

酸性雨에 의한 土壤酸性化에 대한 4個 樹種의 緩衝能力과 樹冠으로부터 養料 溶脫 變異^{1*}

韓心熙 · 李景俊²

Buffering Capacity of Four Tree Species against Soil Acidification by Acid Rain and Variations in Nutrient Leaching from Tree Crowns^{1*}

Sim Hee Han and Kyung Joon Lee²

要 約

본 연구는 산성우의 영향을 받는 산림에서 4개 수종별 수관통과류, 수간류, 토양을 채취하여 pH변화와 양료함량을 비교함으로써 산성우에 대한 수종별 중화능력과 완충능력을 측정하여 중화능력이 우수한 수종을 선발하는데 있다.

경기도 반월공단으로부터 15km 떨어진 산림환경연구소 반월시험림을 대상으로 약 30년생 리기다소나무, 물오리나무, 신갈나무, 툼립나무림에서 1996년 5월부터 9월까지 매 강우시 발생하는 강우, 수관통과류, 수간류를 채취하여 pH, Ca, K, Na, Mg의 농도를 측정하였고, 5월, 7월, 9월에 각각 채취된 잎의 내부 pH, 중화능력(ENC), 완충능력(BCI)을 측정하였다. 또한 공시목의 수간기저부로부터 10, 100, 200cm 떨어진 거리에서 토양 시료를 채취한 후 pH와 양료함량을 측정하였다.

본 시험 구역에서 시험기간 동안 강우의 평균 pH는 4.56이었으며, pH 5.6이하의 산성우의 비율이 74%를 차지하였으며, 토양 pH는 평균 4.15이었다. 수관통과류의 pH는 모든 수종에서 강우보다 높았으며, 수간류의 pH는 리기다소나무(pH 3.73)를 제외한 모든 수종에서 강우보다 높았고, 특히 툼립나무가 가장 높은 pH 5.38을 나타냈다. 수관통과류의 pH는 강우의 pH와 정반대의 상관이 매우 높았으나 수간류의 pH는 강우의 pH와는 상관이 없었다. 강우에 가장 많이 함유된 이온은 Ca이었으며, 수관통과류와 수간류의 이온 함량은 모두 $K > Na > Ca > Mg$ 의 순으로 나타났다. 수간류에서의 양료 함량은 툼립나무에서 가장 높았고 리기다소나무에서 가장 낮았다. 강우의 pH가 낮아지면 지상부에서 양료의 용탈이 높아지는 것으로 나타났다. 수간류의 pH는 잎의 중화능력과 완충능력이 높을수록 증가하여 매우 높은 상관을 보였다. 잎에서의 중화능력과 완충능력은 툼립나무에서 가장 높았고(ENC : 9.03, BCI : $655.3 \mu eq. H^+ / g$), 리기다소나무에서 가장 낮았다(ENC : -4.95, BCI : $57.8 \mu eq. H^+ / g$). 수종별 토양에서의 pH와 양료 농도는 수간류의 경우와 유사하였으며 툼립나무에서 가장 높았고 리기다소나무에서 가장 낮았다. 이러한 경향은 수간으로부터 100cm 거리까지 나타나 수간류가 토양의 특성에 영향을 미치고 있음을 보여주었다.

결론적으로 강우의 특성은 수관을 통과하거나 수간을 따라 흘러내리면서 수목의 중화작용과 완충작용에 의해 변화되는데 수종에 따라 다르게 나타난다. 특히 산성우에 대한 중화능력과 완충능력이 우수한 수종인 툼립나무의 수간류는 pH와 양료의 농도가 높아 토양의 산성화를 지연 또는 조절할 수 있으나, 리기다소나무와 같이 능력이 낮은 수종은 토양의 산성화를 가속화 시킬 것으로 생각된다.

¹ 接受 1997年 5月 22日 Received on May 22, 1997.

² 서울대학교 農生大 山林資源學科 Dept. of Forest Resources, Seoul Nat'l Univ. Suwon, Kyonggido 441-744, Korea.

* 본 연구는 1995년 농림부 농림수산기술관리센터를 통한 농특 현장으로 과제로 수행된 연구의 일부임.

ABSTRACT

The objective of this study was to compare acid-neutralizing and buffering capacity of four tree species against soil acidification by acid rain.

About 30-year-old forests composed of *Pinus rigida*, *Alnus hirsuta*, *Quercus mongolica*, and *Liriodendron tulipifera* in a provincial experimental forest located 15km east from Banwol Industrial Complex in Kyonggido were used in this study. Incident precipitation, throughfall and stemflow, and soil samples were collected from May to September, 1996 to analyze their pH and cation concentrations. Internal leaf pH, external acid neutralizing capacity(ENC), and buffering capacity index(BCI) of leaves were also determined.

The incident precipitation showed an average pH of 4.56, with the percentage of acid rain incidents being 74%. The average soil pH of the study area was 4.15. The pH of throughfall and stemflow in all four species was higher than that of precipitation except that of the stemflow of *Pinus rigida* which showed a pH of 3.73. The throughfall of *Liriodendron tulipifera* showed the highest pH of 5.38. The pH of throughfall and stemflow showed a positive correlation and no correlation, respectively, with precipitations.

The most abundant cation in precipitation was Ca. The cation concentrations in throughfall and stemflow decreased in the following order of K, Na, Ca, and Mg. Cation concentrations in stemflow were highest in *Liriodendron tulipifera* and lowest in *Pinus rigida*. Nutrient leaching from above ground increased with decreasing pH of precipitation. The pH of stemflow showed a positive correlation with ENC and BCI. The highest values in ENC, BCI, soil pH, and soil cation concentrations were observed in *Liriodendron tulipifera*, while the lowest values were obtained in *Pinus rigida*.

