

## 산악 산림 소유역에서 선행강우지수를 이용한 하천유량 추정: 계룡산 용수천 상류

정윤영<sup>1,2</sup> · 고동찬<sup>1,3\*</sup> · 한혜성<sup>4</sup> · 권홍일<sup>3</sup> · 임은경<sup>4</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지하수생태연구센터

<sup>2</sup>고려대학교 지구환경과학과

<sup>3</sup>과학기술연합대학원대학교

<sup>4</sup>국립공원관리공단 계룡산사무소

## Estimation of Stream Discharge using Antecedent Precipitation Index Models in a Small Mountainous Forested Catchment: Upper Reach of Yongsucheon Stream, Gyeryongsan Mountain

Youn-Young Jung<sup>1,2</sup> · Dong-Chan Koh<sup>1,3\*</sup> · Hye-Sung Han<sup>4</sup> · Hong-Il Kwon<sup>3</sup> · Eun-Kyung Lim<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Groundwater and Ecohydrology Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

<sup>2</sup>Department of Geology and Earth Environmental Sciences, Korea University

<sup>3</sup>University of Science & Technology

<sup>4</sup>Gyeryong National Park, Korea National Park Service

### ABSTRACT

Variability in precipitation due to climate change causes difficulties in securing stable surface water resource, which requires understanding of relation between precipitation and stream discharge. This study simulated stream discharge in a small mountainous forested catchment using antecedent precipitation index (API) models which represent variability of saturation conditions of soil layers depending on rainfall events. During 13 months from May 2015 to May 2016, stream discharge and rainfall were measured at the outlet and in the central part of the watershed, respectively. Several API models with average recession coefficients were applied to predict stream discharge using measured rainfall, which resulted in the best reflection time for API model was 1 day in terms of predictability of stream discharge. This indicates that soil water in riparian zones has fast response to rainfall events and its storage is relatively small. The model can be improved by employing seasonal recession coefficients which can consider seasonal fluctuation of hydrological parameters. These results showed API models can be useful to evaluate variability of streamflow in ungauged small forested watersheds in that stream discharge can be simulated using only rainfall data.

**Key words :** Headwater stream, Rainfall-runoff model, Soil moisture condition, Riparian zone, Vegetation

### 1. 서 론

우리나라의 수자원 이용은 산간지방 및 일부 섬 지역을 제외한 대부분의 지역에서 지하수보다 지표수에 의존하고 있다. 우리나라의 강우는 전체의 3분의 2 가량이 여름철에 해당하는 6월~9월경에 편중되어 발생하기 때문에 안정적인 지표수자원의 이용을 위해 대규모 댐 건설을 통한

지표수 자원 확보에 중점을 두고 있는 실정이다(Lee and Lee, 2014). 하지만 최근 들어 기후변화에 기인한 집중호우의 증가양상과 같은 강수패턴의 변화는 하천을 중심으로 한 안정적 지표수자원의 이용에 어려움을 초래하고 있다(Vorosmarty et al., 2000). 강우-하천유출의 상관성 평가에서 강우는 비연속적인데 반해 하천유출은 강우에 연속적인 반응특성을 보인다(Ward, 1984). 따라서 지표수자

\*Corresponding author : chankoh@kigam.re.kr

Received : 2016. 8. 5 Reviewed : 2016. 9. 5 Accepted : 2016. 9. 27

Discussion until : 2017. 2. 28

원의 안정적 이용을 위해서는 강우-유출의 시기적 변동에 대한 과학적 이해가 필요하다.

우리나라 하천의 대부분은 산지에서 발원하며 전 국토의 약 70%가 산지하천 유역에 포함된다(Park et al., 2012) Alexander et al.(2007)은 미국 북동부지역에 분포한 하천을 대상으로 최상위수계 하천이 전체 지표수 하계망의 85%를 차지하며, 4차 수계 이상의 유역에 대해 약 50% 이상의 수량과 영양염류를 공급하는 것으로 보고하였다. 강우-유출의 상관성 평가에서 기후와 지형특성은 중요한 변수인 점을 고려하면 우리나라의 경우 산악유역에 분포하는 최상위수계 하천을 대상으로 하천유출특성을 시계열적으로 파악하는 것은 전체 유역의 물공급 특성의 이해에 중요하다(Bae et al., 2008).

강우사상에 따라 산악유역에 분포한 최상위수계 하천유출특성을 파악하기 위해서는 물리적 관점에서 강우의 하천으로의 유동과 관련된 다양한 실측자료와 수리학적 인자에 대한 파악이 요구된다(Bernier et al., 1985; Sidle et al., 2011). 대표적인 예로 기온변화와 식생활동에 의한 증발산량, 토양층 발달양상 및 공극률, 대수층으로의 침투량 등이 있다. 이러한 하천 유출과 관련된 개별인자들을 모두 파악하는 것은 현실적으로 어려우므로, 많은 연구들에서 강우에 의한 영향을 대표할 수 있는 지수화된 척도를 이용해 강우-유출 사상에 대한 평가를 수행하고 있다(Fedora and Beschta, 1989; Kim et al., 2006).

강우 영향 변화를 연속적으로 나타낼 수 있는 선행강우지수(Antecedent Precipitation Index, API)는 수문학 연구에서 하천의 시계열 변동예측, 부유성 퇴적공급 모형 디자인, 토양저류량의 변화 묘사를 통한 지표유출 특성 규명 등 다양한 주제에 대해 활용되고 있다(Descroix et al., 2002; Brocca et al., 2005). 국내에서 선행강우지수를 이용한 연구는 시계열의 강우사상 변화에 따른 토양저류 특성, 지하수저류 변화 등 산림지역에서 실측된 자료를 바탕으로 선행강우지수와 상관성을 파악하는 등 제한된 영역에서 수행되었다(Heo et al., 2002; Kim et al., 2008; Gwak et al., 2016). 그러나 선행강우지수가 강우-하천유출 특성 평가에 적용된 연구사례는 국내에서는 전무한 상황이다.

이 연구의 목적은 1) 산악 산림 소유역 내 최상위수계를 대상으로 관측된 강우량과 하천수위 시계열 자료와 선행강우지수 모형을 이용하여 강우 발생과 하천유출량의 시기적 상관성을 분석하고, 2) 하천유출량의 시기적 변동을 결정하는 주요 인자를 파악하고 각 인자와 하천유출량 간의 상관성을 규명하여, 3) 국내 산악 산림 소유역에서

선행강우지수 모형의 적용성을 평가하는 것이다. 국내 최상위수계에 대해 선행강우지수와 하천유출과의 유의한 상관 관계를 도출하는 것은 국토의 상당부분을 차지하는 산악 소유역 유출 특성 평가와 기후변화에 따른 유역내 수자원 변동성의 예측에 기여할 수 있다. 또한, 하천유량 미세측 유역에서 강수량만을 이용해 하천유출 특성을 평가할 수 있다는 점에서도 큰 의의가 있다.

