

Original article

산지계류에 있어서 홍수기의 강우사상에 대한 유출수문곡선 분리 및 특성 분석

남수연 · 전근우¹ · 이재욱² · 강원석³ · 장수진*

강원대학교 산림과학연구소, ¹강원대학교 산림과학부, ²강원대학교 대학원 산림환경시스템학과, ³국립산림과학원 산림육성복원연구과

Hydrograph Separation and Flow Characteristic Analysis for Observed Rainfall Events during Flood Season in a Forested Headwater Stream. Sooyoun Nam (0000-0001-5883-476X), Kun-Woo Chun¹ (0000-0003-4393-4762), Jae Uk Lee² (0000-0001-8222-8110), Won Seok Kang³ (0000-0002-0915-2276) and Su-Jin Jang* (0000-0002-0753-1862) (Institute of Forest Science, Kangwon National University, 1 Gangwondaehakgil, Chuncheon-si, Gangwon-do 24341, Republic of Korea; ¹Division of Forest Science, Kangwon National University, 1 Gangwondaehakgil, Chuncheon-si, Gangwon-do 24341, Republic of Korea; ²Department of Forestry and Environmental Systems, Graduate School, Kangwon National University, 1 Gangwondaehakgil, Chuncheon-si, Gangwon-do 24341, Republic of Korea; ³Division of Resource Management and Restoration, National Institute of Forest Science, Seoul 02445, Republic of Korea)

Abstract We examined the flow characteristics by direct runoff and base flow in a headwater stream during observed 59 rainfall events of flood season (June~September) from 2017 to 2020 yrs. Total precipitation ranged from 5.0 to 400.8 mm, total runoff ranged from 0.1 to 176.5 mm, and runoff ratio ranged from 0.1 to 242.9% during the rainfall events. From hydrograph separation, flow duration in base flow (139.3 days) was tended to be longer than direct runoff (78.3 days), while the contribution of direct runoff in total runoff (54.2%) was greater than base flow (45.8%). The total amount and peak flow of direct runoff and base flow had the highest correlation ($p < 0.05$) with total precipitation and duration of rain among rainfall and soil moisture conditions. Dominant rainfall events for the total amount and peak flow of base flow were generated under 5.0~200.4 and 10.5~110.5 mm in total precipitation. However, when direct runoff occurred as dominant rainfall events, total amount and peak flow were increased by 267.4~400.8 and 169.0~400.8 mm in total precipitation. Therefore, the unique aspects of our study design permitted us to draw inferences about flow characteristic analysis with the contribution of base flow and/or direct runoff in the total runoff in a headwater stream. Furthermore, it will be useful for the long-term strategy of effective water management for integrated surface-groundwater in the forested headwater stream.

Key words: base flow, direct runoff, duration of rain, total precipitation

서론

Manuscript received 4 February 2021, revised 11 March 2021,
revision accepted 12 March 2021
* Corresponding author: Tel: +82-33-250-8310, Fax: +82-33-259-5617
E-mail: sujintang@kangwon.ac.kr

최근 지구온난화, 엘니뇨, 라니냐 등 기후변화로 인한
기온과 수온 상승은 물순환 시스템에 영향을 주고 있다

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

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, provide the original work is properly cited.

(IPCC, 2007; Alexander, 2016; MOLIT, 2016). 특히, 전 세계적으로 극한강우의 발생빈도 및 그 규모가 증가함으로써, 수자원을 안정적으로 확보하기 어려워지고 있는 추세이다(Manton *et al.*, 2001; KMA, 2009; Westra *et al.*, 2014). 우리나라의 경우도 최근 20년간(2001~2020년) 연강수량은 1,318 mm로 과거 1981~2010년에 비하여 약 0.8% 높았지만, 강수일수는 1.4% 감소하는 등, 80 mm day⁻¹ 이상의 집중호우가 발생한 빈도는 16.7% 정도 증가하였으며(KMA, 2020), 대부분의 강우는 홍수기인 6~9월에 편중되고 있다(KMA, 2009; MOLIT, 2016).

한편, 우리나라의 연평균강수량(1978~2007년)은 세계 평균의 약 1.6배에 해당하는 1,277.4 mm이고, 연간 수자원 총량(2015년 기준)은 1,323억 m³이지만, 높은 인구밀도와 물 수요의 증가로 인해 1인당 연간 강수 총량(2,629 m³)은 세계 평균의 16% 수준이다(MOLIT, 2011). 즉, 실제로 연간 이용가능한 물의 양은 수자원총량의 약 28%에 해당하는 372억 m³이다(K-water, 2019). 특히, 점차 심화되고 있는 기후변화와 극한강우의 발생 및 편중(K-water, 2019)으로 인해 이용가능한 물의 계절별, 연도별, 유역별 등 시·공간적 편차는 더욱 커질 것이다(Chang *et al.*, 2007; Bae *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2012). 결국, 편중된 물의 이용은 전체 수계의 지하수를 비롯한 수자원의 확보 및 관리를 더욱더 어렵게 만들게 될 것이다(e.g., Lee and Kwon, 2015; MOLIT, 2016).

우리나라는 전 국토의 63.5%가 산림지대이고(KFS, 2019), 산림 내를 흐르는 산지계류 역시 전체 수계연장의 88.9% 이상(Kim and Han, 2008)을 차지하고 있어서 수계의 수자원 공급 및 관리 측면에서 산림과 산지계류의 역할이 매우 중요하다(Jun *et al.*, 2007). Kim *et al.* (2011)은 산지계류가 물과 토사 및 각종 영양염류·유기물의 근원지인 동시에 이들을 하류의 대하천까지 공급하는 중간지대로서의 중요한 역할을 갖고 있다고 설명하였다. Meyer *et al.* (2007)도 산지계류는 생물종이 다양하고, 풍부하여 전체 수계의 건전한 계류생태계를 유지하는 데에 도움을 준다고 보고하였다. 따라서, 전체 수계의 이용가능한 수자원의 공급량은 산지계류에 의해 결정된다고 할 수 있다(Sidle *et al.*, 2000; Meyer and Wallance, 2001; Gomi *et al.*, 2002).

유역의 상류부에 위치하고 있는 산지계류는 하류부에 위치하고 있는 하천이나 호수와 비교하여 평상시에는 상대적으로 유량이 적거나 간헐천(ephemeral stream)의 특성을 보이는 곳이 많기 때문에(Kim *et al.*, 2020), 강우에 대한 유출의 정량적 변화를 파악하는 것이 매우 중요하다(Wenninger *et al.*, 2008; Nippgen *et al.*, 2016). 또한, 유출

수문곡선에 의해 분리한 직접유출과 기저유출의 특성을 분석하여 산지계류에 있어서의 홍수조절 및 갈수완화 등과 같은 유출의 정성적 변화도 파악해야 할 필요가 있다(Sidle *et al.*, 2000, 2001; Lee and Lee, 2014). 선행연구에 따르면, Dung *et al.* (2012)은 일본 미에현(三重県)에 있는 산지계류에서의 강우에 따른 총 유출고는 60.5 mm였으며, 이 중 평균 직접유출고(22.6 mm)는 Horton의 지표면 유출(Horton overland flow)의 영향으로 평균 기저유출고(37.8 mm)보다 적었다고 보고하였다. 그리고 Jung *et al.* (2010)은 천성산 내 산지고층습원에서 강우사상(43.1~217.3 mm)에 대한 총 유출고는 6.3~30.2 mm로 나타났으며, 특히 직접유출고의 감소는 지하수유출에 영향으로 기저유출고의 감소보다 빠르게 발생하였다고 보고한 바 있다. 또한, Sklash *et al.* (1986)은 뉴질랜드 타파이에 있는 산지계류에서 강우사상에 대한 직접유출고는 포화 지표면 유출(saturation overland flow) 및 대공극류(macropore flow)의 영향으로 기저유출고보다 3~4배 이상 높게 발생하였다고 설명하였다. Masiyandima *et al.* (2003)은 서아프리카 코트디부아르 중부에 있는 산지계류에서 전체 유출고의 20~40%가 포화초과 지표면 유출(saturation excess overland flow)에 의해 발생하였다는 연구결과를 제시하기도 하였다.

