

소나무와 상수리나무림의 임내우 물수지 특성^{1*}

이현호² · 박재철³

Characteristics of Water Budget on Throughfall and Stemflow in *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima*^{1*}

Heon-Ho Lee², Jae-Chul Park³

요 약

본 연구는 산지의 수자원보전량 평가용 수문유출모형의 개발을 위한 중요한 기초연구로서 우리나라 주요 수종인 소나무와 상수리나무에 대한 수간류 및 수관통과우의 물수지식과 수문학적 특성을 밝히고자 수행하였다. 영남대학교 자연자원대학 부속 용성연습림과 영남대학교 교내 야산에 각각 수관통과우 및 수간류 관측용 야외 실험지를 설치하고, 1995년 9월에서 1998년 6월까지 약 2년 10개월 사이에 이 지역에 내린 다수의 단위강우에 대한 두 수종의 임내우 수량배분을 조사하였다. 그 결과 임외의 단위강우에 응답하는 두 수종의 수문학적 특성과 임내우 물수지식을 요약하면 다음과 같다.

1. 소나무에 있어서 수관통과우와 수간류의 총량은 각각 임외우의 73.8%와 0.8%이었으며, 상수리나무는 각각 임외우의 76.9%와 3.8%로 관측되었다.

2. 소나무에 있어서 임외우(G_p)에 대한 수간류(S_f)와 수관통과우(T_f)의 회귀식은 각각 $S_f = 0.01G_p - 2.05$ ($r^2=0.54$), $T_f = 0.79G_p - 26.04$ ($r^2=0.92$)로, 임내우(N_f)와는 $N_f = 0.81G_p - 28.09$ ($r^2=0.92$)로 추정하였다. 이와 같이 소나무에 있어서 수간류와 수관통과우는 임외우의 양에 정비례하여 증가하였다.

3. 상수리나무에 있어서 임외우(G_p)에 대한 수간류(S_f)와 수관통과우(T_f)의 회귀식은 각각 $S_f = 0.03G_p + 12.25$ ($r^2=0.74$), $T_f = 0.78G_p + 19.75$ ($r^2=0.96$)로, 임내우(N_f)와는 $N_f = 0.81G_p + 31.99$ ($r^2=0.96$)로 구해졌는데 소나무보다 상수리나무에 있어서 수간류와 수관통과우의 증가폭이 더 큰 것으로 나타났다.

4. 수간류 및 수관통과우와 그 영향인자로 평가된 수관투영면적(CA), 흉고직경(DBH), 임외우량(G_p)과의 내부상관분석을 한 결과, 소나무 수간류에는 임외우>수관투영면적>흉고직경의 순으로, 상수리나무 수간류에는 임외우>흉고직경>수관투영면적의 순으로 상관계수 값이 높았다. 그리고 소나무와 상수리나무의 수관통과우는 임외우>수관투영면적>흉고직경의 순으로 상관계수 값이 높았다.

주요어 : 임외우, 수간류, 수관통과우, 수량배분, 물수지식

* 이 논문은 1996학년도 영남대학교 학술연구조성비에 의한 것임.

1 접수 9월 30일 Received on Sep. 30, 1998

2 영남대학교 자연자원대학 산림자원학과 Dept. of Forest Resources, College of Natural Resources, Yeungnam Univ., Kyongsan, 712-749, Korea

3 영남대학교 대학원 산림자원학과 Dept. of Forest Resources, Graduate School, Yeungnam Univ., Kyongsan, 712-749, Korea

ABSTRACT

This study, as an essential research to develop a mountainous runoff model, was conducted to clarify the hydrologic character and water budget equation of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima*. Net rainfall quantity division for two species was investigated at Youngsung experiment forest and Yeungnam University for 30 months (Sep. 1995 - Jun. 1998). The results were summarized as follows; 1. The percentages of throughfall and stemflow to gross precipitation are 73.8% and 0.8% in the *Pinus densiflora*, and 76.9% and 3.8% in the *Quercus acutissima*, respectively. 2. In the *Pinus densiflora*, regression formula of stemflow, throughfall, and net rainfall to gross precipitation are $S_f = 0.01Gp - 2.05$ ($r^2=0.54$), $T_f = 0.79Gp - 26.04$ ($r^2=0.92$), $N_r = 0.81Gp - 28.09$ ($r^2=0.92$). Stemflow and throughfall increased in direct proportion to gross precipitation. 3. In the *Quercus acutissima*, regression formula of stemflow, throughfall, and net rainfall to gross precipitation are $S_f = 0.03Gp + 12.25$ ($r^2=0.74$), $T_f = 0.78Gp + 19.75$ ($r^2=0.96$), $N_r = 0.81Gp + 31.99$ ($r^2=0.96$), respectively. Comparing with two species, gross precipitation has a much larger effect on the stemflow and throughfall of *Quercus acutissima* than those of *Pinus densiflora*. 4. In the analysis of intercorrelation between stemflow and throughfall of each species and crown area(CA), diameter at breast height(DBH), and gross precipitation(Gp), correlation coefficient was higher by following order at each species; $Gp > CA > DBH$ on stemflow of *Pinus densiflora*, $Gp > DBH > CA$ on stemflow of *Quercus acutissima*, and $Gp > CA > DBH$ on throughfall of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima*.

KEY WORDS : GROSS PRECIPITATION, STEMFLOW, THROUGHFALL, WATER QUANTITY DIVISION, WATER BUDGET EQUATION

서론

현재 우리 나라의 산지는 과거 대규모 황폐지에 대해 1970년대 초반부터 시행한 치산녹화사업으로 외형적으로 대부분이 삼림으로 피복되어 있다. 그러나 우리의 산림이 경제적 및 공익적 기능을 충분히 발휘할 수 있는 안정된 생태계로의 복원이 이루어지기도 전에 최근 산지에서 공단, 택지조성 또는 골프장 건설 등과 같은 무분별한 개발로 인해 산지의 토지이용 전환이 확대되어 가는 추세에 있다. 이러한 무계획적인 개발행위나 산림면적의 감소는 특히 급년 여름과 같이 유례가 없는 빈번한 집중호우의 발생시에 우리 사회에 막대한 인적·물적 자원의 피해를 가속화시켰다. 산림면적의 감소나 산림 황폐지의 증가는 본래 산지가 가지고 있던 산림의 산원수자원 보전기능을 약화시키기 때문에 집중호우시의 홍수유량을 감소시켜주는 기능이나 갈수기에 산지로부터 끊임없이 안정된 유출수량을 공급하는 기능 등의 산림환경 조절기능에 대한 기대를 할 수 없게 만든다.

