

脫窒菌 및 황산還元菌 定량을 통한 서울의 大氣汚染이 南山の 土壤에 미치는 影響 評價¹

朴 賢²

Evaluation of Air Pollution Effects in Seoul City on Forest Soil at Mt. Namsan by Assay of Denitrifying and Sulfur-Reducing Bacteria¹

Hyun Park²

요 약

대기오염의 장기화에 따라 토양오염이 심화된 것으로 추측되는 서울 남산의 토양을 대기오염이 심하지 않은 것으로 판단되는 계방산 토양의 화학적 특성과 비교하여 남산토양의 오염도를 평가하며, 질소 및 황의 무기화에 관여하는 미생물을 동시에 정량하여 질소 및 황의 무기화에 관여하는 미생물 군을 토양오염도 평가기준으로 활용할 수 있는지 알아보았다. 남산의 토양은 계방산에 비하여 10배 이상 수소이온의 농도가 높아 토양 산성화가 상대적으로 심하였다. 특히, 남산토양은 양이온의 용탈이 심하고 치환성 알루미늄은 많아져 남산지역 토양 생태계에 큰 문제가 발생하였음을 나타냈다. 토양 산성화의 주요인은 황산화물의 집적으로 추정되지만 황산환원균의 활성은 지역간에 유의차를 발견할 수 없어서 미생물 동태가 단순한 인자만이 아닌 복합적인 요인에 의하여 조절됨을 짐작할 수 있었다. 반면, 탈질기작에 관여하는 세균의 동태는 남산의 소나무림에 비하여 계방산의 소나무림에서 활발한 것으로 평가되어 토양생태계의 전반적인 미생물 활성도나 건전도의 지표로 질소의 무기화에 관여하는 미생물의 정량기법을 검토해 볼만하다.

ABSTRACT

Soil pollution intensity at Mt. Namsan in Seoul city which was expected to show significant soil contamination due to long-term air pollution was evaluated by comparing soil chemical properties at Mt. Kyebangsang in Hongcheon area as a control, and the bacteria participating in nitrogen or sulfur mineralization were assayed simultaneously in order to evaluate the validity of N and/or S mineralization bacteria as an index of soil contamination. The soil of Mt. Namsan showed 10 times higher concentration of hydrogen ion compared to that of Mt. Kyebangsang, which indicated that the soil had relatively been acidified seriously. Especially, large amount of cations were thought to be leached out from the soil, while the amount of extractable Al was getting larger and larger, which result in serious problems in soil ecosystem of the mountain. I could infer from soil chemical properties of the four study sites that the major reason of soil acidification was SO_x deposition. However, the sulfur-reducing bacteria were not significantly different between the two regions, which indicated that the microbial dynamics of the soil ecosystem was not controlled by simple factor, but by multiple factors. By the way, the dynamics of bacteria participating in denitrification process was different between the two regions, which was more active at Mt. Kyebangsang than at Mt. Namsan.

¹ 接受 1997年 1月 20日 Received on January 20, 1997.

² 임업연구원 산림미생물과 Dept. of Forest Microbiology, Forestry Research Institute, Cheongryangri-dong, Seoul, Korea 130-010.

Thus, the microbial assay for nitrogen mineralization is desirable to be examined as a tool for evaluating soil health or microbial activity in soil ecosystem.

Key words : microbial assay, soil contamination, soil ecosystem, soil health index, SO₂ deposition

서 론

최근 환경오염에 대한 우려가 나날이 증가하고 있는데, 특히 대기오염은 서울을 비롯한 대도시에서 거주하는 사람들의 생존과 직접적으로 연관된 심각한 문제로 부각되고 있다. 대기오염의 주된 결과는 산성우나 호흡장애 등으로 나타나는데, 주 오염원은 황산화물(SO_x)이나 질소산화물(NO_x)로 인식되며 최근까지는 토양의 완충능에 의하여 중화될 수 있는 것으로 평가되어 왔다(장남기 등, 1990). 하지만, 식물에게 미약한 영향을 미치는 정도의 대기오염물질도 지속적으로 유입될 경우 누적효과로 인하여 피해가 확대될 수 있으며(Johnson과 Lindberg, 1992), 누적된 오염원의 제거는 실질적으로 불가능한 경우가 많은데 토양오염은 그 대표적인 예라 할 수 있다.

