

ORIGINAL ARTICLE

## 제주 꽃자왈 산림의 물순환 특성에 따른 수원함양률 분석

김재훈 · 임흥근 · 최형태\* · 이기문 · 문혜원 · 최형순<sup>1)</sup>

국립산림과학원 산림환경보전연구부 도시숲연구과, <sup>1)</sup>국립산림과학원 미래산림전략연구부 국제산림연구과

### Analysis on Water Retention Rate according to Water Cycle Characteristics in Jeju Gotjawal Forest

Jaehoon Kim, Honggeun Lim, Hyung Tae Choi\*, Qiwen Li, Haewon Moon, Hyungsoon Choi<sup>1)</sup>

Urban Forests Division, Forest Environment and Conservation Department, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

<sup>1)</sup>Global Forestry Division, Future Forest Strategy Department, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

#### Abstract

This study was carried out to analyze water cycle characteristics and evaluate water retention function in Jeju Gotjawal forest from 2013 to 2017. The average ratio of throughfall, stemflow, interception loss in Seonhul Gotjawal (SH) and Cheongsu Gotjawal (CS) was 43.1%, 15.8%, and 41.1%, respectively. Rainfall-throughfall, rainfall-stemflow, and rainfall-interception loss were expressed as linear regression equation ( $p < 0.001$ ). The comparison results showed that SH was higher than CS ( $p < 0.05$ ), indicating that the canopy area had an important effect on the difference in stand structure. The average water resources retention rate of the Gotjawal region was 41.9%, which is similar to the total water resources retention rate (40.6%) of Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP). Currently, the development of Gotjawal is in progress in JSSGP. The development of Gotjawal will lead to a decrease in the water resources retention rate due to changes in the surface environment such as an increase in impervious areas, which will affect the total groundwater content of JSSGP. Therefore, the conservation of the Gotjawal area is judged to be very important from the point of view of water conservation.

**Key words** : Gotjawal, Forest, Water cycle characteristics, Water retention rate, Total rainfall

#### 1. 서 론

꽃자왈의 정의는 사전적, 지질학적, 법률적으로 구분할 수 있다. 사전적 의미에서 꽃자왈은 표준어 '숲(숲)'을 제주방언 '술'로 정의하였고(Suk, 1947), '꽃'을 '산' 또는 '숲'으로 나타내었다(Park, 1988). 조선시대 신증동국여지승람, 남사록, 탐라지, 남환박물 등에서 꽃자

왈이 '숲'으로 표현된(Choi and Hyeon, 2018) 이후 공식적으로는 '나무와 덩굴 따위가 마구 엉클어져 수풀 같이 어수선하게 된 곳'으로 기록되어 있다(JSSGP, 2009). 지질학적 의미에서 꽃자왈은 '토양의 발달이 매우 빈약할 뿐만 아니라 크고 작은 잡석과 잡목 및 가지 덩쿨이 한데 어우러져 있어 경작지로 이용하기 곤란한 쓸모없는 지대'로 정의된다(Song and Yoon, 2002).

Received 22 August, 2022; Revised 18 November, 2022;

Accepted 22 November, 2022

\*Corresponding author : Hyung Tae Choi, Urban Forests Division, Forest Environment and Conservation Department, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea.  
Phone : +82-2-961-2641  
E-mail : choiht@korea.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. 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, provided the original work is properly cited.

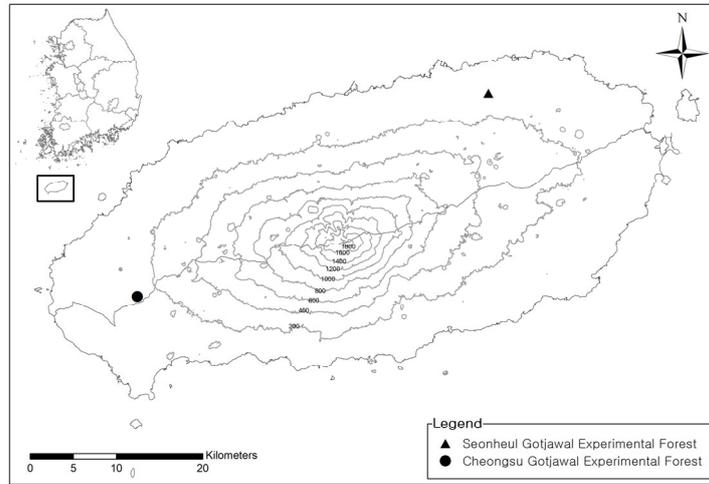


Fig. 1. The location of study site.

법률적 의미에서 꽃자왈은 '제주도 화산활동 중 분출한 용암류가 만들어낸 불규칙한 암피지대로 숲과 덩굴 등 다양한 식생을 이루는 곳'으로 표현되어 있다(JSSGP, 2014).

꽃자왈의 지질은 크게 한경-안덕, 애월, 조천-함덕, 구좌-성산의 4개 꽃자왈 지대로 구분된다(Song, 2000; Jang and Lee, 2009). 선홍꽃자왈은 파호이호 이 용암지대로 낮은 경사의 튜물러스와 용암동굴, 동굴 함몰지 등이 발달하며, 소규모 습지도 분포하고 있다(Jeon et al., 2012; Jeon et al., 2015). 선홍 꽃자왈 상부에서 고토양 채취하여 탄소연대측정 및 광여기류 미네선스 측정을 실시한 결과 약 1.1만년에 형성된 것으로 나타났다(Ahn et al., 2015). 소규모의 용암동굴과 습지가 곳곳에 분포해있는데, 특히 랍사르 습지로 지정된 동백동산 있으며 생물다양성에 기여하고 있다(Jeon et al., 2012). 청수꽃자왈의 대지는 주로 아아 용암류로 구성되어 있으며 주변에는 파호이호 이 용암과의 전이지대도 발달되어 있다(Park et al., 2014).

꽃자왈에서 서식하는 식물상은 총 1,039분류군이 분포하였고, 이 중 멸종위기야생식물은 9종, 산림청 지정 희귀식물은 총 88종이었다(NIFoS, 2019). 국립산림과학원 난대·아열대산림연구소 꽃자왈연구시험림 내 분포하는 희귀식물은 총 27종으로 제주고사리삼 등 환경부 멸종위기 야생식물2급 4종, 새우란 등 산림청 희귀식물 14종, 개족도리 등 한국 특산식물 9종이 분포하였다. 동일지역에서 서식하는 동물상은 조류 33종,

양서류 4종, 파충류 4종, 포유류 5종이 출현하였고, 이 중 천연기념물 또는 멸종위기야생동물 등 법정보호종은 원앙 등 조류 11종으로 조사되었다.

