


팔공산 산림소유역의 유출 특성 변화

정유경¹ · 이기환¹ · 최형태² · 이현호¹ 

¹영남대학교 산림자원학과, ²국립산림과학원 산림육성복원연구과

Changes in Hydrological Characteristics of a Forested Watershed of Mt. Palgong

Yu-Gyeong Jung¹, Ki-Hwan Lee¹, Hyung-Tae Choi² and Heon-Ho Lee¹ 

¹Department of Forest Resource, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

²Division of Resource Management and Restoration, National Institute of Forest Science, Seoul 02445, Korea

요약: 본 연구는 산림 소유역에서 강우량에 대한 계류유출량의 장기적인 변화추이를 정량화하고, 임목의 생장이 산림소유역의 유출변화에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하기 위하여 실시했다. 연도별로 강우량과 유출량은 비례관계를 보였으며, 시간이 경과할수록 유출량은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 월별 강우량과 유출량은 7월과 8월에 가장 높았으며, 유출률은 8월과 9월에 높은 값을 보여 강우량과 유출량, 유출률 변화가 반드시 일치하지는 않았다. 월별 변동계수(CV)는 강우량에 비해 유출량이 더 크게 나타났고, 강우량과 유출량 간의 편차는 점차 증가하였다. 강우량에 대한 총 유출량과 직접 유출량의 변화는 2011년~2017년의 추세선의 기울기가 더 낮아졌고, 기저유출량의 기울기는 증가하였다. 산림토양이 발달하면서 토양층의 수분보유력이 증가하였기 때문에 보여지며, 기저유출량의 증가는 팔공산 산림소유역의 유출수량 증가와 함께 지하수위 상승에 영향을 줄 것으로 판단된다. 감수곡선의 기울기는 2003년~2010년에 비해 2011년~2017년이 더 낮은 것으로 나타났고, 시간이 경과함에 따라 유출량의 감소가 완화되고 유출량이 일정하게 유지되었다. 따라서 팔공산 산림소유역은 임목의 생장에 따라 지표류의 유출이 감소하고 기저유출이 증가하는 것으로 나타나, 산림의 수원함양기능이 점차 증가하는 것으로 나타났다.

Abstract: In this study we quantified the long-term change in discharge against precipitation in a forested watershed and investigated how the growth of forest trees influences these changes. We found a proportional relationship between precipitation and discharge for each year, and discharge decreased gradually with time. Precipitation and discharge were highest in July and August, and the changes in precipitation, discharge, and runoff rate did not always coincide, given that high runoff rate was shown in August and September. The monthly coefficient of variation (CV) for discharge was larger than that for precipitation, and the deviation between precipitation and discharge increased gradually. From 2011 to 2017, the gradient of the trend line for the change of total discharge and direct runoff against precipitation decreased, whereas the gradient of the base flow increased in this same time period. A possible explanation is that the water holding capacity of soil deposits increased as the forest soil of the Palgong Mountain watershed developed and the increase of base flow rose with groundwater level together with that of outflow quantity. The coefficient of flood recession was lower in the period 2011 to 2017 than in 2003 to 2010; thus, the reduction of discharge was mitigated and remained steady as time progressed. We conclude from these results that the discharge of surface runoff decreased as tree growth and base flow increased; however, the water yield function of the forest increased gradually.

Key words: precipitation, direct runoff, baseflow, tree growth, coefficient recession

서론

* Corresponding author
E-mail: hhlee@ynu.ac.kr

ORCID

Heon-Ho Lee  <https://orcid.org/0000-0001-9797-2794>

산림은 우리나라 국토의 63%를 차지하고 있으며, 하천수의 발원지로서 전체 하천의 수량과 수질에 많은 영향을 미친다. 최근 기상이변으로 인해 홍수와 가뭄이 심화되면

서 지속가능한 수자원 관리를 위한 물순환 체계의 중요성이 높아지고 있고, 산림 물순환 매커니즘의 해석은 이용가능한 수자원 확보를 위해 그 필요성이 증대되고 있다 (K-water, 2019). 산림은 토양과 임목이 존재하고 있어 수분 보유력이 뛰어나고 외부에서 유입되는 오염원이 없어 깨끗한 수질을 유지하기 때문에 지속가능한 수자원 관리의 측면에서 좋은 대안으로 제시되고 있다. 그러나 산림에서는 강우로 수원을 공급받고 있어 계절적인 유출량의 변동성이 크기 때문에 물순환 매커니즘을 파악하는 것은 매우 어렵다. 산림에 도달한 강우는 차단손실, 증산, 침투, 투수, 유출 등의 다양한 과정을 거치게 되고, 임내에 존재하는 토양 및 식생과 상호작용을 하면서 수원함양 효과를 발휘하게 된다(National Institute of Forest Science, 2011). 이처럼 산림에서의 강우나 유출량의 장기적인 변화가 이용가능한 수자원의 증대와 효과적인 산림의 관리를 위해 가치 있는 정보를 제공할 수 있도록 산림에서의 유출 특성의 변화경향을 밝히는 것이 중요하다.

식생의 변화가 수문학적 요인에 영향을 준다는 것은 많은 연구를 통해 보고되어 왔다(Muñoz, et al., 2011; Jost et al., 2012; Liu et al., 2014). Hiker et al.(2014)과 Liu et al.(2018)은 식생이 수관차단이나 근계의 흡수를 통해 직·간접적으로 물의 분배에 영향을 미친다고 하였으며, Jiao et al.(2017)은 식물의 생장이 높은 증산작용과 낮은 유출, 토양수분, 유출의 발생경향을 감소시킨다고 보고하였다. Alvaregna et al.(2016)은 분리된 수문-토양-식생모델을 이용하여 브라질에서의 수문학적 영향평가를 실시하였고, 산림훼손이 토양의 퇴화를 초래하여 수자원 이용가능성의 저하를 초래할 수 있다고 하였다. Grace et al.(2006)은 수관이나 식생의 성장은 침투 용량과 보유력을 변화시켜 산림의 하층 조건을 개선할 수 있다고 보고하였다. Loaiciga et al.(1993)은 토양수분과 임목의 연륜폭과의 관계를 비교하여 제한된 토양수분 조건 하에서 연륜폭이 유출량과 기후 인자와의 상관성이 있다고 하였다.

