

## 유역 집중시간 및 저류상수의 이론적 배경과 경험식

### Theoretical Backgrounds of Basin Concentration Time and Storage Coefficient and Their Empirical Formula

이 지 호\* / 유 철 상\*\* / 신 지 예\*\*\*

Lee, Jiho / Yoo, Chulsang / Sin, Jiye

#### Abstract

This study proposes proper forms of empirical formulas for the concentration time and storage coefficient based on their theoretical backgrounds and evaluates several existing empirical formulas by comparing them with the formula proposed in this study. Additionally, empirical formulas for the concentration time and storage coefficient of the Chungju Dam basin were derived using the forms proposed by considering their theoretical backgrounds, and compared with existing empirical formulas. The results derived are summarized as follows. (1) The concentration time of a basin is proportional to the square of the main channel length, but inversely proportional to the channel slope, as the flood flow is generally turbulent. (2) The storage coefficient is proportional to the concentration time. (3) The comparison results with existing empirical formulas for the concentration time indicates that the empirical formulas like the Kirpich, Kraven (I), Kraven (II), California DoT, Kerby, SCS, and Morgali & Linsley are in line with the form proposed in this study. Among existing empirical formulas for the storage coefficient, the Clak, Russell, Sabol and Jung are found to be well matched to this study. (4) The application results to Chungju Dam basin indicates that among empirical formulas for the concentration time, the Jung, Yoon, Kraven (I), and Kraven (II) show relatively similar results to the observed in this study, but the Rziha shows abnormal results. Among the empirical formulas for the storage coefficient, the Yoon and Hong, Jung, Lee, and Yoon show somewhat reasonable results, but the Sabol shows abnormal results. In conclusion, the empirical formulas for the concentration time and storage coefficient developed in Korea are found to reflect the basin characteristics of Korea better.

**Keywords** : storage coefficient, concentration time, empirical formula

#### 요 지

본 연구에서는 유역 집중시간과 저류상수의 이론적 배경을 바탕으로 적절한 경험식의 형태를 제시하고 기존의 경험식의 형태와 비교·평가하였다. 추가로, 제시된 경험식의 형태를 이용하여 충주댐 유역의 집중시간 및 저류상수의 경험식을 유도하고, 유도된 경험식과 기존의 경험식들을 비교하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다. (1) 유역의 집중시간에 대한 경험공식의 형태는 유로연장의 제곱에 비례하고 유로경사에 반비례하는 형태로 나타난다. (2) 저류상수는 집중시간에 비례하는 형태로 나타난다. (3) 기존 매개변수에 관한 경험식을 검토한 결과, 집중시간의 경우에는 Kirpich 공식, Kraven (I) 공식, Kraven (II) 공식, California DoT 공식, Kerby 공식, SCS 공식 및 Morgali and Linsley 공식 등이 이러한 이론적

\* 교신저자, 고려대학교 대학원 건축사회환경공학부 박사 (e-mail: kijihito@korea.ac.kr, Tel: 02-3290-3912)

*Corresponding Author*, Ph.D., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

\*\* 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수 (e-mail: envchul@korea.ac.kr)

Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

\*\*\* 고려대학교 대학원 건축사회환경공학부 석사과정 (e-mail: soonie53@korea.ac.kr)

Master's Course., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

배경을 잘 따르고 있는 것으로 나타난다. 저류상수의 경우, Clark 공식, Russell 공식, Sabol 공식 및 정성원 공식 등이 본 저류상수와 집중시간의 비례관계를 매우 잘 만족하는 것으로 나타난다. (4) 기존의 경험식을 충주댐 유역에 적용한 결과, 집중시간의 경험식 중 정성원 공식, 윤태훈 등 공식, Kraven (I) 공식 및 Kraven (II) 공식은 추정된 집중시간과 비교적 유사한 결과를 보였으나, Rziha 공식은 비정상적인 결과를 나타내는 것으로 나타났다. 저류상수의 경우에는 윤석영과 홍일표 공식, 정성원 공식, 이정식 등 공식 및 윤태훈 등 공식이 어느 정도 합리적인 결과를 보인 반면, Sabol 공식의 경우에는 비정상적인 결과가 유도되었다. 결론적으로 국내의 집중시간 및 저류상수에 대한 경험공식이 국내 유역의 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 저류상수, 집중시간, 경험식

## 1. 서 론

유역의 유출특성은 다양한 인자들로 정량화될 수 있다. 선형시스템 이론을 가정하는 경우에는 단위유량도(unit hydrograph, 이하 단위도라 칭함)를 구성하는 제인자들이 이러한 인자들을 대변할 수 있다. 첨두유량(peak flow), 첨두시간(peak time), 상승부 및 하강부의 변곡점(deflection point), 총 유출시간 또는 기저시간(base time) 등이 단위유량도를 구성하는 제인자에 포함된다(Yoon, 2007). 그러나 유역의 유출특성은 홍수유출의 보다 근본적인 특성에 의하여 추정될 수 있기도 하다. 가장 대표적인 것이 유역의 저류상수(storage coefficient)와 집중시간(concentration time)이다.

유역의 저류상수와 집중시간은 특히 홍수유출의 첨두유량 및 첨두시간을 추정하는데 결정적인 역할을 한다. 국내에서 가장 많이 이용되는 강우-유출의 해석방법인 Clark 단위도(Clark, 1945)도 이들 두 매개변수로 표현된다. 즉, 선형시스템 이론으로 가정하는 경우, 이들 두 매개변수가 유역의 홍수유출 특성을 대표할 수 있다.

그러나 단 두 개의 매개변수로 Clark 단위도를 정의할 수 있음에도 불구하고, 이들 두 매개변수를 결정하는 것은 그리 간단하지 않다. 사실, 모든 강우-유출 사상에 대해 유일하게 적용되는 매개변수를 찾아내는 것은 현실적으로 불가능하다. 이는 유역에서의 강우-유출 과정을 선형으로 가정하였기 때문이다. 즉, 근본적으로 비선형인 강우-유출 과정을 선형으로 가정함에 따라 발생하는 문제이다. 또 다른 문제는 이들 두 매개변수가 서로 관계되어 있다는 점이다. 따라서 정밀하게 관측된 강우-유출 기록이 가용하다 하더라도 이들 두 매개변수를 유일하게 결정하기 어려운 것이 현실이다. 이러한 문제점을 해결할 방안으로 Yoo and Shin (2010)는 Nash (1958)의 순간단위도 형태를 차용하여 유출특성을 유도하는 방안을 제시한

바 있다. 이 방법론의 적용을 통해 비상식적인 매개변수의 추정문제는 어느 정도 해결할 수 있다.

한편, 미계측 유역에서는 경험공식을 이용하여 매개변수를 추정한다. Kirpich 공식, Rziha 공식, Kraven 공식 등이 국내에서 사용되고 있는 대표적인 집중시간 산정 경험 공식이다. 주로 국외에서 개발된 식으로 경험공식별로 추정값에 큰 차이를 보이므로, 적용시 주의를 기울려야 한다 (Jeong et al., 2006; Yoon, 2007; Jeong and Yoon, 2007; Yoo, 2009). 또한, 국외에서 개발된 경험공식은 우리나라의 지역성을 반영하지 못할 가능성이 크다는 문제점도 있다. 국내의 자료를 이용하여 제안된 경험공식의 경우에도 대상지점의 제한, 이용자료의 부족, 매개변수 추정시의 주관적 판단, 검증과정의 미비 등으로 수문설계의 실무에서 활용성이 많이 떨어지고 있다(Jung, 2005).

집중시간과 저류상수의 결정에 관여하는 인자의 특성은 유역면적, 유로연장, 유로경사, 강우강도 등으로 경험 공식마다 다양하다. 그럼에도 불구하고, Yoo (2009)의 연구에 의하면 유역의 집중시간과 관련한 경험공식의 형태는 매우 유사한 것으로 나타났다. 이는 집중시간을 결정하는 유역의 특성인자가 대체로 유사함을 의미하며, 또한 유역 전반에 걸쳐 일관된 식의 형태를 적용하는 지역화가 가능함을 의미한다.

본 연구에서는 유역대표 집중시간과 저류상수의 이론적 배경을 검토하고 이를 바탕으로 일관적으로 적용할 수 있는 경험식의 형태를 제시하고자 한다. 그러나 유역의 물리적인 특성에 따라 이론적 경험식의 계수들이 어떻게 결정되는지를 살펴보는 연구는 아니다. 다만 집중시간과 저류상수의 이론적인 특성을 가지고 경험식을 평가해 보는 정도이다. 추가로 집중시간과 저류상수의 이론적 배경을 바탕으로 충주댐 유역의 매개변수 경험식을 유도해 보았다. 그리고 기존의 연구성과나 경험공식으로 추정된 집중시간 및 저류상수를 이용하여 그 특성을 검토함으로써,

선행연구에서 제시된 매개변수 경험식의 활용성을 평가해 보았다. 향후 다양한 유역에 대해 경험식을 유도한 후, 이를 유역의 특성에 따라 유역을 구분할 수 있다면 보다 정도 있는 경험식의 개발이 가능할 것이다.

