

人工酸性雨が 森林土壤의 緩衝能에 미치는 影響¹

閔一植² · 李壽煜³

Effects of Artificial Acid Precipitation on Forest Soil Buffer Capacities¹

Ell Sik Min² and Soo Wook Lee³

要 約

大氣汚染과 酸性雨が 森林土壤의 緩衝能에 미치는 影響을 규명하기 위하여 移動汚染源地域으로 서울地域, 固定汚染源地域으로 蔚山 및 麗川地域 그리고 對照地域으로 江原道 平昌地域에서 土壤試料를 채취하여 人工酸性雨를 處理하고 調査分析한 結果를 考察해 볼 때 다음과 같았다. pH 3.0-5.7 水準의 人工酸性雨에 대하여 土壤溶脫溶液이 나타낸 溶液 pH의 水準은 江原道地域에서 pH 6.2-7.1이었고, 다음이 蔚山으로 pH 3.8-6.0, 麗川은 pH 4.0-5.4, 서울이 pH 4.0-5.5로 나타나므로써 酸性雨에 대한 土壤緩衝能은 江原道가 가장 컸으며 서울이 가장 낮았다. 그러나 pH 2.0의 酸性雨處理에서는 각 地域에서 모두 土壤緩衝能이 급격히 낮아졌다. 人工酸性雨의 處理에 대한 土壤緩衝能은 江原道地域의 경우 花崗岩 地域과 石灰岩地域間의 有意인 差異를 나타냈고 서울과 蔚山地域의 경우 pH 3.0-5.7의 酸性雨에 대해서는 汚染源으로부터 距離가 멀어질수록 土壤緩衝能이 有意의으로 增加하였다. 人工酸性雨處理에 대한 土壤緩衝能의 機作은 江原道地域의 경우 陽이온置換이었으며, 서울地域에서는 pH 3.0 以上の 酸性雨에 대해서는 陽이온置換이 緩衝作用을 主導하였으나 pH 2.0에서는 Aluminum 및 Silicate hydrolysis가 主導하였다. 蔚山地域의 경우 pH 3.0 以上에서는 陽이온置換이, pH 4.5 以下에서는 Aluminum hydrolysis가, 그리고 pH 3.0 以下에서는 Aluminum hydrolysis 및 Silicate hydrolysis가 主導하였다. 麗川地域에서는 pH 4.5에서 Silicate hydrolysis가, pH 4.5 以下에서는 Aluminum hydrolysis가 主導하였다.

ABSTRACT

A research effort has been made to determine soil buffer capacity in forest soils nearby urban and industrialized regions. Buffer capacities of soils from four regions were measured by different pH levels of artificial acid precipitation. The following conclusions have been drawn in response to the overall research objectives. Soil buffer capacity was the highest in Kangwondo followed by Ulsan, Yeochon and Seoul when simulated acid precipitations were treated at the level of pH 3.0-5.7. With the acid precipitation treatment below pH 2.0 level, however, the capacity dropped seriously with no significant differences between the regions. In Kangwondo region soils weathered from granite and limestone showed significant differences in the buffer capacities. Soil collected in Seoul and Ulsan revealed that the capacities tended to increase with the distance from the pollution sources when treated at pH 3.0, 4.5 and 5.7 level of acid precipitation. The major mechanism of soil buffer observed during simulated acid precipitation experiment was cation exchange for Kangwondo forest soils. In Seoul region cation exchange also played an important role in soil buffering under artificial acid precipitation

¹ 接受 1990年 6月 25日 Received on June 25, 1990.

² 中部社會産業大學 Chungbu Socio-Industrial College, Majeon, Chungnam.

³ 忠南大學校 農科大學 College of Agriculture, Chungnam Nat'l Univ., Daejeon.

between 3.0 and 5.7 pH levels, yet under pH 2.0 level aluminum and silicate hydrolysis. In Ulsan cation exchange was a msjor determinant for the buffer capacity above pH 4.5 level, between pH 3.0-4.5 aluminum hydrolysis and below pH 3.0 aluminum and silicate hydrolysis. In Yeochon silicate hydrolysis led buffer capacity above pH 4.5 and below pH 4.5 aluminum hydrolysis.

Key words : Acid precipitation, Forest soil buffer capacity, Cation exchange, Aluminum hydrolysis, Silicate hydrolysis

緒 論

産業革命 이후 近代産業文明의 발달은 人間生活의 편익을 계속 향상시켜 왔다. 우리나라에서도 1960年代 중반이후 産業化가 가속화되면서 化石燃料使用의 急増, 都市의 人口過密化 및 工業團地의 大規模化현상을 가져왔다. 이에 따라 産業工場으로부터의 燃突排出物, 自動車의 排氣가스, 人間生活에 부수되는 汚染物과 같은 각종 公害物質들이 生態界로 移動, 擴散, 流入되고 있다. 이 物質들은 氣體相, 液體相, 固體相의 形態로 自然環境을 汚染시키고 있는데, 특히 大氣圈을 광범위하게 汚染시키고 있다. 이러한 大氣圈內에 浮游하고 있는 汚染物質들은 氣象要因들과 상호복합적인 작용으로 降雨의 形態로 내려 自然環境에 각종 被害를 일으키고 있다. (2,17,21,23)

汚染物質들은 종종 高層大氣圈의 氣象要因들에 의하여 長距離移動하면서 汚染範圍를 擴散시키고 있는데, 현재 그 擴散範圍는 매우 커서 北半球의 産業文明圈을 중심으로 地球村全體의 生態界를 汚染시키고 있는 실정에 있다. (14,40,54) 國內에서도 地域에 따라 大都市 및 大規模 工團地域에서 pH4.2의 降雨가 내리고 있는 것으로 報告되고 있다. (30,40) 局所汚染源으로부터의 酸性雨외에 李等(37)에 의해 中國으로부터 偏西風을 타고 韓國으로 長距離移動하는 酸性雨가 이미 報告된 바 있다. 또한 全國의 降雨 pH도 해가 갈수록 낮아지는 傾向이 뚜렷하며 그 汚染程度도 매우 심각한 상태에 있다고 할 수 있겠다. (44) 全 國土面積의 54%가 花崗岩類의 母岩으로 구성되어 있는 韓國에서는 酸性雨의 被害가 특히 심하게 그리고 급속하게 나타날 것으로 우려되는데, 이는 酸性岩인 花崗岩인 花崗岩母材로부터 생성된 土壤들이 각종 鹽基의 含量이 낮음으로 인해서 酸性雨에 대한 緩

衝能力이 상대적으로 낮은 것으로 알려져 있기 때문이다. (11,43)

