

홍수도달시간 산정방법이 설계홍수량에 미치는 영향

권기대 · 이준호* · 강미정* · 지홍기*

영남대학교 건설시스템공학과

* 영남대학교 방재연구소

Effect of Estimation for Time of Concentration on the Design Flood

Ki Dae, Kwon · Jun Ho, Lee* · Mi Jeong, Kang* · Hong Kee, Jee⁺

Department of Civil & Environmental Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan City, Korea

* Prevention of Disaster Research Center, Yeungnam University, Gyeongsan City, Korea

요 약

본 연구에서는 국내 기존 도달시간 산정방법에 있어 Kraven(II)는 경사구간별 3가지 유속을 제시하고 있으므로 해당 유역특성이 충분히 반영되지 못하고 있다. 이에 최근 『설계홍수량 산정요령, 2012. 국토해양부』에서 제안한 보완된 연속형 Kraven 경험식은 환경사부와 급경사부의 유속을 보완하였으며, 평균유속이 최소유속 1.6m/s에서 최대유속 4.5m/s의 범위내의 연속성의 유속을 나타내고 있어서 현실적으로 타당한 범위를 가지며, 도달시간도 매우 합리적인 결과를 나타내고 있으므로 기존의 불연속의 문제나 매우 완만한 경우와 급한 경우의 적용성에도 매우 우수한 것으로 나타나고 있다. 본 연구에서는 도달시간 산정방법에 있어 기존 Kraven(II) 경험식과 보완된 연속형 Kraven 경험식에 따른 수문곡선의 변화양상을 살펴보았으며, 동화천, 매호천, 옥수천, 금포천에 대해서 각 해당 유역특성을 고려하여 단위도법-도달시간 산정방법에 따른 홍수유출모의결과를 비교분석하였다.

핵심용어 : 홍수도달시간, 유역특성, Kraven(II), 연속형 Kraven, 설계홍수량

Abstract

In this study, that the Kraven(II) empirical formula, the existing method to estimate the time of concentration in river basin, does not reflect the characteristics of relevant basin as it presents 3 stream velocities by section of slope was verified, and the time of concentration for the actual average stream velocity considering the characteristics of the basin was compared and analyzed by applying the continuous Kraven empirical formula, which was suggested recently by 'Design Flood Estimation Guide Line, 2012, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs' complementing the stream velocities for the easy slope and the steep slope, to the Donghwa-Cheon, the medium size river and the modality of changes in hydrograph was examined, For the Maeho-Cheon, Wuksu-Cheon and Geumpo-Cheon, the flood runoff simulation results according to the time of concentration application empirical formula considering the characteristics of relevant basin were compared and analyzed and following conclusions were able to obtain.

Keywords : Continuous Kraven, Design Flood, Kraven(II), Time of Flood Concentration

1. 서론

최근 기후변화에 따른 집중호우와 하천에 인접한 제내지에서의 토지이용도 극대화 등으로 인하여 홍수피해로 인한 자연재해가 날로 증가하고 있다. 이러한 상황에서 설계홍수량은 하천계획 수립 시 유역내 구조물에 대한 통수능력을 검토하거나 수공구조물의 적정규모를 결정하고, 사전재해영향성검토에서는 개발 전·중·후의 홍수증가량을 평가하여 방재시설

의 용량을 결정하는데 있어 기준이 되므로 가장 기초가 되는 분석 과정이지만, 정확한 설계홍수량의 산정은 매우 중요한 과업 중 하나이다. 그러나 우리나라의 경우 아직까지 기준상의 미흡한 부분이 많이 있어서 설계홍수량 산정 결과의 신뢰도가 매우 낮은 실정이며, 거의 모든 분석이 미세측 유역 내에서 이루어지고 있어 보다 체계화 된 분석 과정이 절실하다고 판단된다.

+ Corresponding author :

합리식은(合理式, rational formula)은 미국에서 Kuichling(1889) 방법으로, 영국에서는 Lloyd- Davies (1906) 방법으로 부르고 있으나 Dooge(1957)에 의하면 Mulvaney(1850)가 최초로 합리식에 관한 논문을 발표한 것으로 알려져 있다. 한편 설계홍수량 산정에 있어 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 Clark 단위도법의 매개변수인 도달시간(T_c)과 저류상수(K)를 정확히 추정하는 것은 단순한 일이 아니다. 이는 이들 매개변수의 추정에 주관적인 판단이 많이 개입되는 등 분석자마다 일치되지 않는 해석 등에 의해 불확실성을 많이 내포하고 있기 때문인 것으로 보인다. 또한 국내의 자료를 이용하여 제안된 경험식들은 대상지점의 제한, 이용 자료의 부족, 매개변수 추정시의 주관적 판단, 검증과정의 미비 등으로 수문설계의 실무에서 활용성이 많이 떨어지고 있다. 이러한 불확실성에 따라서 각종 수공구조물의 설계에 과소 또는 과대 추정되는 일이 많이 발생하고 있으며, 이는 곧 국가경제의 손실과 치수안전성에 직접적인 영향을 주어 사회경제적으로 큰 손실을 보고 있는 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 설계홍수량 산정에 있어 매개변수인 도달시간 산정방법 기준 Kraven(II) 경험식과 보완된 연속형 Kraven 경험식에 따른 홍수수문곡선의 변화양상을 비교분석하는 등 보다 설계홍수량 산정에 도움이 될 것으로 판단된다.

2. 홍수도달시간의 기본이론

2.1 홍수도달시간과 설계강우지속시간의 관계

일반 하천유역에서 일정한 강도의 강우가 불투수

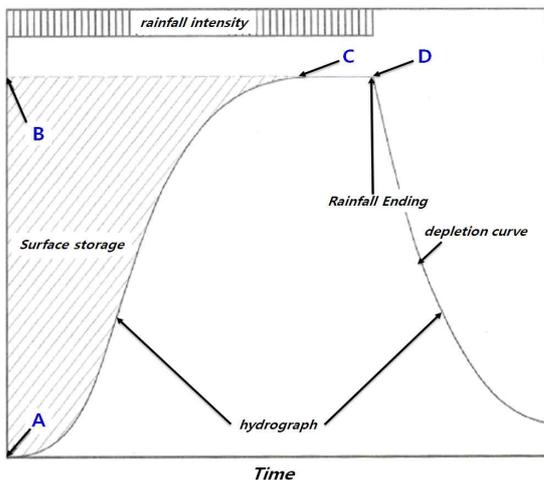


Fig. 1. Basic assumption of rational formula

면에 강하하면 그 불투수면으로부터의 단위면적당 유출률은 <Fig. 1>에서 보는 바와 같이 차차 증가하여 결국 강우강도와 동일하게 되어 평형상태(equilibrium condition)에 도달하게 된다. 이러한 평형상태의 도달에 소요되는 시간은 강우로 인한 유수가 그 유역 내의 가장 먼 지점으로부터 주 유로를 따라 유역출구까지 도달하는 데 소요되는 시간과 같으며 이를 유역의 도달시간(time of concentration, t_c)이라 하며, 합리식에서는 일반적으로 설계강우의 지속기간으로 홍수도달시간을 채택하고 있다.