이러한 연구들은 식생의 변화가 수문학적 인자에 미치는 영향을 파악하였지만, 강우사상의 수가 적거나, 대면적을 대상으로 연·월 단위의 유출량만을 이용하는 등 정밀성이 떨어지는 단점이 있다. 또한, 유출과정 분리 및 성장량과 유출량간의 직접적인 관련성에 대해서는 충분히 고려되지 않았다. 국내에서도 산림 내 소유역을 대상으로 한 장기 유출특성에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서, 장기적인 수문데이터를 이용하여 식생과 물순환에 대한 상호관계를 이해하는 것은 다양한 수문학적 요소의 변화경향을 보다 정확하게 예측하는데 도움이 될 것이며, 급변하는 기후에 대응할 수 있는 기초자료를 제공할 수 있을 것이다.

본 연구는 산림 소유역에서 강우량에 대한 계류유출의 장기적인 변화추이를 정량화하고, 감수계수의 기울기에 따른 산림소유역의 유출특성을 구명하고자 실시하였다. 또한, 산림소유역에서 임목성장함에 따라 소유역의 강우유출과 어떠한 연관을 가지는지를 파악하는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 연구대상지의 개황

본 연구는 산지 소유역의 유출특성을 분석하기 위하여 경상북도 경산시 와촌면에 위치한 팔공산 소유역을 대상으로 선정하였으며, 연구대상지의 위치는 Figure 1과 같다. 연구대상지는 지리적으로 북위 36°01'0.60"N, 동경 128°41'25.19"E에 위치하고 있고, 유역면적은 17.7 ha이며, 평균경사도는 29°로 조사되었다.

산림성장량을 파악하기 위해 전체 유역의 면적을 고려하여 총 6개의 방형구(15 m × 15 m)를 설치하고 각 방형구별로 1본의 표본목을 선정하여 총 6본의 임목을 조사하였다. 임목의 생장은 수종이나 방향 및 경사 등의 산림환경여건에 따라 성장량의 차이를 보이기 때문에 다양한 조건을 고려하였다. 표본목의 수종은 신갈나무(*Q. Mongolica*), 졸참나무(*Q. serrata Thunb. ex Murray*), 소나무(*P. densiflora*), 아까시나무(*R. Pseudoacacia. L*)이며, 표본목의 수고, 흉고 직경, 임령, 고도, 경사, 방향을 조사하여 Table 1에 나타내었다. 표본목의 수고는 6.9 m~22.4 m였으며, 임령은 37년생~63년생으로 조사되었다. 조사지점의 경사는 25°~35°로 평균 31.1°의 급경사지로 나타났고, 고도는 476 m~635 m로 조사되었다.

2. 임목생장의 측정임목생장의 측정

성장량은 표본목을 벌채하여 0.2 m 간격으로 원판을 획득하였고, 구분구적법에 따라 일정한 길이로 얻어진 원판의 재적을 합산하여 성장량을 측정하였다. 성장량의 산출은 아래 Huber식을 이용하였다.

$$T.G. = L \sum_{i=1}^n b_i + 1/3b_n L' \quad (1)$$

여기서, L은 통나무의 길이(=0.2), b는 흉고단면적, L'는 말구의 길이이다.

3. 수문데이터 수집 및 분석

1) 강우량 및 유출량

강우량과 유출량은 15년(2003년~2017년)동안의 연구

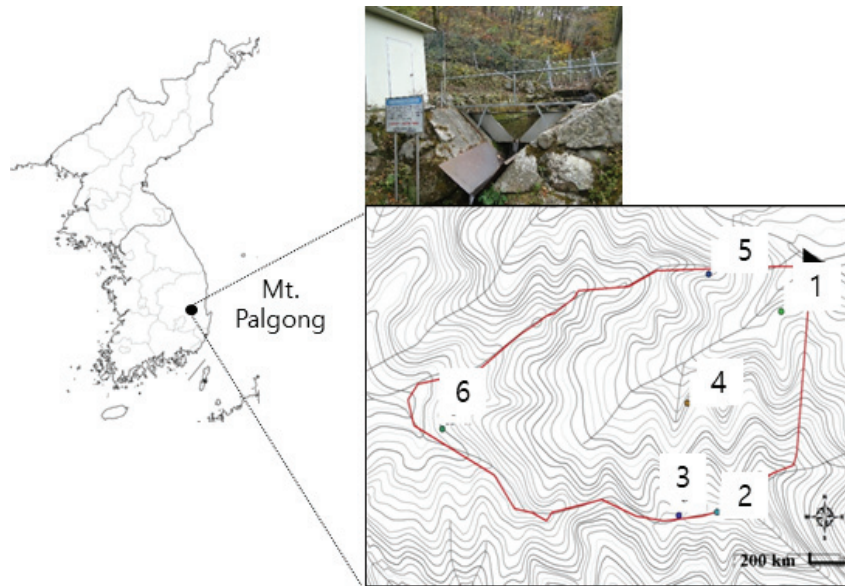


Figure 1. Location of the study area.

