

논토양에서 질소비종 및 벼 재배양식이 메탄가스 발생에 미치는 영향

고지연 · 강항원 · 강위금 · 박항미 · 임동규 · 박경배
영남농업시험장 식물환경과

The Effects of Nitrogen Fertilizers and Cultural Patterns on Methane Emission From Rice Paddy Fields

Jee-Yeon Ko, Hang-Won Kang, Ui-Gum Kang, Hang-Mee Park, Dong-Kuy Lim, and Kyeng-Bae Park (National Yeongnam Agricultural Experiment Station, RDA, Milyang, 627-130, Korea)

Abstract : To mitigate the methane emission from rice paddy fields, effects of nitrogen fertilizers source and cultural patterns were evaluated on silty loam soils. And a pot experiment was carried out to find out the effects of nitrogen fertilizers on soil pH, Eh, sulfate concentration of soil water in flooded soil.

In transplanting cultivation, the total methane emission depending on fertilizers was 32.9gm^{-2} for urea ; 30.3gm^{-2} for ammonium sulfate ; 26.4gm^{-2} for coated urea. Methane emitted in direct seeding on dry soil was 24.7gm^{-2} for urea ; 16.7gm^{-2} for ammonium sulfate ; and 22.8gm^{-2} for coated urea. Thus, the methane emission rate of direct seeding on dry soil was 29.7% lower than transplanting. According to the nitrogen fertilizers, the methane emission rate by ammonium sulfate and coated urea were reduced 18.4 and 15.9% in comparison with urea, respectively.

In pot experiments, pH in flooded soils depending on nitrogen fertilizers decreased in order of urea > coated urea > no fertilizer > ammonium sulfate and the order was coincided with that of total CH_4 emission from flooded soil. Soil Eh was highest in ammonium sulfate application followed by coated urea, no fertilizer, urea. And sulfate concentrations of soil water were in order of ammonium sulfate > coated urea > urea > no fertilizer.

Key words : Greenhouse effects, Methane emission, Paddy fields, Nitrogen fertilizer.

서 론

메탄(CH_4)은 지구온난화현상을 유발하는 미세기체 중 하나로서, 이산화탄소(CO_2)에 비하여 대기 내 미량으로 존재하나 단위당 열 흡수능(relative potential for thermal absorption per unit mass)이 CO_2 의 30배에 해당하는 문제시 되는 온실가스이다¹⁾. 산업혁명이래 지난 2세기동안 온실가스들 중 CO_2 는 30%, N_2O 는 15% 증가하였음에 반하여 CH_4 는 0.8ppmv에서 1.72ppmv로 증가하여 215%라는 뚜렷한 증가양상을 보였다²⁾. 이러한 원인은 대부분 농업과 같은 인간활동에 기인하였으며, 특히 논에서는 연간 약 60Tg의 CH_4 가 배출되어 지구전체 CH_4 배출량의 5~30%를 차지하는 것으로 알려져 있다³⁾.

이러한 측면에서 논에서 발생하는 CH_4 를 저감시키기 위하여 간단관개, 물관리방법, 퇴비와 같은 부숙된 유기물의 시용, 추경 등 다양한 재배적 방법에 의한 CH_4 배출 감

소방법이 연구되어 있으나^{4,5,6)}, 토양에 가장 많이 투입되는 화학물질인 비료의 영향에 대해서는 명확하게 구명되어 있지 않다. Yagi와 Minami⁷⁾는 비료의 시용이 CH_4 배출량에 미치는 영향을 발견하지 못하였다고 하였으며, Kimura⁸⁾는 논토양에 요소($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$), 황산암모늄($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), 염화암모늄(NH_4Cl)을 처리하여 암모늄염 종류별 메탄발생양을 조사한 결과 요소시비구에서 가장 많은 메탄배출량을 보였다고 하였다.

비료는 토양의 pH, 식물체의 생육상황, 토양 미생물의 밀도, 미생물의 탄소원이 되는 식물체 지하부의 biomass 및 뿌리삼출물의 양 등에 영향을 미치는데⁹⁾, 특히 질소비료는 집약다비농업의 확산과 세계 식량문제로 인한 논 면적의 증가(86Mha(1935)→144Mha(1985))로 시용량이 증가하는 추세이다. 따라서 포장조건에서 건답직파와 중묘이앙의 재배양식별로 질소비종에 따른 메탄가스 발생양상을 조사하고, 질소비종이 메탄가스 발생과 관련있는 토양환경에

미치는 영향을 구명하기 위하여 실내실험에서 질소비종에 따른 토양 pH, Eh 및 토양용액 내 SO₄ 농도변화를 살펴 보았다.

