

&lt;총 설&gt;

## 대기 질소강하물이 육상 생태계에 미치는 영향 및 국내 연구제안

강 호 정

이화여자대학교 과학기술대학원 환경학과

### Effects of Nitrogen Deposition on Terrestrial Ecosystems

Hojeong Kang

Dept. of Environmental Science and Engineering, Ewha Woman's University, 120-750, Seoul, Korea

**Abstract** - Effects of atmospheric nitrogen deposition on terrestrial ecosystems were reviewed and discussed in this paper. The amount of nitrogen deposition has increased rapidly in Europe, North America and Korea due to industrialization, increase in fossil fuel combustion (automobiles in particular), and intensive agricultural activities. Nitrogen input through such deposition may enhance primary productivity at early stage, but it could cause nitrogen saturation and hence induce deterioration of forests or disturbance of systems in the long term. Mechanisms of the deterioration of forests by nitrogen deposition include nutrient imbalance, soil acidification, and immobilization of toxic ions. In addition, nitrogen deposition may impede the decomposition rates of soil organic matter, and induce eutrophication in aquatic ecosystems by enhanced leaching of nitrate. Finally, I propose several topics in relation to nitrogen deposition, which warrant further studies in Korea.

**Key words** : acid deposition, nitrogen saturation, decomposition, organic matter, forest decline,

### 서 론

질소는 생명체를 구성하는 가장 중요한 원소 중에 하나이다. 이 물질은 생체내의 DNA, RNA는 물론 단백질을 구성하는 아미노산의 주요 성분이다. 대기 구성물질 중 질소 기체 ( $N_2$ )가 80% 가까이를 차지하는데도 불구하고, 이것이 무기태(암모니아, 질산 등)나 유기태 질소로 고정되지 않으면 생물체가 이용할 수가 없다. 특히, 육상 생태계에서는 질소가 제한 영양소인 경우가 많고, 성숙한 삼림과 같은 경우 그 시스템 안에서 질소를 효율적으로 사용하기 위한 폐쇄계의 영양소 순환이 매우 발달

되어있다(Aber and Melillo 1991). 식물의 뿌리는 질산이나 암모니아를 흡수하여 식물체 내에서 단백질이나 핵산 성분으로 생합성을 한다. 다년생 식생의 경우 낙엽이 발생할 때 많은 양의 유기 질소가 함께 토양으로 되돌아 가며 이것이 미생물들의 작용으로 분해되어 나오는 무기 질소들은 빠른 속도로 미생물들이나 식물에게 다시 흡수되어 영양소 순환이 유지되는 것이다. 툰드라 및 일부 특수한 지역을 제외하고는(Lipson and Näsholm 2001) 대부분의 식생과 미생물들은 유기태 질소를 직접 흡수할 수가 없고, 체외 효소에 의한 분해에 의해 유기 물질을 암모니아로 바꾸거나, 미생물 대사과정에서 생성된 잉여의 질소가 체외로 배출된 것을 흡수하여 사용한다(Killham 1994).

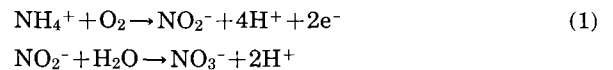
지난 40여년간 인간의 활동(농업, 자동차의 증가, 화석

\* Corresponding author: Hojeong Kang, Tel. 02-3277-3916, Fax. 02-3277-3275, E-mail. hjkang@ewha.ac.kr