## 2. 연구지역

연구지역인 계룡산 국립공원 내 동학사유역은 대전광역시와 충청남도 논산시, 공주시 경계에 위치한 산악유역으로 행정구역상 공주시 반포면에 위치하고 있다. 동학사유역의 면적은 3.96 km<sup>2</sup>로 계룡산 국립공원 총면적의 약 6.5%에 해당한다. 연구유역의 지형은 능선부와 저변부를 구성하는 암상의 상대적인 풍화차에 기인된 차별 침식의 결과로 형성되었을 것으로 추정된다(KNPS, 2012). 서쪽의 천황봉과 관음봉을 중심으로 동쪽 방향으로 분지형 계곡을 이루며 말단으로 갈수록 비교적 평탄한 충적지가 발달된 형태를 보인다. 주요하천인 용수천은 금강의 지류인 갑천의 최상위지류에 해당하며, 산정부를 중심으로 방사상으로 발달하여 있다. 연구유역 내 산지하천은 두부침식에 의하여 파괴가 진행되어 폭이 좁고 곡사면은 급경사 사면을 이루고 있어, 일반적인 산지하천에서 볼 수 있는 심한 곡류하도와는 다르게 직선하도 형태가 지배적이다.

연구지역에 해당하는 계룡산일대의 지질은 선캠브리아기 변성암류와 옥천계 변성퇴적암류를 기반암으로 하고 있다. 이 기반암은 중생대 백악기 내지 제3기의 문상반암(granophyre) 및 각종 암맥류와 석영맥 등에 의해 관입된 형태를 띠고 있다(Kim et al., 1976). 연구유역의 능선에 해당하는 천황봉 및 관음봉 일대는 풍화에 강한 문상반암이 주로 분포한 반면 저변부에는 중생대의 편마상 화강암(gneissose granite)과 홍색장석화강암(pink feldspar granite) 등 상대적으로 풍화에 약한 암석이 주로 분포하고 있다. 연구유역 내 토양의 토성은 양토, 식양토, 사질 식양토로 다양하게 나타났으며, 유효토심은 평균 27.5 cm로 계룡산 일대의 갑사나 상신리 지역에 비해 상대적으로 낮은 수치를 보인다(KNPS, 2010). 연구유역내 토지이용은 대부분이 산림으로 지표면에는 식생의 부산물인 낙엽이나 낙지가 쌓여서 형성되는 유기물층(forest floor)이 2~3 cm의 두께로 지표면에 형성되어 있다. 연구유역 토양의 용적밀도는 1.16~1.28 g/cm<sup>3</sup>로 낙엽 등의 유기물 투입량이 증가됨에 따라 점차 낮아지고 반대로 공극률은 증가하

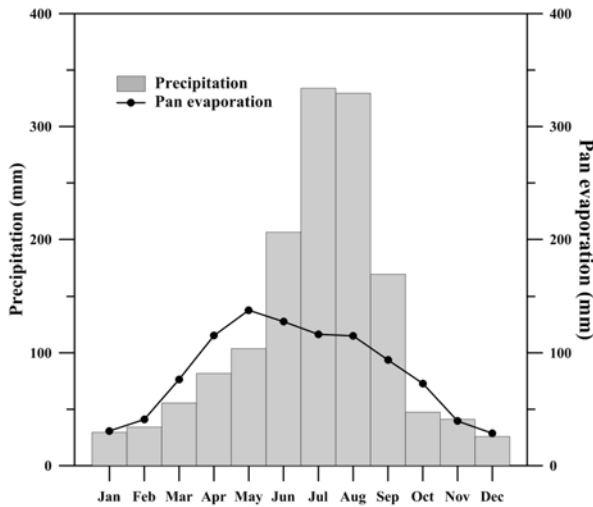


Fig. 1. 30 year average monthly precipitation and pan evaporation at Daejeon meteorological station near the study area.

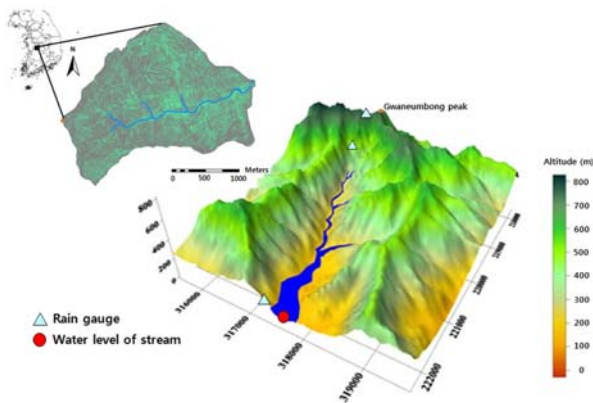


Fig. 2. Location of Donghak mountainous forested catchment with measurement systems of precipitation and stream discharge.

는 경향을 보인다(KNPS, 2010).

연구지역 인근의 대전 기상관측소의 기상자료에 따르면 1981~2010년간 평년강수량은 1458.7 mm이며, 평균 기온은 13°C이다. 월별 강수량의 경우 계기증발량보다 많은 강수량이 기록되는 6~9월경 전체 강수량의 71%가 집중되어 발생되었다(Fig. 1).

### 3. 연구방법

#### 3.1. 강우량과 하천유량 관측

연구지역에서 강우사상과 하천유출량 변동의 시기적 상관성을 파악하기 위해 2015년 3월 13일부터 2016년 3월 16일의 약 1년 동안 고도별 강우량과 하천 수위 관측을 수행하였다(Fig. 2). 선행강우지수 분석에 사용할 강우자

료에 대한 신뢰성을 높이기 위해 연구지역내의 고도별 3개 지점에 tipping bucket 측정방식의 강우계(1 pulse/0.2 mm rain, Aerodynamic rain gauge, Eijkelkamp)를 설치하여 운영하였다. 이 장비는 영하의 기온에서는 강우량 측정이 불가능하여, 이 시기에는 연구지역 저지대에 설치된 계룡산 국립공원 측의 자동기상관측 자료(AWS)를 선행강우지수 분석에 활용하였다. 하천의 수위는 용수천 본류 1개소에서 압력식 자동수위계(0.01%FS, 0.1°C, Orpheus Mini)를 이용해 10분 간격으로 관측하였다. 하천 유출량은 한국건설기술연구원에서 검정된 UCM(Universal Current Meter, C31, OTT co.)을 이용해 수위별로 7회 측정하여 수위-유량 관계곡선(stage-discharge rating curve)을 작성하였으며, 이를 이용해 하천유량을 추정하였다.