한편, 강우 시 산림 내에 내리는 수간유하우량(강우가 수관을 통해 아래쪽으로 흐르는 양)과 수관통과우량(강우가 수관을 통과하여 지표면에 떨어지는 양)의 양적인 분배에 관한 연구는 유럽에서 19세기 중반부터 시작되었다(Friesen et al., 2019). 산림 내 강우의 양적인 분배에 영향을 미치는 인자는 크게 2가지로 기상학적인자(강우량, 강우강도, 증발률, 풍속, 연속강우 사이의 시간 간격)와 생물학적 인자(수간밀도 및 종조성에 따른 수관구조, 잎의 특성, 잎의 공간적 분포, 가지 구조, 활엽수의 경우 수피상태, 계절에 따른 식물 상태)로 나눌 수 있다(André et al., 2011). 수간유하우량은 임내에서 수문학적, 생태학적, 생지화학적인 중요성과 함께(Levia and Frost, 2003) 유출(Neave and Abrahams, 2002)에 영향을 미치며, 수관통과우량은 토양수분함양과 상관관계를 가진다(Molina et al., 2019; Zhu et al., 2022). 임내의 질적인 측면에서 산림생태계는 생지화학과 금속 이온 오염물질의 순환을 조절하는 중요한 역할을 하는데(Han et al., 2021), 벌채와 같은 숲 환경 변화는 통과우와 토양수의 이온 변화를 초래한다(Robertson et al., 2000).

국내에서 산림 내 물순환 연구의 양적인 측면에서는 임상 및 임분에 따른 수간통과우량, 수간유하우량, 차단손실량을 분석하여 차단효과나 임외강우량과의 관계

**Table 1.** The condition of SH and CS experimental plots

Plots	Species	No. of trees	Ave. height (m)	Ave. DBH (cm)	Canopy projection area rate (%)
SH	<i>Quercus glauca</i>	9	7.3	17.6	64.4
CS		26	6.9	12.0	68.5

**Table 2.** The proportion of throughfall, stemflow and interception loss in total rainfall at SH and CS from 2013 to 2017

Year	SH				CS			
	R (mm)	TF (mm)	SF (mm)	I (mm)	R (mm)	TF (mm)	SF (mm)	I (mm)
2013	958.7	521.3	116.3	321.1	1067.4	579.0	164.5	323.9
2014	303.5	58.3	21.7	223.5	577.9	171.5	90.7	315.6
2015	509.0	238.4	91.7	178.9	103.6	33.1	9.4	61.1
2016	851.0	375.2	169.5	306.4	936.5	363.0	187.0	386.5
2017					455.9	131.4	64.0	260.6
Ave. annual value (mm)	655.6	298.3	99.8	257.5	628.3	255.6	103.1	269.5
Ratio to Ave. Rainfall (%)	-	45.5	15.2	39.3	-	40.7	16.4	42.9

식을 도출하거나(Kim and Woo, 1988; Min and Woo, 1995; Lee et al., 1997; Kim et al., 2005), 전 나무림에서 숲가꾸기에 따른 임내우와 차단손실량을 분석하였다(Kim et al., 2003). 질적인 측면에서는 지역별 참나무 천연림을 대상으로 임내우의 pH, 양이온, 음이온을 분석하거나(Jin and Son., 2007), 낙엽활엽수림과 낙엽송 조림지의 임내우 및 낙엽낙지에 의한 양분유입량 차이를 설명하였다(Jung et al., 2007).

제주도의 지질은 화산암류로 구성되어 높은 투수성으로 인해 지표수의 발달이 매우 낮아 수원을 대부분을 지하수에 의존하고 있다(Kim et al., 2009). 용암류 기반의 생태학적 가치가 매우 높은 제주 꽃자왈은 지하수 함량에 큰 영향을 미치지 않지만, 꽃자왈 내 물순환에 관한 정량적 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구는 국립산림과학원 난대·아열대산림연구소 시험림인 선홍꽃자왈연구시험림과 청수꽃자왈연구시험림을 대상으로 강수량에 따른 차단효과와 수원함양률을 분석하여 수자원 관점에서 꽃자왈의 환경적 가치를 높이는 데 그 목적이 있다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 연구지역

제주특별자치도에서 꽃자왈의 전체 면적은 110

km<sup>2</sup>로 제주특별자치도 면적(1,825 km<sup>2</sup>)의 약 6%이다. 연구지역인 선홍꽃자왈과 청수꽃자왈은 각각 조천-함덕 꽃자왈지대와 한경-안덕 꽃자왈지대에 해당하며, 국립산림과학원 난대·아열대산림연구소 꽃자왈연구시험림에 속해있다(Fig. 1).

선홍꽃자왈연구시험림(SH, Seonheul)은 제주특별자치도 조천읍 선흘리 일대 176.7 ha로, 위도 33° 31' 14.88"N, 경도 126° 42' 33.95"E이며, 해발고도는 약 152 m이다. SH 주변의 제주 기상관측소에서 관측한 평년값은 평균기온 16.2°C, 최고기온 19.3°C, 최저기온 13.4°C, 연강수량 1,502.3 mm이다. SH는 상록활엽수림 140.1 ha (79.3%), 침활혼효림 16.1 ha (9.1%), 낙엽활엽수림 6.6 ha (3.7%), 관목 및 기타수림 13.9 ha (7.9%)으로 구성되어 있다. 산림을 구성하는 주요 수종은 종가시나무, 동백나무이며 소밀도가 밀한 IV영급 천연림이다. 경사도는 5° 미만으로 경사가 완만하다.

청수꽃자왈연구시험림(CS, Cheongsu)은 제주특별자치도 한경면 청수리 일대 25.5 ha로 위도 33° 18' 16.63"N, 경도 126° 16' 14.41"E이고, 해발고도는 약 142 m이다. CS 주변 고산 기상관측소에서 관측한 평년값은 평균기온 15.7°C, 최고기온 18.6°C, 최저기온 13.2°C, 연강수량 1,182.9 mm으로 나타났다. CS는 상록활엽수림 20.5 ha (80.4%), 침활혼효림 0.8 ha

