

# 한강 유역의 형태학적 특성과 강우 유출의 상관분석

이지행\* · 이웅희\*\* · 최흥식\*\*\*

Lee, Ji Haeng\*, Lee, Woong Hee\*\*, Choi, Heung Sik\*\*\*

## Morphometric Characteristics and Correlation Analysis with Rainfall-runoff in the Han River Basin

### ABSTRACT

The basin characteristics reflect the attributes of geomorphological pattern of basin and stream networks affect the rainfall-runoff. In order to analyze the relationship between the basin runoff and stream morphometric characteristics, the morphometric characteristics were investigated for 27 water-level observation stations on 19 rivers in the Han River basin using Arc-map. The morphometric characteristics were divided into linear, areal and relief aspects for calculation while the annual mean runoff ratio as a basin response by rainfall was estimated using the measured precipitation and discharge to analyze the rainfall-runoff characteristics. The correlation among the morphometric parameters were schematized to analyze the correlations among them. The multiple regression equation for rainfall-runoff ratio was provided with morphometric parameters of stream length ratio, form factor ratio, shape factor, stream area ratio, and relief ratio and the coefficient of determination was 0.691. The RMSE and MAPE between the measured and the estimated annual runoff rates were found as 0.09, 11.61% respectively, the suggested regression equation showed good estimation.

**Key words** : Morphometric characteristics, Runoff ratio, Correlation, Multiple regression equation

### 초록

유역 특성은 유역과 하도망의 지형학적인 구성에 대한 특성을 반영하는 것으로 유출 특성에 영향을 준다. 본 연구에서는 유역의 형태학적 특성과 유출의 관계를 분석하기 위해 한강 유역의 19개 하천의 27개 지점을 대상으로 유역 형태학적 특성을 Arc-map을 이용하여 구하였다. 하천 형태학적 특성은 선형, 면적, 기복 측면으로 구분하여 산정하였고, 강우에 의한 유역의 반응인 연평균 유출률은 실측 강수량과 유출량 자료를 이용하여 산정하였다. 각각의 형태학적 매개변수에 대한 상관을 도식화하고, 상관특성을 분석하였다. 길이비, 형상계수, 형상인자, 면적비, 기복비, 함몰도에 의한 연간 유출률에 대한 다중 회귀분석식을 제시하였고, 결정계수는 0.691로 나타났다. 실측과 회귀분석식에 의해 계산된 연간 유출률과의 RMSE와 MAPE는 각각 0.09, 11.61%로 나타나 비교적 정확히 예측하였다.

**검색어** : 형태학적 특성, 유출률, 상관특성, 다중회귀분석식

## 1. 서론

일반적으로 유역의 특성을 나타내는 지리학적인 인자들은 유역면적, 유로연장, 유로경사 등 여러 가지가 있다. 그에 따른 유역의 특성을 나타내는 매개변수는 형상계수, 형상인자, 단일형상계수, 원형비, 세장률, 수계밀도, 수계빈도, 섬세비, 분기비, 길이비, 함몰도, 면적비이다. Stralher(1952)는 하천 유역의 구조를 하천차수를 이용하여 분기비, 길이비, 면적비, 함몰도 등 지형학적인 매개변수로 제시하였다. 유역

\* 정회원 · 상지대학교 토목공학과 박사과정 (Sangji University · easyh89@sangji.ac.kr)

\*\* 상지대학교 산학협력단 연구교수 (Sangji University · yuki68024@sangji.ac.kr)

\*\*\* 종신회원 · 교신저자 · 상지대학교 건설시스템공학과 교수 (Corresponding Author · Sangji University · hsikchoi@sangji.ac.kr)

Received December 13, 2017 / revised December 27, 2017 / accepted January 29, 2018

특성과 Horton의 법칙은 유역내 하천과 하도망의 지형학적인 구성에 대한 특성을 반영하는 것으로 유출 특성에 영향을 준다.

Hajam et al.(2013)은 지리 공간정보 기술을 사용하여 키슈미르 남동부 지역의 선형, 면적, 기복측면의 형태학적 특성을 분석하였다. Aher and Sharma(2014)는 토지와 수자원의 개발, 관리 및 활용을 위해서 유역의 형태학적 특성을 분석하였다. Tribhuvan and Sonar(2016)은 RS GIS (Remote Sensing Geographic Information System)기반의 형태학적 분석을 통해 얻은 Phulambri 지역의 유역특성을 분석하였다. Moges and Bhole(2015)는 Goro강의 선형 측면과 면적 측면에서 형태학적 매개변수의 정량적 분석을 기반으로 유역 특성을 분석하였다.

Kim and Choi(2005)는 시험유역에 대한 강우-유출해석을 위해 주요 호우사상을 결정하여 각 사상별 유출률을 산정하여 유역의 유출특성을 확인하였고, Choi et al.(2006)은 유역의 지형학적 매개변수를 얻어 유도된 지형학적 순간단위유량도에 의한 강우-유출의 특성을 분석하였다. Yang(2007)은 기후변화에 따른 수문요소의 변동을 파악하기 위해 섬진강댐과 소양강댐 유역의 물순환 과정에 미치는 영향을 분석 평가하고, 기후변화의 영향이 유역의 유출특성에 크게 영향을 미치고 있다고 단정하기 어렵다고 제시하였다. Song et al.(2010)은 형산강 유역에 위치한 저수지 고려유무에 따른 유출특성을 분석하고, 저수지를 고려한 유출률은 저수지 유역면적을 배제한 유출률에 비해 높은 유출특성을 보이는 것을 확인하였다. Kim et al.(2014)은 유역특성을 고려한 하천수량 확보를 위해 SSARR를 기반모형으로 선정하고, 금호강 유역에 적용하여 상류 지천들의 유출체계를 구성하여 최근의 홍수와 가뭄년을 포함하여 유출 특성을 분석하고, 금호강유역의 유출률을 제시하였다.

이전의 연구는 대상지역에 대한 유역 특성을 분석하거나, 유역

특성을 이용한 유출해석, 유출 특성을 분석하는 연구가 주류를 이루었으나, 유출과 유역의 특성을 나타내는 매개변수와의 상관을 분석한 연구는 부족한 실정이다.