#### 3.2. 강우-하천 유출사상의 선정

강우사상 발생에 따른 유역의 반응과 하천유출에 대한 영향을 평가하기 위해 연구 기간 동안에 발생한 전체 강우사상을 대상으로 하천유출에 기여가 큰 강우사상을 구분하였다(Table 1). 강우사상은 강우가 종료된 이후 6시간 이상의 무강우가 지속된 것을 기준으로 개별 강우사상으로 구분하였으며, 6 mm 이하의 강우사상은 하천유출량 변동에 기여하는 바가 미미하여 6 mm를 초과하는 강우사상을 유효 강우사상으로 판단하였다(Penna et al., 2011). 이 기준을 적용하였을 때 조사 기간동안 연구유역에는 39차례의 유효 강우사상이 발생한 것으로 나타났다.

이와 같이 구분된 강우 사상에 대해서 Eckhardt(2005)에서 제시된 Eckhardt filter를 이용한 수문분리를 수행하여 기저유출(base flow)과 직접유출(direct runoff)로 하천유출을 분리하였다. 이때 각 강우사상에서 기간 중 총 직접유출량과 총 강수량과의 비를 개별강우사상에 대한 유출계수(runoff coefficient)로 정의하였다. Eckhardt filter를 이용한 수문분리에서 총 하천유출에 대한 기저유출량 비의 최대치를 의미하는  $BFI_{max}$ 와 지하수 감수계수를 의미하는 필터 인자인  $\alpha$ 는 인근지역인 계룡산 내 도덕봉 일대의 하천을 대상으로 산소동위원소를 이용한 수문분리 결과(Cho et al., 2007)를 참고하여, 각각 0.8과 0.98로 설정하였다.

#### 3.3. 선행강우지수 계산

선행강우지수(Antecedent Precipitation Index, API)는 홍수 유출(storm runoff), 특히 침투 유량(peak discharge)의 예측을 목적으로 개발된 지수로, 시간이 지남에 따라 선행 강우의 영향이 감소한다는 수문학적 개념을 가지고

**Table 1.** Properties of selected rainfall-runoff events<sup>1)</sup>

Date (yyyy-mm-dd)	Rainfall (mm)	Duration (h)	Direct runoff (mm)	Baseflow (mm)	Runoff coefficient
2015-03-31	10	28	0.67	2.41	0.07
2015-04-02	49	10	5.25	19.16	0.11
2015-04-04	27.6	45	7.38	29.6	0.27
2015-04-13	14.2	18	0.59	1.99	0.04
2015-04-18	35.2	42	5.79	22.82	0.16
2015-04-28	21	14	1.49	5.65	0.07
2015-05-03	8.4	14	2.21	8.68	0.26
2015-05-11	42	13	7.04	28.1	0.17
2015-06-14	9.2	8	0.19	0.7	0.02
2015-06-17	19.2	9	0.43	1.56	0.02
2015-06-20	24.4	19	0.65	2.55	0.03
2015-06-25	81.2	29	6.92	27.51	0.09
2015-07-07	62.8	61	2.57	9.68	0.04
2015-07-11	56.2	48	11.62	46.42	0.21
2015-07-21	20	8	0.1	0.31	0.01
2015-07-21	42.6	12	3.05	10.65	0.07
2015-07-23	39	12	5.72	16.32	0.15
2015-07-23	46.2	26	14.7	66.46	0.32
2015-07-29	35.2	8	5.6	22.4	0.16
2015-08-08	34.4	2	1.4	5.64	0.04
2015-08-20	10.4	19	0.15	0.59	0.01
2015-08-25	24.6	20	0.21	0.8	0.01
2015-08-27	10.2	10	0.38	1.54	0.04
2015-09-11	17.6	15	0.04	0.16	0.00
2015-09-12	14.4	6	0.23	0.91	0.02
2015-10-01	66.6	17	1.25	4.98	0.02
2015-10-10	24.2	11	0.72	2.89	0.03
2015-10-27	29.8	10	1.06	4.21	0.04
2015-11-06	66.8	57	3.46	13.77	0.05
2015-11-13	33.4	33	2.9	11.49	0.09
2015-11-16	29.2	18	4.63	18.59	0.16
2015-11-22	12.2	15	0.57	2.24	0.05
2015-11-24	19.8	24	3.44	13.91	0.17
2015-12-02	16.8	8	2.7	10.88	0.16
2015-12-10	12.2	14	1.07	4.25	0.09
2015-12-14	13.2	21	1.81	7.27	0.14
2016-02-11	48.2	44	3.87	15.32	0.08
2016-02-26	9	22	0.35	1.38	0.04
2016-03-04	26.8	20	3.95	15.7	0.15

1) Rainfall and streamflow including stormflow and baseflow are cumulative amounts during each rainfall event.

있다(Fedora and Beschta, 1989). 선행강우지수는 강우발생에 따른 하천유량 변동의 재구성을 통한 모의할 수 있다는 점에서 하천유량자료가 존재하지 않는 지역의 침투 유량(peak flow) 예측에 활용될 수 있다(Kobashi and Suzuki 1987; VanSickle and Beschta, 1983). Western

and Grayson(1998)이 강우 발생에 따른 유역 내 토양 습윤조건에 의해 지배되는 지표유출(surface runoff)에 명확한 임계값이 존재함을 보고한 이후 최근들어 산악유역에서 선행강우지수를 이용해 토양저류량과 유출계수(runoff coefficient)간의 상관성을 파악하고 이와 관련된 수문학적

과정을 이해하려는 연구사례들이 많이 보고되고 있다(Sidle et al., 2000; Sidle et al., 2011; Gwak et al., 2016).