원료의 사용 등)으로 인하여 전지구적인 질소 순환에 큰 변화가 일어났는데, 비료생산(년간 80 Tg 질소), 화석 연료 연소(년간 20 Tg 질소), 뿌리혹 박테리아 식물경작(년간 40 Tg 질소)등을 포함한 인간의 활동으로 고정되는 질소의 양은 자연적으로 고정되는 질소량과 엇비슷한 것으로 보고되었다(Vitousek *et al.* 1997). 따라서 질소 기체이외의 형태로 존재하며 순환하는 질소의 양은 증가하게 되고 대기를 통해 육상이나 다른 생태계로 강하되는 질소량도 급격히 증가하고 있다(Holland *et al.* 1999). 질소강하물의 농도가 크게 나타나는 지역은 집약적 농업이 발달한 지역과 산업 및 도시화가 많이 이루어진 곳에서 주로 발견되며, 농업이나 목축이 집약적으로 이루어지는 곳에서는 주로 암모니아성 대기 강하물이 많고 대도시나 공업지대에서는 NO<sub>x</sub> 형태의 강하물이 많이 나타나는 것으로 알려져 있다. 대기 강하물은 습식과 건식 두 가지 형태가 있는데 건식강하에 대한 연구는 많지 않지만, 많은 지역에서 습식 강하량과 비슷하거나 적어도 비교할 만한 양이 강하되고 있는 것으로 추정되고 있다(Ashenden and Edge 1995). 또한 질소강하는 대기를 통한 현상이기 때문에 국지적(local)이기도 하고 지역적(regional)인 현상으로 발견되기도 하며 최근에는 질소강하의 절대량이 증가함에 따라 전지구적인 현상으로 고려되기도 한다(Galloway *et al.* 1994). 대기 질소 강하물의 영향을 받는 대표적인 지역은 네덜란드, 독일, 영국, 스칸디나비아 반도 등을 포함하는 중북부 유럽, 미국의 동부 및 중동부 지역 등이다(Holland *et al.* 1999). 질소 강하가 과학자들의 관심을 끌기 시작한 것은 이러한 지역들에서 삼림의 쇠퇴가 발견되면서부터였다. 기존의 삼림쇠퇴 이론 중 가장 일반적인 것은 황산성분을 포함한 산성비에 의한 효과이다. 그러나 탈황 기술의 발달과 규제법안의 강화로 강우 중 황산성분은 일반적으로 줄어들고 있어서, 과학자들은 새로운 이론들을 내어 놓기 시작했다. 예를 들어, 토양의 산성화로 인한 알루미늄의 유동화와 뿌리에의 독성효과, 오존이나 기타 대기 오염물질에 의한 직접적인 피해, 병균침입의 증가, 자동차로부터 배출되는 유무기 독성물질에 의한 효과 등이 제안되었다(Wright and van Breeman 1995). 그러나 이러한 요인들은 부분적인 현상들만을 설명할 수 있어서, 유럽과 미국의 일부에서는 80년대 중반부터 지나친 질소강하에 의한 삼림쇠퇴가 가장 중요한 요인으로 알려지어서 많은 연구가 진행되고 있다.

일반적으로 삼림을 비롯한 육상생태계는 질소가 제한 요인이기 때문에 대기강하로 첨가된 질소는 비료로써 작용하여 식생의 일차생산성을 증가시킬 수 있다. 그러나 질소첨가가 장기적으로 고농도로 계속 된다면 토양

과 식생에 여러 가지 악영향을 미치고 다른 요소(물, 다른 영양소 등)가 제한 요인으로 작용하여 결국에는 삼림의 쇠퇴를 가져올 수도 있을 것으로 예측이 되었다. 이러한 배경 하에서 '질소포화(nitrogen saturation)'가설이 제시되었다(Skeffington and Wilson 1988; Aber *et al.* 1989). 이 이론에 따르면, 첨가된 질소는 처음에는 식물과 미생물에게 흡수되어 그 성장을 돕고 따라서 식물의 일차 생산성은 증가하는 양상을 보인다. 그러나, 시간이 지남에 따라 과잉의 질소, 특히 잉여 암모니아의 경우는 질산화(nitrification)과정을 거쳐 질산으로 전환되고 이 과정에서 여러 가지 질소 기체(예, 아산화질소, 산화질소 등)가 발생하며, 이동성이 큰 질산은 지하수나 지표수를 통해 호수나 하천과 같은 수체로 이동하게 된다. 이 과정에서 토양의 산성화에 영향을 미치게 되는 주요한 두 반응이 나타나게 된다. 첫째는, 질산화 과정 자체에서 수소이온이 발생하여 토양내의 pH를 낮추게 된다(식 1).



둘째로는, 질산이 물을 따라 이동하며 칼슘(Ca<sup>2+</sup>), 마그네슘(Mg<sup>2+</sup>), 칼륨(K<sup>+</sup>)과 같은 이온들을 함께 이동시켜 토양내의 염기성 양이온 농도를 감소시켜 결국 토양 pH를 낮추는 역할을 한다. 이에 따라 토양의 무기물질에 강력하게 흡착되어 있던, 알루미늄(Al<sup>3+</sup>) 같은 독성이온이 유동화되는 현상도 일어나게 된다. 또한 식물의 입장에서 필요한 양이온 영양소들이 부족하게 된다. 결국에는 영양소의 불균형, 독성이온의 유동화, 토양의 산성화 등으로 인해 식생의 성장이 제한 받거나 오히려 삼림쇠퇴의 원인이 된다(Aber *et al.* 1989).

