

## Closed chamber를 이용한 토양 N<sub>2</sub>O 배출량과 주요 토양 인자들과의 상관성

### The Relevance of Soil N<sub>2</sub>O Emissions Measured by a Closed Chamber Technique on the Physico-chemical Soil Parameters

김 득 수\* · 오 진 만

군산대학교 토목환경공학부 환경공학전공 대기환경연구실

(2004년 7월 8일 접수, 2004년 12월 1일 채택)

Deug-Soo Kim\* and Jin Man Oh

*Atmospheric Environmental Research, School of Civil & Environmental Engineering,*

*Kunsan National University, Kunsan, Korea*

(Received 8 July 2004, accepted 1 December 2004)

#### Abstract

Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) has been known as an important trace gas due to the greenhouse gas and the major source of stratospheric oxide of nitrogen (NO). Soil is the major source of N<sub>2</sub>O in nature. The physicochemical characteristics of soils affect the emission of N<sub>2</sub>O from soil. These physicochemical parameters are soil moisture, soil temperature, and soil N content. Since these parameters are correlated to the flux of N<sub>2</sub>O from soil individually and compositely, there still remain many unknowns in the mechanism to produce N<sub>2</sub>O in soil and the roles of such physicochemical parameters which affect the soil N<sub>2</sub>O emission. Soil N<sub>2</sub>O fluxes were measured at different levels in water filled pore space (WFPS), soil temperature and soil N contents from the same amounts of soils which were sampled from agriculturally managed upland field in a depth of ~30 cm at Kunsan. The soil N<sub>2</sub>O flux measurements were conducted in a laboratory with a closed flux chamber system. The optimum soil moisture and soil temperature were observed at 60% of WFPS and ~13°C. The soil N<sub>2</sub>O flux increased as soil N contents increases during the whole experimental hours (up to 48 hours). However, average N<sub>2</sub>O flux decreased after ~30 hours when organic carbon was mixed with nitrogen in the sample soils. It is suggested that organic carbon could be important for the emission of N<sub>2</sub>O, and that the ratio of N to C needs to be identified in the process of N<sub>2</sub>O soil emission.

**Key words :** Soil N<sub>2</sub>O emission, Soil flux, Nitrous oxide, Soil flux measurements, Closed chamber

#### 1. 서 론

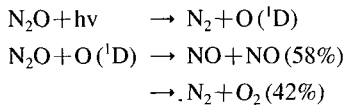
대기내의 아질산(N<sub>2</sub>O)가스가 Adel에 의해 처음으

로 발견된 이후 약 30여 년 동안은 주요 연구대상으로서 주목을 받지 못하였다(Warneck, 1988). 그 주된 이유로는 N<sub>2</sub>O가 독성을 띄지 않으며, 화학적으로도 매우 안정한 기체이기 때문에 여겨진다. 그러나 1970년대 이르면서 성층권내에서 광분해(photo-decomposition)되어 이차반응결과로 성층권 오존농도

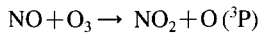
\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)63-469-4764, E-mail : dskim@kunsan.ac.kr

를 감소시키는 결과를 초래함이 알려지고부터(Crutzen, 1970, 1971), 이들의 지구배출량과 배출원 특성에 관한 조사와 연구가 본격화되기 시작했다.

N<sub>2</sub>O의 주요배출은 자연배출로 분류되는 토양 내 미생물 활동과정과 밀접한 연관을 갖고 있으며, 이렇게 하여 지표 부근에서 배출된 기체가 오랜 체류기간(166±16년, Prinn *et al.*, 1990)을 거쳐 성층권으로 유입되어 성층권에서 자외선 흡수에 따른 다음과 같은 광분해 과정을 거치게 된다.



이러한 일련의 반응들은 중간과 상부 성층권내에서 우세하게 일어나며, 이 때 발생된 NO가 성층권에서 오존을 제거하는 반응으로 이어진다.



한편으로 N<sub>2</sub>O는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>와 함께 지구온난화를 가속시키는 주요 온실기체(greenhouse gas)이며, 매년 0.6~0.9 ppbv/year (0.2~0.3%/yr) 평균증가율을 나타내는 것으로 보고 된다. 대기 중 열을 흡수할 수 있는 능력을 CO<sub>2</sub>와 비교해서 수치화한 지구온난화지수(GWP: global warming potential)가 CO<sub>2</sub>의 310배 정도로 보고 되어(IPCC, 1994), 지구온난화 기여율도 농도증가율과 비례하여 해마다 증가할 전망이다. 대기 중 N<sub>2</sub>O의 농도는 대략 300~330 ppbv (Warneck, 1988) 수준이며, 남반구에서 보다는 북반구에서의 평균농도가 약 0.75 ppbv 정도로 더 높아 북반구에 더 많은 배출원이 분포되어 있는 것으로 추정된다.

N<sub>2</sub>O의 주요 배출원으로는 토양이 지목되고 있지만(전체배출량의 약 57%로 추정), 그 배출규모가 비교적 과소평가되었거나, 알려지지 않은 배출원들도 상당수 있는 것으로 추정되고 있다(Duxbury *et al.*, 1993; Khalil and Rasmussen, 1992).

N<sub>2</sub>O의 토양배출과정은 토양 내 미생물의 활동과 밀접한 연관이 있으며, 따라서 그들의 활동에 영향을 미치는 토양의 물리화학(physicochemical) 인자들이 중요한 역할을 하는 것으로 보고 되고 있다(김득수와 오진만, 2003; Kim *et al.*, 2002; Kim and Kim, 2002; Stange *et al.*, 2000). 이와 같이 토양의 특성에 따라 N<sub>2</sub>O 배출량이 결정되기 때문에 토양으로부터

