

도달시간 산정공식의 입력변수 적용범위 및 민감도 분석

Study on the Application Limits and Sensitivity Analysis for the Parameters of Time of Concentration

김 선 주* · 강 상 진**
Kim, Sun Joo · Kang, Sang Jin
이 광 야*** · 박 재 흥***
Lee, Kwang Ya · Park, Jae Heung

Abstract

Many lot of books introduce the methods to calculate the time of concentration, and these are described as various forms of formulas. There are few formulas appropriate for our basin characteristics Therefore, there are problems to make excessive or less estimation when these formulas are used. To solve these problems, comparison of formulas and sensitivity analysis for them were made with converting parameters. Finally, Time of concentration was estimated to derive Application limits for 3 watersheds by standardized formulas.

In the case of input parameters analysis, SCS formula has the highest value by the length, Kerby by the height and SCS by the slope, respectively, while Kraven formula has the lowest value among them. Concerning the relative sensitivity by Taylor series, the time of concentration showed the constant effect while increasing of the length and slope, and the length was more sensitive than the slope in parameters. Finally the standardization formula developed in this study was applied to derive application limits for 3 watersheds(total 17 subbasins). In this case, Rziha(8 subbasins) and SCS(9 subbasins) formulas were the most similar to, observed data of total 17 subbasins respectively. Application limits were about 300~500km² area, 30~60km length and under 0.01 slope for Rziha formula and about 100~200km² area, 10~30km length, and over 0.01 slope for SCS formula, respectively.

* 건국대학교 농축산생명과학대학

** 한국종합기술개발공사 수자원부

*** 농업기반공사 조사설계처

키워드 : 도달시간, 상대민감도, 일반화 강우유출, 유역
반응시간

I. 서 론

강우에 의한 유출의 반응을 유역반응이라 하며, 유역반응을 나타내는 시간변수는 홍수예측에 매우 중요한 요소다. 이러한 시간변수의 정확도는 설계홍수량의 추정시 첨두홍수량과 매우 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이때 주로 사용하는 시간변수로는 도달시간(time of concentration, T_c), 지체시간(lag time), 기저시간(time base), 첨두발생시간(time to peak), 평형시간(time to equilibrium) 등이 있다.³⁾

이 중 도달시간은 기존의 홍수유출 모형에 중요한 매개변수로 이용되어 왔고, 실제강우의 지속시간 결정시 홍수도달시간이라는 개념을 도입하고 있다. 그러나 현재 우리나라에서 사용되고 있는 도달시간 산정식은 그 종류가 매우 다양할 뿐 아니라, 우리나라 실정에 맞는 산정방법이 체계적으로 이루어진 바 없이 대부분 외국의 유역에 대한 실험공식이 사용되고 있는 실정이다. 무엇보다도 국·내외에서 사용되고 있는 도달시간 산정공식은 동일한 공식일지라도 단위환산과정에서 오류와 표기의 잘못으로 인해 각종 참고서적마다 상이한 공식이 수록되어 있고, 이는 도달시간의 과대설계 또는 과소설계에 원인이 되고 있다. 또한, 도달시간 산정공식의 입력변수 단위를 일반화시키지 않아 설계자들의 혼란을 야기시키는 경향이 있다.

이러한 문제점은 윤(1995)¹¹⁾등과 심(1998)⁸⁾등에 의해 이미 제기된 바 있다. 윤 등은 국내외 참고서적의 제안식을 원본 그대로 인용하여 비교해 보고 오자 및 잘못된 부분을 지적하였으며, 외국의 실정에 맞는 도달시간 산정식들을 제반여건이 서로 다른 우리나라에서 그대로 사용하고 있는 현실성에 문제점을 제기하였고, 추후 우리나라 실정에 적합한 산정식의 개발 필요성을 지적하였다. 또한 심 등은 홍수도달시간의 경우 국내외 각종서적을 참고로 하여 동일 공식에 있어서도 상이한 공식으로 나타나고 있는 각 공식에 대해 표준공식의 필요성을 제시하였으며, 총 7개의 도달시간 산

정식에 대해 표준화를 제안하였다.

본 연구는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 우리나라 농촌 소유역에 자주 인용되고 있는 홍수도달시간 산정공식(Kerby, SCS[lag], California 도로국, Kirpich, Rziha, Kraven 산정식)의 적용방법에 대한 편차를 최소화 하기 위하여 산정식에 사용되는 입력변수 및 출력값의 단위를 통일시켜 각각 일반화된 공식으로 재정립하였다. 또한 일반화된 공식을 이용하여 입력변수의 조건에 따른 도달시간을 비교하고 상대민감도 분석을 실시하였으며, 실측치와 비교 분석을 통하여 우리나라 지형적 특성을 고려한 도달시간 산정공식의 적용범위를 재정립하였다.