그러나 강우사상에 대한 유출수문곡선 분리 및 특성에 관한 양질의 신뢰성 있는 자료를 확보할 수 있는 하천유역(e.g., An and Shin, 2005; Lee *et al.*, 2010; Hwang *et al.*, 2017)에 비해 소수의 선행연구(e.g., NIFS, 2002; Lee and Lee, 2014; Jung *et al.*, 2020)를 제외하면, 국내의 산지계류를 대상으로 중·장기적 강우-유출을 해석한 연구는 상대적으로 부족하다. 특히, 직접유출과 기저유출의 분리 및 특성을 분석하는 연구는 저유량 및 갈수량에 대한 유출의 기여도에 따라 산지계류의 수량 및 수질 관리의 우선순위를 결정할 수 있는 지표에 활용할 수 있다(e.g., Park and Lee, 2000; Sidle *et al.*, 2001; Masiyandima *et al.*, 2003)는 측면에서 그 중요도가 매우 높다. 따라서 이 연구는 산지계류에 있어서 4년간 홍수기(6~9월)에 발생한 강우사상에 대한 유출고 변화를 분석하였으며, 강우사상에 대한 유출수문곡선에 의해 분리한 직접유출과 기저유출의 특성 및 이에 영향을 미치는 강우조건을 확인하였다. 그리고 산지계류에 있어서 강우사상에 대한 직접유출고와 기저유출고가 총 유출고에 미치는 기여도를 제시함으로써, 지속가능한 수자원의 이용 및 관리에 중요한 기초자료로서 활용하고자 하였다.

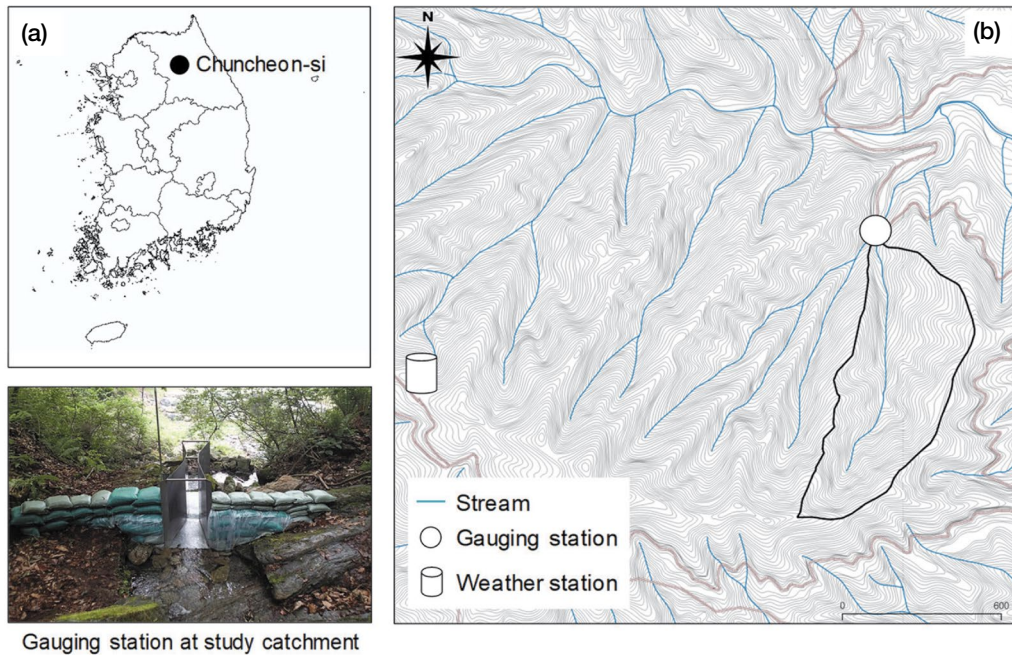


Fig. 1. Location of the study site and monitoring station in a forested headwater stream (a) shows the location of study site within Korea and (b) indicates the distribution of gauging station.

재료 및 방법

1. 연구대상지

연구대상지는 강원도 홍천군 북방면 북방리 산61-1번지에 위치한 강원대학교 학술림 내 산지계류(N37°47'50.86", E127°50'49.26")로서, 유역면적은 23.4 ha이며, 고도는 335~658 m이다(Fig. 1(a) and (b)). 그리고 기상청 팔봉 방재기상관측소(Automatic Weather Station, AWS)의 평년값 자료(1998~2019)에 따르면, 연평균기온은 10.7 ± 0.5 (\pm Standard Deviation, SD) $^{\circ}\text{C}$ 이며, 연평균강수량은 $1,333.3 \pm 357.0$ mm로 이 중 63.5%가 여름철(6~9월)에 집중되고 있다. 이 계류는 상수가 있는 유역으로, 계곡의 형태는 직선부와 곡선부가 복합적으로 나타나는 1차수이고, 계류 폭은 0.6 m, 계상물매는 0.24 m m^{-1} , 계상재료는 대부분이 호박돌과 자갈로 구성되어 있다. 목본의 수관투영면적은 71% 이상(밀)에 해당하므로 울폐도가 높은 편이다. 또한, 임상은 낙엽활엽수 71%, 침엽수 29%로 구성된 혼효림으로 주요수종은 떡갈나무, 신갈나무, 물푸레나무, 층층나무, 잣나무, 일본잎갈나무 및 소나무이며, 평균수고 15~17 m, 평균흉고직경 26~32 cm, 평균입령 66~83년(VII~IX영급)이다.

2. 강우-유출 자료

이 연구는 2017년부터 2020년까지 실시한 현지 모니터링 결과 중에서, 강우가 집중적으로 발생한 홍수기(6~9월)의 자료를 중심으로 분석하였다. 즉, 기본적으로는 6월 1일부터 9월 30일까지 측정된 자료를 이용하였지만, 2019년은 수위계의 분실 및 고장의 사유로 인해 6월 13일부터 8월 26일까지 측정된 자료를 사용하였다.

그리고 유출고는 파살플룸(Parshall flume) (폭: 0.15 m, 길이: 1.53 m, 높이: 0.60 m)에 설치한 막대식 수위계(TruTrack WT-HR 1000)를 사용하여 1시간 간격으로 측정된 수위자료를 식(1)과 (2)에 의해 계산하였다(ISO-9826, 1992).

$$Discharge = 0.381h_a^{1.580} \quad (1)$$

$$Runoff = Discharge \times Area^{-1} \quad (2)$$

Discharge: 유량($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)

h_a : 상류부의 수위(mm)

Runoff: 유출고(mm)

Area: 유역면적(23.4 ha)

한편, 강우량은 산지계류의 수위자료 측정지점과 1.4 km 거리에 위치한 산림청 산악기상관측망(<http://mw.nifos>).

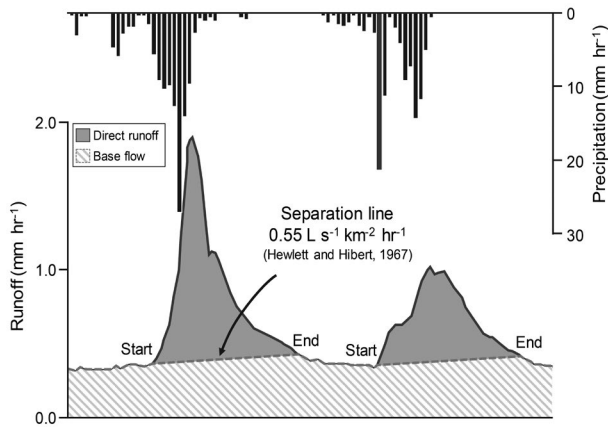


Fig. 2. Hydrograph separation procedure. The flood flow period begins from the start of hydrograph rise and ends when the falling limb intercepts the extended separation line with a slope of $0.55 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ (ref., Hewlett and Hibbert, 1967).

go.kr) 연엽산 관측소에서 1시간 간격으로 관측된 자료를 활용하였고, 유출률은 강우사상 동안 총 강우량에 대한 총 유출고의 비율로 계산하였다.

