

## 환경 조건 차이에 의한 경안천 토양의 유기물 분해속도와 온실가스 발생 변화

최 인 영 · 강 민 경 · 최 정 현\*

(이화여자대학교 환경공학과)

Change of Organic Matter Decomposition Rates and Greenhouse Gas Emission of the Soil of Gyeongang Stream under Different Environmental Conditions. *Choi, In young, Min Kyoung Kang and Jung Hyun Choi\** (Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea)

This study investigated the effects of organic matter decomposition on the emission of greenhouse gas under the influence of environmental factors such as change of climate condition (CO<sub>2</sub> concentration and temperature), vegetation, and N concentration in the soil of Gyeongang stream in the laboratory. The experimental results showed that organic matter decomposition and CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> flux were influenced by changes of complex environmental conditions. Organic matter decomposition rate was affected by changes of climate condition with N concentration and climate condition with vegetation. Through the results of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> flux, CH<sub>4</sub> flux was affected by change of climate condition with N concentration and climate condition with vegetation and affected by the presence of vegetation and N concentration. CO<sub>2</sub> flux was affected by change of climate condition with vegetation and vegetation with N concentration. According to results of the study, change of (1) climate conditions, (2) vegetation, and (3) N concentration, each have an effect on organic decomposition rate, that also influences emission of greenhouse gas. It is known that climate change is related to an increase in greenhouse gasses in the atmosphere. However, additional study will be needed whether vegetation could remove positive effect of nitrogen addition in soil since this study shows opposite results of organic matter decomposition in response to the nitrogen addition.

**Key words :** climate change, nitrate, vegetation, decomposition rate, greenhouse gas, flux

### 서 론

산업혁명 이후, 인간 활동으로 인한 지구의 온실가스 배출량은 계속적으로 증가하고 있다. 제4차 IPCC 보고

서에 따르면 산업화 이전에 약 280 ppm이던 CO<sub>2</sub> 농도가 2005년에는 약 379 ppm이 되었고, CH<sub>4</sub> 농도는 산업화 이전 약 715 ppb에서 2005년에는 1,774 ppb로 증가하였다고 한다. 이러한 온실가스의 증가는 지난 100년간 지구 평균 기온을 0.74°C 상승시켰고(IPCC, 2007), 지구

\* Corresponding author: Tel: +82-2-3277-3748, Fax: +82-2-3277-3275, E-mail: jchoi@ewha.ac.kr

온도의 증가로 인한 지표면 가열, 수온 상승, 증발산량 증가는 강수의 세기 및 패턴을 변화시켜 육상 생태계 및 수 생태계에도 영향을 미치게 된다 (Lal and Kimble, 1995).

지구 온난화를 야기시키는 온실 가스 중 가장 많은 양을 차지하고 있는 CO<sub>2</sub>의 대기 중 농도는 1년에 0.5%씩 증가하고 있으며 이러한 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 증가는 식물 생산량의 증가를 가져와 토양 내 축적되는 탄소의 양을 증가시키고 있다 (Lal and Kimble, 1995; Yunsheng *et al.*, 2003). 토양에 포함된 유기 탄소의 양은 약 1500 Pg으로, 이는 대기에 포함된 탄소 양의 약 2배, 식생에 포함된 탄소 양의 약 3배에 해당한다 (IPCC, 2007). 토양 내 유기물은 미생물의 호흡과 분해작용으로 인하여 일부는 땅속에 저장되고 일정부분은 다시 대기 중으로 배출된다. 토양에서 일어나는 생지화학적 유기물 분해 반응은 호기성 분해 (Aerobic respiration), 탈질 (Denitrification), 망간 환원 (Manganese reduction), 철 환원 (Iron reduction), 황 환원 (Sulfate reduction), 메탄 생성 (Methanogenesis)의 과정이 순차적으로 일어난다 (Berner, 1980). 분해 반응의 최종 산물은 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>으로 이러한 토양 내 생지화학적 유기물 분해 반응은 광합성 반응을 통해 대기에서 토양으로 이동하였던 탄소가 다시 대기로 돌아가 (Roden and Wetzell, 1996; Zhu *et al.*, 2010) 대기 중 온실가스 (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) 농도에 영향을 줄 수 있다.

토양의 유기물 분해 반응에 영향을 주는 인자로 토양 내 식물의 영향을 들 수 있는데, 식물이 존재하고 있는 토양은 식물의 성장 및 사멸에 수반되는 다양한 반응기 작용의 영향을 받게 된다. 식물은 토양에 유기물을 공급하여 토양 내 유기물 분해에 관여하는 미생물을 활성화시킬 수 있으며 기공을 통해서 공기 중의 산소를 뿌리로 이동시켜 뿌리의 호흡을 증진시킬 수 있다. 이러한 특징은 갈대과의 식물에서 찾아볼 수 있으며 이동되어진 산소의 일부분은 뿌리 주변의 토양으로 방출되어 혐기적 유기물 분해에 사용되었던 환원된 물질들을 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, HS<sup>-</sup>) 산화시킬 수 있고 (Lim *et al.*, 2009) 산소 운반율은 식물의 종류, 뿌리의 크기와 형태, 산소 요구량 등에 따라 달라질 수 있다 (Armstrong, 1979).

식물 외의 토양의 유기물 분해 반응에 영향을 주는 인자로 토양 내 질소 함유량의 변화를 고려해 볼 수 있다. 급속한 산업화에 따른 인구 증가로 식량 보급을 늘리기 위해 많은 양의 비료가 사용되었고, 이러한 인위적인 질소 퇴적 (Nitrogen deposition)은 자연 생태계의 질소 순환에 영향을 미치고 있다 (Galloway *et al.*, 1995; Vitousek *et al.*, 1997). Galloway (2004)에 따르면 자연

생태계에서 대기 중 질소 (N<sub>2</sub>)로부터 토양 내 이용 가능한 질소인 Reactive N으로 전환되는 비율이 인간 활동에 의해 배출되는 NO<sub>x</sub>와 NH<sub>3</sub>의 증가로 인해 변화된다고 한다. 아시아 지역 토양에서 대기 중 무기질소 퇴적은 1990년대에는 1000~2000 mg N m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> 정도에 해당했으나 NO<sub>x</sub>와 NH<sub>3</sub>의 증가로 인해 2050년 이후로는 약 5000 mg N m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>로 증가될 것으로 예측하고 있다.

토양 생태계로의 질소 퇴적 증가는 토양의 호흡을 증가시켜 (Burton *et al.*, 2004; Swanston *et al.*, 2004; Olsson *et al.*, 2005) 대기 중 CO<sub>2</sub> 배출을 증진시키고, 토양 내 탄소 저장을 줄어든다 (Aber *et al.*, 1993; Cao and Woodward, 1998). 그러나 질소의 퇴적 증가가 토양 내 유기탄소의 분해를 저하시켜 유기 탄소 축적을 증가시킨다는 (Burton *et al.*, 2004) 상반된 연구 결과도 보고되고 있어 토양 내 탄소 순환에 대한 질소의 영향에 대해서는 지속적인 연구가 필요한 상황이다.