연평균 유출과 유역의 형태학적 특성의 상관연구를 위한 대상지역은 한강 수계로 수위-유량관계식이 있는 수위관측소 지점으로 19개 하천의 27개 지점을 대상으로 하였다. 하천에서의 유출은 댐, 저수지, 하천수 취수, 지하수 양수 등으로 인해 교란되었기에 연평균 유량 자료의 활용보다는 교란의 영향이 작은 홍수기 유출만을 대상으로 유역의 형태학적 인자와 유출의 상관을 분석하면 좋은 상관은 물론 유출을 지배하는 형태학적 인자를 많이 사용하지 않아도 될 것으로 판단되나, 몬순지역에서의 강우특성에 따른 연평균 유출율과 유역의 형태학적 특성과의 상관분석을 시도하였다.

본 연구에서는 유역 형태학적 특성을 도출하여 각각의 형태학적 특성간의 상관분석을 수행하고, 지형학적 인자와 연평균 유출률에 대한 회귀식의 제시와 이의 사용성을 분석하였다.

## 2. 연구 대상 지역 및 방법

### 2.1 대상 지역

본 대상지역은 한강 유역으로 선정하였으며, 한강 유역은 4개의 유역, 25개 중권역, 47개 단위유역, 235개의 표준유역으로 구성되어 있다. 한강 유역의 유역면적은 34,428km<sup>2</sup>, 유로연장은 482km이다. Fig. 1은 한강 유역과 연구에서 사용된 지점의 위치를 나타낸다. 지점 명칭과 관측기간을 Table 1에 정리하였으며, 관측기간은 결측을 다소 포함하고 있어 결측기간을 제외하고 10년간의 자료를 이용하였다.

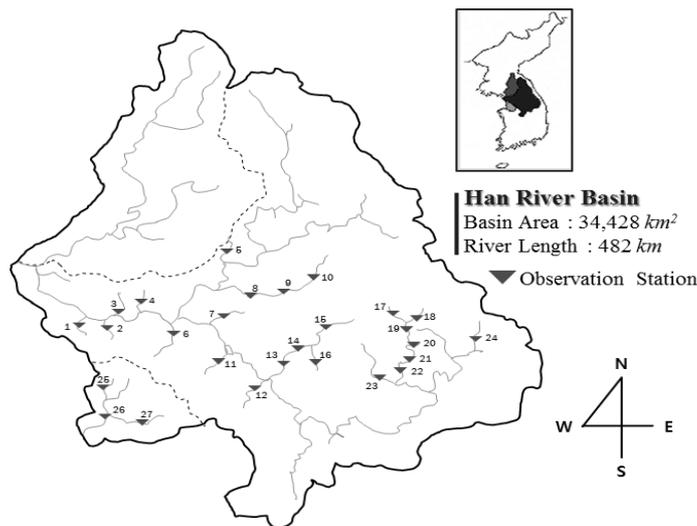


Fig. 1. Selected Observation Stations in the Han River Basin

Table 1. Observation Stations

Station	Name	Duration of observation (year)	Station	Name	Duration of observation (year)
1	Anyang	2004~2013 (10)	15	Hoengseong	2002~2013 (10)
2	Seongnam	2004~2013 (10)	16	Wonju	2004~2013 (10)
3	Jungrang	2004~2013 (10)	17	Baekokpo	2000~2013 (10)
4	Toegyewon	2004~2013 (10)	18	Imokjeong	1995~2005 (10)
5	Gapyeong	2004~2013 (10)	19	Jangpyeong	1995~2005 (10)
6	Gyeongang	2004~2013 (10)	20	Sanganmi	2002~2013 (10)
7	Heukchun	2004~2013 (10)	21	Bangrim	2003~2013 (10)
8	Seomyeon	2002~2013 (10)	22	Pyeongchang	2004~2013 (10)
9	Hongcheon	2004~2013 (10)	23	Jucheon	2004~2013 (10)
10	Hwachon	2001~2013 (10)	24	Imgye	2003~2013 (10)
11	Bokha	2004~2013 (10)	25	Songsan	2003~2012 (10)
12	Cheongmi	2004~2013 (10)	26	Pyeongtaek	2004~2013 (10)
13	Munmak	2004~2013 (10)	27	Anseong	2004~2013 (10)
14	Ganhyeon	2004~2013 (10)			

## 2.2 연구방법

유역 형태학적 특성 분석을 위해, 한강 유역 19개 하천의 27개 지점에 대해서 하천 자료를 수집하였다. 우선, Arc-map을 이용하여 각 지점의 지리학적 인자를 도출하여, 특성 인자를 통해서 형태학적 특성을 선형, 면적, 기복 측면에 대해서 산정하였다.

Arc-map은 격자형 고도자료인 수치표고모델(Digital Elevation Model)을 통해 수자원에서 필요로 하는 유로연장, 유역경사 등의 지리학적 인자와 하천망을 분석해 주는 기능이 있다(You et al., 2012). 지리학적 인자를 도출하기 위해 사용된 DEM 자료의 공간 해상도는 30m×30m이고, 좌표계는 중부원점을 사용하고 있다. 수집된 하천자료는 유역면적, 유로연장, 하천경사, 주하천 길이,

유역둘레, 최대표고, 지점표고 등 유역의 형태학적 특성을 산정하기 위한 자료를 수집하였다.

형태학적 분석은 선형, 면적과 기복 측면으로 구분하였으며, 선형 측면은 분기율, 하천 길이비, 유로연장, 섬세비를 산정하였고, 면적 측면에서는 유역면적, 수계밀도, 수계빈도, 원형비, 세장률, 형상계수, 단일형상계수, 형상인자, 면적비를 산정하였다. 그리고 기복 측면에서는 기복비와 함몰도를 산정하였다.

유출 특성으로 유출률은 Thiessen 다각형법에 의해서 평균강우량 산정을 하고, 대상 지점 실측 유출량을 이용하여 산정하였다. 산정된 유역 형태학적 특성간의 상관분석을 수행하고, 유출률과의 회귀분석을 통해 회귀식을 도출하였다(Fig. 2).