우리의 현실이 이렇음에도 불구하고 산지의 수자

원관리, 보전 및 확대방안, 또는 수질정화기술개발 등과 같은 공익적 기능에 대한 연구가 부족하고, 또한 그 가치가 올바르게 평가받지 못하고 있는 실정이다. 더구나 산림의 환경적 기능의 실태에 관한 연구, 또는 장래의 산원수자원량의 변화 예측이나 이를 위한 산림사업의 장기적 방향에 대한 연구와 축적된 자료가 상당히 부족한 상태에 있다. 이 시점에서 먼저 우리나라 산지를 대상으로 한 산원수문자료를 체계적으로 축적해 가야 하며, 예를 들면, 강우량과 유출현상을 비롯한 임내우, 토양수, 계류수 등 산지의 모든 수문사상과 물순환과정을 대상으로 하여 간단한 수문모델부터 하나씩 단계적으로 구축해 갈 필요가 있다. 궁극적으로 산원수자원량의 정확하고 과학적인 평가를 위해서는 먼저 그 지역에 가장 적합한 수문유출모형을 개발하여 현존 산원수자원 보전량의 추정과 장래의 수자원확보를 위한 정확한 예측이 가능하여야 할 것이다. 본 연구에서 수행한 산지로부터 수관통과 우와 수간류의 측정 및 물수지 추정은 산림이 유역의 물생산에 미치는 영향을 예측하는 데에 반드시 필요한 작업이고, 이후 후속 연구로 수행할 산림유역 전체를 대상으로 한 산원수자원 보전량의 평가와 보전

대책을 수립할 때 아주 긴요하게 활용할 수 있다.

국내외에서 수관통과우와 수간류의 측정 및 모델화에 관한 연구는 다수 있다. 김경하(1993)가 리기테다 소나무림과 신갈나무림에 있어서 임내우량 배분에 관해 보고하였으며, 수관차단손실량 추정용 전산모형을 개발하고 그 모형의 활용성이 높다고 하였다. 이현규(1998)는 잣나무의 임내우량 물수지를 측정하여 임외우에 대한 수관통과우의 비율이 53.1%, 수간류가 2.6% 정도라고 하였다. 일본에서는 1911년 삼림측후소에서 삼림내외의 강우량의 비교를 중심으로 연구를 시작한 것이 산림수문연구의 효시이며, 이후 1919년경 Horton의 연구를 거의 같은 내용으로 실시한 바 있다(近嵐, 1986). 그 후 차단현상의 연구범위를 하층식생까지 넓혀 임황 및 계절별로 그 성과를 보고하였으며, 실내실험으로 공시지엽(供試枝葉)의 수분부착량을 측정하여 수목 전체의 엽량과의 관계로부터 차단량을 추정하기에 이르렀다. 최근에 이르러 차단현상은 증발에 의해서 일어난다는 관점에서 열수지와 공기역학의 이론에 근거하여 이들을 수식화 혹은 모델화(坂本康, 1993)하는 연구가 많이 진행되고 있다. 한편, Lawson(1967)은 소나무와 참나무림의 혼효림에서 임외우에 대한 수관통과우량의 비율이 84.9%, 수간류가 2.4%라고 하였고, 수간류의 총량은 침엽수보다 활엽수에서 높았으며, 수간류의 추정에 있어서 흉고단면적과의 관계식이 가장 유효한 것으로 보고한 바 있다. 服部 等(1982)은 편백나무림에 있어서 임내우의 수량배분에 대해 보고하였으며, Silva와 Okumura(1996)는 참나무 혼효림(Mixed White Oak)에서 임내우를 측정한 결과 총강우량에 대해 수간류가 10%, 수관통과우가 72%로 나타났으며, 최대강우강도와 수간류 사이에 높은 상관성이 있다고 하였다. 또한 수관차단량은 18%로 평가되었으며, 이는 강우지속시간 및 강우강도와 같은 강우 특성과 높은 상관성이 있다고 하였다. Gash *et al.*(1980)은 차단손실량에 영향을 주는 인자를 기상인자와 임분구조인자로 구분하여 조사하였으며, Skau(1964)는 임외우와 임관밀도지수를 이용하여 수관통과우를 보다 정확하게 예측할 수 있다고 하였다. 이현호와 전재홍(1996), 이현호(1997)는 소나무와 상수리나무에 있어서 임외우가 두 수종을 통과할 때, 수관통과우와 수간류의 시계열 수질변화를 분석하고 각 수종에 있어서 측정된 유출수량과 수질변화와의 관련성에 대해 보고한 바 있다.

이와 같이 기존의 연구성과가 주로 외국의 경우를 취급하고 있고, 국내의 임내우에 대한 연구 동향도 현재 불과 몇 수종에 대한 결과만을 보고하고 있는

실정이어서 우리나라 산지의 주요 수종인 소나무와 상수리나무를 대상으로 한 임내우 수량배분에 대한 연구가 시급한 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구의 목적은 우리나라 산지유역의 종합적인 수문유출모형을 개발함에 있어서 필수적인 주요 수종의 임내우 양적배분과 물수지식을 산출하고, 그 수문학적 특성을 구명하는 데 있다. 나아가 본 연구 결과가 전체 산림유역의 수문유출모델의 구축에 필요한 기초 서브모델로서 긴요하게 활용될 것으로 기대한다.

재료 및 방법

1. 실험지 개황 및 연구재료

(1) 실험지 개황

경상북도 경산시 용성면 매남3리(동경 128° 56' 30", 북위 35° 48' 00")에 위치한 영남대학교 부속연습림, 그리고 경산시 대동(동경 128° 45' 30", 북위 35° 49' 00")에 위치한 영남대학교 교내 야산의 2개 지역에서 각 1개의 야외 조사지를 선정하였다 (Figure 1).

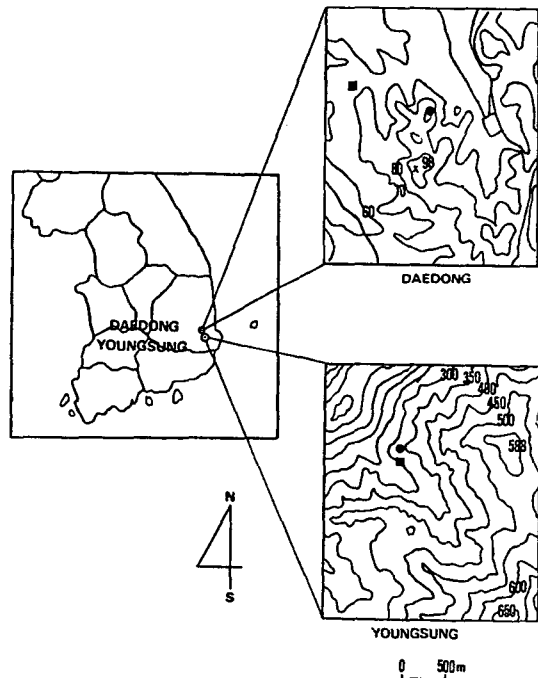


Figure 1. Location map of experimental sites

- : Gross precipitation sampling site
- : Stemflow and throughfall sampling site

Table 1. General description of experimental sites

Site	Altitude (m)	Soil type	A ₀ layer (cm)	Soil hardness (kg/cm ²)	Slope (°)	Forest type
YONGSUNG	350	Sandy loam	1.5	4.8	37	Mixed
DAEDONG	90	Sandy loam	2.5	5	17	Mixed