의 자연적 지표배출량을 추정하기 위해서는 해당지역의 기후 특성, 토지이용형태 등에 따른 다양한 토양환경에서의 배출 특성을 이해해야 하는 어려움이 따른다(김득수, 2001). 야외측정의 경우, 실제 다양한 토양인자들이 N<sub>2</sub>O 배출에 복합적으로 영향을 줄 수 있다. 따라서 야외현장에서 측정된 배출량과 각 토양인자들의 변화를 직접 비교 분석하는 것으로는 개개의 토양 인자가 토양 N<sub>2</sub>O의 생성 및 배출에 직접적으로 미치는 영향을 파악하기는 어려운 일이다. 결국, 측정횟수와 측정점들이 제한될 수밖에 없는 현장 측정 결과들을 바탕으로 얻어진 개개의 토양인자들과 N<sub>2</sub>O 배출량과의 관련성을 이용해서 해당 지역의 N<sub>2</sub>O 배출규모를 추정하는 것은 큰 불확실성을 내포하게 되며, 현장자료를 사용할 경우 장기간 여러 측정점에서의 지속적인 측정으로 자료의 대표성 입증 등이 선결되어야 할 것이다. 따라서 이번 연구에서는 현장 측정을 통해서 나타날 수 있는 주요 토양인자들 사이의 복합적 영향을 배제하기 위한 방편으로 토양인자 조건을 일정하게 조절하면서 기체배출량을 측정할 수 있도록 폐쇄형 챔버시스템을 구성하였다. 구성된 장치는 일정한 토양환경(토양온도, 토양수분, 토양 내 질소와 탄소량)하에서 N<sub>2</sub>O 배출량을 측정하였으며, 이들 토양조건의 변화에 따른 배출량 변화가 함께 측정되었다. N<sub>2</sub>O 배출량의 변화는 주요 토양인자 변화와 함께 통계적인 방법에 의해 분석되고, 그들 서로간의 상관관계가 분석 논의되었다. 이러한 실험을 통한 결과는 각 토양인자가 N<sub>2</sub>O 배출 규모에 미치는 직접적인 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 이점이 있으며, 지속적인 자료구축을 통해 그들 간의 상관관계를 이용하여 주요 토양 환경 인자들로 구성된 통계적 경험식을 얻을 수 있을 것이다. 그 결과는 N<sub>2</sub>O 배출에 영향을 미치는 대상지역 주요 토양 인자들의 대표 값과 함께 그 지역 N<sub>2</sub>O 배출량을 추정하는데 사용할 수 있으며, 추후 지속적인 연구결과는 대상 토양의 온도, 수분함량, 토양 내 질소와 탄소함량 등의 물리·화학특성이 고려된 토양 N<sub>2</sub>O 배출량 산출 모형 정립에도 활용되어질 것으로 기대된다.

## 2. 배출량 측정챔버 및 측정방법

측정 지역의 토양에서의 수분함유량(WFPS: water

filled pore space), 토양온도, 시비된 토양내의 질소의 양(N-fertilized), 시비된 토양내의 질소와 탄소의 양(N+C-fertilized) 등 총 네 가지 인자들과 토양 N<sub>2</sub>O의 배출량과의 직접적인 상관성을 조사하기 위해 이들 주요인자들을 통제할 수 있는 상황에서 실험을 수행하였다. 우선 야외 측정지점 주변에서 통계적으로 random하게 여러 곳에서 토양을 채취하여, 2 mm 채로 거른 후 시료 토양으로 사용하였다. 남아있는 여분의 토양시료는 실험실 내 냉암소에 보관하여 계속된 실험에 사용하였다. 일반적으로 야외측정의 경우에는 매우 다양한 인자들이 토양의 기체배출에 상호 복합적으로 작용하기 때문에 그러한 개개 인자들을 측정하여 그들과 토양 N<sub>2</sub>O 배출량과의 직접적인 관계를 정확하게 밝히는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 야외실험으로는 파

악이 어려운 각각의 인자들이 N<sub>2</sub>O 배출량에 직접적으로 미치는 영향들을 보다 정확하게 밝히기 위해 실험실에서 토양인자를 조절하면서 배출량을 측정할 수 있는 챔버장치를 구성하여 실험을 수행하였다.

김득수 등(2001)은 지표로부터의 N<sub>2</sub>O 배출량을 추정하기 위한 모수화(parameterization)를 위해서는 배출량에 영향을 주는 주요 토양인자들과 N<sub>2</sub>O 배출량과의 상관성을 파악하고, 주요인자들의 변화가 N<sub>2</sub>O 배출에 미치는 영향을 정량화해야 할 필요가 있다고 하였다. 배출량측정 장치를 구성하기 위해 가장 먼저 고려해야 할 것은 자연상태의 야외측정조건과 유사한 환경을 만들어 주고, 측정 챔버장치로 N<sub>2</sub>O의 배출량을 측정할 때 챔버로 인해 나타날 수 있는 내부의 화학반응이나 물리적인 영향 등이 없어야 한다. 이번 연구를 위해 실험실에서 사용된 배출량 측정 챔

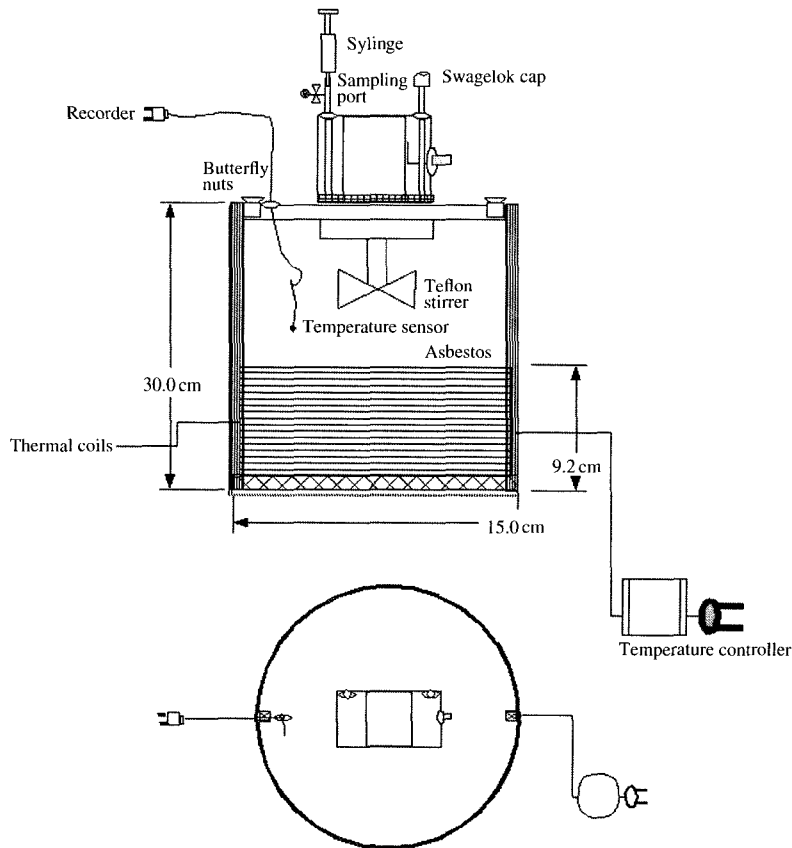


Fig. 1. Schematic of manufactured closed chamber system to measure N<sub>2</sub>O soil flux in laboratory experiment.