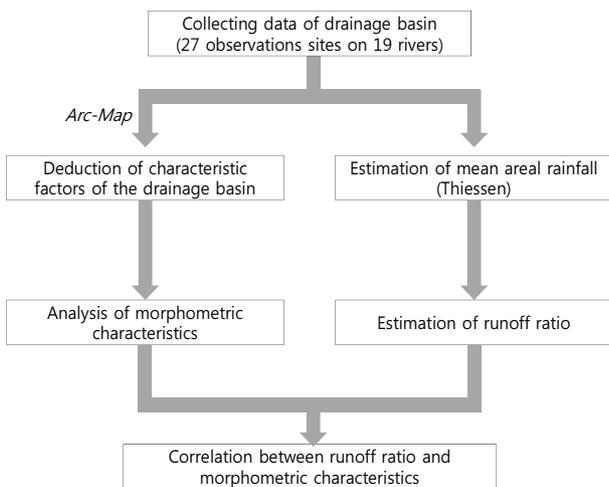


Fig. 2. Methodology

## 3. 유역 특성 분석

### 3.1 유역의 형태학적 특성

형태학적 특성분석은 유역의 형태뿐만 아니라 지리적 정보를 나타내고, 이는 유역의 특성을 결정짓는 중요한 요소로 수계에 대한 정량적인 정보를 제공한다. 정량적인 형태학적 분석은 배수 형태(drainage pattern)를 지배하고 다양한 형태의 유출로 나타난다. 형태학적 특성은 1. 배수망의 선형측면(유로장, L), 2. 유역의 면적측면(유역면적, A), 3. 수로망과 경사의 기복측면(유역 고저차/유역기복, H)으로 구분할 수 있다. 다양한 형태학적 특성은 Table 2에 제시된 방법을 사용하여 결정한다.

유역의 선형 측면은 유역내 하도망의 수로 발달 형태와 밀접하게 관련되어 있다. 분기율은 유역의 지류 발달이 이루어진 상태를 의미하며, 분기율이 클수록 지류가 많음을 의미한다. 산정 결과

Table 2. Morphometric Parameters (Hajam et al., 2013)

No.	Parameters	Symbol	Formula
1	Linear aspects		
1.1	Bifurcation ratio	$R_b$	$R_b = N_w / N_{w+1}$ Where, $N_w$ = No. of stream segments of a given order $N_{w+1}$ = No. of stream segments of next higher order
1.2	Stream length ratio	$R_l$	$R_l = L_w / L_{w-1}$ Where, $L_w$ = Mean stream length of a given order $L_{w-1}$ = Mean stream length of next lower order
1.3	Stream length	$L$	Length of the stream
1.4	Finess ratio	$R_f$	$R_f = L / L_p$ Where, $L_p$ = Outer boundary of drainage basin measured in kilometers
2	Areal aspects		
2.1	Basin area	$A$	Area of the basin
2.2	Drainage density	$D$	$D = \sum L / A$ Where, $\sum L$ = Total no. of stream of all orders $A$ = area of the basin
2.3	Drainage frequency	$C_f$	$C_f = \sum N / A$ Where, $\sum N$ = Total number of stream segments of order
2.4	Circularity ratio	$R_c$	$R_c = 4\pi A / L_p^2$
2.5	Elongation ratio	$R_e$	$R_e = \sqrt{4A/\pi} / L$
2.6	Form factor ratio	$R_f$	$R_f = A / L^2$
2.7	Unity shape factor	$R_u$	$R_u = L / \sqrt{A}$
2.8	Shape factor	$R_{sf}$	$R_{sf} = L_c / \sqrt{4A_w/\pi}$
2.9	Stream area ratio	$R_a$	$R_a = A_w / A_{w-1}$ Where, $A_w$ = Mean stream area of a given order $A_{w-1}$ = Mean stream area of next lower order
3	Relief aspects		
3.1	Relief ratio	$R_h$	$R_h = H / L$ Where, $H$ = basin relief
3.2	Stream concavity	$R_s$	$R_s = S_w / S_{w+1}$ Where, $S_w$ = Mean stream slope of a given order $S_{w+1}$ = Mean stream slope of next higher order

한강 유역내의 분기율은 2.30에서 6.89로 나타났으며, 임계 지점과 주천 지점에서 최소, 최대의 값을 보였다. 하천 길이비는 유역내 지류하천의 크기 정도를 나타내며, 산정된 길이비는 1.78에서 12.32로 나타났으며, 임계 지점에서 최소, 이목정 지점에서 최대 값을 보였다. 길이비가 크게 나타나는 이목정 지점은 높은 차수 하천의 평균 길이가 크게 나타나는 것을 의미하는데, 이는 유역면적에 비해 하천수가 적어서 나타나는 것으로 판단된다. 섬세비는 유역 둘레 길이에 대한 수로 길이의 비로, 유역내 하천망의 거칠고 섬세한 정도의 척도로 사용된다. 한강 유역의 섬세비는 0.20에서 1.74의 범위를 보였다(Table 3).

면적 측면에서는 형태학적 매개변수는 면적과 관련된 것으로 유역면적은 수문곡선의 형태, 최대 및 평균 크기에 직접적으로 영향을 미친다(Hajam et al., 2013). 수계밀도는 유역 내 모든 차수의 수로 총길이와 유역면적의 비이다. 단위면적당 하천길이를 의미하며 유역 내 지류의 많고 적음을 나타내는 지수로, 한강 유역에서는 0.37에서 1.39로 나타났으며 그 값이 크게 나타나는 횡성 지점을 제외하면 대부분의 수계밀도는 0.37에서 0.88사이에 값을 보였다. 수계빈도는 단위면적당 하천의 수를 나타내며, 강우가 하천으로 모이는 정도를 나타내는 지표이다. 한강 유역에서는 수계 빈도의 범위가 0.09에서 0.27로 나타났다. 원형비는 유역 둘레와

동일한 원주의 면적에 대한 유역면적의 비이다. 한강 유역의 원형비는 1.29에서 12.11의 범위를 보였다. 세장률은 유역면적과 같은 면적을 갖는 원의 직경과 유로연장의 비로, 유역의 형상이 원에 가까울수록 값이 1.0에 가까워지며 한강 유역의 세장률은 0.36에서 1.11로 나타났다. 형상계수는 Horton에 의해 정의된 유역 길이의 제곱에 대한 유역면적의 비로, 유역의 형상에 대해 나타내는 지표이다. 값이 작을수록 가늘고 긴 모양을 나타내며, 한강 유역의 형상계수의 범위는 0.01에서 2.73으로 나타났다. 단일형상계수는 유역면적의 제곱근에 대한 유로연장의 비이다. 한강 유역의 단일형상계수는 1.02에서 3.12로 나타났다. 형상인자는 유역과 동일한 면적을 갖는 원의 직경에 대한 주하천 길이의 비이다. 한강 유역의 형상인자는 0.10에서 0.96으로 나타났다. 면적비는 차수간의 평균 면적의

비로, 하천 지류의 면적의 크기정도를 나타낸다. 한강 유역의 면적비는 2.57에서 12.30으로 나타났으며, 면적비가 높게 나타나는 지점은 높은 차수의 하천 평균면적이 크게 나타나는 지점으로 이는 유역면적에 비해 하천수가 적어서 나타나는 것으로 판단된다 (Table 3).