3. 강우사상에 대한 유출수문곡선 분리

강우사상은 「강우 종료 후 무강우시간(24시간)」을 기준으로 구분하였으며 (i.e., Gomi *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2013; Jeong *et al.*, 2019), Fig. 2와 같은 방법으로 강우사상에 대한 유출수문곡선에서 직접유출과 기저유출을 분리하였다.

한편, 강우사상에 대한 직접유출과 기저유출을 분리하는 방법에는 물수지 분석법, 해석적 방법, 유출수문곡선의 기저유출분석법, NRCS-CN 방법 등의 명확한 이론에 기초한 다양한 기법들이 있다 (e.g., Bae and Kim, 2006; Lee *et al.*, 2008; Yang and Chi, 2011; Yoo *et al.*, 2014). 그러나 대부분의 방법은 하천이나 호수를 대상으로 분석하고 있으므로, 산지계류에 적용하기에는 복잡한 수문조건을 단순화하는 과정에서 자료의 오차가 발생할 수 있다는 위험성을 내포하고 있다 (e.g., Lee and Lee, 2014; Jung *et al.*, 2020). 따라서 이 연구에서는 독립적인 표준유역에 따른 특성을 고려하여 강우사상 동안 발생한 유출고에 경사의 분리선 (separation line = $0.55 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ hr}^{-1}$; see Fig. 2)을 적용한 Hewlett and Hibbert (1967)의 분리법을 통해 직접유출과 기저유출을 분리하였다. 이 방법은 주로 산지계류 (headwater, $\leq 1 \text{ km}^2$ in drainage area; see Gomi *et al.*, 2002)에서 주로 이용하고 있을 뿐만 아니라 (e.g., Scott, 1997; Onda, 2008; Dung *et al.*, 2012; Shinomiya *et al.*,

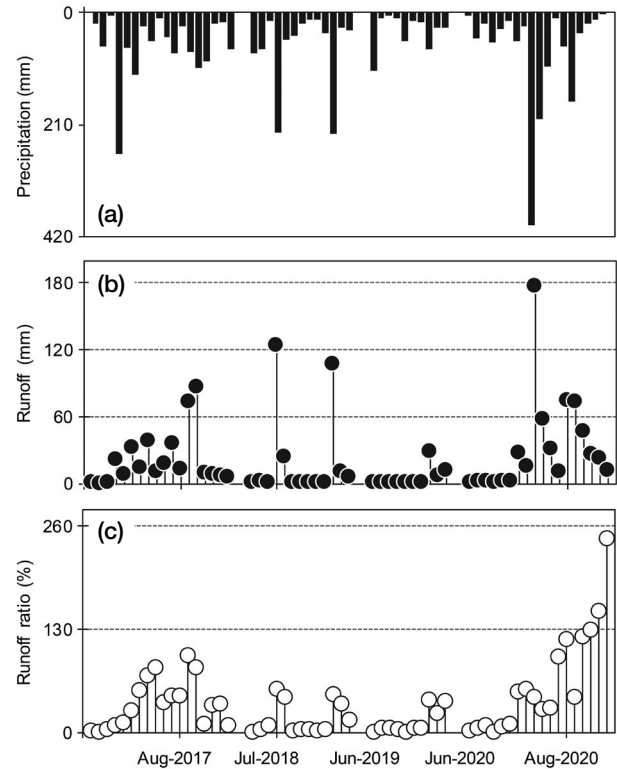


Fig. 3. (a) Precipitation, (b) runoff, and (c) runoff ratio in a forested headwater stream during observed rainfall events of flood season from 2017 to 2020 yrs.

2014, 2020), 수평분리법이나 지하수 감수곡선을 고려한 방법과 같이 연구자에 의한 임의성을 배제할 수 있다는 장점이 있다. 직접유출과 기저유출의 유출률은 강우사상 동안 총 강우량에 대한 각각의 직접유출고 및 기저유출고의 총량의 비율을 계산하여 산출할 수 있다 (e.g., Jung *et al.*, 2010).

4. 자료 분석

홍수기에 발생한 강우사상에 대한 유출수문곡선에서 분리한 직접유출과 기저유출에 영향을 미치는 강우조건을 파악하기 위해 직접유출과 기저유출에 대한 각각의 유출고, 첨두유출고 자료와 강우량, 1시간 최대 강우강도, 평균 강우강도, 강우지속시간 및 선행강우량 등의 강우자료를 이용하여 상관분석을 실시하였다 (Statistical Package for Social Sciences (SPSS), version 19). 이때, 선행강우량 (API, Antecedent Precipitation Index)은 강우사상 이전 시기에 발생한 강우가 현재의 강우-유출에 영향을 주는 강우량을 가리키며 (Lee, 2005; Gomi *et al.*, 2008), 이 연구에서는 강우사상별 강우가 시작되기 2일, 5일, 7일, 30일 이전의 누

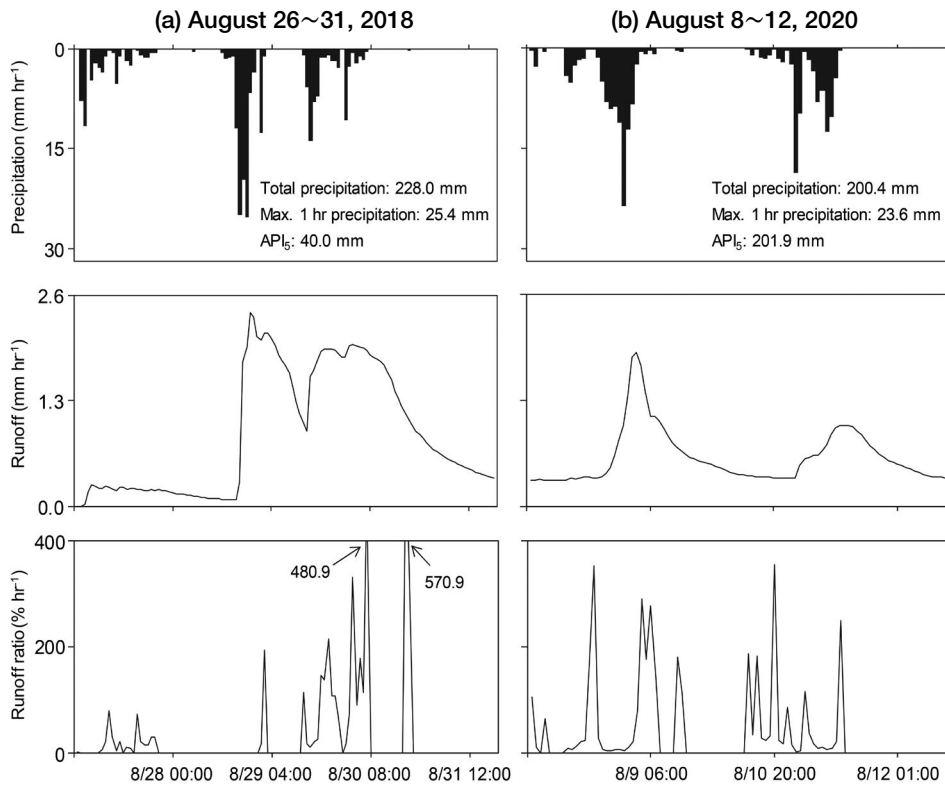


Fig. 4. Precipitation and runoff responses with runoff ratio during observed rainfall events on 26~31 August 2018 and 8~12 August 2020.

적강우량을 계산하여 분석하였다(e.g., Sidle and Ochiai, 2006; Dung *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2013; Yoo *et al.*, 2014). 여기서 2일, 5일, 7일 선행강우량(API₂, API₅, and API₇)과 30일 선행강우량(API₃₀)은 각각 표토층(surface soil)과 심토층(deep soil matrix)의 수분상태를 나타낼 수 있는 지표로 이용할 수 있다(i.e., Mosley, 1979; Fedora and Beschta, 1989; Sidle *et al.*, 2000; Huang *et al.*, 2016).

