

## 지역적 성향을 고려한 도시하천 유역의 도달시간 및 저류상수 공식 개발

### Development of Concentration Time and Storage Coefficient Considering Regional Trend in Urban Stream Watershed

배 덕 효\* / 김 용 재\*\*

Bae, Deg-Hyo / Kim, Yong-Jae

---

#### Abstract

The objective of this study is to develop the equations for concentration time and storage coefficient considering regional trend in urban stream watershed for reliable hydrological analysis. The 13 basins located in Jungrang, Tan, Anyang, and Hongje stream are selected for the data collection and formula development in this study. The stepwise multiple-regression analysis is used for the development considering watershed, urban, and precipitation characteristic indices. The developed formulae are compared with the domestic and foreign empirical formulae and evaluated the accuracy in urban stream area. It shows the computed value from the equation developed in this study is more accurate than those from other empirical formulae. The error sum, average error and RMSE of computed values from the developed equations in this study are the lowest. The formulae considering the regional trend of urban stream watershed are worth in terms of showing better results than the domestic and foreign empirical formulae. It can be concluded the developed formulae can be useful in urban stream watershed.

**Keywords** : concentration time, storage coefficient, urban stream watershed, regional trend

---

#### 요 지

본 연구에서는 도시하천 유역의 신뢰성 높은 수문해석을 위해 지역적 성향을 고려한 도달시간 및 저류상수 공식을 개발하였다. 이를 위해 국내 대표 도시하천 유역인 중랑천, 탄천, 안양천, 홍제천 내 13개 유역을 대상으로 지역적 성향이 없는 유역특성인자와 지역적 성향이 있는 도시 및 강우특성인자를 분석하였으며, 단계적 다중회귀분석을 통하여 공식을 개발하였다. 개발된 공식은 국내외 경험식들과 함께 도시하천 유역에 대해 정확도를 비교 평가하였다. 분석결과 본 연구에서 개발한 공식의 계산값이 다른 경험식들에 비해 더욱 정확하게 모의하였으며 오차합, 평균오차, 평균제곱근오차 또한 가장 낮은 것으로 나타났다. 본 연구는 도시하천 유역이라는 지역적 성향을 고려하여 공식을 개발함으로써 기존 국내외 경험식들 보다 더 나은 결과를 제시하였다는 측면에서 가치가 있다고 판단된다.

**핵심용어** : 도달시간, 저류상수, 도시하천 유역, 지역적 성향

---

\* 교신저자, 세종대학교 물자원연구소, 건설환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)  
*Corresponding Author*, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ., Seoul 143-747, Korea

\*\* 세종대학교 건설환경공학과 공학석사 (e-mail: kyj860523@naver.com)  
Master. Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ., Seoul 143-747, Korea

## 1. 서 론

1970년대 산업화 이후 우리나라는 도시로의 급격한 인구집중과 유역개발이 진행되어 왔다. 그 결과 하천 주변에 점차 도시가 발달하면서 도시하천 유역이 나타나게 되었다. 도시하천 유역은 자연하천 유역과는 다르게 유역 내 높은 불투수 지역과 지하에 복잡한 하수관망 시스템을 보유하고 있다. 이로 인해 여름철 집중호우 발생 시 유입 시간의 단축, 도달시간의 감소, 침투유출량의 증가, 통수능 부족, 저류량 감소 등 자연하천 유역과는 다른 수문현상이 나타나고, 이런 현상들로 인해 도시하천 유역의 홍수피해가 증가하고 있다(Bae et al., 2012).

도시하천 유역의 홍수피해를 경감하기 위해서는 신뢰성 있는 수문해석 기술이 요구된다. 일반적으로 유역의 수문해석을 하는데 있어 가장 중요한 매개변수 중에 하나는 도달시간과 저류상수이다. 도달시간과 저류상수는 유역면적, 유로연장, 유로경사 등과 같은 지역적 성향이 없는 인자(no regional trend factor)와 지형특성, 강우특성, 토지이용, 지질특성 등 지역적 성향이 있는 인자(regional trend factor)들에 의해서 영향을 받는다(Graf et al., 1982). 여기서 지역적 성향이란 해당지역의 성질 또는 기질 등을 통칭하는 말을 뜻한다. 도달시간과 저류상수에 대한 연구는 국내외에서 오래전부터 수행되어 왔다. Kirpich (1940)는 테네시 주의 소규모 농지유역의 도달시간 경험식을 제시하였다. Clark (1945)은 저류상수와 유로연장, 유로경사 그리고 Clark 유출계수(C)의 관계를 이용하여 저류상수 경험식을 제시하였고, Linsley (1975)는 Clark 저류상수 경험식을 일부 수정한 경험식을 제시하였다. Graf et al. (1982)은 미국 일리노이주의 98개 유역에 대해서 도달시간과 저류상수의 합과 유로연장, 유로경사와의 관계를 규명하여 경험식을 개발하였으며, Straub et al. (2000)의 경우 미국 일리노이주 39개 소규모 자연유역을 대상으로 유로연장과 유로경사를 이용하여 도달시간 및 저류상수 경험식을 제시하였다. 국내에서는 Jeong (2005)이 설마천, 용담댐, 섬강 시험유역과 보청천, 위천, 평창강 대표유역 등 총 26개 지점에 대해서 유로연장과 유로경사를 인자로 사용하는 경험식을 개발하였고, Yoon et al. (2005)은 중소하천 52개 유역을 대상으로 유역면적, 유로연장, 유로경사를 사용하여 경험식을 제시한 바 있다.

그러나 국내외에서 개발된 기존의 경험식들은 대부분 유역면적, 유로경사, 유로연장이라는 유역특성인자를 사용하였는데, 이 인자들은 지역적 성향이 없는 인자로써 식을 적용할 수 있는 지역적 범위가 넓다는 장점을 가지고 있

다. 하지만 도시하천 유역과 같은 지역적 성향이 존재하는 특정 지역에 적용했을 때 정확도가 떨어진다는 단점이 존재한다. 본 연구에서는 도시하천 유역이라는 특정 지역의 신뢰성 높은 수문해석을 위해 지역적 성향을 고려한 도달시간 및 저류상수 공식을 개발하고자 하며, 개발된 식을 기존의 국내외 경험식들과 비교하여 도시하천 유역에 대한 정확도를 평가하고자 한다.