## 2. 집중시간과 저류상수의 이론적 배경

### 2.1 집중시간의 이론적 배경

집중시간에 대한 이론적 배경은 Singh (1976), Yoo and Jun (2000) 및 Yoo et al. (2011)의 연구를 통해 살펴볼 수 있다. 먼저 Singh (1976)의 연구를 살펴보면, 그는 지표면 흐름을 운동파(kinematic wave) 이론으로 해석하여 다음과 같은 집중시간 산정식을 제시하였다.

$$T_c = I^{\frac{1-m}{m}} \left( \frac{L}{\eta} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

여기서,  $T_c$ 는 집중시간,  $L$ 은 유역길이,  $I$ 는 강우강도,  $\eta$ 는 마찰관계항,  $m$ 은 상수이다. Eq. (1)에 포함된 이러한 다양한 변수들은 단순한 상수가 아니면 물리적인 특성을 내포하고 있다. 먼저, 강우강도의 경우, Yoo et al. (2011)은 Sherman형 강우강도식에서 강우지속시간과 유역의 집중시간  $T_c$ 가 같다고 가정하여, 다음과 같은 관계를 유도하였다.

$$I = \frac{M}{T_c^k} \quad (2)$$

여기서,  $k$ 는 지역상수이고,  $M$ 은 재현기간의 함수이다. 또한 마찰관계항  $\eta$ 와 상수  $m$ 을 추정하기 위해, 다음과 같은 Chezy 평균유속공식을 도입하였다.

$$u = \sqrt{gHS/C} \quad (3)$$

여기서,  $u$ 는 평균유속,  $H$ 는 동수반경,  $S$ 는 수로경사,  $C$ 는 마찰계수이다. 층류흐름일 때 마찰계수  $C$ 는  $C = \beta/R_e$  ( $\beta$ 는 상수,  $R_e$ 는 레이놀즈수)로 나타낼 수 있다(Yoo and Lee, 2000). 이를 Eq. (3)에 대입한 후,  $H$ 를 수심  $h$ 로 가정하면,

$$u = \sqrt{\frac{ghS}{\left(\frac{\beta}{R_e}\right)}} = \sqrt{\frac{ghS}{\left(\frac{\beta\nu}{uh}\right)}} = \frac{gh^2S}{\beta\nu} \quad (4)$$

위 식에서  $\nu$ 는 동점성계수이다. 위 식을 운동파의 운동량 방정식  $u = \eta \cdot h^{m-1}$ 의 형태로 바꾸면,

$$u = \frac{gS}{\beta\nu} \cdot h^2 = \eta \cdot h^{m-1} \quad (5)$$

따라서  $\eta$ 와  $m$ 은 다음과 같이 나타난다. 즉,

$$\eta = \frac{gS}{\beta\nu}, \quad m = 3 \quad (6)$$

마지막으로 Eq. (2)의 강우강도  $I$ 와 Eq. (6)의 마찰관계항  $\eta$  및 상수  $m$ 을 Eq. (1)에 대입하면, 층류흐름일 경우에 대한 집중시간  $T_c$ 는 다음과 같이 나타나게 된다.

$$T_c = \left( \frac{\beta\nu L}{gM^2 S} \right)^{\frac{1}{3-2k}} = \left( \frac{\beta\nu}{gM^2} \right)^{\frac{1}{3-2k}} \cdot \left( \frac{L}{S} \right)^{\frac{1}{3-2k}} \quad (7)$$

한편 난류흐름일 경우 마찰계수는  $C = \beta(h/\epsilon)^{-1/3}$ 으로 나타낼 수 있다(Yoo and Jun, 2000). 이를 이용하여 층류흐름일 경우와 같은 방법으로 난류흐름일 경우의 집중시간을 유도하면 다음과 같다.

$$T_c = \left( \frac{\beta L^2 \epsilon^{1/3}}{gM^{4/3} S} \right)^{\frac{3}{10-4k}} = \left( \frac{\beta \epsilon^{1/3}}{gM^{4/3}} \right)^{\frac{3}{10-4k}} \cdot \left( \frac{L^2}{S} \right)^{\frac{3}{10-4k}} \quad (8)$$

여기서,  $\epsilon$ 는 상당조도(equivalent roughness)이다.

Eqs. (6) and (7)에서  $\beta$ ,  $\nu$ ,  $g$ ,  $k$  및  $M$ 는 모두 상수이므로, 층류흐름에서의 집중시간은  $(L/S)$ 의 함수 형태로, 난류흐름에서의 집중시간은  $(L^2/S)$ 의 함수 형태로 나타낼 수 있다. 홍수기 및 유역 상류에서의 흐름은 난류일 가능성이 크므로, 집중시간 산정식은 다음과 같은 형태를 가지게 될 가능성이 크다.

$$T_c = a \left( \frac{L^2}{S} \right)^b \quad (9)$$

여기서,  $a$ ,  $b$ 는 유역의 특성에 따라 결정되는 계수이다.

## 2.2 집중시간과 저류상수의 관계 검토

### 2.2.1 Saint-Venant 방정식에 나타난 집중시간과 저류상수의 관계

Dooge et al. (1982)은 선형시스템의 가정 아래, Muskingum 하도추적모형의 매개변수들과 Saint-Venant 방정식의 수리학적 매개변수들 간의 관계를 이론적으로 유도하였다. 이들 매개변수의 관계를 이용하면 집중시간과 저류상수의 관계를 추측할 수 있다. 먼저, Dooge et al. (1982)의 연구를 요약하면 다음과 같다(Kim, 2011).

측방유입이 없을 때, 개수로에서 1차원 부정류의 연속

방정식은 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

여기서,  $Q$ 와  $A$ 는 각각 유량과 단면적을 나타낸다. Saint-Venant 방정식에 의하면,

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g\bar{y}(1-F^2)\frac{\partial A}{\partial x} + \frac{2Q}{A}\frac{\partial Q}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (11)$$

여기서,  $\bar{y}$ 는 평균 수심,  $F$ 는 프루이드 수,  $S_0 - S_f$ 는 미소 시간  $dt$  동안 하향구배의 변화량이다. 정상부등류의 경우, 유량과 단면적은 각각  $Q = Q_0 + \partial Q$ ,  $A = A_0 + \partial A$ 로 정의할 수 있으므로, 이를 Eq. (10)에 대입하고 Eq. (11)과 연계하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \bar{y}_0(1-F_0^2)\frac{\partial}{\partial x}(\delta A) + \left(\frac{2Q_0}{A_0} + \frac{\partial S_f/\partial A}{\partial S_f/\partial Q}\right)\frac{\partial}{\partial x}(\delta Q) \\ & = gA_0\left(-\frac{\partial S_f}{\partial Q}\delta Q - \frac{\partial S_f}{\partial A}\delta A\right) \end{aligned} \quad (12)$$

상류단과 하류단에서의 단면적과 유량의 변화량을 알고 있다면, 다음과 같은 가정이 가능하다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\delta A) = \frac{\delta A_2 - \delta A_1}{L}, \quad \frac{\partial}{\partial x}(\delta Q) = \frac{\delta Q_2 - \delta Q_1}{L} \quad (13a, b)$$

여기서,  $A_1$ ,  $Q_1$ 는 상류에서의 흐름단면적과 유량,  $A_2$ ,  $Q_2$ 는 하류에서의 흐름단면적과 유량이고,  $L$ 은 구간길이이다. Eqs. (13a) and (13b)를 Eq. (12)에 대입하여 정리하면, 상류와 하류에서 각각 Eqs. (14a) and (14b)와 같이 정리된다.

$$(M-N)\delta A_1 - M\delta A_2 = (P-R)\delta Q_1 + R\delta Q_2 \quad (14a)$$

$$M\delta A_1 - (M+N)\delta A_2 = -R\delta Q_1 + (P+R)\delta Q_2 \quad (14b)$$

여기서,

$$M = \frac{gy_0}{L}(1-F_0^2), \quad N = gA_0(\partial S_f/\partial A) \quad (15a, b)$$

$$P = gA_0(\partial S_f/\partial Q), \quad R = \frac{2Q_0}{A_0L} + \frac{1}{L}\frac{\partial S_f/\partial A}{\partial S_f/\partial Q} \quad (15c, d)$$

Eqs. (14a) and (14b)를 연립하면, 상류와 하류의 각 흐름 단면적은 다음과 같이 상류와 하류유량의 선형결합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} N^2\delta A_1 = & -[(M)(R) + (M+N)(P-R)]\delta Q_1 \\ & + [(M)(P+R) - (M+N)(R)]\delta Q_2 \end{aligned} \quad (16a)$$

$$\begin{aligned} N^2\delta A_2 = & -[(M-N)(R) + (M)(P-R)]\delta Q_1 \\ & + [(M-N)(P+R) - (M)(R)]\delta Q_2 \end{aligned} \quad (16b)$$

한편 Muskingum 하도추적모형은 다음과 같다.

$$S(t) = K[xQ_1(t) + (1-x)Q_2(t)] \quad (17)$$

부정류의 홍수와 길이와 비교하여 구간의 길이가 매우 짧다면  $\delta S = L(\partial A_1 + \partial A_2)/2$ 로 가정할 수 있고, 이에 Eqs. (16a) and (16b)을 대입하면, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta S = & \frac{L}{2N^2}[-(2M+N)P + 2NR]\delta Q_1 \\ & + \frac{L}{2N^2}[(2M-N)P - 2NR]\delta Q_2 \end{aligned} \quad (18)$$