유역의 기복 측면은 다양한 지질학적 특성을 분석하기 위해 지형의 수직 차원의 면적, 부피 및 고도와 관련된 3차원 특성 연구와 상당히 관련되어 있다. 기복비는 유역출구와 유역 내 가장 높은 곳과의 표고차를 의미하는 유역기복과 유로연장의 비이다. 한강 유역의 기복비는 5.31에서 71.57로 나타났다. 하천 함몰도는 차수간의 평균 경사의 비로, 한강 유역의 함몰도는 0.92에서 1.41의 값을 보였다(Table 3).

Table 3. Morphometric Parameters of the Han River Basin

Classification	$R_b$	$R_l$	$L$ (km)	$R_i$	$A$ ( $km^2$ )	$D$	$C_f$	$R_c$	$R_e$	$R_f$	$R_u$	$R_{s_f}$	$R_a$	$R_h$	$R_s$
1. Anyang	3.75	2.47	12.90	0.20	110.66	0.61	0.17	8.36	0.92	0.66	1.23	1.54	4.24	46.45	1.14
2. Seongnam	5.38	3.22	24.60	0.37	202.20	0.69	0.15	4.20	0.65	0.33	1.73	1.23	6.31	24.32	1.08
3. Jungrang	5.00	4.02	26.50	0.44	208.30	0.54	0.15	3.73	0.61	0.30	1.84	1.49	6.06	29.34	1.14
4. Toegyewon	3.83	2.45	30.00	0.53	202.20	0.44	0.09	2.82	0.53	0.22	2.11	1.31	4.55	20.12	1.02
5. Gapyeong	2.83	2.32	38.10	0.48	305.12	0.66	0.10	2.64	0.52	0.21	2.18	1.22	3.33	37.10	1.37
6. Gyeongan	5.43	3.67	36.30	0.78	256.91	0.54	0.14	2.45	0.50	0.19	2.26	1.01	6.19	14.01	1.12
7. Heukchun	3.21	2.85	36.40	0.63	307.82	0.65	0.13	2.92	0.54	0.23	2.07	1.81	3.89	30.84	1.29
8. Seomyeon	5.12	3.67	110.00	1.74	1325.36	0.55	0.11	1.38	0.37	0.11	3.02	1.37	5.90	5.31	1.36
9. Hongcheon	4.32	3.35	78.50	1.52	879.14	0.55	0.12	1.79	0.43	0.14	2.65	0.84	5.07	10.08	1.36
10. Hwachon	3.70	3.02	23.30	0.42	523.20	0.59	0.13	12.11	1.11	0.96	1.02	0.81	4.34	38.32	1.34
11. Bokha	4.63	3.93	25.20	0.52	165.44	0.49	0.16	3.27	0.58	0.26	1.96	0.79	5.63	23.17	0.92
12. Cheongmi	3.86	2.69	44.70	0.71	525.60	0.64	0.14	3.31	0.58	0.26	1.95	1.25	4.37	12.37	1.16
13. Munmak	3.43	2.65	89.60	1.08	1347.96	0.63	0.11	2.11	0.46	0.17	2.44	1.82	3.97	10.17	1.18
14. Ganhyeon	3.23	2.56	81.70	0.96	1190.27	0.63	0.11	2.24	0.48	0.18	2.37	1.49	3.75	8.92	1.20
15. Hoengseong	3.41	3.06	42.40	0.69	209.00	1.39	0.24	1.46	0.38	0.12	2.93	2.44	4.07	14.25	1.13
16. Wonju	2.70	2.25	15.00	0.21	96.06	0.88	0.27	5.37	0.74	0.43	1.53	1.10	3.11	71.57	1.10
17. Baekokpo	3.63	2.93	24.60	0.28	143.93	0.51	0.13	2.99	0.55	0.24	2.05	0.02	4.41	43.45	1.10
18. Imokjeong	6.00	12.32	21.00	0.24	56.33	0.37	0.12	1.61	0.40	0.13	2.80	0.04	12.30	46.86	1.26
19. Jangpyeong	3.50	5.68	26.90	0.31	104.76	0.57	0.12	1.82	0.43	0.14	2.63	0.03	5.51	38.96	1.31
20. Sangammi	3.46	3.07	47.90	0.82	392.93	0.58	0.12	2.15	0.47	0.17	2.42	0.98	4.21	18.21	1.26
21. Bangrim	3.43	2.90	57.00	1.34	527.12	0.53	0.10	2.04	0.45	0.16	2.48	1.85	4.15	17.04	1.33
22. Pyeongchang	3.62	3.12	79.00	0.87	695.67	0.48	0.09	1.40	0.38	0.11	3.00	1.76	4.32	12.23	1.32
23. Jucheon	6.89	5.24	72.00	1.32	533.23	0.51	0.10	1.29	0.36	0.10	3.12	2.73	8.33	8.64	1.41
24. Imgye	2.30	1.78	17.90	0.26	157.39	0.73	0.13	6.17	0.79	0.49	1.43	0.01	2.57	47.59	1.10
25. Songsan	2.98	2.43	28.90	0.44	237.61	0.84	0.14	3.58	0.60	0.28	1.87	0.98	3.44	8.05	1.11
26. Anseong	3.51	2.68	48.40	0.93	585.90	0.59	0.10	3.14	0.56	0.25	2.00	0.25	4.10	4.75	1.05
27. Pyeongtaek	3.00	2.18	28.90	0.39	107.49	0.56	0.12	1.62	0.40	0.13	2.79	0.69	3.47	18.08	1.17

### 3.2 유출 특성

유출률은 강우량에 대한 유역 출구에서 직접 유출량으로, 해당 지점에서 산정된 유출량을 유역출구를 기준으로 한 유역의 총 강수량으로 나뉘 유출 특성을 파악하는 지표로 사용된다.

$$R_r = \frac{Q}{P} \quad (1)$$

여기서,  $R_r$ 은 연 유출률,  $Q$ 는 연 유출량( $m^3$ ),  $P$ 는 연간 강수량( $m^3$ )이다.

연간 유출률을 산정하기 위해서는 우선적으로 수위관측소별 유역 평균강수량 및 유역면적 자료를 확보해야 한다. 유역 평균 강수량은 기상청 자료를 사용하여 Thiessen 다각형법을 통해 산정하였으며, 유역면적과 유출량은 수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 대상 지점의 유역면적 정보를 이용하였고, 유출량은 실측 수위와 수위-유량 관계식을 이용하여 산정하였다.