Table 2. Characters of rainfall data measured in experimental sites

No.	Site	Date	Precipitation (mm)	Elapsed time (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	Antecedent precipitation (mm)
*1	YONGSUNG	95.09.23	17.1	24.5	0.7	
*2	DAEDONG	96.03.14	34.7	17.6	1.9	
3	DAEDONG	96.03.16	25.4	18.2	1.4	25.6
4	DAEDONG	96.03.21	48.7	26.8	1.8	24.5
5	YONGSUNG	96.04.29	16.4	56.4	0.3	
6	YONGSUNG	96.05.04	15.3	24.2	0.6	24.4
7	YONGSUNG	96.07.04	38.0	24.2	1.6	7.1
*8	YONGSUNG	96.08.27	61.1	41.0	1.5	22.0
*9	DAEDONG	98.05.01	24.2	27.0	0.9	
*10	DAEDONG	98.05.11	50.9	28.3	1.8	
*11	DAEDONG	98.06.01	24.8	11.0	2.3	

* : Rainfall data used in analysis.

각 조사지의 개황은 Table 1에 나타냈으며, 용성 연습림의 임상은 주로 소나무와 참나무류, 관목류 등으로 구성된 침활혼효의 천연림이고, 대동의 임상은 대부분 리기다 조림지로 구성되어 있으며, 참나무류가 약간 혼재되어 있다.

(2) 연구재료

대상 강우의 선정은 1995년 9월부터 1998년 6월까지 약 2년 10개월 동안 이 지역에 내린 단위강우 중 강우개시부터 종료 때까지 일정시간 간격으로 측정이 가능하였던 강우만을 대상으로 하였다. 강우는 용성에서 2개, 대동에서 4개를 각각 선정하였다. 각 조사지에서 측정한 모든 단위강우의 강우개시일, 총강우량, 강우지속시간, 강우강도, 그리고 5일간의 선행강우량 등의 강우 특성을 Table 2에 나타내었다.

대상수목은 소나무(*Pinus densiflora*)와 상수리나무(*Quercus acutissima*)로 결정하고 이때 수관의 발달이 양호하고 수간이 통직하며, 또한 과거 병충해의 피해를 입지 않았던 수목을 선정하였다. 또한 이들 수목의 형태학적 특성으로 인해 통계분석 때 발생할 수도 있는 오차를 최소화하기 위해 수종별 수관투영면적과 흉고직경 및 수고가 가급적 비슷한

수목을 선정하는 데 유의하였다. 용성 조사지에서 소나무와 상수리나무 각각 2개체, 그리고 대동 조사지에서 소나무 7개체, 상수리나무 4개체를 각각 선정하고 각 수목에 일련번호를 붙였다. 이때 선정된 수목의 수관통과우 채수시 다른 수목의 영향을 없애기 위하여 이들 수관이 서로 겹쳐지지 않게 주위의 수목을 정리하였다. 각 조사지에서 선정한 대상수목의 수고, 흉고직경, 수관폭을 Table 3에 나타내었다.

2. 연구 방법

(1) 임외우와 임내우의 측정방법

임외우(gross precipitation)는 선정된 2개 조사지에서 수관의 영향을 받지 않는 조사지 근처 공지에 보통우량계와 OTA사에서 제작한 전도형 자기우량계(tipping bucket rain gauge)를 설치하여 측정하였다. 이때 단위강우의 시계열 수량변화를 측정하기 위하여 일정시간 간격으로 임외우를 측정하고, 강우 종료 후에 총량을 기록하였다. 임내우(net rainfall)는 임상(forest floor)에 도달하는 수관통과우와 수간류를 합한 강우로서, 이 가운데 수관통과우는 수관에 접촉하지 않고 직접 지표면에 떨어지는 강우와

Table 3. General description of selected trees

Site	YONGSUNG				DAEDONG										
	P _I	P _{II}	Q _I	Q _{II}	P _I	P _{II}	P _{III}	P _{IV}	P _V	P _{VI}	P _{VII}	Q _I	Q _{II}	Q _{III}	Q _{IV}
Height(m)	7.4	7.2	11.9	10.3	7.6	9.5	9	7.5	9.3	6	7.5	15	18.5	17.5	13
DBH(cm)	11.8	13.7	16.8	14.5	22	20	21	22	21	18	18	21	24	31	20
CA(m ²)	8.2	8.1	20.8	15.1	32.4	28.4	20.6	24.2	21.3	18.4	11.5	26.2	45.1	80.8	49.3

CA: Crown area, P: *Pinus densiflora*, Q: *Quercus acutissima*

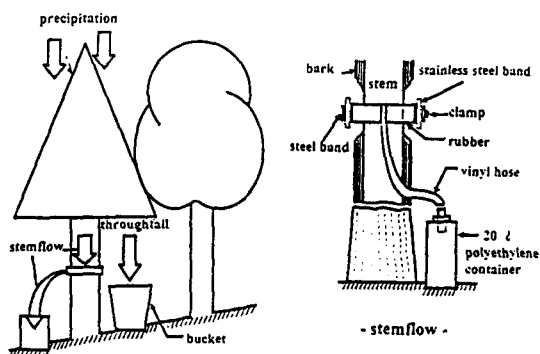


Figure 2. Schematic diagram of devices for collecting stemflow and throughfall

수관에 일시 저류 되었다가 바람과 중력 등의 영향으로 떨어지는 강우를 가리키며, 수간류는 수간에 부착 또는 저류된 강우가 수관을 따라 흘러내리는 강우를 가리킨다.

임내우의 채수 방법을 Figure 2에 모식적으로 나타내었다. 수간류는 각 조사지에서 선정된 수목의 흉고높이에 수피를 벗겨 매끄럽게 다듬고 비닐호스를 고정시킨 후, 고무밴드를 두르고 정확한 고정을 위해 못을 박았다. 고무밴드 위에는 스테인레스 스틸밴드를 씌우고 클램프로 고정시켰으며, 누수방지를 위해 silicon sealant로 빈틈을 없앴다. collar 내로 수집된 수간류를 수목 근주부에 설치한 용량 20 l 플라스틱통에 고무호스를 통하여 채수하고, 일정시간 간격으로 수량을 측정하였다. 수관통과우는 수간류를 측정된 수목의 수관부 아래에 입구단면적이 0.073m²인 고무버킷을 수 개 설치하여 수간류와 동시에 측정하였으며, 고무버킷의 단면적을 수관면적으로 환산하여 각 입목의 수관통과우를 추정하였다. 임외우와 수간류, 수관통과우의 수량은 각 단위강우별로 측정하였으며, 동시에 각 수량의 강우지속시간 및 강우강도에 따른 시계열 변화를 조사하기 위해 일정시간 간격으로 각각 수회 측정하였다. 또한 강우개시후 각 수량

의 측정 시간간격은 가급적 동일시간에 같은 간격으로 하여 강우종료 후까지 연속적으로 측정하였다.