- note: 1. *Q. mongolica* (Q1) 2. *P. densiflora* (P2)
 3. *R. Pseudoacacia. L* (A3) 4. *Q. mongolica* (Q4)
 5. *P.densiflora* (P5) 6. *Q. serrata* Thunb. ex Murray (Q6)

Table 1. Morphological characteristics between tree sample in the study area.

NO.	H (m)	DBH (cm)	L.C.	A (m)	S.G. (°)	S.D.	T.G (m ²)
Q1	19.1	16	63	475.7	35	N	0.00039
P2	14.6	28	43	604.5	32	NE	0.07116
A3	6.9	12	46	599.8	28	NE	0.00989
Q4	22.4	24	37	527.8	35	NW	0.13647
P5	12.5	20	43	514.9	25	S	0.00355
Q6	15.1	16	61	635.4	32	E	0.02383

note: H Tree height
 D.B.H. Diameter ar breast height
 L.C. Length of tree chronology
 T.G. Total tree growth
 A Altitude
 S.G. Slope gradient
 S.D. Slope direction

대상지인 팔공산 산림소유역의 장기데이터를 수집하였고, 임목성장기인 4~10월까지의 데이터를 이용하였다. 11~3월의 데이터는 건기의 유출수량 부족이나 한파의 영향으로 일부 미계측 기간(2003년~2005년, 2009년, 2012년)이 다수 발생하여 분석자료에서 제외하였다.

강우량은 산림소유역 내 티핑버킷형 우량계를 설치하고 10분 간격으로 측정하였다. 결측치가 발생한 경우에는 8 km 인근의 영천기상대(AWS: 신녕 ID 826)의 자료를 이용하였다. 유출량은 소유역의 출구로 유출되는 계류수를 수집할 수 있는 저수조와 삼각 위어(Weir)을 설치하여 1시간 간격으로 월류수심을 측정하고, 측정된 수위데이터를 팔공산 소유역에 적용하기 위해 유도(개발)한 '수위-유량 환산공식'을 이용하여 유출량을 산출하였다. 수위-유량 환

산공식은 식 2와 같다.

$$Q = 2.115 \times (10^{-8}) \times ((H + 9.7036)^{2.6354} \times 3600 / 17.7) \quad (2)$$

여기서, Q는 유량(ton/ha/hour), H는 수위(cm)이다.

2) 변동계수

팔공산 산림소유역에서 연년 유량변화를 알아보기 위해 강우량과 유출량의 변동계수(CV)를 측정하였고, 산출식은 식 3과 같다.

$$CV = SD / mean \quad (3)$$

여기서, SD(standard deviation)는 월별 표준편차이며,

mean은 월별 평균값을 나타낸다. 변동계수는 표본의 표준편차를 평균값으로 나눈 값으로 산포도를 평균에 대비해 나타내는 상대적 개념의 통계량이다. 본 연구에서는 강우량과 유출량 간 변동의 상대적 비교를 통해 변화 경향을 분석하였다.

3) 유량분리

본 연구에서는 관측기간동안의 강우에 대한 유출특성을 명확하게 파악하기 위해 직접유출량과 기저유출량을 분리하였다. 장기간의 데이터를 분석하는데 있어 수문곡선 분리의 간편성을 고려해 수평직선 분리법을 이용하였으며, 단기수문곡선의 유량분리는 상승기점으로부터 수평선을 그어 감수곡선과 만나는 교점을 구하여 직접유출량과 기저유출량을 분리하였다. 침투유량에 도달한 후, 다음 호우 발생시까지 유출은 하강곡선을 그리게 되는데, 이 과정에서 지표면 및 중간유출, 지하수 유출이 발생한다. 감수곡선의 형태는 대수층의 특징에 따라 다르게 나타나므로 본 연구에서는 수문곡선의 침투유량에서부터 수문곡선이 종료되는 지점까지의 감수부의 기울기를 산출하고 감수곡선의 기울기를 측정하여 유출 변화를 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 임목생장에 따른 유출량 변화

1) 연도별 유출

팔공산 산림소유역에서 조사기간동안의 연도별 총 강우량은 503.7 mm~2,053.0 mm 범위로 나타나 연평균 1,099.7 mm의 값을 보였다(Figure 2). 연도별로는 2003년에 2,053.0 mm로 가장 많았고, 2008년과 2017년은 각각 503.7 mm, 583.9 mm로 나타나 연도별 강우량 편차가 매우 큰 것으로 나타났다. 연도별 유출량은 218.9 mm~1,450.0 mm의 범위였고, 평균 493.0 mm로 나타났다. 2003년에 1,450.0 mm로 가장 많았고, 2015년 218.9 mm로 가장 적었다. 연년 강우량과 유출량의 변화는 비례관계로 유출량은 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 유출량의 감소는 수관차단이나 토양침투능 등 다양한 원인에 기인하기 때문으로 판단된다.

임목의 연년생장량은 2003년에서 2005년까지 증가하다가 그 이후 2011년까지 생장량이 감소하는 것으로 나타났고, 2012년부터 다시 생장량이 증가하는 것으로 나타나 뚜렷한 증감의 경향을 보이지는 않았다.