대상 유역의 유출률의 범위는 Fig. 3에서와 같이 0.29~6.20으로 나타났으며, 성남, 황성, 송산, 안성, 평택 지점에서 각각 1.49, 1.61, 0.91, 6.20, 2.04로 높은 유출률을 보이고 있다. 이는 대상 지점 상류에 위치한 댐과 저수지 등의 유무에 따라 유출률에 영향을 미치는 것으로 보이며, 유출률이 높게 나타나는 지점 상류에는 댐과 많은 수의 저수지가 있는 것으로 확인되었다(Table 4).

유출률이 상이하게 나타나는 5개 지점을 제외하면 한강 유역 대상 지점 유출률의 범위는 0.29~0.86으로 나타났다.

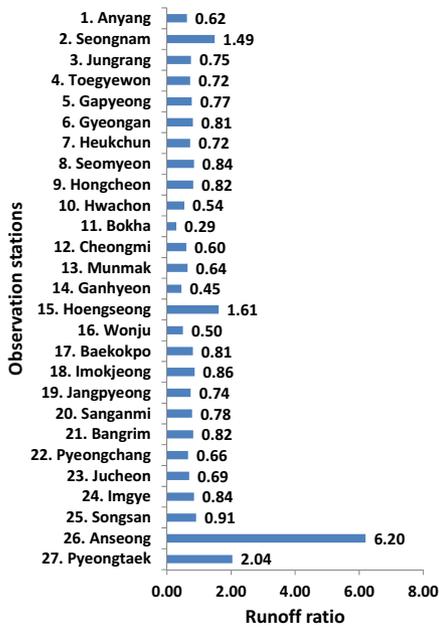


Fig. 3. Runoff Ratio at Observation Stations

## 4. 결과

### 4.1 유역의 형태학적 특성간의 상관분석

선형, 면적과 기복 측면의 15가지 유역 형태학적 특성간의 상관 관계에 대해서 분석을 수행하였으며, 각 특성간의 관계를 도식화하였다(Fig. 4).

유역의 형태학적 특성을 나타내는 변수들은 대부분의 경우 낮은 상관관계를 보이고 있으나, 일부는 높은 관계를 보이는 것을 확인하였다.

분기율의 관계에서는 길이비와 면적비가 분기율이 증가함에 따라 함께 증가하는 양의 선형 관계를 보였고, 길이비와 면적비에서 상이하게 높게 나타나는 지점은 높은 차수의 하천 평균 길이와 평균 면적이 크게 나타나는 지점으로 이는 유역면적에 비해 하천수

Table 4. Presence or Absence of Dam/Reservoir at the Upstream of Observation Stations

Observation stations	Upstream dam/reservoir
1. Anyang	o
2. Seongnam	o
3. Jungnam	o
4. Toegyewon	o
5. Gapyeong	x
6. Gyeongan	o
7. Heukchun	x
8. Seomyeon	o
9. Hongcheon	o
10. Hwachon	o
11. Bokha	x
12. Cheongmi	o
13. Munmak	o
14. Ganhyeon	o
15. Hoengseong	o
16. Wonju	x
17. Baekokpo	x
18. Imokjeong	x
19. Jangpyeong	x
20. Sanganmi	x
21. Bangrim	o
22. Pyeongchang	o
23. Jucheon	x
24. Imgye	x
25. Songsan	o
26. Anseong	o
27. Pyeongtaek	o

가 적게 나타나 큰 값을 갖는 것으로 판단된다. 분기율과 수계밀도는 분기율이 증가함에 따라 수계밀도가 감소하는 경향을 보이며 비선형의 관계를 가졌다.

길이비와의 관계에서는 면적비와 분기율이 증가함에 따라 함께

증가하는 뚜렷한 양의 선형 관계를 보였다. 이는 두 가지 특성 모두 지류 하천의 수와 크기를 의미하는 것으로 지류 하천의 수가 증가함에 따라 하천의 크기가 증가하는 것으로 현실적으로 타당한 관계를 보여준다. 길이비가 증가함에 따라 단일형상계수가 증가하

