

人工酸性雨が 處理된 盆植한 은행나무幼苗의 生長과 生理的 特性과의 相關

The Relations between Growth and Physiological Characteristics of Potted
Ginkgo Biloba L. Seedlings Treated with Simulated Acid Rain

金 甲 泰*
Gab- Tae Kim

ABSTRACT

One-year-old seedlings of *Ginkgo biloba*, potted in three different soils (nursery soil, mixed and sandy soil), were treated with simulated acid rain (pH 2.0, 3.0, 4.0 and 5.0) and tap water (control, pH 6.4) during the growing seasons (1985. 4.28 - 1985. 10.19) to examine the effects of acid rain on growth and physiological characteristics, and the relations between seedling growth and physiological characteristics. The results obtained in this study were as follows:

1. The effects of soil types on the total, top and root dry weight per seedling were significant at 5% level, and those of the pH of the rain treated at 1% level. The total dry weight of the pH 3.0 sub-plot was the highest for nursery soil, while for mixed and sandy soils, those of the control and the pH 5.0 sub-plots were the highest, respectively.
2. The leaf surface areas of pH 2.0 sub-plots severely decreased after July, but those of other sub-plots were not affected. The correlations between growth and leaf surface area differed among soil-types, however, the highest positive correlation was found in September.
3. The injured leaf rate increased with decreasing pH levels of acid rain. Highly negative correlations between growth and injured leaf rate were found.
4. The lower the pH level of acid rain treated was, the more the chlorophyll content was measured at the beginning of treatment, and the more severely it decreased at late growing season. A negative correlation between growth and chlorophyll content was found in May, but highly positive correlations were found in August, September and October.
5. The photosynthetic ability decreased rapidly after July with decreasing pH levels. A highly positive correlation between growth and photosynthetic ability was found in August.

1. 緒 論

Lee 와 Weber³²⁾ 는 11 개 수종의 종자에 산성우를 처리하여 처리산성우의 pH가 낮을수록

종자발아율, 지상부 및 지하부 생장이 좋아졌음을 金 등¹⁾, Lee 등³¹⁾, 李와 金²⁾, 등은 산성우에 의한 종자발아율 및 생장이 식물종에 따

라 상이함을 보고하였다. Cates 등⁹⁾, Cole 과 Johnson¹⁰⁾, Jones 등²⁶⁾ 은 산성우가 양료로 작용하여 식물생장이 증가했음을 밝혔으며, 산성우는 엽면시비효과를 갖기도 하는¹³⁾ 등으로 식물체에 유익하게 작용하기도 한다. 한편, Puckett³⁷⁾ 는 뉴욕의 삼림이 산성우와 대기오염으로 생장이 감소했으며, 수종간의 내성차이로 수종변화가 일어날 것을 보고했으며, 이와 유사한 산성우에 의한 임목의 성장감소가 McLaughlin 등³⁴⁾, Cowling과 Dochinger¹¹⁾ 등에 의해 보고되었으며, 작물에서도 인공산성우에 의한 조기낙엽과 함께 생장이 감소했음이 보고되었다.^{7,16,25)} 이처럼 산성우가 식물생장에 미치는 영향은 최근 다수의 연구자들에 의해 수행되었으나 상반된 결과가 보고되는 등, 쉬이 결론내리기 힘든 실정이며, Evans¹⁴⁾, Irving²¹⁾ 등은 대부분의 연구가 처리산성우의 pH와 식물생장에 관한 것으로 토양조건과 재배환경의 차이에 의해 상이한 결과를 보였다고 설명하면서 산성우와 토양조건, 타오염물질과 산성우의 상호작용이 규명될 수 있도록 실험설계됨이 필요하며, 산성우중의 유황과 질소의 양료로서의 효과와 산성물질로서의 해작용의 크기가 적절하게 밝혀지지 못했음을 지적하였다. Evans와 Lewin¹⁶⁾ 은 산성우가 식물생장에 미치는 영향을 보다 정확히 파악하기 위해서는 산성우가 어떤 생리작용에 영향하는가와 그생리작용들이 생장에 여하히 영향하는가를 조사해야 할 것이라 설명하였다.

이에 이 연구는 토양조건이 상이한 세가지 토양에 분식한 은행나무유묘(1-0, Half-sib)에 pH 2.0, 3.0, 4.0 및 5.0의 인공산성우와 수도물(pH 6.4)을 생육기간중 처리하면서 엽면적, 피해엽률, 엽록소 함량 및 광합성능을 월별로 측정된 자료와 산성우처리 종료후 측정된 유

묘의 건중량과의 관계를 토양별 자료 및 전체자료로 밝힘으로써 산성우처리가 생리적 특성에 미치는 영향과 그 생리적 특성들이 생장에 미치는 영향을 알아보고자 시도되었다.

2. 材料 및 方法

2.1 供試材料 및 人工酸性雨 處理

서울大學校 農科大學 苗圃場에서 育苗된 은행나무幼苗(1-0, Half-sib)에서 選拔된 585本을 1985年 4月 6日에 3가지 土壤을 主區로 하고 處理酸性雨의 pH를 細區로 하는 3反復의 分割區配置法(Split-Plot Design)으로 배치하였다.²⁷⁾ 1985年 4月 28日부터 10月19日까지 週 3回, 1回 5mm, 3分間 人工酸性雨를 處理했으며, 人工酸性雨는 황산(H₂SO₄)과 질산(HNO₃)을 3:1(V/V)로 혼합한 후 수도물로 묽혀 각각 pH 2.0, 3.0, 4.0 및 5.0으로 조정하였으며 對照區로 수도물(pH 6.4)을 利用하였다.²⁷⁾ 處理期間中의 天然降雨는 반투명의 Plastic-Slate로 차단시켰다. 供試土壤의 理化學的 性質과 處理酸性雨의 成分은 표1과 2에 보였다.

2.2 生理的形質 및 生長測定

葉面積은 線型測定值를 利用하여 推定하는 方法²⁸⁾으로 算出했으며, 被害葉率은 壞死斑이 나타난 被害葉의 比率로 表示하였으며, 葉綠素含量은 80% Aceton으로 色素를 抽出한 후 Vernon⁴⁴⁾의 公式으로 算出했으며, 葉組織의 光合成能은 산소전극(Oxygen Electrode & Monitor, YSI Co., Ohio, USA)으로 測定하였다.²⁸⁾ 幼苗의 生長은 細區當 6本씩의 幼苗를 10月 20日에 畚취하여 건조(85°C, 72hr)시킨 후 秤량하고 그 平均值를 統計分析資料로

Table 1. The physical and chemical properties of the soil used in this study.

