인공산성비 처리에 의한 백합나무 묘목의 엽피해와 엽록소함량 변화

윤준혁¹ · 이도형^{1*} · 우관수²

¹영남대학교 산림자원학과, ²국립산림과학원 산림유전자원부

(2008년 6월 18일 접수; 2008년 9월 24일 수정; 2008년 9월 26일 수락)

Changes in Chlorophyll Content and Leaf Damages of *Liliodendron tulipifera* L. Seedlings Treated with Simulated Acid Rain

Jun-Hyuck Yoon¹, Do-Hyung Lee^{1*} and Kwan-Soo Woo²

¹Department of Forest Resources, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

²Department of Forest Genetic Resources, Korea Forest Research Institute, Suwon 441-847, Korea

(Received June 18, 2008; Revised September 24, 2008; Accepted September 26, 2008)

ABSTRACT

This study was conducted to analyze the influence of simulated acid rain on leaves of *Liliodendron tulipifera* seedlings. The seedlings were treated with four levels of simulated acid rain with pH of 5.6, 4.9, 3.9 and 2.9, and then chlorophyll contents and the degree of foliar damage were investigated. Differences were statistically significant among treatments in chlorophyll contents in all of the tested soils. The total contents of chlorophyll tended to decrease as the simulated acid rain treatment was maintained. Chlorophyll contents, however, did not decrease according to the decrement of pH levels. Foliar damage increased as the simulated acid rain was maintained in all tested soils. Especially, the damage dramatically increased between May and July as the acidity increased. As the treatment of simulated acid rain continued, deformed new leaves appeared. In all treatments except the control, the leaves turned brown and the damage increased with time. Necrotic spots appeared during the first month of treatment at the pH level of 2.9 in all soil types. The damage by acid rain should be considered when we plant *Liliodendron tulipifera*.

Key words : *Liliodendron tulipifera*, Simulated acid rain, Chlorophyll content, Foliar damage

I. 서 론

인구의 증가와 산업의 고도화로 인해 화석연료의 사용이 급증하면서 아황산가스, 질소산화물 등의 오염물질이 대기 중으로 대량 유입되고 있으며, 이로 인한 산림생태계 내의 환경오염물질의 증가는 세계적인 관심사로 주목 받고 있다. 산성비(acid rain)라는 용어는 1872년에 영국의 화학자 Smith가 처음 사용하였다. 그 후 다양한 분야에서 산성비에 의한 많은 피해가

증가되고 있으며, 산림의 경우, 산성비로 인한 다양한 피해 및 산림생태계의 쇠퇴 징후에 대한 사례가 있으며, 그에 따른 다양한 대책연구가 수행되고 있다.

일반적으로 산성비는 토양을 산성화하고, 토양과 식물체로부터 무기양분의 용탈에 의해 양분순환체계를 혼란시키며, 종자의 발아율 저하, 잎과 생식기관의 조직에 대한 변화, 엽록소 함량의 감소, 광합성능력의 저하 등 생리적인 장애와 지상부·지하부의 성장량 감소, 잎의 괴사반점, 잎의 주름, 부정아의 발생, 조기낙

엽 등의 형태적 특성에 영향을 미친다(Ferenbaugh, 1976; Cole and Johnson, 1977; Lee and Weber, 1982; Oh, 1986; Kim, 1987; Cheong, 1988). 또한, 산성비는 식물의 잎에 심각한 손상을 입히며(Hindawi *et al.*, 1980; Kelly and Strickland, 1986), 수목의 엽내 엽록소를 감소시켜 직접적인 피해를 준다고 보고되고 있다(Evans, 1980; Cape, 1986). 한편, 산성비에 의한 식물의 반응은 매우 다양하게 나타나고 있다. 산성비 처리에 따른 식물 종간의 상이한 반응(Lee and Weber, 1979; Evans, 1984)에 대하여 연구된 바 있으며, 산성비에 대해 식물종간이나 영양계간의 내성 차에 대한 연구(Garsed and Rutter, 1982)가 수행된 바 있다.