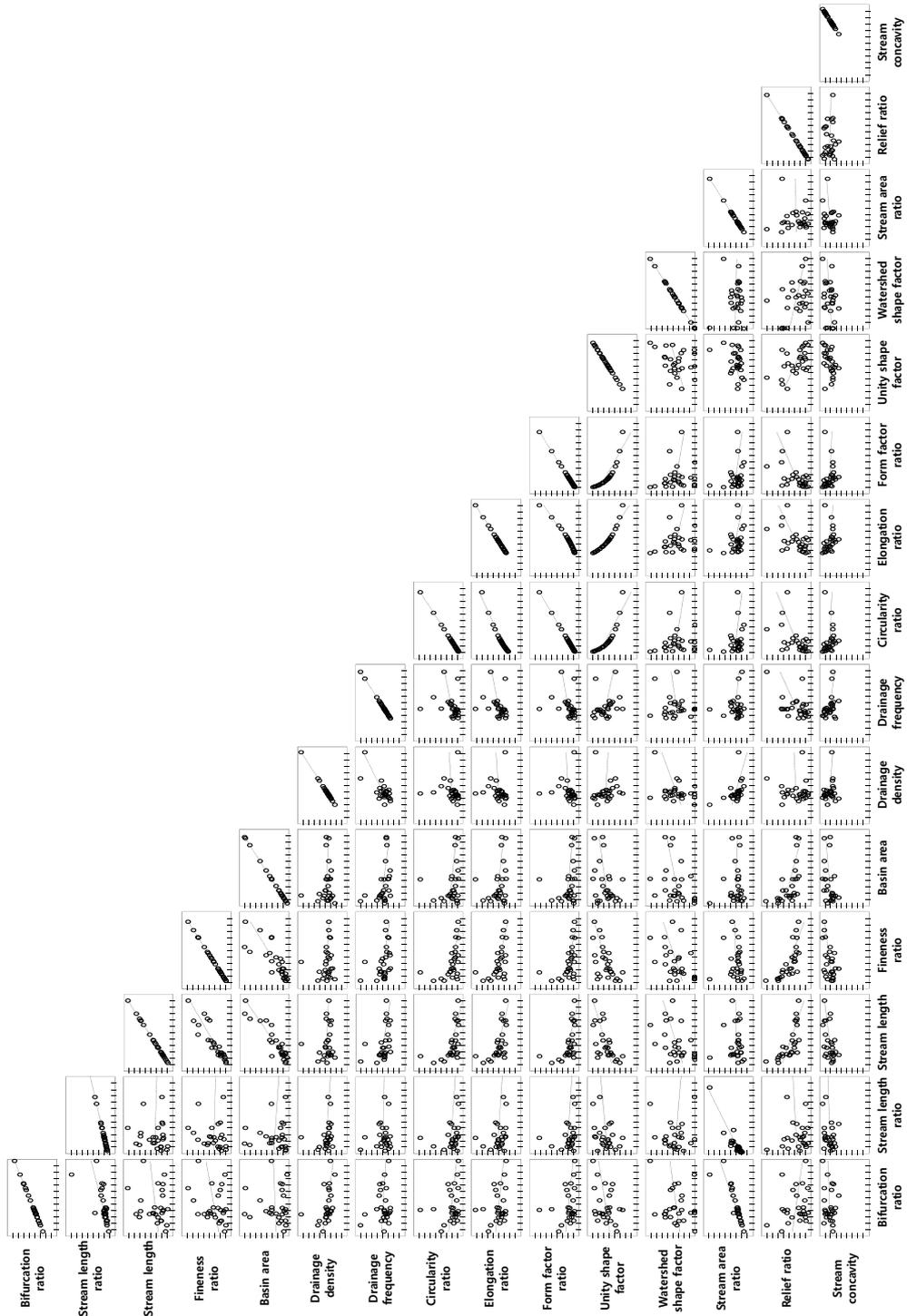


Fig. 4. Scatter Plot Matrix Among Morphometric Parameters

는 양상을 보였으나, 그 상관관계는 높지 않았다. 수계밀도, 원형비는 길이비가 증가함에 따라 감소하는 양상을 보였으며, 선형적으로 감소하기 보다는 비선형의 관계를 보였다.

유로연장은 섬세비, 유역면적, 단일형상계수와 양의 선형 관계를 보였으며, 그 관계가 높게 나타났다. 이는 세 가지 특성의 계산 과정에서 유로연장이 커짐에 따라서 계산되는 값이 크게 나타나기 때문이다. 반대로 기복비와 관계에서는 음의 선형 관계를 보였다. 유로연장과 수계빈도, 원형비, 세장률, 형상계수는 음의 관계를 보였으며, 그 관계가 비선형을 보였다.

섬세비는 유역면적과 형상계수의 관계에서 양의 선형 관계를 보였고, 기복비와는 음의 선형 관계를 보였다. 또한, 수계빈도, 원형비, 세장률, 형상계수와는 음의 비선형 관계를 보이며, 유로연장과 같은 관계를 보이고 있다. 이는 세장률과 유로연장의 상관관계가 높기 때문에 나타나는 것으로 판단된다.

유역면적은 기복비와 높은 음의 선형 관계를 보였으며, 이는 기복비가 유로연장과 상관관계가 크게 나타나기 때문에 유역면적과 기복비의 관계에서도 같은 양상을 보인다. 유역면적과 수계빈도, 수계밀도, 원형비, 세장률, 형상계수는 음의 비선형 관계를 보였다.

면적비는 수계밀도가 증가함에 따라 감소하는 음의 선형 관계를 보였으며, 그 외에 관계에서는 뚜렷한 상관을 보이지 않았다. 또한 수계빈도와와의 관계에서도 비슷한 양상을 보였다.

원형비는 세장률, 형상계수와 양의 선형 관계를 보였으며, 이는 세장률과 형상계수 모두 유역면적, 유로연장과의 상관관계가 높게 나타남에 따라 원형비와의 관계에서 그 상관이 높게 나타나는 것으로 판단된다. 단일형상계수는 앞의 두 가지 특성과는 반대로 유역면적과 유로연장의 관계가 역의 관계를 가짐에 따라 원형비와 음의 선형 관계를 보인다. 또한, 세장률과 형상계수의 관계에서도 원형비와 동일한 양상을 보였다.

#### 4.2 유출률과의 다중회귀분석

다중회귀분석은 유출률 값이 상이하게 나타나는 5개 지점을 제외하고, 22개 지점의 자료를 이용하여 분석을 수행하였다. 유출 특성과 유역 형태학적 특성을 Eq. (2)과 같이 나타내었고, 유출 특성과 유역 형태학적 특성에 대수를 취하여 Eq. (3)과 같이 회귀분석을 수행하였다.

$$R_r = f(R_b, R_l, R_i, D, C_f, R_c, R_e, R_f, R_u, R_{sf}, R_a, R_h, R_s) \quad (2)$$

$$Y_1 = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}) \quad (3)$$

회귀모형의 독립변수 선정은 모든 독립변수들을 포함하는 회귀모형을 만든 후 기여도가 가장 적은 변수부터 차례로 제거시키 나가는 후진 제거법을 사용하여 수행되었다. 이에 따라 유출률을 예측하기 위한 다중회귀분석에 들어가는 변수로는 길이비, 형상계수, 형상인자, 면적비, 기복비, 함몰도가 선택되었다. 통계 소프트웨어인 IBM SPSS 22v.을 사용하여 도출된 회귀식은 아래와 같다.

$$R_r = e^{-2.627} R_l^{-1.544} R_f^{-0.291} R_{sf}^{-0.093} R_a^{1.604} R_h^{0.239} R_s^{1.829} \quad (4)$$

도출된 회귀모형에 따른 예측 유출량은 실제 측정값과 0.69의 결정계수를 보여주었고, Fig. 5에서 점선구간은 실측값의 평균값에 대한 95% 신뢰구간을 의미하며 실선구간은 모형 예측값에 대한 95% 예측구간을 나타낸다. 또한 예측모델의 정밀도를 보다 객관적으로 평가하기 위해 실제 유출률과 예측한 값의 차이를 다룰 때 흔히 사용되는 RMSE (root mean square error)와 MAPE (mean absolute percentage error)를 도출하였다. 실측값과 예측된 값 사이의 RMSE는 약 0.09로 5% 이하의 낮은 오차로 확인되었고, MAPE는 약 11.61%로 모형이 매우 정확한 예측을 하는 것으로 확인하였다.

