

樹木의 水分特性에 關한 生理·生態學的 解析(IX)

—Heat pulse法을 利用한 신갈나무林分의 蒸散速度 測定*¹—
韓相燮²·金宜憲²

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

—Measurement of the Transpiration Rate by the Heat Pulse Method in a *Quercus mongolica* Stand*¹—

Sang Sup Han² and Sun Hee Kim²

要 約

본 연구는 heat pulse법을 이용하여 신갈나무 장령림 林分의 蒸散량을 알기 위한 기초연구로서, 신갈나무 임목에 있어서 日射量, 溫度, 濕度(大氣飽差) 등의 變化에 따른 heat pulse 速度의 日별 변화와 계절 변화, 방위별 heat pulse 速度의 차이, 번재부에 있어 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 수분포텐셜과 heat pulse 速度와의 관계, 줄기에 있어 수분상승의 방향, 그리고, heat pulse법으로 측정된 單木과 林分의 日, 月別, 年間 蒸散量 등을 측정고찰하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 신갈나무의 heat pulse 速度(V)와 樹液流速(SFR)과의 관계는 $SFR=1.37V$ 였다.
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 순이었다. Heat pulse 速度는 日射量, 溫度, 大氣飽差 등의 크기에 따라 일변화하였다.
3. Heat pulse 速度와 葉의 수분포텐셜은 거의 비슷한 일변화를 나타냈다.
4. Heat pulse 速度의 계절 변화는 7월에 평균 2.9cm/hr로 가장 낮았고, 5월이 평균 4.0cm/hr로 가장 높게 나타났다.
5. 줄기에 있어서 heat pulse 速度의 차이는 북측이 가장 높았고, 서측이 그 다음 순이었으며, 남측과 동측은 큰 차이없이 가장 낮은 값을 나타냈다.
6. 번재부에 있어서 깊이별 heat pulse 速度의 차이는 수피로부터 0.5cm 깊이에서 가장 높고, 다음 1.0cm, 1.5cm 순으로 나타났다.
7. 줄기에 있어 水分移動方向은 4분 모두 部分的 垂直上昇(sectorial straight ascent)을 나타내고 있었다.
8. 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.
9. 1ha의 林分에 대한 1일의 蒸散량의 構成比率은 낮이 72%, 밤이 28%였고, 蒸散량은 약 5.6ton/ha/day이었다.
10. 1ha의 月別 蒸散량은 5월이 168ton/ha/month으로 가장 많았고, 7월이 125ton/ha/month로 가장 낮았다. 또 1 ha의 年間 蒸散량은 839ton/ha/yr이었다.

¹ 接受 1996年 1月 12日 Received on January 12, 1996.

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

* 本 研究는 1994年度 韓國科學財團 核心專門研究課題 研究費 支援에 의하여 이루어진 것임.(과제번호:941-0600-013-2)

ABSTRACT

This is the basic study to investigate the amount of transpirational water loss in thrifty mature *Quercus mongolica* stand by the heat pulse method. The differences of heat pulse velocity by direction and depth, differences of heat pulse velocity by dominant, codominant and suppressed trees, diurnal changes of heat pulse velocity due to the change of leaf water potential, vapor pressure deficit and radiation, and sap flow path way in sapwood by dye penetration were measured in stems. Finally the amounts of daily and annual transpiration in stand were calculated by the heat pulse velocity. The results obtained were summarized as follows :

1. Relationship between heat pulse velocity(V) and sap flow rate(SFR) was obtained as a equation of $SFR=1.37V$.
2. The sap flow rate was high in the order of dominant, codominant, and suppressed trees. The daily heat pulse velocity changed with radiation, temperature and vapor pressure deficit.
3. The heat pulse velocity showed the similar diurnal variation as the leaf water potential change.
4. The heat pulse velocity showed the highest value in May(4.0cm/hr in average), the lowest one in July(2.9cm/hr in average).
5. The heat pulse velocity in the same stem presented the highest value in the northern direction, medium in western, and the lowest in southern and eastern.
6. The heat pulse velocity in stem was highest in 0.5cm, medium in 1.0cm, and lowest in 1.5cm depth from the surface of stem.
7. The sap flow path way in stem showed sectorial straight ascent pattern in four sample trees.
8. The amount of sap flow(SF) was presented as a equation of $SF=1.37A \cdot V$ (A: the cross-sectional area of sapwood, V: heat pulse velocity), and especially SF was larger in dominant tree than codominant and suppressed trees.
9. The amount of daily transpiration was 5.6ton/ha/day, and its composition ratio was 72% at day and 28% at night.
10. The amount of stand transpiration per month was largest in May(168ton/ha/month), lowest in July(125ton/ha/month). The amount of stand transpiration per year was 839ton/ha/year.

Key words : *Quercus mongolica* stand, heat pulse velocity, sap flow rate, transpiration rate

I. 緒 論

수분은 식물의 광합성이나 증산과 같은 여러 대사와 다양한 생리현상에 밀접하게 관여하여 식물의 생장에 없어서는 안될 중요한 요소이다. 따라서 식물은 다량의 수분을 흡수하고 배출하면서 생명을 유지하고 있다. 이때 수분의 흡수와 배출로 이어지는 수분이동은 植物이 土壤과 大氣環境 속에서 살아가기 때문에 土壤(soil)-植物(plant)-大氣(atmosphere)의 連續體(continuum), 즉 SPAC이라는 經路를 통해 일어난다(Lange 등, 1976; Hinckley 등, 1978).

SPAC 內에서의 水分移動은 토양-뿌리-줄기-가지-엽-대기로 이어지는 과정에 있어서 각 부분의 水分포텐셜 차이에 의해서 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; Kozłowski 등, 1991; 韓相變, 1992). 결국 수분이동에 주요 원인이 되는 것은 증산작용이라는 것을 알 수 있다. 따라서 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 같다. 그 중 heat pulse法은 살아 있는 나무에 약간의 상

처만 입히고, 林地에서 立木의 樹液流速을 精度 높게 측정할 수 있기 때문에 최근 널리 사용되고 있다(森川, 1974; 小南과 鈴木, 1990; 奥村 등, 1989; Lassoie 등, 1977; Swanson과 Whitfield, 1981; 韓相變과 金宣憲, 1993).

