

## 광릉 전나무인공림에서 수액이동량, 토양수분장력 그리고 토양함수량의 변화와 상호작용

全宰弘\* · 金景河 · 劉在閔 · 程龍鎬 · 丁昌沂

국립산림과학원 산림환경부

### Interactions and Changes between Sapflow Flux, Soil Water Tension, and Soil Moisture Content at the Artificial Forest of *Abies holophylla* in Gwangneung, Gyeonggido

Jaehong Jun\*, Kyongha Kim, Jaeyun Yoo, Yongho Jeong and Changgi Jeong

Department of Forest Environment, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

**요약:** 본 연구는 2004년 9월에서 10월까지 경기도 광릉시험림내 국립산림과학원 산림수문 유역시험지인 전나무 인공림에서 수목의 증산에 의해 나타나는 수액이동량과 토양수분장력 및 토양함수율의 변화를 조사하고, 이들 간의 상호작용을 밝히기 위하여 수행되었다. 대상지인 전나무림은 1976년 조림지로서 1996년 2월부터 7월까지 1차 간벌과 가지치기를 실시하였으며 2004년 4월에 2차 간벌과 가지치기를 실시하였다. 수액이동량은 수액유속계로 측정하였으며, 토양수분장력은 사면부와 계류부에 텐시오미터를 설치하여 조사하였다. 토양함수량은 사면부에 10, 30, 50 cm 깊이로 TDR을 매설하여 관측하였으며, 각 조사항목들은 30분단위로 측정하여 데이터로거에 저장하였다. 조사기간 동안 일일 평균수액이동량은 10.16 l이고, 최대는 15.09 l, 최소는 0.0 l였다. 시간별로는 9시부터 수액이동량이 증가하기 시작하여 13시에 최대치인 30분당 0.74 l에 달하였으며, 15시까지 그 값이 유지된 후 급감하기 시작하여 19시를 지나면서 0으로 수렴하였고 야간에는 수액이동이 거의 없었다. 강우시에는 주간에도 수액이동량이 거의 없는 것으로 나타났다. 토양수분장력은 사면에서 평균 -141.3 cmH<sub>2</sub>O, -52.9 cmH<sub>2</sub>O, -134.2 cmH<sub>2</sub>O로 낮았으며, 계류부 사이의 완경 사지에서 평균 -6.1 cmH<sub>2</sub>O, -18.0 cmH<sub>2</sub>O and -3.7 cmH<sub>2</sub>O로 높게 나타났다. 특히 토양수분에 대한 강우의 영향이 감소된 후 사면의 토양수분장력은 수목의 증산에 따라 일주기성을 나타내어 수액이동량이 증가하면 토양수분장력이 낮아지고 수액이동량이 감소하면 토양수분장력이 높아지는 경향을 보였으나, 계류부에서는 수액이동량의 영향을 파악할 수 없었다. 토양함수율은 강수 종료 후 지속적으로 감소하였으며, 사면부의 토양수분장력과 같이 증산에 따른 일주기성을 나타내어 주간에는 토양함수율이 감소하였고 수액의 이동이 거의 없는 야간에는 함수율이 유지되거나 또는 소폭 상승하는 경향이 나타났다. 이상의 결과로 수액이동량의 변화에 따른 토양수분의 변화는 사면부와 계류부에서 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다.

**Abstract:** This study was conducted to investigate the influences of sapflow flux on soil water tensions and soil moisture content at the *Abies holophylla* plots in Gwangneung, Gyeonggido, from September to October 2004. The *Abies holophylla* had been planted in 1976 and thinning and pruning were carried out in 1996 and 2004. Sapflow flux was measured by the heat pulse method, and soil water tension was measured by tensiometer at hillslope and streamside. Time domain reflectometry probes (TDR) were positioned horizontally at the depth of 10, 30 and 50 cm to measure soil moisture content. All of data were recorded every 30 minutes with the dataloggers. The sapflow flux responded sensitively to rainfall, so little sapflow was detected in rainy days. The average daily sapflow flux of sample trees was 10.16 l, a maximum was 15.09 l, and a minimum was 0.0 l. The sapflow flux's diurnal changes showed that sapflow flux increased from 9 am and up to 0.74 l/30 min. The highest sapflow flux maintained by 3 pm and decreased almost 0.0 l/30 min after 7 pm. The average soil water tensions were low (-141.3 cmH<sub>2</sub>O, -52.9 cmH<sub>2</sub>O and -134.2 cmH<sub>2</sub>O) at hillslope and high (-6.1 cmH<sub>2</sub>O, -18.0 cmH<sub>2</sub>O and -3.7 cmH<sub>2</sub>O) at streamside. When the soil moisture content decreased after rainfall, the soil water tension at hillslope responded sensitively to the sapflow flux. The soil water tension decreased as the sapflow flux increased during the day time, whereas increased during the night time when the sapflow flux was not detected. On the other hand, there was no significant relationship between soil water tension and sapflow

\*Corresponding author  
E-mail: junejh@naver.com

flux at streamside. Soil moisture content at hillslope decreased continuously after rain, and showed a negative correlation to sapflow flux like a soil water tension at hillslope. As considered results above, it was confirmed that the response of soil moisture tension to sapflow flux at hillslope and streamside were different.