따라서 이 연구에서는 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 및 온도증가에 따른 기후 조건의 차이, 식물의 유무, 질소 농도의 차이가 유기물 분해속도에 미치는 영향을 측정하고 이를 통해 대기로 방출되는 온실가스 (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) 발생량에 어떤 영향을 주는지 알아보려고 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구대상지역

경안천은 경기도 용인시 처인구 호동의 용해곡 상봉에서 발원하여 서울시민의 상수원인 팔당호로 유입되는 길이 22.5 km의 국가하천으로 유로연장은 49.3 km, 유역면적은 575.32 km<sup>2</sup>, 국가하천 2개와 지방2급 하천 77개소를 포함하고 있는 한강지류 중 하나이다 (Fig. 1). 경안천 유역은 주로 화강암과 화강편마암으로 구성되어 있고, 구릉성 산지가 발달해 있으며, 하천을 따라 좁고 길게 충적지가 형성되어 면적은 좁은 편이나 관개시설이 잘 되어 있다. 유역의 연 강수량은 1,300 mm 내외로 비교적 많은 편이며 기온의 차가 심하여 연평균 기온은 11°C, 1월 평균기온은 4.7°C, 8월 평균기온은 25.5°C이다 (Kim and Kim, 2005). 경안천에 살고 있는 식물로는 갯버들, 꽃창포, 애기똥풀, 물떡새, 연꽃, 갈대 등이 있고, 주요 자생 식물은 갈대와 부들이다. 갈대는 외떡잎 식물 화본목 화본과의 여러살이 풀로 분포지역은 온대와 한대이고 서식장소는 습지나 갯가, 호수 주변 모래땅이며 크기는 높이 약 3 m 정도에 해당한다. 부들은 외떡잎 식물 부들목 부들과의 여러살이 풀로 한국, 일본, 중국, 필리핀 등의 지역에

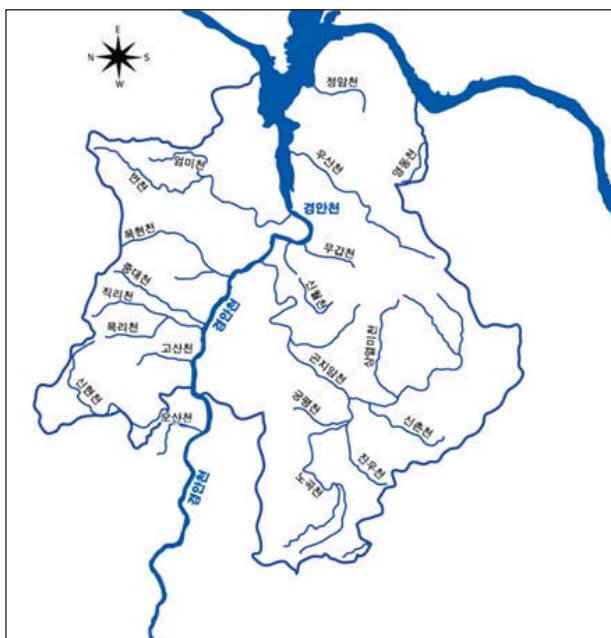


Fig. 1. Location of study area.

서 분포하고 서식장소는 연못 가장자리와 습지이며 크기는 높이 약 1~1.5 m 정도에 해당한다.

## 2. 연구 방법

실험에 필요한 토양은 경안천 유역인 경기도 광주시 퇴촌면 광동리 (37° 27'57.08"N, 127° 18'10.13"E)에서 채취하였다. 경안천에서 6월에 채취한 토양을 2주일간 풍건한 뒤, 2 mm 체로 걸러 균질하게 혼합한 후 사용하였다. 실험실에서 기후 조건 차이에 따른 영향을 알아보기 위해 성장상 (140 × 74 × 1200 cm<sup>3</sup>, Dasol Science, Korea)을 이용하였다. 성장상 1은 현재 대기 상태를 기준으로 CO<sub>2</sub> 390 ppm과 온도 23°C/18°C (day/night)로 유지하였고, 성장상 2는 2100년인 미래 대기 상태를 나타내려고 IPCC 배출 시나리오에 관한 특별보고서 (IPCC Special Report on Emissions Scenarios)에서 A1B 시나리오를 따라 CO<sub>2</sub> 720 ppm과 온도 27°C/22°C (day/night)를 유지하였다. 두 성장상 모두 습도는 70%로 맞추었으며 조도는 낮 (1,000 lux) 14시간, 밤 10시간으로 설정하였다. CO<sub>2</sub> 농도를 유지시키기 위해 계측기 (KORINS KRG701, Korea)로 성장상 내부의 CO<sub>2</sub> 농도와 온도를 측정하였으며, 90일간의 측정치를 Fig. 2에 나타내었다. 성장상 2는 CO<sub>2</sub> 720 ppm을 유지시키기 위해서 CO<sub>2</sub> 흡습제 (Sodasorb CO<sub>2</sub> Absorbent-W.R. GRACE&CO, USA)를 200 g부터 400 g까지 늘려가며 넣어주었다.

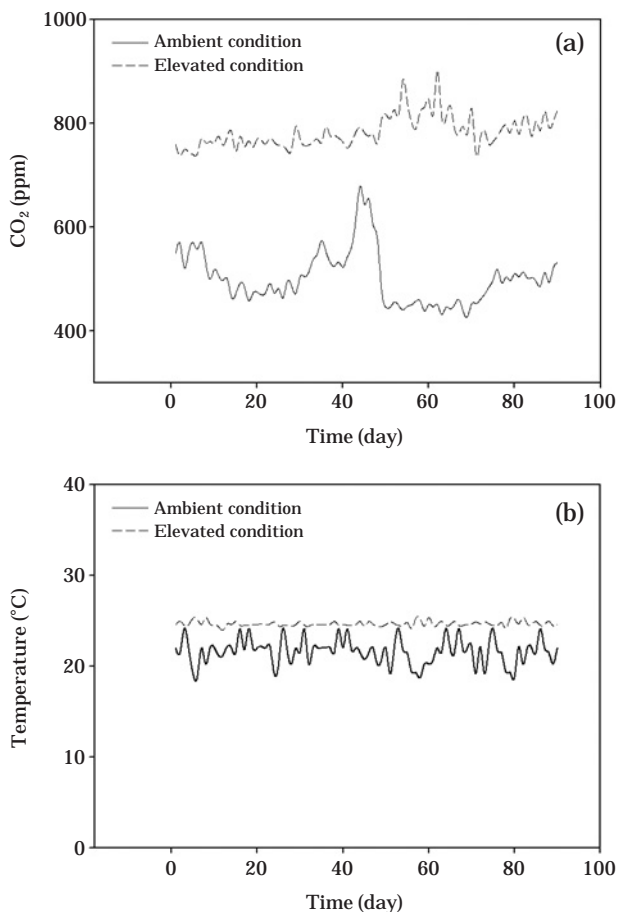


Fig. 2. CO<sub>2</sub> concentration (ppm) and temperature (°C) of the growth chamber under ambient and elevated conditions during the experimental period (90 days). (a) CO<sub>2</sub> concentration (ppm), (b) Temperature (°C).

