

여천공단 주변지역 토양의 화학적 성질

문형태 · 표재훈 · 김준호*

공주대학교 생물학과 · 서울대학교 생물학과*

Chemical Properties of Soils in the Vicinity of Yoch'on Industrial Complex

Mun, Hyeong-Tae, Jae-Hoon Pyo and Joon-Ho Kim*

Department of Biology, Kongju National University and Seoul National University*

ABSTRACT

Effects of air pollutants on the chemical properties of soil in Yoch'on industrial complex were investigated. Soil pH showed severe acidity with average value of 4.3 ± 0.13 . Soil pH decreased along the increase in altitute of Mt. Jeseok. Soil organic matter and total N was $19.2 \pm 3.6\%$ and $4.7 \pm 0.25 \text{ mg/g}$, respectively, which were higher than those of unpolluted area, Kongju. Available P was $41.2 \pm 3.7 \mu\text{g/g}$, which was 4 times greater than that of unpolluted area, Kongju. Average content of total-S was $283.5 \pm 14.1 \mu\text{g/g}$, which was 10 times greater than that of unpolluted area. Content of available Al was $0.43 \pm 0.03 \text{ mg/g}$, which was 2 times greater than that of unpolluted area. Available Al increased as the soil pH decrease. Contents of exchangeable K, Ca and Mg were significantly lower than those in unpolluted area, because of severe leaching in acid soil.

Key words: Air pollutants, Acid soil, Industrial complex, *Miscanthus sinensis*, *Phytolacca americana*.

서 론

대기오염물질은 직접 식생에 영향을 주거나 산성 강하물의 형태로 토양에 이입되어 직접 또는 간접적으로 영향을 미치는데, 직접적인 영향은 주로 식물의 생식기관이나 잎에 피해를 주고, 간접적으로는 토양의 산성화 및 토양의 부영양화를 유발시킨다. 이러한 복합적인 영향으로 삼림의 쇠퇴현상이 일어나고 식물의 종다양성이 급감하게 되며, 식생의 구조와 기능이 단순화 되어 결국에는 생태계 전반에 걸쳐서 악영향을 미치게 된다(Nagy and Nagy 1981, Jakucs 1991, Bell 1994).

산성 토양에서는 불용성 상태의 Al과 Mn이 가용성

상태로 전환되어 식물체의 잔뿌리 발육을 억제하기 때문에 식물의 활력도가 낮아진다. 또한 토양의 pH가 낮아짐에 따라서 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} 과 같은 치환성 양이온이 수소이온과 치환되어 세탈되고, 가용성 P를 불용성 상태로 전환시켜서 이들 영양염류의 결핍증상이 나타나게 되며, 이러한 요인들이 식물 생장의 중요한 제한요인으로 작용한다(Ulrich *et al.* 1980).

Tilman(1987)은 외부에서 생태계로 이입되는 물질에 의해 토양의 성질이 변화되고 그 결과 생태계의 종 구성도 변화되어 새로운 천이가 진행된다고 주장한 바 있다. 즉, 기존의 식생이 파괴되고 새로 이입된 식물의 수도와 빈도가 증가되어 단기간 내에 상관이 크게 달라지게 된다(문과 조 1996). 인위적인 활동에 의해 비롯되는

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(BSRI-96-4442)에 의하여 연구되었습.

환경의 변화는 자연적인 요인에 의한 변화보다 그 속도가 빠르고, 강도가 크기 때문에 단기간 내에 생태계의 변화가 초래될 수 있다(Bell 1994).

본 연구는 대기오염이 심각한 것으로 알려진 여천공업단지 내의 남해화학 주변에 위치하고 있는 제석산의 서사면을 중심으로 대기오염으로 인한 토양의 화학적 성질의 변화를 파악하는데 그 목적이 있다.