(2) 분석 방법

1) 임외우의 강우 특성

조사기간 동안에 수집한 모든 단위강우에 대해 총강우량, 지속시간, 강우강도 및 선행강우량을 분석하여 각 강우의 특성을 분석하였다. 이 가운데 강우개시부터 종료 후까지 수량의 측정이 가능하였던 단위강우를 선정하여 총강우량과 강우강도와의 관계를 조사지별로 비교하였다.

2) 임외우와 임내우, 차단손실량의 시계열 변화

임내에서의 물순환 과정별 수량변화를 파악하기 위하여 임외우의 강우강도와 경과시간에 따른 수간류와 수관통과우, 차단손실량의 시계열 변화 모습을 구하였다. 이때 임외우의 총량과 강우강도 및 지속시간이 각 수량의 경시적인 누적량에 영향을 주는 것으로 보고, 이를 분석하여 소나무와 상수리나무에 있어서 임외우에 대한 각 수량의 수문학적 반응과 특성을 조사하였다.

3) 임내우의 수량 배분과 물수지식 추정

임외우의 총량에 대한 수관통과우 및 수간류의 양적 배분을 산출하고, 대상수목인 소나무와 상수리나무에 있어서 배분된 각 수량의 총량을 비교하여 두 수종간의 수문학적 특성을 분석하였다.

임외우에 대한 임내우의 양적배분을 정량적으로 산출한 자료를 분석하여 각 단위강우에 대한 수종별 평균 차단손실량을 구하였다. 소나무와 상수리나무에 있어서 차단손실량 추정식은 '차단손실량(Ic) = 총강우량(Gp) - 수간류(Sf) - 수관통과우(Tf)' 형태의 물수지식(water budget equation)으로 구하였다.

4) 임내우의 영향인자 분석

임내우의 양적배분에 영향을 주는 인자로 판단되

는 수관투영면적, 흉고직경 및 임외우의 인자를 대상으로 내부상관분석을 실시하여 수간류와 수관통과우에 미치는 영향도를 구하였다.

임외우와 수간류 및 수관통과우와의 관련성에 대하여 수관투영면적과 수관통과우의 관계, 그리고 흉고직경과 수간류의 관계를 단순회귀식으로 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 임외우의 강우 특성

임외우는 임내우의 수량배분이나 임내우 총량에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 인자이다. 조사지 2곳에서 2년 10개월간 측정된 11개의 단위강우 중에서 직접 분석에 사용한 6개의 단위강우에 대하여 강우지속시간과 강우강도를 분석하여 Figure 3에 나타냈다. 대상강우의 총강우량 범위가 17.1~61.1(평균:35.5)mm이고, 강우강도는 0.7~2.3(평균:1.5)mm/hr의 범위에 있어, 강우량과 강우강도의 크기는 우리나라에서 내리는 강우사상에서 일반적인 강우 규모로 볼 수 있다.

Figure 3에서 용성 조사지에 비해 대동 조사지에서 상대적으로 강우강도가 큰 것이 많았던 것으로 나타났다. 이러한 임외우의 강우량과 강우강도의 지역적인 특성은 그 지역에 있어서 임내우 수량배분 및 수관차단량, 그리고 각 수량의 시계열 변화 등 임내우의 수문학적 특성에 크게 영향을 미치는 팩터로 볼 수 있으나, 구체적인 분석은 데이터의 부족으로 실시하지 않았다.

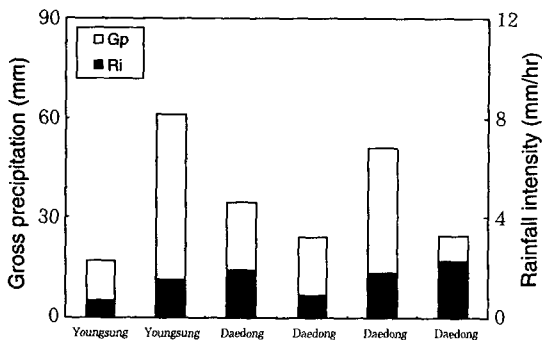


Figure 3. Gross precipitation and rainfall intensity analyzed at each sites(Gp: Gross precipitation, Ri: Rainfall intensity)

2. 임외우와 임내우, 차단손실량의 시계열 변화

상수리나무와 소나무에 있어서 임외우의 변화에 따른 임내우의 누적량을 경과 시간별로 관측하여 Figure 4와 Figure 5에 나타냈다. 그림에서 두 수종 모두 직선적으로 시계열 변화를 하는 것으로 나타났는데, 이 결과는 수관차단량과 임외우와의 관계뿐만 아니라 수관통과우 및 수간류와 임외우 사이의 관계에서 로그식이 가장 적합하다고 추정된 Jackson (1975)의 결과와는 다소 다른 경향을 보여주었다. 두 수종에 있어서 수간류의 시계열변화 경향은 임외우의 시계열변화 경향과 거의 일치하지만(Figure 4와 Figure 5), 소나무에 비해 상수리나무에서 상대적으로 기울기가 급한 경시변화를 하고 있다. 이러한 다소의 기울기 차는 Gash(1980)가 차단손실량에 영향을 주는 인자로 기상인자와 임분구조인자가 있다고한 보고처럼 풍향 또는 풍속과 같은 기상인자의 영향으로 볼 수 있으며, 한편 이러한 결과는 두 수종의 수피

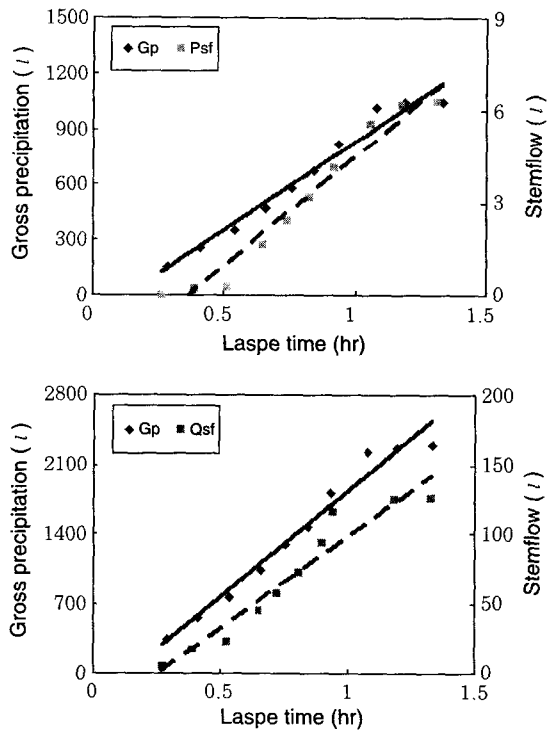


Figure 4. Cumulative amount of stemflow for *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* with passage time(Gp: Gross precipitation, Psf: Pinus stemflow, Qsf: Quercus stemflow)