버의 형태는 야외에서 주로 사용하고 있는 폐쇄형 챔버(closed chamber)를 택하였다. 실험실에서 사용된 챔버는 기체와 내부 벽과의 접촉으로 인한 손실을 최소화하기 위해서 pyrex glass 재질의 실린더 형태로 제작되었으며, 크기는 높이 30 cm, 챔버 내 직경이 15 cm로 제작되었다. 조절실험을 수행 할 때, 특히, WFPS에 대한 영향을 조사 시에 챔버내 수분 손실을 막기 위하여 챔버 밑바닥의 안팎으로 실리콘 처리를 하였으며, 챔버 내 온도변화를 주고 설정 온도를 유지 시켜주기 위해 챔버의 밑 부분에서 위쪽으로 15 cm 가량 열선을 내장한 석면으로 감쌌다(그림 1). 한편으로는 토양시료의 충전(loading)을 용이하게 하기 위해 챔버몸통과 덮개를 나비형 너트로 연결하여 쉽게 열고 닫을 수 있게 하였으며, 연결부위는 고무로 된 o-ring을 사용하여 공기누출을 최대한 방지하였다. 기체시료를 챔버로부터 채취하기 위해서 챔버 덮개의 양쪽에 하나씩의 시료채취구(sampling port)를 설치하였다. 시료는 50 mL 주사기를 사용하여 시료채취구로부터 직접 채취하였으며, 시료를 채취하는 동안 다른 한쪽은 열린 상태로 하여 챔버내 압력변화로 인한 영향을 제거하였다. 또한 챔버 내부는 테프론으로 제작된 교반기(stirrer)를 장착하여 약 20~30 rpm으로 회전시켜 챔버 내부의 공기가 잘 섞일 수 있도록 배려했다.

배출에 영향을 주는 토양 조절인자들(control parameters)의 변화에 따른 배출특성조사 실험을 하기 위해, 연구대상지역의 밭에서 일정량의 토양을 토양 채취기(auger)를 이용하여 지표로부터 약 20 cm 깊이 까지 채집하였으며, 채집된 흙은 채집한 날부터 그늘에서 2~3일 정도 보관하였다. 이렇게 준비된 토양을 실험실에서 2 mm 체를 사용하여, 토양을 일정한 크기로 거른 후에 사용하기 전까지 토양시료보관용기(4°C로 항온)에 토양을 보관하였다. 한편 준비된 토양시료를 이용하여 적정량의 토양수분함량(WFPS)을 얻기 위해서 시료토양의 수분을 5회 이상 측정 한 후에 WFPS기준으로 원하는 수분함량을 얻기 위해 시료토양에 살수되어야 하는 수분량을 식(1)에 의해 계산하여, 준비된 시료토양의 표면에 주사기를 이용하여 고르게 살수하였다. 이와 같이 준비된 토양시료는 충분히 교반한 후에 밀봉하여 시료의 안정화를 위해 12시간 정도 항온실에 보관 후 사용하였다. 이때 수분량이 조절된 토양시료의 안정화(equilibrium)

에 적용된 12시간은 다음의 결과에 의해 도출되었다. 먼저 60%WFPS 수준의 수분함량으로 준비된 시료를 제조하여 충분히 교반한 직후, 4시간 후, 12시간 후, 20시간 후, 30시간 후, 40시간 후, 44시간 후, 48시간 후의 수분함량(WFPS)을 측정하였다. 토양시료가 충분히 교반된 직후부터 30시간 후까지의 토양수분함량은 59~60%WFPS로 거의 일정한 수준으로 나타났고, 약 40시간 이후부터 토양수분량의 감소가 57%, 54% WFPS 이하로 낮게 나타났다. 따라서 각 토양수분함량(30, 40, 60, 70, 80, 90% WFPS)에 따라 준비된 토양시료를 이용해서 수분함량 변화에 따른 토양 N<sub>2</sub>O 배출량실험의 경우 토양수분이 충분히 안정화된 12시간 후의 시료들을 이용하여 분석하였다.

이번 연구에서는 시료토양의 수분량에 따른 배출량 변화를 보다 정확히 조사하기 위해 시료토양의 수분량을 일반적인 수분함수량 표현방식인 gravimetric soil moisture 대신 %WFPS로 나타내었다. %WFPS는 토양의 총 공극율에 대한 volumetric water content의 비로 설명된다.

$$\%WFPS = [100 \times (\theta_g \times BD)] / [1 - (PD/BD)] \quad (1)$$

여기서,  $\theta_g$ 는 gravimetric soil water content

$$\left( = \frac{\text{wet soil mass} - \text{dry soil mass}}{\text{dry soil mass}} = \frac{H_2O(g)}{\text{soil}(g)} \right),$$

BD는 토양의 bulk density  $\left( = \frac{\text{dry soil mass}(g)}{\text{soil volume}(cm^3)} \right)$ ,

PD는 토양의 particle density (거의 대부분의 토양은 2.65 g-dry soil cm<sup>-3</sup>)이다. 이때, 토양은 105°C 드라이 오븐에서 이틀에 걸쳐 건조시켰다.