식물의 존재 여부가 온실가스(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>)발생에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 성장상 1, 2 각각에 식물을 식재하지 않은 화분 4개, 식물을 식재한 화분 4개를 만들어 넣어주었다. 화분에 식재된 식물은 경안천의 우점종인 갈대과의 줄풀 (*Zizania latifolia*)을 식물원에서 구입하여 뿌리에 남아있는 기존의 토양을 증류수로 제거한 뒤, 화분한 개당 2개씩 식재하였다. 토양 표면으로부터 약 1.5 cm 높이에 부표를 만들어 고정시킨 뒤, 수위를 조절하였다.

질소 농도의 차이가 온실가스(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) 발생에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 성장상 1, 2 각각에 식물이 식재되지 않은 화분 1개와 식물이 식재된 화분 1개에 아시아의 예측치인 5000 mg N m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>를 단면적이 490 cm<sup>2</sup> (12.5 cm × 12.5 cm × 3.14)인 화분의 표면적으로 환산하여 0.02 g의 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>를 증류수에 희석하여 한 달에 한번씩 추가하였다. 분석은 화분 설치 후 초기 상태인 8월과

3개월 뒤인 11월에 수행하였다.

### 3. 토양의 물리화학적 특성

토양의 물리화학적 특성을 알아보기 위하여 하천·호소 등 퇴적물 측정망 매뉴얼(환경부 고시 제2011-92호)에 따라 수분 함량 및 완전 연소 가능량, 입도분석을 측정하였다. 수분 함량은 혼합된 토양 시료 5g 이상을 도가니에 넣어 105~110°C 오븐에서 4시간 건조시킨 후 무게를 측정하고, 완전 연소 가능량은 다시 550°C 오븐에서 2시간 동안 가열한 후, 그 무게 차이로 측정하였다.

입도분석은 하천·호소 등 퇴적물 측정망 매뉴얼(환경부 고시 제2011-92호)에 따라 혼합된 토양 20~30g에 과산화수소를 이용하여 유기물과 탄산염을 제거한 뒤, 습식체질법과 건식체질법을 이용하여 분석하였다.

### 4. 유기물 분해속도 측정

기후 조건의 차이, 식물의 유무, 질소 농도의 차이가 토양 내 유기물 분해속도에 미치는 영향을 알아보기 위해 최종 산물인 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>의 발생속도를 측정하였다. 각각의 분해속도 측정은 생장상에서 내경이 3cm, 길이가 10cm인 플라스틱 코어를 이용해 0~10cm 깊이의 토양을 채취한 후, 질소로 충전한 혐기 상태의 글로브 박에서 100 mL serum bottle에 토양 시료 5 mL를 넣고 증류수 5 mL를 넣어 토양 슬러리를 만든 후, 고무마개와 알루미늄 마개를 이용하여 clamping하였다. Clamping한 serum bottle를 혐기성 상태로 14일 동안 배양하며 시간에 따라 발생하는 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> 발생량을 Gas Chromatograph (Agilent technologies 7890A)를 이용해 3 반복하여 측정하였다. Serum bottle에서 가스 시료를 추출하기 전에 동량의 질소가스를 주입하여 serum bottle의 가스 부피를 일정하게 유지하였다(Lim *et al.*, 2009).

### 5. C/N ratio

기후 조건의 차이, 식물의 유무, 질소 농도의 차이가 토양 내 C와 N의 함량에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 원소분석을 하였다. C/N ratio를 측정하기 위해 플라스틱 코어를 이용하여 토양을 채취한 뒤, 60°C에서 건조하여 균일하게 섞은 뒤, 2mg을 취하여 서울대학교 농생명과학공동기기원(Nicem, National Instrumentation Center for Environmental Management)에 Elemental (C, N, S) Analyzer (Flash EA 1112, USA)를 사용하여 분석을 의뢰하였다.

### 6. 온실가스(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) 배출 측정

기후 조건의 차이, 식물의 유무, 질소 농도의 차이가 대기 중 온실가스 발생에 미치는 영향을 알아보기 위해 각 화분에서 시간에 따른 온실가스(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) 기체의 농도 변화를 측정하였다. 지름이 20cm, 높이 70cm인 아크릴로 된 챔버를 씌워 시간에 따라 발생하는 기체를 10분 간격으로 총 120분 동안 500 µL syringe를 이용해 채취한 후 Gas Chromatograph (Agilent technologies 7890A)로 측정하였다. 측정된 기체의 농도를 단위시간 동안 단위 면적에 해당하는 온실가스 발생정도를 나타내는 다음 식을 사용하여 계산하였다(Rolston, 1986).

$$F=V/A (dC/dt) \quad (1)$$

F=가스의 배출, µg m<sup>-2</sup>·hr

V=챔버 부피, m<sup>3</sup>

A=화분의 토양 표면적, m<sup>2</sup>

dC/dt=챔버 내 가스 농도의 시간에 따른 변화, µg m<sup>-3</sup>·hr

### 7. 통계분석

통계분석은 SPSS 12.0K (SPSS Inc., Chicago, USA)를 이용하였으며, 기후 조건의 차이, 식물의 유무, 질소 농도의 차이에 따라 유기물 분해속도 및 토양에서의 온실가스 배출이 통계적으로 유의한 차이를 보이는지 파악하고자 일원일차분산분석(one-way ANOVA test)을 사용하였고 사후분석(post-hoc test)으로 Tukey's test와 Games-Howell test를 사용하였다(p<0.05). 또한 환경조건의 차이가 온실가스(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) 발생량에 미치는 영향을 Pearson correlation을 이용하여 상관관계 분석을 하였다(p<0.01).

