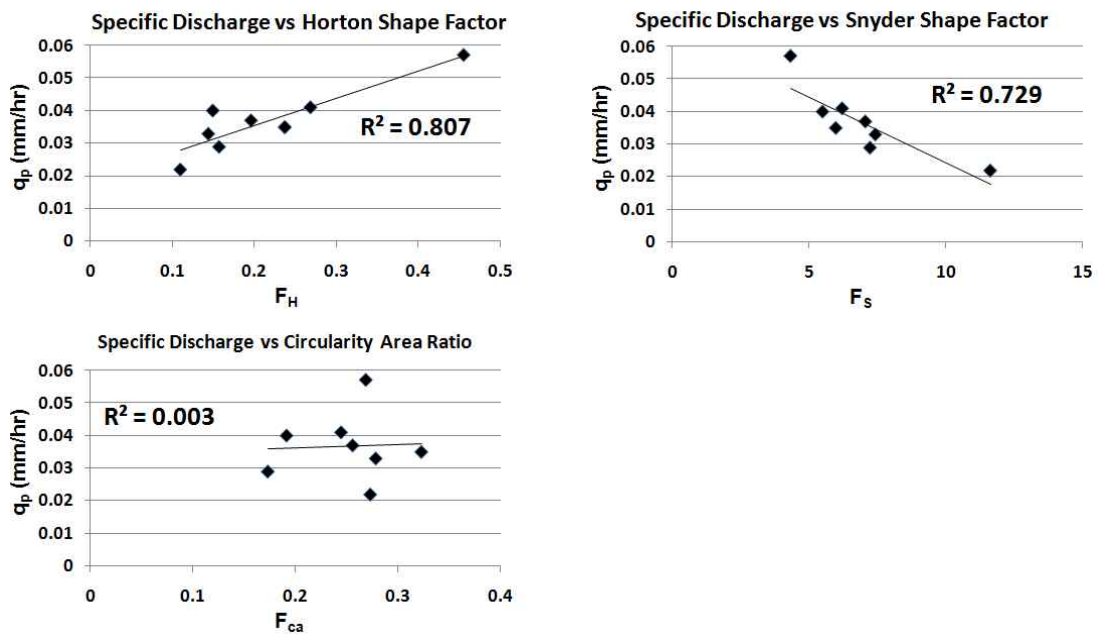


Fig. 4. Correlation Analysis of Specific Peak Discharge and Watershed Shape Characteristics

$$t_p = 2.585F_H^{-1.235}F_S^{-1.188}F_{CA}^{-0.566}L^{0.695} \quad (8a)$$

$$q_p = 0.147t_p^{-0.593} \quad (8b)$$

$$t_p = 3.602F_H^{0.524}F_{CA}^{-0.725}L^{0.452}S^{0.393} \quad (9a)$$

$$q_p = 0.126t_p^{-0.367} \quad (9b)$$

여기서, A는 유역면적(km²), F_H는 Horton 형상계수, F_S는 Snyder 형상계수, F_{CA}는 원형면적비, L은 하천유로연장(km), S는 하천유로경사, q_p는 침투 비유량(cm/hr), t_p는 침투시간(hr)이다. 각 회귀식의 결정계수(R²)는 다음 Table 8과 같다.

Eqs. (6)~(9)의 결정계수를 살펴본 결과, Eq. (9)가 결정계수가 가장 높았으며 이를 중소규모 미계측유역의 형상특성인자를 통해 대표단위도의 침투시간과 침투 비유량을 유도할 수 있는 회귀식으로 채택하였다.

4.4 회귀식에 의한 합성단위도의 검증

본 연구에서 산정된 합성단위도 회귀식의 검증을 위하여 8개의 대상유역의 강우자료와 유출량 자료를 이용하여 직접유출수문곡선으로 도시하고, 기존의 합성단위도와 본 연구에서 개선된 합성단위도를 이용하여 수문곡선의 비교를 Fig. 5와 같이 실시하였다.