Eq. (17)에 의하여 어느 구간에서 순간의 저류량은  $\delta S = K[\delta xQ_1 + (1-x)\delta Q_2]$ 로 나타낼 수 있고, 이를 Eq. (18)과 비교하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Kx = \frac{L}{2N^2}[-(2M+N)P + 2NR] \quad (19a)$$

$$K(1-x) = \frac{L}{2N^2}[(2M-N)P - 2NR] \quad (19b)$$

Eqs. (19a) and (19b)를 더하고, Eqs. (15b) and (15c)를 대입하면 다음과 같다.

$$K = -\frac{P}{N}L = \left(-\frac{\partial S_f}{\partial Q} / \frac{\partial S_f}{\partial A}\right)L = \left(-\frac{\partial A}{\partial Q}\right)L \quad (20)$$

정상부류의 상태에서 홍수파의 전파속도  $c_k$ 는  $c_k = dQ/dA$ 로 표현되므로, Muskingum 하도추적모형에서 저류상수는 하도구간에서 홍수파의 도달시간으로 볼 수 있다(Eq. (21)). 또한 홍수파 전파속도와 유속의 관계는  $c_k = \gamma V$ ( $\gamma$ 는 상수)로 나타난다(Wong, 2002). 이를 이용하여 저류상수와 홍수파 전파속도 또는 평균유속과의 관계를 유추할 수 있다.

$$K = \frac{L}{c_k} = \frac{L}{\gamma V_{av}} \quad (21)$$

따라서 전 하도에 걸쳐 단면적의 형태가 일정하고, 홍수파 전파속도 혹은 평균유속이 일정하다면, 저류상수는

하도길이에 비례하게 된다. 물론 저류상수는 집중시간에도 비례하게 된다.

$$K \propto T_c \quad (22)$$

## 2.2.2 Nash 순간단위도에 나타난 집중시간과 저류상수의 관계

Nash 순간단위도는 선형저수지의 저류상수  $K$ 와 개수  $n$ 만으로도 잘 정의되지만, 수문곡선의 일반적인 정의에 따라 저류상수  $K^*$  (선형저수지의 저류상수와 구분하기 위하여 \*을 붙였음) 및 집중시간  $T_c$ 를 추가로 유도할 수 있다(Yoo, 2009). Nash는 유역 전체가 일련의  $n$ 개의 저수지로 구성되어 있으며, 각 저수지에 대한 저류량과 유출량의 관계는 선형이라 가정하여 유역의 순간단위도를 제안하였다(Yoon, 2007). Nash의 순간단위도는 다음과 같은 Eq. (23)로 나타낼 수 있다.

$$Q_n(t) = \frac{1}{K} \left( \frac{t}{K} \right)^{n-1} \frac{e^{-t/K}}{\Gamma(n)} \quad (23)$$

수문곡선으로부터 저류상수와 집중시간을 추정하는 방법은 간단하다. 집중시간은 유효강우가 끝나는 시점으로부터 유출수문곡선의 하강부 첫 번째 변곡점까지의 시간으로, 저류상수는 변곡점에서의 평균유량을 변곡점의 기울기로 나눈 값으로 정의된다(Sabol, 1988). 따라서,

$$T_c = K(n-1) + \sqrt{n-1} \quad (24)$$

$$K^* = K(\sqrt{n-1} + 1) \quad (25)$$

Eqs. (24) and (25)을 통해 두 특성치의 관계를 유도하면 다음과 같다.

$$T_c/K^* = \sqrt{n-1} \quad (26)$$

위와 같은 간단한 관계는 상수가 아닌 선형저수지의 개수  $n$ 의 함수로 나타난다. 만일  $n$ 이 주어진 유역에 대해 상류 또는 하류 어느 지점에서나 일정하다면, 유역의 집중시간과 저류상수의 비는 유역의 어느 지점에서나 동일하게 된다. 즉,

$$K^* = \alpha T_c \quad (27)$$

그러나 만일  $n$ 이 지점마다 다르다면 집중시간과 저류상수의 관계도 지점마다 다르게 되고, 따라서 유역 전체의 특성을 하나의 상수로 표현하는 것은 어려워진다. 이러한 경우에는 집중시간 및 저류상수의 관계가 주로 유역

이나 하천의 특성인자로 정량화 된다(Sabol, 1988).

## 3. 집중시간 및 저류상수에 관한 경험공식의 분석

### 3.1 집중시간에 관한 경험공식들

국내에서 사용되고 있는 미계측 유역의 집중시간과 저류상수를 위한 경험공식은 매우 다양하다(Jeong and Yoon, 2007). 국내에서 사용되고 있는 대표적인 집중시간의 경험공식은 Table 1과 같다. 여기서,  $T_c$ 는 집중시간(hour),  $A$ 는 유역면적(km<sup>2</sup>),  $L$ 은 유로연장(km),  $S$ 는 유역경사(공식에 따라 하도경사를 사용하기도 함),  $N$ 은 지체계수(retardance),  $V$ 는 유역의 평균유속(m/sec),  $i$ 는 강우강도(in/hr),  $n$ 은 Manning의 조도계수(resistance coefficient)를 나타낸다.

본 연구에서 검토한 경험식의 형태와 Table 1에서 제시된 기존 집중시간 경험공식을 비교하기 위해, 유로연장( $L$ )과 유로경사( $S$ ) 간의 지수비를 이용하였다(Fig. 1). 본 연구에서 검토한 집중시간은 난류흐름에서  $L^2/S$ 를 독립변수로 하는 멱함수이며, 유로연장( $L$ )과 유로경사( $S$ ) 간의 지수비가 2이다. 층류 상태에서 집중시간은  $L/S$ 를 독립변수로 하는 멱함수로, 유로연장( $L$ )과 유로경사( $S$ ) 간의 지수비는 1이다. 기존 집중시간 경험공식 중 유하속도  $V$ 와 고도차  $H$ 를 이용한 경우,  $V$ 는 Manning 공식에 의해  $V = \alpha S^{1/2}$ 로,  $H$ 는  $H = SL$ ,  $A$ 는  $A = L^2$ 로 변환하여 비교하였다.

Fig. 1을 살펴보면, Kirpich 공식, Kraven (I) 공식, Kraven (II) 공식, California DoT 공식, Kerby 공식, SCS 공식 및 Morgali and Linsley 공식 등 대부분의 경험식의 경우, 유로연장( $L$ )과 유로경사( $S$ ) 간의 지수비가 2로 나타난다. 반면, Johnston and Cross 공식과 Izzard 공식의 유로연장( $L$ )과 유로경사( $S$ ) 간의 지수비는 1로 나타난다. Rziha 공식, FAA 공식, SCS lag 공식은 층류와 난류의 중간적 특성을 보이는 것으로 나타난다. 그 외 Jung 공식과 Yoon et al. 공식은 유로연장( $L$ )과 유로경사( $S$ ) 간의 지수비가 2보다 큰 값으로 나타난다. 즉, 국외에서 개발된 대부분의 경험공식들은 난류 또는 층류의 이론적 경험식 형태를 만족한다. 따라서 국외에서 개발된 대부분의 경험공식들은 어느 정도 이론적 배경을 바탕으로 경험식이 개발되고 있다고 짐작할 수 있다.

### 3.2 저류상수에 관한 경험공식들

국내외에서 개발된 대표적인 저류상수의 경험공식은 Table 2와 같다. 여기서,  $K^*$ 는 유역의 저류상수(hour),  $C$ 는 유출계수,  $L$ 은 유로연장(km),  $A$ 는 유역면적(km<sup>2</sup>),  $S$ 는 하도경사,  $b$  및  $\alpha$ 는 보정계수를 나타낸다. 참고로  $A/L^2$ 은

Table 1. Empirical Formula for the Concentration Time and Exponent Ratio of  $S$  to  $L$