조사지 개황

여천 임해공업단지는 여수에서 서북쪽으로 18 km 거리의 광양만 남쪽에 위치하며, 여천시 소재 낙포동, 월내동, 적량동 및 중흥동 일대에 걸쳐 동·서로 길게 해안선을 따라서 대규모의 단지를 형성하고 있다. 여천공단은 1974년부터 가동되기 시작하였고, 이 지역의 평균 강수량은 1220.8 mm/yr이고, 풍향은 북북서 방향에서 약 1.1 m/sec의 평균 속도로 남동 방향으로 불며, 해안 지역의 특성상 해풍의 영향을 많이 받는 지역이다(기상청 1996). 제석산은 남해화학의 동쪽과 남쪽을 둘러싸고 있는 336m의 야산으로 남해화학에서 남동쪽으로 형성되어 있는 계곡을 따라 골짜기에서 배출되는 오염물질이 바람과 함께 이동된다(Fig. 1).

조사 방법

토양 채집과 분석

공업단지 주변 토양의 이화학적 성질을 조사하기 위하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 남해화학을 중심으로 제석산(336m)의 서사면 아래 부분에서부터 능선쪽으로 7개의 채집 경로를 설정한 후, 각각의 경로에서 고도 약 100m 간격으로 총 28점의 토양을 채취하였다. 토양 채집은 1996년 9월에 실시하였다. 하나의 토양을 채취할 때는 반경 2m 이내에서 5군데의 토양을 채취하여 잘 혼합하였으며, 그 깊이는 5cm 이내로 제한하였다. 채집한 토양은 비닐 봉투에 밀봉하여 운반한 다음 실험실에서 음건하여 2mm 체로 친 후 분석에 사용하였다. 토양 산도, 유기물 함량, 총질소, 유효인 등은 Wilde 등(1979)의 방법에 따라 분석하였고, 토양의 황과 가용성 황산염은 Bardsley와 Lancaster (1960)의 방법에 따라 정량하였다. 가용성 알루미늄은 Wilde 등(1979)에 따라, 치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 1 M ammonium acetate로 추출한 뒤 원자흡수분광광도계를 이용하여 정량하였다. 본

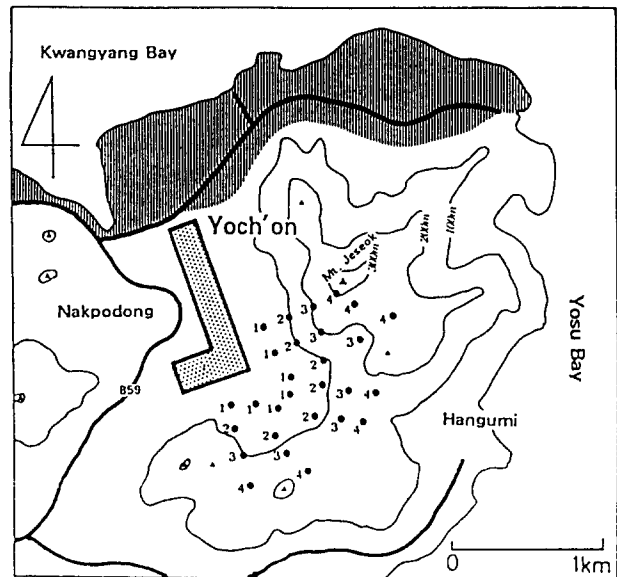


Fig. 1. A map showing the study area. Bar area indicate Yoch'on Industrial Complex and dotted area indicate Namhae chemical industry. Closed circles indicate sampling sites.

문에 표시된 분석치는 평균 \pm 표준오차로 나타내었다.

결과 및 고찰

조사지소 식생의 개관

공단이 가동되기 이전에 제석산 지역의 식생은 곰솔 (*Pinus thunbergii*)과 소나무 (*Pinus densiflora*)로 이루어진 소나무 군락이 우점을 이루고 있었는데(서 등, 1981), 공단이 가동된 이후에는 이들 군락이 고사하면서 대상식생으로 참억새 (*Miscanthus sinensis*)와 미국자리공 (*Phytolacca americana*)과 같은 초본식생이 번무하게 되었고, 지역에 따라서는 때죽나무 (*Styrax japonica*)가 순군락을 형성하고 있다. 전반적으로 사스레피나무 (*Eurya japonica*)의 출현 빈도가 높았다.