## 2. 연구이론 및 방법

도달시간(Time of Concentration,  $T_c$ )은 물 입자가 유역의 최원점에서부터 유역의 출구까지 이동하는데 걸리는 시간이다(Kirpich, 1940). 실제 강우-유출곡선상의 관계를 이용하여 산정 시 유효우량이 끝나는 시점에서 직접유출곡선의 감수부 첫 번째 변곡점까지의 시간으로 결정한다(Fig. 1). 저류상수(Storage Coefficient,  $K$ )는 유효우량이 유역출구로 배수되기 전 유역에 일시적으로 저류되는 것을 시간 단위로 나타낸 것이다(Sabol, 1988). 강우-유출곡선 자료가 있는 계측 유역의 경우, 선형저수지 저류방정식을 이용하여 저류상수를 산정할 수 있으며 아래 Eq. (1)과 같다.

$$K = -\frac{Q}{\frac{dQ}{dt}} \quad (1)$$

여기서,  $K$ 는 저류상수(hr),  $Q$ 는 유출량( $m^3/sec$ ),  $dQ/dt$ 는 시간에 따른 유출량의 변화량( $m^3/sec$ )을 의미한다.

Fig. 2는 본 연구의 절차를 나타낸 것이다. 먼저 대상유역의 실측 강우-유출량 자료와 GIS 자료를 수집하여 지역적 성향이 없는 인자인 유역특성인자와 지역적 성향이 있는 도시 및 강우특성인자를 구축하고, 공식 개발 및 검증에 사용할 강우-유출 호우사상을 선정한다. 선정된 호우사상으로부터 관측 도달시간 및 저류상수 값을 계산하고, 앞서 구축한 특성인자들과 단계적 다중회귀분석(stepwise multi-regression analysis)을 통하여 공식을

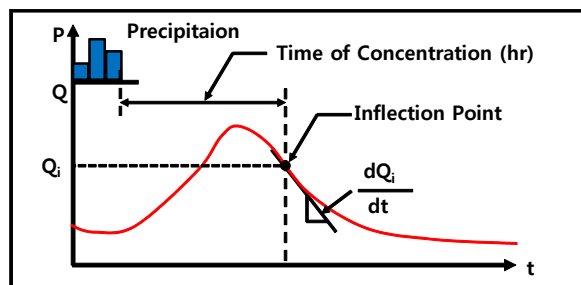


Fig. 1. Graphical Representation of Time of Concentration and Storage Coefficient

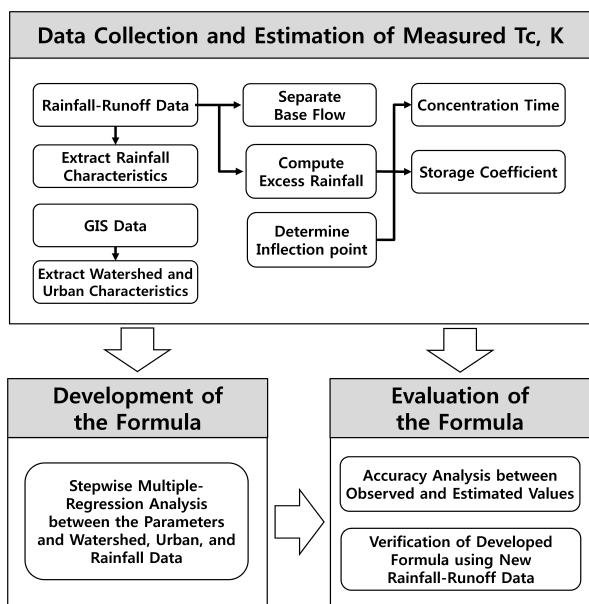


Fig. 2. Flow Chart of This Study

개발한다. 개발된 공식을 국내외 경험식들과 도시하천 유역에 대해서 정확도를 평가하고, 공식 개발에 사용하지 않은 강우-유출 호우사상을 이용하여 공식의 적절성을 검증 (verification)하고자 한다.

본 연구를 통해서 개발된 도달시간 및 저류상수 공식과 국내외 경험식들의 정확도 평가는 오차합(Error Sum), 평균 오차(Average Error), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 적용하였다. 공식으로부터 계산되는 계산값( $X_i$ )과 관측값( $Y_i$ )의 오차를 합한 오차합, 총 오차합에서 호우사상의 개수로 나누어 계산한 평균오차, 계산값( $X_i$ )과 관측값( $Y_i$ )의 차이를 제곱근해서 평균을 취한 RMSE는 아래 Eqs. (2)~(4)와 같다.

$$Error\ Sum = \sum_{i=1}^N |X_i - Y_i| \quad (2)$$

$$Average\ Error = \frac{\sum_{i=1}^N |X_i - Y_i|}{N} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2} \quad (4)$$

### 3. 대상유역 선정 및 자료 구축

#### 3.1 대상유역 선정

본 연구에서는 국내 대표 도시하천 유역인 서울 및 인근 경기도 지역의 중랑천, 탄천, 안양천, 홍제천 내 13개

대상유역을 선정하였으며, 유역의 유량관측지점 위치는 Fig. 3과 같다. 이들 관측소 가운데 신곡, 중랑교, 궁내, 성남, 안양, 시흥, 천왕, 신정은 한강홍수통제소(Han River Flood Control Office, HRFCO) 관할이며, 월계1교, 제2마장교, 대곡교, 고척교, 성산2교는 서울시(Seoul City) 관할 유량관측소이다.