Name	Formula	Characteristics
Kirpich (1940)	$T_c = 0.0663 \cdot \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$	small farmland, $A: \sim 0.8km^2$ , $S: 1/30 \sim 1/10$
Rziha	$T_c = 0.0139 \cdot \frac{L}{S^{0.6}}$	natural upstream, $S \geq 1/200$
Kraven (I)	$T_c = 0.0074 \cdot \frac{L}{S^{0.515}}$	natural middle and downstream, $S < 1/200$
Kraven (II)	$T_c = 0.2778 \cdot \frac{L}{V}$	$S \leq 0.005 : V = 2.1m/sec$ $0.005 < S < 0.01 : V = 3.0m/sec$ $S \geq 0.01 : V = 3.5m/sec$
California DoT	$T_c = 0.0663 \cdot \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$	small mountainous region
Kerby (1959)	$T_c = 0.6059 \cdot \left(\frac{L \cdot N}{\sqrt{S}}\right)^{1/2.14}$	$S < 1/10$
Johnstone and Cross (1949)	$T_c = 0.543\left(\frac{L}{S}\right)^{0.5}$	$A: 25 \sim 1,624m^2$
SCS	$T_c = 1/3600 \sum \frac{L}{V}$	mean velocity depending on surface conditions
FAA	$T_c = \frac{0.000524(1.1 - C)L^{0.5}}{S^{1/3}}$	airport region, urban region or surface flow
Izzard	$T_c = \frac{0.00547(0.0178i + C)L^{0.33}}{S^{0.333}i^{0.667}}$	delay constant( $C$ )=flat pave region: 0.007, concrete pave region: 0.012, gravel pave region: 0.017, cutted lawn: 0.046, dense lawn: 0.060
Morgali and Linsley (1965)	$T_c = \frac{1.396 \times 10^{-6} L^{0.6} n^{0.6}}{i^{0.4} S^{0.3}}$	surface flow
SCS lag	$T_c = \frac{0.257L^{0.8}[(1000/CN) - 9]^{0.7}}{1900S^{0.5}}$	farmland or urban, $T_c = 1.67 \times basin\ lag$ , $A \leq 8.09 km^2$
Jung (2005)	$T_c = 0.119 \frac{L^{0.777}}{S^{0.212}}$	Korean, $A: 8.5 \sim 520 km^2$ , $S: 0.00582 \sim 0.04057$
Yoon et al. (2005)	$T_c = 1.08 \frac{A^{0.09} L^{0.16}}{S^{0.12}}$	Korean, $A: \sim 5,000 km^2$

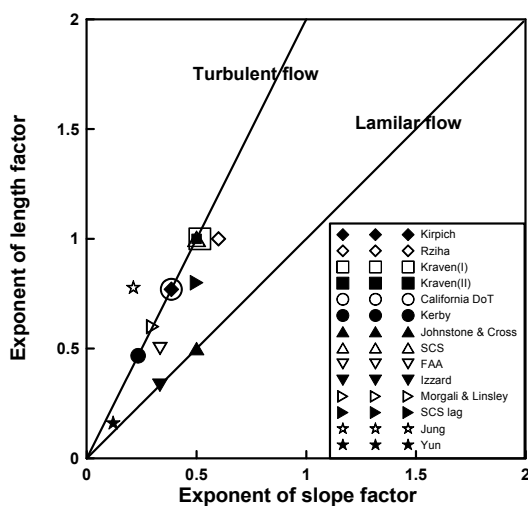


Fig. 1. Exponent Ratio of  $S$  to  $L$

형상계수(shape factor)로서 유역의 형태를 정량화할 경우 자주 사용된다.

앞서 검토한 집중시간의 이론적 배경에 의하면, 집중시간은 난류상태에서  $L^2/S$ 를 독립변수로 하는 멱함수의 형태로 표현된다(Eq. (9)). 그리고 저류상수는 Saint-Venant 방정식과 Nash 모형으로부터 집중시간에 비례한다고 검토한 바 있다. 따라서 저류상수도 난류상태에서 집중시간과 마찬가지로  $L^2/S$ 를 독립변수로 하는 멱함수의 형태로 표현된다. 즉,

$$K^* = \alpha T_c = c \left( \frac{L^2}{S} \right)^d \quad (28)$$

여기서,  $\alpha$ 는 상수이고  $c, d$ 는 유역의 특성에 따라 결정되는 계수이다.

Table 2에 나타난 저류상수에 관한 경험공식의 형태를 살펴보면, Clark 공식, Russel 공식, Sabol 공식 및 Jung 공식이 앞서 살펴본 저류상수와 집중시간의 비례관계를 매우 잘 만족함을 확인할 수 있다. 먼저, Clark 공식과 Jung 공식의 경우, 유로연장( $L$ )과 집중시간( $S$ )의 지수비가 2로 나타났다. 즉, 저류상수가 Eq. (22)의 형태로 표현되므로 저류상수는 집중시간에 비례한다. 또한, Russel 공식의 경우, 저류상수와 집중시간의 관계를 비례상수로 설명하고, Sabol 공식도 유역의 형상을 고려하는 인자를 두어 저류상수와 집중시간의 관계를 고려한다.

이에 반해 Linsley 공식, Laurenson 공식, Yoon and Hong 공식, Lee et al. 공식 및 Yoon et al. 공식에서는 저류상수와 집중시간 사이의 관계를 고려한 근거를 찾기 어렵다. 먼저, Linsley 공식의 경우,  $A$ 를  $A=L^2$ 로 변환하면 유로연장( $L$ )과 집중시간( $S$ )의 지수비가 4로 나타난다. 따라서 Linsley 공식은 유로연장에 더욱 민감하게 된다 (Yoo, 2009). 또한, Laurenson 공식, Yoon and Hong 공식, Lee et al. 공식, Yoon et al. 공식은 유역경사를 고려하지 않아 저류상수와 집중시간 사이의 관계에 관한 이론적인 배경을 찾기 어렵다.

한편 Linsley 공식, Laurenson 공식, Yoon and Hong 공식, Lee et al. 공식 및 Yoon et al. 공식은 유역면적을 이용하여 저류상수를 추정하였다. 그러나 Yoon and Hong 공식 및 Lee et al. 공식의 경우, 유역면적에 대한 멱수가 각각 0.074, 0.06으로 매우 작아, 유역면적이 저류상수에 크게 영향을 미치지 않는다. 반면, Linsley 공식, Laurenson 공

식 및 Yoon et al. 공식의 경우, 유역면적에 대한 멱수가 각각 0.5, 0.27, 0.108이므로, 저류상수가 유역면적에 상대적으로 더 민감해진다. 저류상수의 경험공식에서 유역면적과 하도길이를 이용한다는 것은 특히 유역형상을 고려한다는 의미이므로, Linsley 공식과 Yoon et al. 공식은 유역형상을 고려하여 저류상수를 추정한다고 판단할 수 있다.

## 4. 충주댐 유역에의 적용

### 4.1 유역특성 및 강우-유출 자료

본 연구의 적용대상 지역으로 충주댐 유역을 선정하였다. 충주댐 유역은 남한강 상류 유역, 평창강 유역, 충주댐 유역으로 구성되어 있으며, 한강 유역 중 유역면적이 가장 큰 유역이다. 남한강 유역의 주하천은 남한강이며, 남한강 상류 유역에 위치한 남한강은 강원도 삼척시 대덕산(1,307 m)에서 발원하여 골지천, 동강을 따라 남서쪽으로 흐른 뒤 영월읍에서 평창강으로 합류된다. 충주댐 유역의 소유역 중 하나인 평창강 유역은 평창강이 주하천이며, 평창강은 유역의 최고봉인 계방산(1,557 m)에서 발원하여 남한강으로 유입되는 한강의 제 1지류이다. 북으로는 홍천강, 동으로는 오대천, 서로는 남한강 수계의 섬강과 인접하는 산지성 고지대라 할 수 있다(Yoo and Shin, 2010).

강우 및 유출자료는 국토해양부의 홍수통제소에서 제공 받았으며, 충주댐 유역 내에 위치한 31개의 수위관측소 중에서 분석이 가능한 18개 지점을 선별하였다. 강우자료로는 수위관측소별로 적용되는 우량관측소의 자료를 산술평

Table 2. Empirical Formula for the Storage Coefficient

Name	Formula	Characteristics
Clark (1945)	$K = C \frac{L}{\sqrt{S}}$	natural river, $A: 647 \sim 4298 \text{ km}^2$
Linsley (1945)	$K = \frac{bL\sqrt{A}}{\sqrt{S}}$	modified Clark formula
Laurenson (1962)	$K = 1.03A^{0.27}$	-
Russel et al. (1979)	$K = \alpha T_c$	$\alpha =$ generally, 0.8 ~ 1.2, urban, 1.1 ~ 2.1, natural, 1.5 ~ 2.8, mountain, 8 ~ 12
Sabol (1988)	$K = \frac{T_c}{1.46 - 0.0867(L^2/A)}$	-
Yoon and Hong (1995)	$K = 5.29A^{0.074}$	Korean, $A: 33.8 \sim 472.5 \text{ km}^2$
Lee et al. (1997)	$K = 3.92A^{0.06}$	Korean, $A: 33.8 \sim 472.5 \text{ km}^2$
Jung (2005)	$K = 1.521 \frac{L^{0.263}}{S^{0.120}}$	Korean, $A: 8.5 \sim 520 \text{ km}^2$ , $S: 0.00582 \sim 0.04057$
Yoon et al. (2005)	$K = 1.89A^{0.108} L^{0.179}$	Korean, $A: \sim 5,000 \text{ km}^2$

균법으로 산정한 유역 평균강우량을 사용하였다. AMC-III 조건에서 강우사상들은 상대적으로 강우강도의 공간분포가 균일하여 유역의 유출특성을 결정하는데 보다 적절하다고 판단되므로(Lee and Yoo, 2011) AMC-III 조건인 독립호우사상만을 추출하여 본 연구에 적용하였다. 18개 지점에 대한 유역특성, 적용된 우량관측소 개수 및 호우사상의 개수는 Table 3과 같다.

