

樹木의 水分特性에 關한 生理·生態學的 解析(VII)

— Heat pulse法에 의한 낙엽송林分의 樹液流速 計測^{1*} —

韓相燮² · 金宣惠²

Ecophysiological Interpretations on the Water Relations Parameters of Trees (VII)

— Measurement of Water Flow by the Heat Pulse Method in a *Larix leptolepis* Stand^{1*} —

Sang Sup Han² and Sun Hee Kim²

要 約

本研究는 heat pulse法을 이용하여 낙엽송林分의 蒸散量을 알기 위한 기초 연구로써, 日射量, 溫度, 濕度 등의 변화에 따른 heat pulse速度의 일변화와 계절변화, 방위별 heat pulse速度의 차이, 邊材部에 있어서 깊이별 heat pulse速度의 차이, 優勢木, 準優勢木, 劣勢木의 heat pulse速度의 차이, 葉의 水分포텐셜과 heat pulse速度와의 관계, 줄기에 있어 수분상승의 방향, heat pulse法으로 추산한 林分의 蒸散量 등에 대하여 측정 고찰하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 낙엽송의 heat pulse速度(V)와 樹液流速(SFR)과의 관계는 $SFR = 1.37V$ ($r = 0.96^{**}$)의 식으로 나타냈다.
2. 優勢木, 準優勢木, 劣勢木의 heat pulse速度를 비교하면, 樹液流速은 優勢木이 가장 높고, 準優勢木, 劣勢木 순위였다. Heat pulse速度는 日射量, 溫度, 大氣飽差 등의 크기에 따라 심한變化를 나타냈다.
3. 立木個體間의 heat pulse速度의 차이는 이른 아침과 밤에는 거의 없으나, 日射量이 높은 12시부터 16시 사이에는 약간의 차이를 나타냈다.
4. Heat pulse速度와 水分포텐셜은 거의 비슷한 일변화 경향을 나타냈다.
5. Heat pulse速度의 계절변화는 8월에 가장 높았고, 10월이 가장 낮았다. 그리고 6, 7, 9월의 heat pulse速度는 거의 비슷한 값을 나타냈다.
6. 줄기에 있어 방위별 heat pulse速度는 동측이 가장 높았고, 서측과 북측은 비슷한 속도를 나타냈으며, 남측의 속도가 가장 낮았다.
7. 邊材部에 있어서 깊이별 heat pulse速度의 차이는 樹皮로부터 2cm 깊이에서 가장 높고, 다음이 1cm 깊이, 그리고 3cm 깊이에서 가장 낮았다.
8. 줄기에 있어 水分移動方向은 5본 모두 오른쪽螺旋上升(spiral ascent turning right)을 나타내고 있었다. 특히 지상의 3m까지는 매우 느린回旋을 나타내다가 그 이상의 樹高에서는 매우 빠른回旋으로 상승됨을 알 수 있었다.
9. 樹液流量(SF)은 $SF = 1.37AV$ 式으로 나타났고, 이 식으로 구한 樹液流量은 優勢木이 準優勢木과

¹ 接受 1993年 3月 5日 Received on March 5, 1993.

² 江原大學校 林科大學 林學科 Department of Forestry, College of Forestry, Kangweon National University, Chuncheon 200-701, Korea.

* 本研究는 1992年度 韓國科學財團 핵심전문연구과제 研究費 支援에 의하여 이루어진 것임.

劣勢木보다 현저히 높았다.

10. 1ha의 林分에 대한 1일의 蒸散量의 構成比率은 낮이 83%, 밤이 17%였고, 蒸散量은 약 30.8ton/ha/day이었다.
11. 1ha의 月別 蒸散量은 8월이 1,194ton/ha/month로 가장 많았고, 5월이 386ton/ha/month로 가장 낮았다. 또 1ha의 年間 蒸散量은 3,983ton/ha/yr이었다.

ABSTRACT

This is the basic study in order to know the amount of transpirational water loss in a *Larix leptolepis* stand by a heat pulse method. Especially this study has been measured and discussed the diurnal and seasonal trends of heat pulse velocity by changes of radiation, temperature and humidity, differences of heat pulse velocity by direction and depth in stem, differences of heat pulse velocity by dominant, codominant and suppressed trees, diurnal change of heat pulse velocity by change of leaf water potential, sap flow path way in sapwood by dye penetration and amount of daily and annual transpiration in a tree and stand.

The results obtained as follows :

1. Relation between heat pulse velocity (V) and sap flow rate (SFR) was established as a equation of $SFR = 1.37V (r=0.96^{**})$.
2. The sap flow rate presented in the order of dominant, codominant and suppressed tree, respectively. The daily heat pulse velocity was changed by radiation, temperature and vapor pressure deficit.
3. The heat pulse velocity in individual trees did not differ in early morning and in late night, but had some differed from 12 to 16 hours when radiation was relatively high.
4. The heat pulse velocity and leaf water potential showed similar diurnal variation.
5. The seasonal variation of heat pulse velocity was highest in August, but lowest in October and similar value of heat pulse velocity in the other months.
6. The heat pulse velocity in stem by direction was highest in eastern, but lowest in southern and similar velocity in western and northern.
7. The difference of heat pulse velocity in according to depths was highest in 2.0cm depth, medium in 1.0 cm depth, and lowest in 3.0cm depth from surface of stem.
8. The sap flow path way in stem showed spiral ascent turning right pattern in five sample trees, especially showed little spiral ascent turning right in lower part than 3m hight above ground, but very speedy in higher than 3m hight.
9. The amount of sap flow (SF) was presented as a equation of $SF = 1.37AV$ and especially SF in dominant tree was larger than in codominant or suppressed tree.
10. The amount of daily transpiration was 30.8ton/ha/day and its composition ratio was 83% at day and 17% at night.
11. The amount of stand transpiration per month was largest in August (1,194ton/ha/month), lowest in May (386ton/ha/month). The amount of stand transpiration per year was 3,983ton/ha/year.

Key words : Heat pulse velocity, sap flow rate, transpiration, *Larix leptolepis* stand

緒論

植物은 생장에 있어서 체내에 흡수한 물의 99%를 蒸散으로 소실하며, 남은 1% 중 0.1%가

光合成과 그 밖의 生化學的 反應의 基質로서 이 용되고, 0.9%는 체내의 수분으로 남아 細胞의膨壓維持의 역할을 하고 있다(勝見, 1984; 池田, 1984). 따라서 植物의 水分移動에 주요 원인이 되는 것은 蒸散作用이라는 것을 알 수 있다.

植物은 土壤과 大氣環境 속에서 살아가기 때문에 植物의 水分移動은 土壤(soil)-植物(plant)-大氣(atmosphere)의 連續體(continuum), 즉 SPAC라는 經路를 통해 일어난다(Lange 등, 1976; Hinckley 등, 1978). 草本이나 木本이나 水分移動의 原理와 매카니즘은 같다고 볼 수 있지만, 나무의 경우 水分移動에 관계하는 木部組織의 構造가 樹種別로 상당히 다르고 복잡하다. 보통 樹木의 뿌리-줄기-가지로 이어지는 道管 또는 假道管에 있어서의 水分移動抵抗이 草本보다 크고 水分通路가 길기 때문에 樹木의 水分移動速度는 草本보다 상당히 느린다.

SPAC 内에서의 水分移動은 토양-뿌리-줄기-가지-엽-대기로 이어지는 과정에 있어서 각 부분의 水分포텐셜 차이에서 일어난다. 특히 樹體內에서의 水分移動은 葉에서 蒸散으로 수분을 잃으면 葉의 水分포텐셜이 감소하여 貧壓이 생기고, 그 貧壓의 크기만큼 가지, 줄기, 뿌리의 木部組織을 통해 수분을 잡아 당기기 때문에 水分移動이 일어난다(Hinckley 등, 1978; Kozlowski 등, 1991; 韓, 1992). 보통 토양수분이 충분할 경우, 葉의 水分포텐셜의 감소가 크다는 것은 蒸散으로 水分損失이 많다는 것을 의미하며, 이 때는 줄기의 樹液流速이 커진다. 葉에서 단위 시간당 蒸散으로 잃어버린 수분량만큼 수분상승이 되기 때문에 樹液流速을 측정한다는 것은 立木의 蒸散速度를 측정하는 하나의 방법이다.