선행강우지수의 계산은 기본적으로 식 (1)과 같이 특정 강우사상 발생 이전의 특정일수( $n$ )의 시간 간격( $\Delta t$ )에 발생한 선행강우량( $P$ )에 대해 가중 인자(weighting factor,  $b$ )를 적용한 합으로 계산되며, 적용방법에 따라 다양하게 수정된 형태가 존재한다(Brocca et al., 2005).

$$API_t = \sum_{\Delta t=1}^n bP_{t-\Delta t} \quad (1)$$

이번 연구에서 사용한 선행강우지수 계산식은 강우발생 이후 토양층에서의 중간유출(interflow)이 포함된 기저유출의 감쇠 특성을 반영할 수 있는 식 (2)를 적용하여 선행강우지수에 따른 하천유출량 변화를 모의하였다(Fedora and Beschta, 1989). 해당 수식은 단순 산술적 계산 방식의 선행강우지수 계산 수식에 비해 대상 매체의 연속적 변화 특성을 모의하는 경우에 더 좋은 예측력을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다(Brocca et al., 2005; Gwak et al., 2016).

$$API_t = (K \cdot API_{t-\Delta t}) + P_{\Delta t} \quad (2)$$

여기서,  $API_t$ 는 시간  $t$ 에서 선행강우지수(unit: mm),  $K$ 는 강우발생이후 수문곡선의 감수곡선을 이용해 얻어진 무차원의 감수계수(dimensionless recession coefficient),  $\Delta t$ 는 강수량 관측사이의 시간간격,  $P_{\Delta t}$ 는  $t-\Delta t$ 의 시간간격동안 발생한 강우량을 의미한다. 이때 사용된 감수계수는 Garstka et al.(1958)에서 제시된 바와 같이 강우종료시점을 기점으로 연속적으로 감소하는 하천유량과 특정시간간격 이전의 하천유량의 비교를 통해 얻어진 직선의 기울기로 표현된다. 이번 연구에서 감수계수는 유량변동이 관측된 모든 개별 수문곡선에 대해 2시간 간격의 하천유량 비교를 통해 계산되었다. 식 (2)를 이용해 고려된 선행강우 반영일수(reflection time)는 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7일로 설정하고, 실제 하천유량 변동간의 상관성 비교를 수행하였다. 계산된 선행강우지수 값은 반영일수에 따른 값의 차이가 존재하며 실제 측정된 하천수위 값과의 직접적 비교를 위해 무차원화하였다. 무차원화된 선행강우지수는 실측값인 하천수위와 단순선형회귀분석을 통해 얻어진 기울기와 절편을 이용하여 하천수위로 변환하였다. 하천수위로 변환된 선행강우지수는 수위별로 6차례 유량측정을 통해 얻은 수위-유량관계곡선을 이용해 강우발생에 따른 하천유량 변화를 산출하였다.

### 3.4. 선행강우지수와 하천유량간의 회귀모형 검증

선행강우 반영일수 차이에 따른 선행강우지수와 측정된 하천유량간의 회귀모형의 성능(performance)을 식 (3) 결정 계수(coefficient of determination,  $R^2$ )와 식 (4)과 식 (5)와 같이 Nash-Sutcliffe Efficiency(NSE, Nash and Sutcliffe, 1970)와 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)의 세가지 기준을 이용하여 평가하였다. 결정 계수는 이상치(outlier)에 값이 좌우되며, 예측된 값과 관측된 값의 상관성에 의존적이라는 점에서, NSE와 RMSE를 이용해 모형의 적합성 여부를 추가적으로 평가하였다(Legates and McCabe Jr., 1999).

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q'_0 - Q'_s)^2}{\sum_{t=1}^T (Q'_0 - Q_m)^2} \quad (4)$$

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (Q'_0 - Q'_s)^2}{n}} \quad (5)$$

여기서, 식 (3)에 언급된 SST는 총 편차의 제곱합, SSR은 회귀모형에 의해 설명되는 편차의 제곱합, SSE: 잔차들의 제곱합을 의미하며, 식 (4)와 식 (5)에 언급된  $Q'_0$ '는 시간별 측정된 하천유량,  $Q'_s$ '는 모의된 하천유량,  $Q_m$ 은 관측된 하천유량의 평균값을 의미한다. 결정계수는 0~1의 범위를 가지며, 1에 가까울수록 모의치가 관측치와 일치하고, 0에 가까울수록 관측된 값과 예측된 값의 상관성이 없음을 의미한다. NSE는  $-\infty \sim 1$ 의 범위를 가지며, 이 값이 1일 경우는 모형에 의한 예측치와 관측치가 완전하게 일치하고, 0일 경우는 예측치가 관측치의 평균과 같은 정도로 정확하며, 0보다 작을 경우는 평균 관측치가 모형보다 더 좋은 예측치임을 지시한다. RMSE는 작을수록 예측된 값과 관측된 값의 차이가 적음을 의미한다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1. 연구유역 수문자료

연구기간동안 연구유역의 강우사상, 평균기온, 하천수위의 시계열 변동은 Fig. 3와 같다. 연구유역의 일평균기온은  $-14^{\circ}\text{C} \sim 27.2^{\circ}\text{C}$  범위로, 대부분의 토지이용이 산림으로

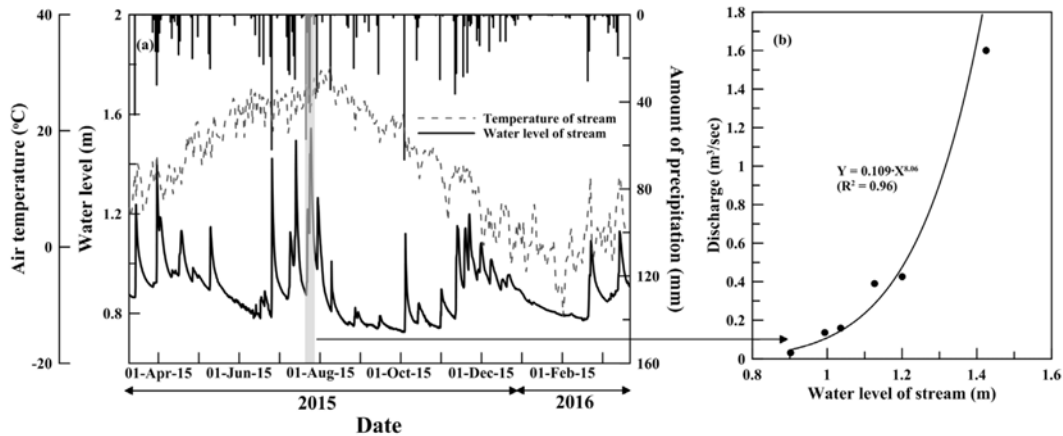


Fig. 3. (a) Daily variations of precipitation, air temperature and water level of the stream during the study period and (b) discharge rating curve at the outlet of the stream.

구성되어 있어 인근의 대전 도심에서 측정된 기온에 비해 모든 계절에 걸쳐 2°C~3°C 가량 낮은 기온을 보이는 것으로 나타났다.