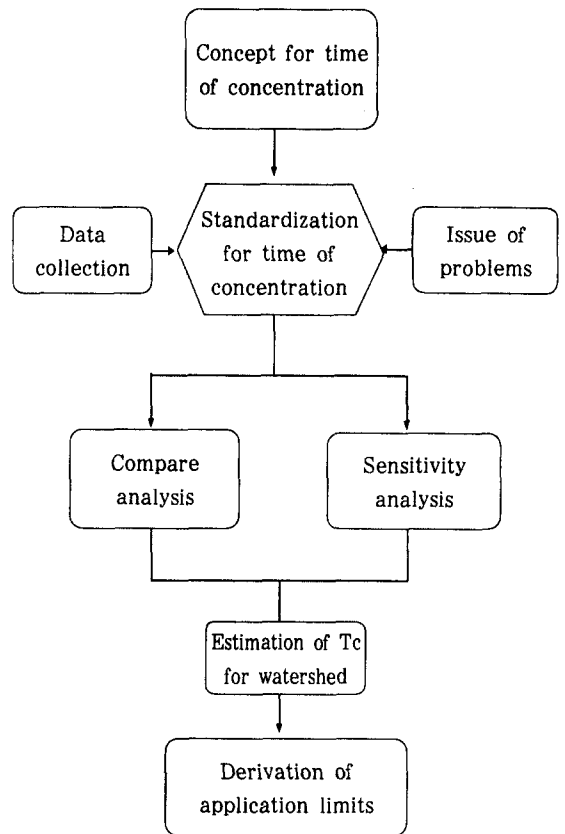


Fig. 1 Flow chart for the study

II. 연구방법

1. 공식의 일반화

도달시간을 계산하는 많은 방법들은 흐름에 영향을 요소 중에서 일반적으로 유역경사, 하도길이 및 토지이용 등과 같은 유역에 따른 매개변수를 사용하며, 그 형태는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.14)

$$T_c = C_p L_p^a S_p^b \dots\dots\dots(1)$$

여기서, C_p : 상수, L_p^a : 길이의 함수,

S_p^b : 경사의 함수, a, b : 유역조건 지수

제시된 도달시간 산정식은 실무에서 많은 적용되고 있는 경험적 공식으로 Kerby, Rziha, California 도로국, Kraven, SCS, Kirpich 공식을 선정하였으며, 일반화 방법은 먼저 국·내외 참고서적에 제시된 공식의 오자와 단위환산과정에서의 오류를 지적하고, 입력변수 조건을 하도길이(L)와 유역경사(S)로 통일하였으며, 단위의 통일을 하였다.

2. 입력변수의 비교분석

본 장에서는 일반화시킨 도달시간 산정공식을 가지고 같은 조건하에서 하도길이(L), 유역표고차(H), 유역경사(S)를 달리하여 각 입력변수의 조건에 따른 도달시간을 산출하며, 비교분석을 실시하기 위해 다음과 같은 입력변수의 적용범위를 결정하였다.

가. 길이의 조건

일반화 시킨 도달시간 산정공식에 대해 유역의 표고차를 일정하게 유지시키고, 길이 즉 유역의 하도길이 조건을 달리하여 계산된 도달시간에 대해 비교분석을 하고자 한다. Fig. 2는 길이조건에 대한 개략도를 보여주는 것으로서 유역의 표고차

는 100m로 고정시키면서 하도길이를 1~42km 범위내에서 도달시간을 산출하였다.

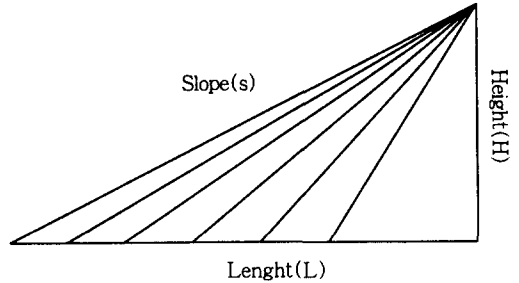


Fig. 2. Diagram of several lengths for analyzing input parameters

나. 높이의 조건

일반화시킨 도달시간 산정공식에 대해 유역의 하도길이를 일정하게 유지시키고, 유역의 높이 즉 표고차를 달리 했을 경우 각 산정공식에서 계산된 도달시간의 비교분석을 실시하고자 한다. 높이의 개략도는 Fig. 3과 같으며, 하도길이는 5km로 고정시켰을 때, 유역의 표고차를 10~1,000m 범위에 대해 적용시켰다.

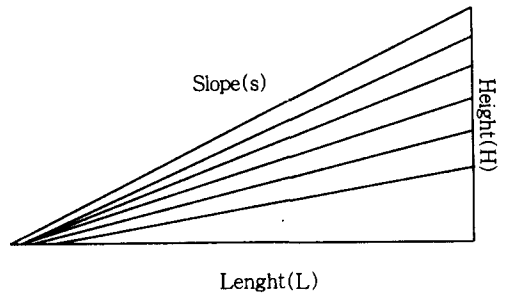


Fig. 3. Diagram of several heights for analyzing input parameters

다. 경사의 조건

경사의 조건은 지금까지 높이나 하도길이를 각각 일정하다는 조건으로 도달시간을 산정한 것과는 달리 경사가 일정하다는 가정하에 높이와 하도길이를 같은 비율로 변화시켜 각각에 대해 도달시간을 산정하였다. 이러한 접근방법은 도달시간과

유역면적과의 관계로 볼 수 있다고 사료되며, 경사조건의 개략도는 Fig. 4와 같다.