본 논문에서는, 이러한 질소강하증가의 내용과 그로 인하여 생태계에 미칠 수 있는 영향들을 여러 시공간적인 수준에서 대해 알아보고자 한다. 또한 앞으로 국내에서 진행되어야 한다고 사료되는 연구분야에 대한 제안을 하고자 한다.

## 질소강하 현황

먼저 다루어져야 할 부분은 얼마만한 질소물질이 대기 강하로 나타나고 있으며 그 공간적 시간적 분포는 어떻게 이루어지고 있는 지이다. 자세한 내용은 대기화학 연구분야이나 본 논문에서는 대략적인 결과들만을 보고하고자 한다. 미국의 경우에는 Illinois주를 중심으로 중동부 지역과 북동부 지역의 질소 강하량이 높게 나타나는 것으로 알려져 있으며, 그 양이 5~9 kg N/ha/yr까지

이르는 것으로 보고되고 있다(National Atmospheric Deposition Program; <http://nadp.sws.uiuc.edu>). 유럽의 경우도 5 kg N/ha/yr 이상의 질소 강하에 노출된 지역이 광범위하게 분포하는 것으로 보고 되고 있다(EMEP; <http://www.emep.int>). 한국의 경우도 서울과 춘천의 경우 29~32 kg/ha/yr의 고농도 질소강하가 보고된 바 있고(박 1999), 팔당호로 유입되는 대기 질소 강하물의 양은 0.49~5.2 kg/ha/yr 정도로 추산되고 있어서(한국과학기술연구원 2000), 질소 강하가 육상생태계에 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 서구 선진국과 비슷한 정도의 강하량을 나타내고 있다. 황해의 경우에도 대기로부터 유입되는 질산과 암모니움 양이 강에서 유래하는 것보다 각각 2배에서 10배 가량 더 많은 것으로 보고되었다(홍 등 1997). 또한 Galloway *et al.* (1994)의 전지구적인 NO<sub>x</sub> 강하량 추정에 의하면 미국 중동부, 유럽과 더불어 한국을 포함한 극동 아시아가 1980년대부터 17 kg/ha/yr의 고농도 강하지역이 나타나고 있으며 2020년에는 그 면적이 더욱 확대되어 한국, 중국, 일본에의 질소 강하량은 더욱 증가할 것으로 예측되고 있다.

## 연구 방법

### 1. 장기 질소첨가 실험

가장 일반적인 방법은 다른 요인들이 조절되는 환경 하에서 장기적으로 질소를 가하는 방법으로 유럽의 경우 서로 환경이 다른 여러 나라에서 공동으로 진행된 연구경험이 있다. 대표적인 것이 NITREX 연구계획으로 7개국의 연구지에서 인공질소 강우를 가하거나 대기로부터 유입되는 질소를 배제하면서 육상 생태계가 어떠한 반응을 보이는지를 연구하였다(Emmett *et al.* 1998). 이 연구에서는 노르웨이, 스웨덴, 영국, 스위스, 덴마크, 독일, 네덜란드 등 7개국의 10개 연구지에서 질소를 인공적으로 가하거나, 혹은 기존의 대기 강하량이 높은 지역의 경우에는 산림에 지붕을 설치하여 질소강하를 배제하는 실험을 진행하였다. 이때 가해진 질소의 양은 0에서부터 89 kg/ha/yr였고, 식생의 영양상태, 뿌리/균근류/미소동물, 영양소 순환률, 지구온난화기체의 동태 등이 계속 측정되었다(Wright and van Breeman 1995).

미국의 동부의 삼림에서도 비슷한 접근의 연구들이 장기적으로 광범위하게 진행되었는데 서로 다른 토지이용 내력을 지닌 세 군데의 숲에서 활엽수림과 침엽수림 별로 연구를 진행했다(Aber *et al.* 1998).

### 2. 질소강하 구배 (gradient)에 따른 야외조사

경도나 고도에 따른 질소강하의 구배가 나타나는 지역에서 야외조사를 실시함으로써 질소강하의 효과를 연구할 수 있다(Lovett and Rueth 1999). 또한 질소강하의 농도구배에 따라 식물을 담은 화분을 정치하고 반응을 살피는 연구도 가능하다(Saxe 1994). 이러한 접근법은 장기 질소첨가 보다는 좀더 자연상태에 가까운 조건에서 반응을 살필 수 있는 장점이 있으나, 상관관계 분석으로부터 확실한 결론을 유도하기는 어려울 수도 있다. 예를 들면 질소강하농도의 구배에 따라 다른 대기 오염물질(중금속, 오존 등)의 농도도 함께 변화하는 경우가 있을 수 있다.