산림에 유입되는 대기오염물질은 수목에게 흡수되어 수피(樹皮)에 축적되거나 수관우(樹冠雨, throughfall), 수간류(樹幹流, stemflow), 낙엽 등을 통하여 토양으로 환원된다(장남기, 1990; 장남기와 이경형, 1990). 다양한 경로로 토양에 유입된 오염원은 토양의 건강도(健康度)에 따라 큰 영향을 나타내지 않을 수도 있으나 토양의 완충능 한계를 벗어나면 토양 생태계의 순환기작을 완전히 마비시켜 생태계가 회복되기 어려운 상태로 만든다(Binkley 등, 1994). 하지만, 토양의 완충능을 정확히 평가할 수 있는 방법이 아직 없으므로 생태계가 회복불능의 단계에 이르기 전에 이를 알아내기는 매우 어렵다(이수옥과 민일식, 1989). 환경오염의 지표로 지의류를 이용할 수 있지만(유정환 등, 1995) 지의류는 대기오염에 매우 민감하여 초기오염도의 지표로 사용될 수 있으며, 식물 등 다른 생물은 피해는 오염이 누적된 이후에 가시화되므로 중간단계의 지표로 활용하기는 어렵다.

토양오염이 어느 정도 진행된 상태에서 토양오염도의 심각성을 평가할 수 있는 방법으로 토양 미생물상의 동태를 파악하는 방법을 추천할 수 있다. 왜냐하면, 토양오염이 진행됨에 따라 토양

의 건전도가 약화되며, 이에 따라 토양미생물이 주도적 역할을 담당하는 토양내 순환계가 제 기능을 다하지 못할 단계에 이르면 그 토양은 회복되기 어려운 상태라고 평가할 수 있기 때문이다(이창근, 1988). 이러한 측면에서 대기오염의 장기화로 인하여 토양내 오염물질 축적이 일정한 수준에 이르렀을 것으로 평가되는 토양생태계의 심각성을 판단하는 기준으로 토양내 각종 물질의 무기화 기작에 관여하는 미생물의 동태를 파악하는 것은 의미 있는 일이다. 특히, 도시화의 과정에서 형성되는 대기오염은 자동차 배기가스나 공장의 연소산물인 질소와 황산화물이며(배재근과 오종민, 1995), 질소와 황은 미생물 생태계에서 매우 중요한 영양원이 되므로 질소 및 황의 무기화에 관여하는 미생물을 정량하여 토양오염도를 평가하는 기법은 시도해 볼 만한 가치가 있다고 생각된다.

본 연구는 대기오염의 장기화에 따라 토양오염이 충분히 진행된 것으로 추측되는 서울 남산의 토양을 대기오염이 심하지 않은 지역의 토양과 비교하면서 질소 및 황의 무기화에 관여하는 미생물을 동시에 정량함으로써 남산토양의 오염도를 평가하고, 동시에 질소 및 황의 무기화에 관여하는 미생물군을 토양오염도 평가기준으로 활용할 수 있는지에 대하여 평가하고자 수행하였다.

재료 및 방법

연구 대상지

서울의 남산은 한국 최대의 교통량으로 인하여 대기오염도가 심한 대표지역이다. 반면, 대조구로 선정된 운두령지역(강원도 홍천군 내면 창촌리 수청골 입구; 계방산)은 현재까지 남한의 청정 산림지역이라 일컬어질 수 있을 정도로 대기오염이 거의 없는 지역이다(그림 1). 남산과 계방산은 같은 위도(북위 37° 35')에 위치하고 있으나 직선거리로 약 120km 떨어져 정도는 1° 30' 정도의 차이를 지니고 있다. 대기오염도만 다르고 다른 조건은 비슷한 조건의 토양을 비교하는