연도별 유출률은 0.28~0.72로 나타났고, 연도별 값의 차이가 컸다. 2007년 0.72, 2003년 0.81, 2010년 0.70으로 높게 나타났고, 2016년 0.28로 가장 낮은 값을 보였다. 강우량이 매우 적었던 2008년(503.7 mm)과 2015년(640.9

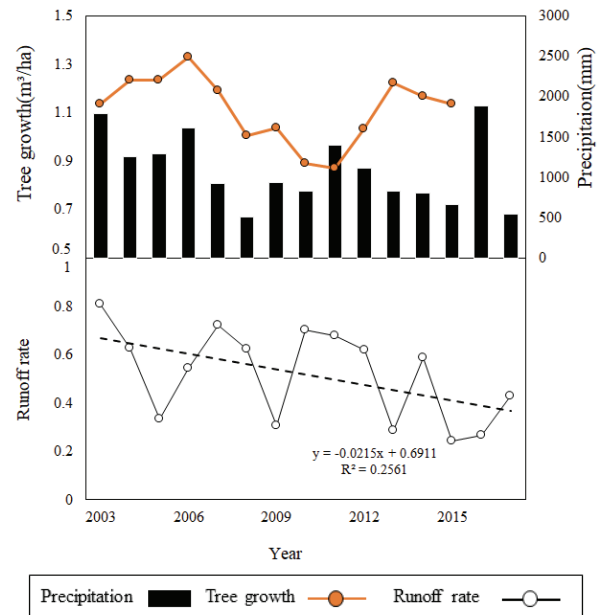


Figure 2. Annual variation precipitation, runoff rate and tree growth in small forested watershed.

mm)의 경우, 그 다음해의 유출률이 각각 0.30과 0.28로 매우 낮게 나타났다. 이는 극소우기에 토양 내 수분부족현상이 심하여, 이듬해에 강우량이 200 mm~1,000 mm 이상 증가하더라도 내린 강우가 지반으로 흡수되어 유출되는 수량이 매우 적었기 때문으로 판단된다. 건조기의 선행강우조건이 다음해 여름철의 유출량에 영향을 준다는 M. Jenicek et al.(2015)의 연구나 선행강우의 유무나 양이 유출특성에 영향을 준다는 Chung et al.(2011)과 Lee et al.(2012)의 연구로 미루어 볼 때, 선행강우의 양이나 강우강도, 지속시간 등의 강우조건에 따라 유출량이 변화한 것으로 판단된다.

연년 임목생장량과 강우량, 유출량, 유출률간의 상관성을 분석한 결과, 강우량보다는 유출량과 유출률의 상관성이 더 높게 나타났(Table 2). 임목별로 유출량은 P₅, P₂와 상관도가 높게 나타났으나, P₅는 정의상관, P₂는 부의상관을 보여 동일한 수종임에도 상관도의 차이를 보였다. 이는 생장량의 차이가 수종보다는 경사, 고도나 방위, 토양수분 조건 등의 환경적 인자에 영향을 받기 때문으로 판단된다(Naiman et al., 1997; Drucker et al., 2008; Costa et al., 2009). 유출률은 P₅, P₂, Q₆와 생장량과의 상관성이 매우 높게 나타났다. 임목 생장량과 강우-유출특성은 어느 정도 상관관계를 보인다고 볼 수 있으며, 강우량의 경우, 수관차단량 및 증발산에 의해 손실량이 발생하기 때문에 상관성이 적은 것으로 판단된다. 임목의 연륜폭은 연년 유출량 및 여름철 유출량과 깊은 상관관계가 있다고 한 Antonie and David(2006)의 연구와 동일한 결과를 보였다.

Table 2. Comparison of correlation analysis between hydrological factor and tree growth in small forested watershed.

Factor	Q1	P2	A3	Q4	P5	Q6	Ave.
Rainfall	-.476	.407	-.321	-.130	-.203	.373	.134
Discharge	-.549*	-.645**	-.226	.061	.799**	-.550*	-.591*
Runoff rate	-.303	-.712**	-.106	.146	.824**	-.624**	-.629*

** : p < 0.01 (paired)

* : p < 0.05 (paired)

2) 계절별 유출

팔공산 산림 소유역의 월별 강우, 유출량과 유출률을 비교한 결과, 강우량과 유출량은 7월과 8월에 가장 높은 값을 보였고, 유출률은 8월과 9월에 높은 것으로 나타났다 (Figure 3). 2003년~2006년, 2007년~2010년대에는 7월의 강우량이 가장 많았고, 2011년~2014년, 2015년~2017년에는 8월의 강우량이 가장 많은 것으로 나타났다. 이는 2010년대에 들어서면서 8월~9월에 대형 태풍의 발생이 잦아졌기 때문으로 판단된다. 연도별 유출량은 7월과 8월이 가장 많았으며, 2015년~2017년대에는 9월의 유출량이 가장 많은 것으로 나타났다. 이는 국지성 호우나 태풍으로 인한 강우량 증가에 기인한 것으로 사료된다.

Figure 3(a)에서 2015년~2017년 8, 9월의 강우량은 큰 차이가 없으나, Figure 3(b)의 유출량은 8월과 9월이 큰 차이가 나타났고, 강우량은 8월이 더 많지만 유출량은 9월이 더 많은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 강우강도, 강우지속시간 등의 강우특성에 기인한 것으로 보여지며, 산림 토층 내에 토양수가 충분한 경우에는 강도의 강우에서도 유출이 영향을 받지 않는다고 한 선행연구(Kegan et al., 2014; Ali et al., 2013)로 미루어 볼 때, 8월에 비해 9월은 대형 태풍(2003년 매미, 2007년 나리, 2016년 차바)의 발생빈도가 잦았고 단기간에 많은 강우가 내려 토양층으로 침투하지 못하고 지표류와 빠른 중간 유출 성분이 많았던 것으로 판단된다.