결과 및 고찰

1. 홍수기의 유출고 및 유출률 변화

2017~2020년 홍수기에는 총 59회(연간 최소 10회, 연간 최대 18회)의 강우사상이 발생하였으며, 강우량은 5.0~400.8 mm, 유출고는 0.1~176.5 mm, 유출률은 0.1~242.9%의 범위로 나타났다(Fig. 3(a), (b), and (c)). 이는 집중호우 및 가뭄이 반복되는 과정에서 나타나는 지표면 유출(overland flow), 중간유출 및 지하수유출로 인해 산지사면으로부터 유입되는 수량에 영향을 받아 유출량이 증가하거나 감소한 것으로 판단된다(Uchida *et al.*, 2005; Gomi *et al.*, 2008; Godsey and Kirchner, 2014).

4년 동안 홍수기의 유출률은 각각 32.2, 31.9, 14.1 및 45.1%이었다. 2019년은 유출자료의 결측으로 분석한 강우사상이 제한적이었기 때문에 유출률이 낮게 나타났으며, 2020년은 6월 하순부터 8월 중순까지 이어진 중부 지역 장마와 집중호우에 영향으로 2017~2018년에 비해 홍수기의 유출률이 높게 나타났다. 2019년을 제외하고 2017, 2018 및 2020년의 홍수기 평균 유출률은 36.4%(31.9~45.1%)로 나타났다.

그리고 강우패턴이 유사한 강우사상(2018년 8월 26~31일 및 2020년 8월 8~12일)을 선택하여 그 유출 특성을 분석한 결과(Fig. 4(a) and (b)), 강우사상 시 발생한 강우량은 각각 228.0, 200.4 mm, 최대강우강도는 각각 25.4, 23.6 mm hr⁻¹로서 유사하였지만, 2018년 8월 26~31일 유출고(106.6 mm)와 유출률(46.7%)은 2020년 8월 8~12일 유출고(57.5 mm)와 유출률(28.7%)보다 상대적으로 높게 나타났다. 이는 같은 여름철에 발생한 강우사상일지도 강우지속시간(94, 69 hr)에서 크게 차이가 나타난 것에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 5일 선행강우량(API₅)은 2018년 8월 26~31일(40.0 mm)이 2020년 8월 8~12일(201.9 mm)보다 상대적으로 적게 나타났다. 이는 최근 홍수기에 발생한 집중호우와 장기가뭄 등의 극한기후현상(e.g., Kim, 2020;

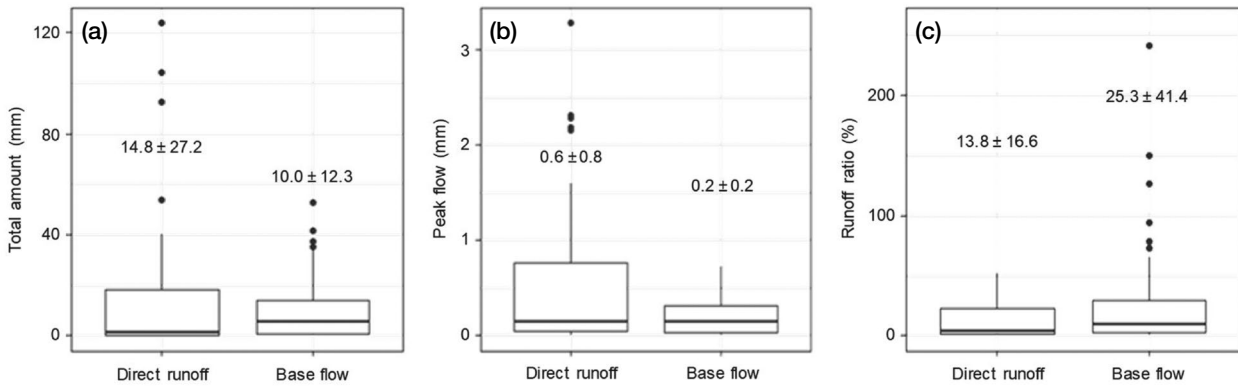


Fig. 5. Box plots of (a) total amount, (b) peak flow, and (c) runoff ratio of direct runoff and base flow during observed rainfall events of flood season. Lines within and adjacent to the box plots indicate the mean and standard deviation, respectively.

Table 1. Flow duration and contribution of direct runoff and base flow in total runoff during observed rainfall events.

Year	Runoff	Lag time (hr)	Flow duration		Contribution in total runoff (%)
			Days	%	
2017~2020 (Flood season)	Direct runoff	7.2 ± 9.3 (1.0~50.0)	78.3	56.2	54.2
	Base flow	29.8 ± 22.4 (1.0~97.0)	139.3	100.0	45.8

Note: ±: Standard deviation, Bracket: Range from minimum to maximum values, Days: Observed days of observed rainfall events for four years.

Kim and Choi, 2020)으로 인해 산지계류의 수분조건이 불안정하였던 상태가 반영된 것으로 판단된다.

2. 유출수문곡선에서 분리한 직접유출과 기저유출 비교

유출수문곡선(ref., Hewlett and Hibbert, 1967)에서 직접유출과 기저유출을 분리한 결과, 평균 유출고(mm)는 직접유출(14.8 ± 27.2)이 기저유출(10.0 ± 12.3)보다 높게 나타났으며(Fig. 5(a)), 평균 침투유출고(mm)도 직접유출(0.6 ± 0.8)이 기저유출(0.2 ± 0.2)보다 높게 나타났다(Fig. 5(b)). 그러나 평균 유출률(%)은 기저유출(25.3 ± 41.4)이 직접유출(13.8 ± 16.6)보다 높았으며(Fig. 5(c)), 평균 지체 시간(hr)은 기저유출(29.8 ± 22.4)이 직접유출(7.2 ± 9.3)보다 길게 나타났다(Table 1).

그리고 홍수기의 강우사상 동안 발생한 전체 유출 대비 기저유출(139.3일)이 직접유출(78.3일)보다 지속기간이 길게 나타났지만, 전체 유출고에 대한 기여도는 직접유출(54.2%)이 기저유출(45.8%)보다 크게 나타났다(Table 1). Hisada *et al.* (2012)은 일본 기후현(岐阜県)의 산림유역에서 2년간(2008~2009년) 관측된 연간 유출고에 대한 직접유출의 기여도는 활엽수림 유역(53.1%)이 침엽수

림(43.3%)보다 높다고 설명하였다. Noguchi and Fujieda (2007)도 일본 오타시(太田市)에 위치한 산림유역에서 7년간(1906~1912년) 관측된 연간 유출률은 침엽수림보다 활엽수림이 높았다는 연구결과를 보고하였다. 따라서 침엽수림의 홍수기 전체 유출에 대한 직접유출의 기여도는 이 유역인 침활혼효림(54.2%)보다 낮고, 활엽수림보다 높을 것으로 예상되었다. 더욱이 이 유역의 홍수기 기저유출비는 Kang *et al.* (2019)이 제시한 낙동강 수계의 홍수기 기저유출비(평균 40%)보다 높게 나타난 것으로, 일반적으로 하천보다 산지계류가 상대적으로 유량이 적거나 간헐천의 특성을 보이는 곳이 많기 때문에(Kim *et al.*, 2020), 유출 발생 시 지하수위의 상승으로 인해 발생한 기저유출이 해당 강우사상의 유출에도 영향을 미친 것으로 판단되었다(Yang and Chi, 2011). 특히, Nam *et al.* (2013)의 연구에서 제시한 국지적인 폭우나 집중호우로 인한 기저유출의 증감은 유출량이 급격히 증가하는 것에 영향을 미친다는 내용과도 일치하였다.