It was concluded that *Liriodendron tulipifera* had highest neutralizing capacity against acid rain, while *Pinus rigida* had the lowest capacity and even promoted acidification of soil.

Key words : throughfall, stemflow, acid buffering capacity index, external acid neutralizing capacity, *Pinus rigida*, *Liriodendron tulipifera*, *Alnus hirsuta*, *Quercus mongolica*

緒 論

최근 산성우는 그 빈도가 잦아지면서 국내에서도 우려할만한 수준에 도달해 있으며(조하만 등, 1992), 산림과 수목에 큰 영향을 미친다고 보고되고 있다(Smith, 1990). 수목의 잎이나 가지에서 일어나는 양료의 용탈은 강우시 발생하는 수관통과류(Throughfall)와 수간류(Stemflow)의 형태로 잎과 줄기를 타고 흘러내리면서 잎이나 줄기 조직내의 세포질 물질과 이온교환을 통해서 이루어지는데(Gaber와 Hutchinson, 1988), 양료 용탈의 정도는 대기의 습도와 온도, 잎의 형태적인 특성, 특히 강우의 pH 등에 따라서 달라지게 된다(Luxmoore 등, 1981). 용탈된 양료는 토양으로 유입되며 개체목의 수관폭 범위에 한정되어 영향을 미치게 되어 수종에 따라 하부 토양의 특성을 변화시키게 된다. 특히 수간류는 수간을 타

고 흘러 내려와서 수간으로부터의 거리에 따른 토양의 화학적 성질과 식생 분포에도 영향을 준다(Falkengren-Grerup, 1989; Andersson, 1991).

수관통과류와 수간류의 화학적 조성에 영향을 미치는 인자는 강우량, 고도, 오염원의 거리, 수령, 토양의 비옥도 등이 있다(Parker, 1983). 또한 동일 환경 조건하에서 산성우의 영향을 받는 수목의 용탈 특성은 잎 표면에서 산성우의 영향을 감소시킬 수 있는 중화능력과 잎 조직 내의 완충능력에 따라 좌우되며 생장시기에 따라 계절변이를 보여 주는데 이 차이는 수종에 따라 다르게 나타난다(Pylypec과 Redmann, 1984). 따라서 수관통과류와 수간류가 토양의 화학적 조성에 미치는 영향도 수종에 따라 다르다.

산성우의 현안 중에 가장 큰 문제점으로 인식되고 있는 토양의 산성화는 수목에서의 양료 용탈 특성과 깊은 관련이 있으며, 이러한 수종간의 특성을 이용하면 토양의 개량을 유도할 수 있는

방법이 모색될 수 있을 것이다. 특히 국내에서와 같이 단순림 조성과 침엽수 일색의 조림은 향후 산성우의 심각성을 가중시킬 수 있다.

본 연구의 목적은 산성우가 산림 토양의 산성화에 기여하는 정도를 수종별로 구분하여 수목이 토양 산성화를 지연 또는 조절할 수 있는지를 검증하는 것이다. 또한 산성우가 임관을 통과하면서 화학적 특성에 어떤 변화를 가져오며, 수종에 따라 산성 강우에 대한 잎 표면의 중화능력과 잎 내부의 완충능력을 비교함으로써 하부 토양의 개량 가능성을 찾고자 하는 것이다.

材料 및 方法

研究流域의 概況과 共試樹種

연구 대상 유역은 경기도 산림환경연구소의 반



Fig. 1. Location of Banwol study area.

월시험지로써, 수리산의 주변부에 해당되며, 연구 유역의 북쪽은 안양시, 남쪽은 군포시, 서쪽은 안산시와 접하고 있으며 반월 공단으로부터 동쪽으로 15km 떨어져 있다. 이 지역은 개발제한 구역으로 산림과 농경지의 훼손이 적고, 자연부락이 산재되어 있는 전형적인 농촌 유역으로 95% 이상이 산림지로 구성되어 있다. 이 유역에서 출현되는 수종 중 교목의 총 출현 종수는 6~11종이었으며, 주요 수종은 소나무(*Pinus densiflora* S. et Z.), 리기다소나무(*Pinus rigida* Miller), 물오리나무(*Alnus hirsuta*(Spach) Ruprecht), 신갈나무(*Quercus mongolica* Ficher)로 과거 30년 전 조림 후 방치된 것으로 판단된다.

공시 수종은 리기다소나무, 신갈나무, 물오리나무, 툄릅나무 등 4개 수종으로 각각의 흉고직경, 수고 및 수관폭은 표 1과 같다. 각 수종은 직경 15cm미만과 15cm이상으로 구분하여 5개체씩 총 35개체를 선정하였다.

降雨, 樹冠通過流, 樹幹流의 測定

강우는 1996년 5월부터 1996년 9월까지 연구 대상 유역내에 있는 농가에 산성우분취기(일본 HORIBA사, AR-8)를 설치하여 매 강우시마다 초기 강우를 1mm 간격으로 9회 강우가 경과되는 시간별로 채취하였다. 강우 시료는 강우 후 즉시 채취한 후 실험실로 운반하여 즉시 pH, Ca, K, Na 및 Mg 농도를 pH 미터(HANNA H8519), 원자흡광법(PYE UNICAM SP9)을 이용하여 각각 측정하였다.

수관통과류는 연구 대상 유역내의 각 수종의 수관 하부에 직경 8cm, 높이 20cm의 폴리에틸렌 병을 지상부70cm 높이에 설치하고 상부에는 수구 직경 10cm의 원형 깔대기를 장착한 후 탈지면으로 이물질의 유입을 막아 강우시 수관통과류를 채취하였다. 시료 채취 후 수기는 증류수로 세척

Table 1. Diameter, Height, and Crown width of four tree species in Banweol study site.

