



도시특성 요인의 다중선형회귀 분석을 이용한 물순환상태추정모델 개발

Development of water circulation status estimation model by using multiple linear regression analysis of urban characteristic factors

김영란*·황성환·이연선

Youngran Kim*·Seonghwan Hwang·Yunsun Lee

서울기술연구원 기술개발본부 생활환경연구실

Division of Living and Built Environment Research, Technology Development Headquarter, Seoul Institute Technology

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

ABSTRACT

Identifying the water circulation status is one of the indispensable processes for watershed management in an urban area. Recently, various water circulation models have been developed to simulate the water circulation, but it takes a lot of time and cost to make a water circulation model that could adapt the characteristics of the watershed. This paper aims to develop a water circulation state estimation model that could easily calculate the status of water circulation in an urban watershed by using multiple linear regression analysis. The study watershed is a watershed in Seoul that applied the impermeable area ratio in 1962 and 2000. And, It was divided into 73 watersheds in order to consider changes in water circulation status according to the urban characteristic factors. The input data of the SHER(Similar Hydrologic Element Response) model, a water circulation model, were used as data for the urban characteristic factors of each watershed. A total of seven factors were considered as urban characteristic factors. Those factors included annual precipitation, watershed area, average land-surface slope, impervious surface ratio, coefficient of saturated permeability, hydraulic gradient of groundwater surface, and length of contact line with downstream block. With significance probabilities (or p-values) of 0.05 and below, all five models showed significant results in estimating the water circulation status such as the surface runoff rate and the evapotranspiration rate. The model that was applied all

Received 13 October 2020, revised 20 November 2020, accepted 23 November 2020.

*Corresponding author: Young-Ran Kim(E-mail : yrkim@sit.re.kr)

- 김영란 (선임연구위원) / Youngran Kim (Senior Research Fellow)
서울특별시 마포구 매봉산로 37, 산학협력연구센터 8층, 03909
37, Maebongsan-ro, Mapo-gu, Seoul 03909, Republic of Korea
- 황성환 (연구위원) / Seonghwan Hwang (Research Fellow)
서울특별시 마포구 매봉산로 37, 산학협력연구센터 8층, 03909
37, Maebongsan-ro, Mapo-gu, Seoul 03909, Republic of Korea
- 이연선 (전문연구위원) / Yunsun Lee (Research Specialist)
서울특별시 마포구 매봉산로 37, 산학협력연구센터 8층, 03909
37, Maebongsan-ro, Mapo-gu, Seoul 03909, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

seven urban characteristics factors, can calculate the most similar results such as the existing water circulation model. The water circulation estimation model developed in this study is not only useful to simply estimate the water circulation status of ungauged watersheds but can also provide data for parameter calibration and validation.

Key words: Water circulation, Multiple linear regression analysis, Urban characteristic factor, Water circulation index, SHER model

주제어: 물순환, 다중선형회귀 분석, 도시특성 요인, 물순환 지표, SHER 모형

1. 서 론

도시에서 인구가 증가하고 삶이 질이 높아짐에 따라 토지이용이 변하고 이에 따라 물순환에 영향을 미치는 환경여건이 달라지고 있다. 도시의 확대와 개발로 투수면적은 증가하고, 이로 인해 강우의 토양침투량과 증발산량이 감소되고, 지표면유출수는 증가되는 등 물순환이 변화되어 도시건조, 열섬화와 폭염 빈발, 합류식 하수관거 월류수(Combined Sewer Overflows, CSOs)증가에 의한 하천수질 악화, 홍수량 증가 등의 도시문제가 심화되고 있다.

우리나라에서는 2005년 「서울특별시 빗물관리 기본조례」 제정을 계기로 도시의 물순환 개선에 관심을 가지고 지자체별로 물순환 관리사업을 시행해 오고 있다. 도시유역의 물순환 상태를 파악하는 것은 유역관리를 위해서 중요하다. 그러나 도시유역의 물순환을 직접 모니터링하는 것은 어려운 실정으로서 이러한 상황을 고려할 때 물순환모형은 매우 유용하게 사용되고 있다 (Foter et al., 2005).

도시유역의 기후, 지형, 토양 등 다양한 인자가 물순환에 미치는 영향을 모의하는 것은 모델 평가에서 중요하다. 최근에는 기후변화로 인한 전 지구적인 환경문제에 대비하기 위하여 다양한 영향인자를 적용한 물수지 모형을 개발하여 물순환 상태를 모의하고 있다. 국내에서 물수지 모형을 적용한 사례는 서울시 물순환 회복 기본계획과 서울시 빗물관리기본계획에서 SHER(Similar Hydrologic Element Response)모형을 이용하여 서울시의 물순환을 모의하였으며, 국내 현황에 적용할 수 있도록 개발한 유역 물순환 해석 모형인 CAT(Catchment hydrologic cycle Assessment Tool)를 이용한 사례가 있다 (Seoul, 2003, 2013; Kim et al., 2012). 청계천의 하천유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 물순환을 모의한 바가 있고, 도립천 유역을 대상으로 분포형 모형인 WEP(Water and Energy

transfer Processes) 모형을 적용하여 모의한 바가 있다 (Chang et al., 2004; Lee et al., 2005).

그러나 물순환모형은 도시유역의 지역특성을 고려하여 구축하는데 많은 시간과 비용이 소요되는 문제를 가지고 있다. 또한 도시유역 특성인자의 변화뿐만 아니라 소유역 간의 관계를 고려하여 물순환 변화를 모의하므로 물순환 모의값 변화에 대하여 명확하게 설명하기 어려운 상황이 발생할 수도 있다.