Heat pulse法에 의해 樹液流速을 최초로 측정한 사람은 Huber(1932)이다. 그리고 Huber와 Schmidt(1937)는 heat pulse를 주는 熱源으로부터 上流에 1.6cm, 下流에 2.0cm 부위에 각각 熱傳對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 밝혔으며, Closs(1958)는 compensation method와 Marshall(1958)의 이론식으로부터 heat pulse에 의한 측정법을 명확히 밝혔다. 이후 heat pulse法에 의한 간편한 측정기가 개발되어 최근까지 樹液流速에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다(Decker와 Skau, 1964; Gale와 Poljakoff-Mayber, 1964; Doley와 Grieve, 1966; Heine와 Farr, 1973; Mark와 Crews, 1973; 森川, 1972, 1974; Skau와 Swanson, 1963; Swanson, 1972; Swanson과 Lee, 1966; Swanson과 Whitfield, 1981; Lassoie 등, 1977; 小南과 鈴木, 1990; 奥村 등, 1989; 矢幡, 1984, 1986; 韓相變과 金宣憲, 1993; Ikeda와 Kiyohara, 1995).

본 연구는 우리나라 주요 향토수종의 하나인 신갈나무의 수분생리적 특성을 밝히고자 하는 연구로서, 신갈나무 입목에 있어서 日射量, 溫度, 濕度(大氣飽差) 등의 變化에 따른 heat pulse速度의 일변화와 계절변화, 방위별 heat pulse速度의 차이, 변재부에 있어 깊이별 heat pulse速度의 차이, 優勢木, 準優勢木, 劣勢木의 heat pulse速度의 차이, heat pulse速度와 수분포텐셜과의

관계, 줄기에 있어 수분상승의 방향 등을 측정고찰하였고, heat pulse법을 이용하여 單木 및 林分의 日, 月別, 年間 蒸散量을 測定 考察하였다.

II. 材料 및 方法

1. 測定材料

본 연구의 실험재료는 江原大學校 構內林에 20~30년생 신갈나무 천연림이며, heat pulse速度는 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 나타냈다. Heat pulse速度와 실제의 樹液流速과의 관계를 알아보기 위한 측정에는 準優勢木의 줄기 상부에서 직경 6cm, 길이 30cm되는 시료를 사용하였다.

2. 測定期間

1993년 7, 8월은 heat pulse速度와 수액류속과의 관계를 밝히고, 입목의 목부에 있어서 방위별 및 깊이별 heat pulse速度를 일사량과 온도가 높은 10~16시 사이에 측정하였다.

1994년 5~10월에는 개체목과 임분의 heat pulse速度와 증산량의 일변화를 측정하였고, heat pulse速度와 엽수분포텐셜의 관계를 밝혔다. 또한 우세목에 있어서 매일 12~16시 사이의 1일 평균 및 최대 heat pulse速度를 일사량, 온도, 대기포차 등 여러 환경인자와 함께 측정하여 나타내었으며, 單木 및 林分의 月別, 年間 蒸散量을 측정하였다.

1995년도에는 1994년도의 실험결과에 대한 보충실험으로서, 우세목을 대상으로 6월부터 9월까지 매일 12~16시 사이의 1일 최대 및 평균 heat pulse速度를 환경인자와 함께 측정하였다.

Table 1. The mean value of sample trees.

Trees	Height (m)	DBH (cm)	Basal area (cm ²)	Heartwood cross-section at breast height (cm ²)	Sapwood cross-section at breast height (cm ²)
Dominant tree	17.2	15.8	194.8	57.2	142.7
Codominant tree	12.2	10.1	80.2	18.7	61.5
Suppressed tree	7.7	4.0	12.3	1.1	11.1

3. 測定器機

Heat pulse 速度는 Sap Flow Meter(林電工(日製), HP-1型)를 사용하였고, 日射量의 變化는 일사량 측정기(Megatron(英國製), DA10/L型)로 측정하였다. 또한 大氣壓飽差는 건습도계로, 워터 포텐셜은 Pressure Chamber(大起理化工(日製), PC-40型)로 측정하였다.

4. 測定方法

1) Heat pulse 速度와 樹液流速과의

關係 測定

신갈나무 林分 중 準優勢木 줄기의 상부에서 직경 6cm, 길이 30cm 되는 시료를 채취하여 즉시 물에 담근 후 실험실로 옮겨 Fig. 1과 같은 장치를 설치하고, 수액류속과 heat pulse의 移動速度를 측정하여 그 관계식을 구하였다. Fig. 1과 같이 시료상부에는 원통을 연결시켜 물을 가득 채우고, 시료하부에는 진공펌프를 연결한 감압플라스크를 설치하여 일정한 흡입압력(0.706 기압) 하에서 시료를 통과하는 通水量(cc/hr)을 측정하였다.

측정한 通水量은 줄기의 通水斷面積으로 나누어 樹液流速(SFR, sap flow rate, cc/cm²/hr)으로 사용하였고, 동시에 시료에 heat pulse 측정 센서를 설치하여 heat pulse 速度를 측정하였다. 이 때 센서의 간격 OA는 1.0cm, OB는 0.7cm로 하고, 깊이는 0.5cm로 동일하게 삽입하였다.

2) 林分에 있어서 heat pulse 速度의 測定

동일 林分 중, 優勢木, 準優勢木, 劣勢木으로 구분한 나무에 대하여 각각 heat pulse 센서를 삽입시켜 channel selector로 동시에 측정하였다. Heat pulse 速度의 일변화는 오전 6시부터 21시

까지 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)도 함께 측정하였다. 立木에 있어 heat pulse의 센서 설치방법은 胸高部位(1.2m) 中央에 heat pulse 熱源을, 그리고 熱源으로부터 상부 1.0cm, 하부 0.7cm에 熱傳對 센서를 각각 0.5cm 깊이로 삽입시켰다.