산성비에 대한 백합나무 관련연구는 산림에서 백합나무 외 3개 수종에 대하여 산성비에 대한 중화능력과 완충능력을 조사한 결과 백합나무가 가장 우수하게 나타났으며(Han and Lee, 1997), 1년생 백합나무 묘목에 인공산성비와 오존을 처리한 결과 낮은 산도에서 잎의 무기성분(N, P, K, Ca, Mn)이 증가하였다고 보고되었다(Schier, 1990).

수목은 내부의 유전적인 요인과 외부의 환경적인 영향으로 인하여 수목의 내·외부의 형태적 차이가 나타난다. 따라서 산성비의 영향으로 인한 수목 내·외부의 형태적 변화가 예상되고 있다. 그러나 현실 임분에서 산성비 피해지역과 피해가 없는 지역에 대한 균일한 비교대상지를 찾기가 매우 어렵기 때문에 산성비가 생태계에 미치는 영향을 파악하는데 많은 어려움이 있다. 따라서 주어진 환경에 대한 수목의 일정한 생리적 반응을 구명하기 위해서는 인공적으로 산도를 조절하여 수목에 분무한 후 반응을 관찰하는 실험에 의존할 수밖에 없다.

본 연구의 목적은 최근 대기 중 이산화탄소(CO₂)의 감소효과가 크고, 생장이 빠르며 경제적 가치가 높은 조림수종인 백합나무(*Liliodendron tulipifera* L.) 묘목의 잎에 인공적으로 조제된 산성비를 우리나라 월평균 강수량과 동일하게 처리한 후 엽록소 함량, 엽피해 상황 등을 비교 분석함으로써 산성비에 의한 묘목의 반응성과 피해증상을 관찰하여 산성비가 백합나무 묘목의 잎에 미치는 영향을 밝히는데 있다.

II. 재료 및 방법

2.1. 공시수종과 공시토양

백합나무 묘목은 국립산림과학원 산림유전자원부 구

내 채종원의 동일클론 개체로부터 채종하여, 동일 연구소 시험포지에서 1년간 양묘한 후 3종류의 토양을 담은 11호 pot(상부직경: 0.36m, 하부직경: 0.21m, 높이: 0.30m)에 이식하고, 자연강우를 차단하기 위하여 온실로 운반하였다. 묘목은 활착률(%)을 높이기 위하여 대절을 실시하였다(Korea Forest Research Institute, 2004). pH가 다른 4종류의 산성비와 3종류의 토양에 대한 비교 연구를 위하여 12구획의 처리구를 배치하였으며, 처리구별로 3반복을 조사하였다. 공시토양은 상토(질소 0.29g/L, 인산 0.52g/L, 칼륨 0.29g/L)와 유기질이 없는 산림토양(마사토)의 혼합비율이 7:3(v/v)인 토양(A), 3:7인 토양(B) 그리고 마사토만으로 이루어진 토양(C)으로 구성하였다.

2.2. 인공산성비의 제조 및 처리

인공산성비는 1N 황산(H₂SO₄)과 1N 질산(HNO₃)을 4:1(v/v)의 비율로 구성하여 제조하였다. 제조된 인공산성비를 지하수(pH 7.07±0.14)로 희석하여, pH 2.9, 3.9, 4.9 그리고 5.6으로 조정하고, pH 5.6은 대조구로 하였다. 대조구의 pH 수준은 산성비를 정의하는 기준이고, pH 4.9는 2004년 기준 우리나라 전국 31개 도시의 산성비 산술평균값이다. 인공산성비 처리는 묘목이 활착되었다고 판단되는 2006년 5월부터 2006년 10월까지 우리나라 월평균강수량을 고려하여 플라스틱 분무기로 매주 2회, pot당 0.5L씩 분무하였다. 또한 온실 내 처리되는 인공산성비의 유실과 다른 처리구에 대한 영향을 방지하기 위하여 처리구 사이를 비닐벽(plastic wall)으로 차단하였으며, 온실 내 고온으로 인한 묘목에 대한 피해를 방지하기 위하여 온도조절장치를 설치하여 실내온도를 조절하였다.