#### 4.2 매개변수의 추정결과

관측된 강우 및 유출기록으로부터 유역의 저류상수 및 집중시간을 결정하기 위해 Yoo and Shin (2010)이 제안한 Nash 모형의 구조를 이용하는 방법을 사용하였다. 직접유출수문곡선의 결정을 위해 수평직선 분리법을 사용하였고, 유효우량은  $\Phi$ -Index 법을 사용하였다. 매개변수 추정 알고리즘의 적용을 위한 초기값으로는 유효강우의 무게 중심과 직접유출의 무게 중심의 시간차이를 적용하였다.

먼저, 유역의 대표 매개변수를 결정하기 위하여 총 348개의 강우-유출사상에 대하여 지점별로 추정된 매개변수들이 군집해 있는 구간을 설정한 후, 이를 크게 벗어나는 매개변수를 제외한 150개의 강우-유출사상을 선별하였다. 18개의 수위관측소 지점들에 대해 대표 매개변수 결정시 적용한 호우사상의 개수는 3개에서 25개로 지점별로

차이가 크다. 송천, 나전, 안흥, 신천 지점의 경우 3개의 매개변수만이 대표 매개변수 결정에 이용되어 불확실성이 크다. 따라서 상류단과 하류단의 관계를 비교하여 적절한 지 판단한 후 대표 매개변수를 결정하였다. Table 4는 추정한 매개변수들을 지점별로 산술평균하여 산정한 지점별 대표 집중시간 및 저류상수이다.

Fig. 2는 결정된 지점 대표 집중시간과 저류상수를 이용하여 유도한 1시간 단위도이며, 단위도의 특성은 Table 4와 같다. 일반적으로 유역면적이 클수록 집중시간과 저류상수도 커진다. 이는 유역면적이 클수록 유로연장이 길어져 집중시간이 커지고, 하도에서 저류할 수 있는 시간 역시 증가하여 저류상수가 증가하기 때문이다. 아울러 집중시간이 커지면 단위도의 침투시간 역시 커지므로 단위도는 오른쪽으로 이동하게 되고, 저류상수가 커지면 단위도는 완만해진다. 따라서 대유역에서의 단위도는 소유역보다 침투시간과 기저시간이 모두 큰 유출수문곡선을 가지게 된다.

#### 4.3 총주댐 유역의 $T_c$ 와 $K$ 경험식 유도

본 연구에서는 앞서 제시한 난류흐름에서 집중시간 및 저류상수 경험식의 형태(Eqs. (9) and (28))를 이용하여 총주댐 유역의 집중시간 경험식을 유도하였다. Eqs. (9) and (28)에서 유역특성인자  $a$ ,  $b$ ,  $c$  및  $d$ 는 선형회귀분석과 최

Table 3. Characteristics of Basin and Storm Events Considered in this Study

Gauge station		Characteristics of basin				# of applied	# of storm events	
		Area (km <sup>2</sup> )	Length (km)	Slope	Shape factor		AMC-III condition	Final applied
Upper south Han river basin	Jeongseon2	1,688.1	103.5	0.00505	0.158	14	10	6
	Yeongwol	2,440.4	186.5	0.00337	0.070	18	8	4
	Yeongweol2	2,283.4	181.5	0.00352	0.069	18	13	3
	Songcheon	349.5	62.8	0.00890	0.089	4	5	3
	Najeon	452.6	59.1	0.00814	0.130	3	7	5
Peongchang river basin	Bangrim	527.2	51.9	0.00774	0.196	10	47	25
	Sanganmi	393.3	44.2	0.00857	0.201	6	37	12
	Baekokpo	143.9	23.0	0.01428	0.272	2	29	14
	Jangpyeonggyo	105.1	26.0	0.01521	0.155	2	24	10
	Imokjeong	55.8	16.6	0.01604	0.202	2	29	7
	Pyeongchang	695.7	74.8	0.00613	0.124	15	7	4
	Panun	879.1	90.3	0.00491	0.108	16	19	7
	Jucheon	533.2	71.0	0.00425	0.106	4	18	5
	Yeongweol1	1,524.1	125.7	0.00380	0.096	19	41	14
	Anheung	187.0	31.8	0.00495	0.185	2	4	3
	Sincheon	598.3	84.1	0.00409	0.085	4	5	3
Dam basin	Yeongchun	4,775.0	189.1	0.00311	0.134	39	31	22
	Chungju Dam	6,448.0	282.2	0.00176	0.083	49	14	3



Table 4. Basin Representative Parameters and Characteristics of 1 hr Unit Hydrograph

Gauge station		$T_c$ (hour)	$K$ (hour)	Russel coefficient $K^*/T_c$	$T_p$ (hour)	$Q_p$ (cms)
Upper south Han river basin	Jeongseon2	11.5	14.7	1.3	11	223.1
	Yeongwol	19.9	17.0	0.9	18	241.7
	Yeongweol2	19.7	15.9	0.8	18	236.1
	Songcheon	8.3	11.3	1.4	8	60.9
	Najeon	8.0	8.6	1.1	8	95.7
	Bangrim	7.2	9.1	1.3	7	111.2
Peongchang river basin	Sanganmi	7.3	7	1.0	7	98.1
	Baekokpo	5.3	6.8	1.3	5	39.9
	Jangpyeonggyo	4.9	6.4	1.3	5	31.3
	Imokjeong	3.4	5.7	1.7	4	19.5
	Pyeongchang	9.9	14.2	1.4	10	98.0
	Panun	13.0	13.6	1.0	12	117.4
	Jucheon	9.0	13.6	1.5	9	79.6
	Yeongweol1	18.0	15.1	0.8	16	168.4
	Anheung	5.1	5.2	1.0	5	63.4
	Sincheon	11.6	13.1	1.1	11	85.2
Dam basin	Yeongchun	21.8	18.8	0.9	20	429.5
	Chungju Dam	25.4	25.2	1.0	24	471.4

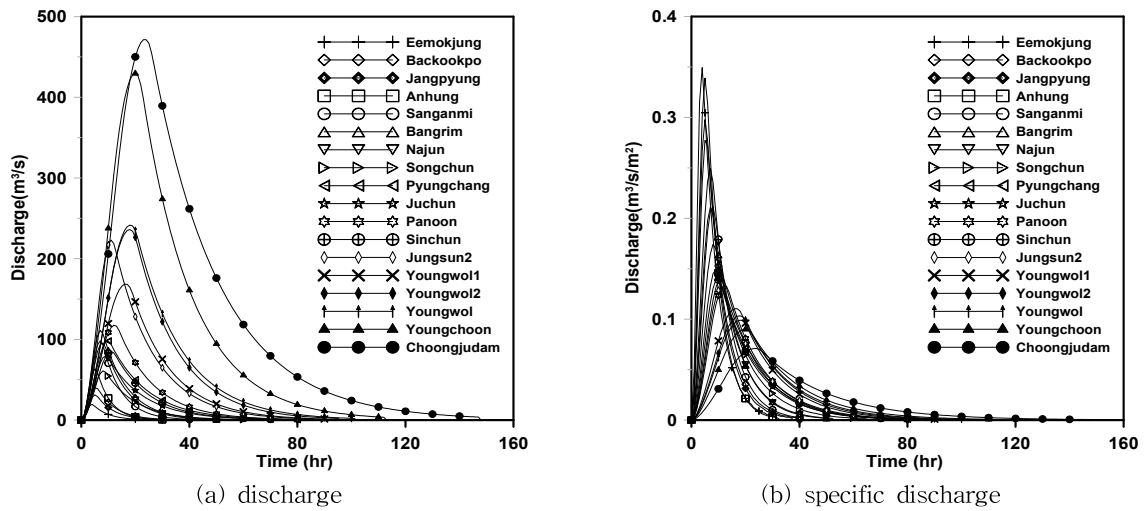
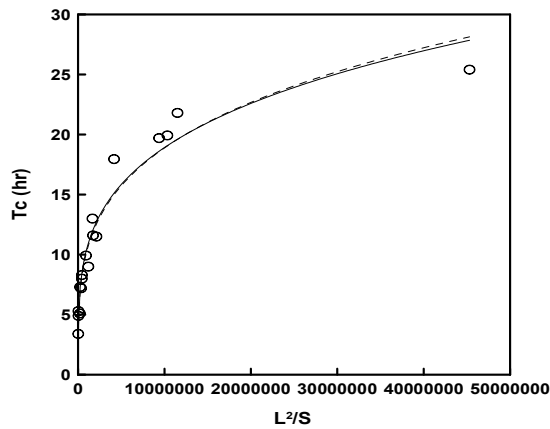


Fig. 2. 1 hr Unit Hydrograph Using Parameters Estimated in this Study

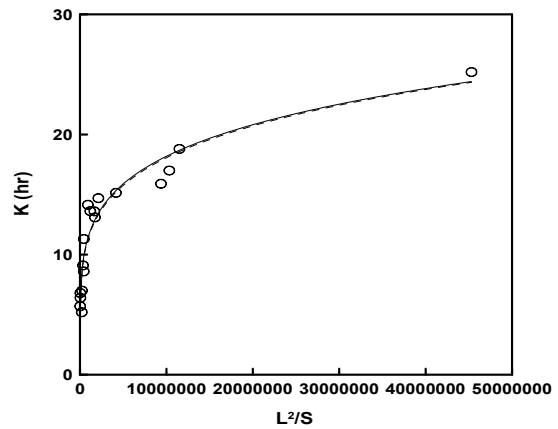
과 최적화 방법을 통해 추정할 수 있다. 본 연구에서는 두 방법을 적용하여 추정된 유역특성인자를 비교하고, 보다 적절한 경험식을 선정하였다. 선형회귀분석의 경우, 양변에 대수를 취하여 선형화한 후 유역특성인자를 구하였다. 최적화 방법은 시행착오법을 이용하였으며, 정확도 기준으로 RMSE를 이용하였다. Table 5와 Fig. 3은 최적화 방법 및 선형회귀분석을 이용하여 유도한 집중시간과 서류

상수의 경험식을 비교한 것이다.