Species	Diameter Class	DBH (cm)	Height (m)	Crown width (cm)	Slope (°)	Aspect
<i>Pinus rigida</i> Miller	< 15cm	11.7	8.3	160	20	SE
	≥ 15cm	19.5	10.4	190	14	SE
<i>Alnus hirsuta</i> (Spach) R.	< 15cm	12.6	9.0	128	20	SE
	≥ 15cm	23.5	10.8	248	14	SE
<i>Quercus mongolica</i> Ficher	< 15cm	11.1	8.6	198	8	S
	≥ 15cm	24.4	9.3	530	16	SE
<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	≥ 15cm	34.5	14.4	394	5	SW

하여 오염을 방지하였다. 채취된 시료는 강우와 동일한 방법으로 pH, Ca, K, Na 및 Mg를 측정하였다.

수간류는 일본삼림총합연구소 동북지소에서 실시한 거즈를 이용한 면제망체법을 이용하였다(佐々朋幸 등, 1991). 시료 채취 후 수기는 증류수로 세척하고, 거즈를 교환하여 오염을 방지하였다. 채취된 시료는 강우와 동일한 방법으로 pH, Ca, K, Na 및 Mg의 농도를 측정하였다.

잎의 内部 pH, 中和能力 및 緩衝能力의 測定

1996년 5월, 7월, 9월에 3회에 걸쳐 각 공시목의 수관 위치에서 채취된 잎을 10cm²로 잘라 5개의 절편을 만들었다. 인공산성우는 증류수에 황산 용액을 첨가하여 pH 4.0으로 조절하여 조제하였다. 이 용액 50ml에 절편을 2시간 동안 잠기게 한 후 변화된 pH로 잎 표면의 중화능력(external acid neutralizing capacity : ENC)을 산정하였다(Craker와 Bernstein, 1984).

잎의 내부 pH와 완충능력(BCI) 측정을 위하여 5월, 7월, 9월에 채취된 약 1g의 생엽에 증류수 30ml를 첨가하여 20,000g에서 6분간 원심분리를

하였다. 원심분리가 끝난 시료는 즉시 pH를 측정하여 잎의 내부 pH값(IpH)으로 사용하고, 적정에 필요한 일정량의 시료를 뽑아낸 후, 0.01N 염산을 이용하여 pH가 1단위 감소할 때까지 적정하여 완충능력지수를 계산하였다(Pylypec과 Redmann, 1984). 이 때 필요한 잎의 건조량은 생엽 1g을 80℃의 건조기에서 24시간 건조시킨 후 측정하였다.

土壤 試料의 物理的, 化學的 特性 測定

토양 시료는 각 공시수종의 수간의 기부로 부터 10, 100, 200cm 거리에서 유기물층을 제거한 후, 토양을 0~15cm, 15~30cm로 구분하여 채취하였다. 채취된 시료는 즉시 수분율과 유기물함량을 측정하고, 토양을 풍건시킨 후 pH(H₂O), 양이온치환능력, 치환성양이온(Ca, K, Na 및 Mg)을 측정하였다(Carter, 1993). 그 결과는 표 2와 같았다.

結果 및 考察

降雨의 pH와 陽이온의 季節的 變化

연구 대상 구역에서 강우 시료는 1996년 5월부터

Table 2. Average moisture content(MC), organic matter(OM), pH, cation exchange capacity(CEC) and cation concentrations in soil under trees of four species in the Banwol study site.

Species	MC(%)	OM(%)	pH(H ₂ O)	CEC (meq./100g)	Ca (meq./100g)	K (meq./100g)	Na (meq./100g)	Mg (meq./100g)
<i>Pinus rigida</i> M.	20.0b	3.91b	4.02c	12.2b	0.23c	0.12c	0.11a	0.18b
<i>Alnus hirsuta</i> (Spach) R.	22.9a	4.46a	4.04c	16.0a	0.29c	0.24b	0.12a	0.24b
<i>Quercus mongolica</i> F.	20.6b	3.49c	4.23b	12.6b	0.45b	0.25b	0.12a	0.27b
<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	20.6b	4.10ab	4.30a	12.2b	0.69a	0.42a	0.13a	0.51a

Note : Means with different letters are significantly different at 5% level

Table 3. The proportion(%) of acid rain precipitation(less than pH 5.6) measured during the period of May to September, 1996 on the Banwol study site.

pH range	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Overall Average
below 3.5	—	2.6	3.4	11.1	28.6	6.8
3.5 ~ 4.0	—	10.3	13.8	50.0	57.1	21.2
4.0 ~ 4.5	5.6	15.4	24.1	27.8	7.1	16.9
4.5 ~ 5.0	—	15.4	17.2	—	7.1	10.2
5.0 ~ 5.5	16.7	15.4	27.6	5.6	—	15.3
5.5 ~ 6.0	66.7	15.4	10.3	—	—	17.8
6.0 ~ 6.5	5.6	15.4	—	5.6	—	6.8
above 6.5	5.6	10.3	3.4	—	—	5.1
Sum	100	100	100	100	100	100
Number of rain incidents	3	4	3	3	3	16(total)

터 9월까지 총 16회에 걸쳐 채취하였으며, 표 3에 그 결과를 나타내었다. 강우의 평균 pH는 4.56이었고, 최대치는 6.73, 최소치는 2.93이었으며, pH 5.6이하의 산성우가 차지하는 비율은 73.7%로 나타났다. 이 결과는 장남기 등(1990)이 서울시를 대상으로 1985년 7월부터 1986년 6월까지 조사한 강우의 평균 pH인 5.1보다 낮은 수준이며, pH 5.6이하가 차지하는 비율인 70.7%보다도 높은 수준을 보여 주고 있다.