회귀식의 유효성을 판단하기 위한 지표로서 결정계수가 있다. 결정계수는  $R^2$ 으로 표기하며 1에 가까울수록 우수한 회귀식임을 의미하나, 독립변수의 수가 증가될수록 값이 커지는 경향이 있어, 아래와 같은 Eq. (6)으로 인해 계산되는 수정된  $R^2$ 값을 활용하여 회귀식의 유효성을 판단한다. 모의 값의 적절성을 나타내는 지표로 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)가 있으며, NSE는 관측치와 모델의 관계를 이용하여 모델의 효율성을 평가하는 기법으로 모의 결과가 우수할수록 1에 가까운 값을 나타내며, Eq. (7)에 의해서 계산된다(Nash and Sutcliffe, 1970).

$$R^2 = \frac{SSR}{TSS} = 1 - \frac{SSE}{TSS} \quad (5)$$

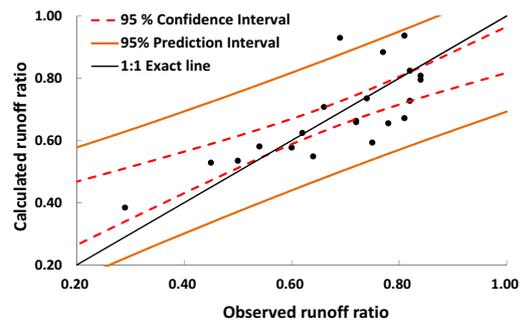


Fig. 5. Relation between Observed and Calculated Runoff Ratios

$$\text{Adjusted } R^2 = 1 - \frac{n-1}{n-p-1} (1-R^2) \quad (6)$$

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (7)$$

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (8)$$

여기서, *TSS*는 총 제곱합, *SSR*은 회귀 제곱합, *SSE*는 오차제곱합, *n*은 표본의 개수, *p*는 설명변수의 개수, *O*는 관측 값, *P*는 예측 값,  $\bar{O}$ 는 관측 값의 평균값, *d*는 Durbin-Watson 통계량, *e<sub>t</sub>*는 시간 *t*에서의 오차이다.

회귀식의 유효성을 판단하기 위한 지표인 수정된 *R*<sup>2</sup>값은 0.567으로 계산되었다. 이것은 종속변수가 갖는 정보 중 57%를 독립변수의 변동으로 설명할 수 있다는 것을 의미한다(Noh, 2005). 모의 값의 적절성을 나타내는 Nash-Sutcliffe 효율성 지수 *NSE*는 0.561로 나타났다. 추정치의 표준오차(standard error of the estimate)는 실측치가 회귀식에서 얼마나 떨어져 있는지를 나타내는 지표로써 0.170로 계산되었으며, 값이 작으면 회귀모형의 적합도가 양호하고 선형 모형은 예측모형으로 사용될 수 있다. 회귀분석의 기본 가정 사항 중 잔차의 독립성이 있다. 잔차가 다른 잔차에 영향을 미치게 되는 경우를 자기 상관이라고 하는데 자기 상관이 높으며 분석의 신뢰성을 잃게 된다. 잔차의 독립성은 Durbin-Watson 값으로 판단하게 되는데 0에 가까울수록 양의 자기상관, 4에 가까울수록 음의 자기상관이 있다고 판단하며, 2에 가까울수록 자기 상관이 없다고 판단한다(Eq. (8)). 계산결과 2.773로 나타나 잔차의 독립성이 충족된 것으로 판단된다(Table 5).

Table 5. Multiple Regression Analysis Results

<i>R</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	Adjusted <i>R</i> <sup>2</sup>	Std. Error of the estimate	Durbin-Watson
0.831	0.691	0.567	0.170	2.773

Table 6. Result in the Analysis of Variance

Model	Sum of square	df	Mean square	F	Slg.
Regression	0.970	6	0.162	5.588	0.003
Residual	0.434	15	0.029		
Total	1.406	21			

### 4.3 회귀모형식의 유의성 검정

한강 유역의 유출률 값이 상이하게 나타나는 5개 지점을 제외하고, 22개 지점을 대상으로 유출률 예측을 위해 개발된 회귀모형의 유의성을 분산분석을 활용하여 검정한 결과, Table 6과 같은 결과를 도출하였다. 자유도(df, degree of freedom)은 알 수 없는 모집단 모수의 값을 추정하고 이러한 추정치의 변동성을 계산하는 데 “사용” 할 수 있는 데이터가 제공하는 정보 양이다. 이 값은 표본의 관측치 수와 모형의 모수 수에 따라 결정된다. *F*값은 독립변수가 종속변수 예측에 도움이 되는지 판단하는 값으로, Table 6에서 *F*값이 5.588이고 이에 대응하는 유의확률(Significance probability)이 0.003로 유의수준 0.05보다 작으므로 독립변수들 중 적어도 하나 이상의 변수는 종속변수를 설명하는데 유의하게 기여함을 나타낸다.

### 4.4 독립변수들의 다중공선성 검토

회귀식이 개발된 후에는 회귀모형의 유의성을 검정하고 다중공선성(multi-co-linearity)을 분산팽창인자(variance inflation factor, VIF)를 사용하여 확인하였다. 변수들간에 다중공선성이 존재하는 경우, 다른 독립변수들의 결합으로 영향을 받는 독립변수가 회귀모형 내에서 독자적인 정보를 제공하지 못하게 되므로 *R*<sup>2</sup>의 값은 큰 반면에 대부분의 회귀계수들이 유의하지 않은 경우가 발생하게 된다. 다중공선성은 독립변수들 사이의 선형종속(linear dependency)의 관계로 정의되며, 실질적으로 어느 독립변수가 다른 독립변수들로부터 밀접한 상관관계를 가지고 있는 상태를 말한다. 따라서 VIF의 유무를 확인하는 것이 바람직하며, VIF값이 10 이상이면 다중공선성이 존재한다고 판단하여 독립변수로 사용하지 않는다(Ham, 2007).

그러나 Na et al.(2012)는 VIF 값이 유의수준을 다소 벗어나도 (VIF>10), 변수 제거 과정에서 수정된 *R*<sup>2</sup>가 크게 낮아지는 모형의 경우는 해당 변수를 채택하였다. 이 방법은 모형의 설명력을 최대한 확보하기 위하여 예측모형의 개발과정에서 주로 사용되는 방법으로 이들 변수를 모두 포함시킨 모형과 제외한 모형을 대상으로 각 모형의 수정된 *R*<sup>2</sup>를 고려하여 가장 안정적이고 설명력이 높은

Table 7. VIF Values for Determining the Multicollinearity of the Independent Variables

Model	Unstandardized coefficients		Sig.	Collinearity statistics	
	B	Std. Error		Tolerance	VIF
Constant	-2.627	0.611	0.001		
$R_t$	-1.544	0.418	0.002	0.049	20.381
$R_f$	-0.291	0.113	0.021	0.321	3.119
$R_{s,f}$	-0.093	0.029	0.006	0.564	1.774
$R_a$	1.604	0.459	0.003	0.059	16.998
$R_h$	0.239	0.101	0.032	0.266	3.757
$R_s$	1.829	0.412	0.000	0.672	1.487

모형을 최적모형으로 선택하였다.