제석산의 아래 부분에는 거의 전지역을 환삼덩굴 (*Humulus japonicus*)과 며느리배꼽 (*Persicaria perfoliata*)이 덮고 있었으며, 그 윗쪽으로는 넓은 면적에 걸쳐 미국자리공과 칩 (*Pueraria thunbergiana*)이 우점하고 있었고, 산의 능선부에서는 참억새가 우점하고 있었다. 분과 조(1996)는 조류의 집단번식으로 부영양화 된 서식처에 환삼덩굴, 며느리배꼽 등이 우점하는 것으로 보

고한 바 있다. 본 조사지역에서도 환삼덩굴, 미국자리공, 칩 등이 우점하는 지소의 토양의 영양염류 함량은 비오염 지역에 비해 현저히 높은 것으로 나타나 토양이 부영양화 되었음을 알 수 있었다.

서 등(1981)은 1981년 조사 당시 이미 남해화학 주변의 소나무는 고사상태에 있었고, 변두리 지역에 있는 소나무도 잎이 많이 탈락된 상태였으며, 잎의 길이도 정상적인 소나무의 1/2 정도로 짧아진 상태였다고 보고한 바 있다.

토양의 화학적 성질

1. 토양 산도

제석산의 토양 산도는 평균 4.3 ± 0.13 으로 이미 산성화가 되어 있음을 알 수가 있었다. 공단이 들어서기 이전에 이 지역의 우점수종이 소나무와 곰솔이었다는 것을 감안할 때 우점식생에 의해 토양의 산성화가 서서히 진행되어온 것으로 판단되지만 공단이 들어서고 난 이후부터는 건성 강하물 및 습성 강하물의 형태로 이입되는 대기오염물질에 의해서 토양의 pH가 급격히 감소한 것으로 판단된다.

고도에 따른 토양 산도의 변화는 그 양상이 매우 뚜렷하게 나타났다(Fig. 2A). 남해 화학의 굴뚝에서 배출된 오염물질이 남동방향으로 부는 바람에 운반되어 산의 능선부근에 다량으로 침적되기 때문에 능선부 토양이 산 하부의 토양에 비하여 훨씬 더 산성화 되었음을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 제석산 하부 토양의 pH는 4.5인데 비하여 고도가 높아질수록 그 값이 낮아져 능선부에서는 4.1이었다. 토양의 산도 변화가 대기오염물질에 의해 영향을 받았다는 사실은 후술하는 황의 함량에 의해서도 뚜렷하게 입증되고 있다.

2. 토양 유기물

토양의 유기물 함량은 평균 $19.2 \pm 3.6\%$ 로 매우 높았으며, 비오염 지역인 공주 근교의 토양(9.3%)에 비해 2배 이상 높았다(이, 1995). 이러한 이유로는 기존 식생의 파괴로 인한 유기물의 첨가가 많았으며, 지상부의 생산량이 많은 미국자리공이나 참억새와 같은 대상식생이 우점하고 있고(문, 미발표 자료), 곰팡이, 균류와 같은 미생물과 토양 소동물이 오염물질에 영향을 받아 유기물의 분해 속도가 느린데 그 원인이 있는 것으로 판단