#### 3.2 호우사상 선정

본 연구에서는 한강홍수통제소, 서울시, 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA) 등에서 생산하고 있는 활용 가능한 모든 강우-유출자료를 수집하였다. 한강홍수통제소에서 서울시 지역의 강우 및 유출자료를 본격적으로 수집한 시기가 2007년이므로 이전에는 기상청 강우자료와 서울시 관할 유량관측소 자료를 이용하였으며, 2007년 이후에는 기상청과 한강홍수통제소 강우관측소 자료를 함께 이용하고 유량자료는 서울시 관측소 및 한강홍수통제소 관측소 자료를 활용하였다. 공식 개발 및 검증에 사용할 호우사상은 Viessman et al. (1989)이 제안한 호우특징들을 고려하여 뚜렷한 첨두값을 가지는 유출수문곡선을 선택하였으며, 균등한 호우분포를 보이는 80개 강우-유출사상을 선정하였다. 이들 가운데 60개는 공식개발에 사용하였으며, 나머지 20개의 호우사상은 개발된 공식을 검증하는데 사용하였다. 공식개발에 사용한 60개 호우사상 중 총강우량의 크기가 상중하에 해당하는 호우사상을 해당지점별로 선정하여 Table 1에 제시하였으며, 이들 호우사상에 대한 총강우량, 총유출량, 도달시간 및 저류상수 값 등 자료 특성을 함께 제시하였다. 나머지 호우사상에 대한 자료 및 특성은 Kim (2015)를 참고하기 바란다.

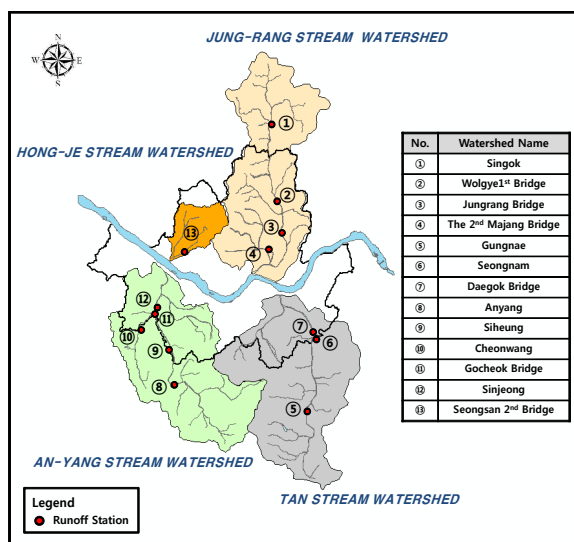


Fig. 3. Study Area and Runoff Station

### 3.3 특성인자 구축

공식 개발에 사용할 인자들은 DEM (Digital Elevation Model), 하천도, 토지이용도, 하수관망도, 하수관망구역도 등 GIS 및 CAD자료와 강우-유출량 자료를 이용하여 구축하였다. 우선 지역적 성향이 없는 유역특성인자인 유역

면적, 유로연장, 유로경사, 유역경사, 형상계수를 구축하였으며 그 값은 Table 2와 같다. 또한 지역적 성향을 가지는 도시특성인자와 강우특성인자를 구축하였다. 도시특성인자는 불투수율, 관망면적비율, 관망형상계수, 관망경사를 구축하였으며, 그 값은 Table 3과 같다. 관망면적비율의 경우 전체 유역면적 중에서 관망이 설치되어있는 면

Table 1. Selected Rainfall Event Characteristics for Developing the Equations

Study Area	Event	Total Rainfall (mm)	Total Runoff (m <sup>3</sup> /sec)	Time of Concentration (hr)	Storage Coefficient (hr)
Singok	2009	165.75	11,409.30	2.33	2.17
	2010	93.75	11,127.10	2.50	2.67
	2011	70.75	8,818.50	2.00	2.00
Wolgye 1 <sup>st</sup> Bridge	2005	70.33	6,238.80	3.33	3.33
	2009	151.08	15,957.80	2.33	2.17
	2013	46.42	10,387.20	2.83	2.67
Jungrang Bridge	2007	51.92	8,233.20	4.00	3.83
	2009	188.17	37,796.00	2.67	2.33
	2010	93.22	26,623.80	3.67	3.50
	2011	60.63	18,693.10	3.67	3.50
Majang 2 <sup>nd</sup> Bridge	2005	66.80	4,940.00	1.17	1.00
	2006	35.50	3,262.70	1.33	1.17
	2013	74.92	4,727.90	1.00	1.33
Gungnae	2008	69.00	6,041.50	2.17	2.00
	2010	104.00	6,177.70	1.83	1.50
	2012	157.50	12,229.20	1.67	1.83
Seongnam	2007	59.67	14,861.00	3.50	3.33
	2008	85.00	17,386.50	3.33	2.83
	2012	121.67	33,520.80	3.00	2.33
Daegok Bridge	2008	85.00	18,721.50	3.17	3.00
	2012	68.75	18,978.00	2.83	2.33
	2013	113.42	29,458.40	2.67	2.00
Anyang	2007	47.00	6,191.80	2.83	2.33
	2010	90.00	9,267.50	2.17	1.83
	2012	127.67	16,745.90	2.17	2.00
Siheung	2009	89.50	13,178.57	3.00	2.33
	2010	165.50	20,131.70	2.83	2.33
	2012	90.75	11,903.28	3.00	3.00
Cheonwang	2009	58.25	3,847.10	1.33	1.67
	2011	85.25	4,090.90	2.00	2.17
	2012	135.25	7,495.10	1.33	1.83
Gocheok Bridge	2009	150.67	32,079.50	3.17	3.17
	2010	159.92	41,337.40	3.17	3.00
	2012	84.67	19,862.00	3.67	3.67
Sinjeong	2007	59.25	13,585.40	4.17	3.50
	2009	154.25	46,551.60	3.17	3.17
	2012	73.83	17,518.70	3.67	3.33
Seongsan 2 <sup>nd</sup> Bridge	2012(1)	100.73	3,119.00	0.83	1.17
	2012(2)	80.63	1,827.30	1.00	1.33