재료 및 방법

공시토양

본 시험은 영남농업시험장 시험포장에 위치한 화동동 담토양에서 수행하였으며, 공시토양의 이화학적 특성은 표 1과 같다. 토성은 미사질 식양토로 보수력이 좋은 편이나, 작토층에 해당하는 0-15cm의 pH는 5.5, 유기물함량은 27.1g/kg, 유효인산 및 유효규산은 각각 87, 117mg/kg으로 약간 불량한 비옥도를 보였다.

Table 1. Chemical and physical properties of soil used.

| Soil depth (cm) | pH (1:5) | OM (g/kg) | Av. P ₂ O ₅ (mg/kg) | Av. SiO ₂ (mg/kg) | Ex. cations(cmol/kg) | | | Soil texture |
|-----------------|----------|-----------|---|------------------------------|----------------------|-----|-----|--------------|
| | | | | | Ca | K | Mg | |
| 0-15 | 5.5 | 27.1 | 87 | 117 | 4.7 | 0.9 | 0.8 | SiCL |
| 15-30 | 5.8 | 26.5 | 82 | 109 | 4.5 | 0.6 | 0.7 | SiCL |

실내시험은 논토양의 담수조건하에서 질소비종이 토양의 pH, Eh 및 CH₄ 생성에 미치는 영향을 면밀히 구명하고자 상기 시험포장의 분얼기 토양을 풍건하여 2mm 체에 통과한 후 800ml의 광구병에 450g씩 담고 400ml의 증류수를 가하여 논상태와 유사한 조건이 되게 하였다.

벼 재배법 및 처리내용

화답벼를 공시품종으로 하여서 건답직파재배는 5월 12일에 파종하고, 중묘이앙재배는 30일묘를 6월 2일에 이앙하였다. 화학비료의 시용량은 건답직파재배는 N : P₂O₅ : K₂O = 150 : 70 : 80kg/ha, 중묘이앙재배는 110 : 70 : 80 kg/ha로 표준시비량에 준하였는데 질소는 요소, 유안, 완효성 피복요소로 비중을 달리하였다. 질소질 비료중 요소와 유안은 기비 50%, 분얼비 30%, 수비 20%로 3회 분시하였고, 완효성 비료는 질소성분량으로 20% 감비하여 전량기비하였다. 인산은 용성인비로 전량기비하였으며, 칼리는 염화칼리로써 기비 80%, 수비 20%로 하여 2회 분시하였다. 또한 물관리는 상시담수하였으며 질소비종 및 재배양식에 CH₄ 발생에 미치는 영향을 뚜렷이 관찰하고자 유기물은 시용하지 않았다.

실내시험은 요소, 유안, 완효성 비료를 각각 질소성분량으로 100kg/ha을 토양표면에 살포하여 메탄생성균의 활성이 가장 높은 온도인¹⁰⁾ 30℃에서 항온 배양하면서 pH와 Eh를 측정하였다.

시료의 채취 및 분석

논토양으로부터 CH₄채취는 60×60×100(cm)의 밀폐식 polyacrylic plastic chamber를 파종 및 이앙직후 논토양에 설치하여¹¹⁾ 수확기까지 주 1회 채취하였다. 채취된 시료는 Gas chromatography(HP 5890 I)로 분석하여 아래의 배출계수 (flux)로 환산하였으며, 분석조건은 표 2와 같다.

Table 2. gas chromatography condition for methane analysis.

| | | |
|------------------------------------|------------------|--|
| - Detector | | Flame ionization detector |
| - Column | Packing material | Porapak N(80/100) |
| | Materials | Stainless steel(1/8" × 6') |
| - Carrier gas | | N ₂ |
| - Flow rate | | 30 ml/min |
| - Temperature | Column | 40℃ |
| | Injector | 80℃ |
| | Detector | 150℃ |
| - Retention time | | 0.93 min |
| - Concentration of calibration gas | | 9.8 ppmv CH ₄ in N ₂ |
| - Sample size | | 1ml |

$$Flux = \rho \times V/A \times \Delta C/\Delta t \times 273/(273 + T)$$

ρ: 메탄의 밀도

A: Chamber 바닥면적(m²)

V: Chamber 체적(m³)

ΔC: 밀폐전후의 메탄농도변화(ppmv)

Δt: 밀폐된 시간(hr)

T: Chamber내 평균온도(℃)

실내시험은 담수상태에서 pH와 Eh를 2일 간격으로 측정하였고, pH 및 Eh전극의 삽입으로 인한 토양환경의 변화를 최소화 하고자 하나의 광구병에서 3회 측정된 다음에는 동일한 조건에서 배양된 새로운 광구병에서 계속 측정하였다.

또한 시비에 따른 토양용액 내 음이온의 변화를 조사하고자 길이 10cm, 직경 3mm의 다공질 세라믹 막대인 porous cup의 끝에 needle이 부착된 plastic tube를 연결하여 토양에 설치하였다. 토양용액은 needle에 10ml의 진공채혈관(vacutainer)을 꽂아 주 1회 채취하여서 Ion chromatography로 분석하였다. 메탄의 측정은 고무마개를 부착한 뚜껑을 닫아 30분간 밀폐한 후 광구병의 상층부에 발생한 메탄을 주사기로 채취하여 상기시험과 같은 GC조건으로 분석하였다.