본 연구에서는 도시 물순환 현황을 간편하게 추정할 수 있는 다중선형회귀분석에 의한 물순환 상태 추정 모델을 개발하였다. 다중선형회귀 모델은 미계측 유역에 대하여 적은 시간과 비용으로 신뢰할 수 있는 결과를 추정할 수 있고, 대상유역의 도시특성 요인에 따른 물순환상태를 현장에서도 간단하게 산정할 수 있다. 본 연구에서 다중선형회귀분석의 독립변수는 물순환에 영향을 주는 기상적 요인과 불투수면적률(Impervious surface ratio), 유역경사(Surface slope) 등의 지형적 요인들이며, 종속변수는 물순환 상태를 나타내는 지표로서 표면유출율, 증발산율이다. 이후 물순환에 영향을 주는 기상적 요인과 지형적 요인을 도시특성 요인으로 통합하여 제시하고자 한다. 종속변수의 자료는 서울시 물순환을 분석하였던 SHER 모형의 모의결과를 적용하였으며, 독립변수의 자료는 기상청 서울관측소의 30년 이동평균 강수량과 SHER 모형의 입력자료를 이용하였다. 도시특성 요인들을 고려한 물순환 상태추정 모델들 중에서 오차가 적고 상관성이 높은 최적 모델을 도출하고자 모델들 추정값의 정확도를 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 대상유역 및 물순환모형 선정

연구대상 유역은 한강의 수위에 크게 영향을 받는 한강유역을 제외한 서울시 경계내의 중랑천, 탄천, 고덕



천, 성내천, 안양천, 사당천, 봉원천 및 육천의 9개 유역이다. 도시특성 요인 변화에 따른 물순환 상태 변화를 고려할 수 있는 충분한 자료를 확보하기 위하여 Fig. 1과 같이 9개 하천유역의 73개 소유역에 대한 도시특성 요인에 따른 물순환 상태 자료를 정리하였다.

현재 우리나라에서 도시유역의 물순환 상태는 물순환모형을 이용하여 산정하고 있으며, 물순환모형으로는 SHER 모형, CAT 모형, SWAT 모형 및 WEP 모형 등을 이용하고 있다.

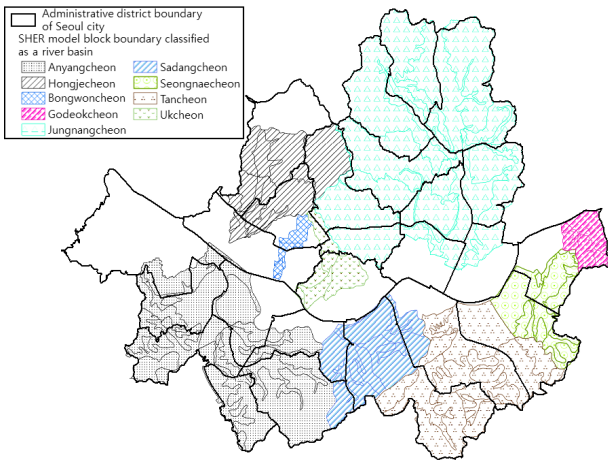


Fig. 1. Location map of target watersheds.

Table 1. Input data of SHER model and influencing urban characteristic factors

Classification	Input data of SHER model	water circulation status estimation model	
		urban characteristic factor	unit
Weather	<ul style="list-style-type: none"> Hourly rainfall^{a)} Potential evapotranspiration 	<ul style="list-style-type: none"> Annual precipitation (Unapplied) 	<ul style="list-style-type: none"> mm/yr -
Watershed specifications	<ul style="list-style-type: none"> Watershed area^{b)} Average land-surface slope^{b)} 	<ul style="list-style-type: none"> Watershed area Surface slope 	<ul style="list-style-type: none"> km² m/m
Impervious watershed	<ul style="list-style-type: none"> Impervious area^{c)} Storage capacity of impervious surface 	<ul style="list-style-type: none"> Impervious surface ratio (Unapplied) 	<ul style="list-style-type: none"> m/m -
Pervious watershed	<ul style="list-style-type: none"> Topsoil thickness Storage capacity of pervious surface Area of solid bare land and bare land^{b)} 	<ul style="list-style-type: none"> (Unapplied) (Unapplied) Saturated permeability coefficient 	<ul style="list-style-type: none"> - - cm/sec
Groundwater	<ul style="list-style-type: none"> Riverbed elevation Riverbed area Aquifer top level Aquifer bottom level Hydraulic gradient of groundwater surface^{b)} Length of contact line with downstream^{b)} 	<ul style="list-style-type: none"> (Unapplied) (Unapplied) (Unapplied) (Unapplied) Hydraulic gradient of groundwater Contact line length 	<ul style="list-style-type: none"> - - - - m/m m

^{a)} 30-year moving average of annual precipitation at the Seoul Station of the Korea Meteorological Administration(1961-2019)

^{b)} SHER model Input data(Seoul, 2003) was made by Seoul Metropolitan Internal Digital Topographic Map Data

^{c)} SHER model Input data(Seoul, 2003) was made by "Seoul metropolitan biotop map"(Seoul, 2000)

본 연구에서 2007년 빗물관리 기본계획에서 서울시 물순환 모의에 사용한 SHER 모형을 이용하여 서울시 73개 소유역에 대한 물순환 상태를 모의하였다.