계산에 의하여 산정된 합성단위도법은 직접유출수문곡선에 비하여 완만한 형태를 띠고 있지만, 수문곡선의 형상 및 침투유량과 침투시간은 비슷한 형상을 보이고 있다. 건기연의 합성단위도법에 의한 수문곡선은 실제 관측 수문곡선보다 과다 산정되는 경향이 있으며, 적용 지점에 따라 본 연구의 합성단위도법은 과소 추정되는 경향을 보

이고 있다. Table 9는 직접유출수문곡선과 본 연구의 합성단위도법, 건기연의 합성단위도법을 적용한 수문곡선의 침투값이며, 흑천교, 탄부교, 효령, 미성 지점에서는 본 연구의 합성단위도로 산정된 수문곡선과 관측수문곡선의 침투값이 거의 일치함을 알 수 있으며, 기존의 건기연 합성단위도법보다 나은 결과를 나타내고 있다고 판단된다. 본 연구의 합성단위도를 사용할 경우 평창, 고산 유역의 경우에는 모의값이 관측침투값에 크게 못미치는 결과를 보였지만, 나머지 유역에서는 본 연구결과의 상대오차가 1.7~29%(평균 11.6%)의 수준을 보여주었다. 기존의 합성단위도법의 적용에서는 탄부와 효령유역에서 특이값이 발생하였으며 이를 제외한 나머지 유역에서는 상대오차가 35.0~64.9%(평균 46.7%)를 보여주어 본연구의 제안식이 기존의 합성단위도기법에 비하여 개선된 결과를 보여주고 있다.

5. 결 론

단위도적용이 실질적으로 이루어지는 규모의 유역에 개선된 합성단위도법을 제시하고자 본 연구를 진행하였다. 한강, 금강, 낙동강, 영산강 수계에서 총 8개의 유역을 대상으로 유역분석 및 수문분석을 통한 대표단위도를 산정하고, 단위도의 특성과 유역특성인자와의 상관관계 분석을 통하여 합성단위도법의 일반화를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기존의 회귀식은 유역면적 4,500 km²까지의 범위를 가지고 있어 실제 단위도의 적용범위에서 크게 벗어난다. Integrated Flood Management in Han River Basin (2009) 보고서 상의 소유역 분할을 분석한 결과 183개의 소유역중 181개의 소유역에서 700 km²

Table 8. Coefficient of Determination of Regression Formula

No.	Regression formula	Coefficient of determination (R ²)
I	$t_p = 2.936F_H^{-0.116}F_S^{2.327}L^{-0.466}S^{-0.005}$	0.286
	$q_p = 1.245t_p^{-0.056}$	0.170
II	$t_p = 2.048A^{0.524}F_H^{-0.750}S^{0.628}$	0.734
	$q_p = 0.2395t_p^{-0.367}$	0.901
III	$t_p = 2.585F_H^{-1.235}F_S^{-1.188}F_{CA}^{-0.566}L^{0.695}$	0.772
	$q_p = 0.147t_p^{-0.593}$	0.833
IV	$t_p = 3.602F_H^{0.524}F_{CA}^{-0.725}L^{0.452}S^{0.393}$	0.841
	$q_p = 0.126t_p^{-0.367}$	0.928