또한, 줄기에 있어서 방위별 heat pulse 速度의 측정시는 동, 서, 남, 북 4방위에 각각 측정 센서를 상기 방법과 같이 설치하고 channel selector를 이용하여 동시에 측정하였다. 깊이별 heat pulse 速度의 측정은 수피를 거의 제거한 상태에서 센서를 0.5cm, 1.0cm, 1.5cm 깊이별로 각각 삽입시켜 동시에 측정하였다. 측정시간은 10~16시 사이에 20분 간격으로 하였다.

계절별 heat pulse 速度의 측정은 1994년 5~10월, 1995년 6~9월에 매일 12시부터 16시 사이의 1일 最高 및 平均 heat pulse 速度를 측정하여 비교하였다. 이 때는 優勢木만의 heat pulse 速度를 측정하였고, 3분을 측정하여 그 평균치를 사용하였다.

3) 수액상승방향 측정

줄기의 邊材部에 있어 樹液上昇의 徑(sap flow path way)을 알기 위하여 優勢木, 準優勢木, 劣勢木 총 4본을 선정하여, 줄기의 지상 0.3m 동측에 직경 1cm, 깊이 10cm의 구멍을 뚫고, 1.0% 酸性 Fucshin 용액을 니겔주사병과 주사바늘 장치를 이용하여 주입시켰다. 그리고 96시간 경과 후에 벌채하여 0.5m부터 2m 간격으로 圓板을 채취하고 염색부분을 감식하여 樹液上昇 經路를 조사하였다. 이 때 염색약이 새는 것을 방지하기 위하여 줄기에 구멍을 아래로 비스듬히 뚫었고, 구멍 입구를 고무마개로 막고 주사바늘을 꽂았다.

4) 林分蒸散量의 計算

Heat pulse 速度(V, cm/hr)와 樹液流速(SFR, cc/cm²/hr)과의 관계가 SFR=xV의 직선상관계로 나타내진다면, 어떤 나무의 줄기에 있어서 樹液流量(SF; sap flow, cc/hr)은 樹液流速에 樹液이 상승하는 斷面積(A, cm²)을 곱하여 구할 수 있다. 따라서 樹液流量은 SF=xAV로 나타내지며, 여기서 SF는 시간당 한 立木의 蒸散量에 해당된다.

본 연구에서는 立木의 heat pulse 速度의 일변

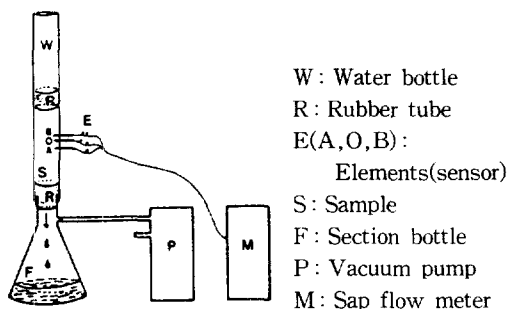


Fig. 1. An apparatus for measuring the water flow rate.

화와 줄기의 邊材部에 있어서 樹液이 상승하는 단면적을 측정하여 개체목과 임분의 蒸散量의 일변화를 산출하였다.

또한, 본 測定林分과 가장 가까이에 위치한 春川 氣象臺(春川市 소재, 測定林分으로부터 약 8 km 거리)에서 측정한 1994年度 月別 및 日別 氣象因子(맑음/흐림/비의 비율: 5月 19/9/3, 6月 19/9/2, 7月 21/7/3, 8月 19/7/5, 9月 23/6/1, 10月 17/10/4, 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 산출하였다.

III. 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 關係를 명확하게 밝히기 위하여 Fig. 1과 같은 실험장치를 이용하여 측정한 heat pulse 速度와 通水速度와의 關係를 Fig. 2에 나타냈다.

Heat pulse 速度는 시료의 邊材組織을 통과한

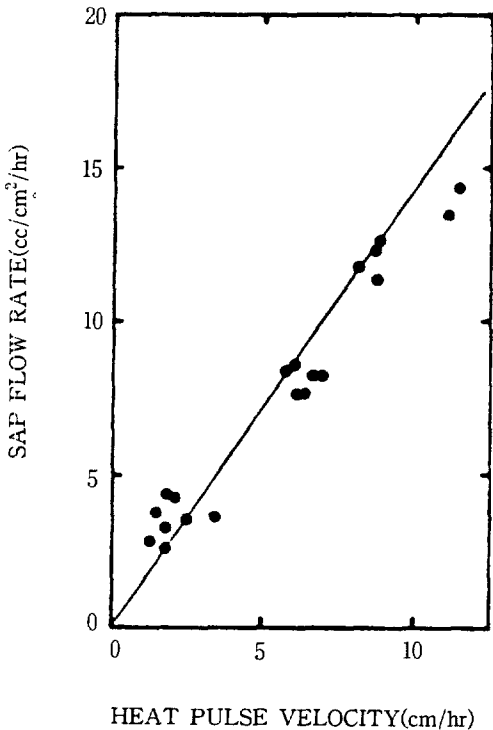


Fig. 2. The relationship between heat pulse velocity(V) and sap flow rate(SFR). The regression equation is $SFR=1.37V$

물의 流速과 높은 直線相關關係를 나타냈으며, heat pulse 速度는 통과하는 물의 流速, 즉 通水速度보다는 약간 낮다는 것을 알 수 있다. 여기서 通水速度는 樹液流速을 의미한다. Fig. 2에서 얻은 樹液流速 SFR(cc/cm²/hr)과 heat pulse 速度 V(cm/hr)와의 關係는 $SFR=1.37V$ 였다.