일반적으로 樹液流速을 측정하는 방법에는 吸入法, 色素注入法, 放射性同位元素法, heat pulse法 등이 있다(森川, 1978). 이들 방법은 樹液流速의 指標를 나타낸다는 점에서 원리는 그러나 精度는 다르다. 최근 살아있는 나무에 약간의 상처만 입히고, 林地에서 立木의 樹液流速을 精度높게 측정할 수 있는 heat pulse法이 널리 사용되고 있다(森川, 1974; 小南, 1990; 奥村 등, 1989; Lassoie 등, 1977; Swanson와 Whitfield, 1981).

Heat pulse法에 의해 樹液流速을 최초로 측정한 사람은 Huber(1932)이다. 그리고 Huber와 Schmidt(1937)은 heat pulse를 주는 热源으로부터 上流에 1.6cm, 下流에 2.0cm 부위에 각각 热傳對를 놓는 방법, 소위 “compensation method”를 고안하였다. 이러한 초기의 연구에서는 heat pulse의 移動速度와 樹液流速은 같다는

가정에서 진행되었다.

그 후 Marshall(1958)은 목재에 있어서 열이동의 이론적 연구와 이 가정을 검토하여 heat pulse法의 유효성과 한계를 밝혔다. Closs(1958)는 compensation method와 Marshall(1958)의 이론식으로부터 heat pulse에 의한 측정법을 명확히 밝혔다. 이후 heat pulse法에 의한 간편한 첨단 측정기기가 개발되어 최근까지 樹液流速에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다(Decker와 Skau, 1964; Dolley와 Grieve, 1966; Gale와 Poljakoff-Mayler, 1964; Heine와 Farr, 1973; Mark와 Crews, 1973; 森川, 1972, 1974; Swanson과 Skau, 1963; Swanson, 1972; Swanson과 Lee, 1966; Swanson과 Whitfield, 1981; Lassoie 등, 1977; 小南과 鈴木, 1990; 奥村 등, 1989; 矢幡, 1986).

本研究에서는 우리나라 주요 造林樹種의 하나인 낙엽송 林分에 있어 水分의吸收, 貯藏, 移動, 排出, 缺差 등에 대한 일련의 기초연구 중 日射量, 溫度, 濕度(大氣飽差) 등의 變化에 따른 heat pulse 速度의 일변화와 계절변화, 方位別 heat pulse 速度의 차이, 邊材部에 있어서 깊이별 heat pulse 速度의 차이, 優勢木, 準優勢木, 劣勢木의 heat pulse 速度의 차이, 葉의 水分포텐셜과 heat pulse 速度와의 관계, 줄기에 있어서 수분상승의 방향, heat pulse法으로 측정한 林分의 蒸散量 등에 대하여 측정고찰하였다.

材料 및 方法

1. Heat pulse法의 測定原理

Closs(1958)에 의하면, 살아 있는 나무의 邊材部의 어떤 부위에 heat pulse를 주면, 그 점으로부터 下流(幹의 상부측)에 x 만큼 떨어진 점에서는 시간경과에 따라 상승하는 樹液流의 온도가 热傳對 센서(thermocouple)에 의해 측정된다. x 점에 있어서 온도변화 $T(x, t)$ 는 다음 (1)식으로 나타내진다.

$$T(x, t) = Q / \sqrt{\pi k t} \exp[-(x - Vt)^2 / 4kt] \quad \dots \dots (1)$$

여기서, T =온도, Q =전달된 热量(cal/cm), t =heat pulse를 준 후부터의 경과시간(sec), k =植物組織의 热傳導率(cm^2/sec), V =heat pulse 速度(cm^2/sec)이다.

그리고 heat pulse를 준 점으로부터 上流(幹의

하부측)에 x' 만큼 떨어진 점에 있어서 온도변화 $T(x', t)$ 는 다음 (2)식으로 나타내진다.

$$T(x', t) = Q / \sqrt{\pi k t} \exp[-(x' - Vt)^2 / 4kt] \dots\dots (2)$$

여기서 heat pulse를 준 이후, 시간이 경과하면 热源으로부터 木部의 상부점 x 와 하부점 x' 의 온도가 같아진다. 즉 $T(x, t) = T(x', t)$ 가 되는 경의 경과시간 t_0 를 측정하면 된다. 따라서 (1)식과 (2)식은 등식이 성립하므로 이를 풀면 heat pulse 速度 V 는 다음 (3)식에 의해 구해진다.

$$V = (x - x') / 2t_0 \dots\dots (3)$$

다만, (3)식에서 $x > x'$ 되어야 하므로 줄기의 heat pulse를 전달한 热源으로부터 上部點이 약간 더 멀리 떨어져야 계측이 가능하다.

2. 測定材料

본 연구의 실험재료는 江原大學校 演習林(강원도 춘천군 동산면 봉명리)에 식재된 20년생 낙엽송 林分이며, heat pulse 速度의 측정에는 林分 중, 優勢木(dominant tree), 準優勢木(codominant tree), 劣勢木(suppressed tree)으로 구분하여 측정했다. 재료로 사용한 優勢木,

準優勢木, 劣勢木의 평균 크기를 Table 1에, 그리고 이들의 物質生產構造를 Fig. 1에 나타냈다. Heat pulse 속도와 실제의 樹液流速과의 관계를 알아보기 위한 측정에는 準優勢木의 줄기 상부에서 직경 6cm, 길이 30cm 되는 줄기를 채취하여 Fig. 2의 시료로 사용하였다. 그리고 樹液이 상승하는 방향을 알기 위한 染料注入의 실험재료로는 5본의 準優勢木을 사용하였다.

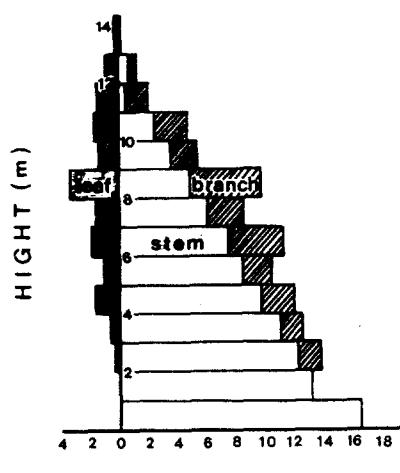
3. 測定方法

1) Heat pulse 速度와 樹液流速과의 關係 測定
낙엽송 林分 중 準優勢木의 줄기의 상부에서 직경 6cm, 길이 30cm 되는 줄기를 채취하여 즉시 물에 담근 후 실험실로 옮겨 Fig. 2와 같은 장치를 설치하고, heat pulse의 移動速度를 Sap Flow Meter(林電工(日製), HP-1型)로 측정하였다. Fig. 2에서 吸入壓力은 0.706 기압을 사용하였으며, 시료상부에는 원통을 연결시켜 물을 가득 채워가면서 시료하부에 연결된 감압 플라스크에 떨어지는 通水量(cc/hr)을 측정하여 줄기의 通水斷面積 당 樹液流速(SFR, sap flow rate,

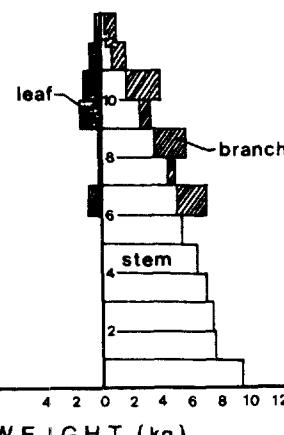
Table 1. The mean value of sample trees.

Trees	Height (m)	DBH (cm ²)	Basal area (cm ²)	Heartwood crosssection at breast height(cm ²)	Sapwood crosssection at breast height(cm ²)
Dominant tree	14.5	14.7	159.0	60.0	97.0
Codominant tree	13.2	10.9	90.0	35.2	54.6
Suppressed tree	8.2	8.0	50.5	12.6	37.9

A. Dominant tree



B. Codominant tree



C. Suppressed tree

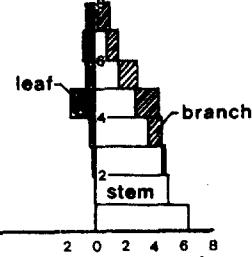


Fig. 1. The state of sample trees.