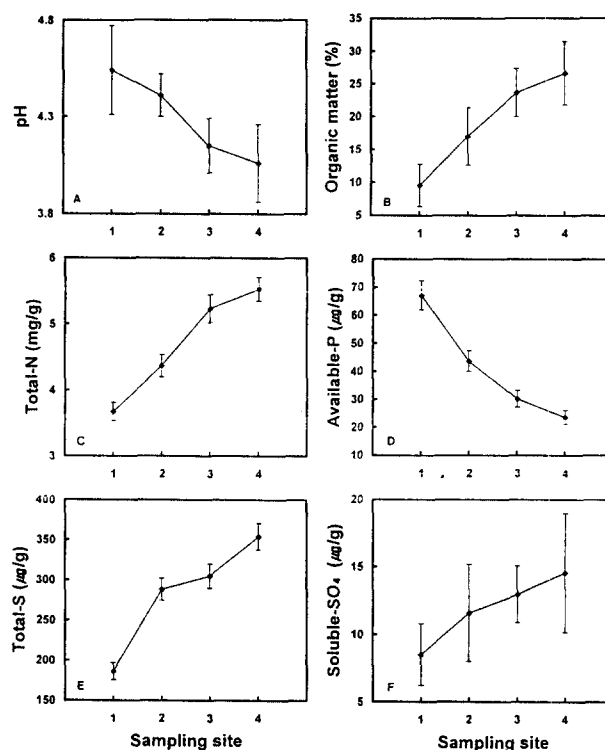


Fig. 2. Changes of soil pH, organic matter, total-N, available P, total-S and soluble SO_4^{2-} along the altitude at the west side of Mt. Jeseok. Bar indicate standard deviation. Sampling sites are appeared in Fig. 1.

된다(Myrold 1990). 그러나 본 조사지역에서 대기오염물질이 분해자 및 토양 소동물에 미치는 영향에 관해서는 체계적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

고도에 따른 유기물 함량의 변화도 뚜렷함을 알 수 있다(Fig. 2B). 이것은 산의 기부에는 칩이나 미국자리공이 우점하는데 비하여 산의 능선부로 갈수록 비교적 분해가 느리고 지상부의 생산량이 많은 참억새가 우점하기 때문인 것으로 판단된다.

3. 전질소

본 조사 지역의 전질소의 함량($4.7 \pm 0.25 \text{ mg/g}$)은 비오염지역 토양에 비해 매우 높았다(Kim *et al.* 1991, 이 1995). 이것은 이 지역 토양의 유기물 함량이 높은 것과는 관계가 있지만 조사 지역이 석유 화학이나 비료 공업이 발달한 곳을 감안할 때 상당량의 질소 성분이 대기 중으로 방출되어 인근 지역에 분산되었기 때문인 것으로 사료된다(Bell 1994, Press *et al.* 1986).

대기오염물질인 질소산화물은 토양의 부영양화를 초래하는데 (Bell 1994), 본 조사지소의 전질소 함량은 조류의 집단서식으로 부영양화 된 지역의 질소 함량과 그 값이 유사한 것으로 보아 이 지역 토양의 부영양화가 상당히 진전된 것으로 판단된다 (Jakucs 1991, 문과 조 1996). 이러한 사실은 이 지역에 발달되어 있는 참억새 군락의 생산량이 비오염 지역에 비해 현저히 높은 것으로도 입증되고 있다 (문, 미발표 자료).

토양의 질소 함량의 증가는 그 지역의 식물종 다양성을 감소시키는 반면 생물량은 증가시키기 때문에 특정 종에 의한 우점도가 증가한다 (Mun and Whitford 1989, Tilman 1987). 본 조사지역에서도 참억새가 우점하는 지소에서는 밀집된 지하경으로 공간을 점유함은 물론 초장이 커 광을 차단하는 효과가 있기 때문에 다른 초본식물이 거의 침입하지 못하는 것을 관찰할 수 있었다.