또한, 월별 강우와 유출량의 변동계수는 각각 0.33~1.18, 0.53~1.68로 나타났고, 강우량에 비해 유출량의 변동성이 더 큰 것으로 나타났다(Figure 4). 변동계수의 증감은 강우량과 유출량이 유사하게 변하는 것으로 나타났으나, 시간이 경과될수록 유출량의 변동성은 점점 커지는 시계열 변화 특성이 나타났다. 강우량에 비해 유출량의 변동성이 크다는 것은 강우와 유출량 변화가 반드시 일치하지 않으며, 강우량 외에 선행강우조건, 강우강도, 토양 침투능과 같은 여러 인자들이 영향을 주는 것으로 판단된다. 강우량과 유출량, 임목생장량의 연도별 변동계수는 0.39, 0.60, 0.12로 나타났고, 강우량과 유출량에 비해 임목생장량의 변동계수가 낮게 나타났다. 임목생장은 강우과 유출과 같은 수문특성 외에도 여러 환경인자가 함께 작용하기 때문으로 판단된다.

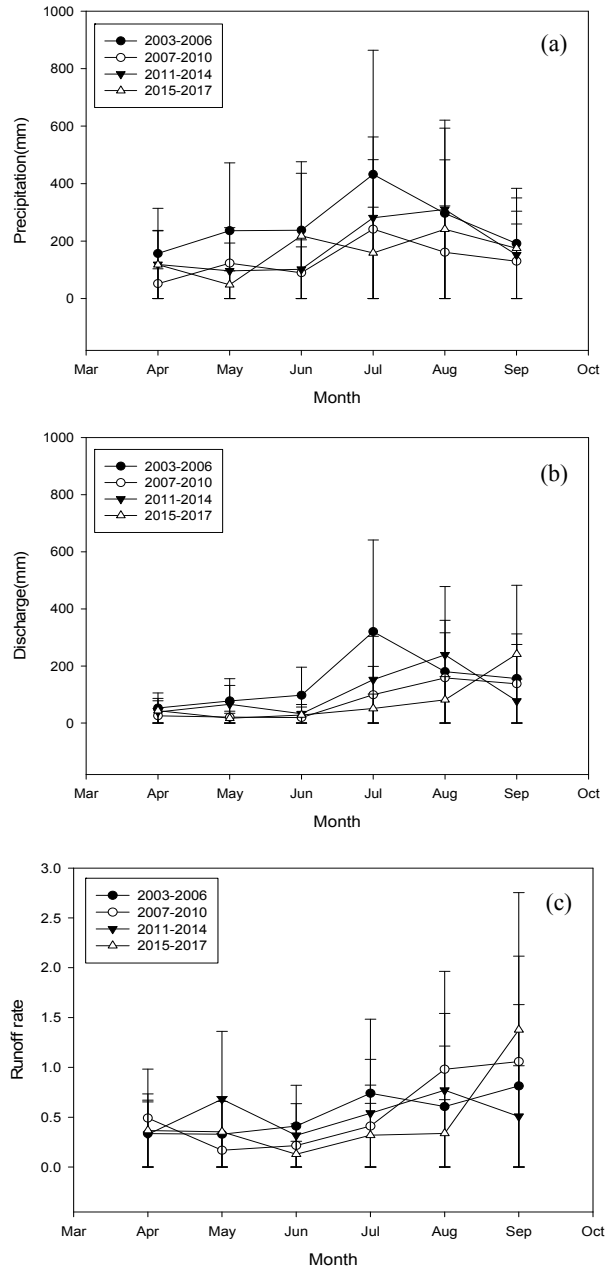


Figure 3. Average monthly precipitation(a) and discharge(b), runoff rate(c) from 2003 to 2017 for small forested watershed.

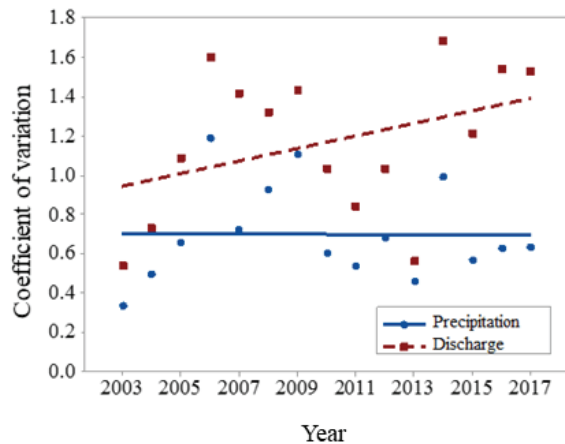


Figure 4. Comparison of annual CV of observed precipitation and discharge variation for small forested watershed from 2003 to 2017.

2. 유량분리에 의한 유출특성의 변화

1) 유출특성의 변화

관측기간 동안의 주요 단기수문곡선을 대상으로 하여 각 유출성분의 직접유출량과 기저유출량을 분리하여 변화 경향을 파악하였다. 총 유출량 중 직접유출량은 75~80%, 기저유출량은 18~24%로 나타났다. 강우량에 대한 총 유출량의 증가는 2003년~2010년에 비해 2011년~2017년이 더 적었으며, 기저유출량은 2011년~2017년에 많은 것으로 나타나 다소 차이를 보였다.

Figure 5(a)에 나타낸 바와 같이 강우량에 대한 총 유출량에 대한 추세선의 기울기를 비교해 보면, 2003~2010년은 0.1167, 2011년~2017년은 0.0695로 기울기의 차이를 보였고, 2011년~2017년의 유출량의 증가폭이 더 줄어든 것으로 나타났다. 2011년~2017년의 강우량에 대한 유출량의 증가폭이 감소한 것은 산림토양의 발달 및 토양물리성의 개선에 따른 수원함양기능이 높아졌기 때문으로 사료된다(KFRI, 2011). 토양의 구조는 산림에서의 물 흐름에 있어 매우 중요한 인자이며, 토양구조가 변화되어 토양물리성이 저하되면 투수능이 낮아지고 표면유출이 증가하게 되는데(Magesan et al. 1999; Hallwell et al., 2001; Green et al., 2003; Shainberg et al., 2002; Manedov et al., 2002), 팔공산 산림소유역의 토양은 사면붕괴나 침식 흔적이 발견되지 않아 토양침식과 같은 구조적 변화가 일어나지 않은 것으로 보여지며, 토양의 특성을 잘 유지하면서 토층 내 침투능과 수분보유력이 개선되었기 때문에 직접유출량의 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다(Penna et al., 2011).