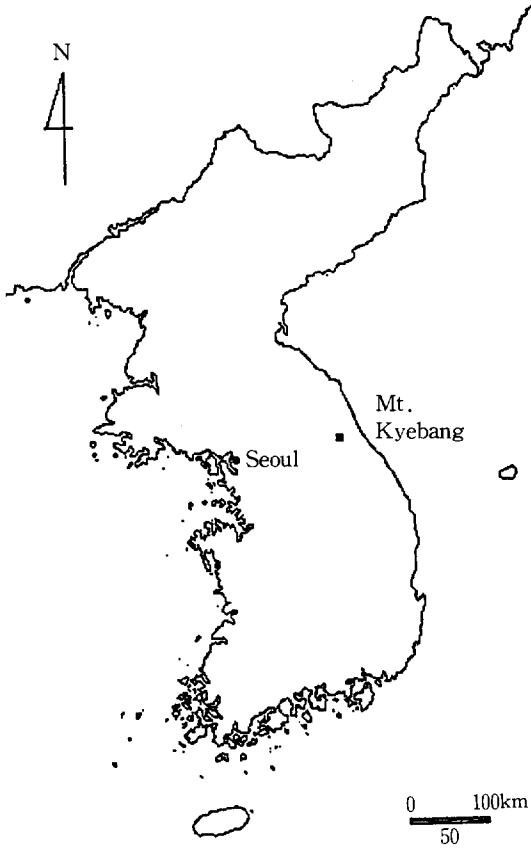


Fig. 1. Location of the two study sites.

것이 바람직하지만, 한국의 도시지역은 대체로 저해발고의 평지에 위치하고 있으며, 청정한 대기조건을 유지하고 있는 산악지역은 대체로 해발고가 높은 산지이다. 본 연구에 활용된 남산 조사구의 해발고는 150~200m인 반면, 계방산 조사구의 해발고는 850~900m이므로 두 지역간에는 지운을 비롯한 여러 가지 미기상적인 요소가 다르게 작용하고 있다. 즉, 연구 대상지간에는 대기오염도 뿐만 아니라 해발고 등 자연환경의 차이가 일부 존재하고 있다. 단, 이러한 차이를 극소화하기 위하여 비슷한 임령의 두 가지 임형(林形)을 선정하였는데 남산의 대표적 임형인 소나무림과 일반적인 중부지방의 산림유형인 활엽수림을 각각 정하였다. 두 지역에서 각각 두 가지 임형을 선택한 후 입지환경이나 토양환경을 비교하기 위하여 선정한 임분내에 10m×10m 조사구를 각각 5개소씩 선정하였다.

계방산의 소나무림 조사지는 산복부(山腹部)에 위치하고 있다. 흉고직경 26~30cm의 소나무가 약 40%의 식피율(植被率)을 나타내며 수고 18~20m의 숲을 천연림의 형태로 이루고 있는 곳이다. 하층에는 층층나무와 국수나무가 각각 5~7m와 2m 내외의 수고를 유지하며 60% 이상의 식피율을 나타내고 있었다. 토양은 포행토의 퇴적양식을 나타내는 건조갈색산림토양(B₁)이며 비교적 토양발달이 잘 이루어져 토심이 70cm에 달한다. A층은 0~15cm의 깊이를 나타내며 약간 건조한 상태의 입상(粒狀)구조를 나타내었고, B층은 15~70cm의 깊이를 나타내며 적절한 견과상(堅果狀)의 토양이었다. 활엽수림 또한 산복부에 위치한 천연림의 형태로서, 신갈나무가 우점종(優點種)으로 나타나며(식피율 60%), 참개암나무, 다릅나무, 물박달나무, 고로쇠 등 여러 가지 활엽수가 잘 섞여 있는 형태이었다. 토양은 경기편마암 복합체의 모암 위에 발달한 건조갈색산림토양(B₁)으로 토심은 50cm 내외를 나타내었다. A층 깊이는 0~12cm의 범위를 나타내며, 건조한 입상 또는 단립상(單粒狀)의 구조를 나타내었다. B층은 12~50cm의 범위를 나타내며 약건의 견과상 구조를 나타내어 소나무림의 토양에 비하여 토심은 약간 얕지만 비슷한 토양이라고 할 수 있었다.