즉 연구 대상 유역이 도심에서 상당한 거리에 위치했음에도 불구하고 서울 도심에서와 유사한 결과를 보여준 것은 본 유역의 주변 도로에 교통량이 증가하고, 연구 유역을 둘러싸고 있는 도시들과 또는 중국에서의 오염물질 등이 복합적으로 유입된 것으로 판단되며(조하만 등, 1992), 특히 15km 서쪽에 위치한 반월 공단지역으로 부터의 영향이 있다고 추측된다.

강우의 계절별 pH는 표 4에 나타난 바와 같이 5월부터 7월초까지는 4.60에서 6.21의 비교적 높은 경향을 보이나 7월 중순이후 부터는 4.6이하의 매우 낮은 수준을 보여주며 9월 이후 다시 약간의 상승을 보여주고 있다. 특히 6월에 강우의 횟수가 증가됨에 따라 강우의 pH에 영향을 주는 오염물질이 희석되어 pH가 높게 나타난 것으로

판단된다. 이러한 특성은 강우 중에 함유되어 있는 이온의 농도와 유사한 경향을 보이는데, 5월부터 6월까지의 이온 농도는 높고, 7월, 8월에는 낮으며, 9월에 다시 높은 수준을 보여준다. 강우 내에 함유되어 있는 Ca, K, Na, Mg의 평균 농도는 Ca>Na>K>Mg의 순으로 나타났다. 일반적으로 Na를 제외한 다른 이온들의 농도는 Ca>K>Mg의 순으로 나타나서 외국의 사례와 흡사하였다(Liechty 등, 1993).

樹冠通過流의 養料 濃度の 樹種間 變異

수관통과류에 함유된 양료의 농도는 그림 1에 표시하였는데 K>Na>Ca>Mg의 순으로 나타났으며, 각 양료의 평균 농도는 Ca, K, Na, Mg 이 각각 160.8, 258.8, 247.1, 46.8 $\mu\text{equiv./L}$ 로 K의 농도가 가장 높게 나타났다. 이것은 대부분의 칼륨이온이 수관에서 용탈되고 있음을 보여 준다. 수종별 양료 농도는 Ca의 경우, 툼립나무가 가장 낮은 수준을 보여주고 있으며, 다른 3개 수종은 큰 차이가 없다. K, Mg의 경우, 물오리나무가 가장 높고, 툼립나무가 가장 낮으며, 리기다소나무와 신갈나무는 중간 정도로 수종간 차이를 보이고 있다. Na의 경우, 신갈나무가 가장 높으며, 다른 수종간에는 큰 차이를 보이지 않았다.

Table 4. Average pH and concentration of cations in the precipitation from May to September on the Banwol study site. (Unit : $\mu\text{eq./L}$)

Date	Precipitation(mm)*	pH(range)	Ca	K	Na	Mg
May 4	9.0	5.77(5.38 - 6.73)	-	-	-	-
May 8	7.2	5.50(4.07 - 6.09)	195.4	196.5	243.9	26.4
May 20	1.4	5.46(5.28 - 5.58)	-	-	-	-
Jun. 10	42.1	4.60(4.13 - 5.86)	18.3	29.3	6.3	3.7
Jun. 17	153.6	5.05(3.55 - 6.03)	65.8	36.8	22.6	14.6
Jun. 24	24.9	6.21(5.67 - 6.64)	44.9	45.2	41.5	10.0
Jun. 29	27.1	4.85(3.30 - 6.39)	21.1	33.2	51.4	4.2
Jul. 4	56.6	5.23(4.43 - 5.99)	25.4	27.1	26.1	7.7
Jul. 15	44.2	4.55(3.91 - 6.60)	28.3	22.8	26.3	8.0
Jul. 22	42.7	4.44(3.47 - 5.60)	18.2	16.8	20.7	6.8
Aug. 22	1.5	4.51(3.25 - 6.23)	78.2	55.2	109.8	21.2
Aug. 27	32.4	3.89(3.70 - 4.07)	17.8	21.8	30.0	7.3
Aug. 30	4.5	3.39(3.43 - 4.03)	24.3	27.0	37.0	3.8
Sep. 6	1.0	3.35(2.93 - 3.73)	200.8	50.1	69.4	35.0
Sep. 9	4.1	4.29(3.73 - 4.68)	103.9	18.4	29.3	13.4
Sep. 19	3.0	3.61(3.43 - 3.79)	112.6	26.0	22.3	9.1
Average	28.5	4.56(2.93 - 6.73)	68.2	43.3	52.6	12.2

* : Precipitation data were obtained from Suwon Weather Station located 13km west from the study site.

특히 툼림나무에서 모든 양료의 농도가 낮았다.

樹幹流의 養料 濃度の 樹種間 變異

수간류의 양료 농도는 그림 2에 표시하였는데 $K > Ca > Na > Mg$ 의 순으로 이동성이 강한 K가 가장 높은 농도를 차지하고 있었으며, Parker (1983)의 연구 결과와 일치하였다. Ca과 K의 농도는 툼림나무에서 가장 높은 수치를 보였으며, 신갈나무, 물오리나무, 리기다소나무 순으로 감소하였다. Na과 Mg의 경우에서도 비슷한 경향을 나타내서 모든 양료의 농도는 툼림나무에서 가장 높게 나타나고, 리기다소나무에서 가장 낮게 나타났다. 툼림나무의 경우, 수간류의 pH가 강우보다 상승하고 양료 농도가 매우 높았으므로 산성우에 대한 완충능력이 크다고 판단되며, 리기다소나무의 수간류 pH는 강우보다 낮아졌으며, 양료 농도도 다른 수종에 비해 낮았다. 따라서 리기다소나무는 토양의 산성화에 기여하는 수종으로 볼 수 있으며, 완충능력이 부족하기 때문에 리기다소나무에서 발생하는 수간류에 노출된 토양은 산성화가 지속될 것으로 판단된다.