결과 및 고찰

논 토양에서 질소비종 및 재배양식에 따른 메탄배출양상

먼저 질소비종이 논 토양에서 메탄배출에 미치는 영향을 살펴보면 그림 1과 같았다.

담수 이전 메탄은 질소비종에 상관없이 마이너스 배출치를 나타내다가 담수 이후에는 비종별로 메탄발생에 다양한

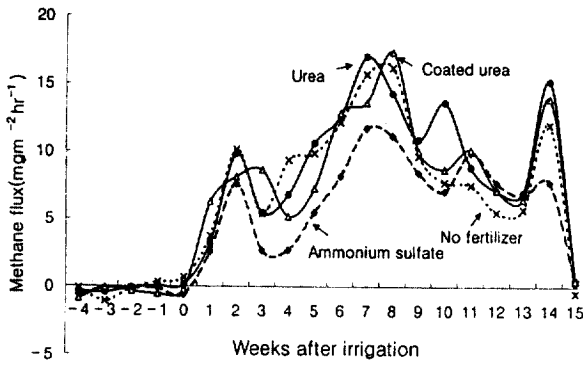


Fig. 1. The change of methane fluxes depending on nitrogen fertilizers from rice paddy fields.

차이를 보이면서 수확까지 3~4회의 메탄배출 peak가 나타났다. 최대 배출peak는 담수 후 7주에 나타났으며, 담수 11주 이후부터는 무비구를 제외하고는 각 처리별 배출 양상이 유사하여 비종간에 큰 차이가 나타나지 않았다. 담수 후 14주에 나타난 큰 메탄 배출 peak는 수확작업을 위하여 논을 배수한 결과 토양 내 생성된 채 배출되지 못하고 갇혀 있던 메탄이 일시적으로 방출된 현상으로 생각되며, 이는 Neue 등¹²⁾이 배수 후 6~8일에 대공구를 통하여 최고 90mgm⁻²hr⁻¹의 메탄 배출을 관찰하였다는 보고와 같은 경향이였다.

질소비종에 따라서는 요소시비구의 배출량이 가장 많았으며, 유안시비구에서 담수 후 3주부터 다른 처리에 비하여 메탄배출이 뚜렷이 저감되었고, 완효성시비구는 요소시비구의 메탄배출량에 비하여 다소 감소되었으나 큰 차이는 없었으며, 다만 메탄배출의 peak가 일주일 정도 늦어지는 경향을 보였다. 무비구의 메탄배출량은 담수초기에는 요소 및 완효성시비구와 비슷한 양상이다가 담수 9주 이후부터 질소시비구들에 비하여 감소되었는데, 이는 생육후기에 나타나는 메탄배출 peak의 탄소원이 뿌리 분비액이나 잔사 등으로 인한 비 자체의 자가분해(autoanalysis)에 의한 바가 크므로¹³⁾, 무비구의 경우 질소비료구에 비하여 생육이 저조하여 메탄생성균의 탄소공급원이 될 지하부 biomass양이 부족하였던 것에서 기인하였으리라 생각되었다. 유안시비구에서 메탄배출이 저감되었던 것은 토양 내에서 메탄이 생성되기 전에 SO₄⁻²가 먼저 환원되어 CH₄생성에 적합한 토양 산화환원전위의 형성이 지연되고, Jakobsen¹⁴⁾의 보고와 같이 SO₄⁻² 자체에 의한 메탄생성균의 활동 저해 및 사멸에 의한 것으로 생각되었다. Kimura⁹⁾는 암모늄비료 종류가 메탄배출에 미치는 영향을 살펴본 결과 요소(Urea) > 염화암모늄(NH₄Cl) > 유안((NH₄)₂SO₄)의 순서로 메탄배출량이 많았다고 하였으며 요소에 비하여 유안시비 메탄발생이 억제되었던 것은 SO₄⁻²를 가진 유안의 사용이 메탄생성균과 같은 기질(유기산, 수소 등)을 이용하는 Sulfate 환

원균을 증가시킴에 따른 현상이라고 보고한 바 있다. 또한 본 실험에서 수비이후 약 20일이 경과된 담수 11주 후부터는 질소비종간 메탄배출량이 유사해지는 경향이었는데 Kimura도 시비에 의한 메탄배출 억제효과는 약 20일 정도라고 보고하여 유사한 경향이였다.