이러한 결과는 heat pulse 速度가 수액류속의 상대적인 값으로 사용하는 것이 상당히 유효하다는 것을 의미하며, 따라서 실제 임목에서 heat pulse 速度만 측정하면 간단히 수액류속을 구할 수 있는 것이다. 이와 같은 관계가 성립함은 Populus spp. (Closs, 1958), 편백나무(森川, 1974), 낙엽송(韓相變과 金宣憲, 1993) 등의 임목에서도 밝혀진 바 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과 劣勢木으로 구분하여, 각각 heat pulse 速度를 同時測定하여 Fig. 3에 나타냈다.

Heat pulse 速度의 일변화를 비교할 때 전체적으로 優勢木이 가장 높고, 準優勢木, 劣勢木의 크기 순이었으며, 특히 일사량과 온도가 높은 12시부터 17시 사이에 이들간의 heat pulse 速度의 差異가 컸다. 韓相變과 金宣憲(1993)에 의하면 낙엽송에서도 우세목일수록 heat pulse속도가 빨랐다고 하며, 편백나무의 경우는 孤立木이나 林分木이나 관계없이 나무가 클수록 heat pulse 速度가 빠르다고 한다(森川, 1974).

Heat pulse 速度는 日射量과 溫度의 增減에

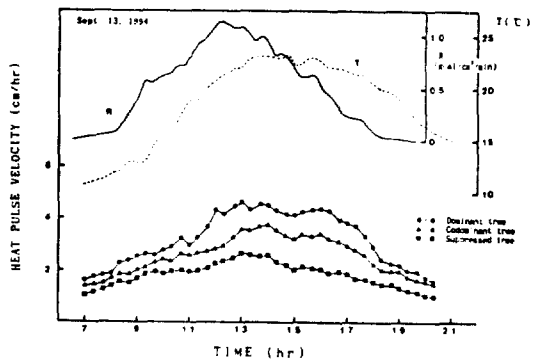


Fig. 3. Heat pulse velocity among dominant, co-dominant and suppressed trees. The holes for embedding the elements are 0.5cm deep from surface stem at 1.2m high above ground.

밀접한 반응을 나타내나, 오후에는 日射量の 감소보다 약간 뒤늦게 감소가 일어나고 있다(Fig. 3). 그러한 경향은 優勢木, 準優勢木과 劣勢木 모두 같았다. Heat pulse 速度는 일출과 함께 증가하기 시작하여 약 13시~14시경 최대치에 달하였으며, 그 후 약 16시까지 최대속도를 유지하였다. 그리고 일몰과 함께 감소하기 시작하여 밤 20시경에는 최소치 1~1.6cm/hr에 달하였다. 日中 heat pulse 速度의 최대치는 優勢木에서 약 4.6cm/hr, 準優勢木에서 약 3.8cm/hr, 劣勢木에서 약 2.7cm/hr 정도로 비교적 낮은 값을 나타냈다.

이러한 결과는 1995년 같은 월(9월)에 측정된 heat pulse 速度(우세목, 최대 13.4cm/hr, 평균 약 10.7cm/hr)의 약 1/3 정도로 무척 낮은 값이다. 이는 1994년 9월의 강수량이 55.9mm로 1995년 9월의 강수량 74.2mm보다 20% 정도 적었으며, 평년 9월의 강수량 162.6mm보다도 매우 적은 양이었기 때문으로 생각되며, 특히 1994년도 7월부터 시작된 32℃ 이상(보통, 12~20시)의 고온 현상과 평년 7, 8월 강수량(347.3mm, 286.5mm)에 크게 못미치는 강수량(7월 128.5mm, 8월 248.5mm)의 영향이 9월까지 이어져 매우 낮은 heat pulse 速度를 나타낸 것으로 사료된다.

Ikeda와 Suzuki(1987)에 의하면, 상수리나무와 해송에 대한 heat pulse 速度를 측정된 결과 두 수종 모두 오전 6~7시경 일출과 함께 급속한 상승을 나타내 오전 10~11시경 최대치에 달했다고 한다. 그 후 상수리나무는 17시까지 최대속도 약 31cm/hr를 유지하다가 18시경 급속한 감소를 나타내 19시경 최저속도에 달하고, 해송은 16시까지 최대속도 약 19cm/hr를 유지하다가 서서히 감소를 하여 23시경에 최저속도에 달하는 특징을 나타냈다. 또한 삼나무의 경우, heat pulse 速度는 오전 7시경 급속한 증가를 나타내고 12시경부터 최대속도 약 17cm/hr를 유지하다가 일몰 후 아주 느리게 감소하여 다음날 2시에 최저속도를 나타냈다.

Fig. 3에서 heat pulse 速度가 최대치에 달하는 시각은 일사량이 최대치에 달하는 시각과 거의 일치하지만, 기온이 최대에 달하기 이전에 heat pulse 速度가 최대치에 달한다는 것을 알 수 있다. 그리고 일몰 후에도 heat pulse 速度의 감소가 계속 진행되어 밤늦게 또는 새벽녘에 최저치에 달함을 알 수 있다.

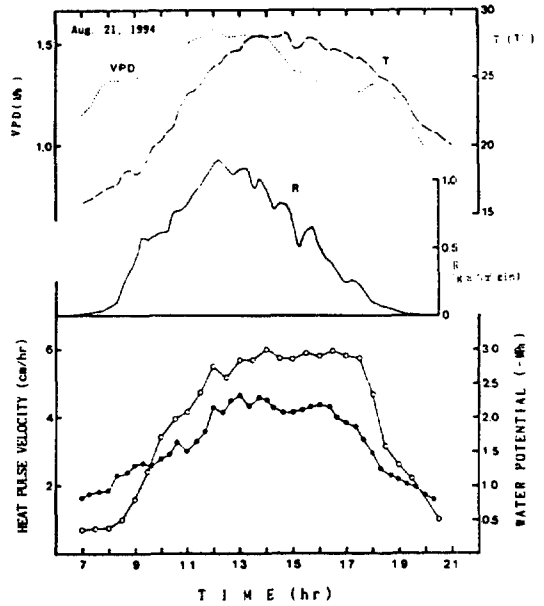


Fig. 4. Diurnal trends of heat pulse velocity and water potential.