Soil type	Soil particle (%) Sand : Silt : Clay	Texture	pH (H ₂ O)	Loss on ignition (%)	C.E.C (me/100g)	Exch. Cations (me/100g)				Base sat. (%)	Exch. Al (me/100)	Avail. P ₂ O ₅ (ppm)	SO ₄ -S (ppm)	NO ₃ -N (ppm)
						Ca	Mg	K	Na					
Nursery	43.62:25.59:30.79	SIC	4.91	4.37	12.14	3.18	0.53	0.59	0.35	38.30	1.38	41.29	54.25	4.50
Mixed	69.63: 9.08:21.29	SCL	5.04	1.64	6.26	2.10	0.35	0.25	0.32	48.24	0.67	23.31	32.78	3.90
Sandy	82.80: 3.99:13.21	SL	5.75	0.94	3.29	1.51	0.26	0.06	0.21	62.01	0.22	8.09	14.61	3.50

Table 2. Major cation and anion concentration of simulated acid rain treated in this study.

Simulated acid rain	Electric conductivity (mS/cm)	Major cations (ppm)					Major anions (ppm)			
		Ca	Mg	K	Na	Al	P ₂ O ₅	SO ₄ S	NO ₃ -N	
Control(pH 6.4)	0.19	27.11	5.01	1.61	12.24	3.27	0.23	21.15	4.10	
pH 5.0	0.42	30.06	4.77	2.00	9.40	3.34	0.58	33.64	9.22	
pH 4.0	0.56	30.08	4.76	2.00	10.85	3.37	0.64	46.90	11.91	
pH 3.0	0.85	31.07	5.02	1.97	12.83	3.46	0.14	117.53	16.31	
pH 2.0	24.50	39.98	5.28	2.15	8.76	4.05	0.04	1135.66	327.00	

利用하였다.

2.3 相關 및 回歸分析

각 세구별로 測定된 45개씩의 資料를 토양별로 구분해서 15개씩의 資料로 각각, 그리고 전체적으로 해서 測定時期에 따른 項目別 單相關과 回歸分析을 했으며, 相關關係가 높게 인정되는 測定時期의 각 項目의 資料들로 重相關 및 回歸分析을 했으며, 서울大學校 農科大學 전산실의 Computer(Hp-3000)의 LISA Package를 利用하였다.

3. 結果 및 考察

3.1 幼苗의 生長比較

은행나무幼苗의 生長關聯形質들(個體當 乾重量, 地上部 및 地下部乾重量, T-R率)의 平均値와 統計分析 結果를 표3에 보였다. 個體當 乾重量에서는 모두 토양간에서 5%, 처리간에서 1% 有意水準에서 有意성이 인정되었다. 個體當 乾重量, 地上部 및 地下部乾重量은 비슷한 경향을 보여 個體當 乾重量으로 상호比較하면, 토양간에는 苗圃土壤에서 월등히 높은 값을 보였다. 처리간에서는 토양에 무관하게 pH 2.0 처리구에서 현저히 낮은 값을 보였으며, 이는 산성우처리에 의한 生長減少이다. 苗圃土壤에서 pH 3.0 처리구에서 4.46gr으로 월등히 높게 나타났으며, pH 4.0과 5.0 처리구들에서도 대조구보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 Lee와 Weber³²⁾가 11개 수종의 종자에 pH 3.0 ~ 5.7의 산성우를 처리하여 일부 수종에서 生長

이 좋았음을 보고한 것과 같은 경향이며, Cates 등⁹⁾, Cole과 Johnson¹⁰⁾, Jones 등²⁶⁾ 및 Ogner³⁶⁾ 등의 산성우가 養料로 작용하여 植物生長이 증가했음을 설명한 보고들과 부합된다. 이와는 달리 혼합토양과 사질토양에서는 대체로 처리 산성우의 pH가 낮아질수록 個體當 乾重量이 감소하는 경향이었으며, pH 3.0 처리구의 값이 대조구의 그것보다 낮게 나타나 苗圃土壤에서의 결과와 相異하며, 이는 Johnson 등²⁴⁾, Mchaughlin 등³⁴⁾ 및 Puckett³⁷⁾ 등이 복미의 임목生長 감소, 作物에서 산성우처리에 의한 生育減少를 보고한 Bisessar 등⁷⁾, Evans와 Lewin¹⁶⁾, Jacobson 등²³⁾ 및 Johnston 등²⁵⁾의 결과와 상통한다.

이상과 같이 토양에 따른 상이한 결과는 산성우의 양료로서의 效果^{5,9,26)} 토양의 완충능과 양료의 活性化^{10,41)} 식생과 토양의 상호작용⁶⁾ 등의 차이에 의해 결정되는 有益·有害作用의 크기가 상이하기 때문으로 사료된다. 전체적으로 보아, pH가 3.0보다 큰 산성우는 일시적일지는 모르나 은행나무幼苗의 生長에 有益할 것으로 나타났다. 이러한 결과는 수종별^{2,32)} 식물종별^{1,33)}로 산성우처리에 대한 生長反應이 多樣함을 보고한 것과 은행나무가 耐公害성이 강한 점⁴³⁾ 등에 의한 것이기도 하며, 한 生育期(4월 하순~10월 중순) 동안만 산성우를 처리한 결과임을 새겨두어야 할 것으로 보인다.

처리간 T-R率에서는 pH 2.0 처리구에서는 근계발육이 심하게 불량해졌음을 알 수 있었으나 pH 3.0 이상의 처리구들에서는 큰 차이가 없었

다. 이는 근계발육에 토성, 토양수분, ...등의 여러가지 요인들이 복합적으로 작용하기 때문으로 보이며, 토양 pH가 낮아짐에 따른 Al 毒性으로 근계생장이 불량해졌음을 밝힌 보고²⁰⁾와는 다른 결과였고, Bouton⁸⁾과 Summer가 토양 pH 4.2에서 Al 毒性이 일어나지 않았음을 밝힌 결과와 같이 pH 3.0 이상의 처리구들에서는 토양 pH가 Al 毒性을 일으킬 정도로 낮아지지 않았기 때문으로 보인다.