메탄은 혐기적 조건에서 일어나는 유기물의 최종분해산물이므로 토양 Eh와 깊은 관련이 있으며, 이는 토양의 담수상태에 따라 크게 영향을 받는다. 따라서 담수기간이 상이한 건답직파와 중묘이앙의 재배양식별 메탄 배출량을 조사하였다.(그림 2)

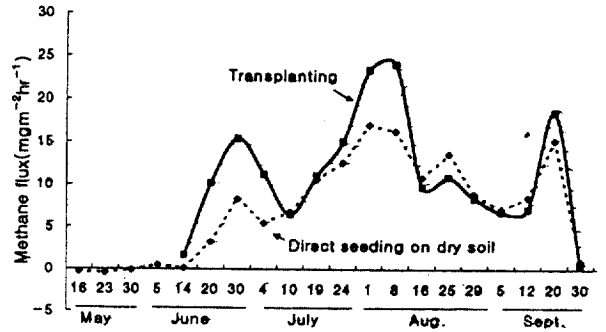


Fig. 2. The change of methane fluxes depending on cultural patterns from rice paddy fields

중묘이앙재배에서는 6월 30일(분얼기)에 뚜렷한 배출 peak를 나타내다가 유수형성기와 출수기 사이 최대 peak가 나타났으며, 출수기 이후 점차 감소하는 경향이였다. 건답직파재배는 고랑사이에 관수(3엽기)가 시작되는 6월 14일 이전에는 마이너스 배출치를 나타내다가 분얼기에 이르러 1차 배출 peak가 나타났으며, 이후 점진적으로 증가하다가 중묘이앙재배와 같이 8월 1일 후로는 감소하였다. 건답직파재배에서 3엽기 이전에 나타나는 메탄의 마이너스 배출치는 토양 내 공기와 대기사이 메탄의 농도 차에 의한 확산작용으로 건조한 토양이 메탄의 흡수원으로서 작용하였기 때문이라 생각되며^{15,16,17)}, 이는 고⁶⁾가 보고한 건답직파답에서의 유기물 및 물관리에 따른 메탄배출양상을 조사하였을 때와 같은 경향이였다.

재배양식별 메탄배출량은 출수기 이전까지는 건답직파재배가 이앙재배에 비하여 뚜렷이 적었으나 이후로는 큰 차이가 없었는데, 이와 같은 경향은 토양 Eh는 일정한 수준에 도달하면 유기물 투입 등의 외부 요인이 없는 한 고정되므로⁸⁾, 생육초기에서 후기로 갈수록 처리간에 토양환원 발달정도의 차이가 없어진 결과라고 생각된다.

표 3은 질소비종과 재배양식에 따른 메탄배출량을 나타낸 것으로 중묘이앙재배시 질소비종에 따른 메탄배출총량은 요소 32.9gm⁻², 유안 30.3gm⁻², 완효성비료 26.4gm⁻²으로 요소시비구의 메탄배출량이 가장 많았다. 건답직파재배에

Table 3. Methane emission by nitrogen fertilizers and cultural patterns

| Cultural patterns | Nitrogen fertilizers | CH ₄ emission(g m ⁻² d ⁻¹) | | | Total emission (gm ²) |
|--------------------------------------|----------------------|--|------|------|-----------------------------------|
| | | Min. | Max. | Av. | |
| Transplanting (30 days-old seedling) | Urea | -0.01 | 0.58 | 0.27 | 32.9 |
| | Ammonium sulfate | 0.02 | 0.48 | 0.25 | 30.3 |
| | Coated urea | 0.04 | 0.38 | 0.22 | 26.4 |
| Direct seeding on dry soil | Urea | -0.03 | 0.41 | 0.17 | 24.7 |
| | Ammonium sulfate | -0.01 | 0.28 | 0.12 | 16.7 |
| | Coated urea | -0.01 | 0.42 | 0.16 | 22.8 |

서는 요소 24.7gm⁻², 유안16.7gm⁻², 완효성 비료 22.8gm⁻²로 메탄배출량이 가장 많은 구는 중묘이앙재배와 같이 요소시비구였으나 유안시비에 따른 메탄 배출저감 효과는 중묘이앙재배에 비하여 더욱 크게 나타났다. 건답직파재배에서 유안시비구의 메탄 저감 효과가 컸었던 것은 유안의 시비량이 중묘이앙재배에 비하여 많았을 뿐 아니라, 메탄발생을 감소시키는 효과를 가진 SO₄²⁻가 SO₂로 토양 내에서 환원되던 중 건답직파 재배초기에 토양이 산소와 접하는 기간이 길어 SO₄²⁻로 재 산화됨에 따라 메탄 배출저감 효과가 커진 것이라고 생각된다. Lovely 등¹⁸⁾도 SO₄²⁻를 가진 N 비료의 사용에 의한 CH₄배출의 저감 정도는 SO₂의 재산화량에 의존된다고 하였다.