조절인자 변화에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량 변화를 조사하기 위한 실험실내에서의 플릭스챔버의 측정방법은 다음과 같이 진행하였다. ① 챔버 덮개를 열고 2 mm 체로 분류되어 준비된 토양시료를 일정량(volume; 1L) 취하여 챔버 내에 조심스럽게 넣는다. ② 실험대상인 토양 조절인자에 맞는 환경을 유지시킨다. 토양수분에 따른 배출량변화의 경우, 원하는 토양함수량에 적당한 양의 물을 주사기로 취하여 야외에서 비 오는 것과 같이 표면에 살수한 후, 교반한 후 토양안정화를 위해 일정시간 항온실에 보관한 토양시료를 사용하였다. 토양온도에 따른 변화를 조사하기 위해서는 열선의 저항을 변화시켜서 시료토양의 온도를 원하

는 온도에 이르게 한 후 배출량 측정을 수행한다. 토양 내 질소(N)성분과 탄소(C)성분의 변화에 따른 조사연구의 경우는 적당량의 비료, 비료와 글루코스(glucose)를 준비된 토양시료와 혼합한 후에 그에 따른 변화를 측정한다. ③ 챔버내의 상태가 안정될 때까지의 시간이 필요하므로 원하는 토양조절인자 값에 맞게 설정된 직후부터 약 1시간 정도 그대로 두어 토양조건이 챔버 내에서 안정화될 때까지 기다린다. ④ 토양시료를 안정시킨 후 챔버 덮개를 덮고 N<sub>2</sub>O 배출량을 측정한다. 이후의 플럭스 챔버를 이용한 N<sub>2</sub>O 배출량 측정을 위한 기체시료 채취방법과 배출량 산정을 위한 상세한 내용은 이미 발표된 여러 연구논문과 동일한 방법에 의해 진행되었다(김득수와 오진만, 2003; Kim and Kim, 2002; Kim *et al.*, 2002; 김득수, 2001). N<sub>2</sub>O의 농도는 전자포획검출기(electronic capture detector)가 장착된 기체크로마토그래피(gas chromatography; Model CP-8300, Varian)를 이용하여 정량 하였다. 검출기 설정온도는 350°C이었으며, Porapak Q (80/100 mesh) 컬럼이 사용되었고, 이때 컬럼의 설정온도는 150°C로 하였다. 운반기체는 순도 99.9999% N<sub>2</sub>를 사용하였다. 이번 연구에서 토양 산성도(soil pH)에 관한 실험은 토양의 산성도(pH)를 일정하게 유지시키는 데 기술적인 어려움으로 수행되지 않았다.

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1 토양 수분 함유량(Water Filled Pore Space)에 따른 배출량 변화

그림 2는 2절에 기술된 방법으로 제조된 수분함량이 각기 다른 토양시료(30~100%WFPS)를 이용하여 시료토양의 %WFPS의 변화에 따른 토양 N<sub>2</sub>O의 배출량을 나타낸 것이다. 이때 챔버 내 토양의 온도는 18°C 안팎을 유지시켰다. 그림 2의 결과에 따르면 토양 N<sub>2</sub>O 배출량은 WFPS가 60%일 때 가장 높은 배출을 보인 후 수분량이 증가함에 따라 지속적으로 감소하고, WFPS가 90% 이상으로 과다한 경우에는 거의 배출이 없음을 보였다. 이번 실험을 통한 결과에서 N<sub>2</sub>O 배출이 가장 많이 발생할 수 있는 최적의 WFPS는 60%로 나타났다. Davidson (1990)와 Weitz *et al.* (2001)에 의한 야외측정을 통한 연구 결과에서도 최대 N<sub>2</sub>O 배출량이 일어나는 토양의 최적

수분량(optimum moisture level)이 나타났으며, 60~70% WFPS영역에서는 질산화 과정이 가장 활발하게 일어나고 동시에 혐기성 영역도 공존해 탈질화 과정 역시 동시에 일어나기 때문으로 분석하였다. 이번 실험결과 수분 변화에 따른 배출량 측정 실험을 통해 가장 적은 배출량을 보인 때는 수분량이 완전 포화되었을 경우로 N<sub>2</sub>O 배출이 감지되지 않았다. 이 때의 토양은 거의 완전 혐기성 상태를 띠고 있기 때문에 토양내의 질소성분이 거의 대부분 N<sub>2</sub>로 환원되기 때문으로 생각된다(Cavigelli and Robertson, 2001).

그림 3은 일정한 온도 조건에서 최대배출량을 보인 60%의 WFPS의 토양시료에서 시간에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량의 변화를 보인 것이다. 실험에 사용된 토양시료는 2~3일 동안 항온실에 보관된 시료를 2mm 채로 거른 후 앞 절에서 기술된 방식으로 원하는 수분함량인 60%WFPS으로 제조된 것이다. 수분함량이 인위적으로 조절된 토양 시료의 안정화시간을 확인

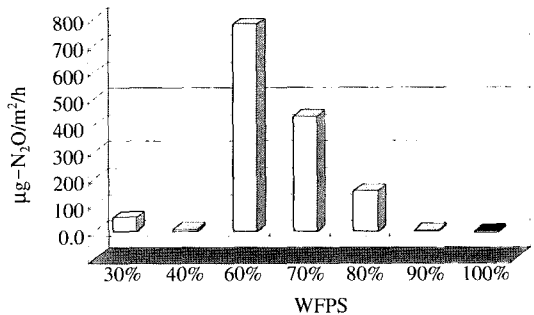


Fig. 2. Soil N<sub>2</sub>O fluxes with different levels of soil moisture at 30%, 40%, 60%, and 70% of WFPS under a fixed soil temperature 18°C.

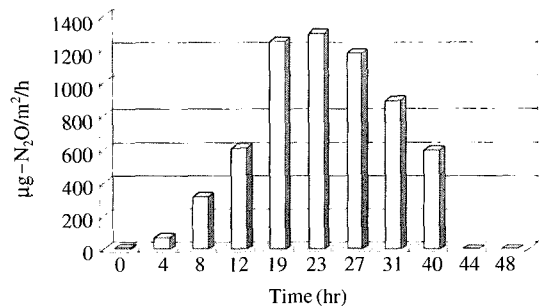


Fig. 3. Soil N<sub>2</sub>O fluxes with time at soil moisture of 60% WFPS under a fixed soil temperature of 18°C.