Fig. 3을 살펴보면 최적화 방법과 선형회귀분석을 이용하여 추정된 매개변수 경험식의 그래프 형태는 상당히 유사하다. 그러나 두 방법을 통해 추정된 경험식의 매개변수는 매우 다르다(Table 5). 본 연구에서는 보다 적절한 경험식의 매개변수를 선정하기 위해, 두 방법을 통계학적으로 비교하였다. 최적화 방법과 선형회귀분석을 통해 각



(a) concentration time  $T_c$



(b) storage coefficient  $K$

Fig. 3. Comparison between Optimization Method and Linear Regression Analysis

Table 5. Statistics of Optimization Method and Linear Regression Analysis

	Concentration time		Storage coefficient	
	Optimization method	Linear regression analysis	Optimization method	Linear regression analysis
Empirical formula	$0.306 \left( \frac{L^2}{S} \right)^{0.256}$	$0.296 \left( \frac{L^2}{S} \right)^{0.264}$	$0.786 \left( \frac{L^2}{S} \right)^{0.195}$	$0.753 \left( \frac{L^2}{S} \right)^{0.197}$
RMSE	1.389	1.402	1.480	1.488
R <sup>2</sup>	0.956	0.956	0.922	0.874

각 추정된 집중시간과 저류상수의 경험식에 대하여 RMSE와 결정계수 R<sup>2</sup>를 산정하였다(Table 5).

일반적으로 RMSE가 작을수록, 결정계수가 클수록 원자료의 특성을 잘 반영한다고 할 수 있다. 집중시간의 경우, 최적화 방법을 적용한 경험식이 선형회귀분석을 적용한 경험식에 비해 RMSE 값이 작았으며, 결정계수는 같았다. 저류상수의 경우에도 최적화 방법을 적용한 경험식이 선형회귀분석을 적용한 경험식에 비해 RMSE 값이 작았고, 결정계수는 크게 산정되었다. 결과적으로, 선형회귀분석보다는 최적화 방법이 원 자료의 특성을 잘 설명한다고 판단할 수 있다.

추가적으로, 저류상수의 경험식은 Russel 공식의 형태로 유도될 수 있다. Russel 공식에서 저류상수는 집중시간에 비례한다. 충주댐 유역에 대해 Russel 공식의 형태로 유도한 결과는 다음과 같다.

$$K = 0.986 T_c \quad (29)$$

산정된 Russel 계수는 0.986으로 국내에서 일반적으로 적용하고 있는 범위인 0.8~1.2 내에 포함된다. 국외의 경

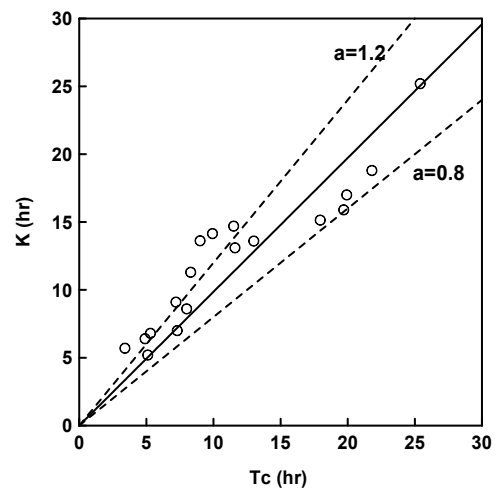


Fig. 4. Russel Coefficient Derived Using Parameters Estimated in this Study

우 Russel 계수가 1.5~2.8 범위를 주로 적용한다는 점을 감안하면, 국내의 유역과 국외의 유역이 서로 다른 특성을 지니고 있음을 짐작할 수 있다. Fig. 4는 Russel 공식의 형태로 유도된 저류상수의 경험식을 도시한 것이다.

#### 4.4 타 경험식과의 비교

국내외에서 기존에 제시된 집중시간과 저류상수에 관한 주요 경험식들은 앞서 정리한 바 있다. 본 연구에서는 앞의 5.1절에서 유도한 충주댐 유역의 경험식을 기존의 경험식과 비교해 보고자 한다. 집중시간 및 저류상수의 기존 경험식들은 각 공식이 적용될 수 있는 조건을 가지고 있다. 본 연구에

서는 앞서 고려한 충주댐 유역의 18개 수위관측소 중에서 각 경험공식이 적용 가능한 수위관측지점에 대해 집중시간 및 저류상수를 산정한 후(Table 6 and Table 8), 앞서 관측자료를 이용하여 추정한 집중시간 및 저류상수(Table 4)와 비교하였다. Table 7 and Fig. 5 및 Table 9 and Fig. 6은 각각 집중시간과 저류상수에 대하여, 본 연구에서 추정한 결과에 대한 각 공식들의 산정 결과를 비율로 표시한 것이다.

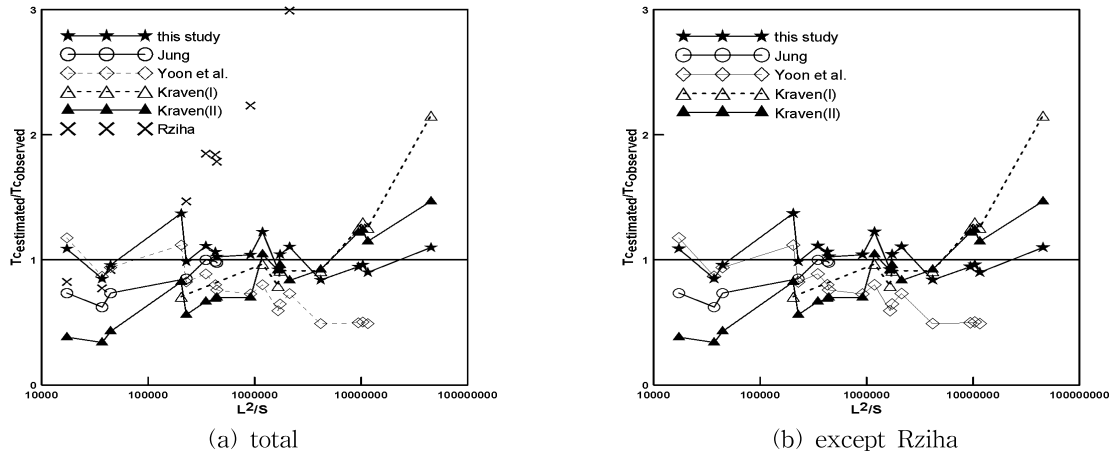


Fig. 5. Concentration Time according to  $L^2/S$

Table 6. Comparison of the Concentration Time in this Study and the Conventional Empirical Formulas (Empty Slot Indicates out of Range of the Empirical Formula)

Gauge station	Concentration time $T_c$ (hr)						
	Observation	This study	Jung	Yoon et al.	Kraven(I)	Kraven(II)	Rziha
Imokjeong	3.4	3.7	2.5	4.0	-	1.3	2.8
Baekokpo	5.3	4.5	3.3	4.6	-	1.8	4.1
Jangpyeonggyo	4.9	4.7	3.6	4.6	-	2.1	4.5
Anheung	5.1	7.0	-	5.7	3.6	4.2	-
Sanganmi	7.3	7.2	6.2	6.0	-	4.1	10.7
Bangrim	7.2	8.0	7.2	6.4	-	4.8	13.3
Najeong	8.0	8.5	7.9	6.4	-	5.5	14.7
Songcheon	8.3	8.5	8.1	6.3	-	5.8	14.8
Pyeongchang	9.9	10.3	-	7.2	-	6.9	22.1
Jucheon	9.0	11.0	-	7.2	8.7	9.4	-
Panun	13.0	12.0	-	7.7	10.3	11.9	-
Sincheon	11.6	12.1	-	7.5	10.6	11.1	-
Jeongseon2	11.5	12.7	-	8.4	-	9.6	34.4
Yeongweol1	18.0	15.1	-	8.8	16.4	16.6	-
Yeongweol2	19.7	18.6	-	9.8	24.6	24.0	-
Yeongwol	19.9	19.1	-	10.0	25.9	24.7	-
Yeongchun	21.8	19.6	-	10.7	27.4	25.0	-
Chungju Dam	25.4	27.9	-	-	54.7	37.3	-

Table 7. Comparison of the Concentration Time in this Study and the Conventional Empirical Formulas

Formula	# of data	Mean of ratio	Standard deviation	Maximum	Minimum
This study	18	1.018	0.126	1.373	0.839
Jung	7	0.864	0.456	1.010	0.623
Yoon et al.	17	0.753	0.277	1.176	0.489
Rziha	9	1.630	0.984	2.991	0.774
Kraven (I)	9	1.160	0.670	2.154	0.706
Kraven (II)	18	0.823	0.318	1.469	0.340