남산의 소나무림은 소나무의 식피율이 85%에 이르지만 수고는 7~8m에 불과하고 흉고직경도 14~18cm로서 계방산의 소나무림에 비하여는 생장이 좋지 않은 상태이었으며, 신갈나무와 때죽나무가 중층 및 하층의 우점종으로 나타나고 있었다. 토양은 산정부(山頂部)에 위치한 조사구의 성격상 잔적토의 퇴적양식을 나타내었는데 대보화강암을 모재로 한 사질양토의 건조갈색산림토양(B₁)이었다. A층의 두께는 11cm, B층은 11~42cm의 깊이를 나타내는데 각각 입상과 견과상의 구조체를 형성한 건조한 토양이었다. 활엽수림은 산복부에 위치한 팔배나무와 졸참나무의 혼효활엽수림이며, 토양은 약건갈색산림토양(B₂)으로 A층은 0~15cm, B층은 15~45cm의 깊이를 나타내었다. 토양구조는 다른 조사구와 마찬가지로 A층은 입상, B층은 견과상을 띄며 약간 건조한 상태이었다.

토양시료 채취 및 운반

선정된 각 조사구내에서 직경 52mm 토양채취기를 이용하여 4지역 모두 A층에 해당하는 0~10cm 깊이의 토양을 채취하였다. 토양습도로 인한 시료의 불규칙성을 배제하기 위하여 각 조사구내에서 5개 이상의 시료를 채취하여 잘 혼합하였으며, 토양의 건조도가 대표치에 이를 수 있도록 유의하여 시료를 채취하였다. 시료는 미생물의 활동이 가장 왕성할 것으로 평가되는 8월에 채취하였으며(Higashida and Takao, 1986), 채취한 시료는 채취 즉시 실험실로 운반하여 냉장고에서 4°C 이하를 유지하며 보관하고 3일 이내에 미생물 정량을 위하여 활용하였다.

토양의 화학적 특성, 탈질균 및 황산환원균 정량

실험실로 운반된 토양시료는 2mm 체로 걸러 풍진시킨 후 각종 화학적 특성을 조사하였다. 토양산도는 증류수 5배액에 희석한 후 pH-meter를 사용하여 측정하였으며, 유기물함량, 전질소, 유효인산, 양이온치환용량, 치환성염기(K, Na, Ca, Mg), 황, 활성알루미늄 등을 일반적인 분석법에 의거하여 정량하였다(김동수, 1988).

탈질균 및 황산환원균에 대한 조사를 수행하기 위해서는 토양을 풍진시키기 전에 2mm의 체로 걸러 10g의 시료를 95ml의 0.85% saline solution (세균완충용액 : NaCl 8.5g/1ℓ 증류수)에 넣고 희석과정을 거쳐 10⁻⁸까지의 희석액을 조제한 후 준비한 액체배지에 접종하여 MPN 방법에 의하여 양을 추정하였다(Alexander, 1982). 동시에 10g의 토양시료를 건조기에서 105°C로 48시간동안 건조후 중량을 측정하여 건조량 1g당 bacterial

colony forming unit의 추정에 활용하였다.

탈질균의 조사를 위해서는 1ℓ의 증류수에 KNO₃ 0.5g, nutrient broth 8.0g을 넣은 액체배지를 사용하여 2주간 배양하였고, 탈질기작의 1단계 및 2단계에 관여하는 미생물의 존재여부 검정을 위하여 0.3g N-(1-Naphthyl) ethylenediamine/100ml HCl과 0.5g Sulfanilamide/100ml 2.4N HCl 용액 및 아연(Zn)을 이용하였다(Tiedje, 1982). 황산환원균의 배양을 위해서는 1ℓ의 증류수에 KH₂PO₄ 0.5g, NH₄Cl 1.0g, CaSO₄ 1.0g, MgSO₄ · 7H₂O 2.0g, Sodium lactate 3.5g, Yeast extract 1.0g, Ascorbic acid 0.1g, Thioglycollic acid 0.1g, FeSO₄ · 7H₂O 0.5g을 첨가한 배지상에서 3주간 배양한 후 배양액내 흑색 침전물의 생성여부에 따라 파악하였다(Neal, 1985).