**Key words :** sapflow flux, soil water tension, soil moisture content

## 서론

산림유역의 물순환과정에서 수목에 의한 증산은 차단과 함께 중요한 손실과정으로 유역의 유출량에 상당한 부분을 차지하고 있다. 수목의 증산은 토양으로부터 토양수가 뿌리로 흡수되어 목부조직을 통하여 잎까지, 그리고 잎

의 증산에 의해 대기로 환원되는 과정으로 설명할 수 있다. 따라서 개별 입목의 증산량은 입목의 목부조직을 통한 물의 이동량인 수액이동량을 측정함으로써 알 수 있으며, 개별 입목의 증산량을 임분 단위로 확대해서 전체 임분의 증산량을 추정할 수 있고, 이를 유역내 물순환과정에서 발생하는 수목의 증산에 의한 토양수분의 손실량이

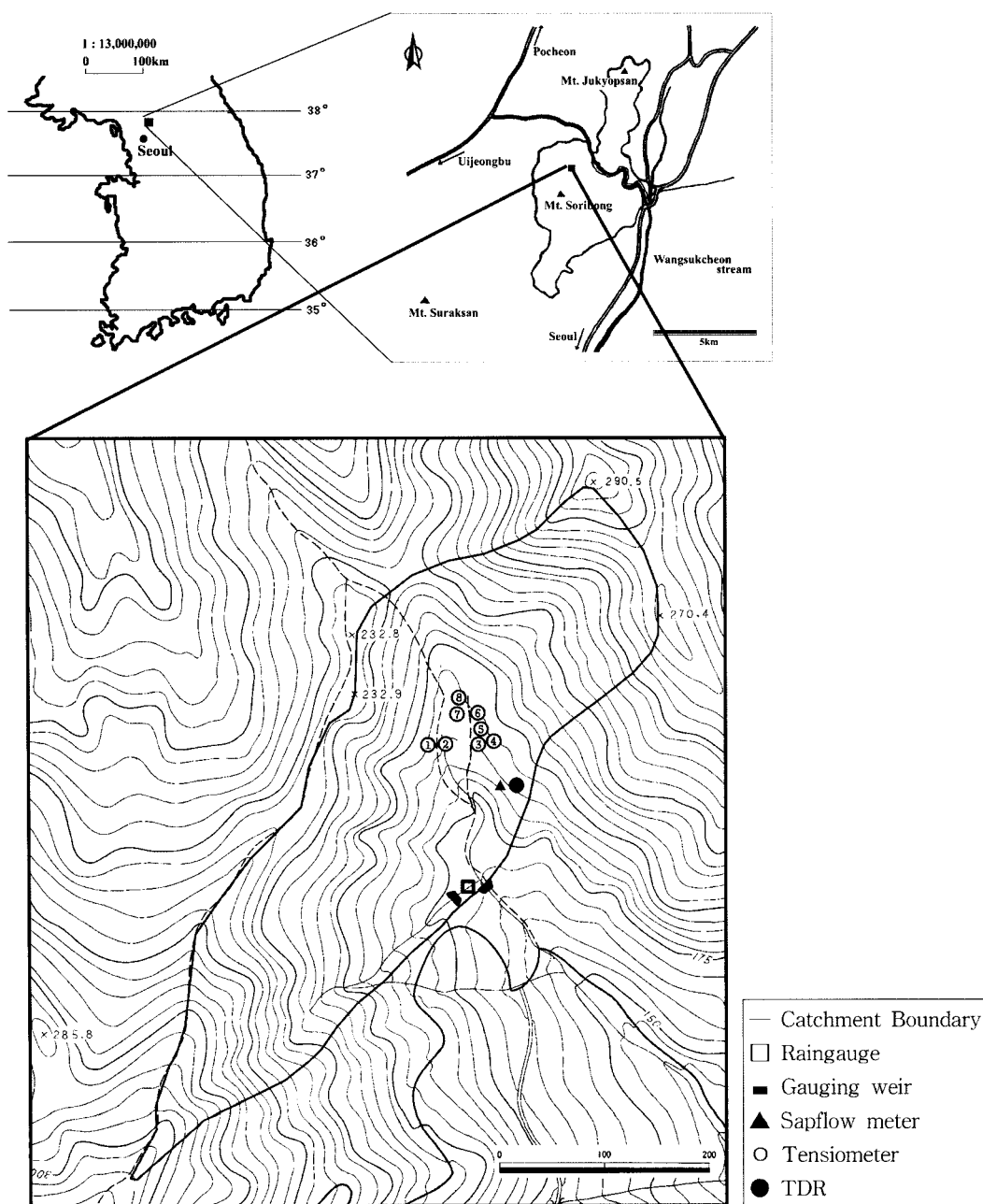


Figure 1. The location and topographic map of experimental watershed.