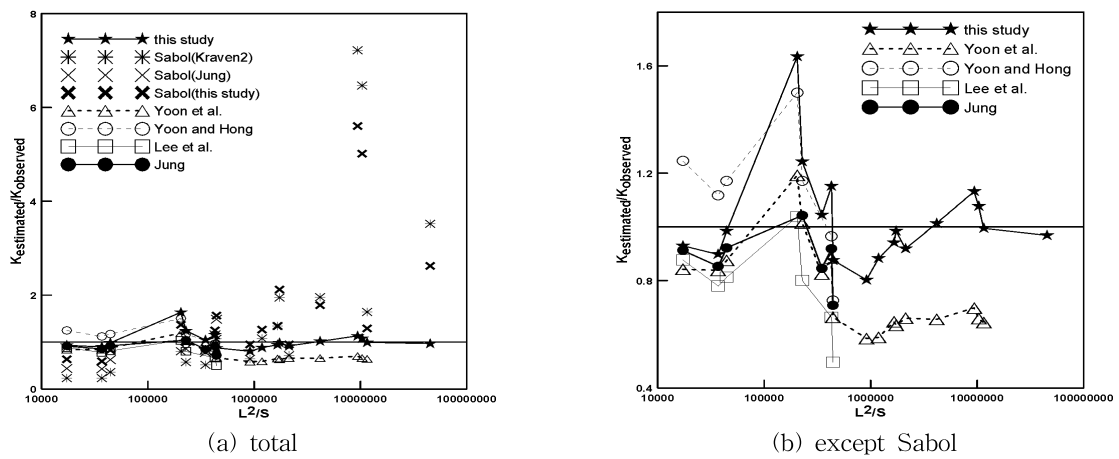


Fig. 6. Storage Coefficient according to  $L^2/S$

먼저 집중시간의 경우, 국내에서 주로 사용하는 Rziha 공식, Kraven (I) 공식, Kraven (II) 공식, Jung 공식, Yoon et al. 공식으로 한정하여 비교하였다. 이들 경험식으로 산정한 각 수위관측지점별 집중시간의 결과는 Table 6과 같다. Table 6을 살펴보면, Jung 공식은 적용 가능한 7개의 지점에 대해, 본 연구에서 앞서 추정한 결과와 거의 유사한 결과를 나타냈다. Yoon et al. 공식은 상류지점에서는 비교적 관측치와 유사한 결과를 보이는 반면, 하류지점으로 갈수록 작게 산정되는 경향을 보였다. Kraven (I) 공식 및 Kraven (II) 공식은 충주댐지점을 제외한 곳에서는 어느 정도 유사한 결과를 보였으며, Rziha 공식은 대부분의 지점에서 관측치와 큰 차이를 나타냈다.

Table 7을 살펴보면, Jung 공식이 전체적으로 13.6% 정도만 작게 산정되어, 본 연구에서 추정한 집중시간과 가장 유사한 결과를 보였다. 또한, Kraven (I) 공식과 Kraven (II) 공식이 각각 16.0% 크게, 17.7% 작게 산정되어, 정성원 공식 다음으로 유사한 결과를 보였다. Kraven (I) 공식의 경우, 상류에 위치한 지점들에 대하여 집중시간이 70% 정도 적게 산정되어 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 이 공식이 유로경사가 0.005보다 작은 중하류 구역에서

주로 적용되기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 실무에서 주로 사용하는 Kraven (II) 공식의 경우, 대상구역의 상류보다 하류가 작게 산정되는 경우가 발생하였다. 이는 Kraven (II) 공식에 적용되는 유속의 범위가 3가지로만 구분되어 있어 불연속이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

Yoon et al. 공식은 24.7% 정도 작게 산정되어 어느 정도 적절한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 반면, Rziha 공식은 63% 정도 크게 산정되어, 대상구역의 특성을 잘 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 특히 구역의 크기가 클수록 비정상적인 매개변수가 산정되었다. 이는 Rziha 공식이 유로경사가 0.005보다 큰 상류 구역에 주로 적용되기 때문인 것으로 판단된다. 상대적으로 큰 차이를 보이는 Rziha 공식을 제외하고, 이들 공식들을 비교하면 Fig. 5(b)와 같다.

저류상수의 경우에는 Sabol 공식, Yoon et al. 공식, Yoon and Hong 공식, Lee et al. 공식, Jung 공식과 비교하였다. Clark 공식과 Linsley 공식의 경우, 하천의 사행이 적은 긴 막대형의 구역에 적합하다. 일반적으로 국내의 구역은 사행이 크므로 저류상수가 비물리적으로 산정될 수 있다. 따라서 Clark 공식과 Linsley 공식은 비교대상에서 제외하였다. 또한, Sabol 공식의 경우 집중시간 산정이 선행되어야

한다. 본 연구에서는 Kraven (II) 공식, 정성원 공식 및 본 연구에서 추정된 집중시간을 Sabol 공식에 적용하였다. Table 8은 각 수위관측지점마다 이들 경험식으로 산정한 저류상수의 결과이다. 저류상수의 경우에도 경험식의 범위에 포함되지 않는 수위관측지점은 제외시켰다.

Table 8을 살펴보면, Yoon et al. 공식, Yoon and Hong 공식, Lee et al. 공식 및 Jung 공식이 본 연구에서 앞서 추정된 결과와 유사하게 나타난다. 하지만 Yoon and Hong 공식과 Lee et al. 공식은 산정한 저류상수의 값이 지점마다 거의 차이가 없으므로, 넓은 범위에 사용하기에는 제약

이 따를 것으로 판단된다. 또한, Yoon et al. 공식은 하류지점으로 갈수록 과소 산정되는 경향이 있어 상류 지점에 더 적합하다고 짐작할 수 있다. 반면, Sabol 공식의 경우, 상류지점에서는 약간 작게 산정되나, 하류 지점에서는 비정상적으로 크게 산정되는 결과를 나타냈다.

Table 9를 살펴보면, Yoon and Hong 공식이 12.8% 크게 산정되고, Jung 공식이 14.8% 작게 산정되어, 본 연구에서 추정된 저류상수와 가장 유사한 결과를 보인다. 다음으로 Lee et al. 공식과 Yoon et al. 공식이 각각 21.9%, 23.0% 작게 산정되어, 집중시간의 경우와 마찬가지로 어

**Table 8. Comparison of the Storage Coefficient in this Study and the Conventional Empirical Formulas (Empty Slot Indicates out of Range of the Empirical Formula)**

Gauge station	Storage coefficient $K$ (hr)								
	Observation	This study	Sabol			Yoon et al.	Yoon and Hong	Lee et al.	Jung
			Kraven (II)	Jung	This study				
Imokjeong	5.7	5.3	1.3	2.5	3.6	4.8	7.1	5.0	5.2
Baekokpo	6.8	6.1	1.6	2.9	4.0	5.7	7.6	5.3	5.8
Jangpyeonggyo	6.4	6.3	2.3	4.0	5.3	5.6	7.5	5.2	5.9
Anheung	5.2	8.5	4.2	-	7.1	6.2	7.8	5.4	-
Sanganmi	7.0	8.7	4.0	6.0	7.0	7.1	8.2	5.6	7.3
Bangrim	9.1	9.5	4.7	7.1	7.9	7.5	-	-	7.7
Najeong	8.6	9.9	6.9	9.9	10.7	7.6	8.3	5.7	7.9
Songcheon	11.3	9.9	12.1	16.8	17.7	7.5	8.2	5.6	8.0
Pyeongchang	14.2	11.4	9.1	-	13.5	8.3	-	-	-
Jucheon	13.6	12.0	14.6	-	17.2	8.0	-	-	-
Panun	13.6	12.8	18.2	-	18.3	8.8	-	-	-
Sincheon	13.1	12.9	25.5	-	27.8	8.3	-	-	-
Jeongseon2	14.7	13.5	10.5	-	14.0	9.7	-	-	-
Yeongweoll	15.1	15.3	29.6	-	27.0	9.9	-	-	-
Yeongweol2	15.9	18.0	114.8	-	89.1	11.1	-	-	-
Yeongwol	17.0	18.3	110.0	-	85.2	11.2	-	-	-
Yeongchun	18.8	18.7	30.9	-	24.2	12.1	-	-	-
Chungju Dam	25.2	24.4	88.6	-	66.2	-	-	-	-

**Table 9. Comparison of the Storage Coefficient in this Study and the Conventional Empirical Formulas**

Formula	# of data	Mean of ratio	Standard deviation	Maximum	Minimum	
This study	18	1.035	0.183	1.635	0.803	
Sabol	Kraven (II)	18	1.767	2.023	7.220	0.228
	Jung	7	0.836	0.336	1.487	0.426
	This study	18	1.752	1.399	5.604	0.588
	Yoon et al.	17	0.770	0.161	1.192	0.585
Yoon and Hong	7	1.128	0.222	1.500	0.726	
Lee et al.	7	0.781	0.157	1.038	0.496	
Jung	7	0.852	0.126	1.043	0.613	

는 정도 적절한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 전체적으로, 국내에서 개발한 저류상수 경험공식이 국내의 유역 특성을 보다 잘 반영하고 있다.