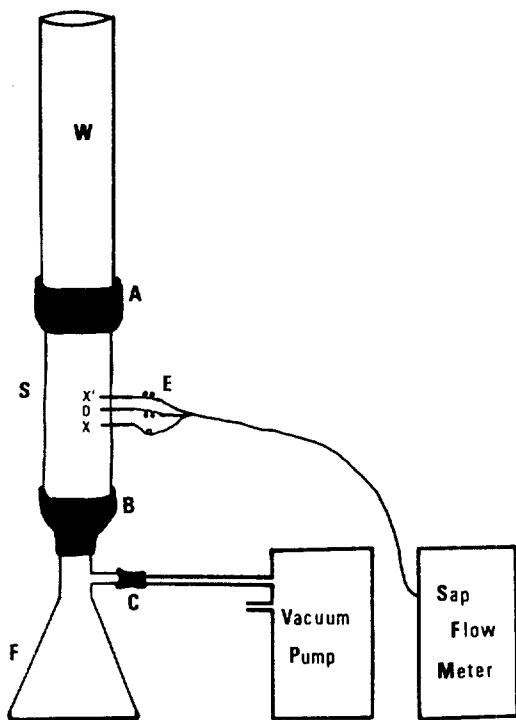


Fig. 2. An apparatus for measuring the water flow rate. W : water cylinder, E : elements(sensor) for measuring the heat pulse velocity, S : segment of the stem with about 6cm in diameter and 30cm in length, F : filtering flask for measuring the amount of water flow through the segment, P : vacuum pump, M : sap flow meter for measuring the heat pulse velocity, A, B, C : a rubber tube.

$\text{cc/cm}^2/\text{ha}$ 으로 사용하였고, 동시각에 그 시료에 heat pulse 측정장치를 설치하여 heat pulse 速度를 측정하였다. 이 때 센서의 간격은 Fig. 2 에서와 같이 $ox = 1.0\text{cm}$, $ox' = 0.7\text{cm}$ 되게 삽입하였다. Fig. 2와 같은 同時測定裝置에 의해 heat pulse 速度와 樹液流速과의 관계식을 얻었다.

2) 林分에 있어 heat pulse 速度의 测定

동일 林分 중, 優勢木, 準優勢木, 劣勢木으로 구분한 나무에 대하여 동시각에 각각의 나무에 heat pulse 센서를 삽입시켜 channel selector로 동시에 측정하였다. Heat pulse 속도의 측정은 오전 6시부터 22시까지 측정하였으며, 日射量, 溫度, 大氣의 水蒸氣壓飽差(VPD, vapor pressure deficit, 이하 大氣飽差라고 함)의 일변화도

함께 측정하였다. 立木에 있어 heat pulse의 센서 삽입방법은 胸高部位(1.2m) 동측에 heat pulse 热源을 樹皮로부터 2.0cm 깊이로 삽입시키고, 热源으로부터 상부에 1.0cm, 하부에 0.7 cm 부위에 热傳對 센서를 2.0cm 깊이로 삽입하였다.

다만 樹皮로부터 깊이별 heat pulse 速度의 측정시는 각각의 측정센서를 樹皮로부터 1.0cm, 2.0cm, 3.0cm 깊이별로 삽입시켜, channel selector를 이용하여 동시에 측정하였다. 그리고 방위에 따른 heat pulse 速度의 측정은 줄기의 동, 서, 남, 북 4방위에 각각 센서를 胸高部位에 樹皮로부터 2.0cm 깊이로 설치하고, 4점을 동시에 측정하였다.

또 개체간의 heat pulse 速度의 차이를 알기 위한 측정에는 準優勢木을 4본 선정하고, 각 立木 줄기의 동측 胸高部에 센서를 삽입시켜 4점을 동시에 측정하였다.

계절별 heat pulse 速度의 측정은 5월부터 10 월까지 12~14시 사이의 1일 最高 heat pulse 速度를 측정하여 비교하였다. 이 때는 優勢木만의 heat pulse 速度를 측정하였으며, 3본을 동시에 측정하여 평균치를 사용하였다.

한편 水分포텐셜 측정에는 pressure chamber (日本大氣社, DIK-PC-40)로 측정하였으며, 溫度는 水銀溫度計로, 濕度는 乾濕度計로, 日射量은 Quantum Radio-Photometer(Crump, Cat. No. 550)로 测定하였다.

줄기의 邊材部에 있어 樹液上昇의 길(sap flow path way)을 알기 위하여 準優勢木 5본을 선정하고, 줄기의 지상 40cm 동측에 직경 1cm, 깊이 6cm의 구멍을 뚫고, 0.5% 酸性 Fucshin 용액(물 : 알콜=1:1)을 넣었고, 주입시킨 후, 72시간 경과 후에 벌채하여 50cm 간격으로 圓板을 채취, 염색부분의 감식에 의해 樹液上昇 經路를 조사하였다. 이 때 염색약 주입시, 새는 것을 방지하기 위하여 줄기에 구멍을 아래로 비스듬이 뚫었고, 구멍 입구를 고무마개로 막고 주사바늘을 꽂았다.

結果 및 考察

1. Heat pulse 速度와 樹液流速과의 關係

Heat pulse 速度와 樹液流速과의 관계를 명확

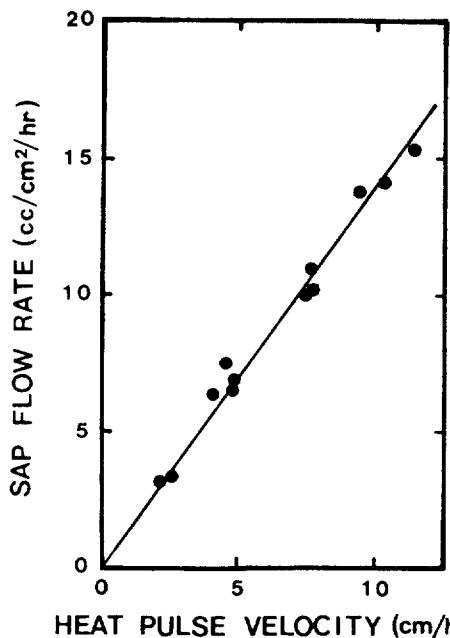


Fig. 3. The relationship between heat pulse velocity(V) and sap flow rate(SFR). The regression equation is $SFR=1.37V(r=0.96^{**})$.

하게 밝히기 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치를 이용, heat pulse 速度와 낙엽송 줄기의 시료를 통과한 通水速度와의 관계를 측정하여 Fig. 3에 나타냈다. Heat pulse 速度는 시료의邊材組織을 통과한 물의 流速과 높은 相關關係를 나타냈으며, heat pulse 速度는 통과하는 물의 流速, 즉 通水速度보다는 낮다는 것을 알 수 있다. 여기서 通水速度는 樹液流速과 같은 의미이다. Fig. 2에서 얻은 樹液流速 SFR(cc/cm²/hr)과 heat pulse 速度 V(cm/hr)와의 관계는 $SFR = 1.37V(r=0.96^{**}, 1\% \text{有意})$ 의 직선식으로 나타났다.

Heat pulse 移動速度에 대한 초기의 연구 (Huber, 1932; Huber와 Schmidt, 1937)에서는 heat pulse 速度와 樹液流速이 같다는 假定下에서 시작되었다. 그러나 Marshall(1958)은 木材에 대한 热移動의 이론적 연구로부터 heat pulse 法의 유효성과 한계를 명확히 하였다. 그에 의하면 heat pulse 速度 V(cm/hr)와 樹液流速 au(cc/cm²/hr)와의 사이에는 $au=p(m+c)V$ 의 관계가 성립한다고 하였다. 여기서, a는 邊材部의 단위면적, u는 실제로 흐르는 樹液流의 速度

(cm/hr), p는 材의 比重(材의 乾重量/生材의 體積, g/cc), m은 乾重을 기준한 含水率, c는 건조한 材의 比重(약 0.33)이다(森川, 1972). 여기서 heat pulse 速度와 樹液流速은 반드시 일치하지는 않는다는 것을 지적하고 있다. 다만 heat pulse 速度는 樹液流速을 측정하는 指標로서 사용될 수 있고, 실제로는 heat pulse 速度가 通水速度보다 낮다.