**Table 2. Watershed Characteristic Index Values**

Study Stream	Study Area	Watershed Area (km <sup>2</sup> )	Stream Length (km)	Stream Slope (m/m)	Watershed Slope (%)	Shape Factor (km <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> )
Jungrang	Singok	83.88	10.07	0.0065	18.00	0.56
	Wolgye 1 <sup>st</sup> Bridge	140.90	22.04	0.0039	19.00	0.22
	Jungrang Bridge	204.75	27.15	0.0032	17.20	0.21
	Majang 2 <sup>nd</sup> Bridge	45.40	11.09	0.0103	11.60	0.37
Tan	Gungnae	76.89	12.67	0.0047	20.40	0.30
	Seongnam	202.21	24.39	0.0033	19.50	0.24
	Daegok Bridge	202.71	25.30	0.0033	19.50	0.23
Anyang	Anyang	110.99	13.60	0.0052	21.00	0.40
	Siheung	133.90	19.55	0.0040	20.40	0.24
	Cheonwang	40.61	11.37	0.0040	12.50	0.33
	Gocheok Bridge	238.65	25.10	0.0034	17.10	0.28
	Sinjeong	239.78	25.78	0.0034	17.00	0.28
Hongje	Seongsan 2 <sup>nd</sup> Bridge	19.02	7.76	0.0107	27.30	0.16

**Table 3. Urban Characteristic Index Values**

Study Stream	Study Area	Impervious Ratio (%)	Area Ratio of Sewer Pipe (%)	Shape Factor of Sewer Pipe Area (km <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> )	Slope of Sewer Pipe (m/m)
Jungrang	Singok	23.82	21.44	1.96	0.044
	Wolgye 1 <sup>st</sup> Bridge	32.80	27.82	0.50	0.040
	Jungrang Bridge	44.18	33.87	0.44	0.044
	The 2 <sup>nd</sup> Majang Bridge	79.07	72.19	1.00	0.063
Tan	Gungnae	34.86	37.67	1.05	0.036
	Seongnam	44.75	32.35	0.54	0.035
	Daegok Bridge	44.82	32.92	0.50	0.035
Anyang	Anyang	46.08	37.96	0.92	0.047
	Siheung	48.18	37.65	0.53	0.043
	Cheonwang	47.78	55.53	0.39	0.040
	Gocheok Bridge	53.01	40.69	0.50	0.044
	Sinjeong	52.24	40.92	0.48	0.044
Hongje	Seongsan 2 <sup>nd</sup> Bridge	46.97	49.42	0.34	0.085

적의 비율을 나타내는 값이고, 관망형상계수는 관망이 설치되어있는 지역의 형상계수를 의미하며, 관망경사는 유역에 존재하는 관망의 평균경사를 계산한 값이다. 그리고 강우특성인자는 앞서 선정한 60개 호우사상에 대하여 총 강우량, 첨두강우까지의 총강우량, 유효우량, 변곡점까지의 총강우량을 구하였다.

#### 4. 공식 개발

##### 4.1 개발방법 및 식 선정 기준

구축한 강우-유출량 자료로부터 선정한 호우사상에 대

해 수평직선분리법과 NRCS-CN 방법을 사용하여 관측 도달시간과 저류상수를 산정하였다. 그리고 특성인자들과 단계적 다중회귀분석을 통해서 공식을 개발하였다. 최종 공식은 식에 사용된 인자들의 유의확률(*p*-value)이 0.05보다 작고, 인자들 사이의 공선성(Collinearity)이 존재하지 않는 식( $VIF \leq 10.0$ ) 중에서 회귀식의 결정계수(Determination Coefficient,  $R^2$ )가 가장 높은 식을 선정하였다. 본 연구에서는 공선성을 검토하기 위해서 분산팽창계수(Variance Inflation Factor, VIF)를 이용하였으며, 다음 Eq. (5)와 같다.

$$VIF = \frac{1}{1 - R_*^2} \quad (5)$$

여기서,  $R_*^2$ 는 회귀식을 산정하는데 사용한 독립변수들을 서로 회귀분석하여 얻은 가장 큰 결정계수 값을 의미한다.

#### 4.2 인자 선정

구축한 유역 및 도시특성인자들과 관측 도달시간 및 저류상수의 상관성을 분석하였다(Table 4). 유역특성인자의 경우 유역면적, 유로연장, 유로경사, 형상계수, 유역경사 순으로 상관계수가 높았으며, 도시특성인자는 관망면적비율, 관망경사, 관망형상계수, 불투수율 순으로 높았다. 이 중에서 상관성이 낮은 형상계수, 유역경사, 관망형상계수, 불투수율 인자들은 제외하고, 나머지 인자들을 다중회귀분석에 사용하였다. 강우특성인자는 4개의 인자들의 상관계수가 거의 유사하여 유출량 자료가 없고, 강우량 자료만 있는 곳에 적용할 수 있는 총강우량 인자를 사용하였다.

#### 4.3 다중회귀분석

공식 개발에 사용할 인자들과 관측 도달시간 및 저류상수와의 단계적 다중회귀분석(stepwise multi regression analysis)을 수행하여 공식들을 산정하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다. 최종적으로 선정된 공식은 앞서 제시한 식 선정 기준을 적용하였으며, 아래 Eqs. (6) and (7)과 같다. Table 5에 제시된 A는 유역면적, L은 유로연장, S<sub>S</sub>는 유로경사, R<sub>L</sub>은 관망면적비율, S<sub>L</sub>은 관망경사, P<sub>t</sub>는 총강우량이다.

$$T_c = 0.698 \frac{A^{0.397}}{S_s^{0.245} R_L^{0.278} P_t^{0.213}} \quad (6)$$

$$K = 0.558 \frac{A^{0.211}}{S_s^{0.385} R_L^{0.253} P_t^{0.165}} \quad (7)$$

여기서, T<sub>c</sub>는 도달시간(hr), K는 저류상수(hr), A는 유역면적(km<sup>2</sup>), S<sub>S</sub>는 유로경사(m/m), R<sub>L</sub>은 관망면적비율(%), P<sub>t</sub>는 총강우량(mm)이다. 공식의 적용범위는 유역면적