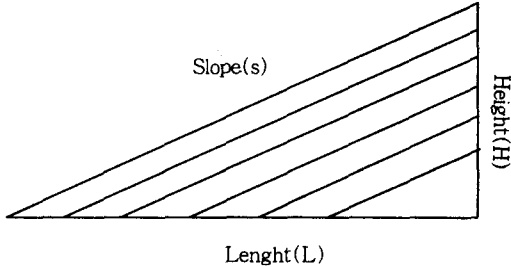


Fig. 4. Diagram of several lengths and heights with constant slope for analyzing input parameters

3. 민감도 분석

민감도는 다른 요인의 변화에 대한 한 요인의 변화율을 말한다. 민감도의 일반적 정의는 양해 함수 0를 Taylor시리즈로 전개할 하여 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.²²⁾

$$0 = f(F_1, F_2, \dots, F_n) \dots\dots\dots(2)$$

요인 0는 어떤 모형의 결과 또는 모형의 한 성분의 결과이다. 요인 F_i 의 변화에 따른 요인 0의 변화는 식(3)과 같다.

$$f(F_i + \Delta F_i, F_j | j \neq i) = 0_0 + \frac{\partial 0_0}{\partial F_i} \Delta F_i + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 0_0}{\partial F_i^2} \Delta F_i^2 \dots\dots\dots(3)$$

여기서 0_0 는 각 F_i 의 특정한 값에서 0의 값이다. 만약 비선형 항이 선형 항과 비교하여 작으면 식(3)는 식(4)과 같다.

$$f(F_i + \Delta F_i, F_j | j \neq i) = 0_0 + \frac{\partial 0_0}{\partial F_i} \Delta F_i \dots\dots\dots(4)$$

따라서

$$\Delta 0_0 = f(F_i + \Delta F_i, F_j | j \neq i) - 0_0 \left[\frac{\partial 0_0}{\partial F_i} \right] \Delta F_i \quad (5)$$

여기서 식(5)는 선형 민감도 방정식이다.

식(5)는 요인 F_i 변화에 따른 요인 0의 변화를 추정할 수 있다. 선형 민감도 방정식은 한 매개변수가 동시에 변화되는 경우도 전개할 수 있고, 식(2)와 식(5)로부터 민감도의 일반적 정의는 식(6)와 같이 유도된다.

$$S = \frac{\Delta 0_0}{\Delta F_i} = \frac{f(F_i + \Delta F_i, F_j | j \neq i) - f(F_1, F_2, \dots, F_n)}{\Delta F_i} \dots\dots\dots(6)$$

민감도 분석 방법을 분류하면 크게 성분 민감도, 절대 민감도 그리고 상대 민감도로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 여러가지 입력변수에 대한 상대적 중요성을 정량적으로 제시할 수 있는 상대 민감도에 대해서만 언급하기로 하였다. 상대 민감도 계산방법은 식(6)의 정의에 의하여 계산된 절대민감도에 분자를 0_0 , 분모를 F_i 으로 각각 나누면 F_i 의 상대적 변화에 대한 0의 상대적 변화를 추정할 수 있다.

$$R_i = \frac{\partial 0_0 / 0_0}{\partial F_i / F_i} = \frac{\partial 0_0}{\partial F_i} \frac{F_i}{0_0} \dots\dots\dots(7)$$

식(7)과 같이 상대 민감도 값은 0와 F_i 의 크기가 일정하기 때문에 요인 민감도 비교를 위한 유용한 수단을 제공할 수 있다.

4. 적용대상지역

본 연구는 평창강 유역, 보청천 유역, 위천 유역에 대한 실측값과 비교분석을 실시하였으며, 각각의 유역제원은 Table 1에서 보는 바와 같다. 평창강 유역의 6개의 관측지점에서 도달시간 산정을 위한 소유역의 제원을 나타내고 있다. 유역면적은 55.93~519.59km², 하도길이는 16.55~51.85km, 유역표고차는 253.8~386.3m의 범위를 각각 가지고 있으며, 유역경사는 0.0081~0.01591의 범위를 나타내고 있다. 보청천 유역은 총 5개의 관측지점에

대한 소유역의 제원을 나타내고 있다. 5개의 관측 지점에 대해 유역면적은 53.72~475.68km², 하도길이는 13.01~49.00km, 유역표고차는 210.0~285.0m의 범위를 보이고 있다. 유역경사는 0.00582~0.01615로 평창강 유역보다는 완만한 경사를 이루고 있으며, 산간지역과 평야지가 혼재한 유역특성을 보이고 있다. 위천유역은 총 6개의 관측지점에 유역면적은 33.63~472.53km², 하도길이는 8~42.83km, 유역표고차는 324.56~677.760m의 범위를 보이고 있으며, 유역경사는 0.01078~0.04057로 3개의 적용대상 유역 중 하도길이는 가장 짧은 반면 유역표고차는 가장 큰 특성을 보이고 있기 때문에 유역경사가 0.01를 넘은 급한 경사를 이루고 있다.

Table 1. Input parameters for calculating Tc of Pyungchang, Bochung and Wi river

Watershed	Subbasin	Area (km ²)	Length (km)	Height (m)	Slope
Pyungchang river	BangLim(No. 1)	519.69	51.85	386.3	0.00745
	HaBanJung(No. 2)	83.98	19.30	253.8	0.01315
	SangAnmi(No. 3)	396.25	44.20	357.9	0.00810
	BaekOkpo(No. 4)	142.26	22.95	265.9	0.01591
	JangPyung(No. 5)	103.55	25.95	323.7	0.01248
	LeeMokJung(No. 6)	55.93	16.55	337.1	0.02037
Bochung river	SanGye(No. 1)	475.68	49.00	285.0	0.00582
	GiDae(No. 2)	346.54	30.32	252.0	0.00832
	TanBu(No. 3)	72.53	19.20	237.0	0.01234
	LeePyung(No. 4)	79.52	16.81	230.2	0.01369
	SangSeung(No. 5)	53.72	13.01	210.0	0.01615
Wi river	MuSeung(No. 1)	472.53	42.83	461.71	0.01078
	ByeungChun(No. 2)	302.13	40.65	446.74	0.01099
	MiSeung(No. 3)	171.25	30.93	431.98	0.01398
	KoNo(No. 4)	109.73	18.90	393.88	0.02084
	DongKok(No. 5)	33.63	8.00	324.56	0.04057
	HyoReung(No. 6)	151.03	21.80	677.76	0.03109