라고 할 수 있다.

환경인자에 따른 증산량의 변화는 주요 연구과제가 되었으며 일사량, vapour pressure deficit, 기온, 토양수분에 의해 입목 또는 임분의 증산량을 추정할 수 있다(Granier 등, 2000). Roberts 등(2001)은 임령이 14, 45, 160년생으로 각기 다른 *Eucalyptus sieberi* 임분에서 수액유속을 측정 한 결과 9.5cm/hr로 큰 차이가 없었으나 수령이 높아질수록 ha당 변재부의 면적이 감소하기 때문에 수액이동량이 감소한다고 하였다. Vertessy 등(2004)은 *Eucalyptus regnans* 유역에서 노령림이 갱신림에 비해 유출량이 2배나 많은 현상이 임령이 증가 할수록 Sapwood Area Index가 낮아져 증산량이 감소하게 되어 발생하는 것으로 설명하고 있다. Lagergren과 Lindroth(2004)는 독일가문비와 구주소나무 혼효림에서 간벌을 시행했을 경우 나타나는 입목의 생장, 직경, 엽량변화에 따른 증산량의 변화를 조사한 바 있다.

증산량과 토양수분의 관계에 대한 연구는 주로 토양수분이 제한되면서 나타나는 수액이동량 또는 증산량의 변화에 관해 이루어지고 있다. Lagergren과 Lindroth(2002)는 토양함수율에 대한 증산량의 변화를 조사한 결과, 토양함수율이 감소하였을 때 독일가문비가 구주소나무보다 더 민감하게 증산량의 변동이 일어났으며, 가뭄이 심할 경우 몇몇 입목의 경우에 수액이동이 전혀 이루어지지 않는 경우도 있다고 보고하였다.

본 연구는 수액이동량, 토양수분장력, 토양함수율의 변화를 조사·분석함으로써 산림 내에서 증산과 토양수의 관계를 구명하고자 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지역의 개황

조사지역은 경기도 포천시 소흘읍 직동리에 위치한 국립산림과학원 산림수문 유역시험지 내의 전나무 및 잣나무로 이루어진 침엽수인공림 유역이다(Figure 1). 조사지의 모양은 화강편마암으로 해발고가 290 m이며, 경사 약 15°의 완경사지이다. 연평균 강수량은 1,433 mm로 우리나라 연평균 강수량보다 많다. 시험지는 1976년에 조립하였고 1996년 2월부터 7월까지 전나무림과 잣나무림 유역에 각각 대조구를 설정하여 간벌구에는 상층울폐도 70%로 1차 산림시업을 실시하였으며, 2004년 4월에는 전나무 간

Table 2. The depth of tensiometers.

Tensiometer	1	2	3	4	5	6	7	8
Depth(cm)	50	53	62	91	107	95	71	81

벌구에 대해 구역별로 70%와 50%의 상층울폐도를 적용하여 2차 시업을 실시하였다.

### 2. 조사방법

임외강수량은 조사구에서 약 50 m 떨어진 개활지에 전도형 자기우설량계를 설치하고 CR10X 데이터로거를 이용하여 30분 간격으로 측정하였다. 수액이동량은 전나무림 시험구에서 임분의 평균 흉고직경과 수고를 가지는 시험목 2개체를 선정하여 측정하였으며, 시험목의 특성을 Table 1에 나타내었다. Heat pulse법을 이용한 수액유속측정장치의 구성은 하나의 데이터로거와 4개의 독립된 수액유속계로 이루어져 있다. 선정된 입목의 흉고부위 북동쪽과 남서쪽에 수액유속계(SF300, Greenspan)를 3.0 cm 깊이로 삽입 설치하였다. 센서부에 대한 태양복사를 차단하기 위해 알루미늄호일로 센서부를 둘러싸 보호하고, 30분 단위로 연속 측정하였다. 토양수분장력은 자체 데이터로거가 내장되어있는 Tensiometer(High water tension probe, TruTrack)를 계류의 직각방향으로 양측 사면까지 설치하여 30분 간격으로 측정하였다. 각 Tensiometer의 설치 깊이를 Table 2에 나타내었다. 토양수분은 TDR(CS615, Campbell Scientific Inc.)을 10, 30, 50 cm 깊이에 설치하고 30분 간격으로 측정하여 CR10X 데이터로거에 저장하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 수액이동량의 변화

Figure 2는 2004년 9월 17일부터 10월 21일까지 전나무 시험목에서 측정된 수액이동량과 임외강우량의 변화를 나타낸 것이다. 측정기간동안의 수액이동량일평균은 10.16 l이며, 최대값은 9월 29일에 측정된 15.09 l이고, 최소값은 9월 20일의 0.0 l였다. 수액이동량은 9월 18일(일강수량 34.5 mm)과 9월 20일(일강수량 16.4 mm)의 강우발생시 나타나는 바와 같이 그 양이 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 강우시 일사량, 기온 등 환경조건의 영향으로 인해 증산이 거의 일어나지 않는 것으로 판단된다.