만약 작은 면적의 불투수지역 내에 일정한 강도의 강우가 <Fig. 1>에서처럼 t_c 보다 긴 시간 동안 계속 되면 침투유량은 t_c 시간부터 강우강도 I 에 유역면적 A 를 곱한 값과 같아질 것이다. 한편, 자연상태의 유역에 있어서는 침투현상에 의한 강우량의 손실이 필연적으로 발생하므로 감소계수(C)를 곱하여 침투유량을 산정하게 된다. 즉,

$$Q = CIA \tag{1}$$

여기서, Q 는 유역출구에서의 침투유량(ft^3/sec)이며, I 는 지속기간이 t_c 인 강우강도(in/sec), A 는 유역면적(acre)을 표시하며, C 는 배수유역의 특성에 따라 결정되는 감소계수인 유출계수(runoff coefficient)이다. 식 (1)을 합리식이라 부르게 된 이유는 식의 좌우변의 단위가 서로 일치하기 때문이다.

한편 <Fig. 2>는 대구기상대 지점에 대한 최대강우강도-지속기간-발생빈도(intensity- duration- frequency, IDF) 곡선을 표시하고 있다.

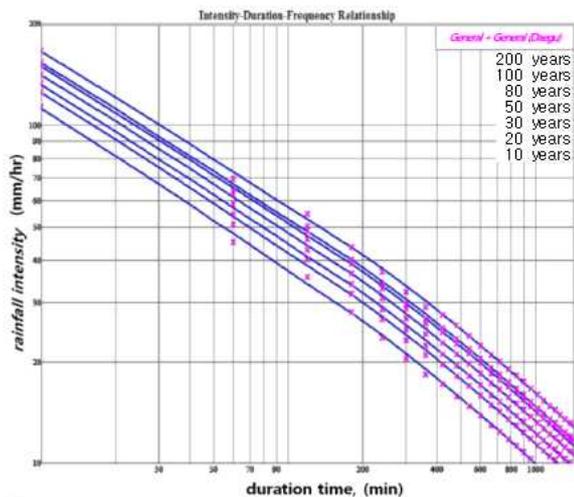


Fig. 2. Relation for Intensity-Duration-Frequency

이들 관계 곡선은 우량 관측소 지점의 장기간 자기우량자료(가급적 30년 이상)로부터 강우지속기간(10분, 30분, 60분, 120분, 360분, 1440분)별 연도별 최대강우량을 선별한 후 연도별 최대강우량을 각 지속기간으로 나누어 연도별 최대강우강도 자료계열을 작성한 후 이 시계열(時系列)에 빈도해석방법을 적용하면 재현기간별, 지속기간별 최대강우강도 관계를 얻게 된다.

<Fig. 2>의 대구기상대 지점의 IDF 곡선을 보면 재현기간이 100년이고 지속시간이 180분인 최대강우강도는 40mm/hr이고, 즉 3시간 동안 120mm의 호우가 내렸다면 강우강도는 40mm/hr이고 이 강도로 3시간 동안 내린 강우의 재현기간은 <Fig. 2>로부터 약 100년임을 알 수 있다.

<Fig. 2>의 관계로부터 재현기간별 강우강도는 재현기간과 강우지속기간의 함수임을 알 수 있으며 이를 일반식으로 표시하면 다음과 같다.

$$I(T, t) = \frac{kT^x}{t^n} \quad (2)$$

여기서, I 는 강우강도(mm/hr), T 는 재현기간(년, years), t 는 강우지속기간(min)이며 k, x, n 은 지역에 따라 회귀분석에 의해 결정되는 상수이다. 식 (2) 으로부터 재현기간별 강우강도, 즉, 소규모 수공구조물의 설계강우강도는 강우지속기간의 길이에 반비례하고 재현기간에는 비례함을 알 수 있다.

한편 식 (1)의 강우강도 I 는 유역의 도달시간 t_c 를 강우의 지속기간(rainfall duration) t 로 잡고 설계하고자 하는 소규모 수공구조물의 목적과 중요도에 따라 강우의 허용 재현기간을 선택하여 <Fig. 2>와 같은 강우강도-지속기간-재현기간 관계곡선으로부터 결정하게 된다. 따라서, 식 (1)에 의해 계산되는 홍수량 Q 는 설계 강우강도 I 와 동일한 재현기간(혹은 생기빈도)을 가진다.

2.2 홍수도달시간 산정방법

기존 도달시간 산정방법에 있어 자연하천유역의 도달시간 산정에는 다음과 같이 외국에서 개발된 Kirpich 공식, Rziha 공식, Kraven(I) 공식, Kraven(II) 공식 등의 경험공식들을 주로 사용하고 있다.

Table 1. Comparison of the method to estimate the time of concentration

Division	Calculation method	Note
Kirpich	$T_c = 3.976 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$	Induced formula to target agricultural watershed
Rziha	$T_c = 0.833 \frac{L}{S^{0.6}}$	Formula that applies to the upstream section of the natural river ($S \geq 1/200$)
Kraven(I)	$T_c = 0.444 \frac{L}{S^{0.515}}$	Formula that applies to the downstream section of the natural river ($S < 1/200$)
Kraven(II)	$T_c = 16.667 \frac{L}{V}$	Formula that applies to the velocity by the slope of the natural river • $S < 1/200$: $V = 2.1$ m/s, • $1/200 \leq S \leq 1/100$: $V = 3.0$ m/s, • $S > 1/100$: $V = 3.5$ m/s
Continuous Kraven	$T_c = 16.667 \frac{L}{V}$	Formula that applies to the velocity by the slope of the natural river • Steep slope ($S > 3/400$) : $V = 4.592 - \frac{0.01194}{S}$, $V_{max} = 4.5$ m/s • Gentle slope ($S \leq 3/400$) : $V = 35.151515 S^2 - 79.393939 S + 1.6181818$, $V_{min} = 1.6$ m/s

한편 연속형 Kraven 공식 형태는 Kraven(II) 공식과 동일하며, 단지 경사구간별 유속을 급경사부와 완경사부로 나누어 나타내고 있다. 또한 기존 Kraven(II) 공식처럼 3가지 유속이 아닌 최소유속 1.6m/s에서 최대유속 4.5m/s의 범위내의 연속성의 유속을 나타내고

있으며, 그 결과는 <Fig. 3>과 같고, 연속형 Kraven 공식에서 산정한 평균유속은 <Fig. 4>의 일반화된 평균경사-평균유속 관계 곡선에서 나타난 바와 같이 ± 0.5 m/s의 범위를 가지는 것으로 나타났다.