5. 실측 홍수도달시간 적용

일반적인 도달시간 산정은 소유역일때는 수로에

색소등을 주입하여 시간을 측정하거나 강우주상도와 홍수수문곡선을 이용하여 강우중심과 첨두유출 발생 시각의 차로써 산정하고 있으나 무계측 지역의 도달시간은 주로 경험공식을 적용하여 산정되고 있다. 본 연구에서 적용한 홍수도달시간은 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서⁴⁾(건설부, 1989, pp. 381~386)에서 제시된 자료를 인용하였다. 이 자료는 IHP 사업으로 연구대상 유역에서 실측된 것이다.

III. 결과 및 고찰

1. 도달시간 산정식의 일반화

본 연구에서 도달시간 산정식의 일반화는 국내외 참고서적에 제시되어 있는 동일한 공식에 있어서도 상이한 공식으로 표기되어 있기 때문에 각 공식에 대해 잘못된 부분을 지적하고, 입력변수의 통일 및 단위를 표준화 시키는데 그 목적이 있으며, 각 공식의 특징 및 적용범위는 여러 참고서적에 수록된 내용을 종합하여 정리하였다.

가. Kerby 공식

총 4권의 참고서적을 수집하여 분석한 결과 이 공식의 적용대상지역은 길이와 경사의 함수 외에 보정계수의 함수로 볼 수 있다. 총 4권의 참고서적에서는 보정계수를 각각 지체계수, 표면계수, 조도계수란 용어로 사용하고 있다. 본 연구에서는 이러한 혼란을 없애기 위해 보정계수를 지체계수(N)로 통일하였으며, 지체계수(N)는 0.8 이하를 사용하고 토지이용도에 따라 Table 2와 같이 분류하였다. 4개의 공식을 적용한 결과 Singh의 저서와 공업수문학에서는 동일한 결과치가 나온 반면 나머지 두개의 공식은 상이한 결과치를 나타내었다. 적용대상지역은 유로연장이 0.4km이고, 유역면적은 0.04km² 내에서 적용되며, 유역경사는 1% 이하인 유역에서 적용가능하다. 4개의 참고서적을 분석한 결과 다음과 같이 일반화하였다.

$$T_c = 36.255 \frac{(Ln)^{0.467}}{S^{0.2335}}$$

여기서 T_c : 도달시간 (min), L : 유로연장 (km),
 S : 유역 경사(m/m), n : 지체계수

Table 2. Surface retardance coefficient(N)

표 면 상 태	N값
매끄러운 불투수 표면 (Conc'면)	0.02
매끄럽고 잘다져진 나지	0.10
불량초지, 줄경작, 또는 보통조도의 나지	0.20
목초지 및 보통의 초지	0.40
산림지	0.60
일반적인 산간유역	0.70
산림지(깊은 낙엽퇴적지), 침엽수림, 조밀한 초지	0.80

나. Rziha 공식

적용대상 지역은 하도경사가 0.5% 이상인 유역에 적용되며, 대상지역은 산지와 평야지역이 혼재할 경우와 지표면의 흐름이 지배적인 지역에서 적용가능하다. 하도길이와 유역면적에 대한 구체적인 적용범위는 조사할 수 없었으며, 각각의 공식의 도달시간 단위에 대해 농림부는 초(s)로, 건설부는 분(min), 공업수문학은 분(min), 응용수문학은 시(h)로 각각 정의되었으며, 이러한 단위 환산 과정에서 오류가 발생한 것으로 볼 수 있다. 건설부 공식에서는 지수 (0.6)을 (-0.6)으로 수정해야 하며, 응용수문학에서는 유로연장의 단위를 미터(m)에서 킬로미터(km)로 환산하여 대입해야 한다. 총 4개권의 참고서적을 종합한 결과 다음과 같은 공식으로 일반화하였다.

$$T_c = 0.833 \frac{L}{S^{0.6}}$$

여기서, T_c : 도달시간(min), L : 유로연장(km),
 S : 유역경사(m/m)

다. California 도로국 공식

이 공식은 경사도가 단순해야 적용이 가능하다. 따라서 유로의 경사도가 상이하게 구성되어 있을

경우 각 구간의 경사도를 구간장의 가중평균으로 평균경사를 구한 후 적용시키고, 주로 산지 소유역을 대상으로 한다. 일반화 공식은 다음과 같다.

$$T_c = 60 \left(\frac{0.869 L^2}{1000S} \right)^{0.385}$$

여기서, T_c : 도달시간(min), L : 유로연장(km),
 S : 유역경사 (m/m)

라. Kraven 공식

하도의 경사가 1/200 이하인 유역에서 적용가능한 공식이며, 주로 중하류 유역을 대상으로 한다. 참고서적에는 모두 동일한 공식으로 표기되어 있어 Kraven 공식은 하천시설기준에 나와있는 공식을 그대로 적용하기로 한다.