통계분석

조사된 자료의 통계분석을 위해서는 SAS system을 사용하여 ANOVA를 실시하고, 유의차가 인정될 경우 각 조사치 평균값의 차이를 α=0.05의 범주에서 Duncan's multiple range test를 통해 비교하였다(SAS, 1985).

결과 및 고찰

각 조사구 산림토양의 화학적 특성

남산의 두 가지 임형에서 채집된 토양은 10개의 시료가 임형에 상관없이 평균 4.24의 pH 값을 나타낸 반면 계방산의 토양은 평균 5.42의 pH 값을 나타내어 지역별로 토양산도에 큰 차이

Table 1. Soil chemical properties of the upper 10cm layer at four study sites (mean ± standard error).

Properties	Stand Hongcheon (Mt. Kyebangsan)		Seoul (Mt. Namsan)	
	Deciduous	Pine stand	Deciduous	Pine stand
pH	5.55 ± 0.07 ^{a*}	5.33 ± 0.23 ^a	4.32 ± 0.14 ^b	4.09 ± 0.03 ^b
Total nitrogen(%)	0.45 ± 0.02 ^b	0.57 ± 0.07 ^a	0.33 ± 0.04 ^c	0.26 ± 0.01 ^d
Organic matter(%)	8.70 ± 0.38 ^{ab}	9.98 ± 0.73 ^a	7.65 ± 0.82 ^{bc}	6.63 ± 0.72 ^c
Available P ₂ O ₅ (ppm)	6.50 ± 0.55 ^c	17.01 ± 6.56 ^b	37.54 ± 10.36 ^a	29.77 ± 3.18 ^a
CEC(me/100g)	16.95 ± 1.76 ^a	19.01 ± 1.29 ^a	14.17 ± 1.00 ^b	12.25 ± 0.26 ^b
Exch. K ⁺ (me/100g)	0.60 ± 0.03 ^a	0.69 ± 0.13 ^a	0.19 ± 0.03 ^b	0.16 ± 0.01 ^b
Exch. Mg ²⁺ (me/100g)	1.84 ± 0.65 ^a	1.50 ± 0.26 ^a	0.32 ± 0.08 ^b	0.25 ± 0.05 ^b
Exch. Ca ²⁺ (me/100g)	6.62 ± 0.97 ^a	9.19 ± 2.12 ^a	1.71 ± 0.22 ^b	1.12 ± 0.11 ^b
Exch. Na ⁺ (me/100g)	0.38 ± 0.02	0.39 ± 0.02	0.35 ± 0.01	0.34 ± 0.01
Extr. Al ³⁺ (me/100g)	169.74 ± 48.9 ^b	184.1 ± 91.8 ^b	474.4 ± 23.1 ^a	482.4 ± 40.2 ^a
Soluble SO ₄ ²⁻ (ppm)	30.0 ± 2.9 ^b	20.2 ± 1.9 ^c	45.7 ± 4.4 ^a	47.7 ± 2.7 ^a

* The same letters indicate that the values were not significantly different for each row at the 5% level.

가 있음을 알 수 있었지만, 임형에 따른 토양산도의 차이는 찾을 수 없었다(표 1). 즉, 대조구로 선정된 계방산의 토양은 일반적인 우리나라 산림토양의 표층부위의 산도를 대표하고 있었으며, 남산의 토양은 계방산에 비하여 10배 이상 수소이온의 농도가 높은 것으로 나타나 두 지역의 토양형이 비슷함을 감안할 때, 남산토양의 산성화가 상대적으로 심하게 진전되었음을 알 수 있었다. 이러한 영향은 각종 양이온의 용탈이 심하고 치환성 알루미늄은 많이 나타나는 현상으로 이어지고 있었는데, 칼륨(K), 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg)의 양과 양이온치환총량(CEC)이 남산토양은 계방산 토양에 비하여 적은 것으로 나타나는 반면 임형에 따른 차이는 없는 것으로 나타나 남산지역 토양 생태계에 큰 문제가 야기되고 있음을 알 수 있었다.