4. 가용성 인

토양의 가용성인 함량 ($41.2 \pm 3.7 \mu\text{g/g}$)은 공주 근교의 토양 ($9.1 \pm 1.5 \mu\text{g/g}$)에 비하여 4배 이상 높았다 (이, 19-95). 따라서 인에 의한 토양의 부영양화도 상당히 진전된 것으로 판단된다. 고도에 따른 가용성인의 함량은 토양의 산도와는 정의 상관관을 보였다 (Fig. 2D). 토양 산도가 낮은 산의 기부에서는 가용성 인의 함량이 더 높았고, 산의 능선부로 갈수록 가용성 인의 함량이 낮아지는데, 이는 토양의 산성화에 따라 인의 가용성이 감소되기 때문인 것으로 판단된다.

5. 황

토양의 total sulfur와 soluble sulfate의 평균 함량은 각각 $283.5 \pm 14.1 \mu\text{g/g}$ 과 $11.9 \pm 2.1 \mu\text{g/g}$ 으로 공주 근교의 토양 ($28.6 \pm 3.3 \mu\text{g/g}$ 과 $8.6 \pm 0.9 \mu\text{g/g}$)에 비해 훨씬 높았으며 (문과 이, 미발표 자료), total sulfur의 경우 10배 이상 높았다. 이것은 공단 지역의 대기오염물질에 황산화물이 다량 포함되어 있기 때문이다. 고도에 따른 황 함량의 변화도 뚜렷한데 (Fig. 2E, F), 이것은 공업단지의 굴뚝에서 나오는 배출가스가 바람의 영향으로 산의 능선부에 다량으로 침적되기 때문인 것으로 판단된다.

황의 결핍은 질소비료의 사용으로 야기될 수 있는데, 이런 경우에는 황의 첨가가 식물생장을 촉진하지만 삼림생태계에서는 황의 첨가가 식물생장을 촉진하는 경우는 거의 없다 (Turner *et al.* 1977). 황산화물은 토양의

산성화에 직접적인 영향을 미치는 물질로 황이 과량으로 존재할 때에 식물에게 미치는 생리·생태적 특성이나 토양 미생물에게 미치는 영향을 파악하는 것이 시급한 문제라고 할 수 있다.

6. 가용성 알루미늄

가용성 Al은 뿌리생장에 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Foy 1975, Hutchinson *et al.* 1986). 본 조사지역 토양의 가용성 Al의 평균 함량은 $0.43 \pm 0.03 \text{ mg/g}$ 으로 공주 근교의 토양 ($0.22 \pm 0.02 \text{ mg/g}$)에 비해 2배 정도 높게 나타났다 (문과 이, 미발표 자료). 이는 대기오염물질의 이입으로 토양의 pH가 낮아지면서 가용성 Al이 증가한 것으로 판단된다.

고도에 따른 가용성 Al의 양은 뚜렷한 증가 현상을 보였다 (Fig. 3A). 그림 2A와 그림 3A에서 토양의 pH와 가용성 Al의 양은 뚜렷한 역상관 관계가 있음을 알 수 있다. 이것은 산의 높이에 따라 토양의 산도가 증가함으로써 토양의 불용성 Al이 가용성 상태로 전환되었기 때문인 것으로 판단된다.

7. 치환성 양이온

조사지역의 칼륨, 칼슘 및 마그네슘의 평균 함량은 각

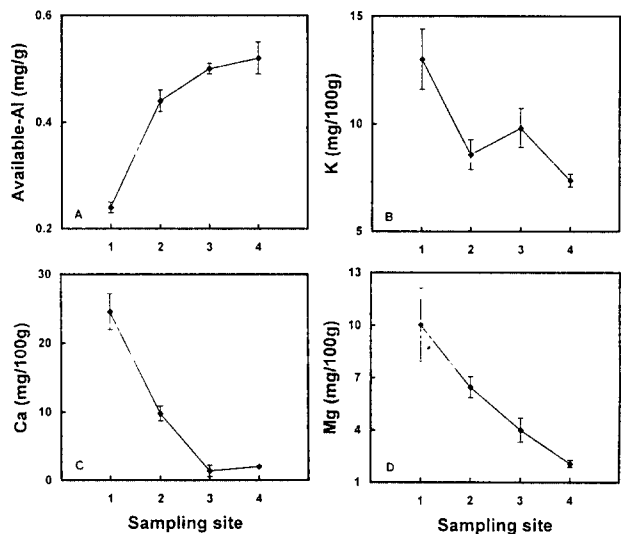


Fig. 3. Changes of available Al and exchangeable K, Ca, Mg along the altitude at the west side of Mt. Jeseok. Bar indicate standard deviation. Sampling sites are appeared in Fig. 1.