3.2 幼苗의 生理的 特性 및 生長과의 相關

가. 葉面積 및 生長과의 相關

각 세구별 엽면적의 平均値와 통계분석 결과를 표 4에 보였다. 산성우처리 초기에는 토양간이나 처리간에 유의차가 인정되지 않다가 6월 측

정부터는 토양간에서, 8월 측정부터는 처리간에서 각각 유의차가 인정되었다. 7월부터 苗圃土壤에서 높은 葉面積을 보였으며, 이는 토양비옥도의 차이때문이라 사료된다. pH 2.0 처리구들에서 일찍부터 葉面積 減少現狀이 나타났으며, 대체로 사질토양 > 混合土壤 > 苗圃土壤의 순이었다. 이러한 현상은 산성우로 인한 산성물질의 집적으로 생기는 토양의 화학적 성질 變化가 비옥도가 낮은 사질토양에서는 급격히 일어나고, 비옥도가 높은 苗圃土壤에서는 서서히 일어났기 때문으로 추정된다. 처리간 葉面積 비교는, 처리간의 유의성이 인정되는 8월 測定値의 경우 苗圃土壤에서는 pH 3.0까지는 대조구와 별 차이를 보이지 않았으나, 混合土壤의 경우, 처리산성우의 pH가 낮을수록 감소하는 경향이며, 사질토양에서는 pH 5.0 처리구에서 가장 높은 값을 보이는 등, 토

Table 3. Mean values of total, top and root dry weight(g) per tree for two-year-old *Ginkgo biloba* seedlings by soil types and by pH levels.

Soil-types	pH levels		Dry weight per tree(g)			
			Total	Top	Root	Top to Root
Nursery soil	Control	(pH 6.4)	3.40 a	1.19ab	2.21 a	0.54 a
		Acid rain				
	Acid rain	pH 5.0	4.17 a	1.52ab	2.68 a	0.57a
		pH 4.0	3.71 a	1.24ab	2.47 a	0.50a
		pH 3.0	4.46 a	1.67a	2.79 a	0.61a
	pH 2.0	2.31 b	1.10b	1.21 b	0.92b	
Mixed soil	Control	(pH 6.4)	3.55 a	1.21	2.34 a	0.52 a
		Acid rain				
	Acid rain	pH 5.0	3.54 a	1.23	2.31 a	0.54 a
		pH 4.0	3.38 a	1.11	2.27 a	0.50a
		pH 3.0	3.24 a	1.09	2.15 a	0.51a
	pH 2.0	2.26 b	1.02	1.23 b	0.84b	
Sandy soil	Control	(pH 6.4)	3.25 a	1.06a	2.19 a	0.48 a
		Acid rain				
	Acid rain	pH 5.0	3.45 a	1.08a	2.38 a	0.45 a
		pH 4.0	3.32 a	1.09a	2.23 a	0.49 a
		pH 3.0	2.97 a	0.99a	1.97 a	0.50a
	pH 2.0	1.37 b	0.64b	0.73 b	0.88b	
F-values						
between soil-types			13.597**	10.663*	10.380*	3.017
between pH levels			33.357**	8.023**	46.824**	38.558**
interaction			2.363*	2.139	1.437	0.575

*and ** indicate significances at 5 % and 1 % levels, respectively

Differences in letters in vertical columns indicate significant difference at 5 % level for Duncan test.

Table 4. Mean values of leaf surface area(dm²) per tree by soil types and by pH levels.

Soil-types	pH levels	Date					
		May 19	Jun. 16	Jul. 17	Aug. 18	Sep. 21	Oct. 20
Nursery soil	Control (pH 6.4)	1.13	1.79	2.32	2.98	3.37 a	2.74 a
	Acid rain pH 5.0	1.05	1.73	1.99	2.20	2.47 ab	1.99 b
	pH 4.0	1.02	2.00	2.61	2.97	3.42 a	2.80 a
	pH 3.0	1.24	1.86	2.44	2.96	3.25 a	2.74 a
	pH 2.0	0.98	1.74	2.34	2.40	1.48 b	0.26 c
Mixed soil	Control (pH 6.4)	1.24	2.10	2.47	3.05	3.24 a	2.00 a
	Acid rain pH 5.0	1.11	1.77	1.93	2.63	2.65 a	2.06 a
	pH 4.0	1.25	2.02	2.06	2.60	2.82 a	2.20 a
	pH 3.0	1.09	1.95	2.17	2.54	2.49 a	1.81 a
	pH 2.0	1.23	2.15	1.99	1.92	0.68 b	0.07 b
Sandy soil	Control (pH 6.4)	1.06	1.55	1.84	2.15 a	2.06 b	1.17 a
	Acid rain pH 5.0	1.15	1.88	2.22	2.54 a	2.91 a	1.36 a
	pH 4.0	1.22	1.73	2.01	2.22 a	2.32 ab	1.63 a
	pH 3.0	1.08	1.59	1.87	2.05 a	2.25 ab	1.72 a
	pH 2.0	1.14	1.88	1.38	0.83 b	0.41 c	0.09 b

F-values

between soil-types	0.787	11.010*	12.743*	16 176*	27.517**	26.181**
between pH levels	0.157	0.443	1.137	6.122**	28.923**	99.786**
interaction	0.760	0.637	1.292	1.290	1.558	3.435*

* and ** indicate significances at 5% and 1% levels, respectively

Differences in letters in vertical columns indicate significant difference at 5% level for Duncan test.

Table 5. Correlation coefficient(R) between total dry weight and leaf surface area per tree.

Soil-type	Date					
	May 19	Jun. 16	Jul. 17	Aug. 18	Sep. 21	Oct. 20
Nursery soil	0.485*	0.195	0.037	0.316	0.585*	0.650**
Mixed soil	0.139	-0.353	0.080	0.340	0.764**	0.791**
Sandy soil	0.028	-0.044	0.693**	0.850**	0.856**	0.664**
Total	0.163	0.000	0.402**	0.597**	0.756**	0.725**

* and ** indicate significances at 5% and 1% levels, respectively.

양에 따라 상이한 결과를 보였다. 이는 토양에 따라 산성우처리에 대한 완충능이 상이하기 때문으로 보인다.

生長(個體當 乾重量)과 葉面積과의 상관관계를 표 5에 보였다. 전체적으로 보아 7월 측정부터 $r = .402 \sim .756$ 으로 높은 정의 상관인 인정되었으나, 이러한 결과는 잡종포플러에서 보인 $r = .865^{28)}$ 보다는 조금 낮았다. 토양별로 보면, 苗圃土壤에서 5, 9 및 10월 측정에서 $r = .485, .585$ 및 $.650$ 이며, 混合土壤에서 9, 10월 측정에서 $r = .764$ 및 $.791$, 사질토양에서 7, 8, 9 및 10월 측정에서 $r = .693, .850, .856$ 및 $.664$ 로 나타나 사질토양 > 混合土壤 > 苗圃土壤의 순으로 상관정도가 높았다. 이러한 결과는 산성우처리에 의한 토양조건변화가 直接 葉

面積크기에 영향한다고 판단되며, 이는 토양별 산성물질 집적에 대한 완충능 차이 때문이라 사료된다.