하기 위한 예비실험 결과(2절에서 기술)에서 보듯이 시료토양 교반직후부터 약 30시간까지는 항온실 시료 보관용기에 보관된 시료의 수분함량의 차이(59~60% WFPS)가 1~2% 미만으로 거의 없었다. 따라서 같은 방법으로 제조된 60%WFPS의 토양시료를 이용하여 챔버 온도를 18°C를 유지하면서 시간에 따른 토양 N<sub>2</sub>O 배출량을 측정하였다. 시간별 WFPS에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량을 측정한 결과, 인위적으로 함수량이 조절된 시료의 교반직후부터 약 20시간이후까지 N<sub>2</sub>O 배출량은 시간에 따라 꾸준히 증가함을 보였다. 측정시작 약 1일후에 최대 배출량(1.297 μg-N<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>/h)을 나타내었으며, 그 후 차차 감소해서 대략 40시간 이후에는 거의 배출을 확인 할 수 없었다. 측정 초기인 시료토양의 교반직후 N<sub>2</sub>O 배출이 매우 적었다가 시간이 경과하면서 증가한 경향은 측정초기 단계에서 토양수분량 조절을 위해 시료토양이 교반되는 과정으로 토양의 교란이 N<sub>2</sub>O 배출을 억제한 것으로 사료되며, 그 후의 지속적 증가는 점차로 토양의 상태가 안정화 되어 가면서 생·화학적 기작이 정상 수준으로 활성화되어 기체 배출이 진행된 것으로 추론된다. 일정온도와 수분함량이 유지되었음에도 불구하고 나타난 최대배출 이후 약 30시간까지의 감소는 기체 배출에 제한을 줄 수 있는 온도와 수분 이외의 토양인자가 시료토양에서 제한되었기 때문으로 추론될 수 있으나, 이와 같은 가설은 관련 미생물 기작과 주요 토양인자들 사이의 상관성연구를 통해 보다 면밀히 조사되어야 할 것으로 사료된다. 40시간이후의 감소는 이번 조절 실험의 한계로 더 이상 적정수준의 수분량(40시간 이후 수분량이 56%WFPS 이하로 감소)을 유지할 수 없음에 따라 나타난 결과로 생각될 수 있으며, 오랜 시간 동안의 변화량을 조사하기 위해서는 토양수분을 일정수준으로 유지하기 위한 방법이 강구되어야 할 것이다.

### 3. 2 토양온도에 따른 배출량 변화

토양 온도가 N<sub>2</sub>O 배출에 미치는 영향을 파악하기 위해서 챔버 몸통의 하단부를 열선을 내장한 석면으로 감싼 후, 실험토양을 일정한 온도로 유지하기 위한 온도조절장치를 장착하였다. 열선의 온도는 5~100°C까지 조절장치에 의해 조절이 가능하며, 토양과 챔버 내의 온도는 온도감지센서에 의해 자동으로 기록되도록 하였다. 챔버내 시료토양의 온도를 뚜

렷한 차이를 나타낼 수 있도록 쉽게 낮추지 못하였고, 실험토양 온도의 미세한 온도조절이 어려워 대략 10°C 단위로 하여 13°C, 20°C, 30°C 등 세 번의 변화를 주어 플릭스 챔버를 통한 실험을 수행하였다. 이때의 %WFPS는 최대배출을 보였던 60%로 유지하였다. 측정 시 토양온도의 변화에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량 변화 결과를 그림 4에 나타내었다.

일정 수분량을 유지한 시료토양을 챔버에 넣은 후 온도센서를 이용하여 원하는 토양온도 까지 이르게 한 후 배출량을 측정하였으며, 적정온도까지 이르는 데 걸리는 시간은 약 3시간 정도이었다. 2절에서 기술되었듯이 60%WFPS의 수분량으로 준비된 토양시료는 교반 후부터 30여 시간까지는 약 1~2% 미만의 수분량 변화를 나타내었으며, 따라서 측정실험 시간동안에 토양 수분량 변동은 거의 없는 것으로 가정하여 분석하였다. 실험 당시의 계절적 시기 관계로 구성된 장치로는 시료토양을 10°C 이하로 낮추기가 어려웠고, 따라서 온도범위는 10~30°C로 하였다. 그림 4에서처럼 이번 실험이 적용된 온도범위에서는 가장 낮은 13°C에서 최대배출이 기록되었고, 토양온도가 증가 할수록 배출이 감소함을 보여 30°C 부근에서는 N<sub>2</sub>O 배출을 감지할 수 없었다. 기체배출이 높게 나타날 수 있는 최적의 토양 온도는 기후조건, 계절적인 영향 등으로 측정 지역마다 다르다. Godde and Conard(1999)는 그 이유를 측정 지역에서의 온도변화에 그 지역토양 내 미생물들이 장기간에 걸쳐 그 지역의 기후에 적응하기 때문으로 설명하고 있다. 이번 실험실 챔버를 이용한 토양온도변화에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량 측정 결과는 실험에 사용된 시료토양이

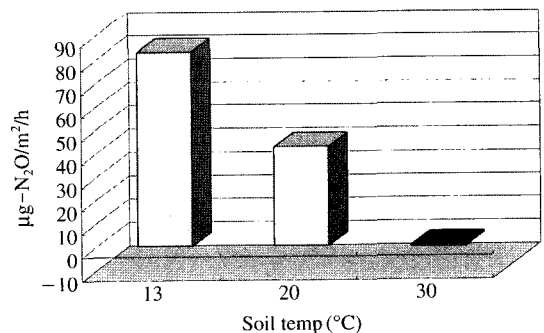


Fig. 4. N<sub>2</sub>O soil fluxes at different soil temperatures under a fixed soil moisture of 60%WFPS.