Figure 5(b)와 Figure 5(c)에는 강우량에 대한 직접유출량과 기저유출량에 대한 변화경향을 나타내었고, 총 유출량에서 75~80%는 직접유출량이 차지하고 있었으며, 18

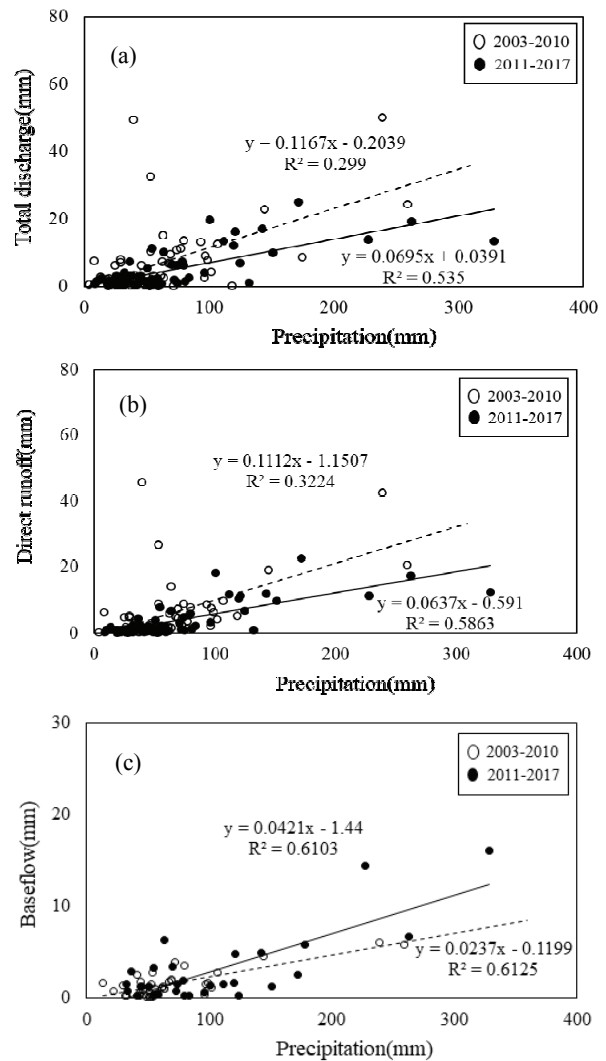


Figure 5. Relationship between the discharge factor of precipitation for watershed in Mt. Palgong with (a) total discharge, (b) direct discharge, (c) baseflow.

~24%는 기저유출량으로 나타났다. 직접유출량의 추세선 기울기는 2003년~2010년 0.1112, 2011년~2017년 0.0637로 2011년~2017년의 기울기가 더 적은 것으로 나타났으며, 기저유출량은 2003년~2010년 0.0237, 2011년~2017년 0.0421로 2011년~2017년의 기울기가 더 큰 것으로 나타났다. 직접유출량에 비해 기저유출량의 기울기는 작았으며, 직접유출량이 강우가 시작된 후 빠르게 빠져나가는 반면, 기저유출량은 느리게 유출되었기 때문에 판단된다. 2011년~2017년의 경우, 직접유출량이 줄어들고 기저유출량이 증가한 것으로 나타났으며, 이는 토양내 수분 보유력이 증가한 것으로 볼 수 있으며, 강우량 증가에 비해 유출량의 증가가 느리게 진행되었고, 임목 성장에 따라 강우차단과 증발산량의 증가로 인해 물손실량이 커졌기 때문으로 판단된다(Swank et al., 1988; Casermeiro

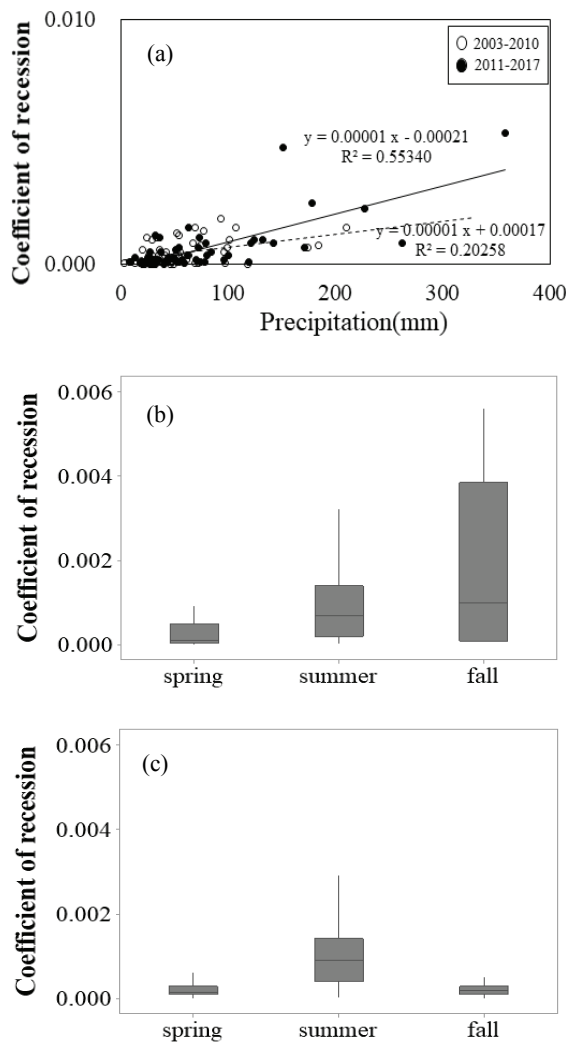


Figure 6. Comparison of seasonal data of coefficient of recession with that calculated by the hydrography for watershed in Mt. Palgong with (a) total, (b) 2003~2010, (c) 2011~2017.