나. 被害葉率 및 生長과의 相關

산성우처리가 시작된 지 2주 후부터 엽표면에 可視的 被害-壞死斑-가 나타나기 시작했으며 新葉에서는 形態가 일그러지거나 葉緣部가 뒤틀리는 등의 여러가지 畸形葉이 생겼다. 가시적 엽피해는 처리산성우의 pH가 낮을수록, 처리가 진행될수록 심하게 나타났으나 7월 초순부터 사질 토양 > 혼합토양 > 모포토양의 순으로 조기낙엽이 시작되어 피해엽율의 正確한 측정이 곤란하여 7월 27일까지만 측정하였다. 피해엽율에서는 5월 19일부터 7월 27일까지 처리간 1%, 7월 27일 측정에서는 토양간에서도 1% 유의수준에

Table 6. Mean values of injured leaf rate(%) by soil types and by pH levels.

Soil-types	pH levels	Date					
		May 19	Jun. 1	Jun.16	Jun.30	Jul.17	Jul.27
Nursery soil	Control (pH 6.4)	0.00 a	0.00a	0.00 a	3.47 a	3.47 a	3.77 a
	Acid rain pH 5.0	0.00 a	0.00a	1.87 a	4.03 a	4.23 a	4.53 a
	pH 4.0	0.00 a	0.00a	1.87 a	3.70 a	7.73 a	9.27 a
	pH 3.0	0.00 a	3.03a	2.23 a	3.50 a	6.90 a	6.67 a
	pH 2.0	22.57 b	30.33b	32.23 b	31.47 b	37.73 b	36.93 b
Mixed soil	Control (pH 6.4)	0.00 a	0.00a	0.00 a	1.40 a	2.77 a	1.40 a
	Acid rain pH 5.0	0.00 a	0.00a	1.77 a	3.77 a	4.00 a	5.77 ab
	pH 4.0	0.00 a	0.00a	4.43 a	5.33 a	7.43 a	6.97 ab
	pH 3.0	2.77 a	4.53a	5.70 a	9.03 a	11.60 a	11.10 b
	pH 2.0	25.93 b	27.67b	34.50 b	40.50 b	45.70 b	61.17 c
Sandy soil	Control (pH 6.4)	0.00 a	0.00a	1.77 a	1.67 a	1.60 a	1.60 a
	Acid rain pH 5.0	0.00 a	0.00a	3.83 a	5.30 a	5.40 a	5.30 a
	pH 4.0	0.00 a	0.00a	2.23 a	4.53 a	4.33 a	4.20 a
	pH 3.0	0.00 a	0.00a	1.87 a	4.17 a	3.97 a	4.17 a
	pH 2.0	21.23 b	25.47b	34.77 b	40.13 b	49.53 b	100.00 b
F-values							
between soil-types		0.338	0.515	0.572	0.506	0.515	173.935**
between pH levels		80.998**	77.702**	137.037**	117.535**	50.913**	688.646**
interaction		0.250	0.294	0.303	0.919	0.511	51.605**

** indicates significance at 1% level

Differences in letters in vertical columns indicate significant difference at 5% level for Duncan test.

Table 7. Correlation coefficient(R) between total dry weight per tree and injured leaf rate.

Soil-type	D a t e					
	May 19	June 1	June 16	June 30	July 17	July 27
Nursery soil	-0.754**	-0.668**	-0.625**	-0.578**	-0.663**	-0.637**
Mixed soil	-0.774**	-0.848**	-0.759**	-0.718**	-0.796**	-0.817**
Sandy soil	-0.869**	-0.866**	-0.881**	-0.864**	-0.868**	-0.888**
Total	-0.697**	-0.680**	-0.692**	-0.666**	-0.687**	-0.731**

*and ** indicate significances at 5% and 1% levels, respectively.

Table 8. Mean values of total chlorophyll content(mg.g⁻¹f.w.) by soil types and by the pH levels.

Soil-types	pH levels	D a t e					
		May 19	Jun.22	Jul.17	Aug.18	Sep.20	Oct.19
Nursery soil	Control (pH 6.4)	1.05 a	1.25a	2.69	2.05	1.51	0.84
	Acid rain pH 5.0	1.18 ab	1.56ab	2.73	1.85	1.85	0.76
	pH 4.0	1.16 ab	1.77ab	2.50	2.19	1.90	0.80
	pH 3.0	1.24 b	2.81c	2.82	2.23	1.89	0.93
	pH 2.0	1.25 b	2.43bc	3.21	2.18	1.24	NA *1
Mixed soil	Control (pH 6.4)	1.03	1.51ab	2.10	2.18	1.56	0.41
	Acid rain pH 5.0	1.07	0.98a	2.47	2.05	1.48	0.54
	pH 4.0	1.05	1.06a	2.36	1.63	1.56	0.42
	pH 3.0	1.07	1.25ab	2.37	2.15	1.68	0.67
	pH 2.0	1.25	2.13b	1.16	1.78	1.29	NA *1
Sandy soil	Control (pH 6.4)	1.07 a	1.10	1.46	1.32 a	0.93	0.32
	Acid rain pH 5.0	1.11 ab	1.19	1.35	1.32 a	0.98	0.19
	pH 4.0	1.15 ab	1.37	1.45	1.52 a	0.97	0.41
	pH 3.0	1.06 a	1.12	1.58	1.19 a	1.15	0.18
	pH 2.0	1.29 b	1.38	1.24	0.54 b	NA	NA *1

F-values

between soil-types	1.114	7.365*	96.630**	16.828*	26.723**	46.130**
between pH levels	7.898**	4.222**	0.316	1.151	0.786	0.405
interaction	0.757	1.816	0.714	1.109	0.283	1.169

* and ** indicate significances at 5% and 1% levels, respectively

Differences in letters in vertical columns indicate significant difference at 5% level for Duncan test.

*1 indicates omitted data in statistical analysis and NA means no data available

서 유의차가 인정되었다. 토양에 무관하게 pH 2.0 처리구가 다른 처리구들에 비해 피해엽율이 월등히 높았으며, 대체로 처리 산성우의 pH가 낮을수록 피해엽율이 높아지는 경향이였다. 이러한 가시적 엽피해는 산성우에 의한 Evans¹⁵⁾ Haines 등¹⁸⁾, Heagle 등¹⁹⁾ 과 산성연무처리에 의한 Lang 등³⁰⁾ 의 결과와 유사하였다.