2.2 다중선형회귀분석 대상자료

다중선형회귀분석은 다양한 요인에 의하여 발생하는 결과를 설명하는 분석 방법으로써, 한강 유역의 특성에 대한 연간 유출률에 관하여 분석한 사례가 있고 계획한 기상자료를 기반으로 저수지의 월별 저수율 추정에도 활용되고 있다 (Lee et al., 2018a, b). 또한 고립지역 연평균 일교통량 추정, LiDAR(Light Detection and Ranging) 필터링, 교차로 사망사고 예측, 미세먼지 농도 추정 등과 같이 폭넓게 사용하고 있다 (Lee, 2004; Choi et al., 2011; Kim and Oh, 2015; Choo et al., 2017).

본 연구에서는 물순환상태를 추정할 모델 개발에서 도시특성 요인의 상수를 산정하기 위하여 이용하였다. 물순환상태추정모델의 상수를 결정하기 위하여 이용한 독립변수와 종속변수를 정리하면 다음과 같다.

2.2.1 독립변수 도시특성 요인 구성

다중선형회귀분석을 위해서는 도시유역의 물순환 변화에 영향을 미치는 요인인 도시특성 요인분석을

pp. 393-402
pp. 403-410
pp. 411-423
pp. 425-435
pp. 437-443
pp. 445-462
pp. 463-471
pp. 473-480
pp. 481-493
pp. 495-502
pp. 503-512

선행하여야 한다. 그러나 특정 도시특성 요인을 입력 자료로 사용하는 물순환모형의 모의결과를 다중선행회귀분석 자료로 이용하였기 때문에 별도의 요인분석을 실시하지 않고, 기존 서울시 물순환모형으로 적용한 SHER 모형의 입력자료를 도시특성 요인으로 적용하였다.

SHER 모형의 입력자료로부터 도출한 물순환에 영향을 미치는 도시특성 요인을 정리하면 Table 1과 같다.

SHER 모형의 입력자료 중에서 불투수면적은 불투수면적률로 산정하여 적용하였다. 또한 투수구역에서 투수계수를 사용하여 나지 및 단단한 나지 유역을 구분하고 나지면적과 단단한 나지 면적의 비율을 고려한 포화투수계수의(Saturated permeability coefficient) 면적가중 평균값을 도시특성 요인으로 적용하였다. 도시특성 요인 중에서 강수량 자료는 30년 이동평균 연강수량(Annual precipitation) 자료를 이용하였다. 도시특성 요인들 중에서 서울시 수치지형도, 생태면적지도 및 계측한 강우자료와 같이 실측자료를 이용한 7개 요인을 적용하였다.

2.2.2 종속변수 물순환 상태지표

서울시 빗물관리기본계획에서 물순환 상태는 지표면유출량, 증발산량, 침투량의 3개의 지표로 나타내었다 (Seoul, 2013). 물순환 상태지표는 물순환 변화의 대표값인 지표면유출량과 증발산량을 연강수량으로 지표화한 식 (1)과 식(2)와 같다. SHER 모형의 지표면유출량 및 증발산량의 30년 이동평균값을 물순환 상태지표로 이용하였으며, 침투율은 식 (3)과 같이 지표면유출율 및 증발산율로 산정할 수 있기 때문에 추정할 물순환 상태에서 제외하였다.

$$\text{Index}_{\text{surf}} = Q_{\text{surf}} / R_{\text{year}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Index}_{\text{eva}} = Q_{\text{eva}} / R_{\text{year}} \times 100 \quad (2)$$

여기서,

$\text{Index}_{\text{surf}}$: 지표면유출율(%)

$\text{Index}_{\text{eva}}$: 증발산율(%)

Q_{surf} : 30년 이동평균 지표면유출량 (mm/yr)

Q_{eva} : 30년 이동평균 증발산량 (mm/yr)

R_{year} : 30년 이동평균 연강수량 (mm/yr)

$$\text{Index}_{\text{inf}} = 100 - \text{Index}_{\text{surf}} - \text{Index}_{\text{eva}} \quad (3)$$

여기서, $\text{Index}_{\text{inf}}$: 침투율(%)

3. 결 과

3.1 물순환 상태지표 및 도시특성 요인의 다변량 산점도

물순환 지표인 지표면유출율, 증발산율과 도시특성 요인인 연평균강수량을 포함한 7개 요인에 대한 다변량 산점도는 Fig. 2와 같다.

지표면유출율과 증발산율의 Pearson 상관계수(R)는 -0.970로 높은 상관관계를 나타낸다. 도시특성 요인들 중에서 지표면유출율 또는 증발산율과 0.5 이상의 큰 상관계수를 나타내는 도시특성 요인은 불투수면적률 뿐이며, 상관계수가 각각 0.984, -0.953이다. 지표면유출율과 상관계수가 큰 도시특성 요인 순서는 불투수면적률, 지표면평균경사, 하류블록 선형 접선 연장(Contact line length), 포화투수계수, 유역면적(Watershed area), 지하수면 동수경사(Hydraulic gradient of groundwater), 연강수량이며, 증발산율과 상관계수가 큰 도시특성 요인 순서는 불투수면적률, 지표면평균경사, 지하수면 동수경사, 하류블록 선형 접선 연장, 연강수량, 포화투수계수, 유역면적이다.