**Table 3.** The proportion of throughfall, stemflow and interception loss in total rainfall from literature review

References	FT	MAR (mm)	TF (%)	SF (%)	I (%)
Haworth and McPherson(1995)	E	600	27~100	1~16	-
Jin and Son(2007): Gangwon area	D	2,206 (2yrs)	82.5	3.4	
Jin and Son(2007): Gyeonggi area	D	2,417 (1.7yrs)	92.2	4.2	
Jin and Son(2007): Jeonnam area	D	4,783 (1.7yrs)	80.1	10.1	
Jin and Son(2007): Seoul area	D	3,734 (1.7yrs)	71.9	11.5	
Kim et al.(2003): unthinned	C	390 (5 months)	55.6	4.4	40
Kim et al.(2003): thinned	C	390 (5 months)	65.2	12.4	22.4
Khan(1999)	D	379	77.5	0.7	21.8
	D	-	86.3	1.3	12.7
	C	1,821	70.9	0.9	
Lee et al.(1997)	C	1,821	62.1	0.8	
	D	1,821	56.5	3.9	
Medeiros et al.(2009)	D	550	81	6	13
Min and Woo(1995)	C	1,036	78.3	7.3	14.4
	C	1,036	86.9	2.0	11.1
NIFoS(2011)	C	5,197.8 (7 yrs)	56.5	5.2	38.3
	C	4,017 (6 yrs)	64.0	3.2	32.8
Nulsen et al.(1986)	E	376	60	32	-
	E			5~25	
Owens et al.(2006)	C	600~900	55	5	40
Pressland(1973)	E	515	69	18	13
Pressland(1976)	E	515	86~94	-	-
Prebble and stirk(1980)	E	719	88	0.6	11
	E	273	51	4	45
Sadeghi et al.(2016)	E	-	56	6.8	36.1
	D	-	62	2	37.5
Silva and Okumura(1996)	D	-	64	9	26.7
	D	-	72	10	18
Swaffer et al.(2014)	E	502	66.4	2.7	30.9
	E		65.9	2.7	31.4
Valente et al.(1997)	E	600	87.5	1.7	10.8
	E	-	82.6	0.3	17.1

\* FT: forest type, MAR: mean annual precipitation, C: coniferous, D: deciduous, E : evergreen

(3.2%), 낙엽활엽수림 2.3 ha (9.0%), 관목 및 기타 수림 1.9 ha (7.4%)으로 구성되어 있다. 산림을 구성하는 주요 수종은 증가시나무로 소밀도가 밀한 IV영급 천연림이다. 경사도는 5° 미만으로 완만한 경사를 나타낸다.

물순환 측정장비가 설치된 시험구(SH, CS)의 수종, 개체목의 수, 평균 수고, 평균 흉고직경(DBH, Diameter of breast height), 수관투영면적률은 Table 1과 같다.

### 2.2. 연구방법

산림 물순환 시험구 위치는 숲 가장자리로부터 50 m 이상 떨어져 외부 환경의 영향을 차단하였다. 시험구 크기는 지형 및 임목 분포 특성을 고려하여 SH에서는 13×12 m, CS에서는 10×16 m로 선정하였다. 임외강우량(R, Total rainfall)은 각 시험구의 숲 밖의 개활지에 전도형우량계를 설치하여 1시간 간격으로 측정하였다.

수관통과우량(TF, Throughfall)은 각 시험구에 전도형우량계 10대를 지상 1 m의 높이에 수관올폐도를 고려하여 임의배치 하였다. 수관통과우량은 시험구내 수관이 있는 부분과 수관이 없는 부분을 고려한 평균수관통과우량을 계산하였으며(Pathak et al., 1985), 식 [1]로 나타내었다.

$$TF = (A_{woc} \times R_{oa} + A_{uc} \times R_{uc}) / A \quad [1]$$

TF: throughfall (mm)

$A_{woc}$ : area without overhead canopy (m<sup>2</sup>)

$R_{oa}$ : rainfall in the open air (mm)

$A_{uc}$ : area under canopy (m<sup>2</sup>)

$R_{uc}$ : throughfall under canopy (mm)

A: area of plot (m<sup>2</sup>)

수간유하우량(SF, Stemflow)은 각 시험구에서 대표적인 흉고직경을 가지는 5개 수목을 선정하고 합성고무와 구리선을 이용하여 흉고직경 측정위치에 고정하였으며, 수목에서 비닐호스를 연결하여 전도형우량계로 수간유하우량을 측정하였다. 임외강우량, 수관통과우량, 수간류량 측정에 사용된 전도형우량계의 1회 전도량은 0.2 mm이며, 각 시험구에 설치된 범용데이터로거에 연결하여 자료를 수집하였다. 수간유하우량은 흉고단면적과 수관밀도를 고려하여 투영면적당 강우깊이로 산출하였으며(Killingbeck and Wali, 1978), 그 관

계식은 식 [2]와 같다.

$$SF = \frac{1}{2} \times \left( \frac{D_1 + D_2}{D_1} + \frac{B_1 + B_2}{B_1} \right) \times \frac{V_c}{A} \quad [2]$$

SF: stemflow (mm)

$D_1$ : total stand density

$D_2$ : stand density of non-collared trees

$B_1$ : total tree basal area (m<sup>2</sup>/plot)

$B_2$ : basal area of non-collared trees (m<sup>2</sup>/plot)

$V_c$ : volume of stemflow collected (litter/plot)

A: area of plot

차단손실량(I, Interception loss)은 강우가 잎과 줄기에 차단되었다가 증발되는 양이다. 임내우량은 수관통과우량, 수관적하우량, 수간유하우량으로 나눌 수 있으나, 수관통과우량과 수관적하우량을 구분하여 측정하기 어려우므로 두 우량의 합을 수관통과우량으로 계산하였다(Min and Woo, 1995). 차단손실량은 임외강우량에서 임내우량의 차이로 계산하였으며, 그 관계는 식 [3]과 같다.

$$I = R - (TF + SF) \quad [3]$$

I: interception loss (mm)

R: rainfall (mm)

TF: throughfall (mm)

SF: stemflow (mm)

수원함양률은 두 꽃자왈 지역의 총 강우량을 대비 수원함양률로 산출하였다. 수원함양률(WRR, Water Retention Rate)은 총 강우량에서 차단손실량과 수액이동량을 제외하고 지면으로 유입되는 양을 산출하였다. 수목의 증산은 토양수가 뿌리, 목부조직, 잎을 통하여 대기로 환원되는 과정으로 개별 임목의 증산량은 목부조직에서 수액이동량(F)을 측정하여 파악할 수 있다(NIFoS, 2011). 수액이동량은 열손실탐침법(Granier, 1985)을 이용하여 측정하였으며, 식 [4]와 같다(NIFoS, 2013).

$$F = u \times SA \quad [4]$$

$$u = 0.714 \times \left( \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231}$$

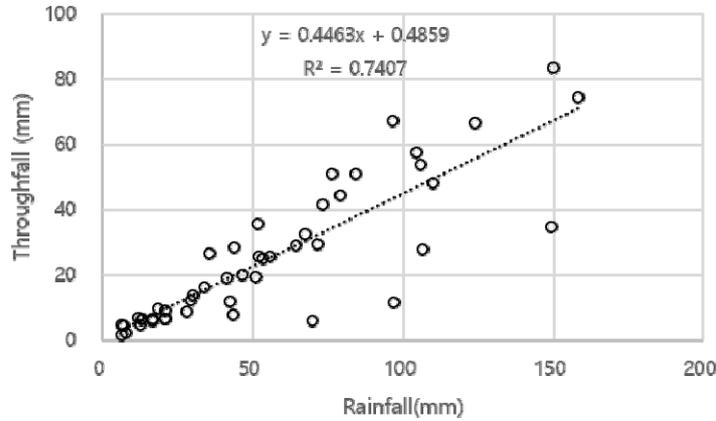


Fig. 2. The relationship between total rainfall and throughfall in SH.