2.3. 엽록소 함량 및 엽피해율 측정

각 처리구에서 성숙잎 1g을 채취하여 80% 아세톤 용액 50mL로 마쇄하여 여과지로 엽록소를 추출한 후, UV-Visible Spectrophotometer(Scinco)를 사용하여 파장길이(wave lengths) 645nm, 663nm, 652nm에서 흡광도(optical density)를 측정하였다. 엽록소 함량은 Chlorophyll a, Chlorophyll b, Total Chlorophyll로 Arnon(1959)과 McKinney(1941)의 방법을 이용하여 아래와 같이 계산하였으며, 엽록소함량의 변화에 대해 pH 수준별 유의성 검증을 실시하였다.

Chlorophyll a = $(0.0127 \times \text{OD}_{663\text{nm}} - 0.00269 \times \text{OD}_{645\text{nm}}) \times 1000 \times 50 \div 1000 \times 4$
 Chlorophyll b = $(0.0229 \times \text{OD}_{645\text{nm}} - 0.00468 \times \text{OD}_{663\text{nm}}) \times 1000 \times 50 \div 1000 \times 4$
 Total Chlorophyll = $\text{OD}_{652\text{nm}} \times 1000 \div 34.5 \times 50 \div 1000 \times 4$
 단, OD645 : 파장 645nm의 흡광도
 OD663 : 파장 663nm의 흡광도
 OD652 : 파장 652nm의 흡광도

엽피해율은 인공산성비 처리 기간 동안 매달 측정하였다. 인공산성비에 따른 묘목의 피해는 잎에 나타나는 가시적인 피해를 기준으로 분석하였으며, 엽피해율은 개체당 피해가 나타난 잎의 수를 전체 잎의 수로 나누어 백분율로 나타내었다(Kim and Soh, 1995). 또한, 인공산성비의 처리기간 동안에 나타난 잎의 색깔, 형태 등의 피해증상을 관찰하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 인공산성비 처리에 따른 세 가지 토양에서의 엽록소함량 변화

인공산성비 처리가 지속됨에 따라 세 가지 토양 모두 pH 처리구에서 엽록소 함량이 전반적으로 감소하는 경향을 보였으며, 특히 pH 2.9 처리구에서 가장 큰 폭의 감소를 나타내었다(Fig. 1). 엽록소 a 함량은 pH 2.9 처리구 중 토양 B에서 가장 큰 폭의 감소를 나타내었고(0.96mg/g), 엽록소 b와 총엽록소 함량의 경우, 토양 A의 pH 2.9 처리구에서 각각 가장 큰 폭으로 감소하였다(엽록소 b: 0.56mg/g; 총엽록소: 1.68 mg/g). 또한 전반적으로 엽록소 a가 엽록소 b의 감소 폭보다 약 2배 더 감소하는 것으로 나타났다.

엽록소 a의 함량은 모든 토양에서 인공산성비의 처리가 지속됨에 따라 감소하는 경향을 보였다. 5월에 측정된 엽록소 a 함량의 경우, 토양 A와 토양 C에서는 대부분 대조구(pH 5.6)에서 가장 높은 함량을 보였으며, 그 외 pH 처리구 별로는 증가하거나 또는 감소하는 경향을 보였다. 그러나 토양 B에서는 측정시기인 5월, 7월, 9월에 각각 pH 2.9, pH 4.9, pH 3.9 처리구에서 그 값이 1.35mg/g, 1.09mg/g, 0.72mg/g으로 가장 높은 엽록소 a의 함량을 나타내었다. 엽록소 b의 함량도 모든 처리구에서 인공산성비의 처리가

Fig. 1. Leaf chlorophyll contents of *L. tulipifera* seedlings treated with four pH levels of simulated acid rain under three soil types.

지속됨에 따라 감소하는 경향을 보이는 엽록소 a의 함량과 유사한 경향을 나타내었다. 또한 측정 시기별 pH 처리에 따른 엽록소 함량의 차이도 엽록소 a의 경향과 유사하였다. 즉, 가장 높은 엽록소 함량은 토양 A와 토양 C에서는 대부분 대조구에서, 토양 B에서는 각각 5월(pH 2.9), 7월(pH 4.9), 9월(pH 3.9)에 나타났다.