3.2 물순환상태추정모델 개발 결과

물순환 상태지표 및 도시특성 요인의 다변량 산점도 분석결과를 지표 및 요인의 1:1 상관관계를 검토한 결과이다. 도시특성 요인의 추가 또는 제외에 따른 물순환 상태지표의 변화는 산점도 분석만을 이용하여 추정하기 어렵다. 비록 물순환 상태지표와 상관성이 낮은 도시특성 요인일지라도 추가시에 다중선행회귀분석에서 오차를 줄일 수 있는 요인이 될 수 있다. 이후 다변량회귀분석의 결과인 물순환 상태지표를 산정할 수 있는 다중선행회귀식을 물순환상태추정모델(Water circulation estimating model)로 제시하고자 한다.

도시특성 요인이 7개인 것을 고려할 때, 물순환상태추정모델의 오차를 최소화하기 위해서는 $128(=2^7)$ 개 모델을 분석하여야 한다. 모든 물순환상태추정모델을 분석하기 어려우므로 Table 2와 같이 5개 물순환상태추정모델을 집중적으로 분석하였다. 물순환 상태지표와 상관성이 뚜렷한 불투수면적률과 기후변화를

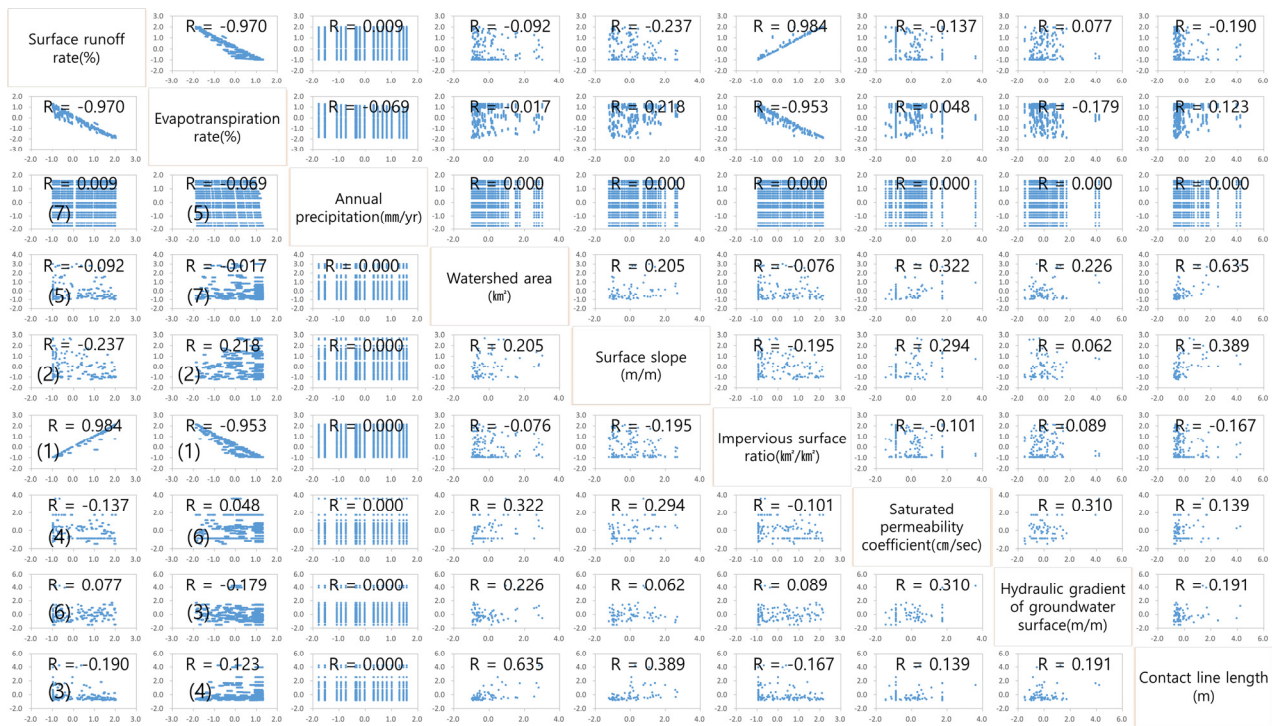


Fig. 2. Scatterplot of water circulation index and urban characteristic factors.
 Note) The numbers in parentheses are in the order of high correlation.

Table 2. Classification of models according to urban characteristic factors

Classification	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Input variables of each model	<ul style="list-style-type: none"> - Impervious surface ratio - Annual precipitation 	<ul style="list-style-type: none"> - Impervious surface ratio - Annual precipitation - Surface slope 	<ul style="list-style-type: none"> - Impervious surface ratio - Annual precipitation - Surface slope - Contact line length 	<ul style="list-style-type: none"> - Impervious surface ratio - Annual precipitation - Surface slope - Contact line length - Saturated permeability coefficient - Hydraulic gradient of groundwater surface 	<ul style="list-style-type: none"> - Impervious surface ratio - Annual precipitation - Surface slope - Contact line length - Saturated permeability coefficient - Hydraulic gradient of groundwater surface - Watershed area

고려할 수 있는 연강수량을 기본 도시특성 요인으로 적용하였고, 상관관계가 뚜렷한 요인을 순서대로 추가하여 5개 모델을 Table 2와 같이 구축하였다.

3.2.1 표면유출율 추정모델

표면유출율을 산정하는 5개 모델 모두에서 유의확률을 나타내는 p-값이 0.05 이하로 나타났다. 유의확률이 0.05 이하인 것은 “도시특성 요인이 물순환 지표

에 영향을 미치지 않는다”는 귀무가설을 기각하는 것을 의미하므로 5개 모델 모두 물순환 표면유출율 산정에 이용할 수 있다. 5개 모델의 변수에 대한 분산분석 결과는 Table 3과 같다.

