

배수 개선처리에 따른 토양 투수속도 변화가 논에서 CH₄ 및 N₂O 배출에 미치는 영향

고지연* · 이재생 · 정기열 · 최영대 · 이동욱 · 윤을수 · 김춘식 · 박성태

작물과학원 영남농업연구소 식물환경과

Effects of Soil Percolation Rate by Different Drainage Treatments on CH₄ and N₂O Emissions from Paddy Field

Jee-Yeon Ko*, Jae-Saeng Lee, Ki-Yeol Jung, Choi-Young Dae, Dong-Wook Lee,
Eul-Soo Yun, Choon-Shik Kim, and Seong-Tae Park

RDA, NICS, Yeongnam Agricultural Research Institute, Milyang, 627-803

The effects of soil percolation rate on CH₄ and N₂O emissions were investigated from paddy fields with different drainage systems. Subsurface tile drainage plot of soil percolation rate 11.9 mm d⁻¹ and non-subsurface drainage plots of soil percolation rate 7.4mm d⁻¹ and 6.9 mm d⁻¹ were designed. The effects of rice straw application were measured at each drainage plots. The subsurface tile drainage plot of soil percolation rate 11.9 mm d⁻¹ showed the lower emission amount both of CH₄ and N₂O among treatments. In the subsurface tile drainage plot of 11.9 mm d⁻¹ percolation rate, 46% of CH₄ and 33% of N₂O emission amounts were reduced in comparison of non-subsurface drainage plot of 6.9 mm d⁻¹ percolation rate. With rice straw application, the CH₄ emission amount was 2.1 times to that from no-applied plot, the N₂O emission amount was not affected by rice straw application.

Key words : Soil percolation, CH₄, N₂O, Greenhouse gases emission, Paddy fields, Drainage system

서 언

지구온난화를 유발하는 미세기체 중 CO₂ 다음으로 중요한 온실가스인 CH₄와 N₂O는 농업활동에서 인간의 활동에 의한 인위적 배출량의 50%와 70%가 발생한다고 한다(IPCC, 2001). 특히 논토양은 CH₄의 중요한 배출원으로서 지구전체 배출량의 10~15%가 논토양에서 배출되고, N₂O는 CH₄에 비하여 논에서의 배출량은 미미하지만 질소시비와 물관리가 결합된 특정조건에서는 상당한 양이 발생할 가능성이 있는 것으로 보고되고 있다(Neue, 1993; Abao et al., 2000; Cai et al., 2001; Wassmann et al., 2004).

따라서 논에서의 CH₄ 발생은 Ciceron and Shettler(1981)에 의해 보고된 이후로, 논토양 온실가스 배출에 미치는 여러 인자 및 그에 따른 발생량, 저감방법 구명 등 다양한 연구들이 국내외적으로 수행되어 왔다. 우리나라에서도 1994년 논토양에서 온실가스 발생량의 측정을 시작한 이후로 물관리, 유기물원의 종류, 재배법, 품종, 질소질 비종 등이 미치는 영향

및 효과적인 저감방법에 관한 연구(Shin, 1996; Lee 1997, 2005; Ko, 1998, 2000, 2002)가 지속되어 왔다. 그러나 국내에서의 논토양 온실가스 발생에 관한 연구는 재배관리에 의한 저감법 개발에 주로 집중되어 있고, 발생의 기질이 되는 토양의 투수속도 같은 물리적 특성에 관해서는 연구가 많이 이루어지지 않은 실정이다.

CH₄는 절대 혐기성균에 의하여 생산되는 유기물 분해의 최종 산물이므로 논에서의 CH₄ 발생은 담수로 인한 토양 혐기상태의 변화에 따라 크게 영향을 받고(Kimura et al, 1992; Neue, 1993; Minami, 1993), 발생 후 배출되는 CH₄는 관개수내 산소에 의해 형성된 토양표면의 2 mm 정도의 얇은 산화층과 벼 뿌리 주변의 산화층에서 토양 내 생성된 양의 30~90%가 산화된 후 발생하므로(Conrad and Ruthfuss, 1991; Bosse and Frenzel, 1997, 1998), 관개수의 투수량은 논토양 CH₄ 배출에 영향을 줄 것으로 생각된다. 토양 투수속도가 CH₄ 발생에 미치는 영향에 관한 연구는 1990년대 초반 Murase et al.(1993), Yagi et al.(1998), Kimura et al.(1992)에 의하여 수행되었는데, 대부분 pot, column, 혹은 Lsimeter 조건에서 시험이 이루어졌

접수 : 2007. 5. 2 수리 : 2007. 6. 8

*연락처 : Phone: +82553501267,

E-mail: kjeeyeon@rda.go.kr

고 실제 포장에서 수행된 바는 없으며, 연구 결과도 연구자에 따라 상이하게 나타나는 경향이였다.