降雨, 樹冠通過流, 樹幹流의 pH 特性 比較

그림 3에서 보여 주듯이 5개월 간 강우의 평균 pH는 4.56으로 낮는데 비하여 수관통과류의 평균 pH는 이보다 높았으며 리기다소나무, 신갈나무, 툼림나무, 물오리나무 순으로 증가하였다. 활엽수 수종간에는 큰 차이를 보이지 않았으나, 침엽수인 리기다소나무와는 차이를 보이고 있다. 일반적으로 침엽수에서 발생된 수관통과류는 동

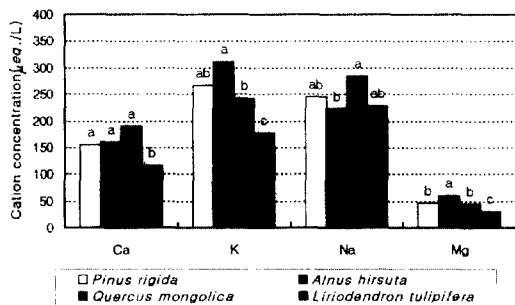


Fig. 2. Average cation concentrations in throughfall from trees of four species in the Banwol study site. Means with different letters are significantly different at 5% level.

일지역의 활엽수보다 더 산성을 나타내는 것으로 보고되었다(Parker, 1982).

수간류의 평균 pH는 그림 3와 같이 수종에 따라 큰 차이를 보여 주었다. 평균 pH는 툼림나무가 5.38로써 가장 높았고, 리기다소나무가 3.73으로써 가장 낮았다. 이러한 결과는 佐々朋幸과 長谷川浩一(1992)이 활엽수인 툼림나무의 수간류 pH는 높고, 침엽수인 삼나무의 수간류 pH는 낮았다는 보고와 일치한다. 수간류의 pH는 네 수종 모두에서 수관통과류의 pH보다 낮았으며, 오종환 등(1987)이 갈참나무와 소나무에서 관찰한 결과와도 유사하였다.

리기다소나무의 수간류 pH는 강우보다도 더 낮았다. 그러나 물오리나무, 신갈나무, 툼림나무의 수간류 pH는 강우보다 높았다. 특히 툼림나무의 수간류는 수관통과류의 pH와 거의 유사하였다. 장관순과 이수옥(1995)이 식생층을 통과한 강우의 pH를 측정된 결과에 의하면, 굴참나무림보다 리기다소나무림에서 낮았으며, 두 수종 모두 강우보다 수관통과류에서는 높은 반면에 수간류에서는 낮아 본 연구 결과와 일치하였다. 또한 佐々朋幸 長谷川浩一(1992)이 툼림나무의 수간류 pH가 다른 수종에 비해 높았다는 결과와도 일치하였다. 즉, 툼림나무는 완충능력이 다른 수종보다 매우 뛰어나서 pH를 상승시키는데 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

잎 内部 pH, 表面의 中和能力(ENC)과 緩衝能力(BCI)

그림 4에 잎의 내부 pH(IpH)와 산성우에 대한 잎 표면의 중화능력과 완충능력을 나타내었는데,

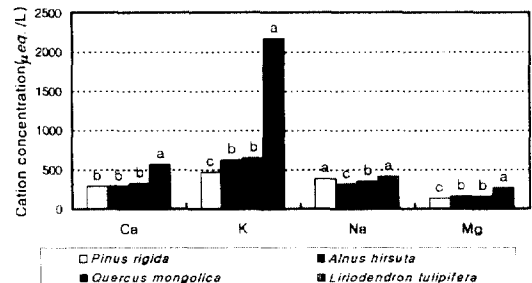


Fig. 3. Average cation concentrations in stemflow from trees of four species in Banwol study site. Means with different letters are significantly different at 5% level.

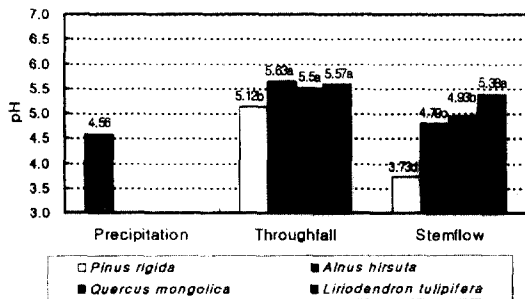


Fig. 4. The average pH of precipitation, throughfall and stemflow of four tree species measured during the period May to September on the Banwol study site.

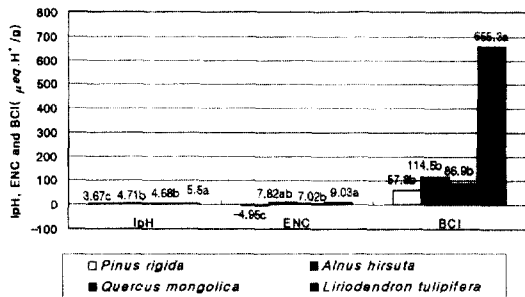
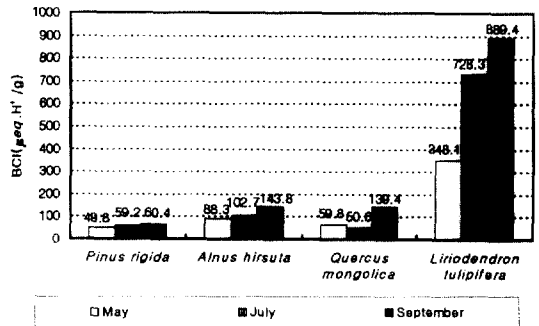


Fig. 5. Internal leaf pH (IpH), average BCI (buffering capacity index of leaves) and ENC (external acid neutralizing capacity of leaves) of four tree species measured in May, July and September on the Banwol study site. Means with different letters are significantly different at 5% level.