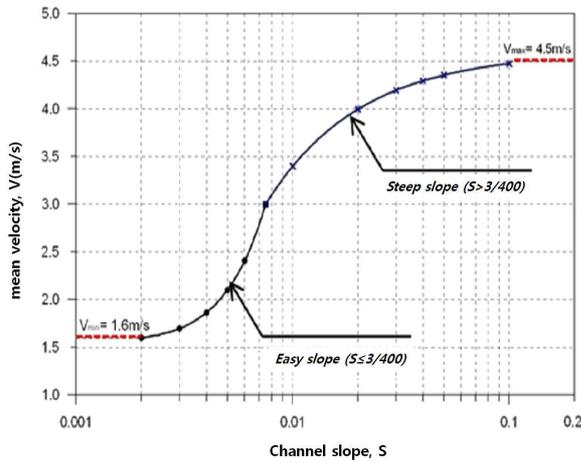


Fig. 3. Velocity distribution by section of slope for Continuous Kraven method

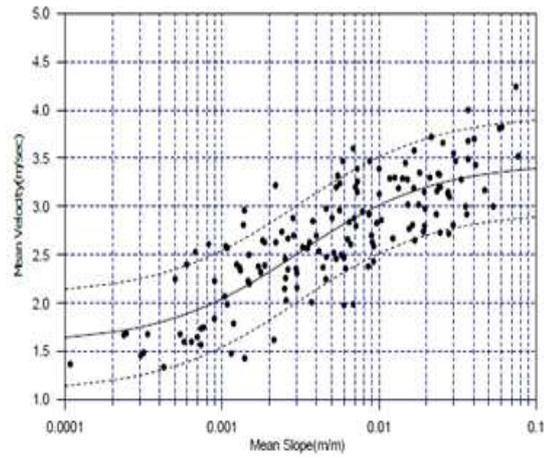


Fig. 4. Relation Curve for generalized average slope - average velocity

3. 보완된 도달시간 산정방법 적용시 홍수수문곡선의 변화양상 비교

본 연구에서는 기존 도달시간 산정방법에 있어 Kraven(II)는 경사구간별 3가지 유속을 제시하고 있으므로 해당 유역특성이 충분히 반영되지 못하고 있음을 검토하고, 최근 『설계홍수량 산정요령, 2012. 국

토해양부』에서 제안한 환경사부와 급경사부의 유속을 보완한 연속형 Kraven 산정공식을 적용하여 홍수수문곡선의 변화양상을 비교분석하고자 한다. 이를 위하여 수행된 연구방법은 <Fig. 5.>과 같으며 본 연구를 수행하는데 있어 동화천(지방하천)을 대상유역으로 선정하였다.

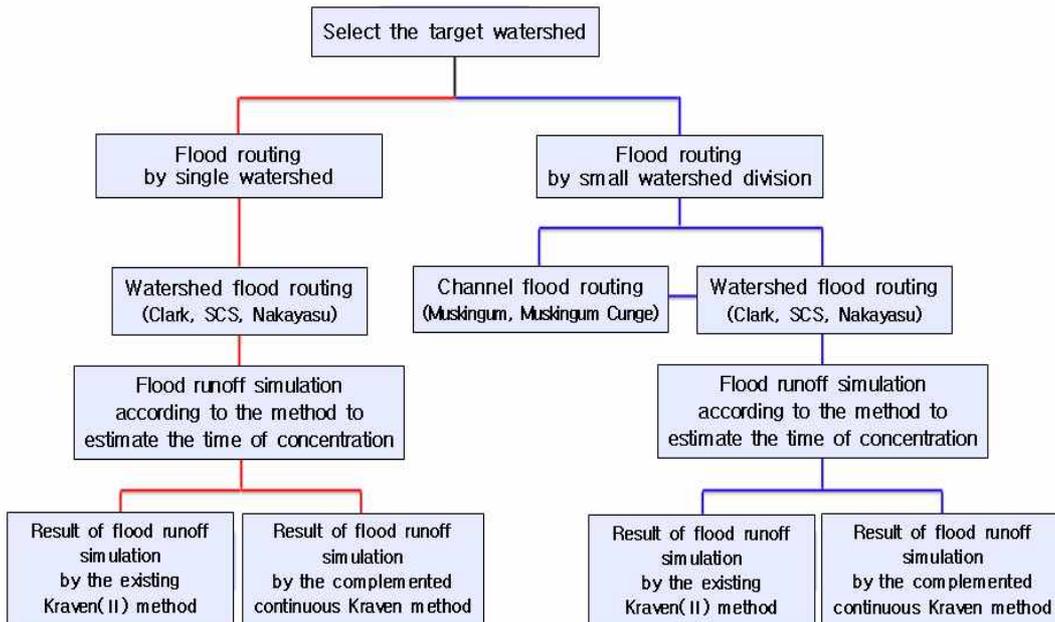


Fig. 5. Mimetic diagram of the research methods

3.1 대상유역 선정 및 적용방법

홍수도달시간 산정방법에 따른 홍수량의 변화양상

을 알아보기 위해 중규모 유역이면서 하천기본계획이 수립된 하천을 대상으로 조사한 결과, 본 연구에서는 대구광역시에 위치한 지방하천 동화천을 대상유역으

로 선정하였다. 한편 지방하천 동화천은 「동화천 하천기본계획 2008. 5, 대구광역시」이 수립된 바 있으며, 유역면적 99.55km², 유로연장 20.56km, 하천연장 15.68km이다.

한편 소유역 분할 기준은 단위도 적용에 적절한

유역면적 규모와 관련이 크므로, 유역규모에 따른 유출특성을 「Hydrology of Floods in Canada: A Guide to Planning and Design(NRCC, 1989)」 등을 토대로 정리하면 <Table 2>와 같다.

Table 2. Runoff characteristics of the watershed scale

Division	Small-scale basin	Mid-scale basin	Large-scale basin
Intensity rainfall during duration of design rainfall	Consistency	Change	Change
Space distribution of rainfall	Uniform	Uniform	Change
Form of runoff	Dominant surface flow	Consist of surface flow and channel flow	Dominant channel flow
Effect of channel detention	Ignore	Ignore	Consideration
Basin area	Less than 25 km ²	25 ~ 250 km ²	More than 250 km ²
Calculation method of flood discharge	Excluded method of channel routing		Included method of channel routing

대상 유역면적이 약 250km²이하인 경우는 <Table 2>에서 보는 바와 같이 하도저류효과를 무시할 수 있기 때문에 대상 하천의 모든 홍수량 산정지점에 대하여 하도추적 제외방법을 적용하여 설계홍수량을 산정하는 것으로 한다. 따라서 소유역의 분할이 필요 없고 홍수량 산정지점의 상류유역을 단일유역으로 취급하여 홍수량을 산정한다(설계홍수량 산정요령, 2012. 국토해양부).

본 연구에서는 유역에 대한 홍수도달시간의 이론적 배경을 바탕으로 보완된 도달시간 산정방법을 검토하고 기존 도달시간 산정방법과 비교하여 홍수량의 변화양상을 살펴보고자 한다.

따라서 본 연구에서는 동화천을 대상유역으로 한 홍수추적 접근방법으로 홍수량 산정지점의 상류유역을 단일유역으로 취급하여 홍수량을 산정하는 방법과 소유역 분할시 유속의 연속성을 검토하기 위한 소유역 분할(24개 소유역)에 의한 홍수량 산정방법 두 가지를 실시하여 홍수도달시간 산정방법에 따른 수문 응답 특성을 비교·분석하였다.

또한 본 연구에서는 동화천 유역과 인접해 있으며 장기간의 시우량 자료를 보유하고 있는 기상청 관할 대구관측소를 선정하여 연최고치 계열(1973~2012년)에 대한 강우분석을 실시하였다.

Table 3. Approach of flood routing of Donghwa-Cheon basin

Division	Single watershed	Small watershed division	Note
Rainfall analysis			
Probability distribution	Gumbel	Gumbel	
Time distribution	Tertile of Huff	Tertile of Huff	
Space distribution	50%	50%	
Runoff curve number	AMCIII	AMCIII	
Watershed routing	Clark	Clark	
Time of concentration	Existing Kraven(II)	Existing Kraven(II)	comparison analysis
	Complemented continuous Kraven	Complemented continuous Kraven	
Storage constant	Sabol	Sabol	
Channel routing	-	Muskingum	

3.2 도달시간 산정방법별 결과 비교

단일유역에 의한 유역 홍수추적 시 각 중 경험공식에 따른 도달시간 산정 결과는 <Table 4>와 같다. 한편 본 연구에서 비교·분석하고자 한 기존 도달시간 산정방법 Kraven(II)와 보완된 도달시간 산정방법 연속형 Kraven의 유속은 각각 3.0m/s, 3.2m/s로 산정되

었다.