$$T_c = 0.444 \frac{L}{S^{0.515}}$$

여기서, T_c : 도달시간(min), L : 유로연장(km),
 S : 유역경사(H/L, m/m)

마. SCS(lag) 공식

농업지역 중 소유역을 대상으로 개발된 공식으로 지체시간과 도달시간 관계를 이용하여 개발된 공식이다. 도달시간은 지체시간의 1.67배이며 적용면적은 약 0.8km², 유로연장은 6km 이내이고, 유역의 경사도가 크게 변하지 않는 단순한 유로형태에 적용된다. 분석결과 SCS 공식이 제시된 농림부와 Singh 저서는 동일한 값을 보인 반면 하천시설기준은 상이한 계산 결과가 나왔다. 따라서 일반화된 공식은 다음과 같다.

$$T_c = 3.56 \frac{L^{0.8} (25400/CN - 254 + 25.4)^{0.7}}{10S^{0.5}}$$

여기서 T_c : 도달시간 (min), L : 유로연장 (km),
 S : 유역경사(m/m), CN : 유역유출수
 문곡선지수

바. Kirpich 공식

테니스주의 7개의 농업지역을 대상으로 개발한 공식으로 수집된 5개의 공식에 대해 농림부에서는 유역면적이 잘못 적용되었고, 하천시설기준에서는 계수값이 틀리게 기록되었다. 유역면적은 0.453km² 이하이며, 하도경사는 3~10%에서 적용가능하다. 일반화된 공식은 다음과 같다.

$$T_c = 3.98 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

여기서, T_c : 도달시간(min), L : 유로연장(km), S : 유역경사(m/m)

Kirpich 산정식은 California 도로국 공식과 같은 지역을 대상으로 유도된 공식으로 도달시간(T_c)은 같은 결과치를 나타내고 있다.

2. 입력변수의 비교 분석

가. 하도길이 조건

입력변수조건중 하도길이의 조건은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 유역의 표고차는 일정하다는 가정하에 하도길이를 달리했을 경우이다. 이때 하도길이의 범위는 1~42km이며, 유역의 표고는 100m로 고정하여 적용시켰다. 지체계수(N), 유역유출수문곡선지수(CN)가 고려되는 Kerby와 SCS(lag) 산정식에서 지체계수는 Table 2를 이용하여 표면상태가 목초지 및 보통의 초지로 N값을 0.4로 가정하였으며, CN값은 90으로 가정하여 도달시간을 산정하였다.

Fig. 2의 조건으로 계산된 도달시간은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 총 6개의 산정공식에 대한 길이 함수의 도달시간을 나타내고 있다. 1~42km 범위에서 하도길이가 증가할수록 6가지 공식에 대한 도달시간의 차이는 크게 나타나는 경향을 볼 수 있으며, 이중 SCS(lag) 산정공식이 가장 큰 증가 추세를 보인 반면, Kraven 산정공식이 같은 조건하에 가장 작은 값을 나타내고 있다. 또한 하도길

이가 15km 범위 내외에서는 SCS와 Kraven 산정공식을 제외한 4가지 도달시간 산정공식이 비슷한 값을 보이는 경향이 있다.

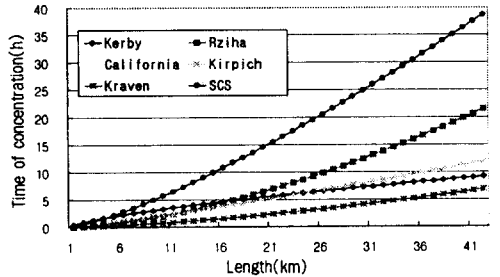


Fig. 5. Time of concentration calculated according to river length

나. 유역표고차 조건

Fig. 3 개략도에서 보는 바와 같이 유역의 유로연장 즉 하도길이가 일정하다는 가정하에 높이의 조건을 달리했을 경우, 일반화된 6개의 산정공식의 도달시간을 산출하였다. 이때 유로연장은 5km로 고정시켰으며, 높이는 10~1000m의 범위에 대해 적용시켰다. 지체계수(N), 유역유출수문곡선지수(CN)값은 하도길이조건일 때와 동일한 값을 적용시켰다. 유역표고차 즉 높이변화에 따른 도달시간은 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 유역표고차가 클수록 도달시간의 차이는 일정한 추세를 보여주고 있으며 특히, 높이 150m 이하인 범위에서는 SCS(lag) 산정공식이 가장 큰 값을 보인 반면 150m 이상일 경우에는 Kerby 산정공식이 가장 큰 값을 나타내었다. 반면에 높이 별로 가장 작은 값을 나타낸 산정공식은 유로연장 조건에서와 같이 Kraven 산정공식이 가장 작은 값을 나타내었다.

모든 도달시간 공식에 대해 유역표고가 200m이 내에서는 도달시간이 급격한 감소추세를 보이는 반면 200m이상부터는 감소추세가 완만한 곡선을 이루고 있는 동시에 도달시간의 차이도 거의 등간격을 이루고 있다. 이는 도달시간과 하도길이의 관계는 비례관계이며, 유역표고차는 반비례관계로서 하도길이와 유역표고차에 대한 적용범위의 한계치가 있음을 알 수 있다. 또한 도달시간 산정공

식을 추정하는데 있어서 유역의 산지보다는 평야 지역에서 보다 신중한 고려가 필요하다고 사료된다.