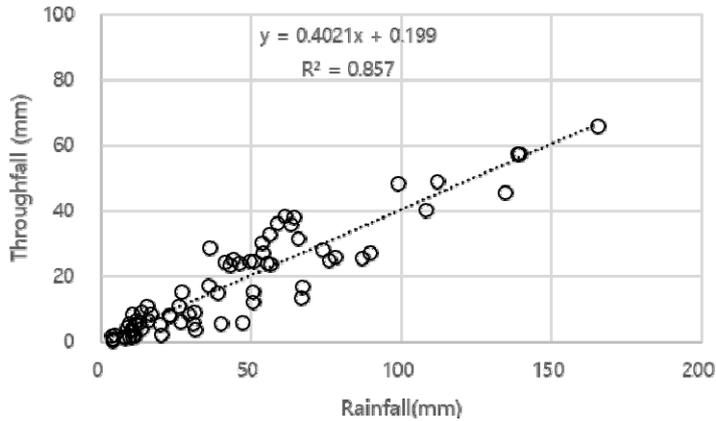


Fig. 3. The relationship between total rainfall and throughfall in CS.

$F$ : sap flow (ml/min)

$u$ : sap flow velocity (ml/min/cm<sup>2</sup>)

$\Delta T_{\max}$ : Maximum temperature difference  
between two sensors

$\Delta T$ : Temperature difference between two  
sensors

$SA$ : sapwood area (cm<sup>2</sup>)

임의강우량에 따른 수관통과우량, 수간유하우량, 차단손실량의 변화를 보기 위해 선형회귀분석을 실시하였다. 또한, 두 개 시험구 사이에서 수관통과우량, 수간유하우량, 차단손실량의 차이를 파악하기 위해 T-검정

또는 Mann-Whitney U-검정을 실시하여 유의수준 0.05에서의 유의성을 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 평균 임내우량 및 평균 차단손실량 비율

2013년부터 2017년까지 SH와 CS에서 결측된 자료를 제외한 임의강우량, 수관통과우량, 수간유하우량, 차단손실량의 비율을 Table 2에 나타내었으며, 결과값 비교를 위해 수종(상록활엽수)과 강우량이 꽃자왈연구 시험림과 유사한 경우와 국내 장·단기 연구 사례를 종합하였다(Table 3). 해외 사례에서는 비슷한 상록활엽

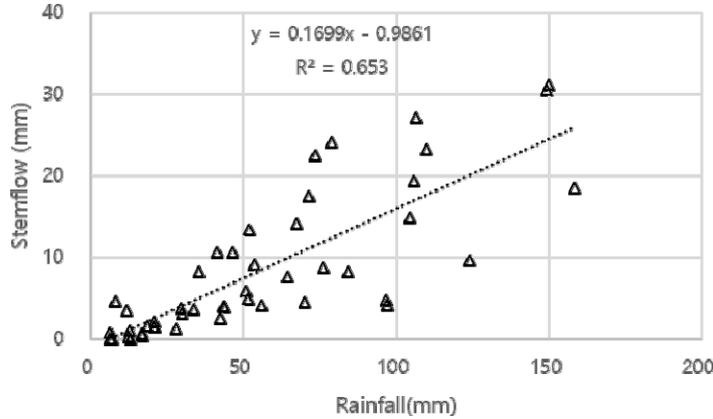


Fig. 4. The relationship between total rainfall and stemflow in SH.

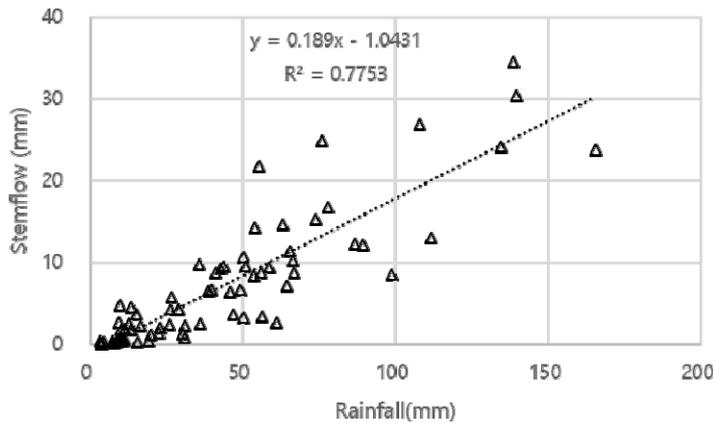


Fig. 5. The relationship between total rainfall and stemflow in CS.

수에 비슷한 강우량을 가지더라도 수관통과우량이 최대 2.2배 많았다. Owens et al.(2006)의 연구결과에 의하면 차단손실률 값이 본 연구결과와 비슷하게 나타났는데, 대상수종(*Juniperus ashei* Buchholz)의 잎이 비늘 모양 형태로 과밀하게 분포하고, 개체당 높은 수관 투영면적(8.1 m<sup>2</sup>~64.1 m<sup>2</sup>)을 가지고 있어 많은 양의 강우량이 차단되었을 것으로 판단된다. Min and Woo(1995)와 Jin and Son(2007)의 연구결과에서는 국내 침엽수와 활엽수 모두 꽃자왈시험림에 비해 수관 통과우량의 비율이 높았지만, Kim et al.(2003)의 연구결과에서는 96.8%의 수관투영면적을 가지는 비간별지 침엽수의 경우 꽃자왈의 차단손실률 연구결과와

비슷하게 나타났다. NIFoS (2011)의 연구결과에서는 1976년에 식재한 전나무와 잣나무 비시험림에 대해 7개 연도(2002~2008)의 평균 차단손실률은 각각 38.3%(30.7~47.8%), 32.3%(25.6~40.5%)로 분석되었으며, 전나무 비시험림 경우, SH의 차단손실률과 비슷한 값을 나타내었다. 또한 잣나무 비시험림의 차단손실률이 40% 이상이었던 연도가 4회로 분석되어 CS의 차단손실률과 비슷한 결과값을 나타내었다. 꽃자왈연구시험림 내 연구대상지는 수관투영면적을 수치가 침엽수 비시험림에 비해 상대적으로 낮지만, 대표 수종(*Quercus glauca*)이 우점하고 있고 수관밀도가 매우 높아 관목층 발달이 어려운 환경(Kim et al., 2020a;

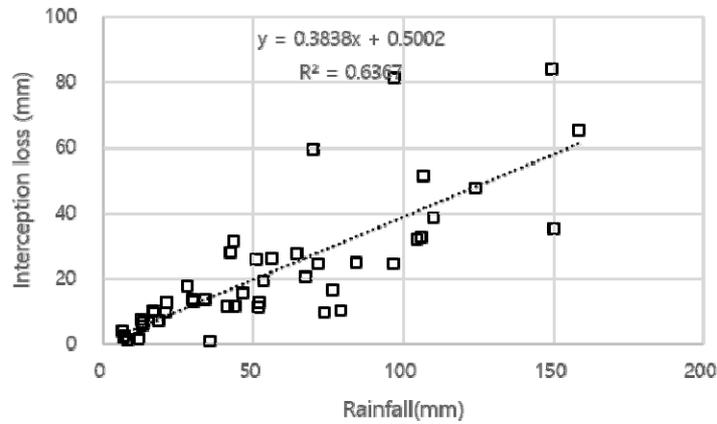


Fig. 6. The relationship between total rainfall and interception loss in SH.