大氣汚染物質과 酸性雨가 自然生態界에 投入됨에 따른 被害는 森林地域에서 가장 광범위하고 심각하게 관찰되고 있다. 우선 汚染物質들은 林木生長에 直間接的인 沮害作用을 일으킨다. (16,52) Gas와 먼지 등에 含有되어 있는 여러종류의 重金屬(Cu, Pb, Cd, Zn 등)들이 土壤에 蓄積되었다가 植物體內로 吸收되기도 하는데 吸收된 重金屬類는 可溶態로 變換되어 細胞內 原形質의 蛋白質과 結合하여 細胞를 파괴시키고 酵素의 作用抑制 및 呼吸作用과 관련된 여러가지 生理的 作用을 沮害한다. (13,57) 또한 林木生育環境의 매우 중요한 요소인 森林土壤의 地力을 弱화시키기도 하는데 이는 森林生態界로 酸性雨에 의한 水素이온이 大量 投入되어 林木生長에 필수적인 陽이온들을 置換, 溶脫시키기 때문이다. (6,18,19) 그 결과 森林土壤內에 植物의 生長에 필요한 養料가 枯渴되어 林木의 生育이 沮害된다. (42,47,48) 각종 陽이온과 毒性金屬이온들이 溶脫된 후 地下水, 河川 및 湖水를 汚染시켜 水接昆蟲들과 魚類들을 滅種시키기도 한다. (4,22,25,26,36,49) 유럽과 北美大陸에서는 數千個의 湖沼가 酸性化로 인해 魚類가 이미 滅種되었으며, 森林에서도 심할 경우 林木枯死現像이 광범위하게 발생하고 있을 정도로 被害의 양상이 다양하고 심각하다. 國內와 外國에서도 林木의 大氣汚染 및 酸性雨에 의한 反應을 測定하기 위하여 實驗室의 또는 現場調査 等の 方法을 통하여 활발한 研究가 進行되어 왔다. 그 研究傾向은 大都市地域의 街路樹에 대한 被害程度를 測定하였고, (9,35,45) 苗木에 人工酸性雨를 處理하여 苗木組織內의 變化나 生長量을 調査 하였고, (12,15,27,28,29,31,39,39,50,52) 工團地域의 大氣汚染度에 따른 擴散範圍와 林木들의 物質生産과 汚染源부근 森林에 분포하는 植生의 種多樣度의 變化 等に 관한 研究結果 (32,33,34,46,47) 등이 있다.

그러나 汚染源으로부터 距離에 따른 土壤養料의 動態에 대한 變化 및 淸淨地域의 花崗岩과 石灰岩地域에서의 人工酸性雨處理에 대한 反應調査는 아직 研究되지 않았다.

本 研究는 大氣汚染物質 및 酸性雨が 森林生態界에 미치는 影響을 森林土壤養料의 動態를 통하여 규명하고자 대부분의 上流水源地域을 점유하고 있는 森林生態界內의 森林土壤에 대하여 人工酸性雨에 의한 溶脫實驗을 통하여 各 地域別로 緩衝能力을 測定하고 그 機作을 밝히는데 目的이 있다.

材料 및 方法

1. 調査對象地

大氣汚染과 酸性雨が 森林生態界에 미치는 影響을 평가하기 위해서 汚染源을 特性別로 분류하고, 汚染地域과 非汚染地域의 土壤을 比較分析할 필요가 있다. 우선 汚染源의 特性을 汚染物質은 排出되는 形態에 따라 固定汚染源과 移動汚染源으로 분류하였고, 固定汚染源은 工場과 産業施設이 밀집되어 있는 곳으로 주로 固定된 場所에서 지속적 으로 同質의 汚染物質이 排出되는 곳으로 보았으며, 移動汚染源은 많은 數의 각종 車輛 等の 排氣 가스로 인하여 汚染되는 곳으로 보았다.^{3,24)}

本 研究에서는 移動汚染源地域으로 서울地域이 선정되었으며, 固定汚染源地域으로서는 全南 麗川 地域과 慶北 蔚山地域이 선정되었다. 이러한 汚染源의 特性에 따라 各 地域에서 森林生態界內의 汚染傾向의 擴散模型을 汚染源으로부터 主風方向을 고려하여 森林植生分布에 따라 針葉樹林 및 闊葉 樹林으로 분류하여 試驗調査區를 배치설정하였다. 各 調査地域別로 설정한 調査區數는 서울地域에 6 個, 蔚山地域에 7個, 麗川地域에 5個의 試驗調査區가 설정되었으며, 對照地域으로는 비교적 淸淨

地域이라 생각되는 江原道 平昌地域에 5個의 試驗 調査區가 설정되었다. 各 調査對象地의 分布 및 各 調査地域別로 설정한 試驗區數는 Table 1과 같다.

2. 土壤緩衝能調査

酸性雨が 森林土壤에 投入됨에 따라 多量의 水素이온이 土壤內에 존재하는 置換性陽이온을 置換시키고, Aluminum 및 Silicate의 Hydrolysis를 발생시켜 土壤水中에서 Hydrogen ion balance에 變化가 일어난다. 이들 反應에 의하여 投入된 水素이온에 대하여 土壤緩衝能이 영향을 받는데 土壤中 水素이온의 生産 및 消費量을 조사하기 위해 人工酸性雨를 實驗室에서 調製하여 各 調査地域으 로부터 채취해온 土壤에 處理하여 溶脫實驗을 실시하였다.

人工酸性雨의 特性은 吳 等⁴⁴⁾이 工團地域 및 都市地域의 降雨成分을 측정한 자료를 참고하였다. 이들은 酸性雨의 主成分인 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 에 대해 工團地域과 都市地域에서 내리는 降雨成分을 조사하였는데, 1986년부터 1988年 사이에 都市 地域, 工團地域 및 山岳地域에서 내린 降雨의 平均pH는 각각 4.44, 5.09, 5.93이었으며, SO_4^{2-} 와 NO_3^- 의 含量은 都市地域에서는 각각 9.72ppm, 2.31ppm 이었고, 工團地域에서는 각각 7.88ppm, 2.22ppm 이었다고 하였다. 이 結果를 기초로 하여 本 實驗에서는 人工酸性雨의 成分을 (0.1N-) $H_2SO_4 : HNO_3 = 4 : 1$ 의 比率로 調製하였다. 降雨의 酸性度에 따라 여러 養料의 溶脫水準이 다르게 나타나므로 人工酸性雨의 pH水準은 pH 4.5, pH 3.0, pH 2.0으로 하였고, 正常降雨水準은 pH 5.7로 하였다.

各 pH 水準別 人工酸性雨의 處理量은 韓國의 年平均 降水量을 1200mm로 假定하여 直徑 5cm

Table 1. Distribution of sample plots in each investigated region.