또 하나의 중요한 온실가스인 N₂O는 토양에서 크게 2가지 경로로 발생하는데, 하나는 NO₃⁻ 및 NO₂⁻의 탈질작용 중 중간대사산물로, 다른 하나는 NH₄⁺의 질산화작용의 부산물로 생성되는 것으로(Bleakley et al., 1982; Wrage et al., 2001)알려져 있다. 담수된 논토양과 같은 혐기성 조건, 즉 토양수분이 WFPS(water filled pore space)의 80% 이상인 조건에서는 탈질작용이 N₂O의 주된 발생기작으로 작용하게 되는데(Bollmann et al., 1998; Renault and Sierra, 1994), 토양내 O₂의 존재는 탈질작용의 효율을 저하시켜 N₂O의 발생이 저감되는 것으로 보고(Hwang and Hanaki, 2000)된 바 있다.

따라서 논토양에서 투수속도의 차이는 관개수에 의한 O₂의 토양내 공급량에 변화를 일으켜 N₂O 발생량에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상되나 이에 관한 시험은 수행된 바 없으므로 본 연구에서는 토양 투수속도가 논토양 CH₄ 및 N₂O 배출에 미치는 영향을 구명하고자, 토양의 투수성에 직접적으로 영향을 미치는 배수개선처리로 토양의 투수속도를 달리하여 그에 따른 논토양 CH₄ 및 N₂O 배출량 등을 조사하였다.

재료 및 방법

처리 및 재배방법 투수속도가 논토양 온실가스 배출에 미치는 영향을 구명하고자 2004년 영남농업연구소 내 토양의 투수속도를 높이고자 암거배수 시설을 설치한 포장(SD : Subsurface drainage plot, 크기 611 m²)과 인접한 2개의 무암거 포장(NSD 1 : Non-subsurface drainage next to subsurface drainage plot, 크기 611 m², NSD 2 : Non-subsurface drainage next to NSD 1 plot, 크기 611 m²)에서 온실가스 발생량을 조사하였다. 또한 유기물 시용시 투수속도변화가 온실가스 배출에 미치는 영향을 구명하고자 벧짚시용 및 무시용처리로 하였는데 이때 벧짚시용량은 5.0 ton ha⁻¹로 조절하여 시용하였다.

암거배수 시설은 1999년 시공되었는데 6 m 간격으로 폭 60 cm, 토심 80 cm를 굴토 후 직경 150 mm의 유공파이프를 매설하고, 그 위에 자갈 30 cm, 왕겨 10 cm의 순으로 충전하였다. 암거배수로 인한 물을 배수하기 위하여 1.2 × 1.2 × 2 m의 맨홀을 배수로의 하단부에 설치하여 일정한 수위가 되면 수중펌프로 자동 배수되게 하였다. 또한 관개수의 절약 및 비료성분 유실을 최소화하고자 자동배수 되는 물은 다시 논으로 관개가 되도록 파이프를 연결하였다.

벼 재배는 중만생종인 일미벼를 산파상자에 파종한 후 30일 중묘를 6월 상순 기계이앙 하였고, 이앙 후

본답관리는 농촌진흥청 벼 표준재배법에 준하여 재배하였다.

논토양 배출 CH₄, N₂O 채취 및 분석 논토양으로부터 온실가스 시료의 채취는 밀폐식 polyacrylic plastic chamber (60 × 60 × 100 cm)를 이용하였다. 시료는 이앙 7일후 부터 주 2회 잠금장치가 장착된 60 ml의 pp 주사기로 채취하였으며 분석은 시료채취 당일 gas chromatograph(Varian 3000)로 하였다. CH₄분석은 검출기는 FID, 컬럼은 porapack Q(1/8" × 6'), 오븐 온도는 70°C, 주입기 온도는 75°C, 검출기 온도는 150°C, 운반가스(Carrier gas)는 N₂를 사용하였다. N₂O 분석을 위해서는 검출기는 ECD, 컬럼은 Porapack Q(1/8" × 6')를 사용하였고, 오븐 및 주입기 온도는 CH₄분석조건과 같았고 검출기 온도는 320°C로 설정하였다. 또한 대기 중에 미량으로 존재하는 N₂O를 검출하기 위하여 ECD의 감도에 영향을 미치는 수분 및 O₂는 밸브를 이용하여 기계적으로 배출시켜 제거하였다.