그림 3은 질소비종에 따른 메탄배출율을 나타낸 것으로 요소시비구(100%)에 비하여 유안 81.6%, 완효성 86.1%로 각각 18.4%, 15.9% 저감되었다. 따라서 유안비료는 토양으로부터 배출되는 메탄의 저감에 가장 효과적인 질소비료로 구명되었으나 유안비료는 화학적 및 생리적 산성비료이므로¹⁹⁾ 토양을 산성화시킬 우려가 있기 때문에 메탄저감의 효과는 적으나 추비에 따른 노동력을 절감할 수 있는 완효성비료의 사용이 보다 적합하리라고 생각되었다.

Schtz¹¹⁾는 요소와 유안을 사용 깊이를 달리하여 메탄발생을 측정 한 결과, 표면에 사용하였을 때는 요소에 비하여 유안시용이 약 21%의 메탄이 저감되었으며, 토양에 혼입

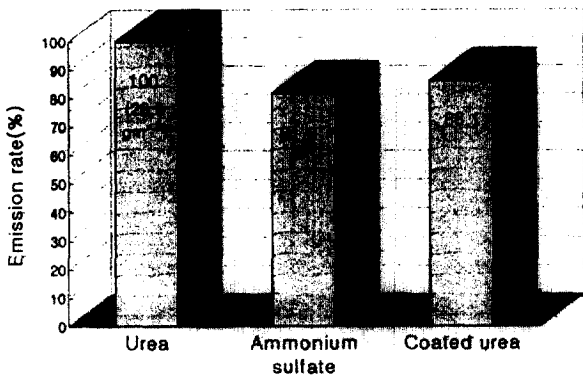


Fig. 3. Methane emission rate depending on nitrogen fertilizers

하였을 때는 약 15.2%의 메탄이 저감되었다고 보고하여 본 시험의 결과와 유사하였다.

재배양식별 메탄배출율은 그림 4와 같이 중묘이앙재배(100%)에 비하여 건답직파재배가 29.7% 저감된 결과를 보였다. 이와 같은 경향은 500kg/ha의 볏짚을 사용한 후 건답직파재배의 메탄저감 효과를 시험한 이⁵⁾ 등의 57.2%나 고⁶⁾의 44%, 돈분 사용 후 건답직파를 시험한 Ling²⁰⁾의 59~74%의 결과에 비하면 낮은 편이었다. 이러한 결과는 본 시험에서 유기물을 사용하지 않았기 때문에 중묘이앙재배에서 이앙 직후 나타나는 사용된 유기물의 환원적 분해에 의한 메탄배출peak가 크지 않아서 전체적으로 건답직파재배와의 배출량 차이가 적었던 것으로 생각된다.

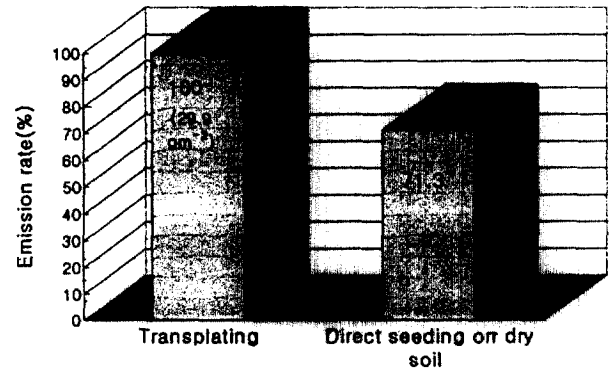


Fig 4. Methane emission rate depending on cultural patterns

질소비종에 따른 담수토양의 pH 및 산화환원전위(Eh)의 변화

메탄생성균은 토양의 Eh값이 -150mV이하인 조건에서 메탄을 생성시키는 절대혐기성 세균이며²¹⁾ pH 7 부근에서 최대의 활성을 나타내는 중성균이므로¹⁰⁾, 질소비종이 담수토양의 pH와 Eh에 미치는 영향을 살펴보았다.