Table 1. The parameters of sample trees.

No. of trees	Height (m)	DBH (cm)	Basal area (cm <sup>2</sup> )	Heartwood crosssection at breast height (cm <sup>2</sup> )	Sapwood crosssection at breast height(cm <sup>2</sup> )	Volume fraction of water	Volume fraction of wood
1	14.1	18.8	277.5	60.8	182.4	0.26	0.35
2	14.0	15.9	198.5	44.2	130.1	0.23	0.34

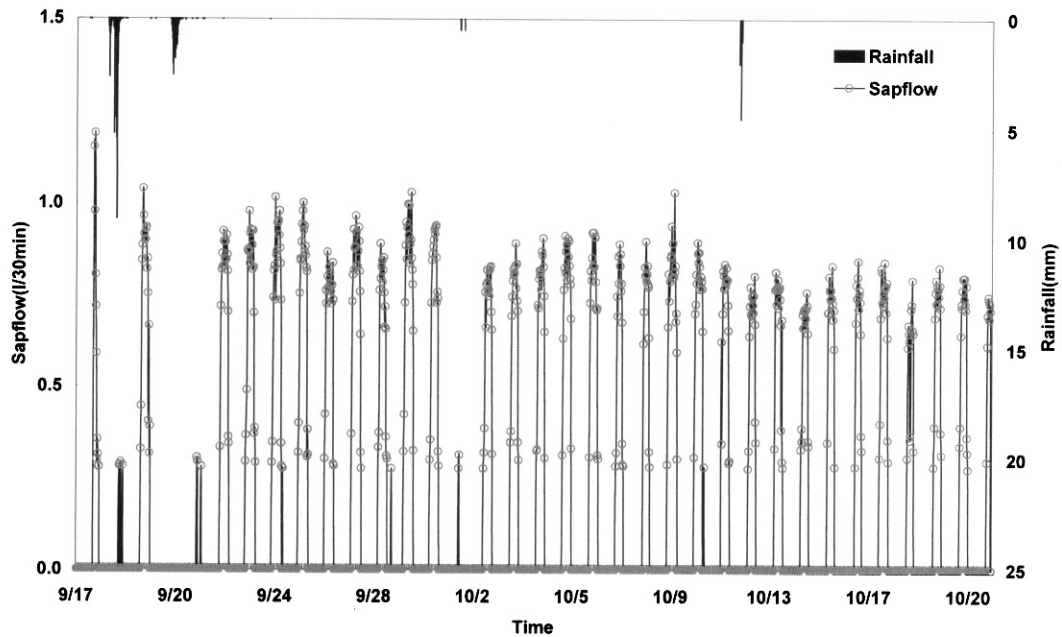


Figure 2. Variations of sapflow and rainfall.

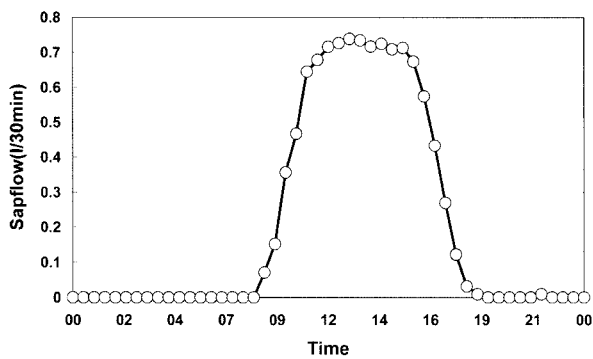


Figure 3. Average diurnal sapflow from 18 September to 17 October 2004.

Cienciala 등(2000)은 수액이동량이 일사량과 공중습도에 영향을 받는다고 하였으며, Jimenez 등(1996)은 수액이동량은 강우와 일사량에 의해 민감하게 반응하였지만 일사량과 정확하게 일치하지는 않는데 이는 태양의 위치와 수관의 위치에 의해 수액이동량의 반응이 약간 이르거나 지체될 수 있다고 하였다.

시험기간인 2004년 9월 18일부터 10월 17일까지의 각 측정시간별 수액이동량을 평균하여 수액이동량 일변화를 분석한 결과, 9시경에 수액이동량이 발생하기 시작한 후 급격히 증가하여 12시부터 최대치에 근접하고 13시에 최

대치인 0.74 l에 달하였다. 그 후 수액이동량은 15시까지 최대치에 가깝게 유지된 후 감소하기 시작하여 19시를 지나면서 다시 0으로 수렴하고, 야간에는 수액이동이 거의 없는 것으로 나타났다(Figure 3). 한상섭과 김선희(1993)는 낙엽송의 경우 heat pulse 속도가 13시 경에 최대치에 달해 오후 4시까지 최대치와 근접한 값을 유지하다가 16시 이후에 감소하기 시작하여 20시 경 최저치가 된다고 하였다.