生長과 피해엽율과의 상관관계를 표 7에 보였다. 측정시기에 무관하게 모두 높은 부의 상관성이 인정되었으며, 상관정도는 사질토양>혼합토양>묘포토양의 순으로 높았다. 7월 27일 측정에서는 토양의 완충능이나 비옥도 등의 토양성질이 불량할수록 산성우에 의한 가시적 엽피해도 심해짐을 알 수 있었다.

다. 葉綠素含量 및 生長과의 相關

은행나무 엽중 엽록소함량이 세구별 平均值와 통계분석 결과를 표 8에 보였다. 6월부터 10월 측정에서 토양간 유의성이 5, 6월 측정에서는 처리간 유의차가 인정되었으며, 9,10월 측정치 중에서 pH 2.0 처리구들의 자료가 부족하여 통계분석에서 제외시켰다. 처리초기를 제외하고는 대체로 묘포토양에서의 엽록소함량이 월등히 높았으며, 다음으로 혼합토양, 사질토양의 순이었다. 토양별로 조금씩 다르나, 대체로 처리초기에는 처리 산성우의 pH가 낮을수록 엽록소함량이 높게 나타났으나 6,7월 이후 pH 2.0 처리구에서만은 급격히 감소했으며, 사질토양>혼합토양>묘포토양의 순으로 감소하는 시기가 빠르며 그 정도가 심하게 나타났다. 이러한 결과는 토양양료조건과 산성우에 대한 완충능차이 때문으로 판단된다. 처리초기에 엽록소 함량이

증가한 것은 Ferenbaugh¹⁷⁾ 의 결과와 유사한 경향이나, Scots pine²²⁾, 소나무와 잣나무³⁾ 에서 엽록소함량의 감소를 밝힌 보고들과는 다른 경향이였으며, 이러한 차이는 식물종, 처리조건 및 토양조건의 차이에서 기인된 것으로 보인다. 또한 처리초기에 처리 산성우의 pH가 낮을수록 엽록소함량이 높게 나타난 것은 기체상의 대기오염에 의한 엽록소함량감도^{4,33,40)} 와는 다른 경향으로 산성우가 엽면시비效果를 갖기도 하며, 토양양료를 공급하기도하는 有益한 면도 있음을 보이는 결과라 판단된다. 이러한 사실들과 葉機能의 손상정도를 엽록소함량으로 표현할 수 있는 점^{28,42)} 으로 보아 산성우가 직접 엽기능을 손상시킨다기보다는 엽조직으로부터의 양료용탈과 토양조건을 變化시킴으로써 간접적으로 엽기능에 손상을 초래할 것으로 판단된다.

생장과 엽록소함량과의 상관관계를 표 9에 보였다. 전체적으로 보아, 5월 측정에서 $r = -0.300$ 으로 높은 부의 상관성이 8,9 및 10월 측정에서는 $r = 0.450, 0.492$ 및 0.575 로 높은 정의 상관성이 인정되었다. 토양별로는, 묘포토양에서는 7월 측정에서만 $r = -0.512$ 로 나타났고, 혼합토양에서는 5,6월 측정에서 각각 $r = -0.697$ 및 -0.610 으로, 사질토양에서는 5월 측정에서 $r = -0.492$ 로 높은 부의 상관성이 인정되었으나, 8월과 10월 측정에서는 $r = 0.767$ 과 0.523 으로 높은 정의 상관성이 인정되는 등으로 상이한 결과를 보였다. 이는 산성우처리 초기에는 pH가 낮을수록 오히려 엽록소함량이 높아지는 경향이였다가 처리가 계속됨에 따라 특히 사질토양에서는 pH가 낮을수록 급격히 엽록

Table 9. Correlation coefficient(R) between total dry weight per tree and total chlorophyll content.

Soil-type	Date					
	May 19	June 22	July 17	August 18	September 20	October 19
Nursery soil	-0.055	-0.158	-0.512*	-0.170	0.225	0.225
Mixed soil	-0.697**	-0.610**	0.430	0.354	0.443	-0.075
Sandy soil	-0.492	-0.185	0.162	0.767**	-0.099	0.523*
Total	-0.300	-0.081	0.265	0.450**	0.492**	0.575**

* and ** indicate significances at 5% and 1% levels, respectively

Table 10. Mean values of photosynthetic ability ($O_2 \mu \text{ mole} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$) by soil types and by the pH levels of simulated acid rain.

Soil-types	pH levels	Date				
		May 27	Jun.30	Jul.30	Aug.25	Sep. 21
Nursery soil	Control (pH 6.4)	0.85	0.84	0.96	0.56 a	0.35
	Acid rain pH 5.0	0.85	0.81	0.88	0.48 ab	0.33
	pH 4.0	0.56	0.90	0.97	0.35 ab	0.31
	pH 3.0	0.89	0.92	0.87	0.32 ab	0.25
	pH 2.0	0.62	0.91	0.74	0.23 b	0.05 *1
Mixed soil	Control (pH 6.4)	0.82	0.70	0.81	0.49 a	0.29
	Acid rain pH 5.0	0.80	0.98	0.94	0.52 a	0.25
	pH 4.0	0.63	0.74	0.70	0.43 a	0.31
	pH 3.0	0.52	0.80	0.88	0.41 ab	0.41
	pH 2.0	0.89	0.98	0.66	0.20 b	0.10 *1
Sandy soil	Control (pH 6.4)	0.75	0.88	0.49	0.43 a	0.16
	Acid rain pH 5.0	0.69	0.74	0.63	0.35 a	0.14
	pH 4.0	0.72	0.73	0.59	0.39 a	0.14
	pH 3.0	0.91	0.74	0.51	0.25 ab	0.08
	pH 2.0	0.75	0.83	0.21	0.04 b	NA *1
F-values						
between soil-types		0.018	1.403	57.940**	22.151**	56.902**
between pH levels		1.408	0.600	1.953	9.956**	0.094
interaction		1.674	0.670	1.303	0.384	1.077

** indicates significance at 1% level

Differences in letters in vertical columns indicate significant difference at 5% level for Duncan test

*1 indicates omitted data in statistical analysis and NA means no data available.

소함량이 감소했기 때문이며, 이러한 결과는 산성우에 대한 토양별 완충능, 양료조건 등의 차이에 의해 나타난 것으로 사료된다.