세 가지 토양에서 pH 수준별 처리에 따른 총엽록소 함량은 엽록소 a, 엽록소 b와 마찬가지로 인공산성비의 처리가 지속될수록 감소하는 경향을 보였다. 이

Table 1. Significance of the chlorophyll contents of *Liliodendron tulipifera* seedlings treated with four pH levels of simulated acid rain under three soil types

Soil types (ratio)	Month	Chl.-a	Chl.-b	Total Chl.	Chl.-a/b
Soil A (7:3)	MAY	4.08* ¹	3.2	5.30*	2.02
	JUL.	27.39**	12.87**	19.91**	.52
	SEP.	52.48**	20.27**	21.05**	12.38**
Soil B (3:7)	MAY	4.34**	4.26*	19.34**	.54
	JUL.	4.28*	6.30*	7.60**	.26
	SEP.	3.42	6.93*	15.21**	12.38**
Soil C (0:10)	MAY	5.81*	3.11	5.13*	.55
	JUL.	12.48**	2.88	30.14**	9.64**
	SEP.	2.04	2.28	5.83*	1.58

The ratio of commercial soil and forest soil was different: Soil A is 7:3; Soil B is 3:7; Soil C is 0:10.

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

¹F-values.

와 같은 결과는 인공산성비를 pH 2.0과 pH 4.0으로 구분하여 잣나무와 쥐똥나무 유묘에 처리한 결과 처리가 지속될수록 엽록소 함량이 감소했다는 Kim and Cheong(1987)의 결과와 일치한다. 한편, 시기별 총엽록소 함량은 pH 2.9 처리구에서 가장 큰 폭으로 감소하는 경향을 보였고 대부분 대조구와 비교하여 낮은 함량을 보였다. 이는 강한 산도의 인공산성비가 잎의 생리적 활성에 영향을 미쳐 엽록소 함량을 변화시킨 것으로 판단된다. 5월에 측정된 총 엽록소 함량의 경우, 토양 A와 토양 C에서는 대조구에서 가장 높았으며, 토양 B에서는 측정시기인 5월, 7월, 9월에 각각 대조구와 비교하여 pH 2.9, pH 4.9, pH 3.9 처리구에서 가장 높은 엽록소 함량을 나타내었다. 이는 인공산성비에 포함된 황산염과 질산염 등의 무기양분이 잎과 토양을 통해 흡수되어 엽록소 함량의 증가에 영향을 미친 것으로 판단되며, 낮은 산도의 산성비가 영양원으로서 소나무와 개나리 유식물의 엽록소 함량을 증가시킨 보고(Cheong, 1987)와 일치하는 결과이다.

한편, 본 실험 결과 인공산성비 처리가 지속됨에 따른 총엽록소의 함량은 감소하는 것으로 나타났지만, 인공산성비의 산도가 높아짐에 따라 총엽록소의 함량은 규칙적으로 감소하여 나타나지는 않았다. 이와 같은 경향은 인공산성비를 pH 2.5와 pH 4.0의 수준으로 구분하여 은행나무 외 2개 수종에 처리한 결과, pH 수준이 낮아질수록 엽록소의 함량이 규칙적으로 감소하였다는 보고(Oh, 1986)와 은행나무와 곰솔에 대하여 인공산성비를 3개월간 처리한 결과 pH 수준이

낮아짐에 따라 엽록소의 함량이 규칙적으로 감소되었다는 보고(Kim and Soh, 1994)와는 일치하지 않았다. 이는 인공산성비 처리기간, 산성비처리에 따른 식물종간의 상이한 반응이 원인으로 작용했으리라 판단된다.

세 가지 토양에서 인공산성비 처리가 엽록소 함량에 미친 영향을 파악하기 위해 유의성 검정을 실시한 결과 pH 수준별 처리가 엽록소 함량에 대부분 영향을 미친 것으로 나타났다(Table 1). 엽록소 a 함량은 토양 B와 토양 C의 9월을 제외한 모든 처리에서 인공산성비 처리 간에 통계적으로 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다. 엽록소 b의 경우, 토양 A와 B에서 대부분 유의미한 차이를 보였으나, 토양 C에서는 통계적으로 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 그러나 총엽록소 함량의 경우, 모든 토양에서 pH 수준별 처리는 1%와 5% 수준에서 통계적으로 유의미한 차이를 보였다.