## 결 과

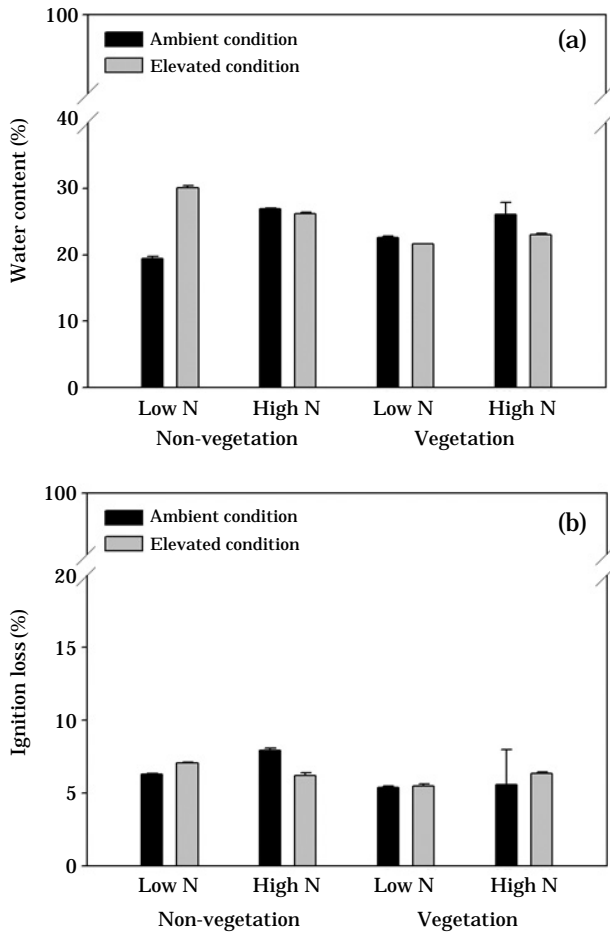
### 1. 물리화학적 특성 결과

#### 1) 수분함량 및 완전 연소 가능량

생장상 1과 2에 사용된 토양들의 수분함량과 완전 연소 가능량을 측정하여 비교해 본 결과 Fig. 3에 나타내었다. 통계 분석결과 수분함량과 완전 연소 가능량 모두 통계적으로 유의한 차이는 없는 것을 알 수 있었다. 수분함량 측정 결과, 기후 조건의 차이가 없는 경우에 대체적으로 높은 값을 보였으나, 기후 조건 차이가 있으면서 식물이 없고 질소 농도가 낮은 경우에서 가장 높은 값을 나타냈다. 그 외에도 식물이 없는 조건, 질소 농도가 높은

경우에서 수분함량이 높게 나타났다.

완전 연소 가능량은 수분함량 측정 결과와는 반대로 기후 조건의 차이가 있을 경우 대체적으로 높은 값을 보여 이를 통해 기후 조건 차이가 있는 토양에서 탄소의 양이 증가함을 알 수 있었다. 그 외에도 식물이 없는 경우, 질소 농도가 높은 경우에 완전 연소 가능량이 높게 나타나 수분함량의 결과와 같은 경향을 보임을 알 수 있었다.



**Fig. 3.** Physical characteristics of soils used in the experiment [n=3]. (a) Water content (%), (b) Ignition loss (%).

**2) 입도분석**

미국 농무성 (USDA)에 따르면 loamy sand의 경우 70~90%의 Sand와 0~30%의 Silt, 0~15%의 Clay로 이루어져 있으며 본 연구 대상지역의 토양 입도 분석 결과, 실험에 사용된 토양은 Sand 79.4%, Silt 13.89%, Clay 6.71%로 비교적 Sand의 비율이 높은 loamy sand에 해당함을 알 수 있었다. 또한 일반적으로 loamy sand의 경우 GLBD (Growth Limiting Bulk Density)는 평균적으로 1.75 g cm<sup>-3</sup> 값을 나타내며 (Richard and Gordon, 1983) 본 연구 대상지역의 토양은 bulk density (부피밀도)가 1.64 g cm<sup>-3</sup>로 비슷한 값을 나타냄을 알 수 있었다. Loamy sand는 공극이 크고 통기성이 높아 낮은 수분함량이 유지되는 것이 보통이며 수분함량의 변화가 낮기 때문에 식물 생육과 재배에 적합한 토양으로 알려져 있다.

**2. 유기물 분해속도 측정 결과**

기후 조건의 차이, 식물의 유무, 질소 농도의 차이 등의 환경 조건 차이에 의한 토양의 유기물 분해속도 (Organic matter decomposition rate) 측정 결과를 Table 1에 나타내었다. 유기물 분해속도를 살펴보면, 기후 조건의 차이에 따른 유기물 분해 속도는 대부분의 경우, 기후 조건의 차이가 없는 환경에서 더 높은 값을 나타내었다. 식물의 유무에 따른 유기물 분해 속도는 식물이 없는 경우에서 더 높은 값을 보였으며 질소 농도의 차이에 따른 유기물 분해 속도는 질소 농도가 낮은 경우 식물이 없는 조건에서, 질소 농도가 높은 경우 식물이 있는 조건에서 대부분 높은 값을 보였다. 기후 조건의 차이가 없는 환경에서 식물이 있고 질소 농도가 높은 경우의 유기물 분해속도가 3.1±0.8 mmol C g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 식물이 없고 질소 농도가 낮은 경우의 유기물 분해속도가 3.1±0.9 mmol C g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>로 가장 높게 나타났으며, 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 식물이 있고 질소 농도가 낮은 경우의 유기물 분해속도가 1.0±0.3 mmol C g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>로 가장 낮게 나타났다.

조건 차이에 따른 유기물 분해속도가 통계적으로 유의

**Table 1.** Organic matter decomposition rate depending on environmental factors [mmol C g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>].

	Anaerobic organic decomposition rate			
	Ambient condition		Elevated condition	
	Non vegetation	Vegetation	Non vegetation	Vegetation
Low N	2.5±1.1 <sup>ab</sup>	2.1±0.6 <sup>ab</sup>	3.1±0.9 <sup>b</sup>	1.0±0.3 <sup>a</sup>
High N	2.1±0.3 <sup>ab</sup>	3.1±0.8 <sup>b</sup>	2.0±0.2 <sup>ab</sup>	1.5±0.2 <sup>ab</sup>

(Low N=N concentration is low, High N=N concentration is high)

**Table 2.** Pearson correlation matrix of Anaerobic decomposition rate [n=48].

		Ambient condition				Elevated condition				
		Non-vegetation		Vegetation		Non-vegetation		Vegetation		
		Low N	High N	Low N	High N	Low N	High N	Low N	High N	
Ambient condition	Non-vegetation	Low N	1							
		High N	-0.24	1						
	Vegetation	Low N	-0.051	-0.539	1					
		High N	0.604	0.075	-0.363	1				
Elevated condition	Non-vegetation	Low N	0.563	-0.763	0.679	-0.099	1			
		High N	-0.128	0.782	0.053	-0.154	-0.271	1		
	Vegetation	Low N	0.508	0.16	-0.485	0.983**	-0.254	-0.169	1	
		High N	0.115	0.581	-0.404	0.768	-0.534	0.349	0.785	1

\*\* : correlation is significant at  $p < 0.01$

(Low N=N concentration is low, High N=N concentration is high)