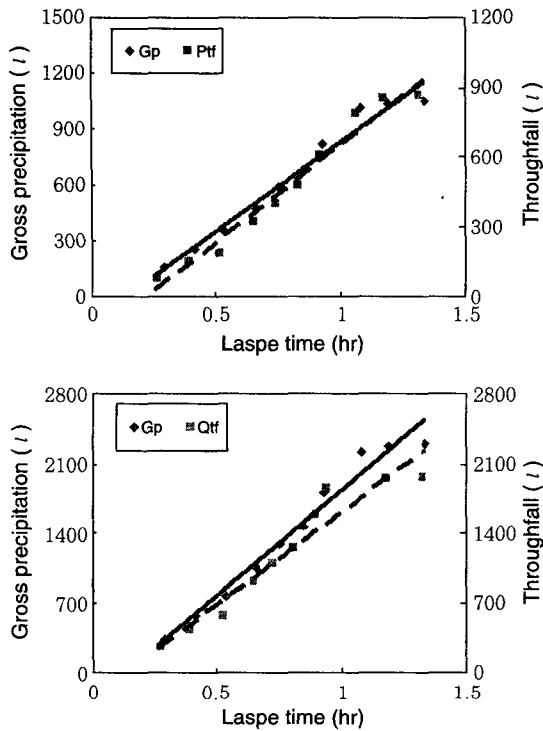


Figure 5. Cumulative amount of throughfall of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* with passage time(Gp: Gross precipitation, Ptf: Pinus throughfall, Qtf: Quercus throughfall)

상태의 차이에 의한 것으로 보고한 이현호(1997)의 보고와도 관련이 깊다.

수관통과우의 경우도 그 경향이 수간류처럼 그렇게 뚜렷하지는 않지만 소나무에 비해 상수리나무에 있어서 시간의 경과에 따른 경시변화가 다소 큰 것으로 나타났으며, 그 원인은 두 수종의 엽면적지수와 수관면적율의 차이에 의한 것으로 볼 수 있으며, 소나무의 경우 엽면적지수가 높아서 상수리나무에 비해 상대적으로 강우가 통과하기 어렵고 또한 수관에 부착되는 수량이 많아서 수관통과우에 기여하는 수량 증대가 늦어지는 것으로 생각된다. 한편, 中野(1976)에 의하면 강우초기에 내리는 강우의 대부분이 수관에 부착하여 쉽게 통과우로 강하하지 못하다가 강우의 계속에 따라 수관이 충분히 적셔진 후에 통과우가 발생하기 때문에 수관통과우의 경시변화는 지수함수의 형태로 증가한다고 하였다. 또한 어느 정도 강우시간이 경과하면 그 이후의 계속된 강우는 이미 수관이 충분히 젖어있기 때문에 수관통과우의

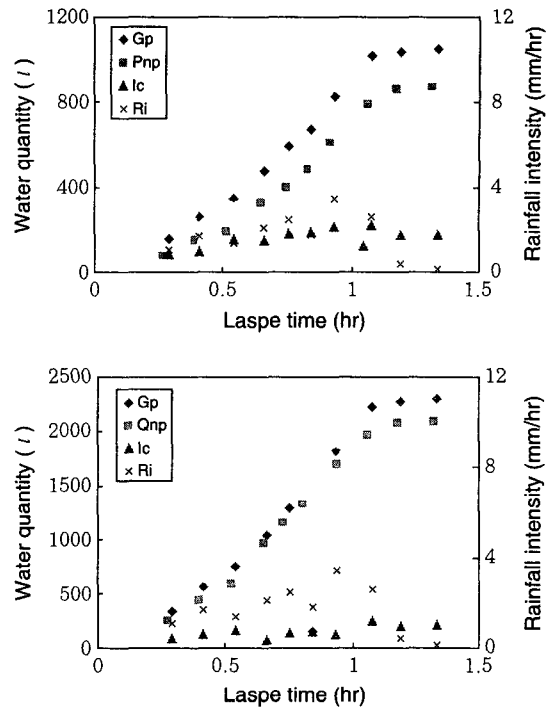


Figure 6. Cumulative amount of gross precipitation and net precipitation of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* with passage time and change of rainfall intensity(Gp: Gross precipitation, Pnp: Pinus net precipitation, Qnp: Quercus net precipitation, Ic: Interception, Ri: Rainfall intensity)

발생량 증가에 크게 기여하지 못하는 것으로 볼 수 있다(只木와 吉良, 1983). 김경하(1987)는 수관통과우의 수종간 차이는 엽면적지수의 상위로 인해 발생하는 수관저류능의 차이에 의한 것으로 보았다.

소나무에 있어서 누적 임내우의 시계열 변화는 누적 임외우의 시계열 변화와 비슷한 경향을 보이면서 증가하고 있으나, 상당한 양이 발생한 차단손실량도 시계열 변화를 보이고 있다(Figure 6). 반면, 상수리나무에 있어서는 누적 임내우의 시계열 변화가 누적 임외우의 시계열 변화와 거의 비슷한 경향을 보이면서 증가하고 있으나, 소나무에 비해 차단손실량이 시계열적으로 매우 적어서 강우 후반부에 약간의 차단손실량만 보이고 있다. 또한, 두 수종에서 전반적으로 차단손실량은 다소 불규칙하게 변화하였는데, 이는 강우강도의 영향으로 생각할 수 있다. Figure

6에서의 임외우는 같은 시기의 강우이지만 소나무와 상수리나무에 있어서 수량이 약 2배 정도 차이가 나는 것은 임외우를 수관면적비율로 강우를 환산하였기 때문이다. 두 수종에 있어서 차단손실량과 손실율은 일반적인 경향으로 알려진 것처럼 강우 초기에 매우 높았으며, 강우시간이 지남에 따라 거의 일정한 값에 접근하였다(塚本, 1993). Figure 6에서 강우강도만을 비교해 보았을 때는 강도가 클수록 차단손실량의 증가폭이 감소하였다. 이 두 결과는 강우강도가 클수록 빗방울이 수관에 흡착 저류할 수 있는 기회가 줄어드는 것에 기인하며, 또한 강우강도가 약할수록 수관에 저류한 수분의 증발기회가 높아지기 때문으로 볼 수 있다.

3. 임내우의 수량 배분과 물수지식 추정

임외우가 수관부를 통과하여 수관통과우와 수간류의 임내우로 변환하는 과정에 있어서 수종에 따른 임내우의 양적배분은 달라진다. 2개 조사지에서 채수한 임외우에 대해 수관통과우, 수간류 및 차단손실량의 수량배분을 구하여 Figure 7에 수종별로 나타내었다.