엽록소 a와 b의 함량비는 세 가지 토양종류에서 pH 수준별 처리간에 규칙적인, 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다. 이는 잣나무 및 쥐똥나무의 유묘에 대해 pH 수준별로 처리한 결과 엽록소 a와 b 함량비가 일정한 규칙을 보이지 않았다는 보고(Kim and Cheong, 1987)와 유사한 결과이다. 그러나 은행나무와 곰솔에 대해 인공산성비 처리 후 pH 수준이 낮아짐에 따라 엽록소 a/b의 비율은 감소하였다는 보고(Kim and Soh, 1994)와는 일치하지 않는다. 이는 수종의 차이와 인공산성비의 조성, 측정시기의 상이함 등의 연구조건에 기인한 결과라 사료된다. 일반적으로 낙엽성 수종은 시간이 지남에 따라 단풍, 낙엽 등의

원인으로 자연적인 엽록소 함량의 감소를 나타낼 수 있지만, 본 연구에서는 대부분의 처리구에서 엽록소 함량이 대조구의 엽록소 함량에 비하여 상대적으로 낮게 나타났으므로, 자연현상에 의한 엽록소의 감소뿐만 아니라 인공산성비의 처리가 부과적으로 엽록소 함량의 감소에 직접적인 영향을 미쳤다고 판단된다.

3.2. 인공산성비 처리에 따른 잎의 형태적 피해

3.2.1. 월별 엽피해율의 변화

토양종류별로 인공산성비의 처리가 지속될수록 전반적으로 피해율이 증가하는 경향을 보였고, 측정시기별로 피해율의 증감차이를 보이기도 하였다. 토양 A와 토양 B에서의 pH 2.9 처리구는 인공산성비를 처리한 시작시점인 5월부터 6월까지 급격한 피해를 나타내었고(토양 A: 12.6~62.2%; 토양 B: 7.1~57.8%), 그 후 피해율이 완만한 증가를 보였다. 반면, 토양 C에서의 pH 2.9 처리구는 7월까지 엽피해율의 급격한 증가가 계속되었고(토양 C: 9.7~88.4%), 그 후 일정하게 증가하는 경향을 보였다. 다른 수준의 pH 처리구에서도 인공산성비가 지속됨에 따라 엽피해율이 꾸준히 증가하는 경향을 보였으며, 특히, 토양 A에서는 6월과 8월에 급격한 피해증상을 나타내었다(Fig. 2).

매월 측정된 인공산성비 pH 수준별 엽피해율은 대부분 pH 수준이 감소함에 따라 높아지는 경향을 보였으며, pH 2.9 > pH 3.9 > pH 4.9 > 대조구 순으로 높았다. 이와 같은 결과는 4개 수종에 대하여 인공산성비를 처리한 결과 pH 수준이 낮아짐에 따라 엽피해율이 증가했다는 보고(Kim, 1992)와 유사한 경향이라 사료된다. 이것은 인공산성비가 백합나무 묘목의 엽피해에 영향을 미치는 것으로 판단되고, pH 수준이 낮아짐에 따라 백합나무 묘목의 엽피해가 증가한다는 것을 의미한다.

3.2.2. 가시적 엽피해 증상

인공산성비를 처리한 후, pH 2.9와 pH 3.9 처리구의 경우, 새롭게 형성된 잎에 대하여 엽신이 오그라들거나 찌그러진 형태의 기형잎이 다소 나타났다(Fig. 3). 토양종류와 pH 수준별 처리(pH 2.9, pH 3.9)에서 일정한 경향을 보이지 않았는데, 이와 같은 잎의 외부 형태적인 변형의 원인에는 인공산성비 처리 이외에 온도, 토양 등의 제한된 온실환경에 대한 영향도 복합적으로 작용하였을 것으로 사료된다.

Fig. 2. Percentage of damaged leaves of *Liliodendron tulipifera* treated with four levels of simulated acid rain in different soil types.