**Table 3.** Chemical characteristic of soils depending on Environmental factors [n=3].

		C (%)	N (%)	C/N
Ambient condition	Non-Vegetation Low N	2.86 ± 0.50	0.20 ± 0.06	14.44 ± 1.77
	Vegetation Low N	1.77 ± 0.51	0.08 ± 0.05	25.20 ± 10.06
	Non-Vegetation High N	1.92 ± 0.34	0.12 ± 0.03	16.26 ± 1.02
	Vegetation High N	2.16 ± 0.12	0.12 ± 0.02	18.10 ± 2.82
Elevated condition	Non-Vegetation Low N	1.84 ± 0.02	0.09 ± 0.01	21.61 ± 3.39
	Vegetation Low N	1.67 ± 0.04	0.08 ± 0.05	21.03 ± 0.19
	Non-Vegetation High N	2.78 ± 0.12	0.20 ± 0.01	13.86 ± 0.22
	Vegetation High N	2.87 ± 1.05	0.19 ± 0.02	15.37 ± 0.35

(Low N=N concentration is low, High N=N concentration is high)

한 수준 ( $p < 0.05$ )에서 차이를 보이는지 파악하고자 일원 일차분산분석 (one-way ANOVA test)과 사후분석 (post-hoc test-Tukey's test)을 수행하여 Table 1에 유기물 분해속도 결과와 함께 그룹 (a, b)으로 나타내었다. 또한 기후 조건의 차이, 식물의 유무, 질소 농도의 차이 등의 환경 조건 차이가 토양의 유기물 분해속도에 미치는 영향의 상관관계 결과를 Table 2에 나타내었다.

ANOVA test 결과의 사후 분석 (post-hoc test)을 통해, 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 식물이 있고 질소 농도가 낮은 경우 (a)가 기후 조건의 차이가 없는 환경에서 식물이 있고 질소 농도가 높은 경우 (b), 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 식물이 없고 질소 농도가 낮은 경우 (b)와 차이가 있음을 알 수 있었다 ( $p < 0.05$ ). 이를 통해 기후 조건의 차이와 질소 농도의 차이의 복합적 조건, 기후 조건의 차이와 식물 유무의 복합적 조건이 유기물 분해 속도에 영향을 미침을 알 수 있었다.

상관관계 분석 결과, 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 식물이 있고 질소 농도가 낮은 경우와 기후 조건의

차이가 있는 환경에서 식물이 있고 질소 농도가 높은 경우 사이에 양의 상관관계가 (0.983) 있음을 알 수 있었다 ( $p < 0.01$ ).

### 3. C/N ratio 결과

초기 토양의 C/N ratio를 구한결과, 토양의 C는 1.7%, N은 0.2%로 C/N ratio는 8.5로 나타났다. 3개월 후, 환경 조건 차이에 따른 토양의 C/N ratio를 측정된 결과, 초기 토양에 비해 3개월 뒤의 C/N ratio는 적게는 1.5배, 많게는 약 3배 이상으로 모두 증가하였다. C/N ratio의 결과는 Table 3에 제시하였으며 유기물 분해속도와 비교를 위해 Fig. 4에 그래프로 나타내었다.

기후 조건의 차이에 따른 C/N ratio는 대부분의 경우 기후 조건의 차이가 없는 환경에서 더 높은 값을 나타내었고, 식물의 유무에 따른 C/N ratio는 식물이 있는 경우에서 더 높은 값을 보였으며 질소 농도의 차이에 따른 C/N ratio는 대부분의 경우 질소 농도가 낮은 경우에서

높은 값을 보였다. 기후 조건의 차이가 없는 환경에서 식물이 있고 질소 농도가 낮은 경우에 편차는 크나 가장 높은 값을 보였는데, 이를 통해 조건이 복합적일 경우 높은 값을 보이고 있음을 알 수 있었다.

기후 조건의 차이에 상관없이 질소 농도가 높은 환경에서 N(%)가 높게 나타났고, 기후 조건의 차이가 있는 환경에서는 높은 N(%)에 따라 C(%)도 높게 나타나 질소 농도의 증가가 토양 내 탄소량 증가에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다. 또한 기후 조건의 차이가 없는 환경에서 식물이 없고 질소 농도가 낮은 경우, 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 식물이 없고 질소 농도가 높은 경우, 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 식물이 있고 질소 농도가 높은 경우에 C(%)가 높게 나타났으며 N(%) 또한 다른 경우보다 높게 나타나 C/N ratio가 비슷한 결과를 나타내는 것을 볼 수 있는데 (Table 3) 이를 통해 기후 조건의 차이와 식물 유무, 질소 농도 차이에 의한 복합적인 영향이 C/N ratio를 변화 시킬 수 있음을 알 수 있었다.

C/N ratio가 낮은 경우는 토양 내 높은 질소 농도로 인하여 분해속도가 빨라지게 된다. 높은 질소 농도는 미생물이 질소를 사용하는 데 있어 도움을 주게 되며 이로

인해 미생물의 분해는 더욱 증진되게 된다. 미생물의 분해로 인한 질소 농도의 증가로 인해 다시 토양 내의 질소의 함량은 증가되며 곧 낮은 C/N ratio가 유지되게 된다. 이와 반대로 C/N ratio가 높은 경우는 분해속도가 낮은 편이기 때문에 미생물이 사멸 후 분해되어 질소와 암모늄을 방출시키기 전까지 토양의 질소와 암모늄을 사용하게 된다. 따라서 토양 내 낮은 질소 함량으로 인해 높은 C/N ratio가 유지되게 된다 (Kristina, 2009).

**4. 온실가스 (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) 배출 측정 결과**

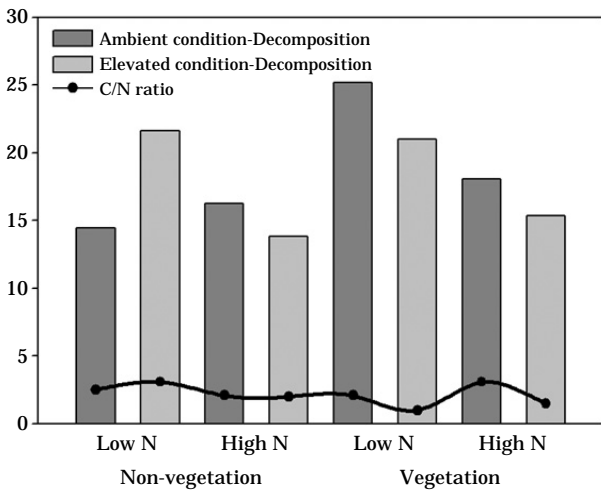
토양에서 발생된 CH<sub>4</sub>와 CO<sub>2</sub> 기체의 농도를 측정한 후, 식 (1)을 이용하여 기후 조건의 차이, 식물의 유무, 질소 농도의 차이 따라 변화되는 온실기체 (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) flux를 산정하였다. 기후 조건의 차이, 식물의 유무, 질소 농도의 차이 등의 환경 조건 차이가 온실 가스 발생량에 영향을 주는지를 파악하기 위해 Pearson correlation을 이용하여 상관관계 분석을 하였다 (p<0.01). 또한 환경 조건 차이에 따른 온실가스 발생량이 통계적으로 유의한 수준 (p<0.05)에서 차이를 보이는지 파악하고자 일원일차분산분석 (one-way ANOVA test)과 사후분석 (post-hoc test)으로 Tukey's test와 Games-Howell test를 사용하였다.