연구기간동안 연구유역에 발생한 총 강수량은 저지대 698.2 mm, 중산간 1313.8 mm, 고지대 795.7 mm로, 저지대 및 고지대의 경우 같은 기간 인근의 대전도심에서 측정된 855.3 mm와 비교했을 때 적거나 유사한 강수량이 기록된 반면 중산간의 경우 약 458 mm 더 많은 강우가 발생하였다. 중산간지점에서 더 많은 양의 강우가 발생한 원인은 산악유역에서 발생하는 지형성 강우의 발달과 연관된다. 지형성강우는 산의 고도와 지형경사를 대표하는 기울기의 영향을 받는데, 일반적으로 고도와 기울기가 증가할수록 공기괴의 연직으로의 큰 변위와 강제 상승이 강화되어 깊은 하층 지형성 구름을 발달시키고 강수량 증가를 초래한다(Barros and Kuligowski, 1997). 따라서 하천 주변을 제외한 연구유역의 대부분이 급경사를 갖는 산악의 비탈면임을 고려하면, 연구지역과 같은 산악 산림유역의 경우 중산간에 기록된 강수량을 이용해 하천유량 변동을 분석하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

상대적으로 강우사상의 발생 빈도가 잦은 6월과 9월 사이에 가장 큰 하천 수위의 변동이 관측되었는데 이 기간 동안 강우량은 중산간을 기준으로 총강우량의 44%에 해당하는 577.6 mm가, 하천 유출은 총유량의 약 46%에 해당하는 267.3 mm가 발생하였다. 낮은 하천수위를 유지하는 시기는 무강우가 지속된 시기와 매우 밀접한 관련이 있다. 연구기간동안 10일 이상의 무강우 시기가 지속된 횟수는 총 9차례이며, 적설의 영향이 나타나는 겨울철을 제외한 최대 무강우 일수는 34일로, 이때 하천유량은 0.016 m³/sec까지 감소하였다. 이러한 하천 유출의 시기적

특성은 강우 사상의 발생빈도와 강우량에 의해 산악 산림 소유역의 하천 유량 변동이 크게 좌우됨을 지시한다. Penna et al.(2011)는 강우 발생에 따라 토양층 내 수분 함량 변화는 강우사상 발생에 즉각적으로 반응하지만, 천부지하수는 강우 발생에 따른 반응성은 상대적으로 작고 큰 강우 사상 이후 천부지하수의 반응이 증가함을 보고하였다. 이것은 강우 사상의 특성에 따른 하천 유출과 관련된 다양한 지질매체의 반응성에 차이가 존재함을 지시한다. 따라서 연구유역의 경우 강우가 집중되는 풍수기에는 갈수기에 비해 지표 이하가 보다 습윤한 상태로 토양수 및 지하수를 포함하는 지하 유동이 하천 유출에서 차지하는 비중이 증가되는 것으로 판단된다.

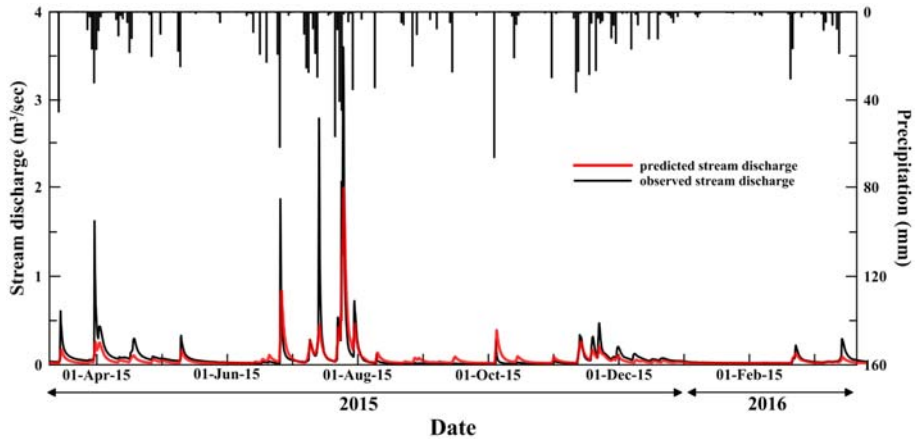
#### 4.2. 선행강우지수와 하천 유출의 상관성

선행강우지수를 적용에서 중요한 인수인 감수계수(K)는 Fedora and Beschta(1989)에서 언급된 무강우 시점의 감쇠곡선을 대상으로 2시간 간격의 하천유량 비교를 통해 계산되었다. 연구기간 동안에 발생한 모든 강우-유출 사상의 감쇠곡선을 대상으로 계산된 감수계수는 0.8765로, 모든 선행강우지수 모형에 동일하게 적용하였다. 선행강우 반영일수 변화에 따라 계산된 하천유량과 실제 하천유량간의 회귀모형을 통해 나타난 결정계수의 범위는 0.353에서 0.626로 최대 27%의 예측력차이를 보이는 것으로 나타났다(Table 2). 선행강우지수를 이용한 하천유출량 변동 예측에서 최적 조건은 1일 이전의 선행강우량과 12시간 이전의 선행강우지수를 반영한 경우로서 가장 높은 R², NSE 값과 가장 낮은 RMSE 값을 보였다. R²를 기준으로 하천유량의 전체 시계열 자료에 대한 예측력은 약 63%이며, 강우사상별 최대 침투유량의 예측력은 약 77%

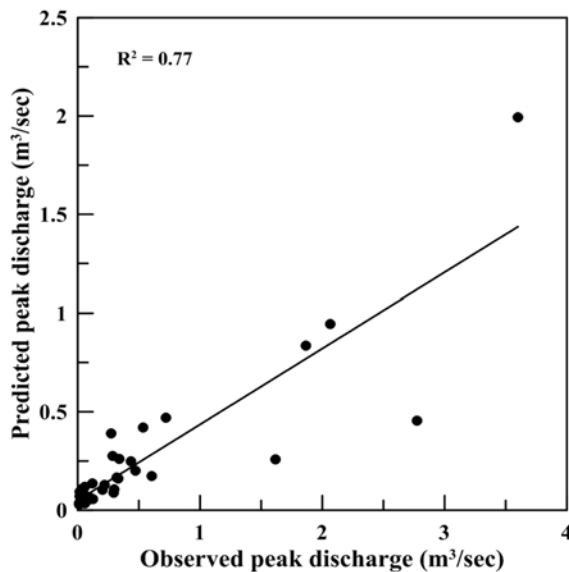
**Table 2.** Coefficients of determination, NSE and RMSE between stream discharge measurements and those predicted by regression equations with various API<sup>1)</sup>

	API(0.5)	API(1)	API(2)	API(3)	API(4)	API(5)	API(6)	API(7)
R <sup>2</sup>	0.534	0.626	0.541	0.435	0.422	0.398	0.366	0.353
NSE	0.524	0.598	0.453	0.354	0.350	0.322	0.287	0.264
RMSE	0.141	0.130	0.152	0.165	0.166	0.169	0.174	0.177

1) The numbers in parentheses represent duration of days considered for antecedent precipitation



**Fig. 4.** Observed stream discharges compared with those predicted by the optimized antecedent precipitation index model.