## 2. 토양수분장력의 변화

Table 3은 2004년 9월부터 10월까지 광릉 전나무림에서 측정된 토양수분장력의 평균, 최대, 최소값을 나타낸 것이다. 사면부에 설치된 4, 5, 6번의 평균토양수분장력이  $-141.3 \text{ cmH}_2\text{O}$ ,  $-52.9 \text{ cmH}_2\text{O}$ ,  $-134.2 \text{ cmH}_2\text{O}$ 로 낮았으며, 사면하부 계류사이의 완경사지에 설치된 1, 2, 7번이  $-6.1 \text{ cmH}_2\text{O}$ ,  $-18.0 \text{ cmH}_2\text{O}$ ,  $-3.7 \text{ cmH}_2\text{O}$ 로 높았다. 계류부에서는 사면부와 달리 강우에 의한 토양의 포화가 나타나 평균토양수분장력이 높게 나타났다. Figure 4와 5는 30분 간격으로 측정된 토양수분장력을 나타내었다. 사면에 설치된 4, 5, 6번의 경우 강우시 일시적으로 증가하지만 강우종료 후에 지속적으로 감소하였다. 이에 비해 계류부에 설치된 1, 2, 7, 8번의 경우 강우시에 포화대가 형성되어

Table 3. Average, maximum, and minimum of each soil water tensions from 1 September to 21 October 2004.

Tensiometer	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	Average
Average	-6.1	-18.0	-22.8	-141.3	-52.9	-134.2	-3.7	-25.5	-50.6
Maximum	7.8	36.8	-3.3	-39.8	23.0	-38.0	83.7	50.3	15.1
Minimum	-15.2	-67.8	-32.3	-324.6	-140.0	-288.2	-38.4	-65.2	-121.5

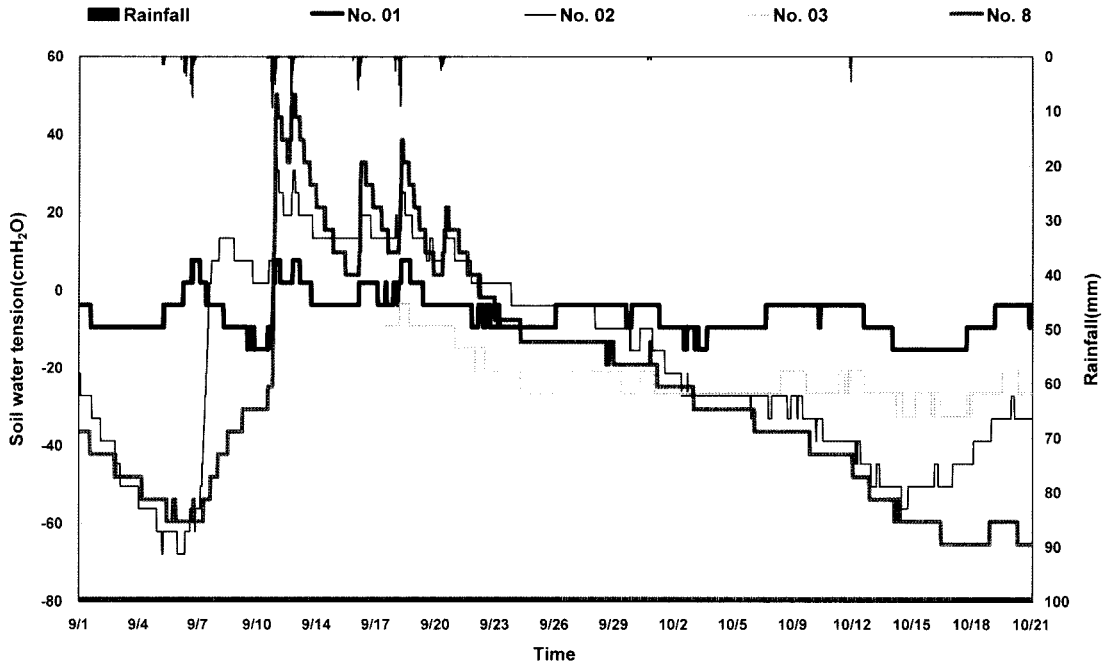


Figure 4. Variations of soil water tension at No. 1, No. 2, No. 3 and No. 8.