시험 전 토양 화학성, 투수속도 및 벼 수량조사 토양 pH는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 희석하여 초차전극법으로 분석하였고 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법, 양이온인 K, Ca, Mg는 1N-NH₄OAc로 침출시킨 후 유도결합플라즈마(PerkinElmer 3300DV USA)를 이용하여 분석하였다. 식물체는 60°C에서 건조후 분쇄한 시료를 H₂SO₄-HClO₄-H₂O 혼합분해액을 가하여 전열 판에서 분해한 후 T-N은 Kjeldahl법, 인산은 Ammonium vanadate법, 양이온은 유도결합플라즈마(PerkinElmer 3300DV USA)를 이용하여 분석하였다.

논토양 투수속도는 철판으로 만든 무저원통(φ30 cm)을 토심 20 cm의 깊이로 각 처리구마다 3반복으로 설치하여, 이앙후 부터 완전낙수시까지 총 10회 측정하였다. 투수속도의 측정은 24시간 동안의 논물 총 감수심 및 증발에 의한 감수심을 조사하여 총 감수심에서 증발량을 제외한 감수심의 변화로 논토양 투수속도를 측정하였다.

수확기 벼 생육상황 및 수량은 각 처리별로 간장, 수장, 수수 및 정조수량을 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사 분석기준에 준하여 조사하였다.

결과 및 고찰

시험 전 토양특성 시험이 수행된 포장의 토성, 투수속도 및 화학성은 table 1과 같다. 토성은 미사질식양토인 보통답 덕평토종으로 토양 배수등급은 약간 양호에 해당하나 유거속도와 수직배수가 느린 토양이고, 유기물함량은 34.0~36.3 g kg⁻¹으로 처리구 간 비옥도 차이는 거의 없었으나 암거배수 처리 포장의

Table 1. Major characteristics of the soils used.

Treatment	Soil depth cm	pH	OM g kg ⁻¹	Av. P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	Av. SiO ₂ mg kg ⁻¹	Ex. cations			Texture	Percolation rate mm d ⁻¹
						Ca	K	Mg		
SD [†]	0-15	6.17	35.6	151.3	154.5	7.1	0.8	1.4	SiCL	11.9±2.45
	15-30	6.40	34.0	131.9	150.8	7.0	0.6	1.4	SiCL	
NSD 1	0-15	6.04	36.3	116.9	155.2	6.5	0.6	1.3	SiCL	7.4±2.15
	15-30	6.17	35.1	104.6	131.8	6.2	0.4	1.4	SiCL	
NSD 2	0-15	6.22	33.7	108.9	200.7	6.1	0.6	1.2	SiCL	6.1±2.53
	15-30	6.10	32.6	99.4	185.5	7.5	0.4	1.6	SiCL	

[†] SD : Subsurface drainage plot, NSD 1 : Non-subsurface drainage next to subsurface drainage plot, NSD 2 : Non-subsurface drainage next to NSD 1 plot

유효인산 함량이 조금 높은 편이었다.

논토양 투수속도는 무암거 2개구에 비하여 지하암 거배수구에서의 평균 투수속도는 11.9 mm d⁻¹로 가장 높았으며, 암거배수구에 인접한 무암거구의 평균 투수속도가 7.4 mm d⁻¹로 다른 무암거구의 6.1 mm d⁻¹보다 약간 높았으나 통계적 차이는 없었다.

배수조건 및 볏짚사용에 따른 CH₄ 배출양상 암거 배수 및 무암거로 투수속도가 다른 3개 논토양의 CH₄ 배출양상을 볏짚사용구와 무사용구에서 조사하였다 (Fig. 1, 2).

볶짚사용구의 배수 및 투수속도별 CH₄ 발생양상은 암거처리로 투수속도가 11.9 mm day⁻¹로 가장 빨랐던 논에서 생육기간 동안 지속적으로 낮은 배출양상을 보였다. 또한 암거구에서는 볏짚과 같은 유기물을 사용한 구에서 생육초기에 전형적으로 나타나는 시용유기물의 분해에 의한 CH₄ 배출 피크(Minami, 1993; Kimura et al., 2004)가 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 생육후기에도 투수속도가 느린구에 비하여 배출이 낮은 특징을 보였다.