라. 葉組織의 光合性能 및 生長과의 相關

세구별 엽조직의 光合性能의 平均值와 통계분석 결과를 표 10에 보였다. 7, 8 및 9월 측정에서 토양간 유의차가 인정되었으며, 묘포토양에서 그 값이 가장 높았다. 처리간에서는 8월 측정에서만 통계적 유의성이 인정되었으며, 대체로 처리산성우의 pH가 낮을수록 光合性能이 낮아지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 동부에서 산성우처리에 의해 光合性能이 증가했음을 밝힌 결과¹⁷⁾와는 다르며, 플라타너스³⁵⁾과 Sco-

ts Pine²²⁾에서 보고된 결과와 유사하였다. 한편 일반적으로 기체상의 오염물질에 의한 光合性能의 감소는 흔히 보고되었으며^{4,12)} 엽록체를 추출하여 SO_2 를 처리하든지³⁹⁾, Sulfate 용액을 처리한 경우³⁸⁾도 光合性能이 抑制됨이 밝혀졌다. 이러한 사실들과 은행나무가 耐公害性이 강한 점으로 보아, 산성우처리가 은행나무 엽조직에 직접적으로 영향하여 光合性能을 抑制한다기 보다는 산성우처리에 의한 토양양료용탈, 엽조직으로부터의 양료용탈, 흡수 이용되는 양료의 變化 등으로 간접적인 영향으로 光合性能에 손상을 미친다고 판단된다.

생장과 엽조직의 光合性能과의 상관관계를 표

Table 11. Correlation coefficient(R) between total dry weight per tree and leaf photosynthetic ability per unit leaf area.

Soil-type	Date				
	May 27	June 30	July 30	August 25	September 21
Nursery soil	0.543*	0.097	0.399	0.192	0.036
Mixed soil	-0.430	-0.309	0.065	0.675**	-0.798**
Sandy soil	0.147	-0.078	0.618**	0.700**	0.536*
Total	0.152	0.015	0.482**	0.519**	0.273

* and ** indicate significances at 5% and 1% levels, respectively

Table 12. The relations between total dry weight(G) and leaf surface area(LA), Injured leaf rate(LI), chlorophyll content(CC) and photosynthetic ability(PA) for *Ginkgo biloba* seedlings treated with simulated acid rain.

Predicted Equation	R	F-value	t-value for β	Date
$G = 0.740LA_7 + 1.644$	0.402	8.309**	2.883**	Jul . 17
$G = 0.715LA_8 + 1.488$	0.597	23.760**	4.875**	Aug. 18
$G = 0.635LA_9 + 1.691$	0.750	55.276**	7.435**	Sep. 21
$G = 0.654LA_{10} + 2.131$	0.725	47.530**	6.894**	Oct. 20
$G = -0.059LI_5 + 3.489$	-0.697	40.727**	6.382**	May. 19
$G = -0.044LI_6 + 3.582$	-0.692	39.521**	6.287**	Jun. 16
$G = -0.022LI_7 + 3.598$	-0.731	49.259**	7.019**	Jul . 27
$G = -2.073CC_5 + 5.561$	-0.300	4.257*	2.063*	May. 19
$G = 0.697CC_8 + 2.146$	0.450	10.937**	3.307**	Aug. 18
$G = 0.630CC_9 + 2.596$	0.492	10.881**	3.298**	Sep. 20
$G = 1.378PA_7 + 2.210$	0.482	13.021**	3.609**	Jul . 30
$G = 2.496PB_8 + 2.298$	0.519	15.880**	3.985**	Aug. 25

* and ** indicate significances at 5% and 1% levels, respectively

II에 보였다. 전체로 보아, 7,8월 측정에서 $r = .482$ 및 $.519$ 로 높은 정의 상관성이 인정되었으며, 토양별로는 모포토양에서는 8월에 $r = .675$, 사질토양에서는 7,8월에 $r = .618$ 및 $.750$ 으로 높은 정의 상관성이 인정되었다. 이러한 결과는 산성우처리 초기에는 처리에 의한 광합성능 변화에 큰 영향이 없다가 7,8월에 가서 처리산성우의 pH가 낮을수록 광합성능이 감소하는 결과가 사질토양과 혼합토양에서 보다 뚜렷이 나타났기 때문으로 보인다. 9월 측정에서 혼합토양에서 $r = -.798$ 로 부의 상관성이, 사질

토양에서는 $r = .563$ 으로 정의 상관성이 인정되지 않는 등의 결과를 보인 것은 pH 2.0 처리구들의 자료가 불충분하여 통계분석에서 제외되었기에 나타난 것으로 보인다.

3.3 生長과 生理的 特性과의 單純回歸 및 多重回歸分析

生長과 生理的 特性들과의 相關이 認定되는 測定時期에 대해서 行한 回歸分析 結果를 표 12에 보였다. 葉面적과 生長과의 關係에서는 7,8,9 및 10월 측정에서 모두 회귀계수에 대한 t 검

Table 13. Multiple regressions between G and LA, LI, CC and PA for *Ginkgo biloba*, seedlings treated with simulated acid by soil-types.

Predicted Equation	R	F-value	t-values for β 's			
			β_4	β_3	β_2	β_1
$G_n = 0.258LA - 0.034LI - 0.589CC + 0.148PA + 3.149$	0.698	2.380	0.661	1.207	0.713	0.524
$G_m = 0.121LA - 0.015LI + 0.175CC - 0.033PA + 3.133$	0.851	6.606**	0.515	1.376	0.829	0.320
$G_s = 0.494LA - 0.003LI + 0.929CC - 0.107PA + 1.788$	0.952	24.028**	2.784**	0.427	2.782**	1.401
$G_t = 0.359LA - 0.011LI + 0.216CC - 0.056PA + 2.691$	0.804	18.229**	2.821**	2.294*	1.555	0.849

** indicates significant at 1% level

n, m, s and t means nursery soil, mixed soil, sandy soil and total data, respectively

정결과가 유의적으로 나타나 생장을 추정하는 식으로 이용 가능하나, 산성우처리간 유의성이 인정되는 8, 9 및 10월 중에서는(표 4) 9월 측정치가 가장 좋은 ($r = .750$) 것으로 나타났다. 이런 결과로 보아 산성우처리에 의한 9월의 엽면적 감소가 생장에 가장 크게 영향한다고 판단된다. 피해엽벌에서는 모든 측정시기에서 처리간 유의성이 인정되나(표 6), 7월 27일 측정치가 상관정도가 가장 높게 나타나 ($r = -.731$), 피해엽벌이 높을수록 생장에 나쁜 영향을 미치는 것으로 판단된다. 엽록소함량은 5, 6월 측정에서만 처리간 유의성이 인정되었으나(표 8), 생장과의 상관에서는 오히려 8, 9월에 보다 높은 상관관계가 인정되었다. 이러한 결과로 보아서, 산성우처리 초기의 엽록소함량 증가는 생장에 영향하지 못하고 처리가 계속됨에 따른 엽록소함량의 감소가 생장에 나쁘게 영향하는 것으로 판단된다. 광합성은 8월 측정에서만 처리간 유의성이 인정되었으며(표 10), 생장과의 상관도 유의적으로 인정되었다. 이러한 결과로 보아, 산성우가 처리초기에는 광합성에 크게 영향하지 못하나 처리가 진행됨에 따라 처리산성우의 pH가 낮을수록 광합성을 떨어뜨려 생장에 나쁘게 영향하는 것으로 판단된다.