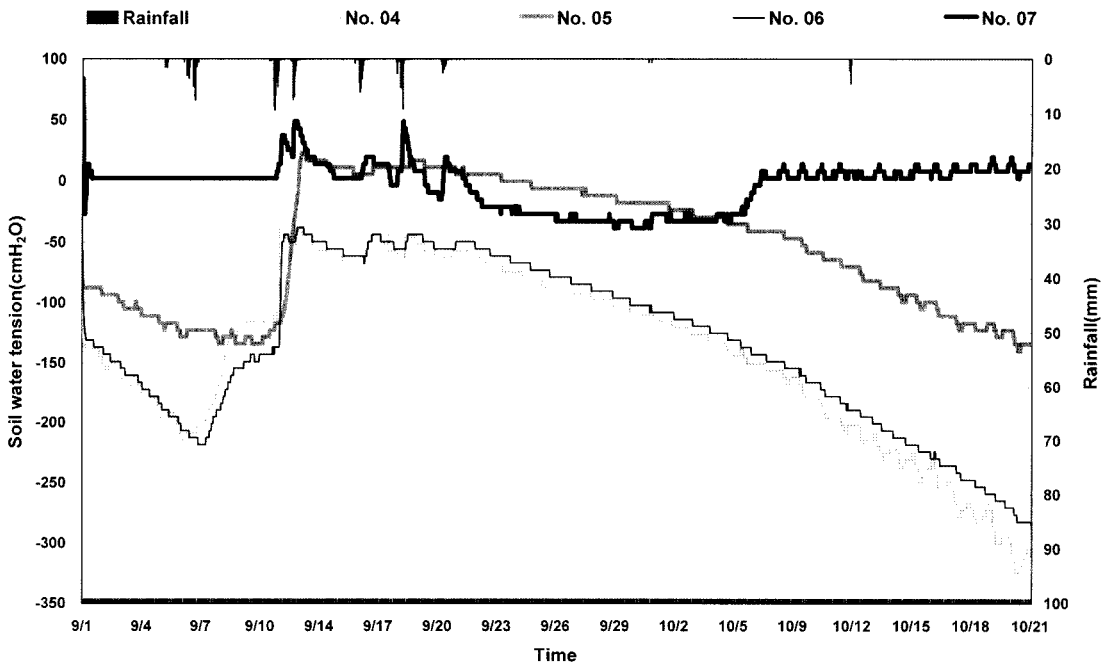


Figure 5. Variations of soil water tension at No. 4, No. 5, No. 6, and No. 7.

0 cmH<sub>2</sub>O 이상으로 증가하였다. 계류부의 토양수분장력과 강우종료 후에 감소하였으나 1, 3, 7번은 일정값을 유지하는 경향을 보이고 있다. 이는 계류부에 지하수면이 일정하게 유지됨으로써 토양수분장력이 지속적으로 감소되지 않은 것으로 판단된다.

3. 수액이동량과 토양수분장력의 상호작용

강우가 종료되고 토양수분장력에 대한 강우의 영향이

사라졌다고 판단된 후부터 토양수분장력과 수액이동량의 일변화를 Figure 6과 7에 나타내었다. 수액이동량에 대한 토양수분장력의 변화는 사면부와 계류부로 구분되는 두 가지 경향을 보였다. 사면부에서 측정된 토양수분장력은 Figure 6과 같이 수액이동량의 일변화에 영향을 받아 증산에 의해 토양수분이 감소하는 주간에 낮아지는 현상을 보이고 있으나 증산이 거의 일어나지 않는 밤시간에는 낮 동안에 감소된 만큼은 아니지만 토양수분장력이 증가하

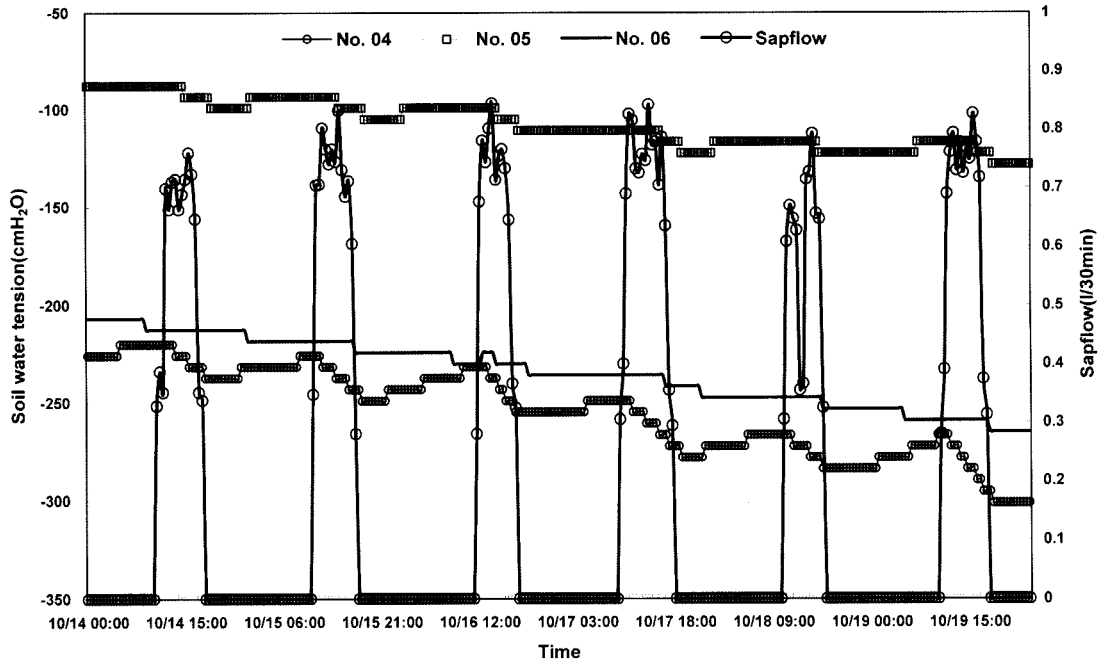


Figure 6. Sapflow flux and soil water tension at hillslope.