### 3. 단기 실험실 조건의 연구

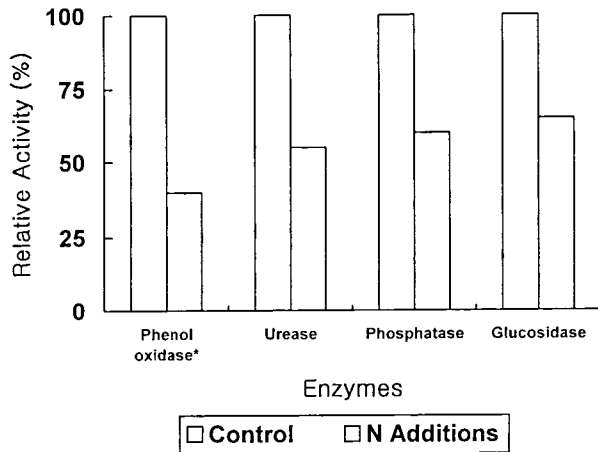
짧은 기간에 적은 비용으로 진행할 수 있는 연구방법으로 실험실이나 온실조건 하에서 서로 다른 농도의 질소물질을 가하고 토양이나 식물체에 나타나는 변화를 추적하는 방법이다. 특히 식물의 발아나 토양내의 미생물의 동태를 밝힐 때 흔히 이용된다. 또 여러 인자를 동시에 고려할 필요가 있을 때(예, 오존 이나 높은 농도의 이산화탄소가 질소 강하물과 동시에 영향을 미치는 실험 계획의 경우)는 실험실 조건이나 온실조건에서 실험이 이루어지는 경우가 많다(Booker *et al.* 2000). 경제적이고 실험조절이 쉽지만, 실험의 결과를 실제 자연환경에서 이루어지는 반응으로 외삽하는데 문제가 있을 수 있다.

## 질소강하가 육상 생태계에 미치는 영향

### 1. 토양 및 토양 미생물에의 영향

육상 생태계에서 토양 미생물과 식물이 일반적으로 질소 결핍(혹은 질소제한) 상태라고 오랫동안 알려져 있고 따라서 질소 첨가는 미생물의 활성 및 식물 성장에 양의 영향을 미칠 것으로 생각 되어왔다. 이러한 생각을 뒷받침하는 실험적인 증거들은 농경지나 삼림등지에서 많이 발견되었다. 예를 들어, 중위도 산림의 경우 낙엽 분해의 속도를 조절하는 중요한 인자로 낙엽내의 질소의 양, 탄소/질소의 비, 리그닌/질소의 비 등이 제안되었다(Melillo *et al.* 1982). 또한 실험실과 야외 실험의 결과 질소 무기화 속도와 낙엽분해율은 양의 상관관계를 보이는 것으로 보고 되었다(McClaugherty *et al.* 1985).

그러나 이러한 상식과 달리 일정량 이상의 과잉 질소



**Fig. 1.** 질소첨가가 토양이나 낙엽에서 미생물의 체외효소 활성에 미치는 영향. \*는 Carreiro *et al.* (2000)에서 변형함.

첨가가 토양 내에서 유기물 분해에 장기적으로는 부정적 영향을 미친다는 것이 Fog (1988)에 의해 보고 되었다. 이 저자는 이러한 반응이 나타나는 이유로 질소 첨가가 토양 미생물 중에 리그닌 분해효소를 생성하는 곰팡이류의 성장을 억제하고, 주로 박테리아로 구성된 미생물 군집으로 변화시키는 것을 제시하였다. 토양내의 유기물 분해속도를 결정하는 것은 주로 난분해성 물질인 리그닌이나 부식질 물질이므로 그러한 미생물 군집의 변화는 유기물 분해속도를 장기적으로 감소시킬 수 있다. 실제로 Carreiro *et al.* (2000)은 질소의 첨가가 삼림저층에서 분해되고 있는 낙엽 속의 페놀산화요소(phenol oxidase)의 활성을 저해하여 낙엽 분해율이 감소하는 것을 관찰하였다. 또한, Kang *et al.* (1997)은 질소첨가가 토양에서 요소분해효소(urease) 활성을 저해함을 보고 하였다. 이밖에도 몇 가지 유기물분해에 관여하는 효소의 활성이 감소함이 관측되었다(Fig. 1). 이러한 영향 등을 고려해볼 때, 단기적으로는 질소의 첨가가 유기물 분해 및 토양내의 영양소 순환을 빠르게 진행시킬 수 있으나 장기적으로는 영양소 순환속도를 감소시키는 효과를 가져올 수도 있다고 사료된다.