**Fig. 5.** Comparison of observed peak discharges and those predicted by the optimized antecedent precipitation index model.

로, 선행강우지수가 강우 사상만을 고려한 모형임을 고려하면 높은 수치로 판단된다(Fig. 4). 하지만 전반적으로 하천유출량 변동이 큰 경우에 예측된 하천유출량과 실제 측정된 하천 유출량과는 상대적으로 더 큰 폭의 차이가 존재하였다(Fig. 5).

강우-하천유출간의 상관성은 물의 연속된 순환으로 표현될 수 있다(Ward, 1984). 따라서 선행강우지수를 이용한 하천유출의 예측력이 최대 63%로 나타난 것은 비연속성의 강우에 대한 국내 산악소유역 하천유출의 연속적인 반응을 선행강우지수를 이용하여 평가할 수 있음을 지지한다. 이때 최적 선행강우지수 반영일수가 1일 이전이란 점은 연구지역에서 강우가 빠른 유동경로를 통해 하천유출에 기여하는 부분이 지배적임을 지지한다. 산악유역에서 강우발생에 따른 하천유출의 기여는 크게 포화된 하천변 지역(riparian zone)의 확장과 경사지(hillslope)를 통한 유출로 구분할 수 있다(Penna et al., 2011). 강우발생시 포화된 하천변 지역의 분포 확장은 경사지 유출에 비해 빠른 반응성을 가지지만, 유역의 습윤 지수가 증가할수록 경사지 유출의 하천유출에 대한 기여도가 증가한다(Detty and McGuire, 2010; McGuire and McDonnel, 2010). 즉, 유역이 습윤한 조건에서는 건조한 조건에 비해 경사지 유출의 반응이 빨라 하천유출에 대한 기여가 증가된다(Moon et al., 2001; McGlynn, 2003). 따라서 이번 연구에서 1일 이전의 선행강우 조건이 반영된 최적모형이 하천유출변동과의 높은 상관성을 보이지만 침투 유량이 과소평가된 것은 해당 모형이 강우발생에 따른 포화된 하천변 지역의 확장을 주로 대변하고 경사지 유출은 상대적

으로 잘 반영하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

강우발생에 따른 하천변 지역의 포화도 변화와 분포의 증가는 토양층 내 물의 유동과 연관된다. 토양층에서 물의 유동은 거대공극(macropore)을 통한 빠른 우회류(bypass flow)와 토양 기질(matrix)를 통한 느린 기질류(matrix flow)로 구분되며, 물의 유동과 저류능력은 강우 강도에 의존적이다(Kim, 2014). 토양층 내 물의 유동을 좌우하는 요소는 토양층의 발달양상 및 구성성분으로, 강우에 따른 토양층의 습윤조건에 따라 토양층 이하의 유동 특성이 달라진다(Heller and Klerber, 2016). 따라서 연구 지역에 적용된 선행강우지수 변화는 강우발생에 따른 하천변 지역 토양층 내 물의 유동특성을 변화를 대표하며, 선행강우지수를 이용한 하천유출량 변화는 하천변에 발달한 토양층의 물의 저류능력과 연관성이 크다고 할 수 있다.

**4.3. 유출계수 특성을 반영한 선행강우지수의 활용**

선행강우지수를 활용한 하천유출특성 모의에서 가장 중요한 인수는 감수계수(K; recession coefficient)이다. Fedora and Beschta(1989)는 서로 다른 크기의 5개 유역을 대상으로 선행강우지수를 이용한 하천유량 변동 모의에서 감수계수는 유역면적에 비례하여 증가하여 면적이 상대적으로 작은 유역에서 큰 면적의 유역에 비해 강우에 대한 하천유량 감쇠가 좀 더 빠르게 진행됨을 보고한 바 있다. 이러한 결과는 감수계수가 유역조건에 따라 유동적일 수 있음을 지시한다. 지금까지 감수계수는 상관분석을 통한 추정이나 감수곡선분석을 통해 결정된 일률적인 값을 토양수분이나 하천유출 변동량 추정에 사용하였다(Fedora and Beschta, 1989; Brooca et al., 2005). 하지만 우리나라와 같이 계절적으로 기온과 강수량의 변화가 명확히 나타나는 지역에서 일률적인 감수계수의 적용은 강수-하천유출 관계의 평가에서 문제가 있을 것으로 판단된다.

이에 따라 이번 연구에서는 선행강우지수와 하천유출 변동성의 상관성 분석에서 시계열 변수의 영향을 파악하기 위해 시기별 유출계수와 선행강우지수를 비교하였다(Fig. 6). 이때 시기의 구분은 강우발생빈도와 발생한 강수량을 기준으로 6월에서 9월까지를 풍수기로, 이 기간 이전과 이후를 갈수기 강우-하천유출 사상으로 구분하였다. 각 시기별 강우사상 발생지점을 기준으로 선행강우지수와 유출계수는 50% 이상의 상관성을 보였다. 봄과 가을에 비해 강우가 집중되는 여름철 풍수기에 동일한 선행강우지수에서 하천으로의 지표유출은 감소되는 것으로 나타났다. 이는 시계열 변화에 따른 하천으로의 유출과정에 차이가 존재함을 지시한다. 이러한 시기적인 차이를 반

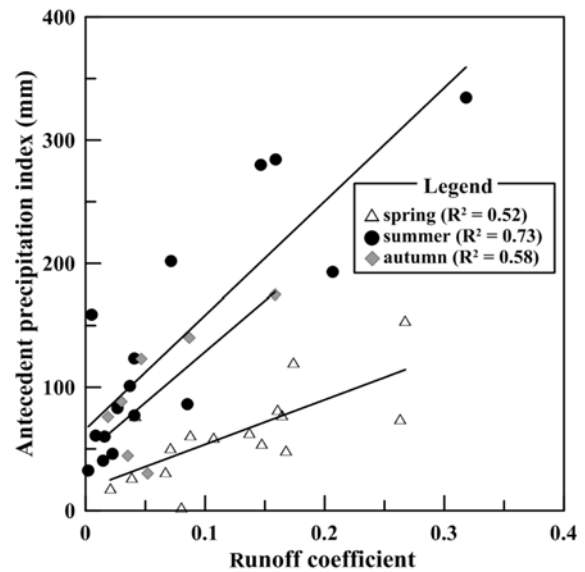


Fig. 6. Seasonal differences in relation between runoff coefficient and antecedent precipitation index.