森川(1972, 1974)의 편백나무의 실측에서도 樹液流速 SFR와 heat pulse 速度 V 사이에는 $SFR=1.37V$ 라는 관계가 성립함을 입증하고 있다.

2. Heat pulse 速度의 日變化 및 季節變化

한 林分에서 優勢木, 準優勢木, 劣勢木을 Table 1과 같이 구분하여, 각각 heat pulse 速度를 测定하여 Fig. 4에 나타냈다. 일변화 측정은 줄기의 동측에 樹皮로부터 2.0cm 깊이에서 20분 간격으로 연속측정하였다. 동시에 각의 heat pulse 速度를 비교할 때 優勢木이 가장 높고, 準優勢木, 劣勢木의 크기 순이었으며, 특히 12시부터 16시 사이에 이들간의 heat pulse 速度의 差異가 커졌다. 森川(1974)에 의하면 편백에서는 孤立木이나 林分構成木이나 관계없이 나무가 클수록 heat pulse 速度가 빠르다고 한다.

Heat pulse 速度는 日射量과 溫度의 增減에 밀접한 반응을 나타내나, 오후에는 日射量의 감소보다 약간 뒤늦게 감소가 일어나고 있다(Fig. 4). 그리고 優勢木, 準優勢木, 劣勢木 모두 약 13시경 최대치에 달하며, 그 후 최대속도는 약 16시까지 계속됨을 알 수 있다. 16시 이후 감소하기 시작하여 밤 20시경에는 최저치 2~5cm/hr에 달했다. 그리고 日中 heat pulse 速度의 최대치는 優勢木에서 약 33cm/hr, 準優勢木에서 약 20cm/hr, 劣勢木에서 약 14cm/hr 정도였다.

森川(1974)에 의하면 쾌청한 날 편백과 소나무의 孤立木에 대한 heat pulse 速度를 측정한 결과, 오전 7시경 일출과 함께 급속한 상승을 나타내어 두 수종 모두 오전 11시경에 최대치에 달했다고 한다. 그 후 편백은 17시까지 최대속도를 유지하다가 다음날 새벽 1시까지 서서히 감소하여 최저속도에 달하고, 소나무는 15시까지 최대속도를 유지하다가 그 후 급속한 감소를 하여 19시경에 최저속도에 달하는 특징을 나타냈다.

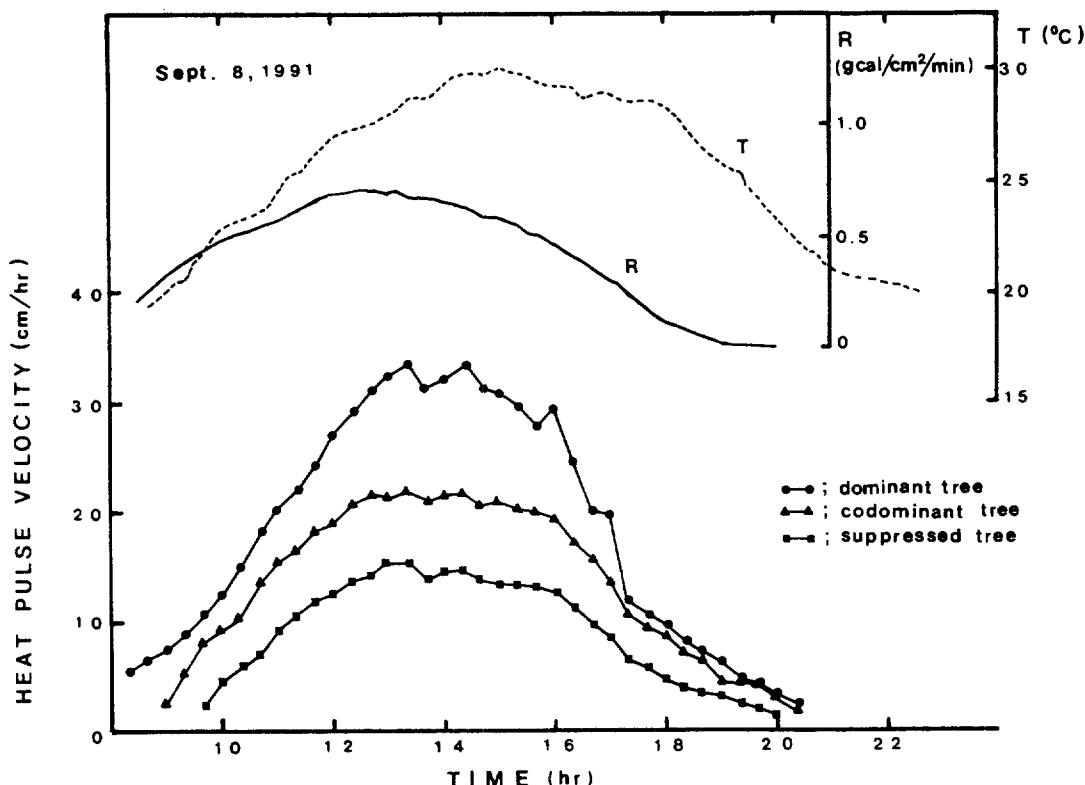


Fig. 4. Heat pulse velocity among dominant, codominant and suppressed trees. The holes for embedding the elements are 2.0cm deep from surface stem at 1.2m high above ground.

Fig. 4에서 heat pulse 速度가 최대치에 달한 시각은 日射量이 최대치에 달한 시각과 거의 일치하지만, 기온이 최대에 달하기 이전에 heat pulse 速度는 최대치에 달한다는 것을 알 수 있다. 그리고 일몰경 최저치에 달하지 않고 밤 늦게 또는 새벽녘에 최저치에 달함을 알 수 있다.

일반적으로 heat pulse 速度는 土壤水分, 日射量, 氣溫, 大氣飽差 등의 環境要因의 변화에 따라 일변화를 한다(森川, 1974; Lassoie 등, 1977). Schubert(1939)에 따르면, 樹液流速의 일변화가 기온의 일변화에 따라 변화한다고 한다. 그러나 편백의 경우 어느 정도는 기온변화와 일치하지만, 반듯이 기온과 평행관계는 아니라고 한다(森川, 1974). 본 연구결과에서도 기온변화와 heat pulse 速度의 변화는 반드시 일치하지는 않았다.

한편, 立木 개체간의 heat pulse 速度의 차이를 알기 위하여 4본의 準優勢木에 대한 동측의 heat pulse 速度의 일변화를 Fig. 5에 나타냈다.

日射量이 높은 12~16시 사이에는 개체목간에 약간의 차이를 나타냈으나, 日射量이 적은 아침 약 11시전과 오후 약 16시 이후 시각에는 개체목간에 큰 차이는 없었다.

또 水分포텐셜의 일변화와 heat pulse 速度의 일변화를 동시에 측정하여 Fig. 6에 나타냈다. Heat pulse 速度는 水分포텐셜의 일변화와 같이 日射量과 大氣飽差의 일변화에 따라 오전 약 12시경 최대치에 달하고, 오후 16시까지 일정한 값을 유지하다가 16시이후에 감소를 나타냈다. 이와 같이 heat pulse 速度는 水分포텐셜의 감소에 비례하여 증가하고, 역으로 水分포텐셜이 증가하면 heat pulse 速度는 감소된다. 일반적으로 heat pulse 速度의 증가와 水分포텐셜의 감소와는 正의 直線關係에 있다고 한다(矢幡, 1986).