## 2. 식물생리적 수준에서의 영향

위에서 언급된 바와 같이 질소 첨가에 의해 식물의 광합성은 증가하고 따라서 일차 생산성도 증가한다. 특히, 질소강하 증가에 따라 식물의 잎에 질소의 농도가 증가하는 것이 알려져 있는데(Pitcairn *et al.* 1995), 이에 따라 광합성에 관여하는 효소(ribulose biphosphate carboxylase)의 양이 증가할 수 있고, 이 양은 광합성 양

과 양의 상관관계를 갖는다(Schlesinger 1997). 그러나 질소강하가 계속 증가함에 따라 식물생리상 몇 가지 변화가 일어나게 된다. 첫째는, 식물의 영양소 균형이 깨지는데, 특히 칼슘:알루미늄 혹은 마그네슘:알루미늄의 비가 떨어지는 현상이 나타난다. 이 현상과 식생의 쇠락과는 유의한 상관관계가 있음이 밝혀졌다(van Dijk and Roelofs 1988). 또한, 이렇게 영양소 불균형을 가진 식생은 환경 스트레스에 아주 약한 것으로 알려져 있는데, 특히 병원균의 침입, 냉해 등에 쉽게 피해를 입는 것으로 보고되고 있으며 알루미늄에 의한 뿌리에 대한 직접적인 피해도 많이 알려져 있다(Nihlgård 1985).

## 3. 군집 수준에서의 영향

식물 각 개체가 질소강하에 영향을 받을 뿐 아니라, 군집수준에서 식물의 종 구성도 변화할 수 있다. 알루미늄 독성에 얼마나 저항성을 갖는지, 증가하는 질소를 얼마나 계속 이용할 수 있는지, 일단 질소 독성에 의해 사멸한 후 새로운 개체가 얼마나 빨리 성장할 수 있는지, 토양의 증가된 질소를 효율적으로 사용할 수 있는지 등이 그 군집의 구조를 결정하는 요인이 된다. 예를 들어, 질소강하가 계속 진행됨에 따라, 알루미늄 독성에 약한 수종(예, spruce, beech)은 감소하고, 다른 수종(예, maple)은 증가할 수도 있고 질소 무기화도 수종에 따라 다르게 나타날 수 있다(Lovett and Rueth 1999). 또한 질소강하는 외래 수종의 침입 및 번성에도 많은 영향을 끼칠 수 있을 것으로 예측되고 있다. 산림 뿐만 아니라 초지에서도 질소강하의 증가가 식생구조를 단순화하는 실험적 결과들도 보고 되었다(Wedin and Tilman 1996). 식물 뿌리부근에 질소고정을 하는 미생물을 가진 식물의 경우에는 질소강하로 인하여 질소 유입이 많아지는 경우, 질소고정 미생물과 공생하지 않는 식물에 대한 우위조건이 없어지므로, 장기적으로 경쟁을 통해 배제될 가능성도 있다.

## 4. 수계 혹은 경관 수준에서의 영향

질소 강하로 인한 삼림의 쇠퇴 및 유출수의 화학적 성질의 변화는 수계 수준에서 많은 변화를 야기할 수 있다. 예를 들어, 토양수 내에 증가된 질산은 유동성이 크기 때문에 수체로 쉽게 유입되어 부영양화를 일으킬 수 있다(Carpenter *et al.* 1998). 삼림의 쇠퇴가 진행되면 삼림에 보유하고 있던 질소도 결국에는 수계로 유입되어 이러한 영양을 더욱 가중시킬 수 있다. 미국의 Gulf of Mexico의 무산소층 생성의 주원인이 질소유입으로 알려져 있는데 이와 같이 질소 강하의 증가는 만이나

하구부근에서 부영양화 빈도와 강도를 증가시킬 가능성을 가지고 있다. 또한 질산의 이동과 더불어 알루미늄과 같은 독성을 가진 이온들이 수계로 유입되어 어류나 패류 등에 독성을 나타낼 수가 있다. 마지막으로 수계내의 습지나 하변 식생들로부터의 탈질작용을 증가시켜서 아산화질소( $N_2O$ )와 같은 지구온난화 기체의 발생을 증가시킬 가능성도 있다.