**1) CH<sub>4</sub> flux**

각 조건 별로 측정한 CH<sub>4</sub> flux를 Table 4에 나타내었으며 사후분석 (post-hoc test-Tukey's test)의 결과를 CH<sub>4</sub> flux 결과와 함께 그룹 (a, b)으로 나타내었다 (p<0.05).

기후 조건의 차이에 따른 CH<sub>4</sub> flux는 기후 조건의 차이가 있는 환경에 더 높은 값을 나타내었다. 식물의 유무에 따른 CH<sub>4</sub> flux는 대부분의 경우 식물이 있는 경우에서 더 높은 값을 보이나, 기후 조건의 차이가 있으며 식물이 없고 질소 농도가 높은 경우에 이례적인 높은 값을 보였다. 질소 농도의 차이에 따른 CH<sub>4</sub> flux는 질소 농도가 높은 경우에서 더 높은 값을 보였다.

상관관계 분석 결과, CH<sub>4</sub> flux는 상관관계가 없는 것으로 나타났으며 ANOVA test 결과의 사후 분석 (post-hoc test)을 통해 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 식물이



**Fig. 4.** Comparison of organic matter decomposition rate with C/N ratio.

**Table 4.** CH<sub>4</sub> fluxes depending on environmental factors [mg m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup>].

	CH <sub>4</sub> flux			
	Ambient condition		Elevated condition	
	Non vegetation	Vegetation	Non vegetation	Vegetation
Low N	1.8 <sup>ab</sup> ± 2.9	0.0 <sup>b</sup> ± 0.0	0.0 <sup>b</sup> ± 0.0	4.0 <sup>ab</sup> ± 1.8
High N	0.0 <sup>b</sup> ± 0.0	2.2 <sup>ab</sup> ± 1.5	40.3 <sup>ab</sup> ± 44.9	4.9 <sup>a</sup> ± 2.3

(Low N=N concentration is low, High N=N concentration is high)

**Table 5.** CO<sub>2</sub> fluxes depending on environmental factors [mg m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup>].

	CO <sub>2</sub> flux			
	Ambient condition		Elevated condition	
	Non vegetation	Vegetation	Non vegetation	Vegetation
Low N	247.3 <sup>ab</sup> ± 220.1	283.1 <sup>b</sup> ± 82.0	93.6 <sup>a</sup> ± 63.6	154.8 <sup>ab</sup> ± 160.4
High N	214.8 <sup>ab</sup> ± 152.6	267.3 <sup>ab</sup> ± 137.4	631.7 <sup>ab</sup> ± 425.1	507.7 <sup>b</sup> ± 840.7

(Low N=N concentration is low, High N=N concentration is high)

**Table 6.** Pearson correlation matrix of CO<sub>2</sub> flux [n=48].

		Ambient condition				Elevated condition				
		Non-vegetation		Vegetation		Non-vegetation		Vegetation		
		Low N	High N	Low N	High N	Low N	High N	Low N	High N	
Ambient condition	Non-vegetation	Low N	1							
		High N	-1	1						
	Vegetation	Low N	-0.5	0.5	1					
		High N	0.798	-0.798	-0.921	1				
Elevated condition	Non-vegetation	Low N	-0.998*	0.998*	0.554	0.835	1			
		High N	-0.98	0.98	0.664	0.903	0.991	1		
	Vegetation	Low N	-0.913	0.913	0.103	0.482	0.885	0.812	1	
		High N	-0.407	0.407	0.995	0.876	0.465	0.582	-0.001	1

\*: correlation is significant at p &lt; 0.05

(Low N=N concentration is low, High N=N concentration is high)

있고 질소 농도가 높은 경우 (a)가 기후 조건의 차이가 없는 환경에서 식물이 없고 질소 농도가 높은 경우 (b), 기후 조건의 차이가 없는 환경에서 식물이 있고 질소 농도가 낮은 경우 (b), 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 식물이 없고 질소 농도가 낮은 경우 (b)의 각각의 경우와 차이가 있음을 알 수 있었다. 이를 통해 기후 조건의 차이와 식물 유무, 기후 조건의 차이와 질소 농도의 차이, 식물 유무와 질소 농도의 차이의 복합적 영향이 CH<sub>4</sub> flux 결과에 영향을 미침을 알 수 있었다.

## 2) CO<sub>2</sub> flux

각 조건에 따라 측정된 CO<sub>2</sub> flux 결과는 사후분석 (post-hoc test-Games-Howell test) 결과와 함께 Table 5에 그룹 (a, b)으로 나타내었다 (p < 0.05). Pearson correlation을 이용한 CO<sub>2</sub> flux의 상관관계 분석 결과는 Table 6에 나타냈다 (p < 0.01).

기후 조건의 차이에 따른 CO<sub>2</sub> flux는 기후 조건 차이가 없는 환경에서 질소 농도가 낮은 경우, 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 질소 농도가 높은 경우 높은 값을 보였다. 식물의 유무에 따른 CO<sub>2</sub> flux는 대부분의 경우 식물이 있는 경우에서 더 높은 값을 보이나, 기후 조건의

차이가 있는 환경에서 식물이 없고 질소 농도가 높은 경우 이례적인 높은 값을 보여 통계결과, 식물의 유무와 질소의 농도 변화에 따른 영향이 있는 것과 같은 결과를 보여줌을 알 수 있었다. 질소 농도의 차이에 따른 CO<sub>2</sub> flux는 기후 조건의 차이에 따른 결과와 같은 양상(기후 조건 차이, 질소 농도의 차이에 따른 영향)을 보였다.

CO<sub>2</sub> flux는 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 질소 농도가 높은 경우에 높은 값을 보였다. 그러나 이 경우 유기물 분해속도, CH<sub>4</sub> flux 결과와 마찬가지로, 식물이 없는 경우가 식물이 있는 경우보다 높은 값을 보여 질소의 영향이 식물이 없을 경우에 더 큼을 알 수 있었다.

상관관계 분석 결과, CO<sub>2</sub> flux는 기후 조건의 차이가 없는 환경에서 식물이 없고 질소 농도가 낮은 경우와 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 식물이 없고 질소 농도가 낮은 경우에 양의 상관관계 (0.998)를 나타냈으며, 기후 조건의 차이가 없는 환경에서 식물이 없고 질소 농도가 높은 경우와 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 식물이 없고 질소 농도가 낮은 경우 또한 양의 상관관계 (0.998)을 나타냈다. ANOVA test 결과의 사후 분석 (Games-Howell test)을 통해 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 식물이 없고 질소 농도가 낮은 경우 (a)가 기후 조건의



차이가 없는 환경에서 식물이 있고 질소 농도가 낮은 경우 (b), 기후 조건의 차이가 있는 환경에서 식물이 있고 질소 농도가 높은 경우 (b)의 각각의 경우와 차이가 있음을 알 수 있었다. 이를 통해 기후 조건의 차이와 식물 유무, 식물 유무와 질소 농도의 차이의 복합적 영향이 CO<sub>2</sub> flux 결과에 영향을 미침을 알 수 있었다.