즉, 산성 대기오염원의 유입 및 축적에 따른 토양산성화가 심하게 진행된 것을 알 수 있었는데, 남산토양의 수용성 황 이온 또한 계방산 토양에 비하여 2배에 해당하는 양으로 나타나 공업화의 산물인 황산화물의 집적이 남산토양의 산성화에 큰 역할을 하고 있음을 알 수 있었다. 이는 대기중의 SO₂ 농도를 통해서도 확인할 수 있는데, 임업연구원의 미발표 조사자료에 따르면, 1996년 전국 산림지역의 평균 SO₂ 농도는 8.1ppb인데 서울 등 도시지역은 8.4ppb, 홍천 등 산악지역은 7.9ppb로 큰 차이를 나타내었다.

반면, 자동차 배기가스를 통해 생성되는 질소산화물의 집적현상은 찾기 어려웠는데, 전질소는 유기물과 더불어 계방산의 토양에 남산의 토양보다 더 많은 것으로 나타났다. 1996년에 산악지역(계방산)의 강수에 포함된 NO_x의 평균농도는

0.9ppb이며, 도시지역(남산)의 강수내 NO_x 농도는 3.3ppb로 나타나 유입량은 남산이 3배 이상이지만(임업연구원, 미발표), 유입된 질소는 휘산(揮散, volatilization) 등으로 쉽게 재순설되어 토양에 집적되지 않는 것으로 추측된다.

미생물의 활동에 영향을 주어 토양생태계의 순환에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 탄질물(C/N ratio)은 지표면 토양유기물의 약 65%가 탄소임을 감안할 때,⁷ 계방산의 토양은 활엽수림과 소나무림이 각각 13과 11, 남산의 토양은 15와 17로 계산되었다. 즉, 계방산 토양은 일반적으로 순환기작이 원활한 탄질물 15이내의 범주에 있어서 토양생태계의 순환기작이 원활하지만, 남산 소나무림의 경우 탄질물이 원활한 양묘순환체제를 이루기에는 약간 높은 상태로 생각되었다.

탈질균 분포

토양유기물의 분해과정에서 발생하는 암모늄태 질소(NH₄⁺-N)는 식물이나 미생물 등에 의하여 활용되지 않을 경우, 즉시 질산태 질소(NO₃⁻-N)로 변하며 이 질소는 다시 탈질화 작용을 거쳐 단위 생태계에서 방출된다. 탈질화작용은 2단계로 일어나는 현상으로서, 질산태 질소(NO₃⁻-N)가 아질산태(NO₂⁻-N)로 변한 후 다시 N₂O나 N₂로 변하여 공중으로 휘산된다(Paul과 Clark, 1989). 일반적으로 탈질화작용은 혐기적 기작이므로 수분함량이 높고 무기태 질소가 풍부한 곳에서 국소적인 형태로 많이 발생하는데, 이러한 경향은 본 연구결과에도 반영되어 적윤하며 전질소가 많은 계방산의 소나무림에서 탈질균이 가장 많은 것으로 나타났다(표 2). 분산분석 결과 지역 간 차이나 임상에 따른 차이는 유의성이 인정되

Table 2. Population of denitrifying bacteria and sulfur-reducing bacteria at four different stands located in Mt. Kyebangsan and Mt. Namsan(unit : CFU ± standard error/g soil).