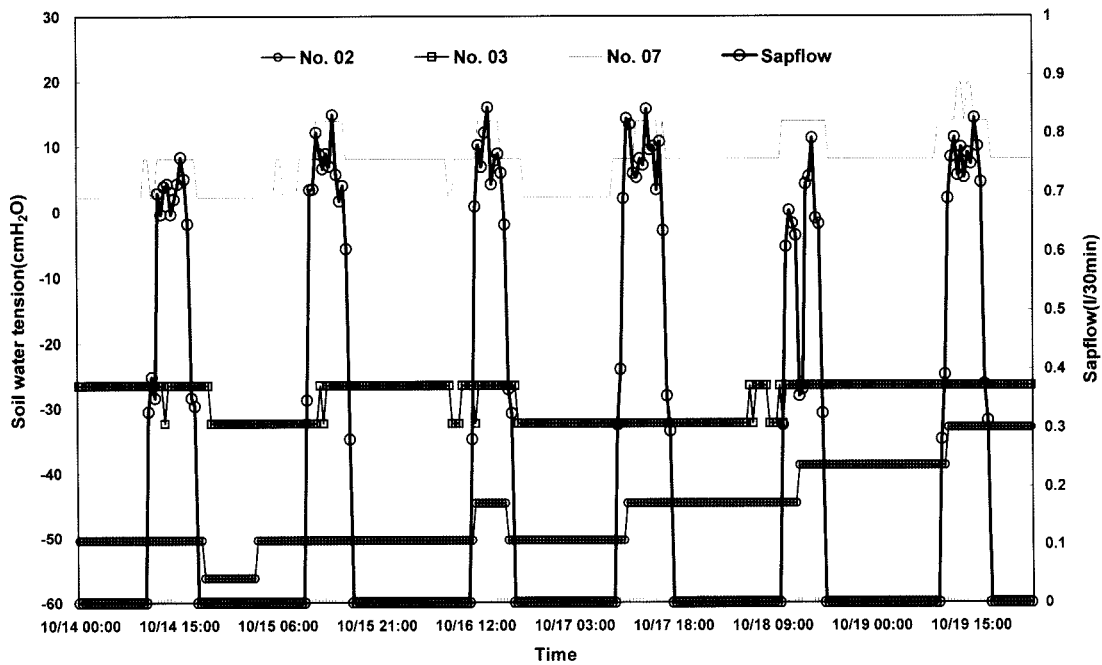


Figure 7. Sapflow flux and soil water tension at streamside.

는 경향을 보이고 있다. 그러나 Figure 7과 같이 계류부에서 측정된 토양수분장력은 증산이 일어나는 낮시간 동안에도 변화가 없거나 오히려 증가하는 경우도 나타났는데 이는 계류부의 토양수분장력이 입목의 증산에 의한 변동보다는 지하수위의 변동에 의해서 영향을 받기 때문으로 판단된다.

이와 같이 유역에서 토양수분장력에 대한 증산의 영향을 명확하게 구명하기 위해서는 사면부와 계류부에서 입

목의 수액이동량과 함께 지하수위의 변동을 파악할 필요가 있다고 판단된다.

#### 4. 수액이동량과 토양함수물의 상호작용

Figure 8은 수액이동량과 TDR로 측정된 사면부에서의 토양함수물 변화를 나타낸 것이다. 토양함수물은 강수종료 후 지속적으로 감소하였다. 사면에 설치된 토양수분장력과 같이 증산이 일어나는 낮 동안에는 감소하였으며, 수