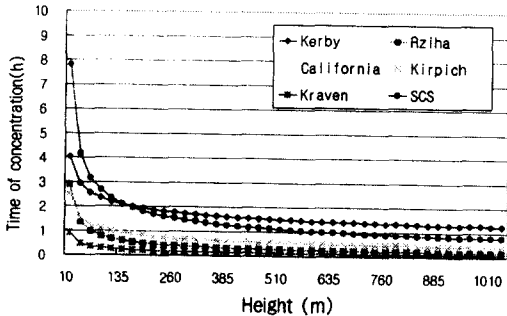


Fig. 6. Time of concentration calculated according to basin height

다. 유역경사 조건

입력변수의 비교분석 중 경사 조건은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 유역경사를 고정시키면서, 하도길과 유역표고차를 일정한 비율로 변화시켜 유역경사의 입력변수에 대한 도달시간을 산정하였다. 이러한 접근방법은 유역면적과 도달시간과의 관계를 비교분석하기 위함이다. 두 개의 입력변수 범위는 유로연장이 0.5km~41.5km이고, 높이는 25m~2075m 범위내에서 비교분석을 실시하였다. 앞에서와 마찬가지로 지체계수(N)와 유역유출수문곡선지수(CN)에 대해 동일조건을 사용하였으며, 도달시간 산정 비교치는 Fig. 7과 같다. 일반적으로 도달시간 증가 추세는 길이조건 일때와 비슷한 양상을 보이고 있으나, 하도길과 유역표고차를 일정한 비율로 동시에 증가할수록 도달시간의 곡선은 완만한 성향을 띄고 있다.

Fig. 7을 보면 길이가 7km 이하일 경우에는 Kerby 공식이 급격한 증가를 보이면서 가장 큰 값을 나타낸 반면, 7km 이상일 때는 SCS(lag) 공식이 가장 큰 값을 가졌다. 또한 길이의 조건 및 높이의 조건에서와 마찬가지로 Kraven 공식이 가장 작은 값을 나타내었다. Kerby와 SCS(lag)를 제외한 나머지 4개의 공식의 도달시간 변화율은 일정한 추세를 보여주고 있다.

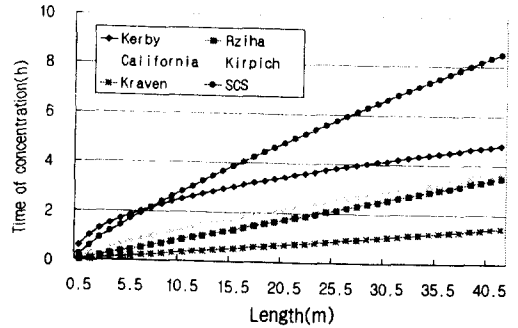


Fig. 7. Time of concentration calculated according to length and height with constant slope

3. 상대민감도 분석

민감도는 다른 요인의 변화에 대한 한 요인의 변화율을 말하며, 민감도 분석 방법을 분류하면 크게 성분 민감도, 절대 민감도 그리고 상대 민감도로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 Taylor 시리즈를 이용하여 여러가지 입력변수에 대한 상대적 중요성을 정량적으로 제시할 수 있는 상대민감도에 대한 분석결과는 다음과 같다.

가. 하도길이 조건의 상대민감도

Fig. 8의 상단 막대그래프는 6개의 도달시간 산정식에 대하여 하도길의 상대민감도를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 길이에 대한 상대민감도는 하도길이가 증가함에 따라 도달시간의 상대적 민감도의 변화율은 일정한 경향을 보여주고 있다. 즉 6개의 도달시간 산정식은 하도길이의 증감에 상관없이 일정한 영향을 받는 특성을 보이고 있다.

각각의 공식에 대해서는 Rziha 공식과 Kraven 공식의 상대민감도가 가장 큰 1의 값을 나타낸 반면 Kerby 공식은 가장 작은 값인 0.467를 기록하였다. 이는 6개의 공식들 중 Rziha와 Kraven 산정 공식이 하도길이에 대해 가장 민감한 반면, Kerby 공식은 상대적으로 낮은 민감성을 나타내고 있다. 총 6가지 공식에 대해 상대민감도의 범위는 0.467~1의 범위를 이루고 있으며, 상대민감도에서도

California와 Kirpich 산정공식은 같은 민감도를 보여주고 있다.

나. 유역경사조건의 상대민감도

Fig. 8의 하단 막대그래프는 경사에 대한 상대민감도를 보여주고 있다. 경사에 대한 상대민감도 또한 길이에 대한 상대민감도와 같이 경사의 변화에 따른 상대민감도의 변화율은 일정함을 나타내고 있다. 각각의 산정공식을 비교해보면, Kerby공식은 -0.2로 6개의 산정공식들 중 가장 큰 값을 나타내었고, 반면 Rziha 공식은 -0.6로 가장 작은 값을 나타내었다. 이는 6개의 공식에 대한 경사조건의 상대민감도에 대해 Kerby공식이 경사에 대해 가장 큰 민감함을 알 수 있고, Rziha 공식이 상대적으로 작은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 경사의 상대민감도에서도 California 도로국 공식과 Kirpich 공식은 같은 값을 보이고 있다.

이처럼 이론적 분석결과에서도 도달시간에 대한 경사의 상대민감도는 음의 값을 가지고 있고, 이는 경사와 도달시간의 관계는 반비례한다는 것을

보여주고 있다. 또한 길이와 경사조건의 상대민감도를 종합해 본 결과 도달시간 공식은 일반적으로 경사보다는 하도길이에 대해 더 많은 민감함을 보이고 있음을 알 수 있다.