한편 낙엽송 優勢木에 대한 heat pulse 速度의 계절변화를 Table 2에 나타냈다. 8월에 최대 및 평균 heat pulse 速度가 가장 높았고, 10월이 가장 낮았다. 그리고 6, 7, 9월의 heat pulse 速度

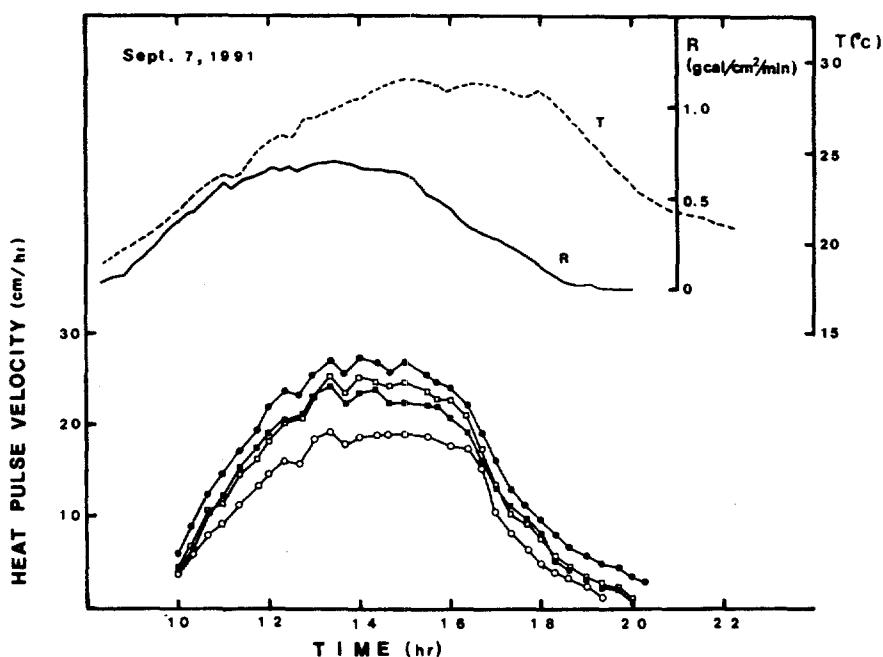


Fig. 5. Heat pulse velocity among same size (codominant) trees. The holes for embedding the elements are 2.0cm deep from surface stem at 1.2m high above ground.

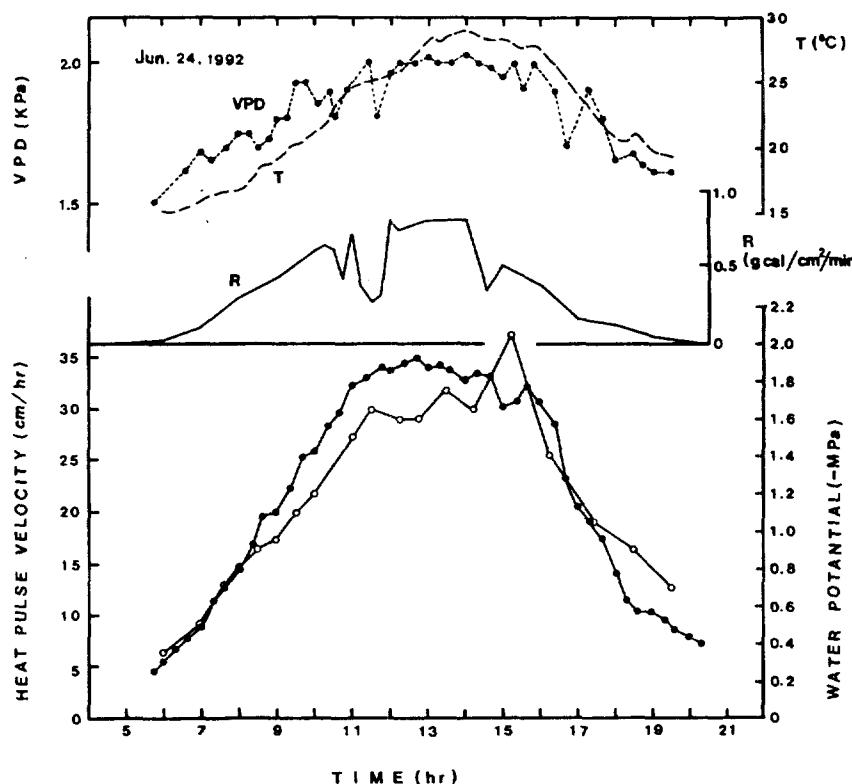


Fig. 6. Diurnal trends of heat pulse velocity and water potential. ●—●, heat pulse velocity; ○—○, water potential.

Table 2. Monthly trends of heat pulse velocity (HPV) in dominant tree and environmental factors at measuring time from 12 to 4 p.m.

	Month	5	6	7	8	9	10
Maximum HPV (cm/hr)		18.1	25.6	28.9	40.2	27.6	14.6
Average HPV (cm/hr)		13.4	24.3	26.9	34.8	25.1	13.0
Average radiation (g.cal/cm ² /min)		0.72	0.80	0.96	1.21	0.69	0.44
Average temperature (°C)		23.2	26.0	28.3	29.7	25.7	15.3
Average VPD (mbar)		10.3	17.2	18.8	20.2	18.2	12.5

는 거의 비슷한 값을 나타냈다. 특히 8월에는 日射量, 溫度, 大氣飽差가 크기 때문에 heat pulse 速度가 가장 높은 것으로 생각된다. 森川(1974)에 의하면 편백나무에서는 6, 7, 8월에 heat pulse 速度가 가장 높게 나타나고, 10월에 가장 낮게 나타난다고 한다. 즐참나무에서는 7, 8월의 heat pulse 速度가 가장 높았다고 한다(奥村 등, 1989).

3. 方位別 heat pulse 速度

낙엽송 林分 中 準優勢木의 줄기의 방위에 따른 heat pulse 速度의 차이를 Fig. 7에 나타냈

다. Heat pulse 速度는 줄기의 동측이 가장 높고, 다음이 서측과 북측으로 거의 비슷한 속도를 나타냈으며, 남측의 속도가 가장 낮았다.

보통 heat pulse 速度는 방위별로 약간씩 다르다고 한다. Douglas-fir에서는 서측과 남측이 높았다(Lassoie 등, 1977). 평지의 삼나무림에서는 동측이 가장 높고, 다음이 북측, 서측 순으로 낮아진다고 한다(矢幡, 1986).

편백나무의 孤立木에서는 방위에 따른 차이가 없다고 하지만(森川, 1974), 또 다른 편백나무 연구에서는 방위별로 상당한 차이를 나타낸다고 한다(小南·鈴木, 1990). 開葉樹인 *Betula*

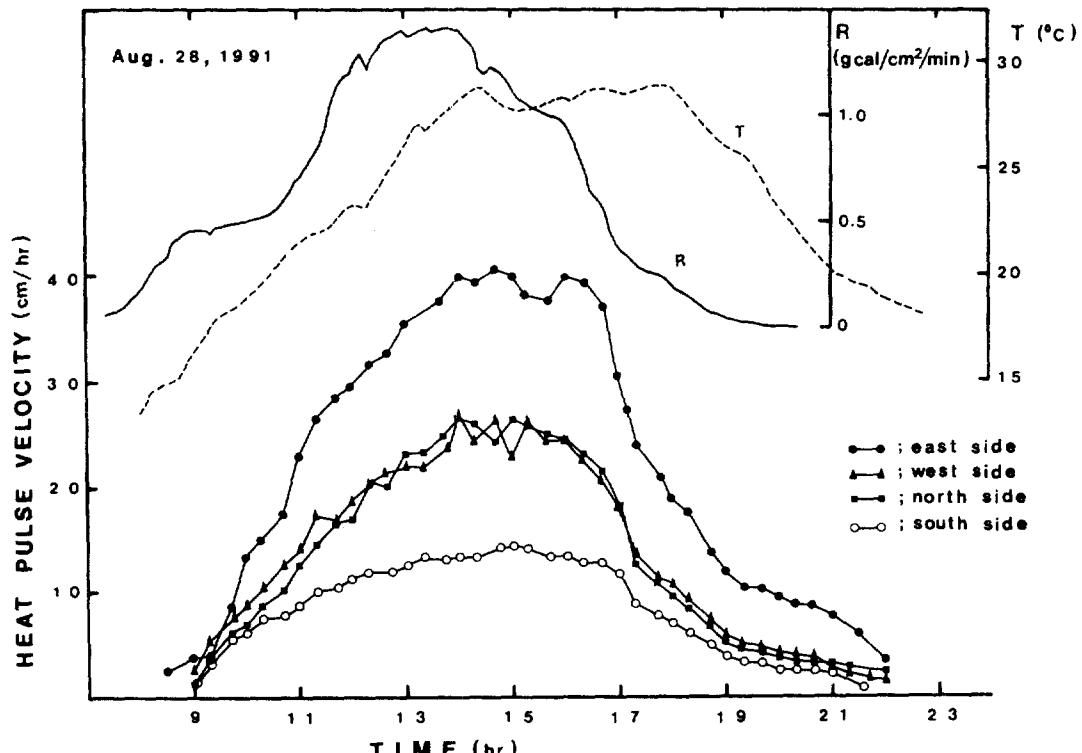


Fig. 7. Heat pulse velocity at various direction of tree trunk at 1.2m high above ground in the codominant tree. The holes for embedding the elements are 2.0cm deep from surface of stem.

verrucosa 立木에서는 줄기의 남측의 heat pulse 速度가 북측보다 빠르다고 하였다(Baumgartner, 1934).