Region		Seoul	Yeochon	Ulsan	Kangwondo
Limestone	Deciduous				1
	Coniferous				1
Granite	Deciduous	3		2	2
	Coniferous	3	5	1	1
Shale	Deciduous			2	
	Coniferous			1	
Sandstone	Deciduous			1	
	Coniferous				

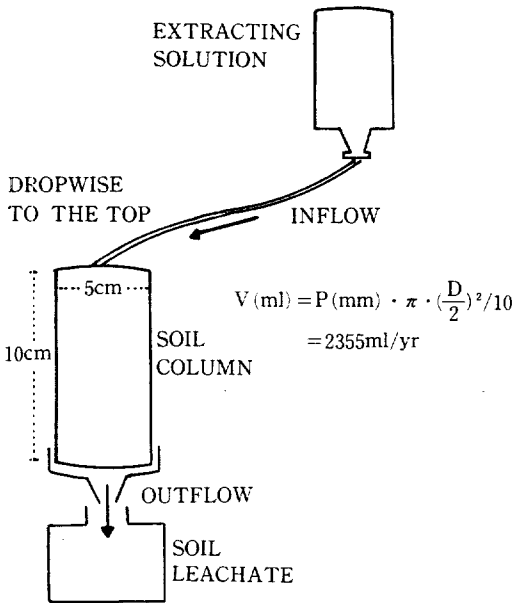


Fig. 1. Diagram of soil leaching experiment for soil buffer capacity

圓桶에 이에 해당하는 1年間 降水量의 體積 約 2,300ml의 人工酸性雨溶液을 時間當 20ml씩 圓桶에 充填된 土壤에 點滴시킨 후 土壤溶脫溶液을 圓桶下部에 설치한 Plastic 桶에 수집하였다. 이것의 實驗模型 그림은 Fig. 1과 같다. 試料土壤은 각 地域 調查區에서 土壤層位別로 채취한 다음 風乾시켜 2mm체로 체별한 후 直徑 5cm, 높이 10cm인 Plastic column에 각 調查區의 土壤假比重을 근거로 充填시켰다. 이 때 充填시킨 試料土壤의 무게와 容積比는 서울地域土壤은 A1層이 1.08 g/cm³, B層이 1.20 g/cm³, 麗川地域土壤은 A1層이 1.14 g/cm³, B層이 1.22 g/cm³, 蔚山地域土壤은 A1層이 1.11 g/cm³, B層이 1.16 g/cm³, 江原道地域土壤은 A1層이 0.99 g/cm³, B層이 1.10 g/cm³이었다.

Plastic 桶에 수집된 土壤溶脫溶液은 緩衝能力의 水準을 分析하기 위하여 pH를 측정하였고, 水素이온에 의해 置換되는 각종 이온들의 量을 조사하기 위해 置換性陽이온(Ca, Mg, Na : Atomic absorption spectrophotometer, K : Flame photometer), Aluminum(Aluminum 比色法, 土壤化學分析法 18-2), Silicate(Aluminum molybdate法, 土壤化學分析法 24-2-2)를 測定하였다.

結果 및 考察

大氣汚染과 酸性雨로 인하여 土壤中에 水素이온이 投入되어 土壤 pH가 낮아질때 土壤粘土鑛物表面의 擴散二重層内部에 吸着되어 있는 각종 鹽基들은 水素이온과 置換이 일어나면서 투입된 水素이온으로 인한 pH 減少에 대한 抵抗이 발생하게 된다. 이 作用이 土壤의 緩衝能(Buffer capacity)의 主要機作이며 土壤內에서 발생하는 Proton consumption의 主機能이 되는 것이다. Bockheim 등^{6,7)}에 의하면 이러한 土壤中에서 일어나는 Proton consumption의 과정은 다음과 같이 세가지로 요약된다고 하였다.

- (1) Cation exchange
Colloid-M⁺ + H⁺ = Colloid-H⁺ + M⁺
- (2) Aluminum hydrolysis
Al(OH)₃ + 3H⁺ = Al³⁺ + 3OH⁻
- (3) Silicate hydrolysis
MAiSiOn + H⁺ = M⁺ + Al³⁺ + Si(OH)₄

[M = a nonhydrolyzable cation (eg, Na, K)]
汚染地域에 대해서 이상과 같은 作用에 의한 土壤의 緩衝能力을 조사하기 위해서 汚染地域들로부터 채취된 土壤에 人工酸性雨를 투입한 후 溶脫溶液을 採取分析하였다. 人工酸性雨는 吳等⁴⁾이 조사한 大都市와 工團地域의 降雨中 汚染物質들의 濃度比率을 기초로 하여 調製하였으며, 人工酸性雨의 投入量은 우리나라의 年平均降水量을 1,200 mm로 假定하여 2,356ml/column를 投入하였다. 이때 人工酸性雨의 處理水準은 pH2.0, pH3.0, pH4.5, pH5.7 이었다.

각 地域에서 污染源으로부터의 距離別로 채취한 土壤에 대하여 人工酸性雨를 處理, 測定한 土壤溶脫溶液의 pH는 Table 2와 같다. 江原道地域의 土壤은 他地域土壤과의 比較值로서 이용하기 위하여 林相別 및 母岩別로 채취분석하였다. Table 2에 나타난 각 地域에서의 土壤溶脫溶液의 pH는 각 pH 處理水準別로 3 反復을 실시하였다. 서울, 蔚山, 麗川地域의 경우 각각 污染源으로부터의 距離別로 土壤溶脫溶液 pH와의 線型回歸關係를 분석하였으며 그 回歸式은 Table 3과 같다. 반면 江原道地域土壤은 調查區의 특성상 母岩別 및 針闊

Table 2. Soil leachate pH by extracting solution of four pH levels treated on soils which collected by distance from pollution source

Region	pH of extraction solution plots	2.0	3.0	4.5	5.7	Remarks
		Seoul	2km	2.55	4.33	
	8	2.57	3.97	4.36	4.36	Mixed (")
	18	2.60	4.20	5.49	5.13	Coniferous (")
	32	2.93	4.65	4.89	5.30	Deciduous (")
Yeochon	0.5km		4.03	4.70	4.89	Coniferous (granite)
	6		4.24	4.81	5.15	" (")
	8		4.18	5.21	5.37	" (")
Ulsan	0.5km	2.0 \geq	3.82	4.58	4.63	Mixed (granite)
	3		4.13	5.10	5.04	Deciduous (shale)
	6		4.18	4.75	4.79	Coniferous (shale)
	11		4.62	5.14	5.10	Deciduous (sandstone)
	23		6.02	6.01	6.38	Deciduous (shale)
	34		4.65	5.30	5.32	Deciduous (granite)
Kangwondo	Undooryeong	3.13	6.28	6.44	6.65	Deciduous (granite)
	Pyungchang-up	3.48	6.92	7.04	7.13	Deciduous (limestone)
	P. Shinri	3.09	6.15	6.64	6.76	Coniferous (granite)
	P. Haanmiri	3.18	6.35	6.75	6.82	Coniferous (limestone)
	Significance	* *	* *	* *	* *	

Plots of Kangwondo are not arranged by distance from pollution source.