### 5. 전지구적 규모에서의 영향

전지구적인 규모에서 특히 관심을 끌고 있는 것은 증가된 질소강하가 대기중의 이산화탄소를 고정하는 식물에 어떠한 영향을 미칠 것인가 하는 점이다. 많은 수리 모델들은 금세기 말에는 대기중의 이산화탄소의 농도가 현재의 두 배 이상으로 증가할 것으로 예측하고 있으며, 이에 따라 기온도 2~6°C 정도 상승할 것으로 예상하고 있다. 이에 따라 식물이 더 많은 이산화탄소를 광합성의 과정으로 고정하려 하는 주장과 다른 요인(예, 질소 공급)에 의해 높은 이산화탄소 조건 하에서도 광합성량의 증가에는 한계가 있을 것이라는 주장이 팽팽히 맞서고 있다(Schlesinger and Lichter 2001; Chambers *et al.* 2001). 따라서 대기로부터의 질소강하물의 증가는 이러한 전지구적인 탄소순환에는 큰 영향을 미칠 수 있을 것이다. 즉, 만일 질소강하가 식물성장에 양의 효과를 가져 온다면 증가된 이산화탄소는 더 많은 식물체로 고정될 것이며, 반대로 질소강하로 산림쇠퇴가 일어난다면 이산화탄소를 제거하는 기능을 보이던 산림이 거꾸로 이산화탄소를 배출하는 장소로 바뀔 수 있을 것이다. Nadelhoffer *et al.* (1999)은 질소 강하가 식생에 의한 이산화탄소 고정에 미치는 영향이 미미하다고 보고했으나 이 부분에 대한 반론도 만만치 않아 더 많은 연구가 필요한 분야이다.

## 국내 연구의 제안

### 1. 장기 기초 야외조사 및 질소첨가 실험

질소강하가 생태계에 미치는 영향에 대해서는 이미 미국(예, New England 지방)과 유럽(예, NITREX)에서 많은 연구들이 진행되어왔다. 한국의 경우는 대기강하에 의한 육상생태계의 영향은 산성비의 낮은 pH농도에 대한 연구가 주를 이루고 있다(김 등 2000). 먼저 전국에 걸친 대기로부터의 질소 강하량의 성분(예, 습식 대 건식, 질산 대 암모니아의 비율 등), 시공간적인 변이, 총량

등에 대한 기초적인 조사가 필요하다. 또한, 위에서 언급했던 접근방법들을 이용하여, 식생, 토양, 미생물, 미소동물 등에 미치는 영향을 파악하여 대기 질소강하물의 증가가 생태계 및 다른 환경에 미칠 수 있는 연구가 시급히 진행되어야 한다.

### 2. 적도 지방을 포함하는 국제 공동연구

지금까지의 연구는 주로 중위도 지방의 산림을 중심으로 이루어져왔다. 그러나, 적도 지방의 경우 질소강하에 의한 영향이 아주 다르게 나타날 수 있다. 적도 토양은 낮은 pH로 인한 인산의 가용성이 낮아 질소대신 인이 제한 요소가 될 수 있다. 이 경우에는 첨가되는 질소는 그 생태계 내에 보유되는 기작없이 바로 시스템 밖으로 배출될 수 있다. 예를 들어, 하와이에서의 한 연구에서는 토양에 공급된 질소강하물이 탈질작용을 매개로 바로 기체상태로 대기중으로 배출되는 현상이 관측되었다(Hall and Matson 1999). 그러나 이러한 연구에도 불구하고 적도지방 생태계의 반응 및 기작에 대해서는 아직 많은 부분들이 알려져 있지 않다. 아시아의 적도 지방들은 생태적으로 중요한 지역들을 많이 포함하고 있는데(적도 우림, 습지 등), 이러한 지역을 대상으로 한 질소강하물의 효과를 살피는 것은 생태학 발전에 아주 선도적인 연구가 될 수 있을 것이다.