## 고 찰

이 연구는 기후 조건의 차이, 식물의 유무, 질소 농도의 차이에 따른 토양의 생물학적 유기물 분해속도의 변화가 대기 중 온실가스(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) 발생에 미치는 영향을 알아 보고자 하였다.

본 연구 결과, 유기물 분해속도와 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> flux 모두 환경 조건이 복합적으로 있는 경우에 영향을 받음을 알 수 있었다. 유기물 분해 속도는 기후 조건의 차이와 질소 농도의 차이, 기후 조건 차이와 식물의 유무가 있는 경우에 영향을 받음을 알 수 있었다. CH<sub>4</sub> flux는 기후 조건의 차이와 질소 농도의 차이, 기후 조건의 차이와 식물의 유무, 식물의 유무와 질소 농도의 차이가 있는 경우에 영향이 있었으며 CO<sub>2</sub> flux는 기후 조건의 차이와 식물의 유무, 식물의 유무와 질소 농도의 차이가 있는 경우에 영향이 있음을 통해 기후 조건의 차이와 식물의 유무, 질소 농도의 차이가 유기물 분해속도에 영향을 주어 대기 중 온실가스 발생에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다.

토양의 수분함량이 높아질 수록 산소(O<sub>2</sub>)의 확산이 저해되며 이는 유기물의 분해와 CO<sub>2</sub> 생산을 감소시키는 요소로 작용 하게 된다(Davison *et al.*, 1998). 그러나 기후 조건의 차이와 수분함량의 복합적 영향에 관해서는 연구가 부족한 상황이라 토양의 수분함량이 유기물의 분해와 CO<sub>2</sub> 생산에 미치는 영향에 대해서는 의문점이 남아있다. 본 연구결과에서 기후 조건의 차이가 없는 환경에서 식물이 없고 질소 농도가 높은 경우 수분함량과 유기물 함량, C/N ratio가 높게 나타났으나 유기물 분해속도와 온실가스(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) 발생량은 낮음을 알 수 있었다. 이를 통해 높은 수분함량이 유기물의 분해를 저해시켜 토양 내의 유기물 함량이 높아지게 되고 이로 인해 온실가스 발생에도 영향을 미쳤음을 알 수 있었다. Coviella *et al.* (2000)에 의하면 CO<sub>2</sub> 농도가 높은 조건에서는 식물의 광합성률이 높아지므로 이는 C/N ratio를 증가시킬 수 있으며 이때 Fertilizer의 역할로 질소를 추가 시, C/N ratio의 증가를 막을 수 있다고 한다. 실험 결과에 따르면 CO<sub>2</sub> 농도가 높은 조건에서 질소를 추가한 경우 C/N ratio가

낮음을 통해 Coviella (2000)의 결과와 같은 경향을 나타낼 수 있었다.

육상생태계에서 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도와 온도의 증가는 leaf litter quality와 분해속도를 저하시키며 이는 생태계의 양분순환속도(Nutrient cycling rate)를 감소시키게 되어 자연 생태계에 저장되어있는 탄소의 분해능을 떨어뜨리게 된다(Hirschel *et al.*, 1997). 그러나 토양 생태계로 질소를 유입시킬 경우, 유기물질 분해를 증가시킬 수 있다고 알려져 있다(Luxmoore, 1981; Korner and Arnone, 1992; Billes *et al.*, 1993; Zak *et al.*, 1993). 본 연구 결과에서도 CO<sub>2</sub> 농도와 온도를 증가시킨 기후 조건 차이의 환경에서 유기물 분해 속도와 온실 가스(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>)발생이 기후 조건 차이가 없는 환경에 비해 낮은 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 fertilizer의 역할로 질소를 추가한 결과, 질소 농도가 높은 경우 유기물 분해속도와 온실가스 발생이 높은 값을 보이는 것을 관찰할 수 있어 질소의 영향이 토양의 유기물 분해 속도를 증가시켜 대기 중 온실가스 배출을 증진시키고 토양의 탄소 저장 능력을 줄어든게 함을 알 수 있었다(Aber *et al.*, 1993; Cao and Woodward, 1998).

기후 변화 조건 하에서 질소 유입이 된다 하더라도 다른 조건이 변화할 경우(ex, 식물의 유무) 토양 내 유기물 분해에 미치는 영향이 달라질 수 있음을 다른 연구결과에서도 발견할 수 있었다(Cardon, 1996). 본 연구결과에서도, 기후 조건 차이와 식물에 의한 복합적 영향으로 인해 litter quality가 저하되어 유기물 분해속도가 감소하게 되고, 이는 양분순환속도(Nutrient cycling rate)를 감소시켜 온실가스(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>)의 대기 중 배출을 저해하게 되므로 토양 생태계 내의 탄소 저장을 증가시키게 됨을 알 수 있었다(Rastetter *et al.*, 1992; Hirschel *et al.*, 1997).

기후 조건 차이는 토양의 분해를 증진시켜 대기로 방출되는 온실가스 또한 가중시킬 수 있다고 알려져 있으나, 본 연구를 통해 기후변화가 유기물의 분해와 대기로의 온실가스 방출을 감소시킬 수 있다는 결과를 도출할 수 있었으며 기후 조건 차이 외의 질소가 유입될 경우, 순영향(positive effect)을 주게 됨을 알 수 있었다. 그러나 식물의 영향이 작용할 경우 질소의 유입으로 인한 순영향을 감소시킬 수 있음을 알 수 있었으며, 이에 따른 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 적 요

이 연구는 경안천 토양에서 기후 조건의 차이, 식물의

유무, 질소 농도의 차이에 따른 토양의 생물학적 유기물 분해속도의 변화가 대기 중 온실가스(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) 발생에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

본 연구 결과, 유기물 분해속도와 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> flux 모두 환경 조건이 동시에 변화하는 경우에 영향을 받음을 알 수 있었다. 유기물 분해 속도는 기후 조건의 차이와 질소 농도의 차이, 기후 조건 차이와 식물의 유무가 있는 경우에 영향을 받음을 알 수 있었다. CH<sub>4</sub> flux는 기후 조건 차이와 질소 농도의 차이, 기후 조건 차이와 식물의 유무, 식물의 유무와 질소 농도의 차이가 있는 경우에 영향이 있었으며 CO<sub>2</sub> flux는 기후 조건 차이와 식물의 유무, 식물의 유무와 질소 농도의 차이가 있는 경우에 영향이 있음을 통해 기후 조건 차이와 식물의 유무, 질소 농도의 차이가 유기물 분해속도에 영향을 주어 대기 중 온실가스 발생에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다.