* * : 1% Significance level

Table 3. Regression equation and significance of soil leachate pH by distance from the pollution source in Seoul, Yeochon and Ulsan region.

	pH level	Regression Equation	Significance
Seoul	2.0	-	ns
	3.0	$Y = 3.57 + 0.035X$	*
	4.5	$Y = 4.30 + 0.028X$	*
	5.7	$Y = 4.21 + 0.037X$	*
Yeochon	3.0	-	ns
	4.5	-	ns
	5.7	-	ns
Ulsan	2.0	-	ns
	3.0	$Y = 4.00 + 0.041X$	* *
	4.5	$Y = 4.77 - 0.030X$	* *
	5.7	$Y = 4.21 + 0.037X$	* *

Y : Soil leachate pH

X : Distance from the pollution source

* * : 1% significance level

* : 5% significance level

ns : no significance

葉樹林相別로 pH 處理水準에 따른 反應程度를 비교하기 위해 分散分析을 실시하였다.

江原道地域의 4個調査區中 石灰岩地域土壤의 土壤溶脫溶液 pH는 花崗岩地域土壤에서보다 높았는

데, 이는 母岩으로부터 공급되는 Ca 이온때문이며, 같은 母岩地域일 경우 闊葉樹林土壤이 針葉樹林土壤에서보다 pH가 높게 나타났다. 이것은 闊葉樹林土壤에서 보다 큰 Proton consumption 효과가 있는 것으로 思料된다. ^{10,15,20,41)} 서울 및 蔚山과 같은 大都市 및 工團地域土壤에서는 汚染源으로부터 距離가 멀어질수록 土壤溶脫溶液의 pH는 점차 높아지고 있다. 이것은 李等³⁸⁾의 報告에서 나타난 바와 같이 서울 및 蔚山地域에서 距離에 따른 土壤 pH의 變化和 밀접한 관계가 있는 현상으로서 汚染源에 가까와질수록 酸性雨에 대한 土壤緩衝能이 낮다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 그러나 pH 2.0 處理에서는 서울 및 蔚山地域土壤이 공히 距離에 따른 土壤溶脫溶液의 pH 差異에 有意性이 인정되지 않는 것으로 보아 이들地域土壤에서는 광범위하게 緩衝能이 限界點에 도달되어 있는 것을 알 수 있다. 그러나 江原道地域에서는 pH 2.0 處理에서도 調査區間에 有意性이 인정되었는데, 이는 花崗岩土壤과 石灰岩土壤間的 母岩의 差異가 人工酸性雨 處理時 土壤溶脫溶液의 pH 水準에 뚜렷한 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다. ^{5,43)} 또한 麗川地域에서는 距離에 따른

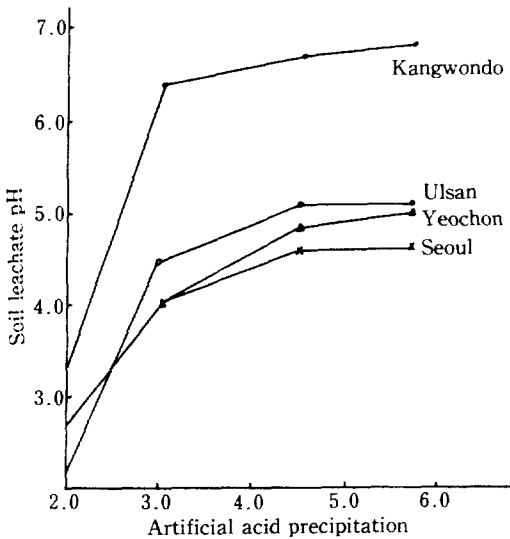


Fig. 2. Change of soil leachate pH by artificial acid precipitation in four regions

土壤溶脫溶液의 pH水準의 差異가 有意性이 인정되지 않았는데 이는 污染源으로부터의 영향이 이미 全 調査地域에 대해서 均일한 정도로 심하게 미친 것으로 思料된다.

4個地域에 대한 人工酸性雨 處理別 土壤溶脫溶液 pH의 變化를 보면 Fig.2와 같다. 土壤溶脫溶液의 pH는 4個地域 모두 强酸性의 人工雨(pH 2.0)를 처리했을때 가장 낮았고 pH가 增加함에 따라 土壤溶脫溶液의 pH가 增加하였다. Fig. 2에서 處理溶液의 pH가 3.0水準以下에서 모든 土壤溶脫溶液의 pH가 급격히 減少하는 것으로 보아 4個地域土壤은 모두 pH 3.0 以下の 酸性雨에 의해서는 緩衝能이 限界點에 넘어서는 것으로 思料된다. 이것은 吳 等⁽⁴⁴⁾의 調査에서도 나타난 것처럼 우리나라 汚染地域內의 降雨 pH가 점차 낮아지게 될 경우 앞으로 酸性雨에 대한 土壤緩衝能의 현저한 減少가 나타날 것임을 암시해 주고 있다고 보겠다.

각 地域別로 土壤溶脫溶液의 pH를 보면 江原道가 제일 높고 다음이 蔚山, 麗川, 서울順이었다. 즉 pH 5.7 處理에서 土壤溶脫溶液의 pH는 江原道, 蔚山, 麗川, 서울順으로 각각 pH 6.84, 5.13, 5.07, 4.64 이었고, pH 4.5 處理의 경우는 각각 pH 6.72, 5.10, 4.86, 4.62 이었으며, pH 3.0 處理의 경우는 각각 pH 6.42, 4.46, 4.12,

3.97 이었다. 그러나 pH 2.0 處理에서는 이와 다르게 나타났는데 江原道가 pH 3.32, 서울이 pH 2.63, 蔚山이 pH 2.0으로 나타났다. 이와 각 地域別로 森林土壤에 미친 大氣汚染과 酸性雨에 의한 장기적인 酸堆積(Acid accumulation)의 영향으로 인한 差異때문인 것으로 思料된다. 따라서 江原道地域은 母岩의 영향도 있겠으나 아직 汚染의 영향이 적었음으로 인하여 pH 3.0의 强酸性人工雨의 處理에 의하여도 土壤溶脫溶液이 pH 6.0以下로 떨어지지 않을만큼 緩衝能을 보유하고 있다고 보겠다. 반면 다른 汚染地域에 있어서는 酸性雨로 인한 土壤酸性化로 緩衝能이 심히 弱화되어 있어 土壤有機物の 保存 및 石灰의 施用 등과 같은 緩衝能提高을 위한 조치가 시급히 요구된다고 할 수 있겠다.