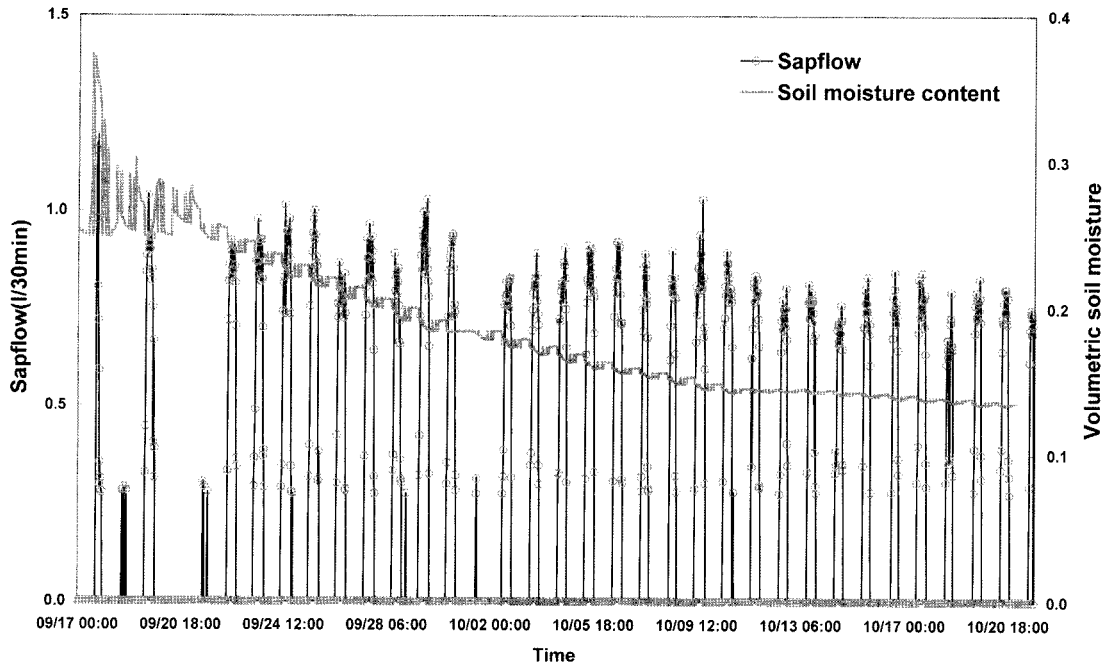


Figure 8. Sapflow flux and volumetric soil moisture at hillslope.

액의 이동이 거의 없는 밤 동안에는 소폭 상승 또는 유지 되는 경향이 나타났다.

## 결론

본 연구는 산림내에서 임목의 증산에 의해 토양수분장력과 토양함수율이 어떻게 변화하는가를 파악하기 위해 경기도 광릉의 전나무인공림에서 2004년 9월부터 10월까지 측정된 수액이동량, 토양수분장력, 토양함수율을 분석하였다.

수액이동량은 강우시 급격히 감소하거나 거의 나타나지 않는 경향을 보였다. 일일 평균수액이동량은 10.16 l이며, 최대는 15.09 l, 최소는 0.0 l였다. 수액이동량 일변화를 분석한 결과, 13시에 최대치인 0.74 l/30 min에 달한 후 15시까지 유지되고 서서히 감소하기 시작하여 19시를 지나면서 다시 0으로 수렴하고 야간에는 수액이동이 거의 없는 것으로 나타났다.

평균토양수분장력은 사면부에서  $-141.3 \text{ cmH}_2\text{O}$ ,  $-134.2 \text{ cmH}_2\text{O}$ 로 낮았으며, 계류부에서는  $-3.7 \text{ cmH}_2\text{O}$ 로 높았다. 사면부에서는 강우시 토양수분장력이 일시적으로 증가하지만 포화대가 나타나지는 않았으며 강우종료 후에 지속적으로 감소하였다. 계류부에서는 강우시에 포화대가 형성되어 토양수분장력이  $0 \text{ cmH}_2\text{O}$  이상으로 증가하였으며, 강우종료 후 감소하였으나 일정값을 유지하는 경향을 보이고 있다. 강우가 종료되고 토양수분장력에 대한 강우의 영향이 사라진 후 사면부의 토양수분장력은 증산의 일변화에 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 수액이동에 의한

토양수분의 소비가 일어나는 낮 동안에는 감소하였으며, 수액이동이 거의 일어나지 않는 야간에는 장력이 소폭 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 계류부의 토양수분장력은 수액이동변화에 따른 직접적 증감은 나타나지 않았다.

토양함수율은 강우종료 후 지속적으로 감소하였으며 사면부에 설치된 토양수분장력과 같이 수액이동이 일어나는 주간에 함수율이 감소하였다. 그리고 수액의 이동이 거의 없는 야간에 함수율이 소폭 상승 또는 유지되는 경향이 나타났다.

## 인용문헌

1. 한상섭, 김선희. 1993. 수목의 수분특성에 관한 생리·생태학적 해석(VII)-Heat pulse법에 의한 낙엽송임분의 수액유속 계측-. 한국임학회지 82(2): 152-165.
2. Cienciala, E., J. Kučera and A. Malmer. 2000. Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo. Journal of Hydrology 236: 109-120.
3. Granier, A., P. Biron and D. Lemoine. 2000. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. Agricultural and Forest Meteorology 100: 291-308.
4. Jimenez, M.S., J. Cermak, J. Kucera and D. Morales. 1996. Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: the annual course of sap flow in *Laurus* trees and stand. Journal of Hydrology 183: 307-321.
5. Lagergren, F. and A. Lindroth. 2002. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. Agricultural and Forest Meteorology 112: 67-85.
6. Lagergren, F. and A. Lindroth. 2004. Variation in sap-

- flow and stem growth in relation to tree size, competition and thinning in a mixed forest of pine and spruce in Sweden. *Forest Ecology and Management* 188: 51-63.
7. Roberts, S., R. Vertessy and R. Grayson. 2001. Transpiration from *Eucalyptus sieberi* (L. Johnson) forests of different age. *Forest Ecology and Management* 143: 153-161.
8. Vertessy, R.A., F.G.R. Watson and S.K. O'Sullivan. 2001. Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. *Forest Ecology and Management* 143: 13-26.
- 
- (2005년 10월 4일 접수; 2005년 10월 12일 채택)