기후 조건 차이는 토양의 분해를 증진시켜 대기로 방출되는 온실가스 또한 가중시킬 수 있다고 알려져 있으나, 본 연구를 통해 기후변화가 유기물의 분해와 대기 중 온실가스 방출을 감소시킬 수 있다는 결과를 도출할 수 있었으며 기후 조건 차이 외의 질소가 유입될 경우, 순영향(positive effect)을 주게 됨을 알 수 있었다. 그러나 식물의 영향이 작용할 경우 질소의 유입으로 인한 순영향을 감소시킬 수 있음을 알 수 있었으며, 이에 따른 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 20120000855).

## 인 용 문 헌

- Aber, J.D., A. Magill, R. Boone, J.M. Melillo, P. Steudler and R. Bowden. 1993. Plant and soil responses to three years of chronic nitrogen additions at the Harvard Forest. *Petersham, MA. Ecological Applications* **3**: 156-166.
- Armstrong, W. 1979. Aeration in higher plants. *Advanced in Botanical Research* **7**: 225-232.
- Berner, R.A. 1980. Early Diagenesis. A Theoretical Approach, Princeton University Press, Princeton., NJ, 241.
- Billes, G., H. Rouhier and P. Bottner. 1993. Modifications of the carbon and nitrogen allocations in the plant (*Triticum aestivum* L.) Soil system in response to increased atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *Plant and Soil* **157**(2): 215-225.
- Burton, A.J., K.S. Pregitzer, J.N. Crawford, G.P. Zogg and D.R. Zak. 2004. Simulated chronic NO<sub>3</sub><sup>-</sup> deposition reduces soil respiration in northern hardwood forests. *Global Change Biology* **10**: 1080-1091.
- Cao, M. and F.I. Woodward. 1998. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature* **393**: 249-252.
- Cardon, Z.G. 1996. Influence of rhizodeposition under elevated CO<sub>2</sub> on plant nutrition and soil organic matter. *Plant and Soil* **187**(2): 277-288.
- Coviella, C.E., D.J.W. Morgan and J.T. Trumble. 2000. Interactions of Elevated CO<sub>2</sub> and Nitrogen Fertilization: Effects on Production of *Bacillus thuringiensis* Toxin in Transgenic Plants. *Environmental and Entomology* **29**(4): 781-787.
- Davidson, E.A., E. Belk and R.D. Boone. 1998. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology* **4**: 217-227.
- Galloway, J.N., F.J. Dentener and D.G. Capone. 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry* **70**(2): 153-226.
- Galloway, J.N., W.H. Schlesinger, H. Levy, A. Michaels and J.L. Schnoor. 1995. Nitrogen fixation: Anthropogenic enhancement-environmental response. *Global Biogeochemical Cycles* **9**: 235-252.
- Hirschel, G., C.H. Korner and J.A. Arnone. 1997. Will rising atmospheric CO<sub>2</sub> effect leaf litter quality and in situ decomposition rates in native plant communities? *Oecologia* **110**(3): 387-392.
- IPCC, Climate change. 2007. The Physical Science Basis. Cambridge University Press, New York.
- IPCC, Climate change. 2007. IPCC Fourth Assessment Report (AR4). Cambridge University Press, New York.
- Kim, K.T. and J.H. Kim. 2005. Analysis of Landscape structure change for Riparian Buffer Zone KyangAn Watershed. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* **8**(3): 74-83.
- Korner, C. and J.A. Arnone. 1992. Responses to elevated carbon dioxide in artificial tropical ecosystems. *Science* **257**: 1672-1675.
- Kristina, A.G. 2009. Basic biological factors of soil carbon and nitrogen. National soil survey center, NRCS, USDA, Lincoln, Nebraska.
- Lal, R. and J. Kimble. 1995. Soils and Global Change. In *Advances in Soil Science*. CRC Press, 1-2.

- Lim, B.M., B.M. Ki and J.H. Choi. 2009. A Study on the Biogeochemistry of the Sediments in the Han River Estuary. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **31**(10): 839-844.
- Luxmoore, R.J. 1981. CO<sub>2</sub> and Phytomass. *Bio Science* **31**: 626.
- Mosier, A.R. 1998. Soil processes and global change. *Biology and Fertility of Soils* **24**(3): 221-229.
- Olsson, P., S. Linder, R. Giesler and P. Hogberg. 2005. Fertilization of boreal forest reduces both autotrophic and heterotrophic soil respiration. *Global Change Biology* **11**: 1745-1753.
- Rastetter, E.B., R.B. Mckane, G.R. Shaver and J.M. Melillo. 1992. Changes in C storage by terrestrial ecosystems: How C-N interactions restrict responses to CO<sub>2</sub> and temperature. *Water Air & Soil Pollution* **64**(1): 327-344.
- Richard, L.D. and E.W. Gordon. 1983. Growth limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. Watershed systems development group USDA Forest service.
- Roden, E.E. and R.G. Wetzel. 1996. Organic carbon oxidation and suppression of methane production by microbial Fe(III) oxide reduction in vegetated and unvegetated freshwater wetland sediments. *Limnology and Oceanography* **41**(8): 1733-1748.
- Rolston, D.E. 1986. Methods of Soil Analysis: Part 1, Physical and Mineralogical Methods, 2<sup>nd</sup> Edition. American Society of Agronomy/Soil Science of America, Madison, Wisconsin.
- Swanston, C., P.S. Homann, B.A. Caldwell, D.D. Myrold, L. Ganio and P. Sollins. 2004 Long-term effects of elevated nitrogen on forest soil organic matter stability. *Biogeochemistry* **70**: 227-250.
- Vitousek, P.M., J.D. Aber, R.W. Howarth, G.E. Likens, P.A. Matson, D.W. Schindler, W.H. Schlesinger and G.D. Tilman. 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecology Application* **7**: 737-750.
- Yunsheng, L., L. Zhongpei and Z. Taolin. 2003. Carbon dioxide flux in a subtropical agricultural soil of China. *Water Air & Soil Pollution* **149**(1): 281-293.
- Zak, D.R., K.S. Pregitzer, P.S. Curtis, J.A. Teeri, R. Fogel and D.L. Randlett. 1993. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and feedback between carbon and nitrogen cycles. *Plant and Soil* **151**(1): 105-117.
- Zhu, R., L. Yashu, X. Hua, H. Tao, S. Jianjun, M. Erdeng and S. Liguang. 2010. Carbon dioxide and methane fluxes in the littoral zones of two lakes, east Antarctica. *Atmospheric Environment* **44**(3): 304-311.

(Manuscript received 14 August 2012,  
Revised 8 October 2012,  
Revision accepted 28 December 2012)