채취된 지역에서의 야외측정 결과와 매우 일치함을 보였다. 야외측정 실험결과에서도 14~15°C에서 N<sub>2</sub>O의 최대배출량이 보고 되었다(김득수와 오진만, 2003). 그러나 측정이 이루어진 시기가 여름철이고, 겨울철과 봄, 가을철에 측정을 못하여 전년(annual)을 통한 측정기록이 없어 보고 된 범위의 토양온도가 배출에 대한 최적온도라고 단정할 수는 없지만, 전년을 통한다 하더라도 실험결과 나타난 최적온도 범위를 크게 벗어나는 변화는 없을 것으로 사료된다. 일반적으로, 토양온도의 증가는 토양미생물의 활동을 활발하도록 도우며 따라서 그들의 대사로 인한 질산화와 탈질화의 증가로 인해 N<sub>2</sub>O 배출이 증가하는 것으로 보고 되고 있다. 하지만 일정수준 이상이 되면 (약 25~30°C 이상), 지속적인 온도증가와 수분의 감소가 미생물들에게 스트레스를 가함으로써 더 이상 온도 증가에 따른 배출량 증가는 나타나지 않는 것으로 보고 되고 있다(Davidson *et al.*, 1990). 이번 실험실 측정챔버를 이용한 연구와 연관된 야외측정 결과에서도 토양온도가 증가함에 따라 N<sub>2</sub>O 배출량도 증가하는 것으로 나타났으며(김득수와 오진만, 2003), 야외측정 시 토양온도의 범위는 8~17°C 사이로 기록되었기 때문에 18°C 이상의 토양온도에서의 배출량과 비교할 수가 없었다.

### 3.3 토양 질소 및 유기탄소의 변화와 배출량

질산화과정은 토양의 수분함유량이 질산화가 일어나기 위한 최적의 상태일 때는 별 문제 없겠지만, 수분함유량이 그 보다 적은 환경(40% 이하)에서는 그만큼 질산화가 늦게 일어날 수 있다. 이 경우 질산화 미생물의 산화·환원전위를 보면 정상적인 전자전달계의 반대방향으로 전자가 전달되는 reverse electron transport 기작이 일어날 수 있다. 유기질 비료를 시비할 경우, 유기질소에서 무기질소로 변환되는 속도가 느리기 때문에 화학비료의 사용을 선호하게 되며, 결국 유기질 비료를 사용할 때보다 토양 내 무기질소의 양을 증대시키는 결과를 초래한다. 더욱이 필요 이상의 화학비료의 사용은 토양 N<sub>2</sub>O의 배출을 증대시킬 수도 있을 것이다(Aulakh *et al.*, 2001). 이러한 사실은 농작물을 관리하는데 있어 그 만큼의 비용이 증대되고, 밭 토양을 기름지게 만들지 못할 뿐 아니라, 작물의 생산성도 떨어뜨릴 것이다. 따라서 경작지에서의 적당량의 비료 사용이 절실히 요구된다. 그러

므로 토양을 과학적으로 관리하여 생산성을 늘리고, 더불어 N<sub>2</sub>O 배출량도 저감할 수 있는 토양 관리기법을 개발해야 할 필요성이 있을 것이다.

이번 연구에서는 토양질소의 양에 따른 토양 N<sub>2</sub>O 배출량과의 상관성을 이해하기 위해 질소의 양을 2 mg/cm<sup>2</sup>, 5 mg/cm<sup>2</sup>, 10 mg/cm<sup>2</sup>로 챔버내 시료토양에 투입시키고 그에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량 변화를 살펴본 결과, 질소의 양을 10 mg/cm<sup>2</sup>를 넣었을 때 가장 많은 N<sub>2</sub>O 배출량을 보였으며, 질소의 양이 많을수록 많은 N<sub>2</sub>O가 배출되는 결과를 얻었다(그림 5). 결과적으로 실험결과를 비료사용의 증대가 토양 N<sub>2</sub>O 배출량을 증가시킬 수 있는 가능성을 충분히 지니고 있음을 보이고 있다. 한편, 이때의 수분함유량(WFPS)은 역시 최적배출을 유도하는 60%로 조절하였으며 배출량 측정은 시료안정화에 도달하는 시간이 지난 후 시도하였다. 그러나 Davidson *et al.* (1990)은 토양 내 질소의 함량이 증가했다 해서, 반드시 N<sub>2</sub>O의 배출이 증가하는 것은 아니며, 질산화 과정의 초기 질소성분이 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>이고 비료의 사용량이 증가함에 따라 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 양도 증가하지만, 이러한 비료 사용량의 증가보다는 질산화 박테리아의 수에 의해 질산화 과정이나 탈질화를 통한 N<sub>2</sub>O가 생성, 배출된다고 보고하였다.

한편, 토양질소와 토양유기탄소증가로 인한 영향을 살펴보기 위해서 실험결과 중 가장 높은 N<sub>2</sub>O의 배출이 있었던 60% WFPS 토양시료를 이용하였다. 2절에 기술된 토양수분량이 조절된 시료준비과정을 거쳐 60%의 WFPS로 유지된 토양시료에 질소량 10 mg/cm<sup>2</sup>를 주입하여 N<sub>2</sub>O 배출량을 시간변화에 따라

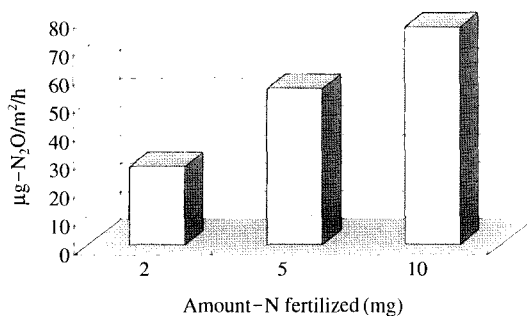


Fig. 5. Variation of N<sub>2</sub>O soil fluxes at the different levels of soil N levels (2 mg/cm<sup>2</sup>, 5 mg/cm<sup>2</sup>, and 10 mg/cm<sup>2</sup>) under fixed soil temperature and soil moisture (18°C and 60%WFPS).