볶짚 무사용구에서도 배수 및 투수속도별 CH₄ 배출

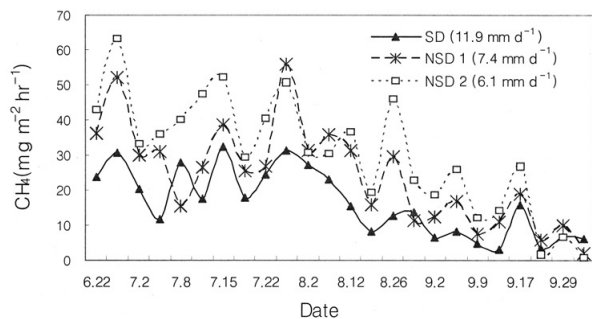


Fig. 1. Changes of CH₄ emission by drainage system and soil percolation rate from rice paddy fields with rice straw amendment.

[†] SD is Subsurface drainage plot with percolation rate 11.9 mm d⁻¹; NSD 1 is Non-subsurface drainage next to subsurface drainage plot with percolation rate 7.4 mm d⁻¹; NSD 2 is Non-subsurface drainage next to NSD 1 plot with percolation rate 6.1 mm d⁻¹

량은 볏짚사용구와 같은 경향이었으나, 볏짚 사용구에 비하여 전체적으로 배출량이 현저히 낮았다.

배수조건 및 볏짚사용에 따른 N₂O 배출양상 배수 조건 및 볏짚사용 유무별 N₂O 배출양상은 Fig. 3, 4에서와 같이 투수속도에 따른 N₂O 배출양상은 논토양 CH₄ 배출과 마찬가지로 암거 처리시 볏짚사용 및 무사용 모두 배출량이 낮은 경향이었으며, 볏짚 사용에 따른 N₂O 배출양상은 CH₄ 배출과 달리 뚜렷한 배출량의 차이를 발견하기 어려웠으나, 생육후기에 볏짚 사용구의 N₂O 배출이 다소 많은 경향이였다.

수확작업을 위하여 완전낙수가 이뤄지는 9월 말에 대부분의 처리에서 N₂O 배출량이 증가하였는데, 이는 배수에 의해 논토양의 수분변화가 급격히 일어남에 따라 탈질 및 국부적인 질산화에 의한 토양내 N₂O 생성이 촉진되고, 생성된 N₂O는 토양에서 대기로 바로 배출되었다고 생각되었다. Zheng et al.(2000)은 벼를 재배하는 생태계에서 N₂O의 폭발적인 증가는 WFPS의 99±9%에서 발생한다고 하였고, Ruser et al.(2005)은 WFPS를 40~98%로 조절한 결과 WFPS 70%이상에서 탈질에 의한 N₂O발생이 증가하면서

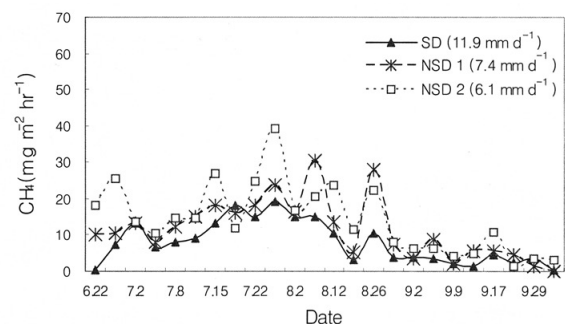


Fig. 2. Changes of CH₄ emission by drainage system and soil percolation rate from rice paddy fields without rice straw amendment.

[†] SD is Subsurface drainage plot with percolation rate 11.9 mm d⁻¹; NSD 1 is Non-subsurface drainage next to subsurface drainage plot with percolation rate 7.4 mm d⁻¹; NSD 2 is Non-subsurface drainage next to NSD 1 plot with percolation rate 6.1 mm d⁻¹

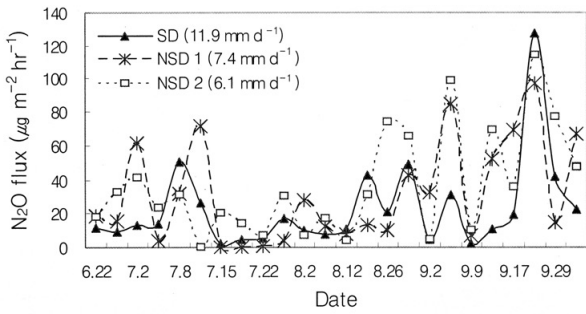


Fig. 3. Changes of N₂O emission by drainage system and soil percolation rate from rice paddy fields with rice straw amendment.