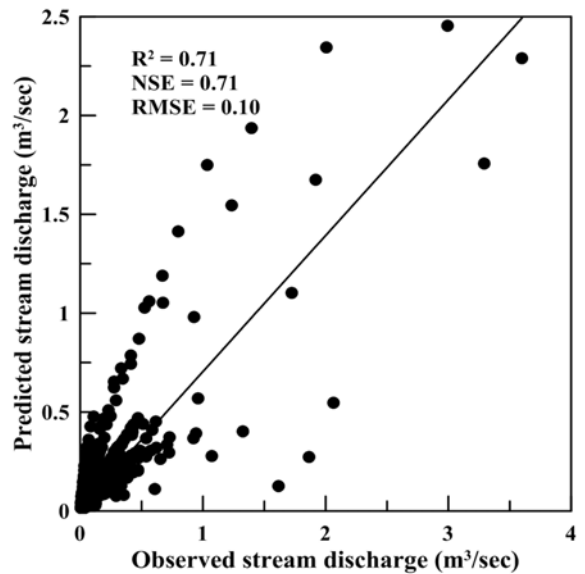


Fig. 7. Comparison of observed stream discharges to those predicted by antecedent precipitation index model employing seasonal recession coefficients.

영하기 위해 계절별 감수계수를 계산하여 선행강우지수에 반영하였다. 계절별 감수계수는 여름철에 0.8612로 가장 낮고, 봄철에 0.9557로 가장 높게 계산되었다. 이러한 감수계수의 계절변동은 Gwak et al.(2016)에서 보고된 결과와 일치한다. 계절별 감수계수가 적용된 선행강우지수 모형은 NSE=0.71, R²=0.71, RMSE=0.10의 값을 보여 전체 감수곡선을 이용해 평균화된 감수계수가 적용된 이전 모형에 비해 예측 성능이 증가하였으며, 이것은 계절변화



에 따른 감수계수의 적용이 산악소유역 하천유량 모의에 유의함을 잘 보여준다(Fig. 7).

계절별로 감수계수가 차이를 보이는 것은 감수계수가 유역내 증발산의 계절적 변화를 반영하기 때문이다(Gwak et al., 2016). 계절별로 증발산량보다 강수량이 많은 풍수기에는 강수의 지하 침투가 증가될 수 있다. 이 시기는 식생활동이 활발한 시기로 임목의 근계를 통한 활발한 토양수분 소비 현상으로 표층에서의 토양수분 미흡량(soil moisture deficiency)이 증가되어 강수의 지하 침투가 더 원활하게 발생한다(Hong et al, 2009). 또한 산림 토양은 높은 침투능력을 가지고 있으므로, 강우 발생 빈도와 강도가 강해지는 풍수기에 식생 활동에 의해 지표에 쌓인 낙엽부산물의 교란이 증대되면 강수의 지하 침투가 증가될 수 있다(Lee and Lee, 2014). 하지만 토양층내 증발산과 식생활동은 시간에 따라 연속적으로 변하며, 강우 양상은 비연속적이란 점에서 계절별 감수계수를 이용한 선행강우지수 모형의 적용은 한계점이 존재한다. 따라서 선행강우지수를 이용한 하천유량 예측 성능을 향상시키기 위해서는 강우 양상을 기준으로 연속적 증발산과 식생활동의 영향을 고려하여 모형을 개선할 필요가 있다.

## 5. 결 론

산림 산악 소유역에서 0.5~7일의 범위에 대해 선행강우지수 모형을 적용한 결과 1일 이전의 선행강우지수 모형이 강우발생에 따른 하천유출량 변화 모의에 가장 적합한 것으로 나타났다. 최적 선행강우지수 모형은 비연속적 강우 발생에 따른 연속적 하천유량의 전반적인 변동 모의에는 유용하였지만 침투 유량은 과소평가하는 경향이 있었다. 이것은 선행강우지수 모형이 강우에 빠른 반응을 보이는 하천변지역에서 포화대가 확장되어 하천유출에 기여하는 과정은 잘 대변하지만, 유역이 습윤한 조건에서 하천유출에 대한 기여가 큰 경사지 유출을 반영하기에는 한계가 있음을 보여준다.

계절별 선행강우지수와 유출 계수의 상관성을 토대로 계절별 감수계수를 적용한 선행강우지수 모형은 이전 모형보다 하천유출 변동 예측 능력이 향상되었다. 이것은 계절별 감수계수가 계절에 따른 식생활동과 기온변화에 의한 증발산 변화와 강우 양상에 따른 지하로의 강우 침투량의 변화를 반영하여 선행강우지수의 유의성을 증가시켰기 때문으로 추정된다.

이번 연구는 우리나라 대표적인 지형 특성인 결정질 암반의 산악 소유역을 대상으로 강수에 의한 유역내 습윤조

건을 반영할 수 있는 선행강우지수 모형으로 시기적 하천유량 변동을 예측하는 것이 가능함을 제시하였으며, 이 결과는 하천유량이 계측되지 않는 최상위수계 유역에서 지표수자원 변동 특성을 더 정확하게 평가하여 지속가능한 수자원 이용에 기여할 것으로 예상된다.

## 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘수리생태학적 기법을 활용한 수권 경계면에서 물질 순환 평가 기술 개발(15-3420)’ 과제와 계룡산국립공원사무소-한국지질자원연구원간의 수생태계보전 업무 협약의 일환으로 수행되었습니다. 심도 있는 논문 심사를 해 주신 부산대학교 김상현 교수님과 익명의 심사자에게 감사드립니다.