상수리나무에서는 평균적으로 수관통과우가 76.9%, 수간류가 3.8%이고, 차단손실량이 19.3%로 추정되었다. 반면, 소나무에서는 평균적으로 수관통과우가 73.8%, 수간류가 0.8%, 차단손실량이 25.4%로 나타났다. 이는 이현규(1998)가 잣나무에 대해 수관통과우 53.1%, 수간류 2.6%, 그리고 김경하(1993)의 리기테다소나무림의 수관통과우

77.9%, 수간류 4.7% 및 신갈나무 수관통과우 72%, 수간류 2.7%의 연구결과와는 다소 차이가 있었다. 이와 같은 수종에 따른 수간류, 수관통과우 및 차단손실량 등의 수량배분의 차이는 주로 기상인자의 차이와 각 수종별 흡고직경, 수관단면적, 엽면적지수 및 수피상태와 같은 형태학적 차이에 의한 결과로 볼 수 있다.

소나무와 상수리나무에 있어서 수종별 평균 차단손실량(Ic)의 추정식은 '차단손실량(Ic) = 총강우량(Gp) - 수간류(Sf) - 수관통과우(Tf)' 형태의 물수지식으로 표현하면 다음과 같다. 소나무의 차단손실량은 $Ic(17.4\%) = P(100\%) - Tr(77.9\%) - Sf(4.7\%)$ 이며, 상수리나무의 차단손실량은 $Ic(25.3\%) = P(100\%) - Tr(72.0\%) - Sf(2.7\%)$ 로 된다. 즉, 두 수종의 임내우 물수지식에서 소나무의 차단손실량이 상대적으로 많은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 침엽수와 활엽수의 엽량과 수관면적의 차이에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 이는 김경하(1993)가 리기테다소나무림에서 신갈나무림보다 차단손실량이 3.5% 정도 더 높다고 보고한 침엽수와 활엽수의 수종별 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

4. 임내우의 영향인자 분석

소나무와 상수리나무에 있어서 임외우 총량과 수관통과우 및 수간류와의 단순회귀로 분석한 결과를 Figure 8과 Figure 9에, 그리고 임내우 총량과의 분석 결과는 Figure 10에 나타냈다. 그 결과 소나무

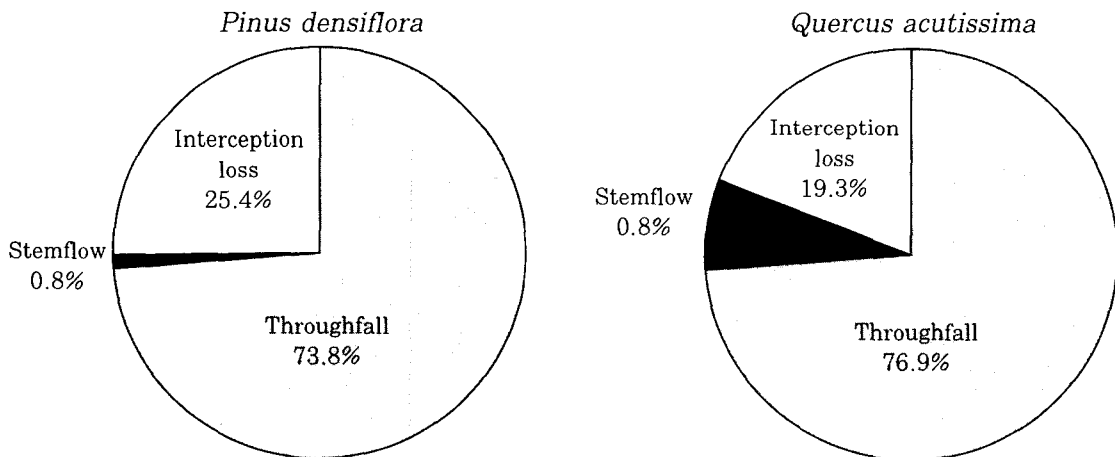


Figure 7. Distribution of net rainfall and interception loss on gross precipitation at *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima*

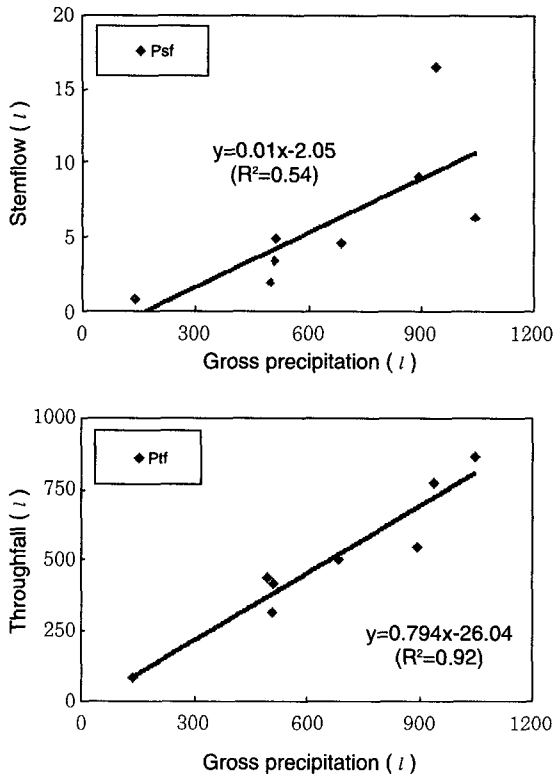


Figure 8. The relationship between gross precipitation and stemflow and throughfall at *Pinus densiflora*(Psf: Pinus stemflow, Ptf: Pinus throughfall)

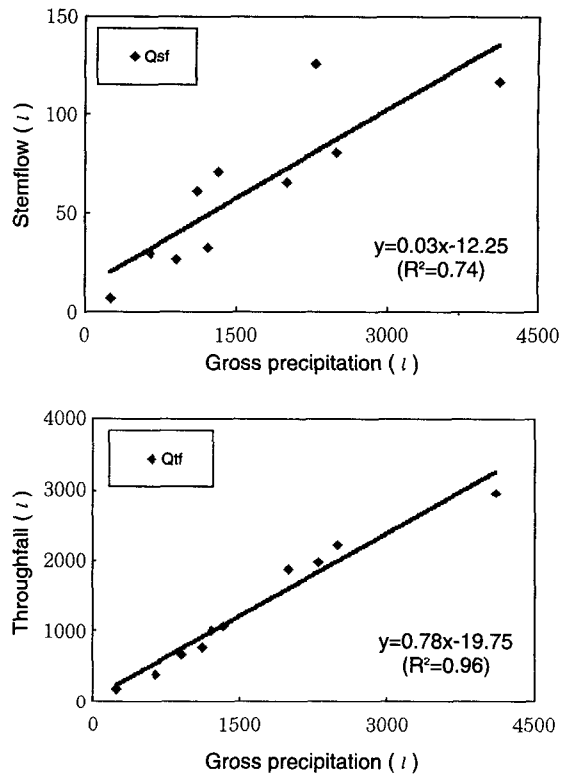


Figure 9. The relationship between gross precipitation and stemflow and throughfall at *Quercus acutissima*(Qsf: Quercus stemflow, Qtf: Quercus throughfall)