소유역 분할(24개 소유역)에 의한 유역 홍수추적 시 각 중 경험공식에 따른 도달시간 산정 결과는 <Table 5>와 같다. 한편 본 연구에서 비교·분석하고자 한 기존 도달시간 산정방법 Kraven(II)와 보완된 도달시간 산정방법 연속형 Kraven은 각각 최소유속 2.1m/s, 1.6m/s, 최대유속 3.5m/s, 4.4m/s로 산정되었다.

Table 4. Result from estimate of time of concentration of Donghwa-Cheon basin (single watershed)

Mark	Distance (km)	Average grade	Time of concentration (hr)				
			Kirpich	Rziha	Kraven (I)	Kraven (II)	Continuous Kraven
DH0	20.8	0.0084	3.01 (1.92)	2.90 (1.99)	1.11 (5.19)	1.93 (3.00)	1.82 (3.20)

[footnote] () mean velocity (m/s)

Table 5. Result from estimate of time of concentration of Donghwa-Cheon basin (small watershed division)

Mark	Distance (km)	Average grade	Time of concentration (hr)				
			Kirpich	Rziha	Kraven (I)	Kraven (II)	Continuous Kraven
DH13	5.12	0.0229	1.64 (0.87)	1.49 (0.96)	0.51 (2.76)	0.41 (3.50)	0.35 (4.07)
DH12	1.48	0.0524	0.28 (1.49)	0.12 (3.46)	0.05 (8.32)	0.12 (3.50)	0.09 (4.36)
DH12'	4.14	0.0124	3.19 (0.36)	4.38 (0.26)	1.26 (0.91)	0.33 (3.50)	0.28 (4.07)
DH11	1.30	0.0327	0.30 (1.21)	0.14 (2.62)	0.06 (6.55)	0.10 (3.50)	0.09 (4.23)
DH11'	5.90	0.0173	9.61 (0.17)	22.72 (0.07)	5.46 (0.30)	0.47 (3.50)	0.38 (4.36)
DH10	0.60	0.0183	0.20 (0.83)	0.09 (1.93)	0.03 (5.03)	0.05 (3.50)	0.04 (3.94)
DH10'	2.81	0.0327	8.26 (0.09)	20.82 (0.04)	4.56 (0.17)	0.22 (3.50)	0.18 (4.23)
DH9	0.20	0.0181	0.09 (0.62)	0.03 (1.80)	0.01 (4.76)	0.02 (3.50)	0.01 (3.93)
DH9'	7.07	0.0183	8.32 (0.24)	17.52 (0.11)	4.48 (0.44)	0.56 (3.50)	0.50 (3.94)
DH8	1.70	0.0101	0.54 (0.87)	0.33 (1.42)	0.12 (3.89)	0.13 (3.50)	0.14 (3.41)
DH8'	3.42	0.0181	3.21 (0.30)	4.59 (0.21)	1.28 (0.74)	0.27 (3.50)	0.24 (3.93)
DH7	0.90	0.0068	0.39 (0.64)	0.23 (1.10)	0.08 (3.12)	0.08 (3.00)	0.09 (2.69)
DH6	2.00	0.0122	0.62 (0.90)	0.39 (1.42)	0.14 (3.88)	0.16 (3.50)	0.15 (3.61)
DH5	0.30	0.0197	0.09 (0.91)	0.03 (2.83)	0.01 (7.01)	0.02 (3.50)	0.02 (3.99)
DH5'	2.15	0.0101	3.17 (0.19)	4.95 (0.12)	1.28 (0.47)	0.17 (3.50)	0.18 (3.41)
DH4	0.70	0.0046	0.36 (0.54)	0.21 (0.94)	0.07 (2.73)	0.09 (2.10)	0.10 (2.00)
DH4'	8.47	0.0050	17.99 (0.13)	56.19 (0.04)	12.50 (0.19)	0.78 (3.00)	0.87 (2.69)
DH3	2.30	0.0040	0.90 (0.71)	0.69 (0.93)	0.24 (2.69)	0.30 (2.10)	0.34 (1.86)
DH3'	5.27	0.0122	38.02 (0.04)	198.33 (0.01)	34.50 (0.04)	0.42 (3.50)	0.41 (3.61)
DH2	1.20	0.0019	0.75 (0.45)	0.59 (0.57)	0.19 (1.77)	0.16 (2.10)	0.21 (1.60)
DH2'	1.76	0.0197	4.12 (0.12)	7.72 (0.06)	1.82 (0.27)	0.14 (3.50)	0.12 (3.99)
DH1	1.50	0.0042	0.70 (0.59)	0.51 (0.82)	0.17 (2.42)	0.20 (2.10)	0.22 (1.91)
DH1'	2.37	0.0039	2.69 (0.24)	3.76 (0.18)	1.02 (0.64)	0.31 (2.10)	0.33 (2.00)
DH0	1.50	0.0037	0.71 (0.59)	0.52 (0.81)	0.17 (2.38)	0.20 (2.10)	0.23 (1.80)

[footnote] () mean velocity (m/s)

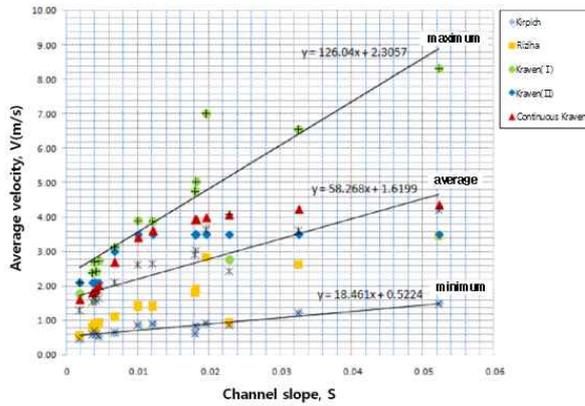


Fig. 6. Channel slope - average velocity according to the method to estimate the time of concentration (Donghwa-Cheon basin)

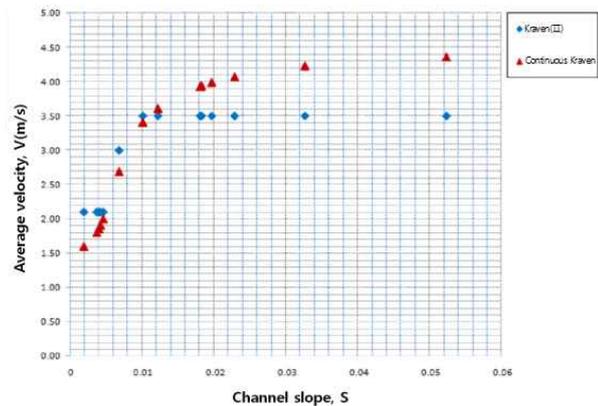


Fig. 7. Average velocity of the existing Kraven(II) method and complemented continuous Kraven method (Donghwa-Cheon basin)

한편 소유역 분할에 의한 기존 도달시간 산정방법과 보완된 도달시간 산정방법의 유속 및 도달시간 분

석결과는 다음과 같다.