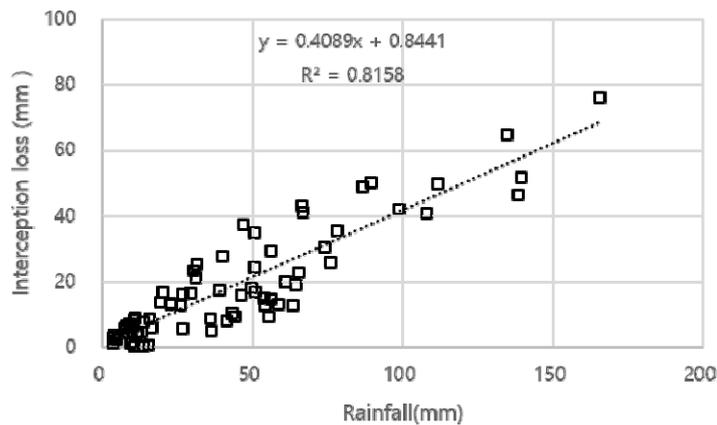


Fig. 7. The relationship between total rainfall and interception loss in CS.

Kim et al. 2020b)으로 우리나라 내륙지방의 간벌하지 않은 지역의 침엽수와 비슷한 차단손실효과를 나타내는 것으로 판단된다.

### 3.2. 임외강우량과 수관통과우량

임외강우량과 수관통과우량의 관계는 Fig. 2 ( $F=128.61$ ,  $p<0.001$ )와 Fig. 3 ( $F=434.47$ ,  $p<0.001$ )에 나타내었다. (Rowe, 1983; Pathak et al., 1985)은 임외강우량에 대해 수관통과우량, 수관유하우량을, 차단손실량을 직선회귀식으로 나타냈으며, 국내에서도 주로 선형으로 분석하였다(Kim and Woo, 1988; Min and Woo, 1995; Lee et al., 1997; Kim et al., 2003,

Kim et al., 2005). SH와 CS에서 수관통과우량은 임외강우량이 증가할수록 선형으로 증가하는 경향을 보였으며, 기울기는 수관통과율을 나타낸다고 하였다(Min and Woo, 1995). Rowe(1983)는 기울기의 차이를 수종과 임분구조의 차이로 나타내었으며, Kim et al.(2003)은 비간벌구와 간벌구 사이의 수관통과우량의 차이를 임분구조로 설명하고 있다. SH와 CS의 기울기에는 각각  $0.4463(t=11.34, p<0.001)$ ,  $0.4021(t=20.92, p<0.001)$ 로 나타나 CS보다 SH에서 상대적으로 많은 통과율을 보였는데( $t=-2.16, p<0.05$ ) SH와 CS의 수관투영면적률은 각각 64.4%, 68.5%로 SH의 상대적으로 낮은 수관투영면적률이 기울기에 영향을 미쳤다고 판단되며, 이는 수관

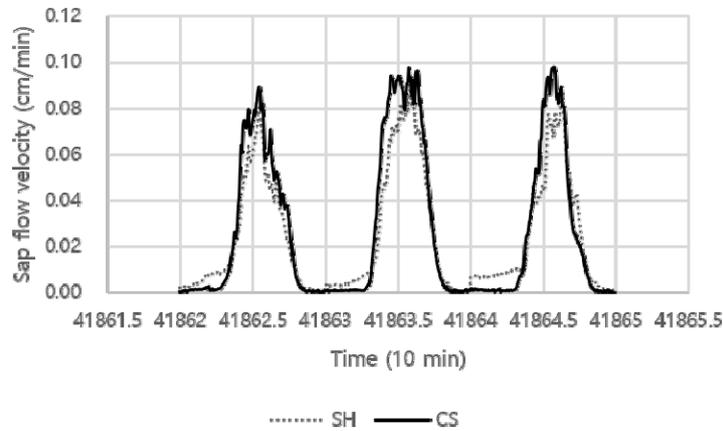


Fig. 8. Sap flow velocity at SH and CS in 2014.

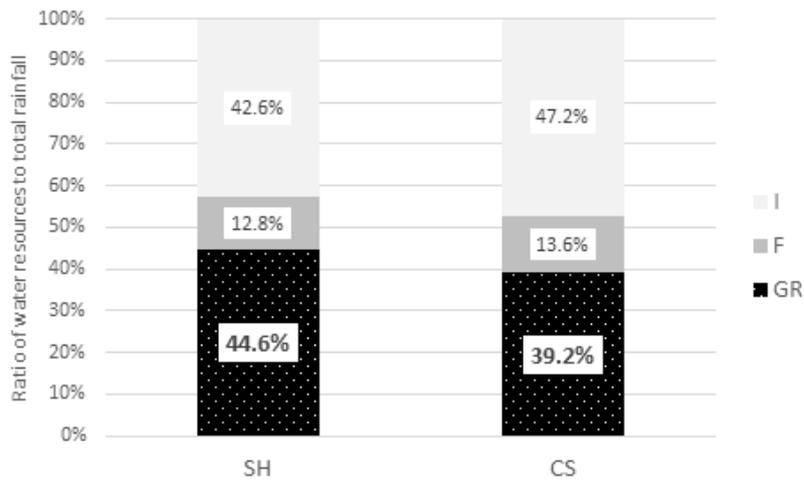


Fig. 9. Ratio of water resources to total rainfall in SH and CS from 2014 to 2016.

통과우량이 수관투영면적과 함수관계라는 Asdak et al.(1998)의 연구결과와 일치한다. 또한, 직선회귀식에서 절편값은 양의 값으로 임외강우시 임내 수관 사이의 공간적 간격으로 인해 수관통과우량이 바로 발생하는 것으로 나타났다.

### 3.3. 임외강우량과 수간유하우량

SH와 CS의 임외강우량과 수간유하우량의 관계는 Fig. 4 (F=84.65, p<0.001)와 Fig. 5(F=254.41, p<0.001)에 나타내었다. 임외강우량과 수간유하우량은 선형관계로 나타났으며, 기울기는 수간유하우량 전환율을, 절편은 수

간저류능을 의미한다(Rowe, 1983; Kim et al., 2003; Kim et al., 2005). Lee et al.(1997)은 침엽수와 활엽수의 수간유하우량 차이를 가지 구조에 의한 수형과 연관이 있다고 하였고, Min and Woo(1995)는 수간유하우량에 영향을 미치는 인자로 수목의 표면적, 가지와 잎의 형태, 잎 표면의 성질, 수피의 상태, 수간의 형태 등으로 설명하였다. SH와 CS의 기울기는 각각 0.1699(t=9.20, p<0.001)와 0.189(t=15.86, p<0.001)를 보였으나 Mann-Whitney U 검정결과 0.05 수준에서 유의적인 차이를 보이지 않았다.