한편, 홍수기 전체 유출고에 대한 직접유출의 기여도가 높게 나타났으므로, 조사대상 산지계류에 있어서 홍수기의 전체 유출량 변화는 직접유출에 민감하게 영향을 받을 것으로 예상되었다. 따라서 산지계류의 유수가 일정하게

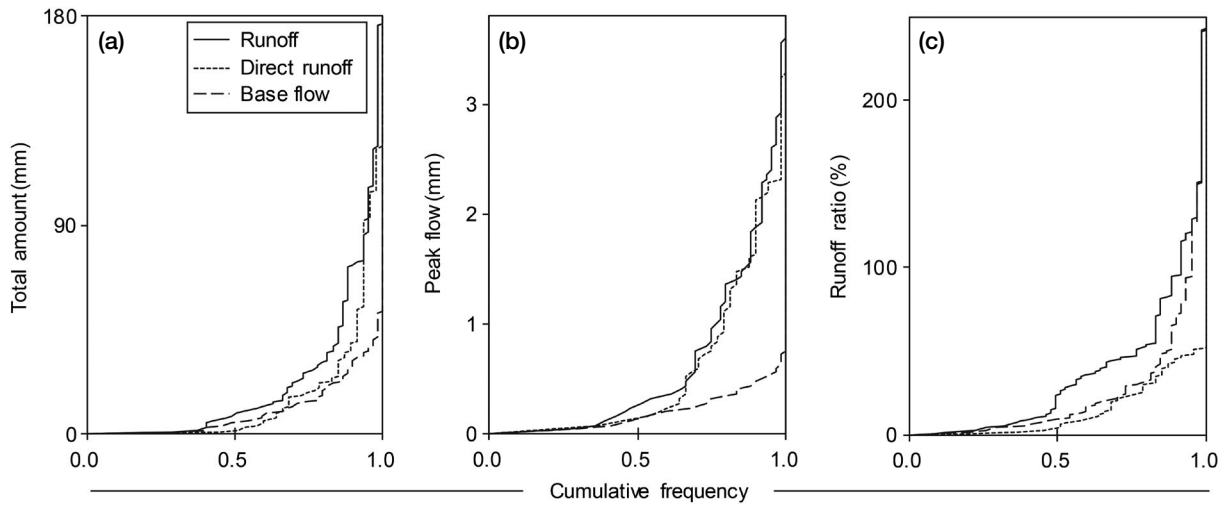


Fig. 6. Cumulative frequency distributions for (a) total amount, (b) peak flow, and (c) runoff ratio of runoff, direct runoff, and base flow during observed rainfall events of flood season.

상승 또는 하강하는지와 영구적으로 유출되는지, 일시적으로 다른 유출현상을 일으키는지 등과 같은 전체 유출과의 관계를 확인할 목적으로 (i.e., Harrold *et al.*, 1976) 직접 유출과 기저유출에 대한 누적빈도분포를 분석하였다 (Fig. 6). 그 결과, 직접유출은 유출고, 첨두유출고 및 유출률 모두 전체 유출과 유사한 형태로 증가하고 있는 형태를 나타내었다 (Fig. 6(a), (b), and (c)). 이는 홍수기의 많은 양의 강우 유입으로 포화된 토양 내에 저류되기 보다는 지표면 유출과 얇은 중간유출과 같이 즉시 계류로 유입되는 직접유출의 증가가 전체 유출의 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다. 즉, 홍수기에 있어서 조사대상 산지계류는 강우 시와 발생 직후에 직접유출이 유출 속도가 느린 깊은 중간유출과 지하수유출을 포함하는 기저유출보다 크게 영향을 받는다고 할 수 있다 (i.e., Sidle *et al.*, 2000, 2011; Dung *et al.*, 2012). 구체적으로는 전체 유출에 대한 직접유출의 기여도가 유출고 ≥ 10 mm, 첨두유출고 ≥ 0.2 mm일 때 기저유출보다 높은 것으로 나타났다 (Fig. 6(a) and (b)).

반면, 기저유출의 유출고, 첨두유출고 및 유출률은 전체 유출과 직접유출에 비해 완만한 형태로 증가하였다 (Fig. 6(a), (b), and (c)). 이는 유량이 풍부한 경우에 수두차에 의해서 토양층을 거쳐 얇은 지하대수층으로의 물의 이동이 일어나게 되는데 토양 내 강우의 저류량은 한계가 있기 때문에 (Onda, 2008), 기저유출량의 증감폭이 직접유출량의 증감폭보다 작게 나타난 것으로 판단되었다.

이와 같이 유출량의 평준화, 홍수조절 및 수원함양 증진 등의 목적으로 산림관리의 중요성을 제시하는 연구가 지속적으로 진행되고 있다 (e.g., Onda, 2008; Onda *et al.*,

2010; Lee and Lee, 2014). 더욱이 이 연구의 임분은 활엽수림 (VII영급)과 침엽수림 (IX영급)으로 구성된 장령림으로서, 장기적인 유출량의 평준화로 인한 홍수조절 및 수원함양기능의 증진을 위해서는 기준별기령에 따른 숲가꾸기 사업 (어린나무가꾸기, 풀베기, 가지치기, 솎아베기, 간벌 등)을 고려해야 한다고 판단된다 (e.g., Fujida *et al.*, 1996; Noguchi and Fujieda, 2007; Dung *et al.*, 2012). 그러나 사업이 이루어진 산림이 재조성될 때까지 홍수조절과 수원함양기능을 비롯한 대기정화, 탄소저장, 수질정화, 토사붕괴방지, 서식처제공 및 휴양·생태계서비스의 다양한 산림의 공익적 기능이 상실될 수 있으므로 합리적인 시·공간적 산림관리 계획을 수립하는 것이 중요한 것으로 판단된다.

3. 강우조건에 따른 직접유출 및 기저유출 분석

유출에 영향을 미치는 강우조건을 분석한 결과, 직접유출의 유출고와 첨두유출고는 강우량, 강우지속시간과 양의 상관관계 (Pearson's $r = 0.69 \sim 0.82$, $p < 0.01$)를 나타냈으며, 기저유출의 유출고와 첨두유출고는 강우량, 강우지속시간 및 선행강우량 (5, 7, 30일)과 양의 상관관계 (Pearson's $r = 0.33 \sim 0.67$, $p < 0.05$)를 나타냈다 (Table 2). 즉, 유출고와 첨두유출고에 상대적으로 높은 상관성을 보이는 강우조건은 강우량과 강우지속시간으로 나타났다.

이상의 상관관계 분석 결과를 이용하여 강우량과 강우지속시간에 따른 유출고와 첨두유출고의 변화를 기저유출이 직접유출보다 많을 때 (Direct runoff < Base flow, DR < BF), 직접유출이 기저유출보다 많을 때 (Direct

Table 2. Correlation analysis between direct runoff and base flow and both rainfall and soil moisture characteristics.

	Direct runoff ($n=47$)		Base flow ($n=59$)	
	Total amount	Peak flow	Total amount	Peak flow
Total precipitation	0.82	0.75	0.55	0.33
Max. 1 hr precipitation	0.24	0.31	0.16	0.12
Mean rainfall intensity	-0.01	-0.02	-0.20	-0.20
Duration of rain	0.76	0.69	0.67	0.38
API ₂	0.04	0.11	0.00	0.03
API ₅	0.18	0.28	0.43	0.43
API ₇	0.04	0.16	0.35	0.39
API ₃₀	0.01	0.19	0.60	0.67

Note: n : number of observed rainfall events, API₂, API₅, API₇ and API₃₀: Antecedent Precipitation Indices for 2, 5, 7, and 30 days, respectively, Correlation is significant at $p < 0.05$ level as bold type using a Pearson's Product-Moment Correlation.