Table 6. Analysis result of velocity and time of concentration by section of Donghwa-Cheon basin

Division	Velocity (m/s)			Time of concentration (hr)		
	①	②	(② - ①)	①	②	(② - ①)
	Kraven(II)	Continuous Kraven		Kraven(II)	Continuous Kraven	
DH13	3.50	4.07	↑ 0.57	0.41	0.35	↓ 0.06
DH12	3.50	4.36	↑ 0.86	0.12	0.09	↓ 0.03
DH12'	3.50	3.60	↑ 0.10	0.33	0.32	↓ 0.01
DH11	3.50	4.23	↑ 0.73	0.10	0.09	↓ 0.01
DH11'	3.50	3.90	↑ 0.40	0.47	0.42	↓ 0.05
DH10	3.50	3.94	↑ 0.44	0.05	0.04	↓ 0.01
DH10'	3.50	4.20	↑ 0.70	0.22	0.18	↓ 0.04
DH9	3.50	3.93	↑ 0.43	0.02	0.01	↓ 0.01
DH9'	3.50	3.90	↑ 0.40	0.56	0.50	↓ 0.06
DH8	3.50	3.41	↓ 0.09	0.13	0.14	↑ 0.01
DH8'	3.50	3.90	↑ 0.40	0.27	0.24	↓ 0.03
DH7	3.00	2.69	↓ 0.31	0.08	0.09	↑ 0.01
DH6	3.50	3.61	↑ 0.11	0.16	0.15	↓ 0.01
DH5	3.50	3.99	↑ 0.49	0.02	0.02	-
DH5'	3.50	3.40	↓ 0.10	0.17	0.18	↑ 0.01
DH4	2.10	2.00	↓ 0.10	0.09	0.10	↑ 0.01
DH4'	2.10	2.10	-	1.12	1.13	↑ 0.01
DH3	2.10	1.86	↓ 0.24	0.30	0.34	↑ 0.04
DH3'	3.50	3.60	↑ 0.10	0.42	0.41	↓ 0.01
DH2	2.10	1.59	↓ 0.51	0.16	0.21	↑ 0.05
DH2'	3.50	4.00	↑ 0.50	0.14	0.12	↓ 0.02
DH1	2.10	1.91	↓ 0.19	0.20	0.22	↑ 0.02
DH1'	2.10	1.80	↓ 0.30	0.31	0.36	↑ 0.05
DH0	2.10	1.80	↓ 0.30	0.20	0.23	↑ 0.03

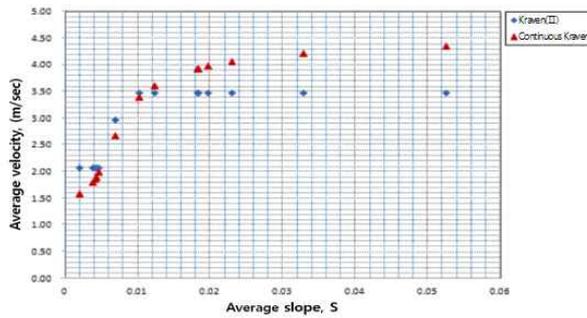


Fig. 8. Average slope - average velocity of Donghwa-Cheon basin

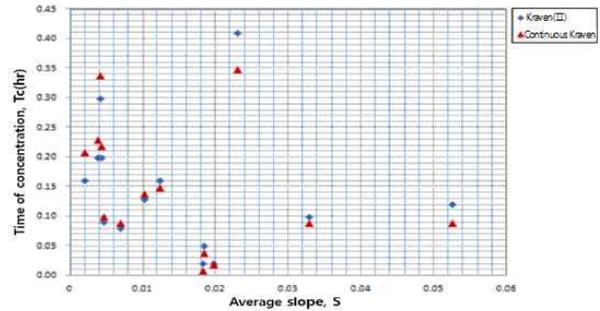


Fig. 9. Average slope - Time of concentration of Donghwa-Cheon basin

3.3 기존 방법과 보완된 방법의 적용 검토

또한 기존 Kraven(II) 공식을 동화천 유역에 적용하여 보면 경사구간별 유속을 제시하고 있으므로 유속이 3가지 구간(2.1m/s, 3.0m/s, 3.5m/s)으로만 구분되어 있어서 적용 시 유속의 불연속이 발생하게 되며, 유속을 동일하게 적용하는 구간의 경우 경사에 따른 영향이 전혀 반영되지 않으므로 도달시간이 동일하게 산정되는 결과를 나타내기도 했다. 따라서 경사가 매우

완만한 구간이거나 경사가 매우 급한 구간에는 적용하기 곤란한 문제점을 가지고 있는 것으로 판단된다.

한편 보완된 연속형 Kraven 공식은 환경사부와 급경사부의 유속을 보완하여 하천평균경사 전반에 걸쳐 평균유속이 동화천 적용 시 1.60~ 4.36m/s로 산정되어 현실적으로 타당한 범위를 가지며, 도달시간도 매우 합리적인 결과를 나타내고 있으므로 기존의 불연속의 문제나 매우 완만한 경우나 급한 경우의 적용성에도 매우 우수한 것으로 나타나고 있다.

Table 7. Analysis result of velocity and time of concentration of Donghwa-Cheon basin

Division	Velocity (m/s)			Time of concentration (hr)		
	Minimum	Maximum	Average	Minimum	Maximum	Average
Existing Kraven(II)	2.10	3.50	3.07	0.02	1.12	0.25
Complemented continuous Kraven	1.60	4.36	3.24	0.01	1.13	0.25

Table 8. Problem of applied to the existing Kraven(II) method (V=2.1m/s)

Division	A(km ²)	L(km)	S	Existing Kraven(II)		Complemented continuous Kraven	
				Velocity (m/s)	Time of concentration (hr)	Velocity (m/s)	Time of concentration (hr)
DH1	0.88	1.50	0.0042	2.10	0.20	1.91	0.22
DH0	2.61	1.50	0.0037	2.10	0.20	1.80	0.23

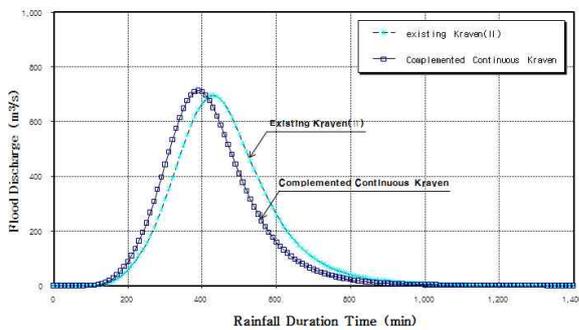
Table 9. Problem of applied to the existing Kraven(II) method (V=3.5m/s)

Division	A(km ²)	L(km)	S	Existing Kraven(II)		Complemented continuous Kraven	
				Velocity (m/s)	Time of concentration (hr)	Velocity (m/s)	Time of concentration (hr)
DH9	0.05	0.20	0.0181	3.50	0.02	3.93	0.01
DH5	1.67	0.30	0.0197	3.50	0.02	3.99	0.02

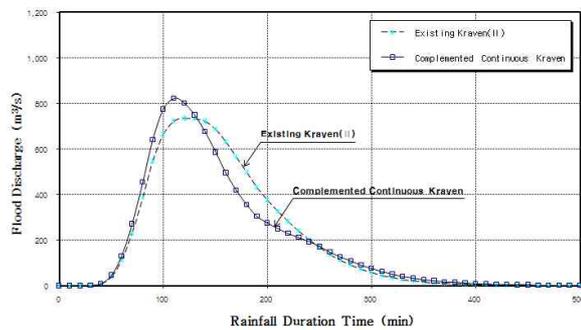
3.4 기존 방법과 보완된 방법 적용에 따른 홍수수문 곡선 변화양상 비교

동화천 유역의 홍수유출량은 전반적으로 보완된 도달시간 산정방법 적용 시 더 크게 산정되었다. 동화천 유역 하류단의 침투홍수유출량 값은 기존 Kraven(II) 공식을 적용했을 때 보다 보완된 연속형 Kraven 공식을 적용했을 때, 단일유역에 의한 홍수추적 시 18.0m³/s 만큼, 소유역 분할에 의한 홍수추적 시 88.1m³/s 만큼 더 크게 산정되었다.