에 있어서 임외우(G_p)에 대한 수간류(S_f)의 관계식은 $S_f = 0.01G_p - 2.05$ ($r^2=0.54$), 수관통과우 $T_f = 0.79G_p - 26.04$ ($r^2=0.92$), 임내우(N_f)의 관계식은 $N_f = 0.81G_p - 28.09$ ($r^2=0.92$)로 구하였고, 상수리나무에 있어서 $S_f = 0.03G_p + 12.25$ ($r^2=0.74$), $T_f = 0.78G_p + 19.75$ ($r^2=0.96$), 그리고 $N_f = 0.81G_p + 31.99$ ($r^2=0.96$)로 추정하였다. 이들 추정식의 결과, 두 수종 모두 임외우 총량과 수관통과우, 수간류는 수간류 일부를 제외하고는 높은 직선상관이 있었고, 특히 수관통과우와 수간류를 합한 임내우와는 두 수종 모두 아주 높은 직선상관이 나타났다. 이러한 수종별 수간류와 수관통과우 회귀식의 기울기 차이는 앞에서 설명한 것과 마찬가지로 각 수종의 수관면적, 엽량 및 수피 등과 같은 수목의 형태학적 차이와 관련이 깊은 것으로 생각된다. 따라서 수종별로 산출한 임내우의 각 회귀식으로 임외우 총량이 임내우로 배분되

는 수량을 추정할 수 있다.

한편, 임외우로부터 임내우의 양적배분에 영향을 주는 인자로 임외우 총량, 강우강도, 수관투영면적, 수간 흉고직경을 생각할 수 있으나, 이 가운데 Lawson(1967)이 수간류의 추정에 흉고단면적이 유효하다는 보고에서처럼 수간류와 수목의 흉고직경 사이에는 높은 상관이 있었고(Figure 11), 그리고, 수관통과우와 수관투영면적 사이에도 높은 직선 상관이 있었다(Figure 12). 이들 수관투영면적, 흉고직경, 임외우의 3개 영향인자를 대상으로 내부상관계수를 구해 본 결과(Table 4), 수간류에는 임외우와 수관투영면적의 상관계수 값이 높았으며, 수관통과우에는 임외우와 수관투영면적, 흉고직경이 비교적 상관계수 값이 높았다. 따라서 소나무와 상수리나무의 수관통과우에 영향을 주는 인자의 크기는 임외우>수관투영면적>흉고직경의 순으로, 수간류에 영향을 미치는 인자의 크기는 소나무의 경우, 임외우>수관투영면적>

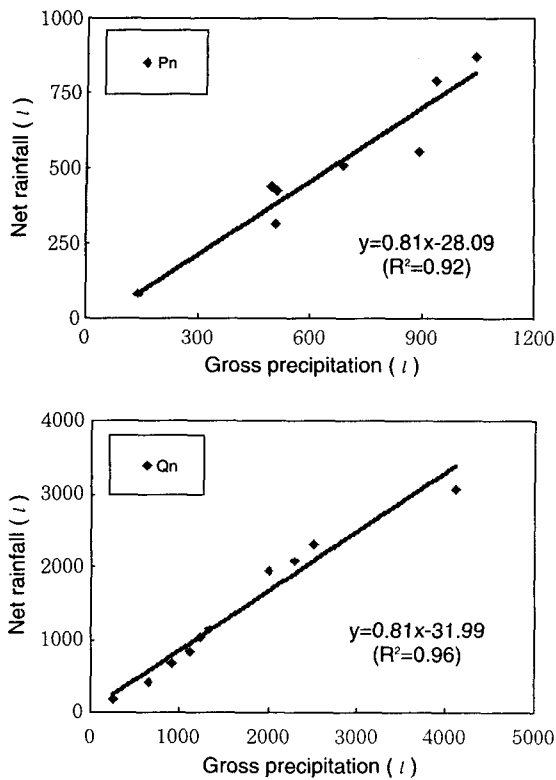


Figure 10. The relationship between gross precipitation and net rainfall at *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima* (Pn: *Pinus* net rainfall, Qn: *Quercus* net rainfall)

흉고직경의 순서로, 상수리나무의 경우 임외우>흉고 직경>수관투영면적의 순서로 나타났다. 그리고 상수리나무 수간류와 소나무 수관통과우에는 임외우 인자가, 상수리나무 수관통과우에는 임외우, 흉고직경 및 수관투영면적이 각각 유의성이 있었다. 소나무 수간류 및 수관통과우와 흉고직경, 수관투영면적 사이에 유의성이 나타나지 않는 것은 소나무 대상목들의 흉고직경과 수관투영면적 값이 거의 비슷했기 때문으로 생각된다. 이 결과로 수간류나 수관통과우에서 임외우의 총량이 가장 영향이 큰 것을 알 수 있었으며, 그러나 임내우의 수량배분에 미치는 수관투영면적과 흉고직경의 기여도는 명확히 밝힐 수가 없었다.

결론

본 연구는 산지의 수자원보전량 평가용 수문유출

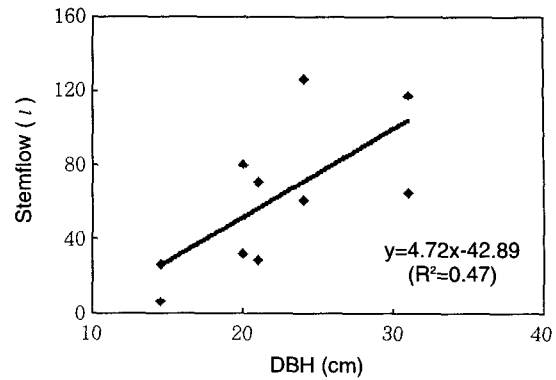


Figure 11. The relationship between DBH and stemflow at *Quercus acutissima*

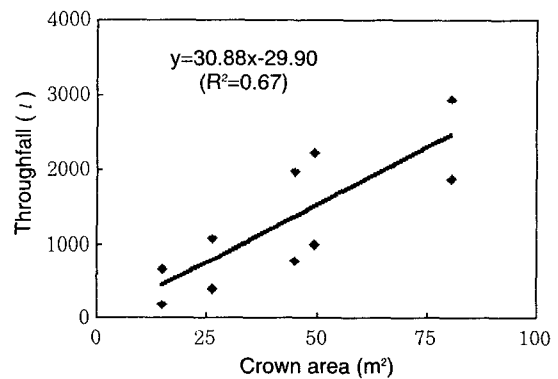


Figure 12. The relationship between crown area and throughfall at *Quercus acutissima*

Table 4. Correlation between net rainfall and factors

	Gp	DBH	CA
Psf	0.63	0.19	0.22
Qsf	0.86**	0.68	0.63
Ptf	0.83**	0.37	0.46
Qtf	0.98**	0.72*	0.82*