- - ● : heat pulse velocity,
- - ○ : water potential.

보통 야간의 heat pulse 速度는 최소치를 유지하여 적은 양의 수분이동이 일어난다고 한다(Lassoie 등, 1977; Ikeda와 Suzuki, 1984, 1987; 上田과 吉川, 1994). Douglas-fir에서 야간의 수분 이동은 최소치 2.5cm/hr를 유지하지만 실제 수분 손실은 없었다고 한다(Lassoie 등, 1977). 이것은 밤에 뿌리로부터 흡수된 수분이 수체에 저장되기 때문으로 생각된다.

또 heat pulse 속도와 水分포텐셜의 일변화를 동시에 측정하여 Fig. 4에 나타냈다. Heat pulse 속도는 수분포텐셜의 일변화와 함께, 일사량과 대기포차의 증감에 따라 일변화하여 약 12시경 최대치에 달하고, 17시까지 일정한 값을 유지하다가 17시 이후 일몰과 함께 급격하게 감소하였다. 이처럼 Heat pulse 속도는 수분포텐셜의 감소에 비례하여 증가하고, 역으로 수분포텐셜이 증가하면 heat pulse 속도는 감소하였다. 이러한 결과는 韓相變과 金宣憲(1993)에 의한 낙엽송의 연구에서도 보고된 바 있으며, 일반적으로 heat pulse의 증가와 수분포텐셜의 감소와는 正의 상관관계에 있다고 한다(矢幡, 1986).

한편 신갈나무 優勢木에 대한 heat pulse 速度

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

Year	1994						1995			
	Month	5	6	7	8	9	10	6	7	8
Maximum HPV (cm/hr)	6.6	5.0	4.3	4.7	4.7	4.3	12.0	15.8	16.9	13.4
Average HPV (cm/hr)	4.0	3.3	2.9	3.4	3.2	3.4	11.3	13.7	15.5	10.7
Average radiation (g · cal/cm ² /min)	0.89	0.95	1.07	1.03	1.00	0.70	0.88	1.02	1.08	0.96
Average temperature (°C)	21.3	29.4	31.8	30.0	24.4	15.2	25.6	29.0	29.6	22.3
Average VPD (mbar)	10.0	16.3	31.1	20.0	14.4	10.9	16.9	22.3	23.5	17.8
Precipitation (mm)	131	100	129	249	60	137	54	454	775	74

의 계절변화를 Table 2에 나타냈다. 1994년도에는 7월에 최대 및 평균 heat pulse 速度가 가장 낮게 나타나, 결과적으로 5월이 가장 높았다. 일반적으로 개엽기인 4, 5월에서 성숙기인 7, 8월로 가면서 heat pulse 速度가 증가하는 것이 지금까지의 측정결과이나, 1994년도 연구에서는 반대적인 결과를 보였다. 이는 1994년 실험기간 중 6월부터 8월까지 이어진 지나친 고온현상, 높은 대기포차에 의한 영향, 그리고 특히 7, 8월의 강수량이 377.0mm으로 평년 7, 8월 강수량 633.8mm의 60%에도 못미치는 등 異常的인 환경영향으로 인한 결과로 사료된다. 그리고 이러한 영향은 10월까지 이어진 것으로 보인다.

그러나 1995년 6~9월의 heat pulse 速度는 1994년보다 평균 3배 이상 높게 나타났다. 이는 Table 2에 함께 나타낸 여러 환경인자의 차이에 의한 것으로 생각되며, 특히 1994년 7, 8월의 강수량(128.5mm, 248.5mm)이 1995년 7, 8월 강수량(453.9mm, 774.7mm)의 35%에도 미치지 못하는 적은 양이었기 때문에 그 영향에 의한 것으로 사료된다.

또한 1995년도 heat pulse 速度의 계절변화는 6월에 평균 11.3cm/hr로 낮은 값을 나타내다가 7월에 평균 13.7cm/hr로 증가하여, 8월의 heat pulse 速度가 평균 15.5cm/hr로 가장 높게 나타났다. 그 후 9월 평균 10.7cm/hr로 다시 감소하여 일반적인 경향을 나타냈다.

韓相變과 金宜憲(1993)에 의하면 낙엽송에서는 8월에 평균 및 최대의 heat pulse 速度가 가장 높았고 5월과 10월이 낮았다고 하며, 편백나무(森川, 1974)와 졸참나무(奧村 등, 1989) 역시 7, 8월의 heat pulse 速度가 가장 높았다고 한다.

3. 방위별 heat pulse 速度

신갈나무 林分 중 準優勢木을 대상으로 측정한 줄기의 방위별 heat pulse 速度의 차이를 Fig. 5에 나타냈다. 신갈나무의 방위별 heat pulse 速度는 줄기의 북측이 가장 높고, 다음이 서측으로 나타났으며, 동측과 남측이 비슷한 값으로 가장 낮았다.