Section [†]	Hongcheon (Mt. Kyebangsan)		Seoul (Mt. Namsan)	
	Deciduous	Pine stand	Deciduous	Pine stand
Denitrifying bacteria I	6.9 × 10 ⁴ ± 1.5 × 10 ^{4b*}	4.8 × 10 ⁵ ± 2.0 × 10 ^{5a}	3.0 × 10 ⁵ ± 1.9 × 10 ^{5ab}	5.8 × 10 ⁴ ± 2.8 × 10 ^{4b}
Denitrifying bacteria II	1.4 × 10 ³ ± 6.2 × 10 ^{2b}	2.9 × 10 ⁵ ± 1.5 × 10 ^{5a}	2.7 × 10 ⁵ + 2.4 × 10 ^{5ab}	8.0 × 10 ⁴ + 2.0 × 10 ^{4ab}
Sulfur-reducing bacteria	3.2 × 10 ⁶ ± 1.2 × 10 ⁶	1.1 × 10 ⁶ ± 4.3 × 10 ⁵	3.9 × 10 ⁵ ± 1.4 × 10 ⁵	4.9 × 10 ⁵ + 3.9 × 10 ⁵
Moisture content	46.5 ± 1.3 ^{b*}	60.5 ± 2.5 ^a	31.7 ± 1.8 ^c	26.5 ± 0.5 ^d

* The same letters indicate that the values were not significantly different at the 5% level.

[†] Denitrifying bacteria I participates in the process of NO₃⁻ → NO₂⁻, while denitrifying bacteria II takes part in NO₂⁻ → N₂O process.

지 않았지만 지역과 임상의 상호작용(interaction)이 유의차를 나타내어 남산의 소나무림에 비하여 계방산의 소나무림에서 높음을 인정할 수 있었다. 한편, 질산화작용은 토양을 산성화시키는 기작인 반면 탈질작용은 토양을 알칼리화시키는 기작이므로 탈질균이 많은 것으로 나타나는 계방산 소나무림은 산성화를 막는 기작이 토양생태계내에서 활발히 진행되고 있는 반면, 남산의 소나무림 토양은 이러한 기작이 미미하여 상대적으로 산성화가 지속적으로 진행되고 있음을 시사한다.

황산환원균 분포

황산환원균도 탈질균과 마찬가지로 일반적으로 혐기적인 조건아래에서 유기물을 탄소원으로 활용하는 미생물이다. 하지만, 분산분석 결과 지역간의 차이나 임상에 의한 차이는 전혀 나타나지 않아 남산토양에의 황 집적현상에도 불구하고 황산환원균의 양에 큰 차이가 나타나지 않는 것은 황산환원균이 환원대상인 황의 양과 더불어 탄질물 등 일반적인 미생물 성장환경에 영향을 많이 받음을 시사한다.

혐기적 조건아래에서 철이온(Fe^{3+})과 황산이온(SO_4^{2-})의 환원기작은 Fe^{2+} 이온과 HS^- 이온을 형성한다. 이들은 황산환원균의 검정을 위하여 활용하였듯이 검은색의 침전물을 만들게 되는데 이러한 기작은 단위 생태계의 pH를 상승시키는 역할을 하여 중국에서는 이러한 방법을 산성토양의 중화기법으로 활용하기도 한다(Paul과 Clark, 1989). 즉, 황산환원기작이 활발히 일어난다면 토양의 pH가 상승하는 효과가 있지만, 남산의 토양에서는 이러한 기작도 계방산 생태계에 비하여 황의 집적이 많음에도 불구하고 활발히 일어나지 못하고 있어서 생태계 스스로 안정화를 이루려는 복원력이 극히 미약함을 나타내었다.

결 론

남산토양의 화학적 특성을 대조구로 선정한 계방산 토양의 특성과 비교할 때, 황산화물 등 대기오염원의 유입으로 인하여 산성화가 심하게 진행되었으며, 이로 인한 토양양료의 유실이 심하게 일어난 상태로 추정되었다. 특히, 황산화물의 집적현상이 두드러지게 나타났지만 질소원의 집적은 그리 크지 않은 것으로 판단되었는데, 이와

반대로 황산환원균의 활성은 두 지역간에 큰 차이가 나타나지 않은 반면, 탈질균의 활성은 오염지에서 저하된 것으로 평가할 수 있었다. 이는 미생물 동태가 단순한 인자에 의하여 좌우되지 않고 복합적인 환경요인의 영향을 받음을 다시 확인시켜 주는 예이며, 황의 집적에 따라 황산환원균의 활성이 민감하게 나타나지는 않지만, 다단계로 이루어지는 탈질균의 동태는 대기오염원의 집적에 따라 상대적으로 민감하게 반응함을 추정하게 한다.