인공산성비의 처리 시작시점인 5월부터 pH 2.9 처리구의 경우, 소수의 괴사반점이 나타났으며, 이는 세 가지 토양 모두에서 비슷하게 나타나는 경향을 보였다. 반면, 대조구를 포함한 다른 pH 수준별 처리구에서는 괴사반점이 나타나지 않았다. 이와 같은 결과는 몇몇 농작물에 산성비를 처리한 결과 pH 3.0 이하에서 엽신에 괴사반점이 나타난 결과(Percy and Baker, 1987)

Fig. 3. Effects of simulated acid rain on occurrence of deformed leaves of *Liliodendron tulipifera* (A: control; B, C, and D: deformed leaves).

Fig. 4. Effects of simulated acid rain on enhancement of necrotic spots by time course (A: control; B, C, and D: the progress of necrotic spots).

Fig. 5. Effects of simulated acid rain on browning of leaves by time course (A: control; B, C, and D: the progress of browning).

와 유사하였다. 그러나 pH 3.9 처리구에서는 인공산성비 처리가 지속됨에 따라 국소적으로 괴사반점이 나타나기도 하였다. pH 2.9 수준 처리구에서 나타난 괴사반점은 인공산성비 처리가 지속됨에 따라 그 수가 증가하여, 9월에는 잎 전체에서 넓게 나타났다(Fig. 4). 인공산성비 처리에 따른 갈변현상은 세 가지 토양에서 모두 광범위하게 나타났다. 인공산성비 처리 초기에는 엽신의 가장자리와 중앙부위에서 반점형태로 나타나기 시작하였으며, 인공산성비 처리가 지속됨에 따라 점차 피해면적이 늘어났으며, 고사되는 잎도 다수 발생하였다(Fig. 5).

이와 같이 본 공시수종인 백합나무에 대하여 인공산성비를 처리하여 괴사반점과 갈변현상이 나타나고, 인공산성비 처리가 지속됨에 따라 그 피해증후가 심화되는 결과는 인공산성비를 처리한 은행나무와 곰솔 잎에서 pH 수준이 낮아짐에 따라 괴사반점과 갈변현상이 증가하였다는 Kim and Soh(1995)의 연구와 유사한

결과를 나타내었다.

IV. 적 요

인공산성비 처리가 백합나무 묘목의 잎에 미치는 영향을 분석하기 위하여 인공적으로 pH 5.6, 4.9, 3.9, 2.9로 구분된 산성비를 일정기간 처리하여 엽록소 함량, 엽피해율 및 가시적 피해증상을 조사한 결과, 엽록소 함량의 경우, pH 수준 간 통계적으로 유의미한 차이가 나타났으나 pH 수준별 순차적 감소는 나타나지 않았고 인공산성비 처리가 지속됨에 따른 엽록소함량의 감소를 보였다. 또한, 엽록소 함량은 세 가지 토양에서 모두 pH 2.9처리구에서 가장 큰 폭으로 감소하였다. 엽피해율은 인공산성비 처리 초기시점에 급격한 피해를 보이다가 지속적으로 피해가 나타났다. 또한, pH 수준이 낮아짐으로써 엽피해율도 차이를 나타내었으며, 가시적 피해증상으로는 기형잎, 갈변현상, 괴

사반점 형태로 나타났다. 본 연구의 결과를 전반적으로 고려할 때, 인공산성비 처리는 백합나무 묘목의 잎에서 일어나는 광합성작용 및 물리적 피해를 준 것으로 나타났다. 따라서 최근 가로수 및 용재수로 보급 중에 있는 백합나무에 대하여 산성비에 의해 예상되는 내외부 생리적 반응 및 생장에 미치는 영향 등에 관한 체계적이고 부가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 영남대학교 학술조성비 지원을 받아 수행하였습니다.