집중시간과의 상관성을 고려하는 Sabol 공식의 경우, Kraven (II) 공식, 본 연구에서 추정된 집중시간을 적용하는 경우에 대하여, 각각 76.7%, 75.2% 정도로 큰 결과를 보여 비정상적인 값이 산정되었다. 특히 영월과 영월2 지점의 경우, 518.0% 정도 크게 산정되어 상당히 큰 차이를 보였다. 정성원 공식으로 산정한 집중시간을 적용한 경우, 평균적으로 16.4% 정도 작게 산정되어 본 연구에서 추정된 값과 상당히 유사하였는데, 이는 영월과 영월2 지점이 Jung 공식의 적용 대상유역에 포함되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 영월과 영월2 지점에서 큰 차이를 보이는 것은 Sabol 공식에서 형상인자(shape factor)를 고려하기 때문인 것으로 보인다. Hack's law (Hack, 1957)에 의하면 유역이 커지면 그 모양이 점차로 막대 모양으로 길어지게 되고 반대로 유역이 작아지면 원형에 가까워지게 된다 (Rigon et al., 1996). Sabol 공식도 이러한 유역의 특성을 반영하고 있다. 즉, 유역면적이 커질수록 형상인자가 작아져 저류상수가 집중시간보다 크게 산정되는데, 이는 긴 막대형 유역의 특성과 동일하다. 영월과 영월2 지점을 출구로 하는 유역은 유로연장이 비슷한 두 개의 하천이 합류되기 직전으로 일반적인 경우에 비해 상대적으로 기다란 형태를 가진다. 따라서 유역면적에 비해 유로연장이 큰 값을 가지므로, 형상인자는 작아지게 된다. 이러한 경우에 대해 Sabol 공식을 적용하면, 저류상수 값이 비정상적으로 크게 산정된다. 따라서 유로연장이 유로면적에 비해 크게 나타나는 비교적 기다란 형태의 작은 유역에 대해 Sabol 공식을 적용할 경우, 상당한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 유역 집중시간과 저류상수의 이론적 배경을 바탕으로 경험식의 형태를 제시한 후, 기존의 경험식의 형태와 비교하고 평가하였다. 추가로, 제시된 경험식의 형태를 이용하여 충주댐 유역의 집중시간 및 저류상수의 경험식을 유도하고, 유도된 경험식과 기존의 경험식들을 충주댐 유역에 적용하여 비교하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 유역의 집중시간과 관련한 경험공식은 크게 난류흐름일 경우와 층류흐름일 경우에 따라 나눌 수 있었으며, 각각의 경우에 포함된 유역특성인자는 유로연장과 유로경사이다. 홍수기에는 주로 난류흐름이므로, 집

중시간의 경험공식은  $L^2/S$ 를 독립변수로 하는 멱함수의 형태로 표현되는 것이 적절하다. 저류상수는 집중시간에 비례하는 형태로 나타나는 것이 적절하다.

- 2) 기존 매개변수에 관한 경험공식을 이론적 배경을 고려하여 검토한 결과, 집중시간의 경우에는 Kirpich 공식, Kraven (I) 공식, Kraven (II) 공식, California DoT 공식, Kerby 공식, SCS 공식 및 Morgali and Linsley 공식 등이 이러한 이론적 배경을 잘 따르고 있는 것으로 나타난다. 저류상수의 경우, Clark 공식, Russell 공식, Sabol 공식 및 Jung 공식 등이 본 저류상수와 집중시간의 비례관계를 매우 잘 만족하는 것으로 나타난다.
- 3) 기존의 경험식을 충주댐 유역에 적용한 결과, 집중시간의 경험식 중 Jung 공식, Yoon et al. 공식, Kraven (I) 공식 및 Kraven (II) 공식은 추정된 집중시간과 비교적 유사한 결과를 보였으나, Rziha 공식은 비정상적인 결과를 나타냈다. 저류상수의 경우에는 Yoon and Hong 공식, Jung 공식, Lee et al. 공식 및 Yoon et al. 공식이 어느 정도 합리적인 결과를 보인 반면, Sabol 공식의 경우에는 비정상적인 결과가 유도되었다. 결론적으로 국내의 집중시간 및 저류상수에 대한 경험공식이 국내 유역의 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

- Clark, C.O. (1945). "Storage and the uni hydrograph." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 110, pp. 1419-1446.
- Dooge, J.C.I., Strupczewski, W.G., and Napiorkowski, J. (1982). "Hydrodynamic derivation of storage parameters of muskingum model." *Journal of Hydrology*, Vol. 54, No. 4, pp. 371-387.
- Hack, J.T. (1957). *Studied of lingitudinal profiles in virginia and maryland*. USGS professional Paper 294-B.
- Jeong, J.H., and Yoon, Y.N. (2007). *Design Practices in Water Resources*, Kumi Press, Seoul, Korea.
- Jeong, J.H., Kim, S.W., and Yoon, Y.N. (2006). "Development of an estimation method for storage coefficient." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 135-143.
- Johnstone, D., and Cross, W.P. (1949). *Elements of Applied Hydrology*, Ronald Press, New York.
- Jung, S.W. (2005). *Development of empirical formulas for the parameter estimation of Clark's watershed flood*

- routing model*. Ph.D. dissertation, University of Korea, Seoul, Korea.
- Kerby, W.S. (1959). "Time of concentration for overland flow." *Civil Engineering*, Vol. 29, No. 3, p. 60.
- Kim, H.Y. (2011). *Examination of runoff characteristics between sub-basin and entire basin's: focusing on the storage coefficient and concentration time*. Master dissertation, University of Korea, Seoul, Korea.
- Kirpich, P.Z. (1940). "Time of concentration of small agricultural watersheds." *Civil Engineering*, Vol. 10, No. 6, p. 362.
- Laurenson, E.M. (1962). *Hydrograph synthesis by runoff routing*. Report No. 66. Univ. of New South Wales, Water Res. Lab.
- Lee, J.H., and Yoo, C.S. (2011). "Decision of basin representative concentration time and storage coefficient Antecedent Moisture Conditions." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Kosham*, Vol. 11, No. 5, pp. 255-264.
- Lee, J.S., Lee, J.J., and Son, K.I. (1997). "A comparative study of conceptual models for rainfall-runoff relationship in small to medium sized watershed-Application to Wi stream basin-." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 30, No. 3, pp. 279-291.
- Linsley, R.K. (1945). "Discussion of storage and the unit hydrograph by C.O. Clark." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 110, pp. 1452-145.
- Morgali, J.R., and Linsley, R.K. (1965). "Computer analysis of overland flow" *Journal of Hydraulics Division, Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 91, No. HY3, pp. 81-100.
- Nash, J.E. (1958). "The form of the instantaneous unit hydrograph." *International Association of Hydrological Sciences Publication*, Vol. 45, No. 3, pp. 114-121.
- Rigon, R., Rodriguez-Iturbe, I., Maritan, A., Giacometti, A., Tarboton, D.G., and Rinaldo, A. (1996). "On Hack's law." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 11, pp. 3367-3374.
- Russel, S.O., Kenning, B.F.I., and Sunnell, G.J. (1979). "Estimating design flows for urban drainage." *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 105, No. 1, pp. 43-52.
- Sabol, G.V. (1988). "Clark unit hydrograph and R-parameter estimation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 1, pp. 103-111.
- Singh, V.P. (1976). "Derivation of time of concentration." *Journal of Hydrology*, Vol. 30, pp. 147-165.
- Wong, T.S.W. (2002). "Generalized formula for time of travel in rectangular channel." *Journal of hydrologic engineering*, Vol. 7, No. 6, pp. 445-448.
- Yoo, C.S. (2009). "A theoretical review of basin storage coefficient and concentration time using the Nash mode." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 42, No. 3, pp. 235-246.
- Yoo, C.S., and Shin, J.W. (2010). "Decision of storage coefficient and concentration time of observed basin using Nash model's structure." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 43, No. 6, pp. 559-569.
- Yoo, D.H., and Jun, W.Y. (2000). "Time of concentration on impervious overland." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 33, No. 2, pp. 195-205.
- Yoo, D.H., and Lee, M.H. (2000). "Exponential friction factor equations of open channel flow." *Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 20, No. 1-B, pp. 1-10.
- Yoo, D.H., Kim, J.H., Lee, M.H., and Lee, S.H. (2011). "The time of concentration considering the rainfall intensity." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 44, No. 7, pp. 591-599.
- Yoon, S.Y., and Hong, I.P. (1995). "Improvement of the parameter estimating method for the Clark model." *Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 15, No. 5, pp. 1287-1300.
- Yoon, T.H., and Park, J.W. (2002). "Improvement of the storage coefficient estimating method for the Clark model." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference, KWRA*, pp. 1334-1339.
- Yoon, T.H., Kim, S.T., and Park, J.W. (2005). "On redefining of parameters of Clark model." *Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 25, No. 3B, pp. 181-187.
- Yoon, Y.N. (2007). *Hydrology*, Cheongmoongak Press, Seoul, Korea.

논문번호: 12-077	접수: 2012.07.04
수정일자: 2012.08.01/10.05/10.11	심사완료: 2012.10.11