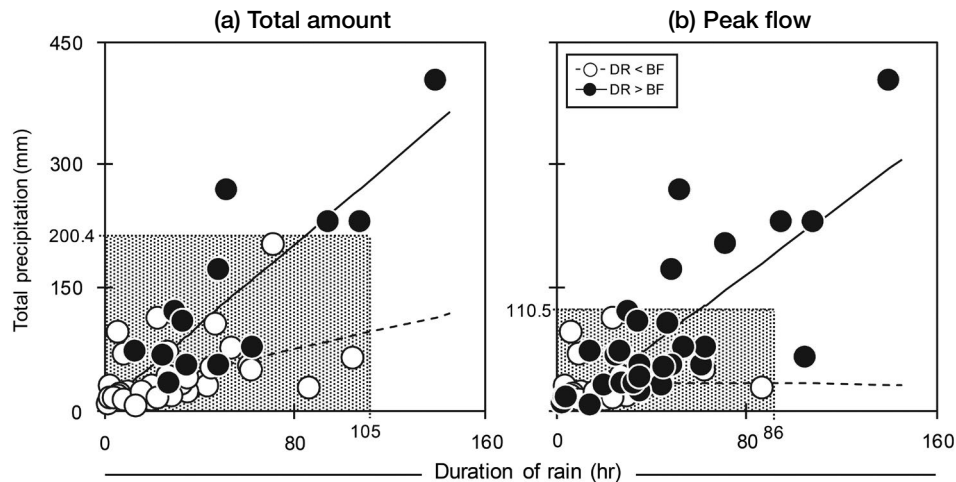


Fig. 7. Duration of rain and total precipitation for (a) total amount and (b) peak flow during observed rainfall events of flood season. Open circles show high base runoff values (direct runoff (DR) < base flow (BF)). Solid circles indicate high direct runoff values (direct runoff (DR) > base flow (BF)). The dotted area indicates concentrated distribution of high base flow between duration of rain and total precipitation.

runoff > Base flow, DR > BF)로 구분하여 Fig. 7과 같이 산포도로 나타내었다. 그 결과, 유출고와 침투유출고에서 DR < BF와 DR > BF는 강우지속시간이 증가함에 따라 강우량이 증가하는 경향이 나타났지만, DR > BF의 기울기는 2.463, 2.159로 DR < BF의 0.663, -0.032보다 더욱 가파르게 나타났으며, 결정계수는 DR > BF에서 0.700, 0.582로 더 높게 나타났다.

그리고 Fig. 7(a)와 (b)에서는 강우지속시간이 증가하더라도 강우량이 유출고에서는 5.0~200.4 mm, 침투유출고에서는 10.5~110.5 mm의 범위에서 유출고와 침투유출고의 경우 기저유출이 직접유출보다 우세한 강우사상을 나타냈다. 또한, 유출고와 침투유출고는 기저유출이 지표면

유출보다 높은 수치를 나타낸 강우사상이 많이 분포하였다. 일반적으로 산지계류에서는 강우지속시간이 증가함에 따라 강우량이 증가하면 유출고와 침투유출고에서 직접유출이 기저유출이 보다 우세하게 발생한다는 연구결과가 보고되었다 (Sidle *et al.*, 2001; Gomi *et al.*, 2008). 그러나 전술한 바와 같이 우리나라의 산지계류는 유량이 적거나 간헐천의 특징을 보이는 곳이 많기 때문에, 기저유출을 중심으로 지하수유출이 지속적으로 발생하여 유출고와 침투유출고의 변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다 (e.g., Bond *et al.*, 2002; Winter, 2007). 또한, Reeze (1972)는 기저유출의 유출변화는 지표면 유출과 포화 (saturation) 또는 불포화된 지중유출 (unsaturated subsurface flow)의 복잡한

상호작용에 영향을 받는 것으로 보고하였다.

한편, 강우지속시간과 관계없이 강우량이 유출고에서는 267.4~400.8 mm, 침두유출고에서는 169.0~400.8 mm의 범위에서 유출고와 침두유출고에서 직접유출이 기저유출보다 우세한 강우사상을 나타냈다(Fig. 7(a) and (b)). 이는 강한 강도의 강우로 인해 증가된 지표면 유출은 산지사면으로부터 계류로 유입되는 물의 양을 증가시키고, 이러한 일련의 과정들이 직접유출의 증가에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다(Sidle *et al.*, 2001; Gomi *et al.*, 2008). 또한, 유역의 상류부에 위치하고 있는 산지계류는 산지사면을 통해 유입된 많은 강우가 중간유출 및 지표면 유출에 의해(Markewich *et al.*, 1990; La Torre Torres *et al.*, 2011) 완만한 지형의 산지고층습원에 비해 단시간에 유출되므로(Lee and Kim, 2002; Jung *et al.*, 2010), 홍수기에는 유출고와 침두유출고에 대한 지표면 유출의 기여도가 기저유출보다 큰 강우사상이 주로 나타난 것으로 판단된다.

이 연구는 시·공간적인 면에서 제한적으로 진행되었으므로 향후 다수의 산지계류에서 장기적이고도 지속적인 수문자료를 수집하여 지표수-지하수의 관리(ref., KEI, 2015)에 관한 대책이 마련되어야 할 것이다. 특히, 집중호우와 장기가뭄 등과 같은 극한기후현상의 심화로 인해 산림수자원 이용에 대한 급격한 변화가 예상되므로, 보다 정확하고도 다양한 자료에 근거한 지표유출과 기저유출의 유출고·침두유출고 산출 및 기여도에 대한 분석이 필요하며, 이와 같은 연구가 축적될 때 지속가능한 수자원 이용 및 유역의 통합관리에 필요한 중요 자료로 활용될 것으로 기대된다.

적 요

이 연구는 지속가능한 수자원 이용 및 관리대책을 수립하는 데에 필요한 수문학적 자료를 제공할 목적으로 2017~2020년 홍수기(6~9월)에 발생한 총 59회의 강우사상에 대한 강우-유출 특성을 파악하였다. 그 결과, 강우량은 5.0~400.8 mm, 유출고는 0.1~176.5 mm, 유출률은 0.1~242.9%의 범위로 나타났다. 그리고 유출수문곡선에서 직접유출과 기저유출을 분리한 결과, 홍수기의 총 유출일 대비 기저유출(139.3일)이 직접유출(78.3일)보다 유출기간이 길었지만, 총 유출고에 대한 기여도는 직접유출(54.2%)이 기저유출(45.8%)보다 높게 나타났다. 또한, 유출에 영향을 미치는 강우조건을 분석한 결과, 직접유출과 기저유출의 유출고 및 침두유출고에 높은 유의성($p < 0.05$)을 보이는 강우조건은 강우량과 강우지속시간으

로 나타났다. 특히, 유출고와 침두유출고의 강우량은 각각 5.0~200.4, 10.5~110.5 mm의 범위에서는 기저유출이 우세한 강우사상이 나타났지만, 유출고와 침두유출고의 강우량이 각각 267.4~400.8, 169.0~400.8 mm의 범위에서는 직접유출이 우세한 강우사상이 나타났다. 앞으로 극한 기후현상에 따른 물 부족이 심화할 것으로 예상되는 가운데, 산지계류의 직접유출 및 기저유출에 대한 장기적이고도 지속적인 분석이 이루어진다면 지표수-지하수의 이용 및 관리 측면에서의 활용과 자료의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

저자정보 남수연(강원대학교 산림과학연구소 박사연구원), 전근우(강원대학교 산림과학부 명예교수), 이재욱(강원대학교 산림환경시스템학과 석사과정), 강원석(국립산림과학원 산림육성복원연구과 임업연구원), 장수진(강원대학교 산림과학연구소 박사연구원)

저자기여도 개념설정: 남수연, 장수진, 전근우, 원고작성: 남수연, 장수진, 강원석, 조사 및 수집: 장수진, 이재욱, 자료 분석: 남수연, 장수진