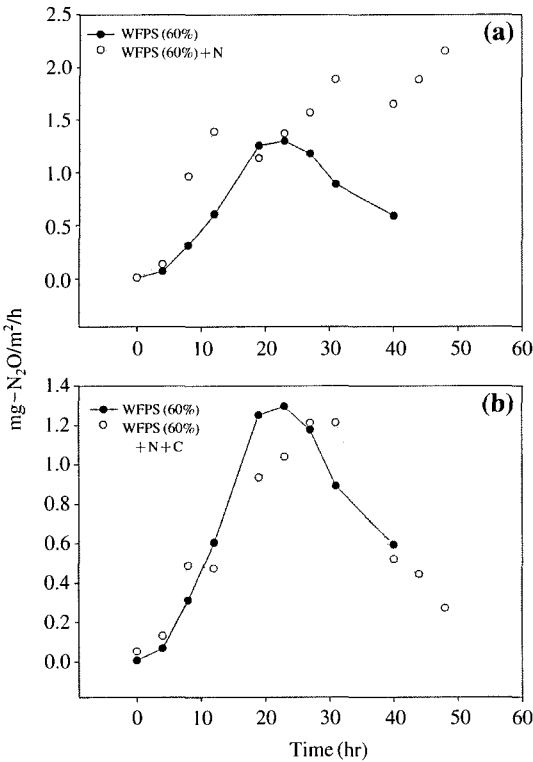


Fig. 6. The change of soil N<sub>2</sub>O emissions with time after spray (a) 10 N-mg/cm<sup>2</sup> and (b) 10 N-mg/cm<sup>2</sup>+21 C-mg/cm<sup>2</sup> onto the experimental soil under fixed soil condition (18°C and 60%WFPS).

측정하였고(그림 6-a), 질소량 10 mg/cm<sup>2</sup>과 유기탄소 21 mg/cm<sup>2</sup>을 동시에 주입한 토양시료의 N<sub>2</sub>O 배출을 측정하였다(그림 6-b). 그림 6은 이들 측정결과를 질소와 탄소의 주입이 없었던 수분량이 동일한 시료토양의 배출량과 비교·분석한 것이다. 측정결과 질소만을 주입하였을 때, 수분함유량만을 가지고 한 실험과는 대조적으로 꾸준히 N<sub>2</sub>O flux가 증가하는 것으로 나타났다. 질소를 주입한 시료의 경우 측정 48시간 동안 꾸준히 증가하였으며, 질소와 유기탄소를 함께 주입한 시료의 경우 측정 대략 30시간 동안 증가하다가 지속적으로 감소하기 시작하였다. 측정은 48시간 동안 실시하였으며, 평균 4시간 간격으로 배출량을 측정하였다. 수분함유량만 가지고 실험한 결과 48시간 동안의 평균 N<sub>2</sub>O 배출량은 0.690 mg-N<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>/h이었으며, 질소주입 시료는 1.125 mg-N<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>/h, 질소와 유기탄소 주입 시료는 0.661 mg-

N<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>/h로 나타났다. Jorgensen and Jorgensen (1996)의 결과와는 달리 질소와 유기탄소를 함께 주입하였을 때의 N<sub>2</sub>O 배출량은 다른 시료들의 배출량 보다 평균적으로 낮게 나타났다. 이러한 결과는 유기탄소량의 증가로 인해 질산화가 활발하게 일어나면서 대부분의 질소형태가 초기에 NO형태로 배출되었을 것으로 추론할 수 있지만 미생물 특성과 존재확인을 위한 실험이 병행되어야 한다. 일반적으로 토양 내 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 산화, 그리고 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 환원에 의해 주로 생성되지만, 전환율이 높기 때문에 토양에서 잘 검출되지는 않는다. 미생물의 활동증가로 인해 토양 내 유기탄소가 mineralization 되면서(C → CO<sub>2</sub>) 산소를 소비, 토양 내 탄소가 CO<sub>2</sub> 형태로 대기로 배출됨에 따라 챔버 내 토양 환경을 더욱더 혐기성 상태로 변하게 하여 N<sub>2</sub>O → N<sub>2</sub>로 전환되는 N<sub>2</sub>O reductase의 활동이 증가했기 때문으로도 생각될 수도 있을 것이다. 그러나 이번 연구에서는 직접적으로 N<sub>2</sub> 배출량 측정이 이루어지지 않아 정확한 비교는 할 수가 없었다.

#### 4. 결론 및 고찰

실험실 챔버실험을 통한 WFPS의 변화(30, 40, 60, 70, 80, 90, 100%)에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량의 변화는 토양 수분량이 WFPS 60%일 때 가장 높은 것으로 관측되었다. 이러한 결과는 토양 %WFPS가 60%이었을 때 질산화 과정과 탈질화 과정의 공존으로 인하여 상대적으로 높은 배출이 관측되었던 것으로 사료된다(Davidson, 1991). 이번 연구에서와 같이 WFPS가 60%일 때 상대적으로 높은 N<sub>2</sub>O 배출이 보인 것은 과거 야외측정 연구결과에서도 나타났으며, 따라서 현장측정 자료들을 통해 보고되었던 토양 기체 배출에 적합한 최적수분량의 존재도 이번 실험을 통해 확인되었다. 한편, WFPS가 최적 수분조건을 초과하면서 100%까지 증가하는 동안 N<sub>2</sub>O 배출이 지속적으로 감소한 것은 토양 공극 내 수분이 포화 되면서 혐기 상태로 변해는 과정에서 질소 환원과정의 최종 산물인 N<sub>2</sub>로 대부분의 토양질소가 환원되었기 때문으로 사료된다. 토양 온도는 10~30°C 범위 내에서 조사되었으며, 토양온도가 조사범위 중 낮았을 때(13°C)가 높았을 때보다 많은 양의 N<sub>2</sub>O 배출을 보였다. 이러한 결과는 시료토양과 같은 토양을 갖는 현



장측정에서의 결과와도 일치하였으며, 측정 지역의 물리화학적 특성에 따라 결정된 것으로 추후 지역에 따른 특성분석이 지속되어야 할 것이 요구된다. 토양에 함유된 질소량의 증가에 따라 N<sub>2</sub>O 배출이 높은 것으로 나타났으며, 이는 토양 내 생물학적 과정을 통해 무기질소의 함유량이 증가했던 결과 때문으로 생각된다. 최적WFPS 토양시료의 시간에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량과 질소와 유기탄소를 주입한 후 시간경과에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량과의 비교연구의 결과는 충분한 량의 질소만을 주입하였을 경우 48시간 이후에도 일정량의 N<sub>2</sub>O 배출이 지속적으로 나타남을 보였다. 그러나 유기탄소를 함께 주입하였을 경우에는 최적수분의 경우와 같이 약 30시간 이후부터 현저히 감소함을 보였다. 그러나 실험 중에 토양수분함량을 40시간 이후 일정하게 유지하는 데는 한계가 있었으며, 40시간 이후 시료토양의 수분 손실에 따른 영향을 배제할 수 없었기 때문에 이에 대한 보완이 있어야 할 것이다. 유기탄소가 토양 N<sub>2</sub>O 배출에 미치는 영향이 아직 명확히 이해되고 있지는 않지만, 이번 결과는 토양 내 질소와 탄소의 양적 관계가 토양에서의 NO/N<sub>2</sub>O형태로의 기체 배출량에 영향을 줄 수 있음을 시사하고 있다.