각 $9.7 \pm 0.7 \mu\text{g/g}$, $9.4 \pm 1.2 \mu\text{g/g}$ 및 $5.6 \pm 0.1 \mu\text{g/g}$ 이었다. 이 값들은 공주 근교의 토양(칼륨 $67.3 \pm 2.6 \mu\text{g/g}$, 칼슘 $113.7 \pm 9.6 \mu\text{g/g}$, 마그네슘 $27.9 \pm 2.8 \mu\text{g/g}$)에 비해 현저히 낮았다(문과 이, 미발표 자료). 이것은 산성 토양에서 세탈에 의해 칼슘과 마그네슘의 함량이 낮아진다는 다른 연구 결과와 일치한다(Wolt, 1990). 제석산의 고도에 따른 치환성 양이온은(Fig. 3B, C, D), 토양의 산도와 양의 상관성이 있음을 알 수 있다. 산성 토양에서는 칼슘과 마그네슘의 세탈이 특히 심하기 때문에 식물 성장에 제한요인이 된다(Wolt, 1990).

대기오염의 영향으로 여천공단 주변의 원식생이 대부분 파괴되었지만 사스래피나무와 때죽나무는 별 영향을 받지 않는 것으로 관찰되었다. 이것은 대기오염물질의 영향이 식물의 종에 따라 다르게 나타남을 의미한다(Bell 1994). 대기오염물질의 2차적인 영향으로 이 지역의 토양이 산성화 되었으며, 이들 지역에 형성되어 있는 대체식생인 참억새와 미국자리공, 환삼덩굴, 칩 등은 산성 토양에 대한 적응력이 큰 것으로 판단된다(문 등, 1997). 따라서 대기오염 지역의 토양의 특성과 식생의 변화를 파악하기 위해서는 공단 주변에 형성되어 있는 대체식생의 구성종에 대한 생리·생태학적인 연구가 병행되어야 할 것으로 생각된다.

적 요

여천공단 주변지역에서 대기오염물질에 의한 토양 성질의 변화를 조사하였다. 토양의 산도는 평균 4.3 ± 0.31 이었으며, 제석산의 기부에서 능선부로 갈수록 토양의 산도가 증가하는 경향을 보였다. 토양 유기물 및 전질소 함량은 각각 $19.2 \pm 3.6\%$ 와 $4.7 \pm 0.25 \text{mg/g}$ 으로 비오염 지역인 공주 근교의 토양에 비하여 높았다. 가용성 인의 경우 평균 $41.2 \pm 3.7 \mu\text{g/g}$ 로 비오염 지역인 공주 근교의 토양에 비해 4배 이상 높았다. 제석산에서는 산의 높이에 따라서 가용성 인의 함량 변화가 매우 뚜렷하였는데, 토양의 산도가 증가함에 따라 가용성 인이 불용성으로 전환되기 때문인 것으로 판단된다. Total-S의 함량은 $283.5 \pm 14.1 \mu\text{g/g}$ 으로 비오염 지역인 공주 근교의 토양에 비하여 10배 이상 높았다. 가용성 알루미늄의 평균 함량은 $0.43 \pm 0.03 \text{mg/g}$ 으로 비오염 지역에 비해 2배 정도 높았으며, 토양의 산도가 증가할수록 가용성 알루미늄의 양이 증가하는 경향을 보였다. 조사지역의 치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘 함량은 비오염 지역에 비해 매우 낮았다. 이는 토양의 산성화로 칼슘과 마그네슘이 세

탈되었기 때문이다.