각 地域의 土壤에 人工酸性雨를 처리했을 때 土壤溶脫溶液內 置換性陽이온 (Ca, Mg, Na, K)과 Aluminum 및 Silicate의 含量의 變化는 Fig. 3, 4, 5, 6과 같다. 서울地域의 경우 (Fig. 3) pH 3.0以上處理에서는 土壤溶脫溶液中 水素이온과 置換되어 溶脫된 置換性陽이온의 含量이 가장 높았으나, pH 2.0 處理에서는 Aluminum과 Silicate 含量이 높아졌다. 이것은 pH 3.0-5.7의 酸性雨 영향하에서는 水素이온의 消費機作이 주로 粘土表面에 吸着된 置換性陽이온에 의해서 이루어졌으며, pH 2.0 處理의 溶液에서는 陽이온類들의 置換보다는 주로 粘土의 Silica板과 Alumina板 結晶格

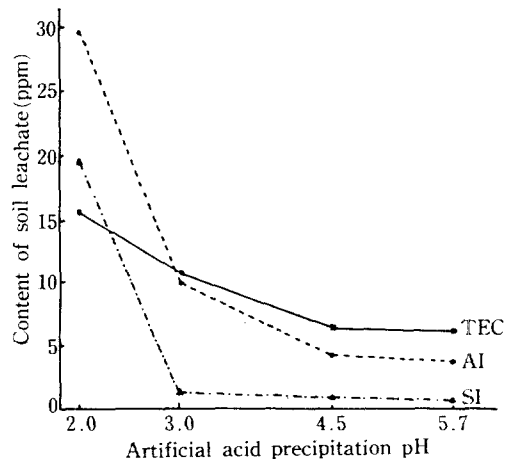


Fig. 3. Change of total exchangeable cations (TEC), aluminum and silicate content in soil leachate in Seoul region.

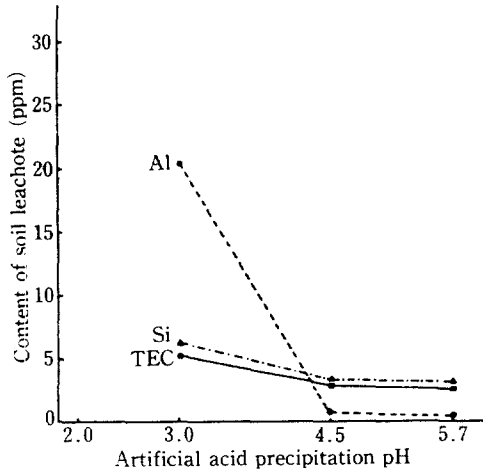


Fig. 4. Change of total exchangeable cations (TEC), aluminum and silicate content in soil leachate in Yeochon region.

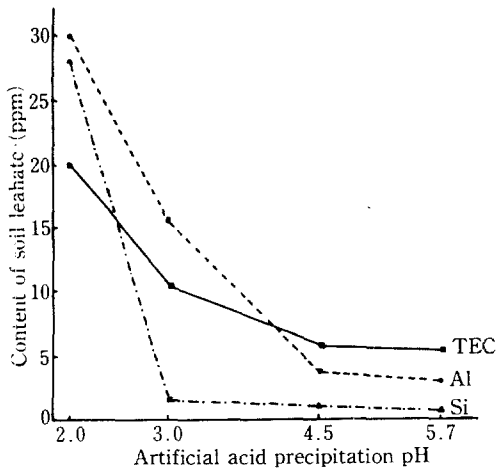


Fig. 5. Change of total exchangeable cation (TEC), aluminum and silicate content in soil leachate in Ulsan region.

子内の Si^{4+} 와 Al^{3+} 를 遊離시키는 것으로 推定된다. 麗川地域의 경우 (Fig. 4)는 pH 4.5-5.7 處理에서 陽이온의 溶脫量이나 Silicate의 溶出量보다는 Aluminum의 溶出量이 매우 낮게 나타나고 있었다. 다른 地域과는 구별되게 麗川地域에서는 pH 4.5-5.7 處理에서는 Proton consumption을 主導하는 것은 Silicate hydrolysis 와 Cation exchange 였으며 Aluminum hydrolysis의 役割이 매우 낮았다. 그러나 pH 3.0 處理에서는 여타地域에서와 같이 Aluminum hydrolysis가 主導했고 Silicate와 陽이온의 役割은 비교적 낮았다. 蔚山

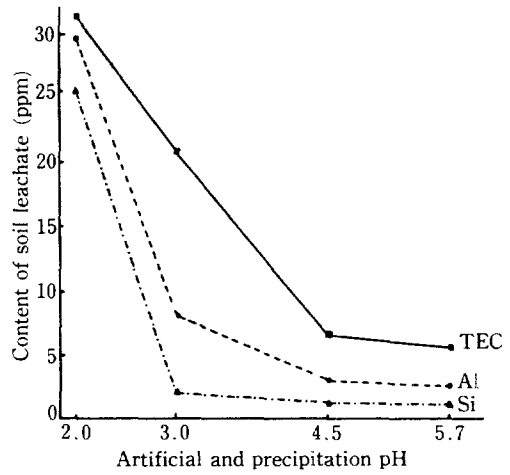


Fig. 6. Change of total exchangeable cations (TEC), aluminum and silicate content in soil leachate in Kangwondo region.

地域의 경우 (Fig. 5)는 pH 4.5-5.7 處理에서 陽이온의 溶脫量이 가장 많았고, pH 3.0 處理에서는 Aluminum 과 Silicate의 濃도가 가장 높았다. 이것은 같은 工團地域인 麗川地域과는 對照를 이루고 있으며 서울地域과는 비슷한 현상을 나타내고 있다. 江原道地域의 경우 (Fig. 6) 전체 pH 處理水準에서 公히 陽이온의 含量이 가장 높았고, 다음이 Aluminum, Silicate의 順이었다. 이는 李等⁽³⁸⁾의 報告에서 나타난 바와 같이 鹽基飽和度와 밀접한 관계가 있는 것으로 江原道地域에서 풍부한 각종 土壤鹽基들에 의해서 土壤緩衝能이 主導되고 있음을 나타내고 있다. 동시에 Aluminum과 Silicate hydrolysis의 役割도 pH 2.0 水準에서는 매우 높은 것이 주목된다.