4. 깊이별 heat pulse 速度

줄기에 있어서 깊이별 heat pulse 速度의 차이를 알기 위하여 準優勢木의 줄기에 대해 樹皮로부터 邊材部의 깊이별 heat pulse 速度를 측정하여 Fig. 8에 나타냈다. 樹皮로부터 2cm 깊이에서 heat pulse 速度가 가장 높고, 다음이 1cm 깊이, 그리고 3cm 깊이에서 가장 낮았다.

Douglas-fir에서는 2.2cm 깊이에서 heat pulse 速度가 가장 높았고, 3.2cm, 1.7cm, 1.2cm, 0.7cm, 0.4cm 순으로 낮았다고 한다(Lassoe, 1977). *Pinus contorta* var. *latifolia*와 *Picea engelmanni*에서도 樹皮로부터 깊이별로 heat pulse 速度는 차이를 나타낸다고 한다(Swanson, 1966). 그러나 편백나무 立木의 邊材部에서는 깊이별로 heat pulse 速度의 차이는 거의 없다고 한다(森川, 1974).

보통 間葉樹 중 環孔材樹種에서는 邊材部의 水

分移動이 최근에 형성된 1~2 年輪層에서만 일어난다고 한다(Kozlowski 등, 1991; Zimmermann, 1978). Ellmore와 Ewers(1985)에 따르면 環孔材인 느릅나무(*Ulmus americana*)에서는 줄기의 최외부에 있는 年輪層만이 水分通導機能을 갖고 있다고 한다. 아카시나무의 줄기에서도 최근에 형성된 1~2 年輪層에서만 水分通導機能을 나타낸다(全·韓, 1992). 종종 間葉樹種의 邊材部가 병해를 받거나 심한 水分缺差를 받으면 邊材部의 늙은 道管細胞는 tyloses 현상 또는 가스거품(gas bubble)으로 막히는 현상(cavitation) 때문에 水分通導機能을 상실하게 된다(Kozlowski 등, 1991; Milburn, 1979; 池田, 1984).

5. 水分移動方向

줄기의 邊材部에 있어서 樹液이 상승하는 방향을 조사하기 위하여 色素注入法으로 살아 있는 立木의 邊材部를 染色한 후 줄기를 일정한 높이별로 切斷해 보면, 通水部分만 염색되어 수분이 상승하는 방향을 쉽게 밝힐 수 있다. Fig. 9에

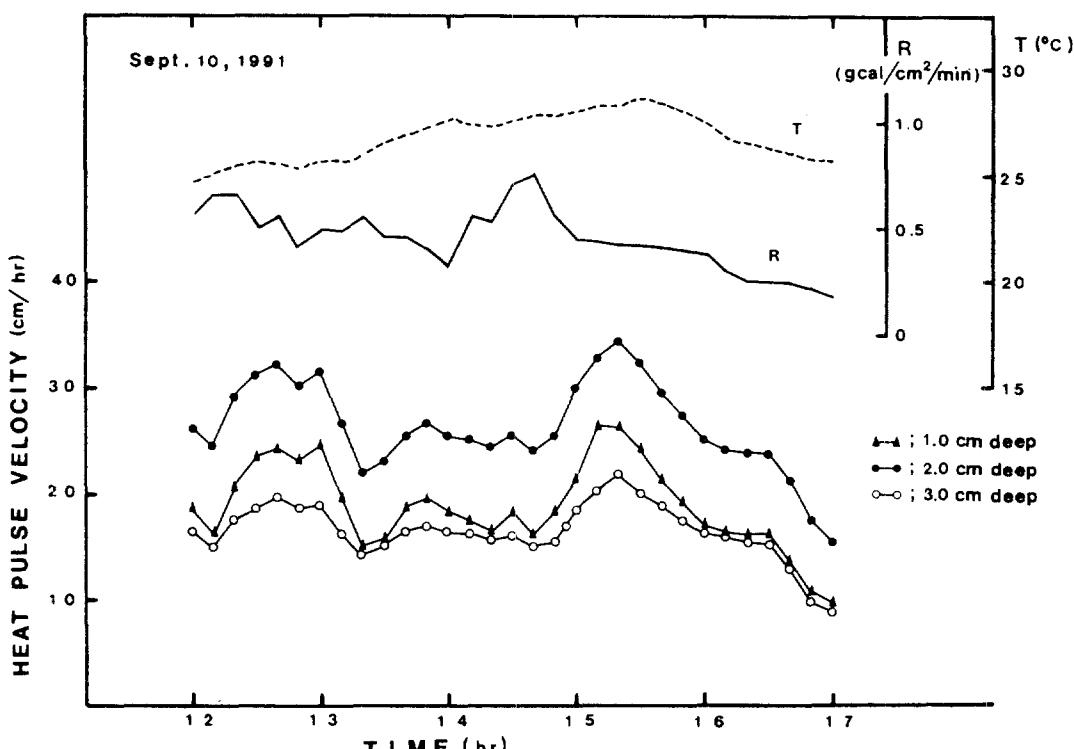


Fig. 8. Heat pulse velocity at various depths from surface stem at 1.2m high above ground.

낙엽송 林分 中 準優勢木의 立木 줄기에 0.5 酸性 Fuchsin 용액을 주입시켜 50cm 간격의 높이 별로 邊材部의 염색된 부분을 조사하여 수분의 상승방향을 나타냈다.

5본 모두 오른쪽 螺旋上昇(spiral ascent turning right)을 나타내고 있다. 특히 줄기의 3m 까지는 매우 느린 회旋을 나타내다가 그 이상의 樹高에서는 매우 빠른 회旋으로 상승됨을 알 수 있다.

Rudinsky(1959)에 의하면 줄기에 있어서 樹液이 상승하는 방향은 5가지 類型, 즉 (1) 오른쪽螺旋上昇(spiral ascent turning right), (2) 左쪽螺旋上昇(spiral ascent turning left), (3) 連結上昇(interlocked ascent), (4) 部分的灣曲上昇(sectorial winding ascent), (5) 部分的垂直上昇(sectorial straight ascent)으로 분류되며, 樹種에 따라 이 5가지 방향 중 한가지 형으로 상승한다고 하였다. 그러나 Kozlowski(1963)에 의하면 Populus屬에 있어서는 同一種內에서도 樹液이 상승하는 방향은 相異하다고 한다. 森川(1974)도 편백나무 11본에 대하여 1% 酸性 Fuchsin 용액을 주입시켜 조사해 본 결과 樹液이 상승하는 방향은 대체적으로는 連結上昇을 나타내지만 몇몇 立木에서는 약간씩 서로 다르다는 것을 관찰하였다.

6. 林分의 蒸散量

Heat pulse 速度(V , cm/hr)와 樹液流速(SFR, cc/cm²/hr)과의 관계는 Fig. 2에서 SFR=1.37V의 관계식을 얻었다. 어떤 나무의 줄기에 있어서 樹液流量을 SF(sap flow, cc/hr)라고 하고, 邊材部에 있어서 樹液이 상승하는 斷面積을 A(cm²)라 하면, 시간당 樹液流量은 SF=1.37AV가 된다. 여기서 SF는 시간당 한 立木의 蒸散量에 해당된다. 이와 같은 관계가 성립함을 森川(1974)가 편백나무의 연구에서 보고하고 있다. 따라서 立木의 heat pulse 速度의 일변화와 줄기의 邊材部에 있어서 樹液이 상승하는 단면적을 측정하면 개체목의 蒸散量의 일변화를 쉽게 산출할 수 있다.