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} \quad (7)$$

개발된 회귀식에 포함된 독립변수들의 VIF값은 Table 7에 나타내었다. 사용된 독립변수의 VIF값은 Eq. (7)에 의해 계산되어 높은 VIF값을 갖는 독립변수가 나타나지만, 그 변수를 제거할 경우 회귀식은 수정된 결정계수가 크게 낮아지고, 본 연구에서 예측모형의 목적이 모형의 적합성보다 예측의 정확성을 높이는데 있다고 판단하여 해당변수를 채택하였다.

### 5. 결론

한강 유역 19개 하천의 22개 지점을 대상으로 유역 형태학적 특성을 도출하고, 형태학적 특성간의 상관분석을 수행하여 유출물과의 상관식을 도출하였다.

- (1) 대상하천은 한강 유역의 지류로 다양한 형태의 하천으로 발달되어 있는 것을 알 수 있다. 유역 형태학적 특성을 나타내는 매개변수간의 상관분석 결과 대부분의 낮은 상관관계를 보였으나, 특정 매개변수간에는 높은 상관성을 보였다.
- (2) 대상 지점의 유출률을 산정한 결과, 성남, 횡성, 송산, 안성, 평택 지점에서 유출률이 높게 나타났으며, 이는 대상 지점 상류에 위치한 댐과 저수지 등의 유무에 따라 유출률에 영향을 미치는 것으로 판단되며 5개 지점을 제외하면 대상 지점의 유출률 범위는 0.29~0.86으로 나타났다.
- (3) 유출률의 예측을 위한 다중회귀분석식의 독립변수는 후진 제거법을 이용하였고, 선정된 변수로는 길이비, 형상계수, 형상인자, 면적비, 기복비, 함몰도이다.
- (4) 다중회귀분석을 통해 길이비, 형상계수, 형상인자, 면적비, 기

복비, 함몰도를 이용하여 유출률 회귀식을 제시하였고, 결정계수는 0.691로 나타났다. RMSE와 MAPE 분석결과, 각각 0.09, 11.61%로 정확한 산정을 하는 것으로 판단된다. 회귀식에 의한 예측값은 95% 신뢰구간에 64%, 95% 예측구간에 95%가 포함되었다.

- (5) 제시한 회귀모형식의 적용성을 위한 유의성을 검정하고, 사용한 매개변수의 적정성을 검토하기 위하여 다중공선성을 분석하였다.
- (6) 추후 더욱 정밀한 유출률의 분석을 위해서는 한강 유역 외에도 타 유역에 대한 유출률과 형태학적 특성을 추가로 확보하여야 할 필요가 있으며, 대상지점의 상류구간 댐/저수지의 유입량 등의 자료를 추가하여 분석할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

### 감사의글

본 연구는 건설교통부 물관리연구사업의 연구비지원(과제번호 15AWMP-C104709-01)에 의해 수행되었습니다.

### References

Aher, P. D. and Sharma, H. C. (2014). "Morphometric characterisation of gagar watershed in kumaon region of uttarakhand for management planning: a GIS approach." *Agricultural Science Digest*, Vol. 34, No. 3, pp. 163-170.

Choi, H. S., Park, C. S. and Moon, H. G. (2006). "A study on rainfall-runoff analysis by geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH)." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 6, No. 1, pp. 49-58 (in Korean).

Hajam, R. A., Hamid, A. and Bhat, S. (2013). "Application of morphometric analysis for geo-hydrological studies using geospatial technology-A case study of vishav drainage basin." *Hydrol. Current Res*, Vol. 4, No. 157, p. 2.

Ham, H. B. (2007). *Data Analysis and SAS Programming*, Vol. 328

- (in Korean).
- Kim, J. S., Maeng, S. J., Jeong, J. H. and Kim, H. S. (2014). "Analysis for runoff characteristic in Geumho River basin by standard unit watersheds including flood and drought years." *Journal of safety and crisis management*, Vol. 10, No. 4, pp. 133-152 (in Korean).
- Kim, S. H. and Choi, H. S. (2005). "Operation of an experimental watershed for river water quality management." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 7, No. 1, pp. 81-91 (in Korean).
- Moges, G. and Bhole, V. (2015). "Morphometric characteristics and the relation of stream orders to hydraulic parameters of River Goro: An Ephemeral River in Dire-dawa, ethiopia." *Universal Journal of Geoscience*, Vol. 3, No. 1, pp. 13-27.
- Na, S. I., Park, J. H. and Park, J. K. (2012). "Development of Korean Paddy Rice yield prediction model (KRPM) using meteorological element and MODIS NDVI." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 54, No. 3, pp. 141-148 (in Korean).
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models Part I - A discussion of principles." *Journal of hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Noh, H. (2005). Theory and Application of Multivariate Statistical Analysis using Excel and SPSS, Hyungsul, pp. 244-261 (in Korean).
- Song, I. R., Jung, C. Y., Min, G. H. and Jung, S. W. (2010). "A study on runoff characteristics by a reservoir in Hyungsan River basin." *In Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, Korea Water Resources Association (in Korean).
- Strahler, R. E. (1952). "Hypsometric (Area-Altitude) analysis of erosional topography." *Bulletin of Geological Society of America, Journal of Science*, Vol. 248, pp. 1117-1142.
- Tribhuvan, P. R. and Sonar, M. A. (2016). "Morphometric analysis of a Phulambri River drainage basin (Gp8 Watershed), aurangabad district (maharashtra) using geographical information system." *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, Vol. 5, No. 6, pp. 1813-1828 (in Korean).
- Yang, H. K. (2007). "Water balance change of watershed by climate change." *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 42, No. 3, pp. 405-420 (in Korean).
- You, H. J., Kim, D. S. and Yang, S. K. (2012). "Development of GIS-based method for estimating and representing stream slopes along the river network." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 21, No. 6, pp. 725-738 (in Korean).