다중선형회귀분석 결과로서 표면유출율 추정할 수 있는 물순환상태추정모델의 도시특성 요인 상수값 산정결과는 Table 4와 같다. SHER 모형의 표면유출율 모의값과 5개 물순환추정모델의 추정값 편차를 비교

pp. 393-402
 pp. 403-410
 pp. 411-423
 pp. 425-435
 pp. 437-443
 pp. 445-462
 pp. 463-471
 pp. 473-480
 pp. 481-493
 pp. 495-502
 pp. 503-512

Table 3. ANOVA(Analysis of Variance) results of each model for calculating surface runoff rates

Model ^{a)}		Sum of squares	DOF	Mean square	F ratio	Significance probability
Model 1	Regression	905378.443	2	986594.988	44982.080	.000 ^{b)}
	Residual	85692.971	2917	21.933		
	Total	991071.413	2919			
Model 2	Regression	906444.131	3	659123.103	32140.828	.000 ^{c)}
	Residual	84627.283	2916	20.507		
	Total	991071.413	2919			
Model 3	Regression	909207.578	4	494392.790	24181.437	.000 ^{d)}
	Residual	81863.836	2915	20.445		
	Total	991071.413	2919			
Model 4	Regression	918120.953	6	329833.289	16517.464	.000 ^{e)}
	Residual	72950.460	2913	19.969		
	Total	991071.413	2919			
Model 5	Regression	922404.468	7	282727.268	14175.829	.000 ^{f)}
	Residual	68666.945	2912	19.944		
	Total	991071.413	2919			

a) Dependent variable: Surface runoff rate

b) Predictor: (constant), annual precipitation, impervious surface ratio

c) Predictor: (constant), annual precipitation, impervious surface ratio, Surface slope

d) Predictor: (constant), annual precipitation, impervious surface ratio, Surface slope, contact line length

e) Predictor: (constant), annual precipitation, impervious surface ratio, Surface slope, contact line length, hydraulic gradient of groundwater, saturated permeability coefficient

f) Predictor: (constant), annual precipitation, impervious surface ratio, Surface slope, contact line length, hydraulic gradient of groundwater, saturated permeability coefficient, watershed area

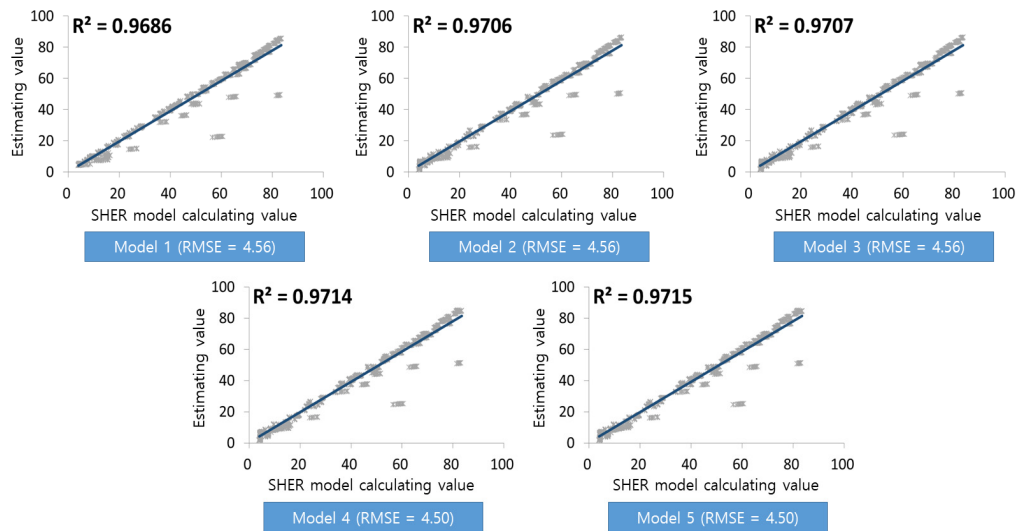


Fig. 3. Analysis result of errors between the SHER model and the estimation models of Surface runoff rate.

한 결과는 Fig. 3과 같다.

기존 SHER 모형 모의값과 물순환추정모델들 추정값 간의 상관관계를 검토한 결과, 5개 물순환추정모델들 모두 결정계수(R^2)가 0.9686에서 0.9715로 뚜렷한 상관성을 나타냈다. Model 1에서 Model 5까지 순서대

로 도시특성 요인들을 추가함에 따라서 RMSE(Root Mean Square Error)는 4.56%에서 4.50%까지 지속적으로 감소하였다. 특히 Model 3과 Model 4의 RMSE는 각각 4.56%, 4.50%으로서 상대적으로 크게 감소하는 것으로 나타났다. RMSE는 측정값과 회귀값의 편차를



Table 4. Results of multiple linear regression analysis for calculating surface runoff rates