수간유하우량인 y 값에 0을 대입하면 SH와 CS 각각

**Table 4.** Comparison of water retention rate between result of this study and JSSGP

	Result of this study	MOC (1993)	JPG (2003)	JSSGP (2013)	JSSGP (2018)
WRR (%)	41.9	44.0	46.1	44.5	40.6

5.8 mm, 5.5 mm의 값을 얻을 수 있는데 이는 수간유하우량이 발생한 임외강우량으로 볼 수 있지만, 이는 평균적인 값이므로 실제 강우시에는 강우지속시간, 강우강도, 풍속에 따라 달라질 수 있다(Min and Woo, 1995).

### 3.4. 임외강우량과 차단손실량

SH와 CS의 임외강우량과 차단손실량의 관계는 Fig. 6( $F=78.78$ ,  $p<0.001$ )와 Fig. 7( $F=323.26$ ,  $p<0.001$ )에 나타내었다. Kim and Woo(1988)은 임외강우량과 차단손실량을 2차 다항식의 관계로도 표현하였지만, 국내 대부분의 연구결과(Min and Woo, 1995; Lee et al., 1997; Kim et al., 2003, Kim et al., 2005)에서는 직선회귀식 관계를 나타내었으며, SH와 CS의 차단손실량도 임외강우량의 증가에 비례하는 경향을 보였다. 선형관계에서 기울기는 평균 차단손실률로 SH와 CS 각각 0.3838( $t=8.88$ ,  $p<0.001$ ), 0.4089( $t=17.98$ ,  $p<0.001$ )로 CS가 SH보다 상대적으로 많은 차단율을 보였다( $t=1.67$ ,  $p<0.05$ ). 이러한 값의 차이는 수간유하우량 보다는 수관통과우량, 즉 수관투영면적률에 더 영향을 받은 것으로 판단된다.

CS보다 SH에서 값의 편차가 나타났는데 그 원인으로 Min and Woo(1995)와 Kim et al.(2005)는 기상 조건, 엽량, 계절적인 엽면적지수의 차이로 설명하였다. SH의 경우, 임내 수관사이의 간격으로 인해 강한 풍속의 강우시 잎의 많이 떨어지면서 계측기기를 물리적으로 덮는 등 결측을 유발하기도 하였다. 실제 약 70 mm 이상의 강우 시 SH는 CS보다 값의 편차가 더 큰 것으로 나타났다.

### 3.5. 수원함양률

Fig. 8은 2014년 수액이동속도 측정 결과를 나타낸 것이다. 수액이동속도는 21시부터 06시까지 가장 낮은 값을, 11시부터 15시까지 높은 값을 나타내었으며, 평균 수액이동속도는 SH보다는 CS에서 1.1배 높았다. 증산 영향을 미치는 인자는 기온, 광합성유효방사, 상대

습도, 바람 속도 등이 있는데(Zhu et al., 2022), 현장 조사에서도 CS가 SH보다 수관투영면적률이 높아(Table 1), 증산에 상대적으로 유리한 조건을 가지는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 2014년부터 2016년까지 전체 강우량에서 차단손실량(I), 수액이동량(F), 수원함양량(GR)을 비율로 나타낸 것이다. SH와 CS의 수원함양률은 각각 44.6%, 39.2%로 SH가 CS보다 높게 분석되었다. 이는 전술한 임외강우량과 수관통과우량과의 관계에서와 같이 수관투영면적률(Table 1) 차이로 SH의 수관통과우량이 높아져 지중으로 침투되는 양이 상대적으로 더 많아진 것으로 수관통과우량과 수관투영면적률과의 함수 관계를 제시한 Asdak et al.(1998)의 연구결과와 일치한다. 수관투영면적률은 차단손실률과 수관통과우량의 차이를 발생시키기 때문에 꽃자왈 지면으로 유입되는 수원함양량은 산림사업에 따라 달라질 수 있다.

### 3.6. 꽃자왈 보전

꽃자왈의 수원함양률을 평가하기 위해 제주특별자치도 수자원관리종합계획에서 분석된 값을 참조하였다(Table 4). 제주특별자치도 수자원관리종합계획은 제주특별자치도 설치 및 국제자유도시 조성을 위한 특별법 제378조와 제주특별자치도 지하수 관리 조례 제3조에 따라 10년 단위로 수립 및 시행해야 하는 법정계획이다. 연구지역의 평균 수원함양률은 41.9%로 2018년 제주특별자치도 수원함양률인 40.6%와 유사한 값을 나타내었다. 또한, 과거 분석값과 비교 시 수원함양률이 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었는데, 2018년의 제주특별자치도의 불투수 면적이 2010년에 비해 16% 증가한 것을 그 원인으로 밝히고 있다. 따라서, 지표환경 변화가 수원함양에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

제주특별자치도는 수자원관리종합계획(JSSGP, 2018)을 통해 수자원 관리체계의 기본 방향을 효율적 배분과 합리적 이용, 청정수질 유지, 물순환 건전성 제고, 과학적 관리로 설정하였고, 물순환 체계의 건전성 확보 분야에서는 주요 지하수 함양지역인 증산간 및 꽃자왈 지역

에 대해 엄격한 보전관리의 필요성을 정책적으로 제안하고 있다. 그럼에도 불구하고 꽃자왈 지역 내 사업장의 비율은 꽃자왈 면적 99.5 km<sup>2</sup>의 29.5%이며, 제주도 전체 꽃자왈 지대 내 127개 사업장 중에서 연구지역과 인접한 교래·선홍꽃자왈 지대에 68개소(53.5%), 저지·청수 꽃자왈 지대에 27개소(21.3%)가 있는 것으로 조사되었다 (The Gotjawal Trust of Jeju, 2018). 경제적 편익에 따른 꽃자왈 면적 감소로 지하수 수질 보전과 함께 수원함양기능의 저하가 발생할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 2013년부터 2017년까지 제주도 용암류 기반의 생태학적 가치가 높은 꽃자왈 중 SH 및 CS를 대상으로 산림 내 물순환 요소인 수관통과우량, 수간유하우량, 차단손실량 특성을 분석하였고 이를 제주특별자치도 전체 수원함양률과 비교하였다.