그림 5는 질소비종에 따른 담수토양의 pH변화로서 pH는 담수 전 5.1 이었으나 담수 후 모든 처리에서 급속히 증가

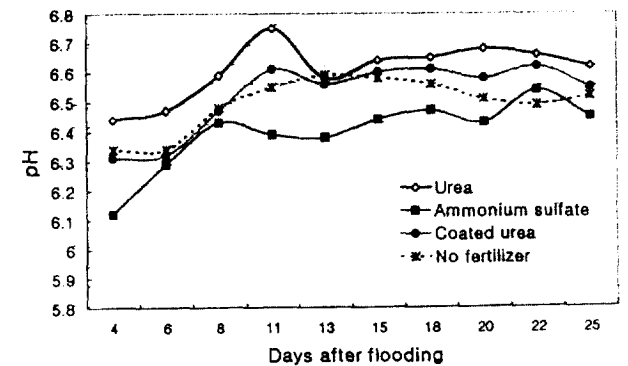


Fig. 5. The change of pH on flooded soil applied nitrogen fertilizers

하여 담수 8일에는 6.4~6.8 사이의 중성에 가까워졌으며, 그 이후로는 조금씩 증가하는 경향이였다. 비종별로는 요소시비구의 pH가 가장 높았고 완효성시비구와 무비구가 비슷한 양상이었으며, 유안시비구의 pH는 담수초기부터 다른 처리보다 낮았으나 후기에 이르러 무비구와 비슷해지는 경향이였다. 요소시비구에서 나타난 pH의 상승은 시비한 요소가 토양에 있는 urease의 가수분해 작용으로 NH₄⁺로 변함에 따라서이고, 유안시비구는 유안내 함유되어 있는 미반용 유리황산의 영향으로 낮았으며¹¹⁾, 완효성피복요소외의 경우는 요소가 느리게 방출됨에 따라 토양의 pH에 크게 영향을 미치지 않아 무비구와 유사하였으리라 생각된다.

Wang²²⁾은 pH 4.8~8.1 사이의 토양을 담수한 후 요소시비에 따른 토양 pH변화 및 메탄생성량을 살펴본 결과 산성토의 대부분에서는 pH와 CH₄ 배출량이 증가하였으나, 그의 비산성토와 알칼리성 토양에서는 pH는 증가한 반면 CH₄ 배출량은 감소되었다고 하여 메탄배출에 대한 비료시용의 영향은 토양의 pH를 CH₄생산에 적합한 범위에 가까워지거나 멀어지게 하는 것이라고 보고한 바 있다.

담수기간 동안의 토양 Eh변화를 보면 그림 6에서와 같이 담수직후 +273mV이었던 공시토양은 담수 11일까지 빠르게 저하하였지만 그 이후로는 완만한 변화를 보여 비종간에 큰 차이가 없었다.

시비에 따른 Eh는 유안시비구가 비교적 높았는데 담수 초기에는 차이가 뚜렷하다가 담수 11일 이후부터는 완효성시비구 및 무비구와 비슷하였으며, 요소시비구는 담수 초기에는 무비구나 완효성시비구에 비하여 Eh가 높았으나 15일 이후부터는 다른 처리보다 낮은 경향이였다. 이러한 시비에 의한 토양 Eh차이는 토양 pH와 Eh사이에는 밀접한 연관성에 있다고 Ponnampetuma²³⁾가 밝힌 바와 같이 비료시용에 의한 토양 pH의 변화에 기인한 것으로 여겨진다.

Porous cup으로 채취한 토양용액내 음이온의 변화를 살펴본 결과(표 4), NO₃는 1.2~0.1범위로서 질소비종에 따라 큰 차이가 없었으나, SO₄는 비종 및 경과일수에 따라 차이가 뚜렷하였다.

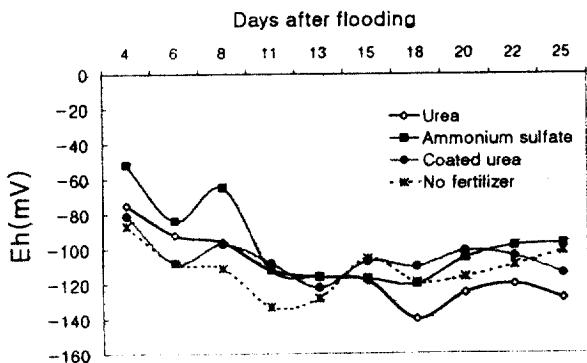


Fig. 6. The change of Eh on flooded soils with nitrogen fertilizers.

담수 4일 후 토양용액 내 SO₄²⁻는 유안비료의 SO₄²⁻ 용출

Table 4. The change of sulfate concentrations in soil water according to nitrogen fertilizers

| Days after flooding | SO ₄ (mg/l) | | | NO ₃ (mg/l) | | | | |
|---------------------|------------------------|---------------|-------------------|------------------------|---------------|-------------------|------|------|
| | Urea sulfate | Ammonium urea | Coated fertilizer | No Urea sulfate | Ammonium urea | Coated fertilizer | No | |
| 4 | 290.2 | 818.9 | 310.5 | 206.1 | 0.04 | 0.04 | 0.17 | 0.03 |
| 8 | 108.9 | 592.3 | 157.4 | 40.4 | 0.05 | 0.04 | 0.06 | 0.02 |
| 15 | 75.7 | 499.9 | 97.3 | 2.3 | 0.13 | 0.09 | 0.25 | 0.21 |
| 22 | 61.5 | 363.2 | 76.2 | 1.1 | 0.09 | 0.91 | 1.20 | 0.61 |

로 인하여 유안시비구에서 818.9mg/l로 가장 많았고, 요소와 완효성시비구가 290.2, 310.5mg/l, 무비구가 206.1mg/l이었다. 모든 처리에서 담수기간이 증가함에 따라 토양용액의 SO₄²⁻는 급격히 감소하여 담수 22일 후에는 담수 4일 후에 비하여 요소 78.8%, 유안 55.6%, 완효성비료 75.5%, 무비 98.9% 감소되었다. 완효성 시비구는 토양 내 SO₄의 소모에 있어서 요소시비구보다 느린 경향이였고, 무비구는 SO₄감소가 빨라 담수 15일 후에는 토양 내 sulfate pool이 완전히 소모되었음에 반해 유안시비구는 담수 22일후에도 상당한 양의 유안이 남아있어 기비로 사용된 SO₄는 추비에 이르기까지 메탄저감 효과를 발생할 수 있으리라 생각되었다.