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

사사 이 연구는 환경부 표토보전관리기술개발사업(2019-002830002) 및 한국연구재단 이공분야학문후속세대양성사업(NRF-2020R1A6A3A01099801)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Alexander, L.V. 2016. Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: a review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond. *Climate and Weather Extremes* **11**: 4-16.
- An, K.G. and I.C. Shin. 2005. Influence of the Asian monsoon on seasonal fluctuations of water quality in a mountainous stream. *Korean Journal of Ecology and Environment* **38**(1): 54-62 (in Korean with English abstract).
- Bae, D.H., I.L. Jung and H.J. Chang. 2008. Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins. *Hydrological Processes* **22**: 2644-2656.
- Bae, S.K. and Y.H. Kim. 2006. Estimation of groundwater recharge rate using the NRCS-CN and the baseflow separation methods. *Journal of Environmental Science International* **15**(3): 253-260 (in Korean with English abstract).
- Bond, B.J., J.A. Jones, G. Moore, N. Phillips, D. Post and J.J. McDonnell. 2002. The zone of vegetation influence on base-

- flow revealed by diel patterns of streamflow and vegetation water use in a headwater basin. *Hydrological Processes* **16**: 1671-1677.
- Chang, H.J., J. Franczyk, E.S. Im, W.T. Kwon and D.H. Bae. 2007. Vulnerability of Korean water resources to climate change and population growth. *Water Science and Technology* **56**(4): 57-62.
- Dung, B.X., T. Gomi, S. Miyata, R.C. Sidle, K. Kosugi and Y. Onda. 2012. Runoff responses to forest thinning at plot and catchment scales in a headwater catchment draining Japanese cypress forest. *Journal of Hydrology* **444-445**: 51-62.
- Fedora, M.A. and R.L. Beschta. 1989. Storm runoff simulation using an antecedent precipitation index (API) model. *Journal of Hydrology* **112**(1-2): 121-133.
- Fujida, M., S. Noguchi and M. Ogawa. 1996. Effects of changes in forest condition on hydrologic environment - Case study of areas clearcut and logged by skidders -. *Journal of the Japanese Forest Society* **78**: 43-49 (in Japanese with English abstract).
- Godsey, S. and J.W. Kirchner. 2014. Dynamic, discontinuous stream networks: hydrologically driven variations in active drainage density, flowing channels and stream order. *Hydrological Processes* **28**: 5791-5803.
- Gomi, T., R.C. Sidle and J.S. Richardson. 2002. Understanding processes and downstream linkages of headwater systems. *Bioscience* **52**(10): 905-916.
- Gomi, T., R.C. Sidle, M. Ueno, S. Miyata and K. Kosugi. 2008. Characteristics of overland flow generation on steep forested hillslopes of central Japan. *Journal of Hydrology* **361**: 275-290.
- Gomi, T., Y. Asano, T. Uchida, Y. Onda, R.C. Sidle, S. Miyata, K. Kosugi, S. Mizugaki, T. Fukuyama and T. Fukushima. 2010. Evaluation of storm runoff pathway in steep nested catchments draining a Japanese cypress forest in central Japan: a geochemical approach. *Hydrological Processes* **24**: 550-566.
- Haga, H., Y. Matsumoto, J. Matsutani, M. Fujita, K. Nishida and Y. Sakamoto. 2005. Flow paths, rainfall properties, and antecedent soil moisture controlling lags to peak discharge in a granitic unchanneled catchment. *Water Resources Research* **41**: W12410.
- Harrold, L.L., G.O. Schwab and B.L. Bonduront. 1976. Agricultural and forest hydrology. Ohio State University Agricultural Engineering, Columbus, 273pp.
- Hewlett, J.D. and A.R. Hibbert. 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas, p. 275-290. In: International Symposium for Hydrology. Pergamon (Sopper, W.E. and H.W. Lull, eds.). New York.
- Hisada, S., M. Senge, K. Ito and T. Maruyama. 2012. Comparison of characteristic of water balance between evergreen coniferous and deciduous broad-leaved forests. *Transactions of The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering* **79**(1): 1-7 (in Japanese with English abstract).
- Huang, X., Z.H. Shi, H.D. Zhu, H.Y. Zhang, L. Ai and W. Yin. 2016. Soil moisture dynamics within soil profiles and associated environmental controls. *Catena* **136**: 189-196.
- Hwang, S.J., Y.B. Sim, B.G. Choi, K. Kim, C. Park, W. Seo, M.H. Park, S.W. Lee and J.K. Shin. 2017. Rainfall and hydrological comparative analysis of water quality variability in Euam Reservoir, the North-Han River, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**(1): 29-45 (in Korean with English abstract).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate change 2007: the physical science basis - summary for policy makers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC WGI 4th Assessment Report.
- International organization for standardization (ISO)-9826. 1992. Measurement of liquid flow in open channels parshall and SANIIRI flumes, pp. 1-10.
- Iwasaki, K., M. Katsuyama and M. Tani. 2020. Factors affecting dominant peak-flow runoff-generation mechanisms among five neighbouring granitic headwater catchments. *Hydrological Processes* **34**: 1154-1166.
- Jeong, H., S.Y. Jeong, S.J. Jang, Y.T. Lee, S.W. Kim and K.W. Chun. 2019. Rainfall-runoff characteristics and classification of recession curve in a small forested catchment in summer 2019. *Journal of Research of Forest of Kangwon National University* **39**: 8-17 (in Korean with English abstract).
- Jun, J.H., K.H. Kim, J.Y. Yoo, H.T. Choi and Y.H. Jeong. 2007. Variation of suspended solid concentration, electrical conductivity and pH of stream water in regrowth and rehabilitation forested catchments. South Korea. *Journal of Korean Forest Society* **96**(1): 21-28 (in Korean with English abstract).
- Jung, Y.G., K.H. Lee, H.T. Choi and H.H. Lee. 2020. Changes in hydrological characteristics of a forested watershed of Mt. Palgong. *Journal of Korean Forest Society* **109**(4): 429-437 (in Korean with English abstract).
- Jung, Y.G., S.W. Lee and H.H. Lee. 2010. Characteristics of rainfall-runoff and groundwater level change at Milbot Bog located in Mt. Cheonseong. *Journal of Korean Forest Society* **99**(4): 559-567 (in Korean with English abstract).
- Kang, H., Y.J. Hyun and S.M. Jun. 2019. Regional estimation of baseflow index in Korea and analysis of baseflow effects according to urbanization. *Journal of Korea Water Resources Association* **52**(2): 97-105 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.Y. 2020. Effect of regional climate change on precipitation in the 21st century. *Journal of the Korean Society for Environmental Technology* **21**(3): 205-210 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.J. and D.H. Han. 2008. A small stream management plan to protect the aquatic ecosystem, Korea Environment In-