단일유역에 의해 산정한 침투홍수유출량 값과 소유역 분할(24개 소유역)에 의해 산정한 침투홍수유출량 값의 차이는 0.01% 발생하고 있으며, 특히 이러한 홍수량 값은 소유역을 많이 분할할수록 크게 산정되었다. 이처럼 소유역 분할에 따른 홍수추적 시 하도 추적방법을 적용할 경우 홍수량 값이 커지게 되며 이의 원인은 소유역 분할 시 홍수량 산정 대상유역의 면적이 작아지면 단위도 종거의 침투치 증가에 따른 침투홍수유출량은 크게 증가되는 반면 하도의 저류효과로 인한 홍수량의 감소는 매우 작기 때문인 것으로 판단된다.



(a) Flood routing by single watershed



(b) Flood routing by small watershed division

Fig. 10. Changing patterns of flood hydrograph of Donghwa-Cheon basin

4. 하천별 단위도법-도달시간 산정방법에 따른 홍수유출모의결과

본 연구에서는 동화천, 매호천, 옥수천, 금포천 4개의 각 하천유역에 Clark, SCS, Nakayasu 단위도법에 따라 도달시간을 변화시켜 홍수유출모의결과를 비교 분석하였다. 그 결과 도달시간에 의해 Clark 방법은 저류상수에 영향을 받게 되며, SCS 방법은 지체시간에 영향을 받게 되는 반면 Nakayasu 방법은 도달시간에 전혀 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

또한 도달시간 산정방법에 있어 Kraven(I) 공식은 유속이 지나치게 높게 산정되었으며 그에 따라 침투홍수유출량 값이 크게 산정되었다. 반면에 Kirpich 공식의 유속은 또 지나치게 낮게 산정되었으며, 그에 따라 침투홍수유출량 값이 작게 산정되었다. 이것은 각각의 도달시간 산정방법이 어떤 것은 급경사 유역에 적합하고 또 어떤 것은 완경사 유역에 적합한 방법으로 근본적인 문제점을 가지고 있음을 알 수 있었다.

Kraven(II) 공식은 모든 경사에 대하여 적용이 가능하며 경사별 유속을 사용하여 도달시간을 산정하

로 단순히 유속의 적정성 측면만을 고려하면 가장 양호한 방법으로 판단되지만, 유속이 3가지 구간으로만 구분되어 있어서 적용시 불연속이 발생하게 된다. 반면 이러한 급경사와 완경사를 보완한 연속형 Kraven 공식은 경사가 매우 완만한 구간이거나 경사가 매우 급한 구간에서도 적용이 가능하며 최소유속 1.6m/s에서 최대유속 4.5m/s의 범위내의 연속성의 유속을 나타내고 있다.

따라서 본 연구에서는 하천별 해당 유역특성을 고려한 실제 평균유속에 대한 도달시간 산정방법 연속형 Kraven을 적용한 후 기존 Kraven(II) 공식과 비교하여 홍수유출모의결과를 살펴보았으며, 그 결과 매호천을 제외한 동화천 및 옥수천, 금포천 유역은 기존 Kraven(II) 공식 적용 시 보다 연속형 Kraven 공식 적용 시 유속이 높게 산정되었으며 그에 따라 침투홍수유출량 값이 크게 산정되었고, 반면 매호천 유역은 기존 Kraven(II) 공식 적용 시 보다 보완된 연속형 Kraven 공식 적용 시 유속이 낮게 산정되었으며 그에 따라 침투홍수유출량 값이 작게 산정되었다.

4.1 하천별 홍수유출모의결과

Table 10. Basin characteristics

Division	Start point	End point	A(km ²)	L(km)
Donghwa-Cheon	Daegu, Dong-gu dohakdong	Kumho River's confluence	99.55	20.80
Machon-Cheon	Daegu, Suseong-gu samdeokdong	Nam-Cheon's confluence	15.03	8.05
Wuksu-Cheon	Daegu, Suseong-gu uksudong	Nam-Cheon's confluence	8.27	8.70
Geumpo-Cheon	Daegu, Dalseong-gun nongongueup	Nam-Cheon's confluence	21.10	8.18

Table 11. Result of flood runoff simulation according to unit hydrograph method - time of concentration

Division			Kirpich	Rziha	Kraven (I)	Kraven (II)	Continuous Kraven		
Donghwa Cheon	Time of concentration		(min)	180.7	173.8	66.8	115.6	109.2	
	Velocity		(m/s)	1.92	1.99	5.19	3.00	3.20	
	Clark	Peak flood discharge	(m ³ /s)	567.8	578.2	879.9	695.5	713.5	
		Critical storm duration	(min)	710	660	310	490	440	
	SCS	Peak flood discharge	(m ³ /s)	731.2	743.8	1,083.1	881.5	900.5	
		Critical storm duration	(min)	480	440	230	330	320	
	Nakayasu	Peak flood discharge	(m ³ /s)	516.7	516.7	516.7	516.7	516.7	
		Critical storm duration	(min)	610	610	610	610	610	
	Machon Cheon	Time of concentration		(min)	96.0	78.4	29.5	38.3	40.5
		Velocity		(m/s)	1.40	1.71	4.55	3.50	3.31
Clark		Peak flood discharge	(m ³ /s)	118.5	129.7	192.5	174.4	170.8	
		Critical storm duration	(min)	400	330	150	200	200	
SCS		Peak flood discharge	(m ³ /s)	149.5	161.7	225.1	208.1	205.1	
		Critical storm duration	(min)	260	250	120	140	150	
Nakayasu		Peak flood discharge	(m ³ /s)	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	
		Critical storm duration	(min)	340	340	340	340	340	
Wuksu Cheon		Time of concentration		(min)	64.9	42.0	17.5	41.4	35.2
		Velocity		(m/s)	2.23	3.45	8.31	3.50	4.12
	Clark	Peak flood discharge	(m ³ /s)	61.1	73.3	101.6	73.6	78.6	
		Critical storm duration	(min)	430	300	160	300	250	
	SCS	Peak flood discharge	(m ³ /s)	89.6	103.3	126.5	104.0	108.9	
		Critical storm duration	(min)	230	150	130	150	140	
	Nakayasu	Peak flood discharge	(m ³ /s)	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	
		Critical storm duration	(min)	350	350	350	350	350	
	Geumpo Cheon	Time of concentration		(min)	97.8	80.5	30.2	39.0	35.1
		Velocity		(m/s)	1.39	1.69	4.51	3.50	3.88
Clark		Peak flood discharge	(m ³ /s)	176.2	192.4	289.7	261.7	272.6	
		Critical storm duration	(min)	370	320	140	170	160	
SCS		Peak flood discharge	(m ³ /s)	216.5	234.3	331.7	306.1	315.9	
		Critical storm duration	(min)	260	220	120	140	130	
Nakayasu		Peak flood discharge	(m ³ /s)	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4	
		Critical storm duration	(min)	350	350	350	350	350	