이상과 같은 단순회귀분석 결과, 인공 산성우가 처리된 은행나무묘의 생장을 추정하는 추정식으로는 9월에 측정된 엽면적을 이용하는 $G = .635LA_9 + 1.691$ 이 가장 좋은 것으로 나타났고, 다음으로는 7월에 측정된 피해엽율을 이용하는 $G = -.022L_{17} + 3.598$ 로 나타났으

며, 엽록소함량과 광합성을 이용하는 추정식도 이용가능하기는 하나 精度가 위의 식들보다 낮게 나타났다.

생장과 상관정도가 높은 생리적 특성들(9월 엽면적, 7월 피해엽율, 8월 엽록소함량 및 8월 광합성)과 생장과 多重回歸分析 결과를 표 13에 보였다. 전체 자료로 보아서는 상관계수도 높게 나타났으며 ($r = .804$), 回歸에 대한 유의성도 인정되었으나, 회귀계수에 대한 t-값이 유의적으로 인정되는 것은 엽면적과 피해엽율에서만이며 유묘생장을 추정하는 데는 9월 엽면적과 7월 피해엽율이 가장 좋은 것으로 나타났다. 한편, 묘포토양에서는 다중회귀에 대한 유의성이 인정되지 않았으며, 혼합토양에서는 다중회귀에 대한 유의성은 인정되나 회귀계수에 대한 t-값이 유의성이 인정되지 않았으며, 사질토양에서는 다중회귀에 대한 유의성도 인정되었으며, 회귀계수에 대한 t-값은 엽면적과 엽록소함량에서 유의성이 인정되어 상이한 결과를 보였다. 이는 산성우처리에 의한 생리적 특성의 변화가 사질토양에서 더욱 뚜렷했기 때문이며, 토양비옥도가 낮고 완충능이 작은 토양일수록 산성우에 대한 反應이 쉬이 나타날 것임을 시사하는 것으로 사료된다.

4. 結 論

세가지 토양(苗圃土壤, 混合土壤 및 砂質土壤)에 盆植한 은행나무묘(1-0, Half-Sib)에 인공산성우(pH 2.0, 3.0, 4.0 및 5.0)와 수도물(pH 6.4)을 生育期間中(1985.4.28 ~ 1985.

10.19)에 처리하면서 幼苗의 성장과 생리적 특성(엽면적, 피해엽율, 엽록소함량 및 光合性能)을 조사하고 성장과 생리적 특성과의 상관관계를 분석하여 얻은 주요한 결과는 다음과 같다.

1. 개체당 건중량, 지상부 및 지하부 건중량에서 토양간에 5%, 처리간에 1% 유의수준에서 유의차가 인정되었다. 묘포토양에서는 pH 3.0 처리구에서 최대건중량을 보였으며, 혼합토양과 사질토양에서는 대조구와 pH 5.0 처리구에서 각각 최대건중량을 보였다.

2. pH 2.0 처리구에서는 7월 이후 엽면적이 급격히 감소했으나 pH 3.0 이상의 처리구들에서는 큰 차이가 없었다. 엽면적과 성장과의 상관은 토양별로 조금씩 다르나 9월에 가장 높은

정의 상관성이 인정되었다.

3. 피해엽율은 처리산성우의 pH가 낮을수록 심해졌으며, 성장과의 상관은 높은 부의 상관성이 인정되었다.

4. 처리산성우의 pH가 낮을수록 처리초기에는 엽록소함량이 증가했으나, 처리가 진행됨에 따라 급격히 감소했다. 성장과의 상관은 5월에는 부의 상관성이 8, 9, 10월에는 높은 정의 상관성이 인정되었다.

5. 엽조직의 光合性能은 7월 이후 처리산성우의 pH가 낮을수록 급격히 감소하였다. 성장과의 상관은 8월에 높은 정의 상관성이 인정되었다.

(原稿接受 '87.3.26)

參 考 文 獻

1. 金在鳳 외 9인, (1982), 工團地域의 綠地造成 및 回復에 關한 研究, 國立環境研究所, 64pp.
2. 李敦求, 金甲泰, (1986), 人工酸性雨가 몇 樹種의 種子發芽와 苗木生長에 미치는 影響, 서울대학교 農科大學 冠岳樹木園研究報告 7:15~21.
3. 李敦求 외 3인, (1984), 人工酸性雨가 소나무와 잣나무幼苗의 葉綠素含量에 미치는 影響, 서울대학교 農學研究 9(2-1):15-19.
4. 韓基確, (1973), 亞黃酸가스에 의한 農作物의 被害生理, 減收率 및 被害輕減에 關한 研究, 韓國農化學會誌 16:146~165.
5. Abrahamsen, G., (1980), Acid precipitation, plant nutrients and forest growth, Pages 58-63 in Drablos, D. and A. Tollan (eds.), Proc. Int. Conf. Ecol. Impact Acid Precip., Norway, 1980. SNSF Project.
6. Anderson, F. and G. Howells, (1978), Ecological effects of acid precipitation. Report of a Workshop held at Gatehouse of Fleet, Galloway, 1978. EPRI SOA 77-403, 8pp.
7. Bissessar, S., K.T. Plamer, A.L. Kuja and S.N. Linzon, (1984), Influences of simulated acidic rain on bacterial speck of tomato, J. Environ. Qual. 13:18-22.
8. Bouton, J.H. and M.E. Summer, (1983), Alfalfa, *Medicago sativa* L. in highly weathered acid soils; V. Field performance of alfalfa selected for acid tolerance, Plant and Soil 74:431-436.
9. Cates, R.L.J., et al., (1984), Effect of by-product sulfuric acid on phytoavailability of nutrients in irrigated calcareous, saline-sodic soil, J. Environ. Qual. 13: 252-256.
10. Cole, D.W. and D.W. Johnson, (1977), Atmospheric sulfate additions and cation leaching in a Douglas-fir ecosystem, Water Resource Research 13(2): 313-317.
11. Cowling, E.B. and L.S. Dochinger, (1980), Effects of acidic precipitation on health and the productivity of forests, USDA for Ser. Gen. Tech. Rep. PSW-43: 265-173.
12. Eckert, R.J. and D.B. Houston, (1982), Photosynthesis and needle elongation response of *Pinus strobus* clones to low level sulfur dioxide exposures, Can. J. For. Res. 10:357-361.