보통 heat pulse 速度는 방위별로 약간씩 다르다고 한다. 낙엽송에서는 동측이 가장 높고 남측의 속도가 가장 낮았으며(韓相變과 金宜憲, 1993). Douglas-fir에서는 서측과 남측이 높았다(Lassoie 등, 1977). 평지의 삼나무림에서는 동측이 가장 높고, 다음이 북측, 서측 순으로 낮아진다고 한다(矢幡, 1986). 또한 편백나무의 孤立木에서는 방위에 따른 차이가 없다고 하지만(森川, 1974), 小南과 鈴木(1990)에 의한 편백나무 연구에서는 방위별로 상당한 차이를 나타냈다고 한다. 闊葉樹인 *Betula verrucosa* 立木에서는 남측의 heat

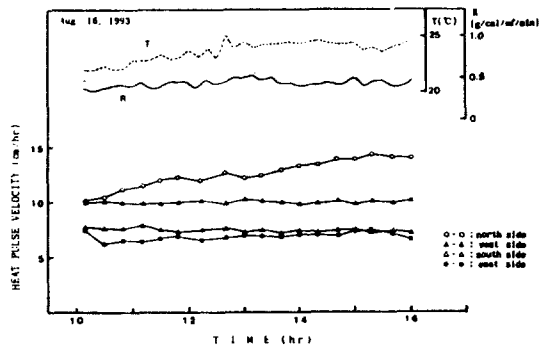


Fig. 5. Heat pulse velocity at various direction of tree trunk at 1.2m high above ground in the codominant tree. The holes for embedding the elements are 0.5cm deep from surface of stem.

pulse 速度가 북측보다 빠르다고 하였다(Baumgartner, 1934). 수목에 있어서 이러한 방위별 heat pulse 速度의 차이는 각 방위에 속하는 뿌리와 엽량, 그리고 목부에 있어서 수분의 이동방향 등과 밀접한 관계를 갖는다고 한다(森川, 1974).

4. 깊이별 heat pulse 速度

줄기에 있어서 깊이별 heat pulse 速度의 차이를 알기 위하여 準優勢木의 줄기에 있어 邊材部の 깊이별 heat pulse 速度를 측정하여 Fig. 6에 나타냈다. 깊이별 heat pulse 速度는 0.5cm 깊이에서 가장 높고, 다음이 1.0cm 깊이, 그리고 1.5cm 깊이에서 가장 낮았다.

이처럼 신갈나무는 형성층 가까이에서 가장 빠른 수액류속을 나타내며 변재부의 내부로 갈수록 그 속도가 느려짐을 알 수 있다. Lassoie 등(1977)에 의하면 Douglas-fir에서는 2.2cm 깊이에서 heat pulse 速度가 가장 높았고, 3.2cm, 1.7cm, 1.2cm, 0.7cm, 0.4cm 깊이순으로 낮아졌다고 한다. 낙엽송의 경우, 수피로부터 2cm 깊이에서 가장 높았으며 다음 1cm, 3cm 깊이 순으로 나타났다(韓相變과 金宜憲, 1993). Pinus contorta var. latifolia와 Picea engelmanni에서도 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 闊葉樹 중 環孔材樹種에서는 邊材部の 水分移動이 최근에 형성된 1~2 年輪層에서만 일어난다고 한다(Kozłowski 등, 1991 ; Zimmermann, 1978). Ellmore와 Ewers(1985)에 따르면 環孔材

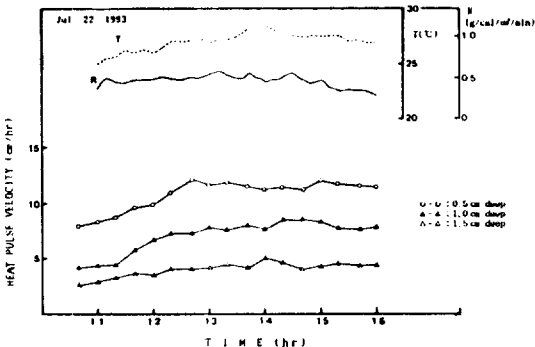


Fig. 6. Heat pulse velocity at various depths from surface stem at 1.2m high above ground.

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(全壽京과 韓相變, 1992). 종종 闊葉樹種의 邊材部가 병해를 받거나 심한 水分缺差를 받으면 邊材部の 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(Kozłowski 등, 1991 ; Milburn, 1979 ; 池田, 1984).

본 연구에서 환공재인 신갈나무의 변재부는 깊이별로 heat pulse 速度는 다르지만, 최소 1.5cm, 즉 최근 5~6年輪層까지 상당한 통수능력이 있다는 사실을 알 수 있었다.

5. 水分移動方向

줄기의 邊材部에 있어서 樹液이 상승하는 方向과 斷面積을 조사하기 위하여 色素注入法을 사용하였다. 줄기의 하부로 염색약을 주입하여 살아있는 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 方向과 通水斷面積을 쉽게 밝힐

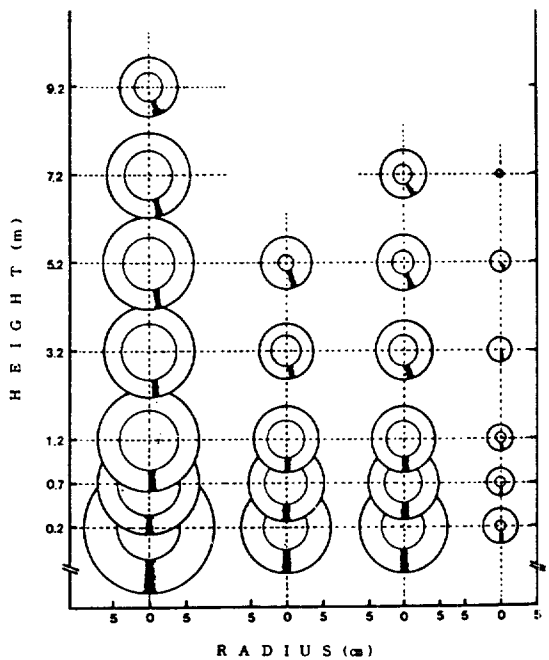


Fig. 7. Patterns of the upward travels of injecting dye.

수 있다.

신갈나무 林分 중 優勢木, 準優勢木, 劣勢木의 立木 줄기에 1.0% 酸性 Fuchsin 용액을 주입시켜 0.5m부터 2m 간격의 높이별로 邊材部의 염색된 부분을 조사하여 수분의 상승방향을 Fig. 7에 나타냈다.

4본 모두 部分的 垂直上昇(sectorial straight ascent)을 나타내고 있다. 이러한 상승형은 뿌리와 엽이 거의 직선적으로 연결되어 있음을 의미한다(池田, 1984). 따라서 방위별 heat pulse 速度의 차이는 특정방위의 영향이 아니라 엽량과 뿌리에 영향한다고 생각된다.