Model	Model	Coefficient	t-statistic	Significance probability	95.0% confidence interval for coefficient	
					Lower limit	Upper limit
Model 1	Constant	-5.010	-2.118	0.034	-9.647	-0.372
	Impervious surface ratio	92.351	299.928	0.000	91.747	92.955
	Annual precipitation	0.004	2.662	0.008	0.001	0.008
Model 2	Constant	-3.192	-1.393	0.164	-7.683	1.299
	Impervious surface ratio	91.505	301.425	0.000	90.910	92.100
	Annual precipitation	0.004	2.753	0.006	0.001	0.008
Model 3	Surface slope	-27.084	-14.276	0.000	-30.804	-23.364
	Constant	-3.059	-1.337	0.181	-7.544	1.426
	Impervious surface ratio	91.409	300.025	0.000	90.811	92.006
	Annual precipitation	0.004	2.757	0.006	0.001	0.008
Model 4	Surface slope	-24.725	-12.135	0.000	-28.721	-20.730
	Contact line length	-3.545E-05	-3.142	0.002	0.000	0.000
	Constant	-1.870	-0.825	0.409	-6.313	2.574
	Impervious surface ratio	91.241	299.564	0.000	90.644	91.838
	Annual precipitation	0.004	2.790	0.005	0.001	0.008
	Surface slope	-20.077	-9.611	0.000	-24.173	-15.981
	Contact line length	-3.614E-05	-3.177	0.002	0.000	0.000
Model 5	Saturated permeability coefficient	-9548.999	-8.344	0.000	-11792.830	-7305.168
	Hydraulic gradient of groundwater	25.020	1.308	0.191	-12.497	62.537
	Constant	-1.876	-0.828	0.408	-6.317	2.565
	Impervious surface ratio	91.213	299.375	0.000	90.615	91.810
	Annual precipitation	0.004	2.792	0.005	0.001	0.008
	Surface slope	-19.437	-9.216	0.000	-23.573	-15.302
	Contact line length	-5.554E-05	-3.818	0.000	0.000	0.000
Model 5	Saturated permeability coefficient	-10350.578	-8.600	0.000	-12710.488	-7990.668
	Hydraulic gradient of groundwater	23.654	1.236	0.216	-13.860	61.169
	Watershed area	0.039	2.138	0.033	0.003	0.075

나타내는 지표로써 RMSE가 적다는 것은 기존 모형 결과와 유사하다는 것을 의미한다.

7개 도시특성 요인들을 모두 적용한 Model 5가 도시특성 요인 중 불투수면적율과 연강수량을 적용한 Model 1보다 RMSE가 0.06% 작은 것으로 나타났다. 표면유출율과 상관성이 낮은 도시특성 요인일지라도 모형의 정확도 개선에 기여할 수 있는 것으로 나타났다. 편차가 최소인 표면유출율 추정모형인 Model 5의 회귀식을 정리한 결과는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Index}_{\text{surf}}' &= \text{Constant} + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 & (4) \\
 &+ a_4 x_4 + a_5 x_5 + a_6 x_6 + a_7 x_7 \\
 &= -1.876 + 91.213 x_1 + 0.004 x_2 \\
 &- 19.437 x_3 - 5.554 \times 10^{-5} x_4 \\
 &- 10350.578 x_5 + 23.654 x_6 + 0.039 x_7
 \end{aligned}$$

여기서, $\text{Index}_{\text{surf}}'$: 물순환상태추정모형의 지표면유출율(%), a_i : 다중선형회귀분석 결과 계수값, x_i : 도시특성 요인, i : 도시특성 요인 구분(1: 불투수면적률, 2: 연평균강수량, 3: 지표면경사, 4: 하류블록 접선연장, 5: 포화투수계수, 6: 지하수동수경사, 7: 유역면적)

3.2.2 증발산율 추정모형

증발산율을 산정하는 5개 물순환상태추정모형의 유의확률은 모두 0.00으로써 95% 수준의 유의확률에서 귀무가설을 기각함으로써, 7개 도시특성 요인을 이용한 물순환상태추정모형은 유의할 수준의 증발산율을 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 증발산율을 추정하는 5개 모형의 분산분석 결과는 Table 5와 같다.

증발산율을 추정할 수 있는 물순환상태추정모형 도시특성 요인의 상수값 산정을 위한 다중선형회귀분석

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

결과는 Table 6과 같다. 또한 SHER 모형 증발산을 모의값과 물순환상태추정모델들 추정값의 편차를 비교한 결과는 Fig. 4에 나타냈다.

5개 물순환상태추정모델의 추정값 모두가 SHER 모형 모의값과 도시적으로 뚜렷한 상관관계를 보였으

며, 결정계수(R^2)도 0.9135에서 0.9307로 높았다. 비록, 물순환상태추정모델에서 고려하는 모델의 유효숫자로 인하여 Model 3의 RMSE가 5.57%로 일시적으로 증가하지만, 도시특성 요인을 점진적으로 추가한 Model 1에서 Model 5까지 물순환상태추정모델의

Table 5. ANOVA results of each model for calculating evapotranspiration rates

Model ^{a)}		Sum of squares	DOF	Mean square	F ratio	Significance probability
Model 1	Regression	905378.443	2	452689.221	15409.601	.000 ^{b)}
	Residual	85692.971	2917	29.377		
	Total	991071.413	2919			
Model 2	Regression	906444.131	3	302148.044	10411.107	.000 ^{c)}
	Residual	84627.283	2916	29.022		
	Total	991071.413	2919			
Model 3	Regression	909207.578	4	227301.894	8093.745	.000 ^{d)}
	Residual	81863.836	2915	28.084		
	Total	991071.413	2919			
Model 4	Regression	918120.953	6	153020.159	6110.280	.000 ^{e)}
	Residual	72950.460	2913	25.043		
	Total	991071.413	2919			
Model 5	Regression	922404.468	7	131772.067	5588.136	.000 ^{f)}
	Residual	68666.945	2912	23.581		
	Total	991071.413	2919			

a) Dependent variable: Surface runoff rate

b) Predictor: (constant), annual precipitation, impervious surface ratio

c) Predictor: (constant), annual precipitation, impervious surface ratio, Surface slope

d) Predictor: (constant), annual precipitation, impervious surface ratio, Surface slope, contact line length

e) Predictor: (constant), annual precipitation, impervious surface ratio, Surface slope, contact line length, hydraulic gradient of groundwater, saturated permeability coefficient

f) Predictor: (constant), annual precipitation, impervious surface ratio, Surface slope, contact line length, hydraulic gradient of groundwater, saturated permeability coefficient, watershed area