13. Evans, L.S., (1984), Botanical aspects of acidic precipitation, *Bot. Rev.* 50:449-490.
14. Evans, L.S., (1982), Biological effects of acidity in precipitation on vegetation: A review, *Environ. Exp. Bot.* 22: 155-169.
15. Evans, L.S., (1980), Foliar response that may determine plant injury by simulated acid rain, Pages 239-257 in Toribara, T.Y., M.W. Miller and P.E. Morrow (eds.), *Polluted Rain*, Plenum Press.
16. Evans, L.S. and K.F. Lewin, (1981), Growth, development and yield responses of pinto beans and soy beans to hydrogen ion concentrations of simulated acid rain. *Environ. Exp. Bot.* 21:103-113.
17. Ferenbaugh, R.W., (1976), Effects of simulated acid rain on *Phaseolus vulgaris* L.(Fabaceae), *Amer. J. Bot.* 63:283-288.
18. Haines, B.L., J.A. Jernstedt and H.S. Neufeld, (1985), Direct foliar effects of simulated acid rain. II. Leaf surface characteristics, *New Phytol.* 99:407-416.
19. Heagle, A.S., et al., (1983), Responses of soy beans to simulated acid rain in the field, *J. Environ. Qual.* 12:538-543.
20. Hecht-Buchholz, C. and C.D. Foy, (1981), Effect of aluminum toxicity on root morphology of barley, *Plant and Soil* 63:93-95.
21. Irving, P.M., (1983), Acidic precipitation effects on crops: A review and analysis of research, *J. Environ. Qual.* 12:442-453.
22. Jaakkola, S., et al., (1980), The effect of artificial acid rain on the spectral reflectance and photosynthesis of Scots pine seedlings, Pages 172-173 in Drablos, D. A. Tollan (eds.), *Proc. Int. Conf. Impact Acid Precip.*, Norway, 1980.
23. Jacobson, J.S., et al., (1980), Polluted rain and plant growth, Pages 291-305 in Toribara, T.Y., M.W. Miller and P.E. Morrow (eds.), *Polluted Rain*, Plenum Press.
24. Johnson, A.H., et al., (1981), Recent changes in patterns of tree growth rate in the New Jersey pinelands: A possible effect of acid rain. *J. Environ. Qual.* 10:427-430.
25. Johnston, J.J.W., et al., (1982), Effect of rain pH on senescence, growth and yield of bush bean, *Environ. Exp. Bot.* 22: 329-337.
26. Jones, U.S., M.G. Hamilton and J.B. Pitner, (1979), Atmospheric sulfur as related to fertility of ultisols and entisols in south Carolina, *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 43:1169-1171.
27. Kim, G.T., (1986), Effects of Simulated Acid Rain on Growth and Physiological Characteristics of *Ginkgo biloba* L. Seedlings and on Chemical Properties of the Tested Soil. Ph.D. dissertation Seoul National Univ., 46 pp.
28. Kim, G.T. and D.K. Lee, (1983), A technique for selecting superior *Populus alba* x *Populus glandulosa* F₁ clones with some physiological characters, *J. Korean For. Soc.* 59: 15-30.
29. Kundson, L.L., T.W. Tibbitts and G.E. Edwards, (1977), Measurement of ozone injury by determination of leaf chlorophyll concentration, *plant physiol.* 60:606-608.
30. Lang, D.S., D. Herzfeld and S.V. Krupa, (1980), Responses of Plants to submicron acid aerosols, Pages 273-290 in Toribara, T.Y., M.W. Miller and P.E. Morrow (eds.), *Polluted Rain*, Plenum Press.
31. Lee, J.J., et al., (1981), Effect of simulated acid rain on yield, growth and foliar injury of several crops, *Environ. Exp. Bot.* 21: 171-185.
32. Lee, J.J. and D.E. Weber, (1979), The effect of simulated acid rain on seedling emergence and growth of eleven woody species, *Forest Sci.* 25: 393-398.
33. Mann, L.K., S.B. Mchaughlin and D.S. Shriner, (1980), Seasonal physiological re-

- sponse of white pine under chronic air pollution stress, *Environ. Exp. Bot.* 20: 99-105.
34. Mchaughlin, S.B., et al., (1983), Effects of acid rain and gaseous pollutants on forest productivity; A regional scale approach, *JAPCA* 33: 1042-1049.
 35. Neufeld, H.S., J.A. Jernstedt and B.L. Haines, (1985), Direct foliar effects of simulated acid rain. I. Damage, growth and gas exchange, *New Phytol.* 99: 389-405.
 36. Ogner, G., (1980), Effects of acid precipitation on soil and forest: 10. The effect of growth of Norway spruce on soil acidity by acid irrigation, Pages 208-209 in Drablos, D. and A. Tollan (eds.), *Proc. Int. Conf. Ecol. Impact Acid Precip.*, Norway, 1980.
 37. Puckett, L.J., (1982), Acid rain, air pollution, and tree growth in southeastern New York, *J. Environ. Qual.* 11:376-381.
 38. Ryrie, I.J. and A.T. Jagendorf, (1971), Inhibition of phosphorylation in spinach chloroplasts by inorganic sulfate, *J. Biol. Chem.* 246: 582-588.
 39. Silvius, J.E., M. Engle and C.H. Baer, (1975), Sulfur dioxide inhibition of photosynthesis in isolated spinach chloroplasts, *Plant physiol.* 56:434-437.
 40. Suwannapinunt, W. and T.T. Kozlowski, (1980), Effect of SO₂ on transpiration, chlorophyll content, growth, and injury in young seedlings of woody angiosperms, *Can. J. For. Res.* 10: 73-83.
 41. Tamm, C.O. and G. Wiklander, (1980), Effects of artificial acidification with sulfuric acid on tree growth in Scots pine forest, Pages 188-189 in Drablos, D. and A. Tollan (eds.), *Proc. Int. Conf. Ecol. Impact Acid Norway*, 1980.
 42. Todd, G.W. and W.N. Arnold, (1962), An evaluation of methods used to determine injury to plant leaves by air pollutants, *Bot. Gaz.* 123: 151-154.
 43. Umbach, D.M. and D.D. Davis, (1984), Severity and frequency of SO₂ - induced leaf necrosis on seedlings of 57 tree species, *Forest Sci.* 30: 587-596.
 44. Vernon, L.P., (1960), Spectrophotometric determination of chlorophylls and pheophytins in plant extracts, *Anal. Chem.* 32: 1144-1150.