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)왼쪽 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 한가지형으로 상승한다고 하였다. 韓相變과 金宣憲(1993)에 의한 낙엽송 5본의 실험결과에서도 모두 오른쪽 나선상승을 하는 것이 관찰되었다. 그러나 Kozłowski(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 連續上昇을 나타내지만 몇몇 立木에서는 약간씩 서로 다르다는 것을 관찰하였다.

또한, 환공재의 활엽수류의 수액이동이 마지막 1년 혹은 2년에 형성된 도관에 의존하는 경우가 대부분이며, 일부수종에서는 당년에 만들어진 춘재의 큰 도관에 의해서만 물이 올라가고 1~2년이 지나면 그 기능이 중지된다고 보고되어 있다(池田, 1984). 반면 신갈나무에서는 심재에 가까운 부분까지 염색된 것으로 보아 변재부 전체에 수분통수능력이 있는 것으로 나타났다.

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 $SFR=1.37V$ 의 관계식을 얻었다. 어떤 나무의 줄기에 있어서 樹液流量을 SF(sap flow, cc/hr)라고 하고, 邊

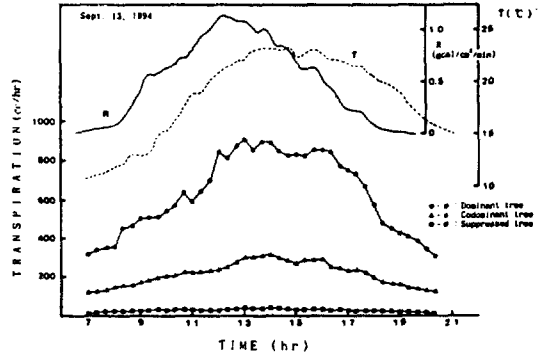


Fig. 8. Diurnal trends of transpiration among dominant, codominant and suppressed trees.

材部에 있어서 樹液이 상승하는 斷面積을 A (cm²)라 하면, 시간당 樹液流量은 $SF=1.37AV$ 가 된다. 여기서 SF는 시간당 한 立木의 蒸散量에 해당된다.

이와 같은 관계가 성립함을 편백나무(森川, 1974)와 낙엽송(韓相變과 金宣憲, 1993)의 연구 등에서 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.

Heat pulse 速度의 일변화(Fig. 2)를 사용하여 산출한 蒸散量의 일변화를 Fig. 8에 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도 높지만, 樹液이 상승하는 邊材斷面積이 優勢木에서 월등히 크게 나타나기 때문이라고 생각된다. 또 Fig. 8을 사용하여 산출한 1일 蒸散量을 계산하여 Table 3에 나타냈다.

1일의 蒸散量 역시 優勢木이 11,947ml로 準優勢木의 3배, 그리고 劣勢木의 22배 정도로 월등히 많다. 그리고 1 ha의 林分에 대한 1日의 蒸散量의 構成比率은 낮이 72%, 밤이 28%로 나타나, 밤에도 상당한 樹液移動이 일어나고 있음을 알 수 있다. 또 1 ha로 계산하면, 신갈나무 林分에서는 하루의 蒸散量이 약 5.6ton/ha으로, 이것은 하루 0.56mm/day를 蒸散으로 소비하고 있음을 의미한다.

韓相變과 金宣憲(1993)에 의하면, 20년생 낙엽송 林分에서는 1일 수분이동의 17% 정도를 밤에 행하며, 하루 약 3.08mm를 증산으로 소비한다고

Table 3. Daily transpiration of trees and stand in *Quercus mongolica* forest. Data was calculated from $SF=1.37AV$ and Fig. 4. SF is transpiration rate($H_2O\text{ cm}^3/hr$); A is cross sectional area of sapwood(cm^2); V is heat pulse velocity(cm/hr).

	Day	Night	Total
Dominant tree	8,684 ml (73%)	3,263 ml (27%)	11,947 ml (100%)
Codominant tree	2,982 ml (71%)	1,227 ml (29%)	4,209 ml (100%)
Suppressed tree	386 ml (71%)	156 ml (29%)	542 ml (100%)
Stand (ha)	4,022 l (72%)	1,579 l (28%)	5,601 l (100%)

Table 4. Monthly transpiration of trees and stand in *Quercus mongolica* forest(1994).

		(Unit : l)						
Trees	Month	5	6	7	8	9	10	year
Dominant tree		365	288	266	284	310	283	1,797
Codominant tree		123	101	94	100	109	100	628
Suppressed tree		16	13	12	13	14	13	81
Stand (ha)		167,850	134,917	124,741	133,207	145,626	132,912	839,253

한다. 또 44년생 편백나무 林分에서는 夏期에 1일 약 3.37mm를 증산으로 소비한다는 보고가 있다(森川, 1974).

또한, 본 測定林分과 가장 가까이에 위치한 春川 測候所(春川市 소재, 測定林分으로부터 약 8 km 거리)에서 측정한 氣象因子를 사용하여 1994년 開葉期부터 落葉期까지의 月別 및 年間 蒸散量을 산출하여 Table 4에 나타냈다.

1994년도 月別 蒸散量은 5월에 168ton/ha, 즉 16.8mm/month로 가장 많았고, 7월이 125ton/ha, 즉 12.5mm/month로 가장 낮았다. 또 1ha의 신갈나무 林分の 年間 蒸散量을 산출하면, 약 839ton/ha으로 年間 83.9mm의 수분을 증산으로 소비하는 것으로 나타났다.

韓相變(1992)이 정리한 자료에 따르면 삼나무 林分은 약 260~1230mm/yr, 편백나무 林分은 233~970mm/yr, 소나무 林分은 633~1242mm/yr, 해송은 880~1026mm/yr 등이라고 하며, 韓相變과 金宣憲(1993)에 의하면 20년생 낙엽송 林分이 398mm/yr라 한다.