2004). 간벌 후 초목의 발달이 지표면 유출을 감소시킨다고 보고한 Eunice et al.(2017)의 연구와 동일한 결과를 보였다. 이러한 유출량의 감소는 산림토양의 물리성이 개선되면서 침투능과 수분 보유력이 증가했기 때문으로 판단된다(Andre et al., 2013; Jehangir et al., 2017).

2) 감수계수의 기울기 변화

유출특성을 파악하기 위해 단위강우별 감수계수의 기울기를 비교하였다. 감수계수의 기울기는 2003년~2010년에 비해 2011년~2017년이 더 낮은 것으로 나타났고, 계절별로는 여름철의 감수계수 값은 큰 차이를 보이지 않았으나, 봄과 가을에는 2011년~2017년의 값이 훨씬 더 낮은 것으로 나타났다(Figure 6). 감수계수의 기울기가 적다는 것은 유출량의 감소경향이 완화되었다는 것으로 시간

이 경과함에 따라 유출량이 일정하게 유지된다고 볼 수 있으며, 지하수 감수곡선의 기울기가 완만할수록 감소경향이 느리며, 유출량도 증가한다고 한 Somorowaska(2004) 결과와 유사하게 나타났다. 감수계수 기울기의 증감에 따라 토양층에서의 수분 저장용량이나 대수층의 두께를 추정할 수 있는데(Stoelzle et al., 2013), 2003년~2010년에 비해 2011~2017년의 수분 저장용량이 증가한 것으로 판단된다. 감수계수의 값이 적으면 침투량이 증가하여 토양 습도가 높아진다고 한 Bertol et al.(2017)의 연구결과로 미루어 볼 때, 유출량의 감소가 느리다는 것은 토양 내부에 수분이 장기간 머물면서 수분보유력의 증가한 것으로 생각된다.