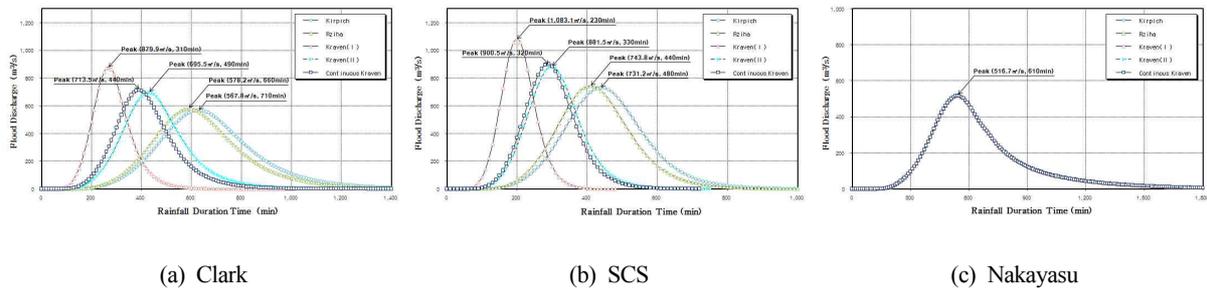


Fig. 11. Result of flood runoff simulation of Donghwa-Cheon basin

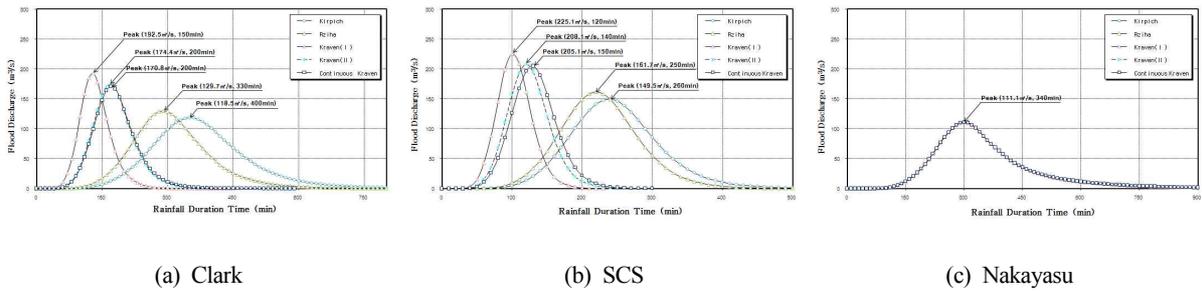


Fig. 12. Result of flood runoff simulation of Maeho-Cheon basin

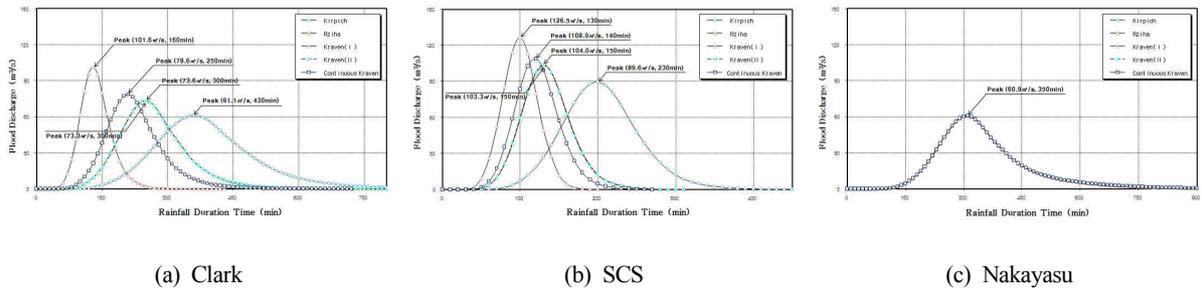


Fig. 13. Result of flood runoff simulation of Wuksu-Cheon basin

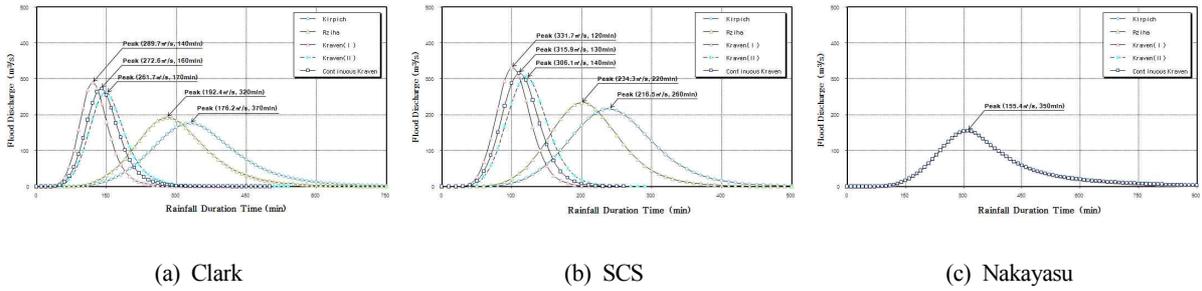


Fig. 14. Result of flood runoff simulation of Geumpo-Cheon basin

<Table 12>, <Fig. 15>~<Fig. 16>는 기존 Kraven (II) 공식을 기준으로 보완된 연속형 Kraven 공식 적용 시 홍수량 산정에 있어 유속, 도달시간, 첨두홍수

유출량, 임계지속시간의 증감을 비교하여 나타냈으며, Nakayasu 방법은 홍수량 산정에 있어 도달시간에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

Table 12. Result of flood runoff simulation according to unit hydrograph method - time of concentration

Division		Time of concentration (min)	Velocity (m/s)	Peak flood discharge (m ³ /s)			Note
				Clark	SCS	Nakayasu	
Donghwa Cheon	Kraven(Ⅱ)	115.6	3.00	695.5(490)	881.5(330)	516.7(610)	Increase in flood discharge
	Continuous Kraven	109.2	3.20	713.5(440)	900.5(320)	516.7(610)	
Maeoho Cheon	Kraven(Ⅱ)	38.3	3.50	174.4(200)	208.1(140)	111.1(340)	Decrease in flood discharge
	Continuous Kraven	40.5	3.31	170.8(200)	205.1(150)	111.1(340)	
Wuksu Cheon	Kraven(Ⅱ)	41.4	3.50	73.6(300)	104.0(150)	60.9(350)	Increase in flood discharge
	Continuous Kraven	35.2	4.12	78.6(250)	108.9(140)	60.9(350)	
Geumpo Cheon	Kraven(Ⅱ)	39.0	3.50	261.7(170)	306.1(140)	155.4(350)	Increase in flood discharge
	Continuous Kraven	35.1	3.88	272.6(160)	315.9(130)	155.4(350)	

[footnote] () Critical storm duration(min)