### 3. 토양 내에서의 질소의 동태

삼림토양 내로 공급된 질소는 식물에 흡수되거나, 미생물의 생체로 고정화되거나, 탈질이나 질산화 단계를 거치며 기체로 발생되거나, 질산의 상태로 토양수의 이동에 따라 시스템 밖으로 제거되거나 하는 등의 거동이 가능하다. 하지만 많은 연구에 있어서 공급된 질소량과 위에서 언급한 과정으로 제거되는 질소량 사이에는 많은 차이가 있어서 이에 의해 설명되지 않는 질소들이 있다. 이를 설명하기 위한 이론으로써 공급된 질소가 토양 유기질소화 되거나, 무생물적인 반응으로 토양에 편입되거나, 현재의 탈질 측정이 부정확 하거나, 증가된 이산화탄소와 더불어 식물 생체량에 고정되는 등의 가설이 제기되었으나 정확한 기작은 아직 알려져 있지 않다(Aber *et al.* 1998). 특히, 토양 내 식물 뿌리 부근에서의 미생물과 식물을 매개한 질소 순환에 대한 연구가 미흡한 실정인데, 이러한 연구는 질소강하가 육상 생태계에 미치는 영향은 물론 장기적인 산림 및 토양에서 생태계의 기능에 대한 중요한 단서가 될 것으로 생각된다.

#### 4. 질소 첨가가 미생물의 구성/활성 및 토양 유기물의 무기화에 미치는 영향

질소 첨가가 토양 내 미생물의 활성에 영향을 미쳐서 유기물 분해속도를 저해 시킬 가능성도 있음을 언급했다. 그러나, 이 이론은 아직 일반화 시킬 수 있는 사실이 아니다. 식생의 종류 및 화학적 성질, 토양의 특성, 역사적인 토지 이용도, 초기 미생물 군집 등 여러 요인들이 다른 상태에서 질소 강하물이 증가함에 따라 토양 미생물 구성 및 미생물의 활성이 어떻게 변화하는지를 살펴서 토양 유기물의 분해 및 이에 따른 무기영양소의 순환이 어떻게 바뀔 것인지를 알아보는 연구가 필요하다. 이를 위하여 분자생물학적 기법 및 생화학적 방법들을 이용하여 연구를 진행하는 것이 매우 중요할 것으로 사료된다.

### 적 요

본 논문에서는 대기로부터 유입되는 질소강하물이 육상생태계에 미칠 영향에 대해 살펴보았다. 질소강하는 산업화 및 화석원료의 사용(특히 자동차의 증가)과 집약적인 농업으로 인해 유럽과 북미를 중심으로 급격한 속도로 증가하고 있으면 한국도 이와 같은 증가 추세를 나타내고 있는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 증가된 질소유입은 처음에는 육상생태계의 일차생산성을 증가시키지만 장기적으로는 산림의 질소포화(Nitrogen Saturation)를 일으켜 산림의 쇠퇴나 생태계의 교란을 일으킬 수 있다. 주요 기작으로는 영양소의 불균형, 토양의 산성화, 독성이온의 유통화 등이 알려져 있다. 이와 더불어 질소강하의 증가는 토양 내 유기물 분해속도를 늦출 수 있으며, 유출되는 질산은 수생생태계의 부영양화를 야기할 수 있다. 마지막으로 이 문제와 연관되어 국내에서 진행해야 한다고 생각되는 연구주제 몇 가지가 제안되었다.

### 사 사

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구 되었음(KRF-2001-003-D00084).

### 참 고 문 헌

김명란, 조애령, 조덕이, 소용영. 2000. 은행나무와 곰솔의 줄기 및 뿌리의 생장과 해부형태에 미치는 인공산성비의

효과. 한국환경생물학회지 18:315-322.

박순용. 1999. 산성비 감시 및 예측 기술 개발. 환경부.

한국과학기술 연구원. 2000. 실시간 호소/하천오염 감시용 센서 및 시스템 개발, 1차년도 연차보고서.

홍기훈, 김석현, 정창수. 1997. 황해본역의 환경오염. Ocean Research 19:55-62.

Aber JD, W McDowell, K Nadelhoffer, A Magill, G Berntson, M Kamakea, S McNulty, W Currie, L Rustad and I Fernandez. 1998. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems-Hypotheses revisited. BioScience 48:921-934.

Aber JD and JM Melillo. 1991. Terrestrial Ecosystems. Saunders College Publishing, PA, USA.

Aber JD, KJ Nadelhoffer, P Steudler and JM Melillo. 1989. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. BioScience 39:378-386.