결론

본 연구에서는 팔공산 산림소유역의 장기유출특성을 파악하고, 임목의 생장이 유출 변화에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하기 위해 수행되었다. 연년 강우량과 유출량의 변화는 비례관계를 보이며 증감하고 있었으며, 유출량은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 유출량의 감소는 수관차단이나 토양침투능 등 다양한 원인에 기인하기 때문에 좀 더 정밀한 연구가 요구된다. 임목 성장량은 유출량, 유출률과의 상관성이 높았으며, 소나무류의 상관도가 가장 높게 나타났다. 그러나, 동일한 수종임에도 상관도의 차이가 크게 나타났는데, 경사, 고도나 방위, 토양조건 등의 환경조건에 따라 지표류의 흐름, 토양습도, 광조건 등의 산림 내 수문환경이 차이를 보여 임목의 생장에 영향을 주었기 때문으로 판단된다. 또한, 팔공산 산림소유역의 장기유출특성은 직접유출량이 감소하고, 기저유출량이 증가하면서 전반적인 지하수위의 상승이 나타난 것으로 판단된다. 감수계수의 기울기 값이 줄어든 것으로 볼 때, 강우가 내리게 되면 토양층에 빠르게 충전되고, 침투유량 이후에는 느린 속도로 유출되고 있는 것으로 나타나, 토양층 내에 수분이 잔존하는 시간이 길어진 것으로 볼 수 있다. 산림에서의 수원함양기능을 파악하기 위해서는 토양이 가지는 물리성과 토양수분에 영향을 주는 인자들을 조사하여 상호연관성에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 국립산림과학원의 ‘임상·임지별 산림유역 유출특성 장기모니터링(FE0603-2016-02-2017)’ 연구의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Ali, G., Oswald, C.J., Spence, C., Gammaraat, E.L.H., McGuire, K.J., Mexiner, T. and Reaney, S.M. 2013. Towards a unified threshold based hydrological theory: Necessary components and recurring challenges. *Hydrological Processes* 27(2): 313-318.
- Alvarenga, L.A., Mello, C.R., Colombo, A., Cuart, L.A. and Bowling, L.C. 2016. Assessment of land cover change on the hydrology of a Brazilian headwater watershed using the Distributed Hydrology Soil Vegetation Model. *Catena* 143: 7-17.
- Andre, D., Jackson, A.A., Adriano, D.C., Patricia, P. and Franciani, R.S. 2013. Water retention and availability in soils of the state of Santa Catarina-Brazil: Effect of textural classes, soil classes and lithology. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 37(6): 1535-1548.
- Antoine, L.B. and David, J.S. 2006. Tree ring reconstructions of streamflow in the Churchill river basin, Northern Saskatchewan. *Canadian Water Resources Association* 31(4): 249-262.
- Casermeyro, M.A., Molina, J.A., Caranaca, M.T., Costa, J.H., Massanet, M.I.H. and Moreno, P.S. 2004. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. *Catena* 57(1): 91-107.
- Chung, I., Lee, J., Kim, J., Na, H. and Kim, N. 2011. Development of Threshold Runoff Simulation Method for Runoff Analysis of Jeju Island. *Journal of the Environmental Sciences* 20(10): 1347-1355.
- Coasta, F.R.C., Guillanmet, J.L., Lima, A. and Pereira, O. 2009. Gradients within gradients: The mesoscale distribution patterns of palms in a central Amazonian forest. *Journal of Vegetation Science* 20(1): 69-78.
- Drucker, D.P., Costa, F.R.C. and Magnusson, W.E. 2008. How wide is the riparian zone of small streams in tropical forest? A test with terrestrial herbs. *Journal of Tropical Ecology* 24(1): 65-74.
- Eunice, M.A., Rafael, D.N.R., Helba, A.Q.P., Jose, B.B. and Jaques, C.R.F. 2017. Hydrological responses of a Watershed to vegetation changes in a tropical semiarid region. *Revista Caatinga, Mossoró* 31(1): 161-170.
- Farrick, K.K. and Brian, A.B. 2014. Soil water storage, rainfall and runoff relationships in a tropical dry forest catchment. *Water Resources Research* 50(12): 9236-9250.
- Grace, J.M., Skaggs, R.M. and Cassel, D.K. 2006. Soil physical changes associated with forest harvesting operations on an organic soil. *Soil Science Society of America Journal* 70(2): 503-509.
- Green, R.T., Ahuja, L.R. and Benjamin, J.G. 2003. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma* 116(1): 3-27.
- Halliwell, D.J., Barlow, K.W. and Nash, D.M. 2001. A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. *Australian Journal Soil Research* 39(6): 1259-1267.
- Hilker, T., Lyapustin, A.I., Tucker, C.J., Hall, F.G., Myneni, R.B., Wang, Y. and Sellers, P.J. 2014. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(45): 16041-16046.
- Jenicek, M., Seibert, J., Zappa, M., Staudinger, M. and Jonas, T. 2015. Importance of maximum snow accumulation for summer low flows in humid catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* 12: 7023-7056.
- Jiao, Y., Lei, H., Yang, D., Huang, M., Liu, D. and Yuan, X. 2017. Impact of vegetation dynamics on hydrological processes in a semi-arid basin by using a land surface-hydrology coupled model. *Journal of Hydrology* 551: 116-131.
- Jost, G., Schume, H., Hager, H., Markart, G. and Kohl, B. 2012. A hillslope scale comparison of tree species influence on soil moisture dynamics and runoff processes during intense rainfall. *Journal of Hydrology* 420(2): 112-124.
- K-water. 2019. Water for the Future. Proceeding of the world water day 2019, Academic Press, Seoul pp. 457.
- Lee, B., Choi, J., Choi, Y. and Bae, D. 2012. Validation of real-time river flow forecast using AWS rainfall data. *Journal of Korea Water Resource Association* 45(6): 607-616.
- Liu, J., Gao, G., Wang, S., Jiao, L., Wu, X. and Fu, B. 2018. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multi-dimensional structure analysis and scale characteristics. *Journal of Geographical Science* 28(1): 59-78.
- Liu, R., Wang, J., Shi, J., Chen, Y., Sun, C. and Shen, Z. 2014. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions. *Science of the Total Environment* 468-(15): 1069-1077.
- Loaiciga, H., Haston, L. and Michaelsen, J. 1993. Dendrohydrology and long term hydrologic phenomena. *Reviews of Geophysics* 31(2): 151-171.
- Jenicek, M., Seibert, J., Zappa, M., Staudinger, M. and Jonas, T. 2015. Importance of maximum snow accumulation for summer low flows in humid catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* 12: 7023-7056.
- Magesan, G.N., Williamson, J.C., Sparling, G.P., Schipper, L.A. and Lloyd-Jones, A.R. 1999. Hydraulic conductivity in soils irrigated with wastewaters of differing strengths: field and laboratory studies. *Australian Journal of Soil*

- Research 37(2): 391-402.
- Mamedov, A.I. 2002. Irrigation water quality, rain energy and soil texture effects on soil hydraulic properties and erosion. pp. 553-563. In: Rubio, J.L. Morgans, P.R.C. Asins, S. and Andred, V. Man and Soil at the Third Millennium. Geofoma Ediciones, Logrono, Spain.
- Muñoz, R.C., Reid, N., Tighe, M., Briggs, S.N. and Wilson, B. 2011. Soil hydrological and erosional responses in patches and inter-patches in vegetation states in semiarid Australia. *Geoderma* 160(3): 524-534.
- Naiman, R.J., Henri, D. and Décamps, H. 1997. The ecology of interfaces: Riparian zones. *Annual review of Ecology and Systematics* 28(1): 621-658.
- National Institute of Forest Science. 2011. The research of hydrologic cycle on Forest watershed. pp. 393.
- Penna, D., Tromp-van, M., Gobbi, A., Borga, M. and Fontana, G.D. 2011. The influence of soil moisture on threshold runoff generation process in an alpine headwater catchment. *Hydrology and Earth System Science* 15(1): 689-702.
- Shainberg, I., Levy, G.J. and Mamedov, A.I. 2002. Prewetting rate and sodicity effects on soil permeability and surface sealing. *Acta Horticulture* 573: 21-28.
- Somowaska, U. 2004. Inferring changes in dynamic groundwater storage from recession curve analysis of discharge data. *Miscellanea Geographic* 11(1): 161-168
- Stoelzle, K., Stahl, K. and Weiler, M. 2013. Are streamflow recession characteristics really characteristic? *Hydrology and Earth System Science* 17(1): 817-818.
- Swank, W.T. Swift, L.W. and Douglass, J.E. 1988. Streamflow Changes Associated With Forest Cutting, Species Conversion, and Natural Disturbances. pp. 297-312. In: Forest Hydrology and Ecology at Coweeta. *Ecological Studies*, Swank, W.T. Crossley, D.A.(Ed.) Springer-Verlag, New York.

Manuscript Received : June 2, 2020
First Revision : October 7, 2020
Second Revision : November 3, 2020
Accepted : November 11, 2020