Lovely¹⁸⁾는 SO₄에 의하여 메탄생성의 저감 효과가 유발되기 위하여서는 토양내 60μM의 SO₄가 필요하고, 100kg/ha의 유안시용은 토양 내 CH₄를 저감시킬 수 있다고 하였다.

표 5는 질소시비에 따른 담수기간중 토양의 pH, Eh, 토

Table 5. Methane emission, soil pH, Eh, and SO₄ in soil water according to nitrogen fertilizers

| Fertilizer | CH ₄ emission (mgm ⁻² h ⁻¹) | pH | Eh (mV) | SO ₄ (mg/l) |
|------------------|---|------|---------|------------------------|
| No fertilizer | 2.79 | 6.50 | -117.7 | 62.5 |
| Urea | 6.44 | 6.61 | -112.2 | 133.8 |
| Ammonium Sulfate | 1.47 | 6.39 | -96.6 | 568.3 |
| Coated urea | 2.90 | 6.52 | -105.2 | 160.0 |

양용액 내 SO₄ 양 및 메탄배출량의 평균치를 나타낸 것이다. 질소비종별 메탄배출량은 요소시비구에서 가장 많았고 그 다음은 완효성비료, 무시용, 유안구의 순이었다. 이는 각 처리별 토양 pH 순서와 일치하여 토양 pH와 메탄발생량과는 정의 관계가 있음을 알 수 있었다. 토양의 Eh 및 토양용액내 SO₄함량은 메탄발생량과 반대경향이 있었다. 이와 같이 요소시비구의 메탄배출량이 가장 많았던 것은

요소에서 분해 생성된 NH_4^+ 에 의해 토양의 pH가 메탄생성균의 활성이 높은 pH 범위로 전환되었기 때문으로 생각되었다. 요소시용구에서 메탄배출량이 증가한 이유로서 Conrad와 Rothfuss²⁰⁾는 암모니아 이온이 담수토양에서 CH_4 의 산화를 저해하여 CH_4 배출량을 증가시키기 때문이라고 하였으며, 이²¹⁾는 요소가 urease에 의해 탄산암모늄으로 가수분해되는 과정에 탄산이 CH_4 생성균의 기질로 이용되었기 때문이라고 보고하였다. Wang²²⁾은 토양 pH가 메탄배출에 미치는 영향을 구명하고자 토양의 Eh를 고정하고 산과 알칼리성 물질을 첨가하여 pH를 5.0~9.0 사이로 조절한 결과, pH 7.3~6.4이하에서는 메탄발생이 매우 저하되었고 pH 6.6~7.0가 메탄발생에 적절한 범위이었다. 가장 많은 양의 메탄이 배출된 것은 자연토양의 pH보다 0.2 높은 수준의 토양이었으며 pH 0.2의 차이에서도 메탄배출량은 큰 차이가 있음을 보고하여 본 시험과 같은 결과이었다. 또한 알칼리성 물질보다 산성물질의 첨가시 메탄배출의 저감 효과가 더 뚜렷하였다는 Wang의 보고로 볼때 유안시용구에서의 메탄배출저감효과는 SO_4 의 토양환원 지연작용뿐 만 아니라 토양 pH의 저하에 영향을 받았으리라 생각되었다.

적 요

논토양에서 질소비종 및 재배양식에 따른 메탄배출양상과 질소비종이 담수토양의 pH와 Eh에 미치는 영향을 조사한 결과는 아래와 같다.

1. 중묘이앙재배에서 질소비종에 따른 메탄배출총량은 요소 32.9g m^{-2} > 유안 30.3g m^{-2} > 완효성비료 26.4g m^{-2} 의 순이었으며, 건답직파재배에서는 요소 24.7g m^{-2} > 유안 16.7g m^{-2} > 완효성비료 22.8g m^{-2} 의 순이었다.
2. 질소비종에 따른 메탄배출량은 요소시비구보다 유안은 18.4%, 완효성비료는 15.9% 저감되었다.
3. 재배양식별로는 건답직파재배는 중묘이앙재배보다 29.7%의 메탄발생량이 저감되었다.
4. 질소비종에 따른 담수토양의 pH는 요소>완효성비료>무비>유안의 순으로 높았는데 이는 질소비종별 메탄배출량의 순서와 일치하였다. 토양 Eh는 유안>완효성비료>무비>요소의 순으로 높아 pH 및 메탄배출량과 반대경향이었으며, 토양용액내 SO_4 농도는 유안>완효성비료>요소>무비의 순으로 높았다.