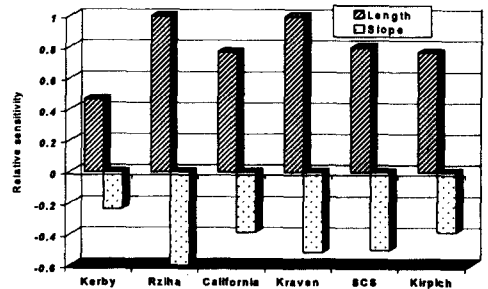


Fig. 8. Relative sensitivity according to input parameters

4. 도달시간 적용 및 분석

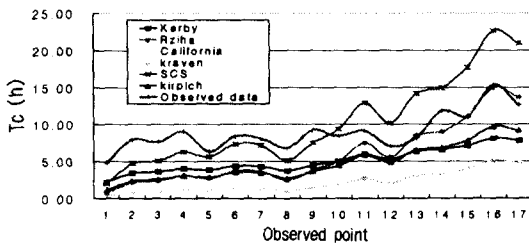
Fig. 9는 3개의 적용대상유역에 대해 총 17개의 소유역으로 구분하여 각각 하도길이, 유역표고차, 유역면적에 대한 결과치이다. 그림에서 보는

Table 3. Time of Concentration of Pyungchang, Bochung and Wi river

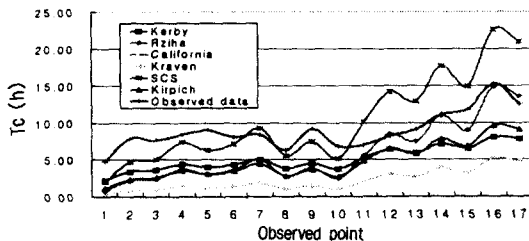
								(unit : h)
Watershed	Subbasin	Kerby	Rziha	California	Kraven	SCS	Kirpich	Observed data
Pyungchang river	BangLim(No.1)	7.8	13.6	9.1	4.8	20.9	9.1	12.6
	HaBanJung(No.2)	4.3	3.6	3.4	1.3	8.9	3.4	8.1
	SangAnmi(No.3)	7.1	11.0	7.8	3.9	17.6	7.8	11.1
	BaekOkpo(No.4)	4.5	3.8	3.6	1.4	9.3	3.6	9.2
	JangPyung(No.5)	5.0	5.0	4.4	1.8	11.6	4.4	8.4
	LeeMokJung(No.6)	3.6	2.4	2.6	0.9	6.37	2.6	7.6
Bochung river	SanGye(No.1)	8.1	14.9	9.6	5.1	22.6	9.6	15.3
	GiDae(No.2)	5.9	7.5	5.8	2.6	12.9	5.8	9.1
	TanBu(No.3)	4.4	3.7	3.5	1.4	9.2	3.5	8.4
	LeePyung(No.4)	4.0	3.1	3.0	1.1	7.9	3.0	9.0
	SangSeung(No.5)	3.4	2.1	2.4	0.8	5.9	2.3	7.9
Wi river	MuSeung(No.1)	6.5	9.0	6.8	3.3	14.9	6.8	11.8
	ByeungChun(No.2)	6.4	8.5	6.5	3.1	14.2	6.5	8.2
	MiSeung(No.3)	5.3	5.6	4.8	2.1	10.1	4.8	7.0
	KoNo(No.4)	3.8	2.7	2.8	1.0	7.1	2.8	6.3
	DongKok(No.5)	2.2	0.8	1.1	0.3	2.5	1.1	4.8
	HyoReung(No.6)	3.7	2.4	2.7	1.0	6.4	2.7	6.8

바와 같이 일반화된 6개의 도달시간 산정식에 대해 하도길이와 유역면적의 도달시간은 SCS>Rziha>Kerby>California=Kirpich>Kraven 순으로 나타내었으며 이는 앞에서 수치해석적으로 분석한 결과와 일치함을 보여주고 있다. 입력변수의 조건에서는 하도길이와 유역면적이 증가할수록 도달시간은 증가하는 추세를 보이고 있으며, 입력변수가 증가할수록 총 6개의 도달시간 산정식의 차이는 일정한 증가추세를 보이고 있다. 이는 앞장에서 언급한 입력변수의 비교분석결과와 동일한 경향을 나타내고 있다. 이에 반해 유역표고차에 대한 도달시간은 특별한 경향을 찾아 볼 수가 없었다.