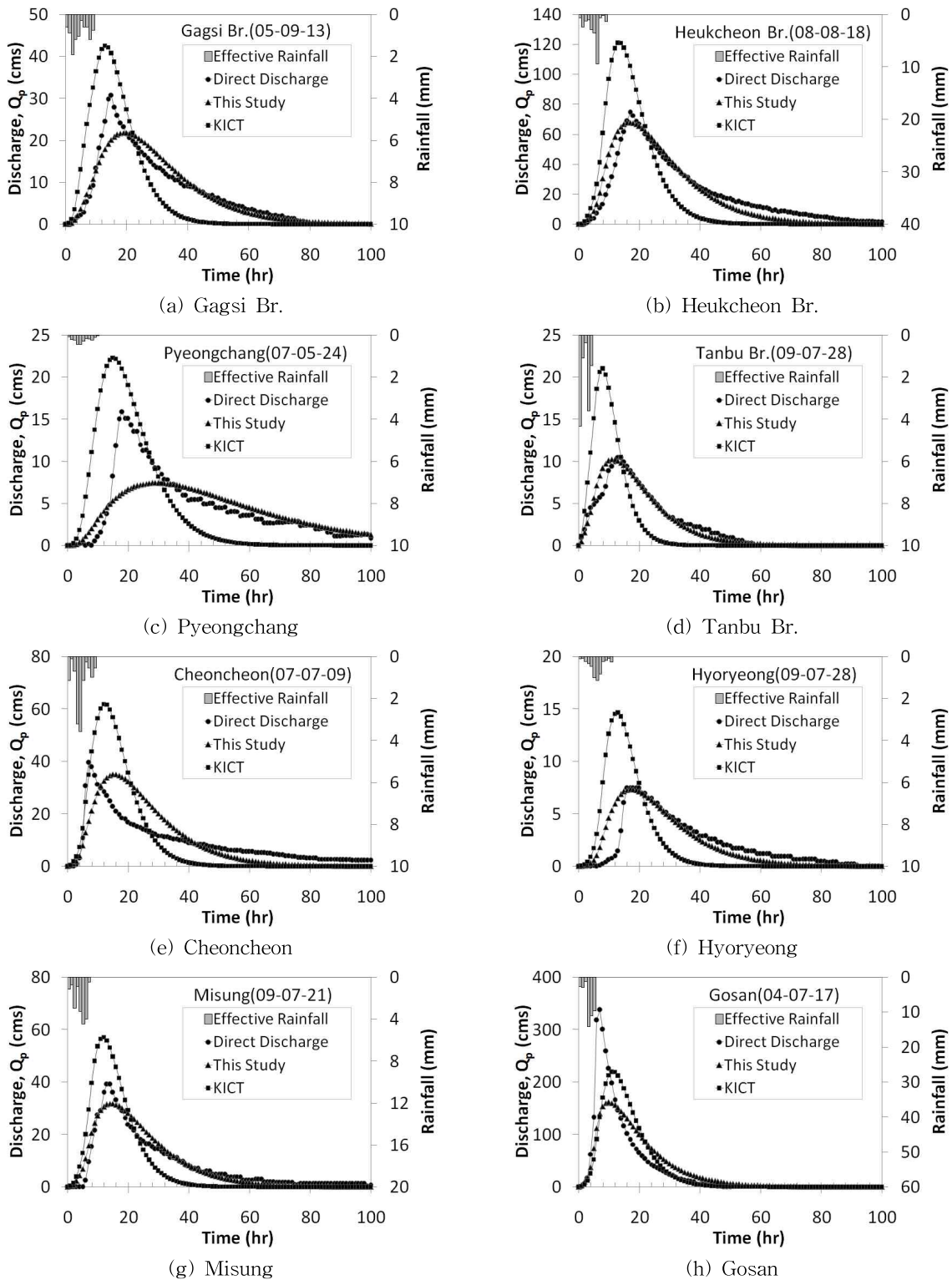


Fig. 5. Comparison of Direct Discharge and Synthetic Unit Hydrograph Method

이하의 면적을 보이고 있으며, 또한 대규모의 자연 하천 유역의 분할된 소유역 면적은 가급적 50~1,000 km²의 규모를 갖는 것을 권장하고 있다. 따라

서 본 연구에서는 국내의 수문특성을 반영하여 개발된 기존의 합성단위도법을 실무에서 적용 가능한 약 700 km²의 중소유역에 대한 합성단위도법으로 개선

Table 9. Comparison of Peak Hydrological Data

River	Watershed	Peak flow(cms)			Peak time(hr)		
		Obs.	This study (Relative error)	Previous study* (Relative error)	Obs.	This study	Previous study*
Han	Gagsi Br.	30.72	21.80 (-29.0%)	42.53 (-38.4%)	15	20	13
	Heukcheon Br.	72.75	67.96 (-6.6%)	120.0 (-64.9%)	18	17	13
	Pyeongchang	15.89	7.44 (-53.2%)	22.28 (-40.2%)	18	29	15
Geum	Cheoncheon	10.42	10.23 (-1.8%)	21.03 (-101.8%)	13	11	8
	Tanbu Br.	39.61	35.03 (-11.6%)	61.83 (-56.1%)	7	15	12
Nakdong	Hyoryong	7.48	7.35 (-1.7%)	14.65 (-95.9%)	16	17	13
	Misung	39.21	31.76 (-19.0%)	57.02 (-45.4%)	14	14	12
Youngsan	Gosan	337.8	161.5 (-52.2%)	219.5 (-35.0%)	7	10	11

*KICT (2000)

하였다.