Fig. 4의 heat pulse 速度의 일변화를 사용하여 산출한 蒸散量의 일변화를 Fig. 10에 나타냈다. 優勢木의 蒸散量은 準優勢木과 劣勢木보다 현저히 많게 나타났다. 이것은 heat pulse 速度

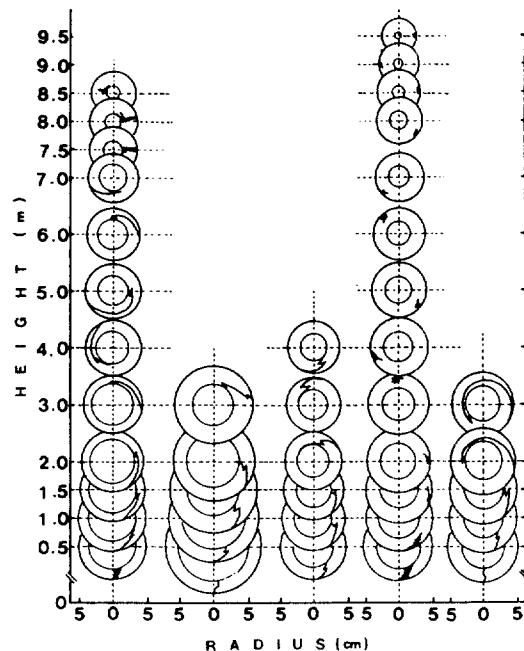


Fig. 9. Patterns of the upward travels of injecting dye.

도 높지만, 樹液이 상승하는 邊材斷面積이 優勢木에서 월등히 크게 나타나기 때문이라고 생각된다. 또 Fig. 1을 사용하여 산출한 1일 蒸散量을 계산하여 Table 3에 나타냈다.

1일의 蒸散量도 優勢木이 準優勢木과 劣勢木보다 월등히 많다. 그리고 1ha의 林分에 대한 1일의 蒸散量의 構成比率은 낮이 83%, 밤이 17%로 되어있어, 밤에도 상당한 樹液上昇이 일어나고 있음을 알 수 있다. 또 1ha로 계산하면, 낙엽송 林分에서는 하루의 蒸散量이 약 30.8ton/ha로, 이것은 하루 3.08mm/day를 蒸散으로 소비하고 있음을 의미한다.

森川(1974)에 의하면 44년생 편백나무 林分에서는 夏期에 1일 약 3.37mm/day씩 蒸散으로 소비한다는 보고와 본 연구 결과는 매우 유사한 결과이다.

또한, 본 测定林分과 가장 가까이에 위치한 春川測候所(春川市 소재, 测定林分으로부터 약 16km 거리)에서 측정한 月別 및 日別 氣象因子(기온/호흡/비의 비율: 5月 21/5/5, 6月 17/10/3, 7月 13/10/8, 8月 20/8/3, 9月 19/9/2, 10月 24/6/1, 그리고 매일의 日照時間 등)를 사용하여 開葉期부터 落葉期까지의 月別 및 年間 蒸散量을 산

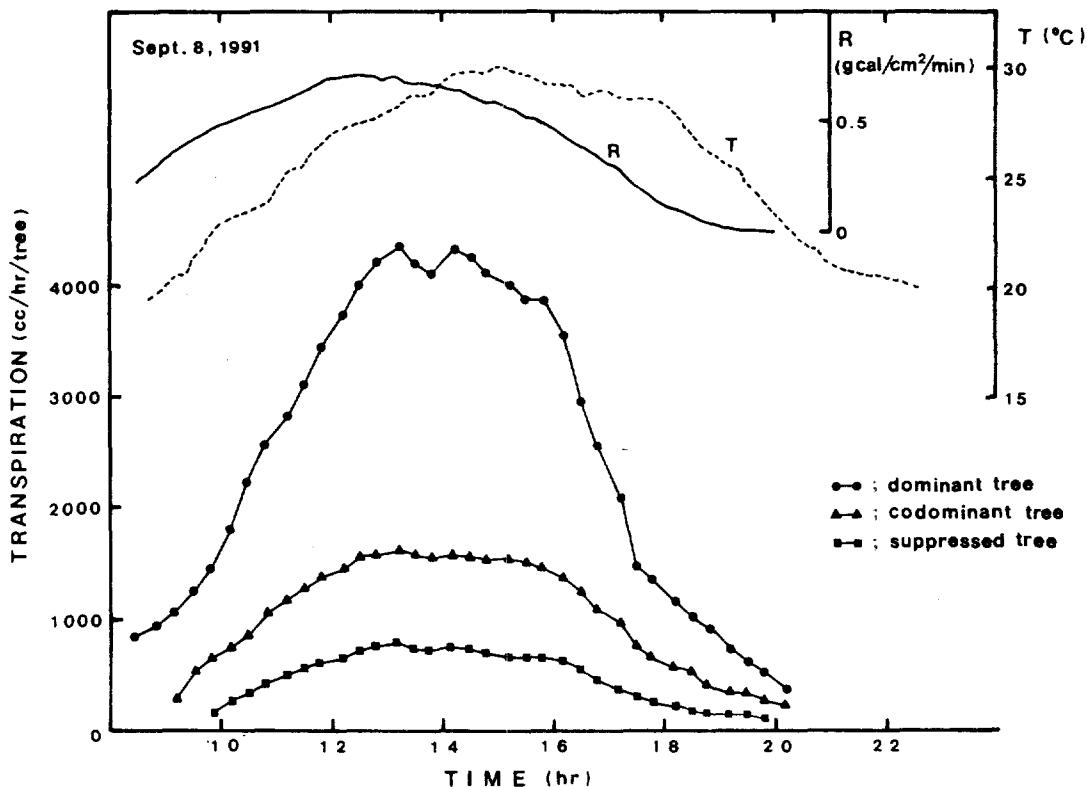


Fig. 10. Diurnal trends of transpiration among dominant, codominant and suppressed trees.

Table 3. Daily transpiration of trees and the stand in the *Larix leptolepis* forest. Data was calculated from SF=1.37AV and Fig. 3. SF is transpiration rate($H_2O \text{ cm}^3/\text{hr}$) ; A is cross sectional area of sapwood(cm^2) ; V is heat pulse velocity(cm/hr)

	Day	Night	Total
Dominant tree	30,234 ml (86%)	4,784 ml (13%)	35,018 ml (100%)
Codominant tree	11,941 ml (81%)	2,827 ml (19%)	14,770 ml (100%)
Suppressed tree	5,230 ml (84%)	996 ml (16%)	6,226 ml (100%)
Stand(ha)	25,651 l (83%)	5,128 l (17%)	30,779 l (100%)

Table 4. Monthly transpiration of trees and the stand in the *Larix leptolepis* forest. (Unit : l)

Trees	Month	5	6	7	8	9	10	year
Dominant tree		439	746	676	1,165	823	490	4,339
Codominant tree		185	315	285	491	347	207	1,857
Suppressed tree		78	133	120	207	146	87	771
Stand(ha)		386,248	655,474	593,915	1,194,479	723,311	430,478	3,983,905

출하여 Table 4에 나타냈다.

蒸散量은 8월에 1,194ton/ha, 즉 119.4mm/month로 가장 많았고, 5월이 386ton/ha, 즉 38.6mm/month로 가장 낮았다. 5월이 10월보다 낮은 이유는 5월에 맑은 일수가 21일인데 비해 10월은 24일이었고, 또 5월에는 비온 일수가 5일인

데 비해 10월은 1일만 비가 내렸기 때문이다. 31년생 편백나무 林分에서도 8월이 가장 높으며, 약 66.6mm/month를 나타냈다(森川, 1974).