REFERENCES

- Arnon, D. I., 1959: Copper enzyme in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology* **24**, 1-15.
- Cape, J. N., 1986: Effects of air pollution on chemistry of surface waxes of scots pines. *Water, Air and Soil Pollution* **31**, 393-399.
- Cheong, Y. M., 1987: Simulated acid rain on growth and nutrient contents of *Pinus densiflora* S. et Z. and *Forsythia koreana* nak. seedlings and on chemical properties of the experimental soil. Ph. D. Dissertation. Dongguk University, 70pp.
- Cheong, Y. M., 1988: Effect of simulated acid rain on nutrient contents of *Pinus densiflora* S. et Z. and *Forsythia koreana* Nak. Seedlings. *Journal of Korea Forest Society* **77**(3), 259-268. (in Korean with English abstract)
- Cole, D. W., and D. W. Johnson, 1977: Atmospheric sulfate additions and cation leaching in a Douglas fir ecosystem. *Water Resource Research* **392**, 313-317.
- Evans, L. S., 1980: Foliar responses that may determine plant injury by simulated acid rain. *Polluted Rain*, T.Y. Yoribara, M.W. Miller and P.E. Morow (Eds). Plenum Press, New York, pp. 239-254.
- Evans, L. S., 1984: Botanical aspects of acidic precipitation. *Botanical Review* **50**, 449-490.
- Ferenbaugh, R. W., 1976: Effects of simulated acid rain on *Phaseolus vulgaris* L. (Fabaceae). *American Journal of Botany* **63**(3), 283-288.
- Garsed, S. G., and R. A. Rutter, 1982: Relative performance of conifer populations in various tests for sensitivity to SO₂, and the implications for selecting trees for planting in polluted areas. *New Phytologist* **92**, 349-367.
- Han, S. H., and K. J. Lee, 1997: Buffering capacity of four tree species against soil acidification by acid rain and variations in nutrient leaching from tree crowns. *Journal of Korea Forest Society* **86**(3), 342-351. (in Korean with English abstract)
- Hindawi, I. J., J. A. Rea, and W. L. Griffis, 1980: Response of bush bean exposed to acid mist. *American Journal of Botany* **67**, 168-172.
- Kelly, J. M., and R. C. Strickland, 1986: Throughfall and plant nutrient concentration response to simulated acid rain treatment. *Water, Air and Soil pollution* **29**, 219-231.
- Kim, C. H., and Y. M. Cheong, 1987: Effect of simulated acid rain on the chlorophyll contents in the needles of *Pinus koraiensis* and *Ligustrum obtusifolium* seedlings. *Journal of Plant Biology* **76**(1), 11-16. (in Korean with English abstract)
- Kim, M. R., and W. Y. Soh, 1994: Growth response of *Ginkgo biloba* and *Pinus thunbergii* exposed on simulated acid rain. *Journal of Plant Biology* **37**(1), 93-99. (in Korean with English abstract)
- Kim, M. R., and W. Y. Soh, 1995: Effect of simulated acid rain on foliar structure of changes of *Ginkgo biloba* and *Pinus thunbergii*. *Journal of Plant Biology* **38**(1), 79-86. (in Korean with English abstract)
- Kim, G. T., 1987: 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 University, 46pp.
- Kim, G. T., 1992: Effects of artificial acid rain on seed germination, radicle growth and seedling growth of several woody species. *Journal of Korea Forest Society* **81**(1), 30-39. (in Korean with English abstract)
- Korea Forest Research Institute, 2004: Characteristics and forestation skill on *Liliodendron tulipifera* (II), 8pp.
- Lee, J. J., and D. E. Weber, 1979: The effect of simulated acid rain on seedling emergence and growth of eleven woody species. *Forest Science* **2**, 393-398.
- Lee, J. J., and D. E. Weber, 1982: Effects of sulfuric acid rain on major cation and sulfate concentrations of water percolating through two model hardwood forests. *Journal of Environmental Quality* **11**, 57-64.
- McKinney, G., 1941: Absorption of light by chlorophyll solutions. *Journal of Biological Chemistry* **140**, 315-322.
- Oh, J. H., 1986: Effect of simulated acid rain on the growth of trees and soil. M. S. Thesis. Kyung Hee University, 28pp.
- Percy, K. E., and E. A. Baker, 1987: Effects of simulated acid rain on production, morphology and composition of epicuticular wax and on cuticular membrane development. *New Phytologist* **107**, 577-589.
- Schier, G.A., 1990: Response of yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera* L.) seedlings to simulated acid rain and ozone-2. Effect on throughfall chemistry and nutrients in the leaves. *Environmental and Experimental Botany* **30**(3), 325-331.