수종에 따라 큰 차이를 보였다. 잎의 내부 pH는 완충능력과 높은 상관관을 가진다. 즉 잎의 내부 pH가 낮으면 산의 유입에 의한 pH의 변화가 거의 없어 완충능력이 적는데(Pylypec과 Redmann, 1984), 리기다 소나무에서 낮으며, 틀립나무에서 높았다. 잎의 표면에서 발생하는 중화능력은 틀립나무에서 가장 높았고, 리기다소나무는 거의 중화능력이 없었으며 오히려 수소이온의 양이 증가하였다. Liu와 Cote(1993)는 중화능력과 완충능력이 *Populus grandidentata*에서 가장 컸으며, *Acer saccharum*과 *Abies balsamea*에서 가장 낮았다고 보고하였다.

잎에서의 완충능력은 리기다소나무가 가장 낮았으며, 틀립나무가 가장 높았다. Pylypec과 Redmann(1984)의 연구 결과에 따르면 침엽수인 *Pinus banksiana*의 잎은 활엽수인 *Populus tre-*

(A) BCI



(B) ENC

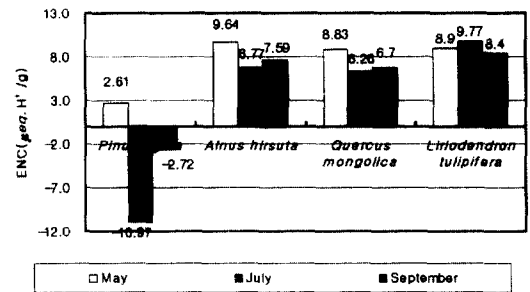


Fig. 6. Seasonal variation in BCI and ENC of leaves of four tree species. BCI: buffering capacity index of leaves, ENC: external acid neutralizing capacity of leaves.

*muloides*의 잎보다 산성 오염물질에 대해 완충능력이 적은 것으로 나타나 본 연구 결과와 일치하였다.

본 연구 결과를 종합해 보면 리기다소나무는 완충능력과 중화능력이 매우 낮아 산성우를 중화할 수 있는 능력이 없을 뿐만 아니라 오히려 pH를 감소시킨다. 그러나 틀립나무는 완충능력과 중화능력이 매우 높아 수간류의 pH를 증가시킬 수 있다. 리기다소나무의 수관통과류와 수간류는 매우 낮은 pH를 갖는 반면에 틀립나무의 수관통과류와 수간류의 pH는 강우보다도 높은 값을 나타내는 것은 수중간 중화능력과 완충능력의 차이를 설명해 준다.

그림 5에서와 같이 잎에서의 중화능력과 완충능력은 계절에 따라 변이를 보인다. 생장이 왕성한 7월에 중화능력은 가장 낮았으나, 완충능력은 생장이 진행됨에 따라 증가하였다. 중화능력은 잎 표면에 축적되는 침적물의 양과 침적물에 함

유된 이온의 농도에 따라 좌우되므로 강우량이 많고 강우 횟수가 증가하는 7월에 가장 낮다. 그러나 완충능력이 우수한 수종이라 할지라도 산성우에 장기간 지속적으로 노출되면 엽내의 이온이 고갈되어 완충능력이 떨어지므로 이에 손상을 입게 된다(Tukey, 1970).

樹幹으로부터의 距離에 따른 土壤의 特性 變化

표 5에서 보는 바와 같이 수간으로부터의 거리에 따른 토양의 특성은 다양한 분포를 나타냈다. 수간으로부터 가까운 토양에서 pH가 낮았으며, 수간으로부터 멀어질수록 토양의 pH는 올라가는 경향을 나타냈다. 이러한 경향은 공시수종 선정지 주변의 타 수종과의 수관폭이 중복되지 않도록 설정하였으므로 pH가 낮은 수간류의 영향을 받고 있다는 것을 의미한다. Beniamino 등(1991)은 *Quercus robur* L.에서 수간 주위에서 더 산성화되어 있었음을 보고하였다.

토양의 양료 분포는 수간으로부터의 거리에 따른 차이가 크지는 않았다. 전체적으로 Ca과 Mg의 농도는 수간 근처에서 낮았으나, K과 Na의 농도는 수간 근처에서 높았다. 그러나 수종간에 차이가 있었다. Ca의 농도는 리기다소나무와 물오리나무의 수간 근처에서 높았고, 신갈나무와 툼림나무의 수간 근처에서 낮았다. 물오리나무와 툼림나무의 K 농도는 수간 근처에서 높았으나,

리기다소나무와 신갈나무는 수간 근처에서 낮았다. Na의 경우는 리기다소나무, 신갈나무, 툼림나무의 수간 근처에서 높은 농도를 보였으나, 물오리나무는 수간 근처에서 낮았다. Mg은 모든 수종의 수간 근처에서 낮았다. Koch와 Matzner (1993)의 *Picea abies*와 *Fagus sylvatica*에 대한 연구에서는 수간 가까이에서 K의 농도가 높았으며, 수종간의 변이는 수간류와 유기물 낙엽에 원인이 있다고 하였다. 한편 Falkengren-Grerup (1989)는 *Fagus sylvatica*의 수간 가까이에서 토양의 치환성 Ca 및 Mg의 CEC에 대한 각각의 포화도는 낮았으며, K의 포화도는 높았다고 보고하였다. 본 연구에서는 툼림나무에서 토양의 pH는 수간으로부터의 거리에 따라 뚜렷하게 차이를 보이고 있으며, K의 경우는 수간에서 가까울수록 높은 함량을 보였다.