以上을 종합적으로 考察해 보면 pH 4.5에서 pH 5.7 處理까지는 麗川地域을 제외하고 서울, 蔚山, 江原道地域 모두에서 土壤溶脫溶液中 陽이온의 溶脫이 가장 많았으며, 다음이 Aluminum 이었고, Silicate 가 가장 낮은 水準이었다. 서울과 江原道地域의 경우는 pH 3.0-5.7 處理水準에서 陽이온의 溶脫量이 Aluminum 이나 Silicate보다 많은 것으로 보아 Hydrogen ion consumption 이 주로 陽이온의 置換에 의하여 이루어지는 것을 알 수 있으며, 蔚山과 麗川地域의 경우는 陽이온의 作用보다는 Aluminum에 의한 영향이 더욱 큰 것을 관찰할 수 있다. pH 2.0 處理에서는 全地域 公히 Aluminum의 含量이 크게 增加하였으며,

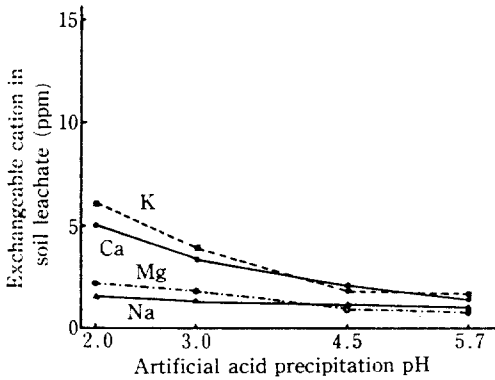


Fig. 7. Change of exchangeable cations in soil leachate by artificial acid precipitation in Seoul region.

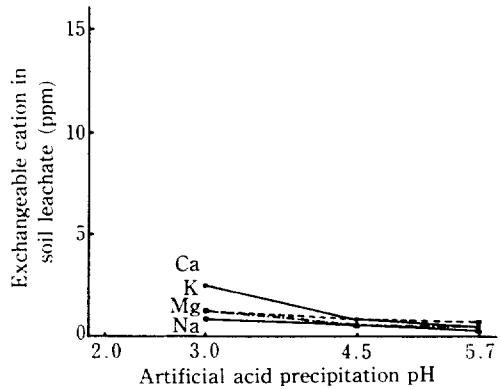


Fig. 8. Change of exchangeable cations in soil leachate by artificial acid precipitation in Yeochon region.

Silicate도 麗川을 제외하고는 모든 地域에서 크게 增加하기 시작하였다. 이를 보아 pH 2.0 處理水準에서는 陽이온에 의한 置換作用보다는 Aluminum 과 Silicate hydrolysis에 의한 영향이 더 크게 寄與하고 있음을 알 수 있다. 이 研究結果는 Ulrich⁵⁶⁾의 研究와도 일치하는데, Ulrich에 의하면 土壤內에서 pH 處理範圍에 따라 水素이온이 첨가될 때 緩衝作用은 中性溶液處理(pH 6.5-8.3)에서는 Ca에 의한 置換作用이 主導하였으며, 弱酸溶液處理(pH 5.0-6.5)에서는 Aluminum에 의한 緩衝이 시작되다가 強酸溶液處理(pH 3.0-5.0)에서는 Aluminum 이 緩衝作用을 主導하였다고 하였다. 以上을 綜合하여 볼 때 工團地域의 경우 降雨 pH가 4.0 以上으로 떨어질 경우 土壤中 毒性 Aluminum의 溶脫이 급격히 增加하여 地下水를 汚染시킬 可能性이 있는 것으로 思料되며 서울과 江原道の 경우는 pH 3.0 以下에서 Aluminum의 溶脫이 크게 增加할 것으로 예상된다.

各 地域의 土壤에서 人工酸性雨處理에 따른 土壤溶脫溶液中 各 置換性陽이온의 變化는 Fig. 7, 8, 9, 10과 같다. 서울地域의 경우(Fig. 7) 溶脫溶液中 置換性陽이온含量의 크기는 대체로 K, Ca, Mg, Na 順이었다. K의 量이 제일 많은 것은 이 地域의 花崗岩이나 片麻岩의 主要造岩鑛物인 正長石(KAlSi₃O₈)이 風化될 때 供給되는 K로 인하여 土壤中 K의 含量이 가장 높게 나타나는 것으로 思料된다. 麗川地域의 경우(Fig. 8) 置換性陽이온의 含量順位는 Ca, K, Mg, Na 順이었으나, 全體地域中에서 가장 낮은 水準이었으며,

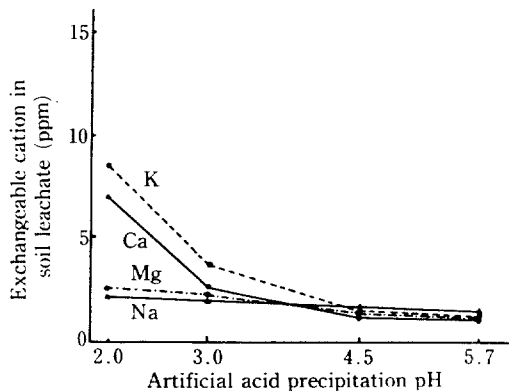


Fig. 9. Change of exchangeable cations in soil leachate by artificial acid precipitation in Ulsan region.

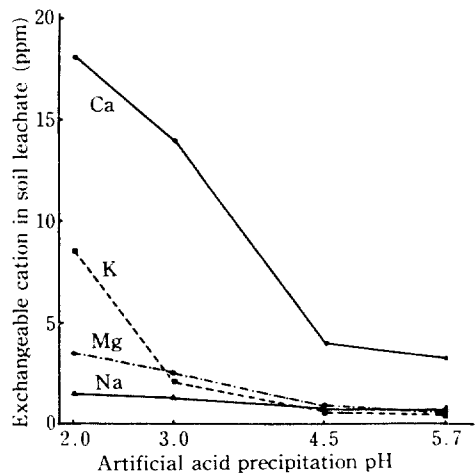


Fig. 10. Change of exchangeable cations in soil leachate by artificial acid precipitation in Kangwondo region

이 地域의 경우 Fig.4에서와 같이 水素이온 첨가 시 緩衝作用이 주로 Aluminum hydrolysis에 의하여 主導되며 陽이온에 의한 영향은 다른 地域에 比較하여 매우 낮은 水準이었다. 蔚山地域의 경우 (Fig. 10) 서울地域과 類型이 비슷하게 나타났으며, 溶脫溶液中 置換性陽이온의 含量順位는 K, Ca, Mg, Na 順이었다. 江原道地域의 경우 (Fig. 10) 土壤溶脫溶液中 置換性陽이온含量的 크기는 Ca, K, Mg, Na 順이었다. 이 중 Ca의 含量은 다른 이온들보다 매우 높게 나타나고 있는데 이는 母岩(石灰岩)으로부터의 Ca 供給의 영향으로 置換反應時 全 pH 處理에서 주로 Ca가 作用할 것으로 思料된다. ^{1,6, 7,51,56)}

以上에서의 結果와 함께 吳 等⁴⁴⁾의 調査에 의하면 우리나라의 平均降雨 pH가 점차 減少해가고 있고, 李 等⁴⁸⁾의 調査에서 보는 바와 같이 土壤 pH 역시 점차 減少해가는 추세로 보아 森林土壤의 酸性化에 대한 對策이 切실히 要求되고 있는 바, 土壤內의 緩衝能을 提高시키기 위해서는 Aluminum 이나 Silicate hydrolysis에 의한 것보다 Ca의 置換에 의한 酸度矯正의 效果가 크기때문에 앞으로 土壤酸性化에 대비하여 石灰施用等이 實行되어야 할 것이며 동시에 보다 근본적인 方法으로는 土壤有機物의 높은 緩衝力을 活用하는 方法이 모색되어야 할 것이다.