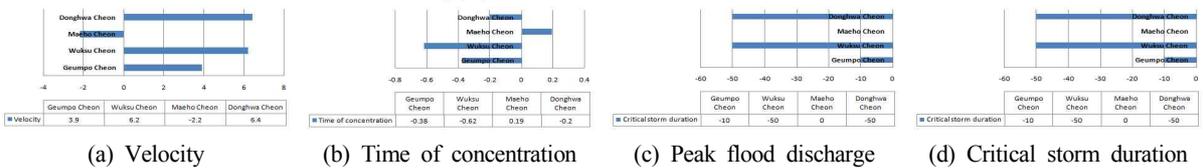


Fig. 15. Comparison of applied to the complemented continuous Kraven method (Clark)

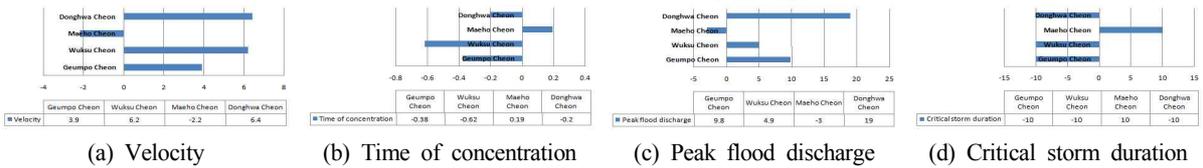


Fig. 16. Comparison of applied to the complemented continuous Kraven method (SCS)

5. 결론

본 연구에서 보완된 연속형 Kraven 공식을 적용하여 도달시간 산정방법에 따른 홍수유출모의를 실시한 결과는 다음과 같다.

- 1) 홍수량 산정에 있어서 매개변수인 도달시간 산정방법에 따라 홍수량이 크게 영향을 받으며, 도달시간이 길어질수록 홍수량이 감소하는 경향을 나타내고 있었다.
- 2) 도달시간 산정방법에 있어 기존 Kraven(Ⅱ) 공식을 동화천 유역에 적용하여 보면 경사구간별 유속을 제시하고 있으므로 유속이 3가지 구간 (2.1m/s, 3.0m/s, 3.5m/s)으로만 구분되어 있어서 해당 유역특성이 충분히 반영되지 못하고 있으며, 적용 시 유속의 불연속이 발생하게 되어 유

속을 동일하게 적용하는 구간의 경우 경사에 따른 영향이 전혀 반영되지 않으므로 도달시간이 동일하게 산정되는 결과를 나타내기도 했다. 또한 경사가 매우 완만한 구간이거나 경사가 매우 급한 구간에는 적용하기 곤란한 문제점을 가지고 있는 것으로 판단된다.

- 3) 보완된 연속형 Kraven 공식은 환경사부와 급경사부의 유속을 보완하여 평균유속이 동화천 유역 적용시 최소유속 1.60m/s에서 최대유속 4.36m/s의 범위내의 연속성의 유속을 나타내고 있어서 현실적으로 타당한 범위를 가지며, 도달시간도 매우 합리적인 결과를 나타내고 있으므로 기존의 불연속의 문제나 매우 완만한 경우와 급한 경우의 적용성에도 매우 우수한 것으로 나타나고 있다.

- 4) 동화천, 매호천, 옥수천, 금포천 4개의 하천유역에 각 해당 유역특성을 고려한 Clark, SCS, Nakayasu 단위도법에 따라 도달시간을 변화시켜 홍수유출 모의결과를 비교분석하였다. 그 결과 도달시간에 의해 Clark 방법은 저류상수에 영향을 받게 되며, SCS 방법은 지체시간에 영향을 받게 되는 반면 Nakayasu 방법은 도달시간에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 또한 도달시간 산정방법에 있어 Kraven(I) 공식은 유속이 지나치게 높게 산정되어 첨두홍수유출량 값이 크게 산정되었으며, 반면에 Kirpich 공식의 유속은 또 지나치게 낮게 산정되어 첨두홍수유출량 값이 작게 산정되었다. 이것은 각각의 도달시간 산정방법이 어떤 것은 급경사 유역에 적합하고 또 어떤 것은 완경사 유역에 적합한 방법으로 근본적인 문제점을 가지고 있음을 알 수 있었다.
- 5) 이처럼 홍수량 산정에서 도달시간과 홍수량의 관계는 아주 밀접하며, 따라서 홍수량을 산정하는데 있어 해당 유역특성이 충분히 반영되고, 기존 Kravn(II) 공식처럼 3가지 유속이 아닌 최소유속 1.6m/s에서 최대유속 4.5m/s의 범위내의 연속성의 유속을 나타내고 있으며, 환경사부와 급경사부의 유속을 보완한 연속형 Kraven 공식을 사용하여 실무에서 보다 정확한 설계홍수량 산정에 도움이 될 것으로 판단된다.

사 사 문

본 연구는 “2010~2011년 영남대학교 산학연구처의 교비 연구비 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 감사한다.”

References

- Daegu (2008). *Rivers Basic Plan of Donghwa-Cheon*, 2008-113, Daegu. [Korean Literature]
- Dooge, JCI (1957). *The Rational Method for Estimating Flood Peaks*, *J. of Engineering*, 20, pp. 311-374.
- Jeong, JH (2005). *Development of Practical Method for Flood Estimation*, PhD Thesis, Korea University, Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Jeong, SW (2005). *Development of Empirical For the Parameter Estimation of Clark's Watershed Flood Routing Model*, PhD Thesis, Korea University, Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Kim, KD, Choi, HI and Jee, HK (2009). Evaluation of Flood Runoff Hydrograph by Selection the Estimation Method for Time of Concentration, *Proceedings of the 2009 Conference of the Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, pp. 1375-1379. [Korean Literature]
- Kuichling, E (1889). The Relation between the Rainfall and the Discharge of Sewers in Populous Districts, *Transactions of ASCE*, 20, pp. 37-40.
- Lee JH, Yu, CS and Sin, JY (2013). Theoretical Backgrounds of Basin Concentration Time and Storage coefficient and Their Empirical Formula, *J. of Korea Water Resources Association*, 46(2), pp. 155-169. [Korean Literature]
- Lloyd-Davies, DE, Jones, AS and Travis, WO (1906). The elimination of stormwater from Sewerage Systems, *Institution of Civil Engineering*, 164, pp. 41-67.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MoLIT). (2012). *Design Flood Estimation Tips*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. [Korean Literature]
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MoLIT). (2011). *Improvement and Supplement of Probability Rainfall in South Korea*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. [Korean Literature]
- Rao, AR and Hamed, KH (2000). *Flood frequency analysis*, CRC Press.
- Sabol, GV (1988). Clark unit hydrograph and R-parameter estimation, *J. of Hydraulic Engineering*, 114(1), pp. 103-111.
- US Army Corps of Engineers (1994). *Flood-Runoff Analysis*, Engineer Manual, US Army Corps of Engineers
- Yun, TH, Kim, ST and Park, JW (2005). On Redefining of Parameters of Clark Model, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 25(3), pp. 181-187. [Korean Literature]
- Yun, YN, Jeong, JH and Ryu, JH (2013). Design Flood Estimation Tips, *J. of Korea Water Resources Association*, 46(3), pp. 55-68. [Korean Literature]

- 논문접수일 : 2014년 01월 06일
- 심사의뢰일 : 2014년 02월 05일
- 심사완료일 : 2014년 02월 13일