佐々朋幸 등(1993)은 토양의 화학적 특성이 수간을 중심으로 동심원상으로 변화되며, 토양 변화의 과정은 수간류의 pH와 조성 차이로 다르게 나타났다고 주장하였다. 특히 *Kalopanax pictus*와 *Juglans mandschurica*의 토양은 pH가 증가하는 반면, *Crytomeria japonica*의 토양 pH는 감소한다고 하였다. 이와 같이 각 수종에 따라 발생하는 수간류의 특성이 다르기 때문에 토양에서의 특성도 다르게 나타난 것으로 보여진다.

Table 5. Comparison of moisture content(MC), organic matter(OM), CEC and cation concentrations in soil at different distances from stem base of four tree species in the Banwol study site

Species	Distance from base(cm)	MC (%)	OM (%)	pH (H ₂ O)	CEC	Ca	K me/100g	Na	Mg
<i>Pinus rigida</i> M.	10	18.8b	3.60b	3.92c	12.7a	0.27a	0.10b	0.15a	0.20a
	100	20.5a	4.07a	4.05b	14.3a	0.19a	0.13ab	0.09b	0.14a
	200	20.7a	3.93a	4.34a	9.6b	0.29a	0.16a	0.10b	0.22a
<i>Alnus hirsuta</i> (Spach) R.	10	23.6a	5.47a	3.95b	16.7a	0.33a	0.28a	0.13b	0.24a
	100	22.5a	3.64b	4.03b	18.0a	0.26a	0.19a	0.11b	0.25a
	200	21.2a	3.94b	4.46a	12.1b	0.25a	0.29a	0.19a	0.25a
<i>Quercus mongolica</i> F.	10	20.6a	3.29a	4.19b	12.7a	0.34a	0.23a	0.14a	0.23b
	100	20.7a	3.59a	4.24b	13.3a	0.43a	0.25a	0.11ab	0.23b
	200	21.1a	3.68a	4.41a	13.4a	0.60a	0.25a	0.10b	0.40a
<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	10	20.6a	4.08a	4.29c	14.3a	0.50a	0.75a	0.16a	0.34a
	100	20.6a	4.11a	4.33b	13.1a	0.95a	0.27b	0.11b	0.82a
	200	21.2a	4.06a	4.58a	14.0a	0.75a	0.24b	0.11b	0.45a
Average	10	20.9a	4.13a	4.08c	14.4a	0.36a	0.33a	0.14a	0.25a
	100	21.1a	3.92a	4.16b	14.6a	0.43a	0.21b	0.10b	0.36a
	200	21.1a	3.90a	4.45a	12.3b	0.47a	0.23b	0.12ab	0.33a

Note : Means with different letters are significantly different at 5% level.

樹幹流의 特性和 土壤의 特性和의 關係

수중에 따른 토양에서의 pH와 양료 분포는 수간류의 양료 분포와 유사한 결과를 보여주고 있다. 즉 수간류에서 양료의 농도는 틀립나무, 신갈나무, 물오리나무, 리기다소나무의 순으로 나타났는데, 토양에서의 양료 농도도 유사한 순서로 동일한 결과가 나타났다. 佐々朋幸과 長谷川浩一(1992)의 연구 결과에서도 수간류의 양료 농도가 높은 수중은 토양 중의 양료 농도도 높았다. 이러한 경향은 수간류가 토양의 양료 분포에 뚜렷하게 영향을 미치고 있음을 나타내고 있으며, 수간으로부터 10cm, 100cm의 거리까지 유사한 경향을 보인다. 그러나 200cm의 거리에서는 결과가 다르게 나타났다. 이것은 본 조사지의 경우 수간류가 100cm까지의 거리에 영향을 미치고 있는 것으로 생각된다.

그러나 본 연구에 이용된 공시 수중 하부의 토양은 매우 산성화되어 있었으며, 수간류의 pH가 비교적 높은 틀립나무에서조차 토양의 pH는 낮게 나타났다. 이것은 토양이 이미 산성화되어 수간류의 효과가 적음을 나타내지만, 토양에서의 양료 분포는 수간류의 영향을 뚜렷하게 보여주고 있어 장기적으로 토양의 특성이 변화될 가능성이 있다고 판단된다.

結 論

본 연구 대상 유역은 산성우의 영향을 받는 지역으로 강우의 평균 pH는 4.56으로 매우 낮고, 5.6이하의 산성우가 차지하는 비율이 74%를 차지하였으며, 토양 pH는 평균 4.15로 매우 낮게 나타나므로써 수목에서의 피해와 토양 산성화의 가능성을 보여 주고 있다.

중화능력과 완충능력은 수중에 따라 큰 차이를 보여주는 데, 본 연구에 이용된 공시 수중 중 리기다소나무는 중화능력과 완충능력이 거의 없었으며, 틀립나무는 중화능력이 매우 컸다. 따라서 중화능력과 완충능력이 큰 수종인 틀립나무는 산성우 발생시에 산성우를 중화시켜 잎과 토양에서 발생될 수 있는 피해를 감소시킬 수 있을 것을 생각된다. 강우시 발생하는 수관통과류와 수간류의 특성은 수관 하부의 토양의 특성에 영향을 미치게 되는데 이러한 영향은 토양을 산성화시킬 수도 있으며, 산성화를 지연 또는 조절할 수도

있을 것이다. 특히 공시수중 중 틀립나무는 중화능력과 완충능력이 가장 컸으며, 수간류의 pH는 거의 수관통과류(pH: 5.57)와 유사한 5.38에 달했으며, 수관 하부의 토양에서도 다른 수중에 비해 높은 pH인 4.30을 나타냈다.

수간류와 토양의 pH와 양료의 농도는 리기다소나무, 물오리나무, 신갈나무, 틀립나무의 순으로 증가하여 같은 경향을 나타냄으로써 수간류가 토양에 직접 영향을 미치고 있음을 시사하였다.