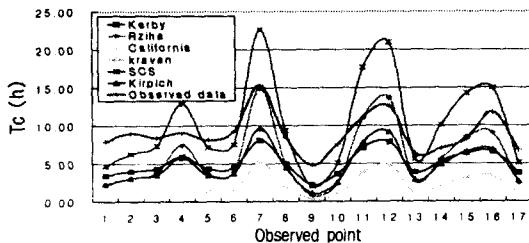
Table 3에서 보는 바와 같이 각 평창강, 보청천,



(a) Time of Concentration by the sorting length



(b) Time of Concentration by the sorting height



(c) Time of Concentration by the sorting slope

Fig. 9. Time of Concentration for the whole 17 subbasins

위천 유역에 대해서는 Rziha 산정공식과 SCS 산정식이 실측치와 가장 유사한 값을 보이고 있다. 총 17개의 소유역에 대해 Rziha 산정공식의 경우 8개의 소유역에서 실측치와 가장 비슷하게 계산되었으며, 유역특성별로 살펴보면 유역면적은 약 300~500km², 하도길이는 30~60km, 유역경사는 0.01 이하인 범위에서 적용범위가 도출되었다. SCS 산정식은 총 17개의 소유역중 9개의 소유역에서 실측치와 가장 비슷하게 계산되었으며, Rziha 산정식보다는 소유역에서 적용가능한 공식으로 적용범위는 유역면적이 100~200km², 하도길이는 10~30km, 유역경사는 0.01 이상인 범위에서 적용범위가 도출되었다. 이는 앞에서 제시된 외국 지역의 적용범위와 비교해보면 상당한 차이가 있음을 알 수 있으며, 특히 Rziha 공식 경우에는 적용범위가 제시되어 있지 않는 경우로서 도달시간의 실측자료를 이용하여 우리나라 지형적 특성을 고려한 적용범위를 제시하였다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 우리나라 농촌지역의 소유역에 자주 인용되고 있는 홍수도달시간 산정공식(Kerby, SCS(lag), California 도로국, Kirpich, Rziha, Kraven 산정식)에 대해 오차 및 잘못된 부분을 지적하였고, 산정식에 사용되는 입력변수 및 출력값의 단위를 통일시켜 각각에 대해 일반화된 공식으로 재정립하였다. 또한 일반화시킨 공식을 이용하여 각각의 입력변수에 따른 도달시간에 대해 비교 및 상대민감도 분석을 실시하였고, 실측치와 비교 분석을 통한 우리나라 지형적 특성을 고려한 기존의 도달시간 산정공식의 공식의 적용범위를 재정립하였으며, 다음과 결론을 얻을 수 있었다.

1. 입력변수 비교분석 결과 도달시간은 길이조건과 경사조건일 때 SCS 산정식이, 높이의 조건일 때 Rziha 산정식이 가장 크게 계산된 반면, Kraven 산정식은 모든 조건에서 가장 작게 계산되었다.

2. 유역표고차의 입력변수조건에서 도달시간 산정시에 산간지역보다는 평야지역에서 보다 신중한 고려가 필요하다고 판단된다.

3. 상대민감도 분석결과 길이와 경사 조건에 따른 상대민감도는 일정하며, 경사보다는 유로연장에 대해 높은 민감성을 나타내어 유달시간 산정시 경사보다 유로장의 계산구간을 짧게 나누는 것이 타당한 것으로 분석되었다.

4. Rziha 산정식은 유역면적 약 300~500km², 하도길이 30~60km, 유역경사는 0.01 이하인 범위에서 변수의 적용범위가 도출되었고, SCS 산정식은 유역면적이 100~200km², 하도길이는 10~30km, 유역경사는 0.01 이상일 경우에 가능한 변수의 적용범위가 도출되었다.

이와 같이 본 우리나라 유역의 도달시간 실측치를 비교분석하여 도출된 적용범위와 외국지역에서 개발되어 제시된 적용범위와 비교해보면 상당한 차이가 있음을 알 수 있으며, 특히 Rziha 공식 경우에는 적용범위가 제시되어 있지 않는 경우로서 도달시간의 실측자료를 이용하여 우리나라 지형적 특성을 고려한 공식의 적용범위를 제시할 수 있는 토대를 마련할 수 있었다. 차후 우리나라 유역에 대해 좀더 많은 실측치를 이용하여 여러 가지 산정공식들의 적용범위를 재정립할 수 있는 연구가 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

- McCuen, R. H., Wong, S. L., W. J., 1984, Estimation Urban time of Concentration, J. of Hydrology, ASCE, Vol. 110, No.7, pp. 88 7~904.
- SCS., 1975, Urban Hydrology for small Watersheds, Technical Release, No. 55, Soil Conservation Service, U. S. Department of Agriculture.
- Singh, V.P., 1976, Hydrologic systems (Rainfall-runoff modelling volume1), Prentice-Hall, Inc.
- 건설부, 1982, 1989, 1991, 국제수문개발계획 (IHP) 대표유역연구조사 보고서, pp. 17~81, pp. 380~386, pp. 2-1~2-51.
- 건설부, 1993, 하천시설기준.
- 농어촌진흥공사, 1997, 배수개선홍수시스템개발.
- 박성우, 1984, 응용수문학, 향문사.
- 심재현, 조원철, 1998, 홍수도달시간과 임계지속시간의 개념 비교(I), 한국수자원학회지, 31(5), pp. 115~132.
- 유동훈, 전우용, 엄호석, 1998, 도달시간 산정식, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 44~49.
- 윤석영, 홍일표, 1994, 소유역의 응답시간특성 산정방법에 따른 시간면적도의 작성과 적용, 제36회 수공학연구발표회 논문집, pp. 279~283.
- 윤여진, 최진구, 김재한, 1995, 도달시간 산정식에 대한 비교 연구, 1995년도 학술발표회 논문집(II), pp. 57~60.
- 윤용남, 1994, 공업수문학, 청문각.
- 한국건설기술연구원, 1992, 수문모형 평가에 관한 연구.
- 한국건설기술연구원, 1994, 홍수유출 예측을 위한 수리·수문학적인자의 결정 -Clark 및 Nash 모형을 중심으로-, 전기연 94-WR-113 pp. 7~21.
- 한국건설기술연구원, 1991, 평창강유역의 수문 특성조사, 전기연 91-WR-111.