Psf: *Pinus* stemflow, Qsf: *Quercus* stemflow, Ptf: *Pinus* throughfall, Qtf: *Quercus* throughfall, Gp: Gross precipitation, CA: Crown area
DBH: Diameter of breast height

*: Significant at 5% level, **: Significant at 1% level

모형의 개발을 위한 중요한 기초연구로서 우리나라의 주요 수종인 소나무와 상수리나무에 대한 수간류 및 수관통과우의 물수지식과 수문학적 특성을 밝히고자 수행하였다. 영남대학교 자연자원대학 부속 용성 연습림과 영남대학교 교내 야산에 각각 수관통과우 및 수간류 관측용 야외 실험지를 설치하고, 1995년 9월에서 1998년 6월까지 약 2년 10개월 사이에 이 지역에 내린 다수의 단위강우에 대한 두 수종의 임내우 수량배분을 조사하였다. 그 결과 임외의 단위강우에 응답하는 두 수종의 수량배분과 수문학적 특성 및 추정된 임내우 물수지식을 아래에 요약하였다.

소나무에 있어서 수관통과우와 수간류의 총량은 각각 임외우의 73.8%와 0.8% 정도의 비율로, 그리고 상수리나무의 경우 수관통과우와 수간류의 총량은 각각 임외우의 76.9%와 3.8%로 조사되었다. 소나무와 상수리나무의 평균 수관투영면적과 평균수간직경이 비슷하다고 보았을 때, 이러한 수종별 관측값의 차이는 수관통과우의 경우 주로 엽량이, 그리고 수간류는 수피의 표면적이나 거침의 정도 등 수목의 형태학적 차이에 의한 영향으로 판단하였다.

소나무에 있어서 임외우(G_p)에 대한 수간류(S_f)와 수관통과우(T_f)의 회귀식은 각각 $S_f = 0.01G_p - 2.05$ ($r^2=0.54$), $T_f = 0.79G_p - 26.04$ ($r^2=0.92$)로, 임내우(N_r)와의 회귀식은 $N_r = 0.81G_p - 28.09$ ($r^2=0.92$)로 추정하였다. 이와 같이 소나무에 있어서 수간류와 수관통과우는 임외우의 양에 정비례하여 증가하였다. 상수리나무에 있어서 임외우(G_p)에 대한 수간류(S_f)와 수관통과우(T_f)의 회귀식은 각각 $S_f = 0.03G_p + 12.25$ ($r^2=0.74$), $T_f = 0.78G_p + 19.75$ ($r^2=0.96$)로 산출되었으며, 임내우(N_r)와의 회귀식은 $N_r = 0.81G_p + 31.99$ ($r^2=0.96$)로 구해졌다. 이처럼 상수리나무에서도 수간류와 수관통과우는 임외우의 양에 정비례하여 증가하였으며, 두 수종을 비교했을 때 소나무보다 상수리나무에 있어서 수간류와 수관통과우의 증가폭이 더 큰 것으로 나타났다.

수간류 및 수관통과우와 그 영향 인자로 평가된 수관투영면적(CA), 흉고직경(DBH), 임외우량(G_p)의 내부상관분석을 한 결과, 소나무 수간류에는 임외우>수관투영면적>흉고직경의 순으로, 상수리나무 수간류에는 임외우>흉고직경>수관투영면적의 순으로 상관계수 값이 높았다. 그리고 소나무와 상수리나무의 수관통과우는 임외우>수관투영면적>흉고직경의 순으로 상관계수 값이 높았다. 그리고 상수리나무 수간류와 소나무 수관통과우에는 임외우 인자가, 상수리나무 수관통과우에는 임외우, 흉고직경 및 수관투

영면적이 각각 유의성이 있었다.

이러한 본 연구 결과를 기초로 하여, 향후 산지유역에 범용적으로 적용할 '산원수자원 보전 및 수량예측 유출모델'을 개발할 계획이다. 이와 동시에 임외우로부터 임내우로의 수량배분과 물수지식에 대해서는 다양한 수종과 더 많은 단위강우를 대상으로 하여 폭 넓게 조사할 필요가 있을 것으로 생각한다. 나아가, 이러한 야외에서의 임내우 수량배분의 관측 및 조사도 앞으로는 원거리에서 자료수집과 분석이 용이하도록 하기 위해 완전 무인 자동화 관측 시스템으로 전환하는 것이 바람직한 것으로 생각한다.

인용 문헌

- 김경하(1987) 산림에서 수관에 의한 강우차단손실에 관한 연구. 서울대학교 대학원 석사학위논문, 35~37쪽.
- 김경하(1993) 산림의 강우차단손실량 추정 전산모형 개발에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사학위논문, 32~33쪽.
- 이현호, 전재홍(1996) 산지 물순환과정에 있어서 산도, 전기전도도 및 용존산소량의 변화. 한국임학회지 85(4): 634-646.
- 이현호(1997) 산지 물순환 소과정에 있어서 수질변화의 추적분석에 의한 산림의 환경적 정화기능의 계량화 연구. 한국임학회지 86(1): 56-68.
- 이현규(1998) 잣나무 수종의 임내 강우량에 관한 연구 (Ⅲ). 한국임학회 학술발표회 논문초록집, 97~98쪽.
- 近嵐弘榮(1986) 森林水文調査 -遮斷量調査-. 治山 31(7): 188-191.
- 中野秀章(1976) 森林水文學. 英立出版, pp. 60-67.
- 服部重昭, 近嵐弘榮, 竹内信治(1982) ヒノキ林における樹冠遮斷量測定とその微氣象學的解析. 林試研報 318: 79-102.
- 只木良也, 吉良龍夫(1983) ヒトと森林. 共立出版, 323pp.
- 塚本良則(1993) 森林水文學. 文永堂出版, pp. 78-85.
- 坂本康(1993) 樹冠通過雨および樹幹流の水量と水質の空間分布と時間變動. 水文・水資源學會誌 6(4): 326-335.
- Cantu, S. and O. Takenobu(1996) Throughfall, stemflow and interception loss in a Mixed White Oak Forest(*Quercus serrata* Thunb.). J. For. Res. 1: 123-129.
- Gash, J.H.C., I.R. Wright and C.R. Lloyd(1980)

- Comparative estimates of interception loss from some coniferous forests in Great Britain. *J. of Hydrology* 48: 89-105.
- Jackson, I.J.(1975) Relationship between rainfall parameters and interception by tropical forest. *J. Hydrology* 24: 215-238.
- Lawson, E.R.(1967) Throughfall and stemflow in a pine-hardwood stand in the Ouachita mountains of Arkansas. *Water Resource Research* 3(3): 731-735.
- Skau, C.M.(1964) Interception, throughfall, and stemflow in Utah and alligator juniper cover types of northern Arizona. *Forest Science* 10: 283-287.