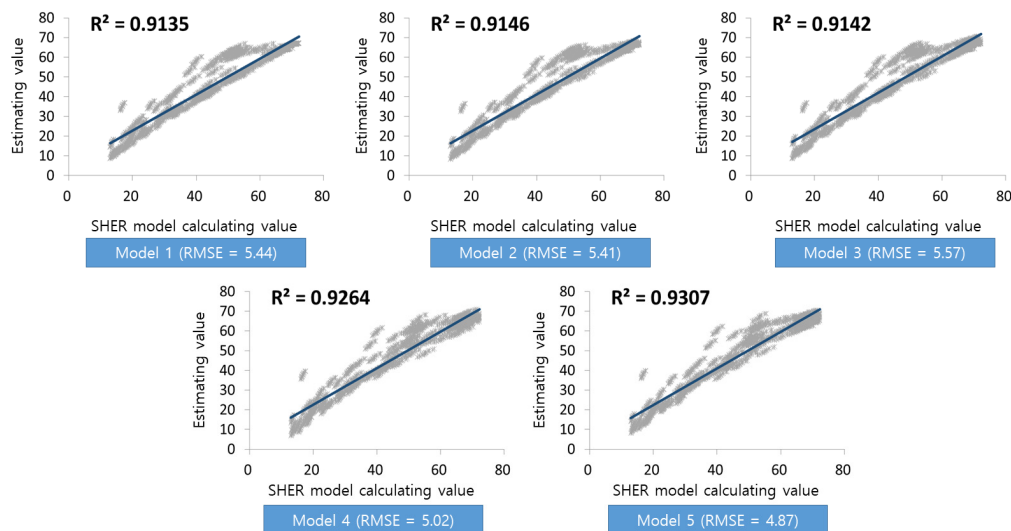


Fig. 4. Analysis result of errors between the SHER model and the estimation models of evapotranspiration rates.



Table 6. Results of multiple linear regression analysis for calculating evapotranspiration rates

Model	Model	Coefficient	t-statistic	Significance probability	95.0% confidence interval for coefficient	
					Lower limit	Upper limit
Model 1	(Constant)	102.043	37.281	0.000	96.677	107.410
	Impervious surface ratio	-62.395	-175.094	0.000	-63.094	-61.696
	Annual precipitation	-0.024	-12.695	0.000	-0.028	-0.021
Model 2	(Constant)	101.125	37.114	0.000	95.783	106.468
	Impervious surface ratio	-61.968	-171.591	0.000	-62.676	-61.260
	Annual precipitation	-0.024	-12.773	0.000	-0.028	-0.021
Model 3	Surface slope	13.676	6.060	0.000	9.251	18.102
	(Constant)	101.616	37.905	0.000	96.360	106.872
	Impervious surface ratio	-62.325	-174.544	0.000	-63.026	-61.625
	Annual precipitation	-0.024	-12.984	0.000	-0.028	-0.021
Model 4	Surface slope	22.403	9.381	0.000	17.720	27.085
	Contact line length	0.000	-9.920	0.000	0.000	0.000
	(Constant)	104.548	41.193	0.000	99.571	109.524
	Impervious surface ratio	-61.767	-181.087	0.000	-62.436	-61.098
	Annual precipitation	-0.024	-13.750	0.000	-0.028	-0.021
	Surface slope	26.560	11.354	0.000	21.973	31.148
Model 5	Contact line length	-9.055E-05	-7.108	0.000	0.000	0.000
	Saturated permeability coefficient	-8207.830	-6.405	0.000	-10720.632	-5695.028
	Hydraulic gradient of groundwater	-317.916	-14.837	0.000	-359.930	-275.901
	(Constant)	104.591	42.469	0.000	99.762	109.420
Model 5	Impervious surface ratio	-61.574	-185.861	0.000	-62.223	-60.924
	Annual precipitation	-0.024	-14.170	0.000	-0.028	-0.021
	Surface slope	22.176	9.670	0.000	17.679	26.672
	Contact line length	4.248E-05	2.685	0.007	0.000	0.000
	Saturated permeability coefficient	-2712.634	-2.073	0.038	-5278.677	-146.591
	Hydraulic gradient of groundwater	-308.557	-14.832	0.000	-349.349	-267.765
	Watershed area	-0.267	-13.478	0.000	-0.306	-0.228

RMSE는 5.44%에서 4.87%까지 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. RMSE가 최소인 증발산율 추정모델인 Model 5의 회귀식을 정리하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Index}_{\text{eva}}' &= \text{Constant} + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \\
 &+ a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_7x_7 \\
 &= 104.591 - 61.574x_1 - 0.024x_2 \\
 &+ 22.176x_3 + 4.248 \times 10^{-5}x_4 \\
 &- 2712.634x_5 - 308.557x_6 - 0.267x_7
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서, $\text{Index}_{\text{eva}}'$: 물순환상태추정모델의 증발산율(%), a_i : 다중선형회귀분석 결과 계수값, x_i : 도

시특성 요인, i : 도시특성 요인 구분(1: 불투수면적률, 2: 연평균강수량, 3: 지표면경사, 4: 하류블록 접선연장, 5: 포화투수계수, 6: 지하수동수경사, 7: 유역면적)

4. 결 론

본 연구에서는 도시유역의 물순환 상태를 간편하게 추정할 수 있는 물순환상태추정모델을 개발하기 위하여 다중선형회귀 분석을 이용하였다. 우리나라 대표적인 도시화 유역인 서울시를 73개 소유역으로 분할하고, 연강수량 및 불투수면적률 등의 도시특성 요인

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

을 적용한 최적의 물순환상태추정모델을 개발한 결과는 다음과 같다.