이번 연구에서는 주요 토양인자들과 N<sub>2</sub>O 배출량과의 일반적 상관만을 조사했을 뿐, 토양 내 생물학적 과정들의 매커니즘에 의한 N<sub>2</sub>O 배출량의 정량적 관계에 대한 연구는 그 어려움으로 한계가 있었다. 토양에서 토양인자들에 따른 생물학적 과정을 규명해야 하는 중요한 이유는 질소성분이 다량 포함된 화학비료 사용의 증가로 토양으로부터의 미량기체(NO, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, 등)가 다량 배출될 수 있기 때문이다. 이로 인한 환경에 미치는 영향을 줄이기 위해 적절한 토양관리가 어느 때보다도 시급하며, 토양인자들이 토양 내 생물학적 과정에 어떠한 영향을 미치는가, 이러한 과정들을 통해 얼마만큼의 무기 질소류들이 생성되는가를 파악하는 것이 매우 중요한 일이다. 결과적으로는 토양에서 필요 이상으로 생성 배출되는 질소성분 물질이 지역 환경변화를 초래하는 것을 사전에 예방할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

김득수(2001) 챔버를 이용한 농작지로부터의 기체배출량

측정과 배출특성 연구: 일산화질소(NO)와 아질산가스(N<sub>2</sub>O)의 배출량 산정. 한국대기환경학회지, 17(2), 203-212.

- 김득수, 오진만(2003) 밭 토양으로부터 아질산(N<sub>2</sub>O)기체의 배출량 측정과 배출특성. 한국대기환경학회지, 19(5), 529-540.
- Aulakh, M.S., T.S. Khera, and J.W. Doran (2001) Mineralization and denitrification in upland, nearby saturated and flooded subtropical soil. II. Effect of organic manures varying in N content and C : N ratio. *Bio Fertil Soils*, 31, 168-174.
- Cavigelli, M.A and G.P. Robertson (2001) Role of denitrifier diversity in rates of nitrous oxide consumption in a terrestrial ecosystem. *Soil Biol. Biochem*, 33, 297-310.
- Cruzen, P.J. (1970) The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content. *Q.J.R. Meteorol. Soc*, 96, 320-325.
- Davidson, E.A. (1991) Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems. *American Society for Microbiology*, Washington, D.C, 219-235.
- Davidson, E.A., J.M. Stark, and M.K. Firestone (1990) Microbial production and consumption of nitrate in an annual grass. In: Davidson E.A. and Schimel J.P. (eds) *Printed and bound in Great Britain at the University Press, Cambridge*. Chapter 10, Microbial processes of production and consumption of nitric oxide, nitrous oxide and methane.
- Duxbury, J.M., L.A. Harper, and A.R. Mosier (1993) Contributions of agroecosystems to global climate change. In *Agroecosystem Effects on Radatively Imporntnat Trace Gases and Global Climate Change*. L.A. Harper, A.R. Mosier, J.M. Duxbury, and D.E. Rolston. 1-18. *ASA Special Publication No. 55*. Amer. Soc. Agro., Madison WI.
- Godde, M. and R. Conard (1999) Immediate and adaptation temperature effects on nitric oxide production and nitrous oxide release from nitrification and denitrification in two soils. *Biol Fertil Soils*, 30, 33-40.
- Holtan-Hartwig, L., P. Dorsch, and L.R. Bakken (2002) Low temperature control of soil denitrifying communities : kinetics of N<sub>2</sub>O production and reduction. *Soil. Biol. Biochem*, (in press).
- IPCC (1994) *Radiative Forcing of Climate Change-Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO-UNEP*.
- Jorgensen, B.J. and R.N. Jorgensen (1996) Filed scale laboratory study of factors affection NO emission from a rye stubble filed on sandy loam soil. *Boil Fertil*

- Soils, 25, 366-371.
- Khalil, M.A.K. and R.A. Rasmussen (1992) The global sources of nitrous oxide. *J. Geophys. Res.*, 97, 14651-14660.
- Kim, D-S, Y. Harazono, M.A. Baten, H. Nagai and H. Tsuruta (2002) Surface flux measurements of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O from a dried rice paddy in Japan during a fallow winter season. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 52, 416-422.
- Kim, D.S. and J.C. Kim (2002) Soil nitric and nitrous oxide emissions from agricultural and tidal flat fields in southwestern Korea. *Canadian Journal of Environmental Engineering and Science*, 1, 359-369.
- Li, C., J. Aber, F. Stange, K.B. Bahl, and H. Papen (2000) A process-oriented model of N<sub>2</sub>O and NO emissions from forest soils. 1. Model development. *Journal of Geophysical Research*, Vol 105, No, D4, 4369-4384.
- Magg, M. and F.P. Vinther (1996) Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in different soil types and at different soil moisture contents and temperatures. *Applied Soil Ecology*, 4, 5-14.
- Prinn, R., D. Cunnold, R. Rasmussen, P. Simmonds, F. Alyea, A. Crawford, P. Fraser, and R. Rosen (1990) Atmospheric emissions and trends of nitrous oxide deduced from 10 years of ALE-GAGE data. *J. Geophys. Res.* 95, 18369-18385.
- Stange, F., K.B. Bahl, H. Papen, S.Z. Boltenstern, C. Li, and J. Aber (2000) A process-oriented model of N<sub>2</sub>O and NO emissions from forest soils, 2. Sensitivity analysis and validation. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. D4, 4385-4398.
- Warneck, P. (1988) *Chemistry of the Natural Atmosphere*. Academic Press. Inc., New York. p757, 1 988.
- Weitz, A.M., E. Linder, S. Frolking, P.M. Crill, and M. Keller (2001) N<sub>2</sub>O emissions from humid tropical agriculture soils : Effects of soil moisture and nitrogen availability. *Soil Biol. Biochem*, 33, 1077-1093.