임외강우량에서 평균 수관통과우량, 수간유하우량, 차단손실량의 비율은 43.1%, 15.8%, 41.1%를 나타내었다. 꽃자왈연구시험림 내 연구대상지는 대표 수종인 증가시나무(*Quercus glauca*)의 수관밀도가 매우 높아 관목이 덜 발달한 환경으로 국내에 간별하지 않은 침엽수림 지역과 비슷한 차단손실량을 나타내었다. 임외강우량과 수관통과우량, 임외강우량과 수간유하우량, 임외강우량과 차단손실량의 관계는 모두 선형회귀식( $p < 0.001$ )으로 나타낼 수 있었으며, 기울기 또한 0.001 수준에서 유의하여 선형성이 잘 나타났다. SH와 CS 간의 비교에서, 수관통과우량은 SH가 CS보다 높게 나타나( $p < 0.05$ ) 임분구조 차이에 따른 수관투영면적률이 영향을 미쳤던 것으로 판단된다. 수간유하우량은 0.05 수준에서 유의적인 차이를 보이지 않았다. 차단손실량은 CS가 SH보다 높게 나타나( $p < 0.05$ ) 수관투영면적률 때문인 것으로 판단된다. 수원함양률은 SH가 CS보다 높게 나타났는데 차단손실량에 기인하는 것으로 판단된다. SH와 CS는 증가시나무의 순림으로 관목층의 발달이 거의 없는데 향후 꽃자왈의 관리방안 수립 시 인위적인 수관밀도 조절을 한다면 종다양도와 함께 가용수 자원의 비율도 증가될 수 있을 것으로 판단된다.

꽃자왈 지역의 평균 수원함양률은 41.9%로 제주특별자치도 전체 수원함양률인 40.6%와 유사한 결과값을 나타내었다. 현재 제주특별자치도에서 꽃자왈의 개발이 진행되고 있다. 꽃자왈의 개발은 불투수 지역 증가

등 지표환경 변화로 수원함양기능의 저하를 초래하여 제주특별자치도 전체 지하수 함양량에도 영향을 미칠 것이다. 따라서, 꽃자왈 지역의 보전은 수자원 보전 관점에서 매우 중요할 것으로 판단된다.

#### REFERENCES

- Ahn, U. S., Sohn, Y. K., Kang, S. S., Jeon, Y. M., Choi, H. S., 2015, The major causes of Gotjawal formation in Jeju Island, J. Geol. Soc. Korea, 51, 1-19.
- André, F., Jonard, M., Jonard, F., Ponette, Q., 2011, Spatial and temporal patterns of throughfall volume in a deciduous mixed-species stand, J. Hydrol., 400, 244-254.
- Asdak, C., Jarvis, P. G., Gardingen, P. V., 1998, Modelling rainfall interception in unlogged and logged forest areas of central Kalimantan, Indonesia, Hydrol. Earth. Syst. Sci., 2, 211-220.
- Choi, S. J., Hyeon, H. J., 2018, Consideration of defining Gotjawal, Literature and Environment, 17, 77-101.
- Friesen, J., Van Stan II, J. T., 2019, Early european observations of precipitation partitioning by vegetation: a synthesis and evaluation of 19<sup>th</sup> century findings, Geosci., 9, 423-430.
- Granier, A., 1985, A New method of sap flow measurement in tree stems, Ann. sci., 42, 193-200.
- Han, C., Zhang, C., Liu, Y., Li, Y., Zhou, T., Khan S., Chen N., Zhao, C., 2021, The capacity of ion adsorption and purification for coniferous forests is stronger than that of broad-leaved forests, Ecotoxicol. Environ. Saf., 215, 1-10.
- Haworth, K., McPherson, G. R., 1995, Effects of *Quercus emoryi* trees on precipitation distribution and microclimate in a semi-arid savanna, J. Arid Environ., 31, 153-170.
- Jang, Y. C., Lee, C. W., 2009, Gotjawal Forest In Jeju Island as an Internationally Important Wetland, Wetl. J., 11, 99-104.
- Jeju Province Government (JPG), 2003, Jeju Island hydrogeology and groundwater resources comprehensive survey (III), Jeju Province Government and K Water, National Institute of Forest Science, Jeju, Korea.
- Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP), 2009, Jeju Dictionary, Jeju Foundation for Arts and Culture, Jeju, Korea. 83-84.
- Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP), 2013, Jeju Island water resources management comprehensive plan, Jeju, Korea.
- Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP), 2014, Jeju

- Special Self-Governing Province and Gotjawal conservation and management ordinance, No. 1198, Jeju Special Self-Governing Province, Jeju.
- Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP), 2018, Jeju Island water resources management comprehensive plan, Jeju. Korea.
- Jeon, Y., Ahn, U. S., Ryu, C. G., Kang, S. S., Song, S. T., 2012, A Review of geological characteristics of Gotjawal terrain in Jeju Island: preliminary study, J. Geo. Soc. Korea., 48, 425-434.
- Jeon, Y. M., Kim, D. S., Ki, J. S., Koh, J. G., 2015, A Proposal for geological classification of Gotjawal terrain in Jeju Island and its meaning, J. Geo. Soc. Korea., 51, 235-241.
- Jin, H. O., Son, Y. W., 2007, Nutrient dynamics and water quantity throughfall and stemflow in natural oak stands in Korea, KJAFM, 9, 61-70.
- Jung, M. H., Lee, D. K., Um, T. W., 2007, Differences of nutrient input by throughfall, stemflow and litterfall between deciduous forest and *Larix kaempferi* plantation in Mt. Joonwang, Kangwon-do, KJSSF, 40, 136-144.
- K-Water, 1993, Jeju Island water resources comprehensive development plan establishment report, Daejeon, Korea.
- Khan, M. A., 1999, Water balance and hydrochemistry of precipitation components in forested ecosystems in the arid zone of Rajasthan, India, Hydrol. Sci., 44, 149-161.
- Killingbeck, K. T., Mohan, K. W., 1978, Analysis of a North Dakota gallery forest: nutrient, trace element and productivity relations, Oikos, 30, 29-60.
- Kim, H. H., Park, E. J., Hyeon, H. J., Seo, Y. O., Park, J. H., 2020(b), Comparison on vegetation structure of Gotjawal area in Jeju Island, J. Agric. Life Sci., 54, 43-50.
- Kim, H. H., Park, E. J., Jeong, K. S., Seo, Y. O., Yim, E. Y., Park, J. H., 2020(a), Vegetation structure and management by forest types in Jeju Gotjawal experimental forest, J. Agric. Life Sci., 54, 55-62.
- Kim, K. H., Jeong, Y. H., Jeong, C. G., 2003, Effects of thinning and pruning on net rainfall and interception loss in *Abies holophylla*, J. Korean For. Soc., 92, 276-283.
- Kim, K. H., Jun, J. H., Yoo, J. Y., Jeong, Y. H., 2005, Throughfall, stemflow and interception loss of natural old-growth deciduous and planted young coniferous in Gwangneung and the rehabilitated young mixed forest in Yangju, Gyeonggi-do (I)-with a special reference on the result measurement, J. Korean Soc. For. Sci., 94, 488-495.
- Kim, K. H., Shin, J. Y., Koh, E. H., Lee, K. K., 2009, Sea level rise around Jeju Island due to global warming and movement of groundwater/seawater interface in the eastern part of Jeju Island, KSFEA., 14, 68-79.
- Kim, K. H., Woo, B. M., 1988, Study on rainfall interception loss from canopy in forest (I), J. Korean For. Soc., 77, 331-337.
- Lee, D. K., Kim, G. T., Joo, K. Y., Kim, Y. S., 1997, Throughfall, stemflow and rainfall interception loss in *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc., *Larix leptolepis* (Sieb. et Zucc.) Gordon and *Quercus* species stand at Kwangju-Gun, Kyunggi-Do, J. Korean For. Soc., 86, 200-207.
- Levia Jr, D. F., Frost, E. E., 2003, A Review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems, J. Hydrol., 274, 1-29.
- Medeiros, P. H. A., de Araújo, J. C., Bronstert, A., 2009, Interception measurements and assessment of Gash model performance for a tropical semi-arid region, RCA, 40, 165-174.
- Min, H. J., Woo, B. M., 1995, Throughfall, stemflow and interception loss at *Pinus taeda* and *Pinus densiflora* stands, J. Korean For. Soc., 84, 502-516.
- Molina, A. J., Llorens, P., Garcia-Estringana, P., de las Heras, M. M., Cayuela, C., Gallart, F., Latron, J., 2019, Contributions of throughfall, forest and soil characteristics to near-surface soil water-content variability at the plot scale in a mountainous Mediterranean area, Sci. Total Environ., 647, 1421-1432.
- National Institute of Forest Science (NIFoS), 2011, Hydrological cycle in forest watershed, Research Report 11-14, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea.
- National Institute of Forest Science (NIFoS), 2013, Standard manual for forest water resource investigation, Report 524, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea.
- National Institute of Forest Science (NIFoS), 2019, Research on exploration of Gotjawal's value and sustainable utilization in Jejudo, Research Report 19-18, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea.
- Neave, M., Abrahams, A. D., 2002, Vegetation influences on water yields from grassland and shrubland ecosystems in the Chihuahuan Desert, Earth Surf Process Landf., 27, 1011-1020.
- Nulsen, R. A., Bligh, K. J., Baxter, I. N., Solin, E. J., Imrie, D. H., 1986, The fate of rainfall in a mallee and heath vegetated catchment in southern Western