Table 4. Correlation Coefficient of the Watershed and Urban Characteristic Index

Time of Concentration		Storage Coefficient	
Characteristic Index	Correlation Coefficient	Characteristic Index	Correlation Coefficient
Watershed Area	0.889	Watershed Area	0.819
Stream Length	0.875	Stream Length	0.810
Stream Slope	0.750	Stream Slope	0.728
Shape Factor	0.373	Shape Factor	0.357
Watershed Slope	0.146	Watershed Slope	0.082
Area Ratio of Sewer Pipe	0.553	Area Ratio of Sewer Pipe	0.531
Slope of Sewer Pipe	0.526	Slope of Sewer Pipe	0.477
Shape Factor of Sewer Pipe Area	0.320	Shape Factor of Sewer Pipe Area	0.338
Impervious Ratio	0.254	Impervious Ratio	0.281

Table 5. Result of the Multi-Regression Analysis

Time of Concentration				Storage Coefficient			
Index	R <sup>2</sup>	p-Value	VIF	Index	R <sup>2</sup>	p-Value	VIF
A	0.85	.000	1.00	A	0.69	.000	1.00
L	0.74	.000	1.00	L	0.64	.000	1.00
S <sub>S</sub>	0.67	.000	1.00	S <sub>S</sub>	0.67	.000	1.00
A-L	0.85	.992	7.35	A-L	0.69	.287	7.35
A-S <sub>S</sub>	0.87	.005	2.71	A-S <sub>S</sub>	0.75	.000	2.71
A-S <sub>S</sub> -R <sub>L</sub>	0.89	.014	2.80	A-S <sub>S</sub> -R <sub>L</sub>	0.77	.036	2.80
A-S <sub>S</sub> -S <sub>L</sub>	0.87	.784	4.92	A-S <sub>S</sub> -S <sub>L</sub>	0.77	.055	4.92
A-S <sub>S</sub> -R <sub>L</sub> -P <sub>t</sub>	0.94	.000	2.83	A-S <sub>S</sub> -R <sub>L</sub> -P <sub>t</sub>	0.82	.004	2.83

19.02~239.78 km<sup>2</sup>, 유로경사 0.0032~0.0107 m/m, 관망면적비율 21.44~72.19%이다.

관망면적비율( $R_L$ )의 경우 본 연구에서는 서울의 하수관망도와 경기도 지역의 하수정비기본계획의 하수관망구역도를 참고하여 계산하였다. 만약 관망면적비율 자료수집이 여의치 않을 경우, Fig. 4와 같이 관망면적비율은 불투수율( $I_p$ )과 상관성이 크기 때문에 Eq. (8)을 통해 관망면적비율의 대략적인 값을 얻을 수 있게 제시하였다.

$$R_L = 0.873 I_p - 0.146 \quad (8)$$

## 5. 결과분석

### 5.1 도달시간 경험식 비교

본 연구에서 개발된 도달시간 공식과 국내의 대표 도달시간 경험식을 비교하기 위해서 관측값과의 산포도를

Fig. 5에 도시하였으며, 경험식은 Kirpich (1940), Rziha, Kraven (I), Jeong (2005), Yoon (2005) 식을 사용하였다 (Table 6). 산포도를 분석한 결과 본 연구에서 개발된 도달시간 공식의 값이 관측값과 일치하는 45° 선에 가장 가깝게 몰려있는 것을 알 수 있으며, 관측값과 비교했을 때 약