- 2) 강우사상별 단위도를 산정하기 위하여 강우 및 수위 자료를 이용하여 단일호우사상에 대한 단위도를 Nash의 순간단위도법을 적용하여 산정하였다. 유역별 강우사상에 따른 단위도의 침투시간 및 침투 비유량의 단순평균을 통하여 평균값을 산정한 후 이를 다시 Nash 모형에 적용함으로써 각 유역의 대표단위도를 산정하였다.
- 3) 각 유역에서 산정된 대표단위도의 침투 비유량 및 침투시간을 바탕으로 유역특성인자 및 형상특성인자와의 상관관계분석을 통한 회귀모형을 선정하였다.
- 4) 일반적으로 유역의 유출특성과 형상계수는 밀접한 관계가 있다. 기존의 합성단위도법으로 산정된 비침투시간과 침투 비유량은 유역의 형상특성인자를 고려하지 않았기 때문에 본 연구에서는 유역의 형상특성인자를 포함한 다중회귀식을 산정하였다. 기존의 합성단위도법과 본 연구의 합성단위도법의 침투 비유량 및 침투시간은 상당한 차이를 보이고 있으며, 이는 과거에는 복합강우사상을 사용하였으나, 본 연구에서는 단일호우사상에 대한 단위도의 분석으로 인하여 차이가 발생한 것으로 판단되며, 적용 유역의 면적 규모의 차이로 인하여 발생하는 오차로 판단된다.
- 5) 특이값이 발생하는 유역들을 제외한 나머지유역에서의 본 연구 합성단위도와 기존의 합성단위도를 이용하여 유출수문곡선을 모의한 결과 본 연구결과의 상대오차는 1.7~29%(평균 11.6%)의 수준을 보여주었으며, 기존의 합성단위도법의 적용에서는 상대오차가 35.0~64.9%(평균 46.7%)를 보여주어 본 연구의 제안식이 기존의 합성단위도기법에 비하여

개선된 결과를 보여주고 있다.

본 연구를 통하여 실제 설계를 위한 유역분할 규모에서의 합성단위도를 산정함으로써 기존의 건기연에서 개발된 합성단위도법을 개선하였고, 대상유역으로 선정된 유역에서의 대표단위도를 기반으로 미계측 유역에서의 단위도 정보를 제공하는데 의의가 있다. 침투회귀식으로 계산한 단위도 정보는 본 연구에서 사용한 Nash 단위도에 실무에서 주로 쓰이는 Clark 단위도에도 응용할 수 있을 것이라 판단되며, 향후 본 연구의 결과를 일반화하기 위해, 다양한 조건을 갖는 유역과 유역형상을 나타내는 추가적인 인자를 포함하여 분석을 수행하고 실무에서 주로 사용하는 Clark 단위도와도 비교를 수행한다면 매우 의미있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

Choi, Y.J. (2010). *Development of Synthetic Unit Hydrograph Considering Geomorphological Dispersion*. Ph. D. dissertation, Chungbuk University, Cheongju, Korea, pp. 47-54 (in Korean).

Clark, C.O. (1945). "Storage and the unit hydrograph." *Trans. ASCE*, Vol. 110, pp. 196-223.

Dooge, J.C.I. (1959). "A general theory of the unit hydro-

- graph." *J. Geophys. Res.*, Vol. 64, pp. 241-256.
- Jung, J.Y. (2007). *Continuous Streamflow Simulation Using Baseflow Separation and Nash's Instantaneous Unit Hydrograph*. Master dissertation, Dankook University, Cheonan, Korea, pp. 3-16 (in Korean).
- KICT (1993). *Study on Development of Water Resources Management Scheme*. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, pp. 711-717.
- KICT (2000). *Operation and Research on the Hydrological Characteristics of the Selma-Cheon Experimental Catchment-Development of Synthetic Unit Hydrograph*, Korea Institute of Construction Technology, pp. 235-236 (in Korean).
- Kim, D.M. (2003). *A Study on Runoff based on Geomorphologic IUH in the Nam River Dan Basin*. Master dissertation, Gyeongsang National University, Jinju, Korea, pp. 17-27 (in Korean).
- Kim, J.C., Jung, K.S., and Kim, J.H. (2003). "The Estimation of Representative IUH Considering Geomorphological Factors." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 36, No. 1, pp. 23-32(in Korean).
- MLTM (2009). *Integrated Flood Management in Han River Basin*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, pp. 8.8-8.11 (in Korean).
- Nash, J.E. (1957). "The form of the instantaneous unit hydrograph." *IASH General Assembly of Toronto*, Vol. 45, pp. 114-121.
- NRCC (1989). *Hydrology of Floods in Canada : A Guide to Planning and Design*, Editor W.E. Watt., pp. 149.
- Singh, V.P. (1988). *Hydrologic System Rainfall runoff Modeling*, Vol. I. Prentice-Hall, pp. 22-27.
- Viessman, W., Jr., and Lewis, G.L. (1995) *Introduction to Hydrology*, 4th Ed., Prentice-Hall, New Jersey.
- Yoon, J.I. (1994). *A Comparative Study on Nash Model and Tank Model*. Master dissertation, Konkuk University, Seoul, Korea, pp. 5-23 (in Korean).

논문번호: 13-010	접수: 2013.01.24
수정일자: 2013.03.05	심사완료: 2013.03.05