- Australia, *Austral Ecol.*, 11, 361-371.
- Owen, M. K., Lyons, R. K., Alejandro, C. L., 2006, Rainfall partitioning within semiarid juniper communities: Effects of event size and canopy cover, *Hydrol. Process.*, 20, 3179-3189.
- Park, J. B., Kang, B. R., Koh, G. W., Kim, G. P., 2014, Geological characteristics of Gotjawal terrain in Jeju Island, *J. Geol. Soc. Korea.*, 50, 431-440.
- Park, Y. H., 1988, Jeju dialect Research, Report 376, Korean University Ethnic Culture Research Institute, Seoul.
- Pathak, P. C., Pandey, A. N., Singh, J. S., 1985, Apportionment of rainfall in central Himalayan forests (India), *J. Hydrol.*, 76, 319-332.
- Prebble, R. E., Stirk, G. B., 1980, Throughfall and stemflow on silverleaf ironbark (*Eucalyptus melanophloia*) trees, *Aust. J. Eco.*, 5, 419-427.
- Pressland, A. J., 1973, Rainfall partitioning by an arid woodland (*Acacia aneura* F. Muell.) in south-western Queensland, *Aust. J. Bot.*, 21, 235-245.
- Pressland, A. J., 1976, Soil moisture redistribution as affected by throughfall and stemflow in an arid zone shrub community, *Aust. J. Bot.*, 24, 641-649.
- Robertson, S. M. C., Hornung, M., Kennedy V. H., 2000, Water chemistry of throughfall and soil water under four tree species at Gisburn, northwest England, before and after felling, *For. Ecol. Manag.*, 129, 101-117.
- Rowe, L. K., 1983, Rainfall interception by an evergreen beech forest, Nelson, New Zealand, *J. Hydrol.*, 66, 143-158.
- Sadeghi, S. M. M., Attarod, P., Van Stan, J. T., Pypker, T. G., 2016, The importance of considering rainfall partitioning in afforestation initiatives in semiarid climates: A comparison of common planted tree species in Tehran, Iran, *Sci. Total Environ.*, 568, 845-855.
- Silva, I. C., Okumura, T., 1996, Throughfall, stemflow and interception loss in a mixed white oak forest (*Quercus serrata* Thunb.), *J. For. Res.*, 1, 123-129.
- Song, S. T., 2000., Distribution and lithology of the Aa rubble flows on Cheju Island, Korea, Ph.D. Dissertation, Pusan National University, Busan, Korea.
- Song, S. T., Yoon S., 2002, Lavas in Gotjawal Terrain, Jeju Island, Korea No. 1. Jocheon-Hamdeok Gotjawal Terrain, *J. Geol. Soc. Korea.*, 38, 377-389.
- Suk, J. M., 1947, Jeju dialect collection, Seoqwipo Cultural Center, Seoqwipo, Korea.
- Swaffer, B. A., Holland, K. L., Doody, T. M., Hutson, J., 2014, Rainfall partitioning, tree form and measurement scale: a comparison of two co-occurring, morphologically distinct tree species in a semi-arid environment, *Ecohydrol.*, 7, 1331-1344.
- The Gotjawal Trust of Jeju, 2018, Report on the actual condition of business sites in Gotjawal, Jeju, Korea.
- Valente, F., David, J. S., Gash, J. H., 1997, Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models, *J. Hydrol.*, 190, 141-162.
- Zhu, Y., Cheng, Z., Feng, K., Chen, Z., Cao, C., Huang, J., Ye, H., Gao, Y., 2022, Influencing factors for transpiration rate: A numerical simulation of an individual leaf system, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 27, 101110.

- 
- Researcher. Jae-Hoon Kim  
Urban Forests Division, Forest Environment and Conservation Department, National Institute of Forest Science  
jkim1922@korea.kr
  - Postdoctoral Fellow. Hong-Geun Lim  
Urban Forests Division, Forest Environment and Conservation Department, National Institute of Forest Science  
hgh3514@korea.kr
  - Senior researcher. Hyung-Tae Choi  
Urban Forests Division, Forest Environment and Conservation Department, National Institute of Forest Science  
choiht@korea.kr
  - Postdoctoral Fellow. Qi-Wen Li  
Urban Forests Division, Forest Environment and Conservation Department, National Institute of Forest Science  
gimunlee2@korea.kr
  - Research Assistant. Hae-Won Moon  
Urban Forests Division, Forest Environment and Conservation Department, National Institute of Forest Science  
haewonii@korea.kr
  - Senior researcher. Hyung-Soon Choi  
Urban Forests Division, Forest Environment and Conservation Department, National Institute of Forest Science  
forgene@korea.kr