인 용 문 헌

- 기상청. 1996. 통계연보. 기상청
- 문형태, 조삼래. 1996. 백로와 왜가리 집단번식이 소나무 군집에 미치는 영향. 한국생태학회지 19: 47-54.
- 문형태, 박병규, 김준호. 1997. 산성 토양 개량제 처리에 따른 식물의 성장 반응과 토양 성질의 변화. 한국생태학회지 20: 43-49.
- 서정현, 정인명, 김재봉, 김동한, 정연보, 오재기, 강덕희, 강인구, 김태욱, 심재우, 김준호, 조경제, 유병태. 1981. 공단 주변의 생태계에 관한 조사 연구. 국립환경연구소. 167p.
- 이지영. 1995. 상수리나무림과 리기다소나무림의 낙엽분해, 토양의 특성 및 cellulase 활성. 공주대학교 석사 학위논문. 27p.
- Bell, N. 1994. The ecological effects of increased aerial deposition of nitrogen. British Ecological Society. Ecological Issues 5. 36p.
- Bardsley, C. E. and J. D. Lancaster. 1960. Determination of reserve sulfur and soluble sulfates in soils. Proceedings of Soil Science Society of America. 24: 265~268.
- Foy, C. D. 1975. Effects of aluminum on plant growth. In E. W. Carson(ed.). The plant root and its environment, University Press of Virginia, Charlottesville. pp. 601-642.
- Hutchinson, T. C., L. Bozic and G. Munoz-Vega. 1986. Response of five species of conifer seedlings to aluminum stress. Water Air Soil Pollut. 31: 283-294.
- Jakucs, P. 1991. Eutrophication in forest ecosystems. In G. Esser and D. Overdieck(eds.), Modern ecology: basic and applied aspects. Elsevier, New York. pp. 571-578.
- Kim, J. H., H. T. Mun and Y. S. Kwak. 1991. Community structure and soil properties of the *Quercus variabilis* forest in limestone areas. Korean J. Ecology. 14: 159-169.
- Mun, H. T. and W. G. Whitford. 1989. Effects of nitrogen amendment on annual plants in the Chihuahuan Desert. Plant and Soil 120: 225-231.

- Myrold, D. D. 1990. Effects of acidic precipitation on soil organisms. *In* A. A. Lucier and S. G. Haines. (eds.), *Mechanisms of Forest Response to Acidic Precipitation*. Springer-Verlag. 245p.
- Nagy, M. and J. Nagy. 1981. Diversity of herb layer of black locust forest. *Acta Biol. Debrecina* 18: 15-20.
- Press, M. C., J. J. Woodin and J. A. Lee. 1986. The potential importance of an increased atmospheric nitrogen supply to the growth of ombrotrophic *Sphagnum* species. *New Phytologist* 103: 45-55.
- Tilman, D. 1987. Secondary succession and the pattern of plant dominance along experimental nitrogen gradients. *Ecological Monographs* 57: 189-214.
- Turner, J., M. J. Lambert and S. P. Gessel. 1977. Use of foliage sulphate concentrations to predict response to urea application by Douglas fir. *Can. J. For. Res.* 7: 476-480.
- Ulrich, B., R. Mayer and P. K. Khanna. 1980. Chemical change due to acid precipitation in a loss-derived soil in central Europe. *Soil Sci.* 130: 193-200.
- Wilde, S. A., R. B. Corey, J. G. Iyer and G. K. Voigt. 1979. *Soil and plant analysis for tree culture*. Oxford and IBH Publishing, New Delhi. 224p.
- Wolt, J. D. 1990. Effects of acid deposition on the chemical form and bioavailability of soil aluminum and manganese. *In* A. A. Lucier and S. G. Haines (eds.), *Mechanisms of forest response to acid deposition*, Springer-Verlag. New York. pp. 62-107.

(1997년 9월 10일 접수)