또 1ha의 낙엽송 林分의 年間 蒸散量을 산출하면, 약 3,983ton/ha으로 398.3mm/yr였다. 韓(1992)이 정리한 자료에 따르면 삼나무 林分은

약 260~1230mm/yr, 편백나무 林分은 233~970 mm/yr, 소나무 林分은 633~1242mm/yr, 해송은 880~1026mm/yr 등 이라고 한다. 따라서 본 연구 결과의 398.3mm/yr는 다소 적은 편이나 31년생 편백나무 林分에서 측정된 394.6mm/yr (森川, 1974)과는 매우 유사한 결과이다.

結論

낙엽송의 heat pulse 速度(V)와 樹液流速(SFR)과의 관계는 $SFR = 1.37V (r=0.96^{**})$ 의 식으로 나타났다. 優勢木, 準優勢木, 劣勢木의 heat pulse 速度는 優勢木, 準優勢木, 劣勢木 순위로 나타났고, 準優勢木 4본의 heat pulse 速度의 차이는 이른 아침과 밤에는 거의 없으나, 日射量이 높은 12시부터 16시사이에는 약간의 차이를 나타냈다. Heat pulse 速度는 日射量, 溫度, 大氣飽差 등의 크기에 따라 日變化했다. Heat pulse 速度와 水分포텐셜은 거의 비슷한 일변화 경향을 나타냈다.

Heat pulse 速度의 계절변화는 8월이 가장 높았고 10월이 가장 낮았으며, 6, 7, 9월은 거의 비슷한 값을 나타냈다.

줄기에 있어 방위별 heat pulse 速度는 동측이 가장 높았고, 서측과 북측은 비슷한 속도를 나타냈으며, 남측이 가장 낮았다. 또한, 邊材部에 있어서 깊이별 heat pulse 速度의 차이는 樹皮로부터 2cm 깊이에서 가장 높았고, 다음 1cm, 3cm 깊이순이었다.

줄기에 있어 水分移動方向은 5본 모두 오른쪽螺旋上昇(spiral ascent turning right)을 나타내고 있었다. 특히 지상의 3m까지는 매우 느린回旋을 나타내다가 그 이상의 樹高에서는 매우 빠른回旋으로 상승됨을 알 수 있었다.

樹液流量(SF)은 $SF = 1.37AV$ 식으로 나타났고, 이 식으로 구한 樹液流量은 優勢木이 準優勢木과 劣勢木보다 현저히 높았다.

1ha의 林分에 대한 1일의 蒸散量의 構成比率은 낮이 83%, 밤이 17%였고, 蒸散量은 약 30.8 ton/ha/day이었다. 1ha의 月別 蒸散量은 8월이 1,194ton/ha/month로 가장 많았고, 5월이 386 ton/ha/month로 가장 낮았다. 또 1ha의 年間蒸散量은 3,983ton/ha/yr이었다.

引用文獻

- 全壽京·韓相燮. 1992. 아까시나무와 산돌배나무의 木部에 있어서 水分移動經路. 韓林誌 81 : 357-362.
- 韓相燮. 1992. 林木에 있어서의 水分의 移動, 排出, 缺差. 江原大學校 林科大學 '92국제학술심포지움집 24-63.
- 池田 武文. 1984. 樹木의 水分通導性について. 福岡植物 10 : 197-212.
- 小南 裕志·鈴木 雅一. 1990. ヒ-トバルス法による 實蒸散量の推定. 京都大 演習林報告 197-207.
- 森川 靖. 1972. 樹液流測定裝置と測定法. 日林誌 54 : 166-171.
- 森川 靖. 1974. ヒノキの樹液の流れ - 林木の水分收支と關連して -. 東京大學 演習林報告 66 : 251-297.
- 森川 靖. 1978. 樹木 -形態と機能-. 文永堂. 東京. 145-167.
- 奥村 武信·水中 進一·前田 浩行. 1989. 廣葉樹林의 蒸散量推算へのヒ-トバルス法の適用に関する研究. 廣葉樹研究 No. 5 : 173-184.
- 矢幡 久. 1986. 樹木における水の吸收, 移動, 排出に関する研究. 九州大學 博士學位論文 1-134.
- Baumgarter, A. 1934. Thermoelektrische Untersuchungen über die Geschwindigkeit des Transpirationstromes. Z.f.Bot. 28 : 81-136.
- Closs, R.L. 1958. The heat pulse method for measuring rate of sap flow in a plant stem. N.Z.J. Sci. 1 : 281-288.
- Decker, J.P. and C.M. Skau. 1964. Simultaneous studies of transpiration rate and sap velocity in trees. Plant Physiol 39 : 213-215.
- Dolley, D. and B.J. Grieve. 1966. Measurement of sap flow in a eucalyptus by thermoelectric methods. Aust For Res 2 : 3-27.
- Ellmore, G.S. and F.W. Ewers. 1985. Hydraulic conductivity in trunk xylem of elm. Ulmus americana. IAWA Bull. N.S. 6 : 303-307.
- Gale, J. and A. Poljakoff-Mayber. 1964. Effect of soil moisture stress on the correlation between heat pulse velocity and transpiration. Plant Cell

- Physiol 5 : 447-455.
16. Heine, R.W. and D.F. Farr. 1973. Comparison of heat-pulse and radioisotope tracer methods for determining sap-flow velocity in stem segments of poplar. *J. Exp. Bot.* 24 : 649-654.
 17. Hinckley, T.M., J.P. Lassoie and S.W. Running. 1978. Temporal and spatial variations in the water status of forest trees. *For. Sci. Monograph* 20 : 1-72.
 18. Huber, B. 1932. Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftströme. *Ber. d. deutsch. bot. Ges.* 50 : 89-109.
 19. Huber, B. und Schmidt, E. 1937. Eine Kompen-sationsmethode zur thermoelektrischen Messung langsamer Saftströme. *Ber. d. deutsch. bot. Ges.* 50 : 89-109.
 20. Kozlowski, T.T. and Winget, C.H. 1963. Patterns of water movement in forest trees. *Bot. Gaz.* 124 : 301-311.
 21. Kozlowski, T.T., P.J. Kramer and S.G. Pal-lard. 1991. The physiological ecology of woody plants. Academic Press, New York. 657pp.
 22. Lange, O.L., L. Kappen and E-D. Schulze. 1976. Water and plant life-problems and modern approaches. Springer-Verlag, Berlin. 536 pp.
 23. Lassoie, J.P., Scott, D.R.M. and Fritsch, L.J. 1977. Transpiration studies in Douglas-fir using the heat pulse technique. *Forest Sci.* 23 : 337-390.
 24. Mark, W.R. and D.L. Crews. 1973. Heat-pulse velocity and bordered pit condition in living Engelmann spruce and lodgepole pine trees. *Forest Sci.* 19 : 291-296.
 25. Marshall, D.C. 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat pulse transport. *Plant Physiol.* 33 : 385-396.
 26. Milburn, J.A. 1979. Water flow in plants. Longman, London. 225pp.
 27. Rudinsky, J.A. and J.P. Vite. 1959. Certain ecological and phylogenetic aspects of the pattern of water conduction in conifers. *For. Sci.* 5 : 259-266.
 28. Schubert, A. 1939. Untersuchungen über den Transpirationsstrom der Nadelholzer und den Wasserbedarf von Fichte und Lärche-Tharan-dter Forstl. Jahrb. 90 : 821.
 29. Swanson, R.H. and Skau, C.M. 1963. An im-proved heat pulse velocity meter as an indicator of sap speed and transpiration. *Geophys. Res.* 68 : 4743-4749.
 30. Swanson, R.H. 1966. Seasonal course of transpiration of lodgepole pine and Engelmann spruce. Sopper, W.E. and H.W. Lull (eds.). "Forest Hydrology." Pergamon Press, New York. 419-434.
 31. Swanson, R.H. 1972. Water transpired by trees is indicated by heat pulse velocity. *Agric Meteorol* 10 : 277-281.
 32. Swanson, R.H. and R. Lee. 1966. Measure-ment of water movement from and through shrubs and trees. *J. For.* 64 : 187-190.
 33. Swanson, R.H. and Whitfield, D.W. 1981. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *J. Exp. Bot.* 32 : 221-239.
 34. Zimmermann, M.H. 1978. Hydraulic architec-ture of some diffuse-porous trees. *Can. J. Bot.* 56 : 2286-2295.