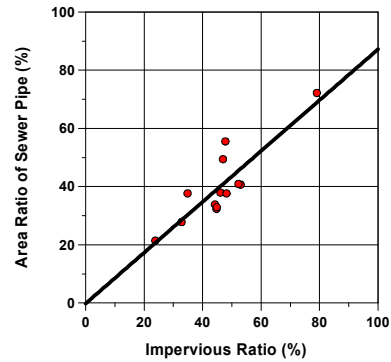


Fig. 4. Correlation Analysis between  $R_L$  and  $I_p$

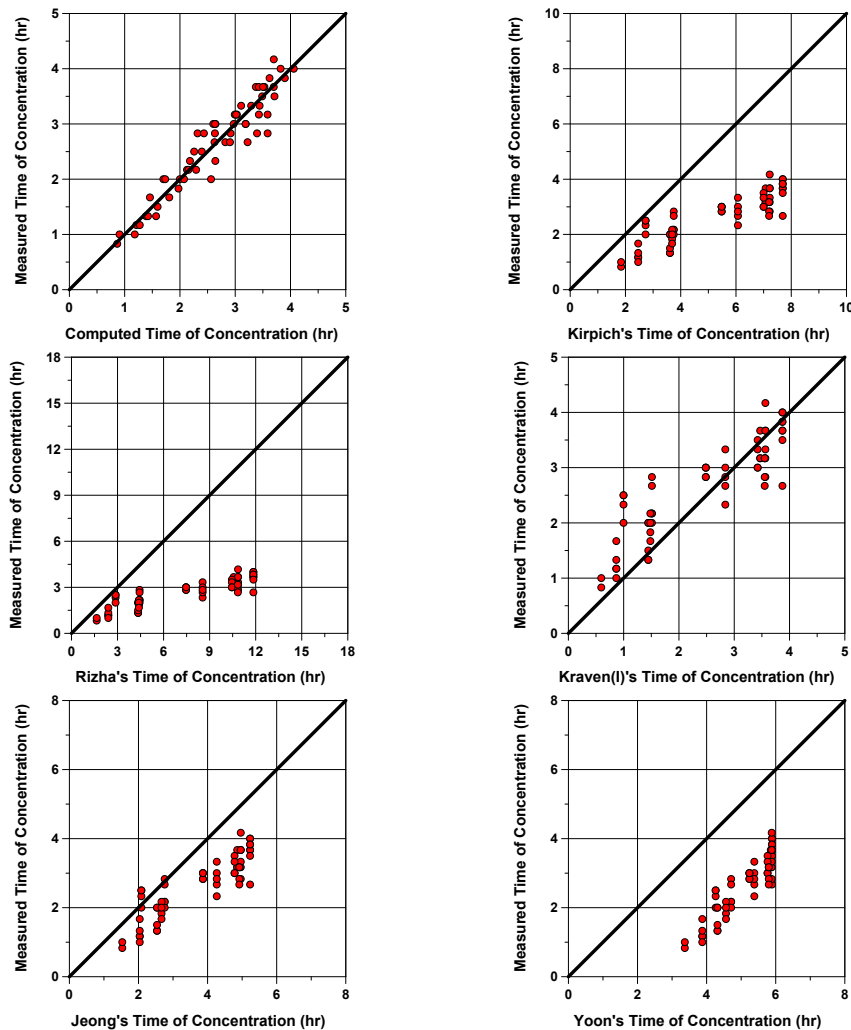


Fig. 5. Comparison between the Regression and Empirical Formula in  $T_c$

1.01배 과대산정 하였다. 경험식의 경우, Kirpich (1940), Rziha, Jeong (2005), Yoon (2005)은 예측값들이 45° 선 아래 위치하며, 관측값 보다 최소 1.44배에서 최대 2.69배 과대산정 하였다. Kraven (I)은 계산결과 0.5~4.0 hr 사이에 예측값들이 위치하며 본 연구의 도달시간 공식보다는 45° 선에서 멀리 퍼져있지만 경험식들 중에서는 가장 관측값에 가깝게 모의하는 것을 알 수 있었다.

한편, 오차분석을 통한 정확도 평가 결과는 Table 7과 같다. 본 연구에서 개발된 공식의 경우 오차합은 12.25 hr, 최소오차는 0.00 hr, 최대오차는 0.76 hr, 평균오차는 0.20 hr, RMSE는 0.26 hr로 나타났으며, 다른 경험식들의 결과와 비교했을 때 가장 관측값에 가깝게 모의하였다. Kirpich, Rziha, Jeong, Yoon 식들은 모두 관측값에 비해 과대산정 하였으며, 오차합은 67.95 hr에서 286.31 hr, 평균오차는 1.13~4.77 hr, RMSE는 1.27 hr에서 5.54 hr로 정확도가 떨어지는 것을 알 수 있었다. 경험식들 중에서 가장 정확도가 높은 Kraven (I) 식과 본 연구의 도달시간 공식의 결과를 비교했을 때, 오차합은 27.67 hr에서 12.25 hr로 약 55.7%, 평균오차는 0.46 hr에서 0.20 hr로 약 56.5%, RMSE는 0.59 hr에서 0.26 hr로 약 55.9% 정확도가 개선되었다. 즉, 도시하천 유역이라는 지역적 성향이 존재하는 곳에서는 본 연구의 공식처럼 지역적 성향이 없는 유역특성인자 뿐 아니라 지역적 성향이 있는 도시 및 강우특성인자를 함께 고려

Table 6. Empirical Formula for the Time of Concentration

Name	Formula
Kirpich (1940)	$T_c = 0.0663L^{0.77}S_s^{-0.385}$
Rziha	$T_c = 0.0139LS_s^{-0.6}$
Kraven (I)	$T_c = 0.0074LS_s^{-0.515}$
Jeong (2005)	$T_c = 0.119L^{0.777}S_s^{-0.212}$
Yoon (2005)	$T_c = 1.08A^{0.09}L^{0.16}S_s^{-0.12}$

Table 7. Error Analysis of the Time of Concentration

Equation	Error Sum (hr)	Min. Error (hr)	Max. Error (hr)	Ave. Error (hr)	RMSE (hr)
This Study	12.25	0.00	0.76	0.20	0.26
Kirpich	160.40	0.23	5.02	2.67	2.97
Rziha	286.31	0.37	9.18	4.77	5.54
Kraven (I)	27.67	0.01	0.90	0.46	0.59
Jeong	67.95	0.07	2.56	1.13	1.27
Yoon	147.17	1.71	3.22	2.45	2.48

하는 것이 더욱 정확한 값을 얻을 수 있다고 할 수 있다.

## 5.2 저류상수 경험식 비교

저류상수 또한 도달시간과 마찬가지로 본 연구에서 개발한 Eq. (7)과 경험식의 예측값 및 관측값의 비교를 위해 산포도를 Fig. 6에 제시하였다. 국내외 경험식들은 Clark (1945), Linsley (1975), Sabol (1988), Jeong (2005), Yoon (2005)을 사용하였다(Table 8). Clark (1945)과 Linsley (2005)의 경우 식에 계수 C와 b가 사용되는데 이 값은 관측값에 가장 가깝게 제시하는 계수를 사용하였으며, C는 0.5, b는 0.01로 가정하였다. Sabol (1988)의 경우, 저류상수를 산정하는데 도달시간을 사용하는데 이 때 도달시간은 본 연구에서 개발한 도달시간 공식으로부터 계산된 값을 사용하였다. 산포도 분석결과, 본 연구의 저류상수 공식 값이 다른 경험식들의 값과 비교했을 때 45° 선에 가장 가깝게 위치하고 있음을 알 수 있다. 산정값은 관측값과 비교했을 때 약 1.02배 과대산정 하였다. 국내외 경험식은 Clark (1945), Linsley (1975), Jeong (2005), Yoon (2005) 모두 전반적으로 과대산정하고 있음을 알 수 있고, 관측값 보다 최소 1.18~3.70배 과대산정 하였다. Sabol (1988)의 경우, 주로 관측값에 비해 과소산정하고, 본 연구의 저류상수 공식의 산포도보다 더 넓게 분포하지만 다른 경험식들에 비해서는 훨씬 가깝게 모의하는 것을 알 수 있었다.

Table 8. Empirical Formula for the Storage Coefficient

Name	Formula
Clark (1945)	$K = CLS_s^{-0.5}$ , $C : 0.5 \sim 1.4$
Linsley (1975)	$K = bA^{0.5}LS_s^{-0.5}$ , $b : 0.01 \sim 0.03$
Sabol (1988)	$K = \frac{T_c}{1.46 - 0.0867(L^2/A)}$
Jeong (2005)	$K = 1.5211L^{0.263}S_s^{-0.120}$
Yoon (2005)	$K = 1.891A^{0.108}L^{0.179}$



본 연구의 저류상수 공식과 여러 경험식들의 산정값을 이용하여 정확도 평가를 하였다(Table 9). 도달시간과 마찬가지로 본 연구에서 개발한 저류상수 공식이 가장 정확도가 높은 것을 알 수 있었으며 오차합의 경우 17.47hr, 평균오차는 0.29 hr, RMSE는 0.35 hr로 나타났다. 경험식 중