본 연구를 통하여 식물 및 미생물의 생육에 가장 큰 영향을 미치는 영양원인 질소의 동태에 영향을 미치는 탈질균은 토양오염도에 따라 변화량이 정량될 수 있었다. 즉, 탈질균의 정량은 토양의 화학적 특성 분석과 더불어 토양오염도의 지표로 활용할 수 있음을 나타냈다. 토양의 산도나 기타 토양환경의 전반적인 변화가 토양생태계의 순환기작에 어떤 영향을 미치는지 파악하기 위한 생물학적인 접근방식으로 탈질균이나 기타 질소 무기화에 관여하는 미생물의 정량기법의 활용도 감안함이 바람직하다.

인 용 문 헌

1. 김동수. 1988. 토양화학분석법. 농촌진흥청, 농업기술연구소. 450pp.
2. 배재근·오종민. 1995. 토양오염학. 서울, 신광문화사. 372p.
3. 유정환·가강현·박 현. 1995. 여천공단의 대기오염이 토양의 화학적 특성, 지의류, 탈질균 및 황산환원균에 미치는 영향. 한국임학회지 84(2) : 178-185.
4. 이수욱·민일식. 1989. 대기오염 및 산성우가 삼림생태계의 토양산도 및 양료분포에 미치는 영향. 한국임학회지 78(1) : 11-25.
5. 이창근(임업연구원). 1988. 대기오염과 산성우가 산림생태계에 미치는 영향. 과학기술처. 191pp.
6. 장남기. 1990. 서울 지역의 대기오염이 강수와 생물에 미치는 영향 2. 능수버들 가로수 피층의 S, Pb 및 Cd 함량에 의한 대기의 상대 오염도의 추정. 한국생태학회지 13(2) : 143-148.
7. 장남기·이경형. 1990. 서울 지역의 대기오

- 염이 강수와 생물에 미치는 영향 1. 지역별 은행나무 낙엽의 S, Pb 및 Cd의 함량. 한국생태학회지 13(3) : 165-172.
8. 장남기 · 이윤상 · 신은영. 1990. 서울 지역의 대기오염이 강수와 생물에 미치는 영향 1. 지역별 강수의 산성화에 관하여. 한국생태학회지 13(2) : 131-142.
 9. Alexander, M. 1982. Most probable number method for microbial populations. Pages 815-820. *In* A. L. Page, ed. *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and microbial properties.* (2nd ed.). ASA. Agronomy Special Publ. No. 9. Madison, WI. 1159pp.
 10. Binkley, D., Y. Son and Z.S. Kim. 1994. Impacts of air pollution on forests : a summary of current situations. *Jour. Korean For. Soc.* 83(2) : 229-238.
 11. Higashida, S. and K. Takao. 1986. Relations between soil microbial activity and soil properties in grassland. *Soil Sci. Plant Nutr.* 32(4) : 587-597.
 12. Johnson, D.W. and S.E. Lindberg. 1992. *Atmospheric Deposition and Forest Nutrient Cycling.* Ecological Studies 91. New York, Springer-Verlag.
 13. Neal, J.L. 1985. *Experiments in Soil Microbiology - a Laboratory Manual.* Virginia Polytech. Blackburg, Virginia. 171pp.
 14. Paul, E.A. and F.E. Clark. 1989. *Soil Microbiology and Biochemistry.* New York, Academic Press. 271pp.
 15. SAS Institute Inc. 1985. *SAS/STAT Guide for Personal Computers, Ver. 6 edit.* Cary NC, USA. 378pp.
 16. Tiedje, J.M. 1982. Denitrification. Pages 1011-1026. *In* A.L. Page, ed. *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and microbial properties.* (2nd ed.). ASA. Agronomy Special Publ. No. 9. Madison, WI. 1159pp.