그러나 본 연구결과에서 신갈나무는 다른 수종에 비해 상당히 적은 양의 수분을 증산으로 소비하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 신갈나무의 내건성 특성에 의한 것으로도 사료되나, 특히 1994년 실험기간 중 6, 7, 8월의 지나친 고온현상, 높은 대기포차, 그리고 평년 강수량(1296.4mm)의 72%에 해당하는 적은 양의 강수(920.9mm)

등 異常인 기상변동으로 인하여 적은 증산량을 나타낸 것으로 사료된다.

引用文獻

1. 全壽京, 韓相變. 1992. 아카시나무와 산돌배 나무의 木部에 있어서 水分移動經路. 韓林誌 81(4) : 357-362.
2. 韓相變. 1992. 林木에 있어서의 水分의 移動, 排出, 缺差. 삼림과학의 연구방향. '92강원대학교 임과대학 국제학술심포지움집. 24-63.
3. 韓相變, 金宣憲. 1993. 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 林分の 樹液流速 計測. 韓林誌 82(2) : 152-165.
4. 池田 武文. 1984. 樹木의 水分通導性について. 橋岡植物 10 : 197-212.
5. 小南 裕志, 鈴木 雅一. 1990. ヒートパルス 法による 實蒸散量의 推定, 京都大 演習林報告 197-207.
6. 森川 靖. 1972. 樹液流測定裝置と測定法. 日林誌 54 : 166-171.
7. 森川 靖. 1974. ヒノキ의 樹液의 流れ - 林木의 水分收支と 關連して -. 東京大學 演習林報告 66 : 251-297.
8. 森川 靖. 1978. 樹木 - 形態と機能 -. 文永堂. 東京. 145-167.

9. 奥村 武信, 水中 進一, 前田 浩行. 1989. 廣葉樹林の蒸散量推算へのヒートパルス法の適用に関する研究. 廣葉樹研究 No. 5 : 173-184.
10. 上田 正文, 吉川 賢. 1994. 夏の無降雨期間がフウの樹液流速度に與える影響. 日林誌 76 (3) : 249-257.
11. 矢幡 久. 1984. ヒートパルス法による自動多点記録蒸散流速計. 日林誌 66 : 241-246.
12. 矢幡 久. 1986. 樹木における水の吸収, 移動, 排出に関する研究, 九州大學 博士學位論文 1-134.
13. Baumgartner, A. 1934. Thermoelektrische Untersuchungen über die Geschwindigkeit des Transpirationsstromes. Z. f. Bot. 28 : 81-136.
14. 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.
15. Decker, J.P. and C.M. Skau. 1964. Simultaneous studies of transpiration rate and sap velocity in trees. Plant Physiol. 39 : 213-215.
16. Doley, D. and B.J. Grieve. 1966. Measurement of sap flow in a eucalyptus by thermoelectric methods. Aust. For. Res. 2 : 3-27.
17. Ellmore, G. S. and F. W. Ewers. 1985. Hydraulic conductivity in trunk xylem of elm. *Ulmus americana*. IAWA Bull. N.S. 6 : 303-307.
18. Gale, J. and A. Poljakoff-Mayber. 1964. Effect of soil moisture stress on the correlation between heat pulse velocity and transpiration. Plant and Cell Physiol. 5 : 447-455.
19. 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.
20. 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.
21. Huber, B. 1932. Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftströme. Ber. d. deutsch. bot. Ges. 50 : 89-109.
22. Huber, B. und Schmidt, E. 1937. Eine Kompensationsmethode zur thermoelektrischen Messung langsamer Saftströme. Ber. d. deutsch. bot. Ges. 50 : 89-109.
23. Ikeda, T and T. Suzaki. 1984. Influence of pine-wood nematodes on hydraulic conductivity and water status in *Pinus thunbergii*. J. Jap. Soc. 66(10) : 412-420.
24. Ikeda, T and T. Suzaki. 1987. Radial variation in the R_{s-1} in the SPAC of several tree species. J. Fac. Agr., Kyushu Univ., 32(1-2) : 1-7.
25. Ikeda, T and T. Kiyohara. 1995. Water relations, xylem embolism and histological features of *Pinus thunbergii* inoculated with virulent or avirulent pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. J. Exp. Bot. 46 : 441-449.
26. Kozłowski, T.T. and Winget, C.H. 1963. Patterns of water movement in forest trees. Bot. Gaz. 124 : 301-311.
27. Kozłowski, T.T., P.J. Kramer and S.G. Pallardy. 1991. The physiological ecology of woody plants. Academic Press. New York. 657pp.
28. Lange, O.L., L. Kappen and E-D. Schulze. 1976. Water and plant life problems and modern approaches. Springer-Verlag. Berlin. 536pp.
29. Lassoie, J.P., Scott, D.R.M. and Fritschen, L.J. 1977. Transpiration studies in Douglas-fir using the heat pulse technique. Forest Sci. 23 : 337-390.
30. 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.
31. Marshall, D.C. 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. Plant Physiol. 33 : 385-396.
32. Milburn, J.A. 1979. Water flow in plants. Longman. London. 225pp.
33. 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.
34. Skau, C.M. and Swanson, R.H. 1963. An improved heat pulse velocity meter as an indicator of sap speed and transpiration. *Jour. Geophy. Res.* 68 : 4743-4749.
35. 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, pp. 419-434.
36. Swanson, R.H. 1972. Water transpired by trees is indicated by heat pulse velocity. *Agric Meteorol* 10 : 277-281.
37. Swanson, R.H. and R. Lee. 1966. Measurement of water movement from and through shrubs and trees. *J. For.* 64 : 187-190.
38. Swanson, R.H. and Whitfield, D.W. 1981. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *J. Exp. Bot.* 32 : 221-239.
39. Zimmermann, M.H. 1978. Hydraulic architecture of some diffuse-porous trees. *Can. J. Bot.* 56 : 2286-2295.