에서 가장 정확한 Sabol (1988)의 결과와 비교했을 때 오차합은 19.79 hr에서 17.47 hr로 약 11.7%, 평균오차는 0.33 hr에서 0.29 hr로 약 12.1%, RMSE는 0.39 hr에서 0.35 hr로 약 10.3% 오차가 개선되었다. 저류상수의 경우 도달시간에 비해서 본 연구에서 개발된 공식의 정확도 개선이

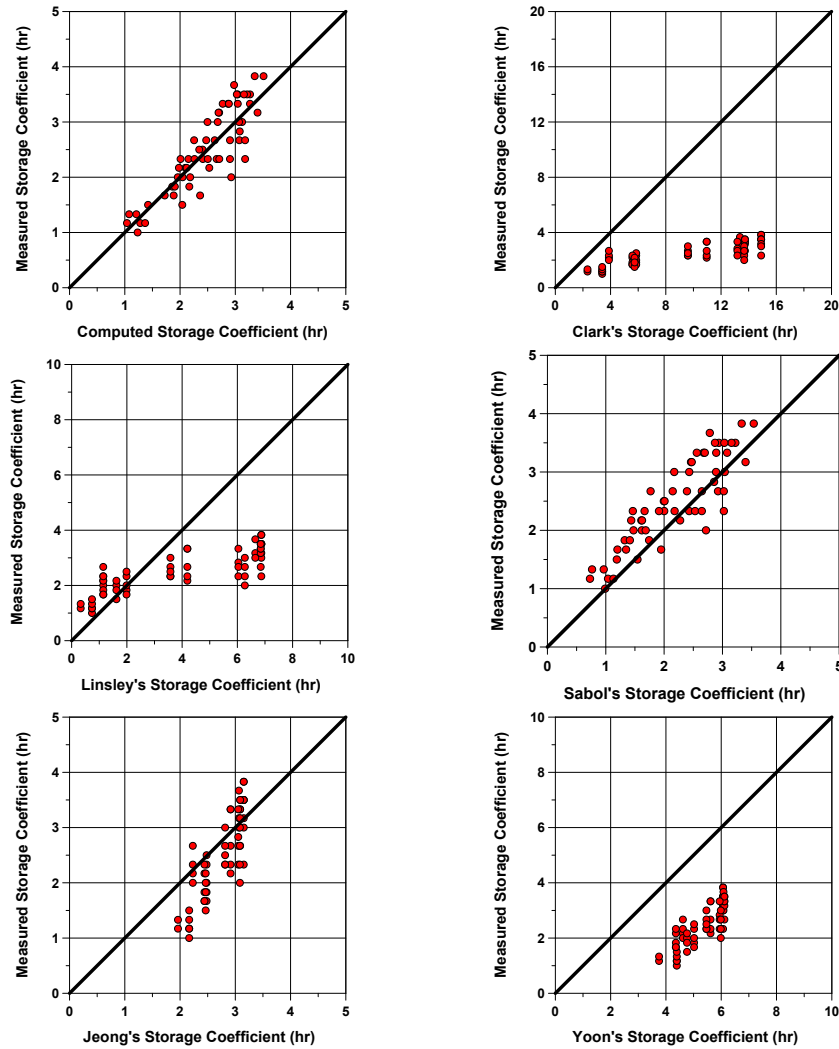


Fig. 6. Comparison the Regression and Empirical Formula in K

Table 9. Error Analysis of the Storage Coefficient

Equation	Error Sum (hr)	Min. Error (hr)	Max. Error (hr)	Ave. Error (hr)	RMSE (hr)
This Study	17.47	0.03	0.93	0.29	0.35
Clark	420.13	1.00	12.58	7.00	7.95
Linsley	115.68	0.01	4.54	5.73	2.40
Sabol	19.79	0.00	0.83	0.33	0.39
Jeong	27.84	0.02	1.16	0.46	0.55
Yoon	171.24	1.94	3.98	2.85	2.89

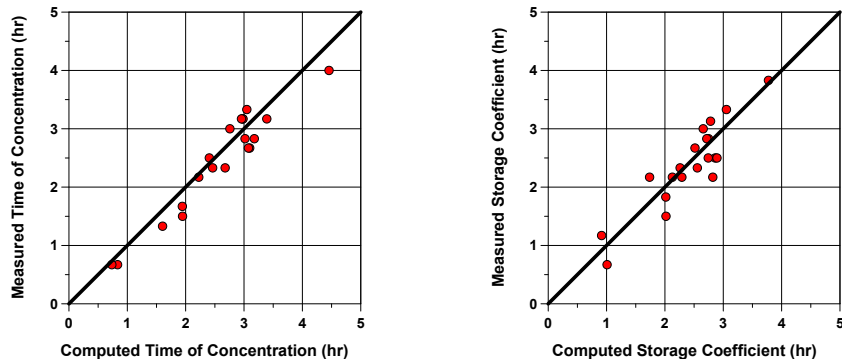


Fig. 7. Verification of  $T_c$  and  $K$

더 낮음을 알 수 있는데 이는 본 연구의 대상 지역인 도시 하천 유역에서 도달시간과 저류상수는 매우 밀접한 관계를 갖고, Sabol (1988)의 경우 경험식에 본 연구에서 도출된 도달시간 공식의 예측값을 사용함으로써 기존의 다른 경험식들에 비해 보다 정확한 예측값을 제시할 수 있다고 판단된다. 만약 본 연구의 도달시간 공식이 아닌 다른 경험식의 도달시간 예측값을 사용한다면 Sabol (1988)의 정확도는 훨씬 떨어지게 되고, 본 연구의 저류상수 공식의 정확도 개선정도는 더 커지게 될 것이다.