結 論

大氣汚染과 酸性雨が 森林生態界內 土壤緩衝能에 미치는 影響을 究明하기 위하여 移動汚染源地域으로 서울地域, 固定汚染源地域으로 蔚山 및 麗川地域 그리고 對照地域으로 江原道 平昌地域을 설정하여 土壤을 採取分析한 結果를 高찰해 볼 때 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

(1) pH 3.0-5.7 水準의 人工酸性雨에 대하여 土壤溶脫溶液이 나타낸 pH의 水準은 江原道地域 土壤에서 pH 6.2-7.1로서 가장 높았으며 다음이 蔚山으로 pH 3.8-6.0, 麗川은 pH 4.0-5.4, 서울이 pH 4.0-5.5로 가장 낮은 水準을 보이므로 酸性雨에 대한 土壤緩衝能은 江原道가 가장 컸으며 서울이 가장 낮았다. 그러나 pH 2.0의 酸性雨處理에 의해서는 각 地域에서 모두 土壤緩衝能이 급

격히 낮아졌다.

(2) 人工酸性雨의 處理에 대한 土壤緩衝能은 江原道地域의 경우 花崗岩地域과 石灰岩地域間의 有意의인 差異를 나타냈고 서울과 蔚山地域의 경우 pH 3.0-5.7의 酸性雨에 대해서는 汚染源으로부터 距離가 멀어질수록 土壤緩衝能이 有意의으로 增加하였다.

(3) 人工酸性雨處理에 대한 土壤緩衝能의 機作은 江原道地域의 경우 陽이온置換이었으며, 서울地域에서는 pH 3.0 以上の 酸性雨에 해서는 陽이온置換이 緩衝作用을 主導하였으나 pH 2.0에서는 Aluminum 및 Silicate hydrolysis가 主導하였다. 蔚山地域의 경우 pH 4.5 以上에서는 陽이온置換이, pH 4.5 以下에서는 Aluminum hydrolysis가, 그리고 pH 3.0 以下에서는 Aluminum 및 Silicate hydrolysis가 主導하였다. 麗川地域에서는 pH 4.5에서 Silicate hydrolysis가, pH 4.5 以下에서는 Aluminum hydrolysis가 主導하였다.

引 用 文 獻

1. Abrahamson, G., R. Hornvedt and B. Tveite. 1975. Impacts of acid precipitation on coniferous forest ecosystems, in "Proceedings of the 1st international symposium on acid precipitation and forest ecosystem" Columbus, Ohio, USA : pp.991-1010.
2. Anderson, A. 1978. Atmospheric heavy metal deposition in the Copenhagen area. *Environmental Pollution* 17(2) : 133-151.
3. Babich, H. and D.L. Davis. 1980. Acid precipitation-Part 1. Causes and consequences. *Environment* 22(4) : 6-13, 40-41.
4. Bache, B.W. 1980. The acidification of soils, in "Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems" Plenum Press, New York. pp.183-202.
5. Bache, B.W. 1980. The sensitivity of soils to acidification, in "Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems" Plenum Press, New York. pp.569-572.
6. Bockheim, J.G., J.E. Leide and R.B. Corey. 198-. Effects of acidic precipitation on a forested entisols. I. Laboratory leaching studies. *Soil Sci.*

- Amer. J.
7. Bockheim, J.G., J.E. Leide and D.A. Wantz. 198-. Effects of acid precipitation on a forested entisols. II. Thermodynamic stability indices from chemical modeling. Soil Sci. Ameri. J.
 8. Budiansky, Stephen. 1980. Acid rain and the missing link. Enviromental Sci. and Tech. 14(10) : 1171-1173.
 9. 車鐘煥. 1974. 環境汚染防止를 위한 植生の 生態學的 研究(III)-道路邊 植生과 重金屬含量 및 汚染에 관한 研究. 植物學會誌 17(4) : 158-162.
 10. Chen, C.W. et al. 1983. Acid rain model. J. of Envir. Engin. 109 : 585-603.
 11. 趙成鎮·朴天緒·嚴大翼. 1987. 土壤學. 鄉文社
 12. 鄭龍文. 1987. 人工酸性雨が 잣나무 苗木의 生長, 葉內 含有成分 및 土壤의 化學的 性質에 미치는 影響. 韓國林學會誌 76(1) : 33-40.
 13. Cowling, E.B. and C.V. Davey. 1981. Acid precipitation : Basic principles and ecological consequences. Pulp and Paper 55 : 182-185
 14. Dittenhoefer, A.C. and B.F. Deither. 1975. The precipitation chemistry of Western New York States : A meteorological interpretation. Report No. GBA 17674. Cornell Univ., Ithaca, New York.
 15. Farifa, J.A.W. and N.W. Lepp. 1975. Effects of simulated acid rain on cation loss from leaves. Nature 255 : 324-325
 16. Ferenbaugh, M. and W. Roger. 1976. Effects of simulated rain on phaseolus Vulgaris L. (Fabaceae). Amer. J. Bot. 63(3) : 283-286.
 17. Galloway, J.N. and E.B. Cowling. 1978. The effects of precipitation on aquatic and terrestrial ecosystems : A proposed precipitation chemistry network. Air Pollution Control Asso. J. 28(3) : 229-236.
 18. Glass, N.R. 1979. US Fedral program on effects of acid rain. Acid rain : Proceedings of ASCE National Conversation. Amer. Soc. of Civil Engineers, New York pp.92-110.
 19. Gorham, E. and W.W. McFee. 1980. Effects of acid deposition upon outputs from terrestrial to aquatic ecosystems. in "Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems" Plenum Press. New York pp.465-480.
 20. Grodzinska, W. 1975. Acidity of tree bark as a bioindicator of forest pollution in Southern Poland. in "Preceedings of the 1st international symposium on acid precipitation and forest eco-systems" Columbus, Ohio, USA : 905-912.
 21. Hegg, D.A. 1983. Sources of sulfate in precipitation-Part 1. Parameterization scheme and physical sensitivities. J. of Geophysical Res. 88 : 1369-1374.
 22. Hendrey, G.R. et al. 1976. Acid precipitation : Some hydrobiological change. Ambio. 5 : 224-228.
 23. Hidy, G.M. 1983. Precipitation-scavenging chemistry for sulfate and nitrate from the sure and related data. EPRI-EA-1914-V. 2. Environ. Res. and Tech. Inc. Westlake Village, California
 24. Hurchinson, T.C. 1971. The occurence of lead, cadmium, nickel, vanadium and chloride in soils and vegetation of Toronto in related to trafic density. Can. Bot. Asso. and the Amer. Inst. of Bio. Sci., Joint Meeting, Alberta, Canada.
 25. Johnson, A.H. and T.C. Siccama. 1983. Acid deposition and forest decline. Envir. Sci. and Tech. 17(7) : 294-305.
 26. Johnson, A.H. and T.G. Siocama. 1984. Decline red spruce in the Northern Appalachians : Assessing the possible role of acid deposition. Tappi 67 : 68-72.
 27. 金甲泰. 1986. 酸性雨, 乾燥 및 食鹽水處理에 따른 잣나무와 은행나무의 組織變化. 韓國林學會誌 73 : 52-62.
 28. 金甲泰. 1987. 人工酸性雨が 은행나무苗木의 生長, 生理的 特性 및 土壤의 化學的 性質에 미치는 影響 I. 種子發芽率과 生長. 韓國林學會誌 76(2) : 99-108.
 29. 金甲泰. 1987. 人工酸性雨が 은행나무苗木의 生長, 生理的 特性 및 土壤의 化學的 性質에 미치는 影響 II. 葉面積, 可視的 葉被害, 葉錄素 含量 및 葉組織의 光合成 成能. 韓國林學會誌 76(3) : 230-240.
 30. 金遵敏. 1985. 酸性비의 實態와 人間生活에 미치는 影響. 自然保存 49 : 19-23.