참 고 문 헌

1. Bowman, A. F. 1990. Soils and the greenhouse effect. John Wiley, New York pp. 25 -192
2. IPCC Working Group I. 1995. Summary for Policymaker : The Science of Climate Change. Website <http://WWW.unep.ch/ipcc/sumwg.html>.
3. IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change (1992) In : Houghton, J. T., B. A. Callandar, and S. K. Varney. (eds) Climate Change 1992 The supplementary report to the IPCC scientific assessment. Cambridge University Press, Cambridge
4. Yeongnam Agricultural Experiment Station, 1992, Research Report : 669-673.
5. Lee, K. B., D. B. Lee, J. G. Kim, and Y. W. Kim. 1997. Effect of Rice Cultural Patterns on Methane Emission from a Korea Paddy Soil. J. Korean Soil Sci. March, 30:35-39.
6. Shin, Y. K., S. H. Yun., M. E. Park., and B. L. Lee., 1996. Mitigation Options for Methane Emission from Rice Fields in Korea. Ambio 25(4):289-291.
7. Yagi, K., and K. Minami. 1991. Emission and production on metnane in the paddy fields of Japan. JARQ 25 : 165-171.
8. Kimura, M., K. Asai, A. Watanabe, and S. Kuwatsuka. 1992. Suppression of methane fluxes from flooded paddy soil with rice plants by foliar spray of nitrogen fertilizers. Soil Sci. Plant Nutr., 38(4) : 735-740.
9. Wang, Z.P., H.Kludze, C.R. Crozier, and W.H. Partick. Jr. 1995. Soil characteristics affecting methane production and emission in flooded rice. In : Climate Change and Rice: 80~90.
10. Neue, H. U., and H. W. Sharpenseel. 1984 Gases products of the decomposition of organic matter in submerged soils. pp. 311 - 328. In Organic matter and Rice. IRRI. Los Bans, Philippines.
11. Schtz, H., A. Holzapfel - Pschorn, R. Conrad, H. Rennenberg, and W. Seiler. 1989. A three year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on mehane emission rate from an Italian rice paddy field. J. Geophys. Res. 94 : 16405 - 16416
12. Neue, H.U., R. Wassman, R.S. Lantin, M.C. Alberto, and J.B. Aduna. 1994. Effect of fertilization on methane emission. In IRRN : 31-45.
13. Neue, H. U., and R. Sass. 1994. Trace gas emissions from rice fields. In: PrinnR(ed). Global atmospheric-biospheric chemistry Plenum Press, New York : 119-148.
14. Jakobsen, P., W. H. Partrick. J, and B. G. Williams. 1981. Sulfide and methane formation in soils and

- sediments. *Soil Science* 132:279-287
15. Kruse, C.W., P. Moldrup, and N. Lversen. 1996. Modeling difussion and reaction in soils : I. Atmospheric methane diffusion and consumption in a forest soil. *Soil Sci.* 161(6):355 -365
 16. Parashar, D.C., and A.P. Mitra etc. 1994. Methane Budget from Indian Paddy Fields. In CH₄ and N₂O, NIAES Series 2.: 27-39.
 17. Thurlow, M., K. Kanda, H. Tsuruta, and K. Minamini. 1995. Methane Uptake by unflooded Paddy soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 41 : 371-375.
 18. Lovely, D. R., M. J. Klug. 1983. Sulfate reducers can outcompete methanogens at freshwater sulfate concentrations. *Appl. Environ. Microbiol.* 45:187-192
 19. Lim, S. U. 1987. Plant nutrition *Fertilizer science* : 325-328, Illshin press.
 20. Ling, S. 1995. Possibility for reducing methane emission from rice fields in China. In *IRRN* : 31-45.
 21. Wang, Z. P., R. D. DeLaune, P. H. Masscheleyn, and W. H. Partick Jr. 1993. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57 : 382-385.
 22. Wang, M. X., A. G. Dai, J. Huang, L. X. Ren, R. X. Shen, H. Schutz, W. Seiler, R. A. Rasmussen, and M. A. K. Khalil. 1993. Methane source from china. *Sci. Atmos. Sci.* 10(3):307-314
 23. Ponnampereuma, F.N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy* 24:29-96.
 24. Conrad, R. and F. Rothfuss. 1991. Methane oxidation in the soil surface layer of a flooded rice field and the effect of ammonium. *Biol. Fert.* 12:28- 32
 25. Lee, K. B. 1997, Effects of Rice Cultivation on Methane Emission from Submerged Paddy Field, Dept. of Agri. Chem. Chonnam National University.