## References

- Alexander, R.B., Boyer, E.W. Smith, R.A., Schwarz, G.E., and Moore, R.B., 2007, The role of headwater streams in downstream water quality, *J. Am. Water Resour. Assoc.*, **43**(1), 41-59.
- Bae, D.-H., Jung, I.-W., and Chang, H., 2008, Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins, *Hydrol. Process.*, **22**(14), 2644-2656.
- Barros, A.P. and Kuligowski, R.J., 1997, Orographic effects during a severe wintertime rainstorm in the Appalachian mountains, *Mon. Wea. Rev.*, **126**(10), 2648-2672.
- Bernier, P.Y., 1985, Variable source areas and storm-flow generation: an update of the concept and a simulation effort, *J. Hydrol.*, **79**(3), 195-213.
- Brocca, L., Melone, F., and Moramarco, T., 2005, Empirical and conceptual approaches for soil moisture estimation in view of event-based rainfall-runoff modeling. *IHP-VI Technical Documents in Hydrology* **77**, 1-8.
- Cho, S.-H., Ha, K., Kim, T., Cheon, S.-H., and Song, M.-Y., 2007, Hydrograph separation for two consecutive rainfall events using tracers ( $\delta^{18}\text{O}$  & Cl). *J. Geol. Soc. Korea*, **43**(2), 253-263.
- Descroix, L., Nouvelot, J. F., and Vauclin, M., 2002, Evaluation of an antecedent precipitation index to model runoff yield in the western Sierra Madre (North-west Mexico), *J. Hydrol.*, **263**(1), 114-130.
- Detty, J.M. and McGuire, K., 2010, Threshold changes in storm runoff generation at a till-mantled headwater catchment, *Water Resour. Res.*, **46**(7), W10543, doi:10.1029/2010WR009341.
- Eckhardt, K., 2005, How to construct recursive digital filters for baseflow separation, *Hydrol. Process.*, **19**(2), 507-515.

- Fedora, M.A. and Beschta, R.L., 1989, Storm runoff simulation using an antecedent precipitation index (API) model, *J. Hydrol.*, **112**(1), 121-133.
- Garstka, W.V., Love, L.D., Goodel, B.C., and Bertle, F.A., 1958, Section 7-- Recession analyses. In: Factors Affecting Snowmelt and Streamflow, USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Ft. Collins, Colo., 63-70.
- Gwak, Y.-S., Kim, S.-J., Lee, E.-H., Hamm, S.-Y., and Kim, S.H., 2016, Soil water storage and antecedent precipitation index at gwangneung humid-forested hillslope, *Korea J. Agr. For. Meteorol.*, **18**(1), 30-41.
- Heller, K. and Kleber, A. 2016, Hillslope runoff generation influenced by layered subsurface in a headwater catchment in Ore Mountains, Germany. *Environ. Earth Sci.*, **75**(11), 1-15.
- Heo, C.-H., Lim, K.-S., Ahn, K.S., and Hong, H.K., 2002, Flood runoff simulation model by using API, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **35**, 331-344.
- Hong, E.-M., Choi, J.-Y., Nam, W.-H., and Yoo, S.-H., 2009, Analysis of soil moisture recession characteristics in conifer forest, *J. Korean Soc. Agr. Eng.*, **53**(4), 1-9.
- Kim, G.-B., Yun, H.-H., and Kim, D.-H., 2006, Relationship between standardized precipitation index and groundwater levels: A proposal for establishment of drought index wells, *J. KoSSGE*, **11**(3), 31-42.
- Kim, N.-H., Hamm, S.-Y., Kim, T.-Y., Jung, J.Y., Jeon, H.T., and Kim, H.S., 2008, Estimation of groundwater storage change and its relationship with geology in Eonyang area, Ulsan megacity, *J. Eng. Geol.*, **18**, 263-276.
- Kim, S.-H., 2014, Hydrometric transit times along transects on a steep hillslope, *Water Resour. Res.*, **50**(9), 7261-7284.
- Kim, S.-U., Yu, H.-S., and Woo, Y.-K., 1976, Geological map of Gongju, 1:50,000, KIGAM, 29 p. (in Korean)
- KNPS, 2010, Resource Monitoring of Gyeryong National Park, 51-67. (in Korean)
- KNPS, 2012, Nature Resources Investigation of Gyeryong National Park, The report of research of KNPS, 652 p. (in Korean)
- Kobashi, S. and Suzuki, M., 1987, The critical rainfall (danger index) for disasters caused by debris flows and slope failures, *IAHS-AISH publication* **165**, 201-211.
- Lee, I.-S. and Lee, H., 2014, Analysis of secular changes in the hydrological characteristics of a small forested watershed using a baseflow recession curve, *J. Korean For. Soc.*, **103**(3), 383-391.
- Legates, D.L. and McCabe Jr., G.J., 1999, Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, *Water Resour. Res.*, **35**(1), 233-241.
- McGlynn, B.L., 2003, Distributed assessment of contributing area and riparian buffering along stream networks, *Water Resour. Res.*, **39**(4), doi:10.1029/2002WR001521.
- McGuire, K.J. and McDonnell, J.J., 2010, Hydrological connectivity of hillslopes and streams: characteristic timescales and nonlinearities, *Water Resour. Res.*, **46**(10), W10543, doi:10.1029/2010WR009341.
- Moon, S.K. and Woo, N.C. 2001, Estimation of groundwater recharge ratio using cumulative precipitation and water-level change, *J. Korean Soc. Groundwater Environ.*, **6**(1), 33-43.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970, River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles, *J. Hydrol.*, **10**(3), 282-290.
- Park, J.-S., Kim, K.-T., and Choi, C.-K., 2012, Analysis on rainfall characteristics in mountainous river basin, *Conference of Korea Water Resources Association*, Jeongseon, Korea, p. 886.
- Penna, D., Tromp-van Meerveld, H.J., Gobbi, A., Borga, M., and Dalla Fontana, G., 2011, The influence of soil moisture on threshold runoff generation processes in an alpine headwater catchment, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **15**(3), 689-702.
- Sidle, R.C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M., and Shimizu, T., 2000, Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm, *Hydrol. Process.*, **14**(3), 369-385.
- Sidle, R.C., Kim, K., Tsuboyama, Y., and Hosoda, I., 2011, Development and application of simple hydrogeomorphic model for headwater catchment, *Water Resour. Res.*, **47**(3), W00H13.
- VanSickle, J. and Beschta, R.L., 1983, Supply-based models suspended sediment transport in streams, *Water Resour. Res.*, **19**(3), 768-778.
- Vorosmarty, C.J., Green, P., Salisbury, J., and Lammers, R.B., 2000, Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, **289**(5477), 284-288.
- Ward, R.C., 1984, On the response to precipitation of headwater streams in humid areas, *J. Hydrol.*, **74**(1), 171-189.
- Western, A. W. and Grayson, R. B., 1998, The Tarrawarra data set: soil moisture patterns, soil characteristics and hydrological flux measurements, *Water Resour. Res.*, **34**(10), 2765-2768.