본 연구 결과에서는 수간류의 pH가 높은 틀립나무가 토양의 산성화를 조절하거나 지연시킬 수 있는 수종이며, 리기다소나무는 토양의 산성화를 가속화시킬 수 있는 수종으로 생각되었다. 특히 잎에서 발생하는 중화능력과 완충능력을 이용하여 토양의 개량이 가능한 수종을 쉽게 선발할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구 대상 유역의 토양이 이미 산성화되어 있어 수간류를 이용한 토양 개량에는 상당한 기간이 소요될 것으로 판단되며 장기적인 연구가 필요하다.

대도시 주변과 공단 주변의 산성우 등 공해에 대한 산림의 피해를 조절하고 산림의 생산성을 유지하기 위한 장기적인 대책이 필요하며, 본 연구에서와 같이 산림의 토양 산성화를 지연 또는 조절할 수 있는 수종을 선발하여 식재하므로써 향후의 발생되는 문제점에 대처해야 한다. 그러나 수종의 특성에 따라 산성우의 영향에 반응하는 양상이 달라지고, 지형적인 특성, 기후 등 여러 가지의 인자들에 영향을 받기 때문에 수종의 선발과 이용에 세밀한 검토가 필요하며, 이와 관련된 지속적인 연구가 요구된다.

引用 文 獻

- 오종환·김영걸·채지석·이창근. 1987. 산성강우의 침, 활엽수림 통과에 의한 산도 및 그 성분변화에 관한 연구. 임연 연보. 34: 159-165.
- 장관순·이수옥. 1995. 산성우에 대한 산림 생태계의 민감도 및 자정기능(II) - 식생층과 토양층 용탈이온 분석을 중심으로 -. 한국임학회지. 84(1): 103-113.
- 장남기·이윤상·신은영. 1990. 서울 지역의 대기오염이 강수와 생물에 미치는 영향. 1. 지역별 강수의 산성화에 관하여. 한국생태학

- 회지. 13(2) : 131-142.
4. 조하만·정순화·남재철·최병철·최영진·전영신·이민영·이선기·최재선, 1992. 산성우에 관한 연구(I) - 기상상태에 따른 산성우 분포. 기상연구소. MR 92-4.
 5. 佐々朋幸·高橋忠幸·長谷川浩一. 1993. 特定樹種の 樹幹流による 土壤の酸性化抑制作用(II) センノキ, オニグルミについて-. 日林誌. 75 : 321-330.
 6. 佐々朋幸·長谷川浩一. 1992. 特定樹種の 樹幹流による 土壤の酸性化抑制作用 - ユリノキの張合 - 日林誌. 74 : 437-440.
 7. 佐々朋幸·後藤和秋·長谷川浩一·池田重人. 1991. 盛岡市周邊の 代表的 森林における 林外雨, 林内雨, 樹幹流の 酸性度ならびに その 溶存成分 - 樹種による 樹幹流の pH 固有値 -. 森林立地. 32(2) : 43-58.
 8. Andersson, T. 1991. Influence of stemflow and throughfall from common oak(*Quercus robur*) on soil chemistry and vegetation patterns. Can. J. For. Res. 21 : 917-924.
 9. Beniamino, F., J.F. Ponge and P. Arpin. 1991. Soil acidification under the crown of oak trees. I. Spatial distribution. For. Ecol. Manage., 40 : 221-232.
 10. Carter, M.R. 1993. Soil sampling and methods of analysis. Can. Soc. Soil Sci. pp.141-176.
 11. Craker, L.E. and D. Bernstein. 1984. Buffering of acid rain by leaf tissue of selected crop plants. Environmental Pollution(Series A). 36 : 375-381.
 12. Falkengren-Grerup, U. 1989. Effect of stemflow on beech forest soils and vegetation in southern Sweden. J. Appl. Ecol. 26 : 341-352.
 13. Gaber, B.A. and T.C. Hutchinson. 1988. Chemical changes in simulated rain drops following contact with leaves of four boreal forest species. Can. J. Bot. 66 : 2445-2451.
 14. Koch, A.S. and E. Matzner. 1993. Heterogeneity of soil and soil solution chemistry under Norway spruce(*Picea abies* Krast.) and European beech(*Fagus sylvatica* L.) as influenced by distance from the stem basis. Plant and Soil. 151 : 227-237.
 15. Liechty, H.O., G.D. Mroz., and D.D. Reed. 1993. Cation and anion fluxes in northern hardwood throughfall along an acidic deposition gradient. Can. J. For. Res. 23 : 457-467.
 16. Liu, G.E. and B. Cote. 1993. Neutralization and buffering capacity of leaves of sugar maple, largetooth aspen, paper birch and balsam fir. Tree Physiol. 12(1) : 15-21.
 17. Luxmoore, R.J., T. Gizzard and R.H. Strand. 1981. Nutrient translocation in the outer canopy and understory of an eastern deciduous forest. For. Sci. 27 : 505-518.
 18. Parker, G.G. 1982. Quality, variability and sources of summertime throughfall in two Virginia Piedmont forests. Thesis. University of Virginia, Charlottesville, Virginia.
 19. Parker, G.G. 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. Adv. Ecol. Res. 13 : 57-133.
 20. Pylypec, B. and R.E. Redmann. 1984. Acid-buffering capacity of foliage from boreal forest species. Can. J. Bot. 62 : 2650-2653.
 21. Smith, W.H. 1990. Air Pollution and Forests : Interaction between Air Contaminants and Forest Ecosystems(second ed.). Springer-Verlag. New York p618.
 22. Tukey, H.B. Jr. 1970. The leaching of substances from plants. Annu. Rev. Plant Physiol. 21 : 305-324.