### 5.3 검증

산포도와 정확도 평가를 통해서 본 연구에서 개발한 도달시간 및 저류상수 공식이 도시하천 유역에 적용했을 때 다른 경험식들에 비해 더 정확한 값을 산정한다는 것을 알 수 있었다. 도달시간 및 저류상수 산정에 사용하지 않은 20개 강우-유출 호우사상을 이용하여 개발된 식을 검증하였다(Fig. 7). 검증결과 도달시간은 결정계수 0.92, 저류상수는 0.82로 나타났으며, 관측값과 일치하는 45° 선에 매우 가깝게 모의하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 도달시간 및 저류상수 공식은 도시하천 유역에 적용 가능한 식이라 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 도시하천 유역의 신뢰성 있는 수문해석을 위해 지역적 성향을 고려한 도달시간 및 저류상수 공식을 개발하였다. 그리고 국내외 경험식들과 정확도 평가를 수행하였으며, 검증 호우사상을 통해 식을 검증하였다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 도시하천 유역의 지역적 성향을 고려한 도달시간 및 저류상수 공식을 개발하기 위해 국내 대표 도시하천 유역인 중랑천, 탄천, 안양천, 홍제천 내 13개 유역을

선정하였다. 총 60개 호우사상을 사용하여 관측 도달시간 및 저류상수를 산정하였으며, 지역적 성향이 없는 유역특성인자와 지역적 성향이 있는 도시 및 강우특성인자를 이용하여 다중회귀분석을 통해 공식을 개발하였다. 도달시간과 저류상수 모두 유역면적, 유로경사, 관망면적비율, 총강우량을 인자로 사용하였다. 결정계수( $R^2$ )는 도달시간 공식은 0.94, 저류상수 공식은 0.82로 나타났다.

- 2) 본 연구에서 개발한 공식과 국내외 경험식을 관측값과의 산포도를 통해서 비교하였다. 도달시간의 경우, 본 연구에서 개발한 공식의 예측값이 관측값과 일치하는 45° 선에 가장 가깝게 몰려 있으며, 약 1.01배 과대산정 하였다. 그 외 경험식들은 최소 0.90배에서 최대 2.69배 차이가 났다. 저류상수 또한 마찬가지로 본 연구의 저류상수 공식이 가장 관측값에 가깝게 모의하였고, 약 1.02배 과대산정 하였다. 국내외 경험식들은 0.87배에서 3.70배 과대산정 하였다.
- 3) 개발된 공식과 경험식의 정확도를 정량적으로 비교하였다. 도달시간의 경우 본 연구에서 개발된 공식은 오차합 12.25 hr, 평균오차는 0.20 hr, RMSE는 0.26 hr로 가장 오차가 작았으며, 경험식 중 가장 정확한 Kraven (I)과 비교했을 때, 오차합은 27.67 hr에서 12.25 hr로 약 55.7%, 평균오차는 0.46 hr에서 0.20 hr로 약 56.5%, RMSE는 0.59 hr에서 0.26 hr로 약 55.9% 정확도가 개선되었다. 저류상수 또한 본 연구에서 개발한 공식이 가장 오차가 작았으며, Sabol 식과 비교하였을 때, 오차합은 19.79 hr에서 17.47 hr로 약 11.7%, 평균오차는 0.33 hr에서 0.29 hr로 약 12.1%, RMSE는 0.39 hr에서 0.35 hr로 약 10.3% 오차가 개선되었다.
- 4) 공식 개발에 사용한 호우사상과는 별개로 20개 검증 호우사상을 이용하여 본 연구에서 개발한 도달시간

및 저류상수 산정식을 검증한 결과, 도달시간은 결정계수 0.92, 저류상수는 0.82로 나타났으며, 관측값과 일치하는 45° 선에 매우 가깝게 위치하는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 도시하천 유역의 지역적 성향을 고려한 도달시간 및 저류상수 공식은 국내외 경험식들보다 더 정확한 결과를 제시한다는 측면에서 가치가 있다고 판단되며, 검정을 통해 서울 및 경기도 도시하천 유역에 적용이 가능하다고 판단된다. 향후 타 도시하천 유역에 대해 적용성 검토를 수행할 필요가 있으며, 추가적으로 다른 지역의 도시하천 유역 자료들을 구축하여 국내 전체 도시하천 유역에 적용할 수 있는 도달시간 및 저류상수 산정식을 개발할 필요가 있다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학기술정보연구원에서 수행하는 (초고성능컴퓨팅 기반 국가현안 대응체계 구축사업)사업의 위탁연구와 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2011-0030040).

## References

Bae, D.H., Shim, J.B., and Yoon, S.S. (2012). "Development and Assessment of Flow Nomograph for the Real-time Flood Forecasting in Cheonggye Stream." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 45, No. 11, pp. 1107-1119.

Clark, C.O. (1945). "Storage and The Unit Hydrograph." *ASCE*, Vol. 110, pp. 1419-1446.

Graf, J.B., Garklavs, G., and Oberg, K.A. (1982). "A Technique for Estimating Time of Concentration and Storage Coefficient Values for Illinois Streams." *U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations*

Report 82-22, p.10

Jeong, S.W. (2005). "Development of Empirical Formulas for the Parameter Estimation of Clark's Watershed Flood Routing Model." Ph. D. dissertation, Korea University, p.152.

Kim, Y.J. (2015). "Development of Concentration Time and Storage Coefficient Formula in Urban Stream Watersheds." Master Thesis, Sejong University, p. 114.

Kirpich, Z.P. (1940). "Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds." *Civil Engineering*, Vol. 10, No. 6, pp. 362-368.

Linsley, R.K., Kohler, M.A., and Paulhus, I.L. (1975). *Hydrology for Engineers*, 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill, New York, N.Y.

Sabol, G.V. (1988). "Clark Unit Hydrograph and R-Parameter Estimation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 1, pp. 103-111.

Straub, T.D., Melching, C.S., and Kocher, K.E. (2000). "Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois." *U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 00-4184*, p. 30.

Viessman, W., Jr., Lewis, G.L., and Knapp, J.W. (1989). *Introduction of Hydrology*, 3<sup>rd</sup> Edition, New York, Harper and Row Publishers, p. 780.

Yoon, T.H., Kim, S.T., and Park, J.W. (2005). "On Redefining of Parameters of Clark Model." *Journal of Korean Society Civil Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 181-187.

paper number : 15-002  
 Received : 13 January 2015  
 Revised : 2 March 2015 / 27 April 2015  
 Accepted : 27 April 2015