31. 金昌浩·鄭龍文. 1987. 人工酸性雨が 잣나무 및 귀동나무 苗木의 葉內 葉綠素含量에 미치는 影響. 韓國林學會誌 56 : 6-16.
32. 金泰旭·李景宰·朴仁協. 1985. 大氣汚染이 物質生産에 미치는 影響. 韓國林學會誌 71 : 33-39.
33. 金泰旭·朴仁協·李景宰. 1982. 環境汚染에 의한 蔚山地域의 森林生態學的 變化에 관한 研究. 韓國林學會誌 56 : 60-69.
34. 金泰旭·李景宰·朴仁協. 1982. 環境汚染이 오동나무 人工林의 物質生産에 미치는 影響에 관한 研究. 韓國林學會誌 58 : 8-16.
35. 金裕鉉·金炳友. 1983. 亞黃酸가스의 處理가 觀賞樹生育에 미치는 影響. 建國大學校 農業資源開發研究所 論文集 8 : 63-70.
36. 李海金. 1985. 酸性비에 의한 水質汚染. 自然保存 49 : 11-14.
37. 李壽煜·張寬淳. 1987. 韓國內 酸性雨의 長距離汚染源(Distance pollution source)에 관한 研究. 南北大學校 環境研究報告 5(1) : 1-14.
38. 李壽煜·閔一植. 1989. 大氣汚染 및 酸性雨が 森林生態界의 土壤酸度 및 養料分布에 미치는 影響. 韓國林學會誌 78(1) : 11-25.
39. Lee, Jeffrey J. and E.W. David. 1979. The effect of simulated acid rain on seedling emergence and growth of eleven woody species. *Forest Sci.* 25 : 393-398.
40. Lewis, D.H. and R.H. Bell. 1982. Long-range transport of air pollution. DOE/EP-0037, US Department of Energy, Washington, D.C.
41. Matzner, E. and B. Ulrich. 1983. The turnover of protons by mineralization and uptake in a beech and Norway spruce ecosystem. in B. Ulrich and J. Parkrath (ed) "Effects of accumulation of air pollutions in forest ecosystems" D. Reidel Pub. pp.93-103.
42. Mclaughline, S.B., D.C. West and T.J. Blasing. 1984. Measuring effects of air pollution stress on forest productivity : Perspectives, problems and approaches 67(1) : pp.725-736.
43. Oden, Svalte. 1975. The acidity problem-An outline of concepts. in "Proceedings of the 1st international symposium on acid precipitation and the forest ecosystem" Plenum Press, Ohio, USA pp.1-36.
44. 吳宗煥·金映燐·蔡智錫. 1988. 大氣汚染과 酸性雨が 山林生態界에 미치는 影響-山林地域 大氣汚染度の 經時的 變化. 科學技術處 研究報告 pp.25-69.
45. 朴奉柱·金熙子. 1984. 街路樹樹皮 및 表土의 重金屬酸度에 관한 研究. 韓國生活科學研究院論文 33 : 137-145.
46. 朴奉柱 外. 1987. 環境汚染 生物指標法の 開發 研究(I)-大氣汚染에 대한 生物指標方法. 科學技術處 國立環境研究院報告書 pp.161-176.
47. Phillips, S.O., J.M Skelly and H.E. Burkhardt. 1977. Growth fluctuation of loblolly pine due to periodic air pollution levels : Interaction of rainfall and age. *Phytopathology* 67 : 716-720.
48. Pritchett, W. L. 1979. Chemical properties of forest soils. in "Properties and management of forest soils" John Wiley and Sons pp.90-105.
49. Schofield, C.L. 1976. Acid precipitation : Effects of fish. *Ambio*, 5 : 228-231.
50. 孫元夏. 1968. 培地の pH가 몇 針葉樹의 幼苗生長에 미치는 影響. 韓國林學會誌 7 : 8-18.
51. Sparks, D.L. and C.R. Curtis. 1983. An assessment of acid rain on leaching of elements from Dalaware soils into groundwater. OWRTA-053-DEL(1). College of Agric. Sci. Univ. of Dalaware, New Yodk, Dalaware
52. Suwannapinnunt, W. and T.T. Kozlowski. 1979. Effects of SO₂ on transpiration chlorophyll content, growth and injury in young seedling of woody angiosperms. *Can. J. For. Res.* 10 : 78-81.
53. 土平井八十二. 1977. 農業氣象 Handbook- 農業氣象調查法. 養賢堂 pp.676-828.
54. Tollen, A. and B. Hagerhall. 1978. Deterioration of water quality due to long-range transport of air pollution. Proceedings of the United Nations Water Conference, United Nations, New York pp.2059-2070.
55. 土壤化學分析法. 1978. 農業振興廳 農業技術研究所
56. Ulrich, B. 1980. Production and consumption of

hydrogen ions in the ecosphere. in T.C. Hutchinson and M. Havas (ed) "Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems" Plenum Press pp. 255-282.

57. Zimdahl, R.L. 1975. Entry and environment in vegetation lead derived from air and soil sources. Air Pollution Control Association Meeting, Boston, Massachusetts.