- stitute Report (No. RE-09), 149pp (in Korean).
- Kim, S.W., K.W. Chun, C.M. Park, S.Y. Nam, Y.H. Lim and Y.S. Kim. 2011. The morphologic characteristics of step-pool structures in a steep mountain stream, Chuncheon, Gangwon-do. *Journal of Korea Society of Forest Science* **100**(2): 202-211 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., K.W. Chun, J.I. Seo, Y.H. Lim, S. Nam, S.J. Jang, Y.S. Kim and J.U. Lee. 2020. Origin and storage of large woody debris in a third-order mountain stream network, Gangwon-do, Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* **34**(3): 249-258 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., K.W. Chun, M.S. Kim, M.S. Kim, J.H. Kim and D.K. Lee. 2013. Rainfall intensity-duration thresholds for the initiation of a shallow landslide in South Korea. *Journal of Korean Forest Society* **102**(3): 463-466 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y and Y. Choi. 2020. An examination on characteristics of extreme high Temperature events by their types of the geographic extent over the Republic of Korea. *Journal of the Korean Geographical Society* **55**(2): 83-95 (in Korean with English abstract).
- Korea Forest Service (KFS). 2019. Statistical yearbook of forestry 2019. Korea Forest Service, Daejeon, Korea, 444pp (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2009. Meteorological Technology and Policy, Korea Meteorological Administration, Seoul, 77pp (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2020. Meteorological data. (<https://data.kma.go.kr>).
- Korean Environment Institute (KEI). 2015. Study on the development and implementation of baseflow index for the management of groundwater dependent ecosystems. Korean Environment Institute, Sejong, 124pp (in Korean with English abstract).
- K-water. 2019. Water for future. 457pp (in Korean).
- La Torre Torres, I.B., D.M. Amatya, G. Sun and T.J. Callahan. 2011. Seasonal rainfall-runoff relationships in a lowland forested watershed in the southeastern USA. *Hydrological Processes* **25**: 2032-2045.
- Lee, H.H. and J.H. Kim. 2002. The characteristics on the groundwater level change and rainfall-runoff in Moojechi Bog. *Korean Journal of Environment and Ecology* **16**(3): 239-248.
- Lee, I. and H. Lee. 2014. Analysis of secular changes in the hydrological characteristics of a small forested watershed using a baseflow recession curve. *Journal of Korean Forest Society* **103**(3): 383-391 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. 2005. Hydrology, Goomibook.
- Lee, J.Y. and K. Kwon. 2015. Groundwater resources in Gangwon Province: Tasks and perspectives responding to droughts. *Journal of the Geological Society of Korea* **51**(6): 585-595 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., W.H. Jeon, Y. Park and H.G. Lim. 2012. Status and prospect of groundwater resources in Pyeongchang, Gangwon-do. *Journal of the Geological Society of Korea* **48**(5): 435-444 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.J., J.C. Kim and J.W. Noh. 2010. Long term runoff simulation for water balance at Daecheong Basin. *Journal of the Environmental Sciences* **19**(10): 1211-1217 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.J., M.H. Hwang and I.W. Ko. 2008. Analysis and application of runoff component in catchment. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* **50**(2): 56-62 (in Korean).
- Manton, M.J., P.M. Della-Marta, M.R. Haylock, K.J. Hennessy, N. Nicholls and L.E. Chambers. 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. *International Journal of Climatology* **21**: 269-284.
- Markewich, H., M. Pavich and G. Buell. 1990. Contrasting soils and landscapes of the Piedmont and Coastal Plain, Eastern United States. *Geomorphology* **3**: 417-447.
- Masiyandima, M.C., N. Giesen, S. Diatta, P.N. Windmeijer and T.S. Steenhuis. 2003. The hydrology of inland valleys in the sub-humid zone of West Africa: rainfall-runoff processes in the M'bé experimental watershed. *Hydrological Processes* **17**: 1213-1225.
- Meyer, J.L. and J.B. Wallace. 2001. Lost linkages and lotic ecology: Rediscovering small streams, p. 295-317. In: Ecology: Achievement and Challenge (Huntly, M.C. and N.J. Levin, eds.). Oxford: Blackwell Scientific.
- Meyer, J.L., D.L. Strayer, J.B. Wallace, S.L. Eggert, G.S. Helfman and N.E. Leonard. 2007. The contribution of headwater streams to biodiversity in river networks. *Journal of the American Water Resources Association* **43**(1): 86-10.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2011. The long-term water management plan (2011-2020). Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong City, 253pp (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2016. The long-term water management plan (2001-2020). Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong City, 131pp (in Korean).
- Mosley, M.P. 1979. Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand. *Water Resources Research* **15**(4): 795-806.
- Nam, K.H., G.B. Kim and G.C. Jeong. 2013. Baseflow comparison using the WHAT system and flow rate measurements in the dry and rainy seasons. *The Journal of Engineering Geology* **23**(2): 117-125 (in Korean with English abstract).
- National Institute of Forest Science (NIFS). 2002. Long-term hydrological monitoring in the forested catchments, National Institute of Forest Science, Seoul, 183pp (in Korean).
- Nippgen, F., B.L. McGlynn, R.E. Emanuel and J.M. Vose. 2016.

- Watershed memory at the Coweeta Hydrologic Laboratory: The effect of past precipitation and storage on hydrologic response. *Water Resources Research* **52**: 1673-1695.
- Noguchi, S. and M. Fujieda. 2007. Forest-Watershed Experiment and proposal for future experiments. *Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute* **6**(2): 111-125 (in Japanese with English abstract).
- Onda, Y. 2008. Water and Sediment Discharge in Abandoned Plantations. Iwanami Shoten Publishers, Tokyo, 246pp (in Japanese).
- Onda, Y., T. Gomi, S. Mizugaki, T. Nonoda and R.C. Sidle. 2010. An overview of the field and modelling studies on the effects of forest devastation on flooding and environmental issues. *Hydrological Processes* **24**: 527-534.
- Park, J.B., D.S. Shin, M.J. Park, B.G. Kang and H.S. Shin. 2013. Rainfall thresholds estimation to develop flood forecasting and warning system for Nakdong small river basins. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* **13**(2): 311-317 (in Korean with English abstract).
- Park, J.C. and H.H. Lee. 2000. Variations of stream water quality caused by discharge change - at a watershed in Mt. Palgong -. *Journal of Korean Forest Society* **89**(3): 342-355 (in Korean with English abstract).
- Reeze, R.A. 1972. Role of subsurface flow in generating surface runoff 2. upstream source areas. *Water Resources Research* **8**(5): 1272-1283.
- Scott, D.F. 1997. The contrasting effects of wildfire and clearfelling on the hydrology of a small catchment. *Hydrological Processes* **11**: 543-555.
- Shinomiya, Y., M. Kobayashi, T. Tsurita, Y. Tsuboyama, S. Sawano, Y. Ohnuki and K. Shichi. 2020. Discharge of suspended solids and radiocesium into stream water in a forested watershed before and after line thinning with spur road construction. *Journal of Environmental Radioactivity* **225**: 106418.
- Shinomiya, Y., T. Yamada, Y. Inagaki, S. Yoshinaga and A. Torii. 2014. Evaluation of Annual nitrate nitrogen load and its runoff processes in a forested catchment in the Shimanto river headwaters. *Journal of Japan Society on Water Environment* **37**(3): 91-101 (in Japanese with English abstract).
- Sidle, R.C. and H. Ochiai. 2006. Landslides: Processes, Prediction, and Land Use, Water Resources Monograph vol.18, AGU, Washington, D.C. 312pp.
- Sidle, R.C., S. Noguchi, Y. Tsuboyama and K. Laursen. 2001. A conceptual model of preferential flow systems in forested hillslopes: evidence of self-organization. *Hydrological Processes* **15**(10): 1675-1692.
- Sidle, R.C., Y. Tsuboyama, S. Noguchi, I. Hosoda, M. Fujita and T. Shimizu. 2000. Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm. *Hydrological Processes* **14**: 369-385.
- Sklash, M., M. Stewart and A. Pearce. 1986. Storm runoff generation in humid headwater catchments: 2. A case study of hillslope and low-order stream response. *Water Resources Research* **22**(8): 1273-1282.
- Uchida, T., Y. Asano, Y. Onda and S. Miyata. 2005. Are headwaters just the sum of hillslopes?. *Hydrological Processes* **19**: 3251-3261.
- Wenninger, J., S. Uhlenbrook, S. Lorentz and C. Leibundgut. 2008. Identification of runoff generation processes using combined hydrometric, tracer and geophysical methods in a headwater catchment in South Africa. *Hydrological Sciences Journal* **53**(1): 65-80.
- Westra, S., H.J. Fowler, J.P. Evans, L.V. Alexander, P. Berg, F. Johnson, E.J. Kendon, G. Lenderink and N.M. Roberts. 2014. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics* **52**: 522-555.
- Winter, T.C. 2007. The role of ground water in generating streamflow in headwater areas and in maintaining base flow. *Journal of the American Water Resources Association* **43**(1): 15-29.
- Yang, J.S. and D.K. Chi. 2011. Correlation analysis between groundwater level and baseflow in the geum river watershed, calculated using the WHAT system. *The Journal of Engineering Geology* **21**(2): 107-116 (in Korean with English abstract).
- Yoo, J.Y., G.W. Moon, J.H. Ahn and T.W. Kim. 2014. Re-establishing the antecedent moisture condition of NRCS-CN method considering rainfall-runoff characteristics in watershed based on antecedent 5-day rainfall. *Korean Society of Civil Engineers* **34**(3): 349-858 (in Korean with English abstract).