Ashenden TW and CP Edge. 1995. Increasing concentrations of nitrogen dioxide pollution in rural Wales. Environmental Pollution 87:11-16.

Booker FL, SR Shafer, CM Wei and SJ Horton. 2000. Carbon dioxide enrichment and nitrogen fertilization effects on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plant residue chemistry and decomposition. Plant and Soil 220:89-98.

Carpenter SR, NF Caraco, DL Correll, RW Howarth, AN Sharpley and VH Smith. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. Ecological Applications 8:559-568.

Carreiro MM, RL Sinsabaugh, DA Repert and DF Parkhurst. 2000. Microbial enzyme shifts explain litter decay response to simulated nitrogen deposition. Ecology 81: 2359-2365.

Chambers JQ, N Higuchi, ES Tribuzy and SE Trumbore. 2001. Carbon sink for a century. Nature 410:429.

Emmett BA, D Boxman, M Bredemeier, P Gundersen, OJ Kjonaas, F Moldan, P Schleppe, A Tietema and RF Wright. 1998. Predicting the effects of atmospheric nitrogen deposition on conifer stands: Evidence from the NITREX ecosystem-scale experiments. Ecosystems 1:352-360.

Fog K. 1988. The effects of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter. Biological Review 63:433-462.

Galloway JN, H Levy II and PS Kasibhatia. 1994. Year 2020: Consequences of population growth and development on deposition of oxidized nitrogen. Ambio 23: 120-123.

Hall SJ and PA Matson. 1999. Nitrogen oxide emissions after nitrogen additions in tropical forests. Nature 400: 152-155.

- Holland EA, FJ Dentener, BH Braswell and JM Sulzman. 1999. Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets. *Biogeochemistry* 46:7-43.
- Kang H, C Freeman and BA Emmett. 1997. Effects of long-term nitrogen addition on soil enzyme activities in a Sitka spruce forest. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences* 23:75-80.
- Killham K. 1994. *Soil Ecology*. University Press, Cambridge, UK.
- Lipson D and T Näsholm. 2001. The unexpected versatility of plants: organic nitrogen use and availability in terrestrial ecosystems. *Oecologia* 128:305-316.
- Lovett GM and H Rueth. 1999. Soil nitrogen transformations in beech and maple stands along a nitrogen deposition gradient. *Ecological Application* 9:1330-1344.
- McLaugherty CA, J Pastor and JD Aber. 1985. Forest litter decomposition in relation to soil nitrogen dynamics and litter quality. *Ecology* 66:266-275.
- Melillo JM, JD Aber and JM Muratore. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology* 63:621-626.
- Nadelhoffer KJ, BA Emmett, P Gundersen, OJ Kjønaas, CJ Koopmans, P Schleggi, A Tietema and RF Wright. 1999. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. *Nature* 398:145-148.
- Nihlgård B. 1985. The ammonium hypothesis-An additional explanation of the forest dieback in Europe. *Ambio* 14:2-8.
- Pitcairn CER, D Fowler and J Grace. 1995. Deposition of fixed atmospheric nitrogen and foliar nitrogen content of bryophytes and *Calluna vulgaris* (L.) Hull. *Environmental Pollution* 88:193-205.
- Saxe H. 1994. Relative sensitivity of greenhouse pot plants to long-term exposure of NO<sub>x</sub> and NO<sub>2</sub>-contaminating air. *Environmental Pollution* 85:283-290.
- Schlesinger WH. 1997. *Biogeochemistry-An Analysis of Global Change*. Academic Press. London, UK.
- Schlesinger WH and J Lichter. 2001. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature* 411:466-469.
- Skeffington RA and EJ Wilson. 1988. Excess nitrogen deposition: Issues for consideration. *Environmental Pollution* 54:159-184.
- Vitousek PM, JD Aber, JD Howarth, RW Likens, GE Matson, PA Schindler, DW Schlesinger, WH, and DG Tilman. 1997. Human Alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Application* 7:737-750.
- Van Dijk HFG and JGM Roelofs. 1998. Effects of excessive ammonium deposition on the nutritional status of and condition of pine needles. *Physiologia Plantarum* 73:494-501.
- Wedin D and D Tilman. 1996. Influence of Nitrogen Loading and Species Composition on Carbon Balance of Grasslands. *Science* 274:1720-1721.
- Wright RF and N Van Breeman. 1995. The NITREX project: An introduction. *Forest Ecology and Management* 71:1-6.

(Received 12 March 2001, accepted 1 November 2001)