- 1) 도시특성 요인과 물순환 지표의 산점도를 검토한 결과, 물순환 지표인 표면유출율 및 증발산률과 도시특성 요인 중에서 불투수면적률은 높은 상관성을 가지고 있지만, 나머지 6개 도시특성요인인 지표면평균경사, 하류블록 선형 접선 연장, 포화투수계수, 유역면적, 지하수면 동수경사 및 연장수량과의 상관성은 낮은 것으로 나타났다.
- 2) 7개 도시특성 요인을 서로 다르게 조합한 5개 물순환상태추정모델을 분산분석한 결과, 5개 모델 모두 유의확률 95%로 유의한 물순환 상태지표를 추정할 수 있는 것으로 나타났다.
- 3) 표면유출율 산정을 위한 구축한 5개 물순환상태추정모델 추정값과 SHER 모형의 모의값의 상관성과 편차를 분석한 결과, 모델들의 결정계수는 0.9686에서 0.9715로서 상관성이 높았으며, 물순환모형인 SHER 모형의 모의값과의 편차는 RMSE 4.56%에서 4.50%로서 5% 이내에 불과한 것으로 나타났다.
- 4) 증발산율 산정을 위한 5개 물순환상태추정모델도 결정계수가 0.9135에서 0.9307로서 높은 상관성을 나타냈고, 편차도 RMSE 5.44%에서 4.87%에 불과하였다.
- 5) 표면유출율과 증발산율을 추정하는 각각 5개의 물순환상태추정모델 중에서 7개의 도시특성 요인을 모두 고려한 Model 5가 상관성은 가장 높고, RMSE는 가장 낮게 나타났고, 특히 표면유출율 추정결과의 RMSE는 유일하게 모두 5% 이내로 나타났다.

본 연구의 결과인 다중회귀분석 모델은 SHER 물순환 모형과 RMSE가 5% 이내로 나타나 높은 정확성을 가지고 있으며, 기존의 물순환 모형보다 간편하게 물순환 상태를 산정할 수 있다. 그러나, 향후 물순환 상태 모의값의 정확도를 높이기 위하여 다른 유사모델과 비교분석이 필요하고, 물순환 모형의 모의값과 회귀식 모델과의 편차가 큰 소유역의 편차 발생원인에 대한 추가 연구가 필요하다.

사 사

이 논문은 2019년 서울특별시 물순환 회복 기본계획 수립 용역(2019-AC-006, 2020-AC-004)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Chang, C.H., Kim, H.J., and Noh, S.J. (2004). "Application of SWAT model for Cheonggecheon watershed", *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, 1 May, 2004, Incheon, Korea, J. Korea Water Resour. Assoc., 1072-1076.
- Choi, S.P., Cho, J.H., and Kim, J.S. (2011). An filtering automatic technique of LiDAR data by multiple linear regression analysis, *J. Korean Soc. GIS.*, 19(4), 109-118.
- Choo, G.H., Lee, K.T., and Jeong, M.J.(2017). Analysis of Empirical Multiple Linear Regression Models for the Production of PM2.5 Concentrations, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 38(4), 283-292.
- Kim, H.J., Jang, C.H., and Noh, S.J. (2012). Development and application of the catchment hydrologic cycle assessment tool considering urbanization (I) - Model development -, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 45(2), 203-215.
- Kim, T.W., and Oh, J.S. (2015). Estimation of AADT using multiple linear regression in isolated area, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 35(4), 887-896.
- Lee, J.H. (2004). Accidents prediction model for unsignalized intersections reflecting the characters of upstream alignments, *Master's Thesis, University of Seoul, Seoul, Korea.*
- Lee, J.H., Lee, W.H., and Choi, H.S. (2018a). Morphometric characteristics and correlation analysis with rainfall-runoff in the Han River basin, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 38(2), 237-247.
- Lee, J.W., Kim, J.U., Jung, C.G., and Kim, S.J. (2018b). Forecasting monthly agricultural reservoir storage and estimation of reservoir drought index(RDI) using meteorological data based multiple linear regression analysis, *J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud.*, 21(3), 19-34
- Lee, S.J., Kim, Y.O., Lee, S.H., and Lee, K.S. (2005). Water cycle simulation for the Dorimcheon catchment using WEP model, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 38(6), 449-460.
- Potter, N.J., Zhang, L., Milly, P.C.D., McMahon, T.A., and Jakeman, A.J. (2005). Effects of rainfall seasonality and soil moisture capacity on mean annual water balance for Australian catchments, *Water Resour. Res.*, 41(6), W06007.
- Seoul. (2000). Seoul metropolitan biotop map.
- Seoul. (2003). Seoul water circulation basic plan, 61-76.
- Seoul. (2013). Rainwater management basic plan, 223-246.