† SD is Subsurface drainage plot with percolation rate 11.9 mm d⁻¹ ; NSD 1 is Non-subsurface drainage next to subsurface drainage plot with percolation rate 7.4 mm d⁻¹ ; NSD 2 is Non-subsurface drainage next to NSD 1 plot with percolation rate 6.1 mm d⁻¹

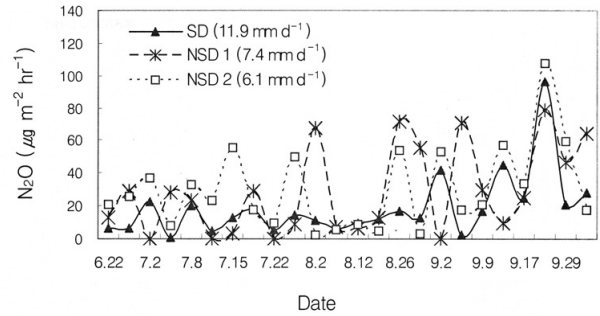


Fig. 4. Changes of N₂O emission by drainage system and soil percolation rate from rice paddy fields without rice straw amendment.

† SD is Subsurface drainage plot with percolation rate 11.9 mm d⁻¹ ; NSD 1 is Non-subsurface drainage next to subsurface drainage plot with percolation rate 7.4 mm d⁻¹ ; NSD 2 is Non-subsurface drainage next to NSD 1 plot with percolation rate 6.1 mm d⁻¹

98%에서 최고를 나타내었다고 보고한 바와 같이, N₂O 발생이 매우 적은 논토양에서도 물관리 등으로 인한 토양 수분조건의 변화시 이와 같이 N₂O 발생이 급격히 일어나는 것으로 생각되었다.

또한 Zheng et al.(2000)은 담수시기에 비해 배수후 N₂O 발생이 월등히 증가함을 관찰하였고, Cai et al.(2001)은 간단관개의 물관리시 상시담수에 비해 증가하였다고 보고하여 본 연구와 비슷한 결과를 나타내었다.

배수조건에 따른 토양 투수속도변화가 CH₄ 및 N₂O 배출에 미치는 영향 Fig. 5는 투수속도가 논토양 온실가스 배출에 미치는 영향을 나타낸 것으로 토양 투수속도가 증가함에 따라 CH₄ 및 N₂O의 배출량이 뚜렷이 감소하였다.

토양 투수속도 증가에 따라 CH₄ 배출이 저감된 것은 대기로부터 용존된 산소를 포함하고 있는 관개수의 침투증가로 토양의 산화환원전위가 상승하여 절대 혐기성균인 CH₄ 생성균의 활동이 저해되었기 때문으

로 생각된다. 또한 토양투수속도 증가에 따라 토양내 CH₄ 생성의 기질이 되는 TOC(total organic carbon)와 같은 탄소원의 용탈이 조장되는 것도(Kimura et al., 1992, 2004; Murase et al., 1993), CH₄ 배출 저감의 원인으로 작용하였으리라 생각된다.

Yagi et al.(1998)은 2 × 2.5 m, 깊이 1.0 m의 Lysimeter에서 투수속도를 0 mm d⁻¹, 5 mm d⁻¹, 20 mm d⁻¹로 조절하여 CH₄ 배출량을 조사한 결과, 0 mm d⁻¹에서 9.25 g m⁻²의 CH₄가 배출되었음에 비하여 20 mm d⁻¹ 구는 0.34 g m⁻²가 배출되어 투수속도 증가에 따라 CH₄ 배출량이 현저히 저감됨을 보고하여 본 실험결과와 일치하는 경향이었다. 또한 이때 논토양의 산화환원전위도 투수속도가 높을수록 증가하여 CH₄ 배출저감이 산화환원전위가 CH₄생성에 적합한 수준인 -200 mV보다 증가하였기 때문으로 생각된다. 그러나 Murase et al.(1993)은 pot 하부에 주사기를 장착하여 투수속도를 0, 5, 15 mm d⁻¹로 조절하면서 토양 용액내 CH₄ 및 대기로 배출되는 CH₄량을 조사한 결과, 투수속도 증가에 따라 침출수량은 많아지고 용액내 CH₄ 농도는 거의 차이가 없었기 때문에 침출된 CH₄량은 투수속도 증가에 따라 비율적으로 증가하였으나, 대기로 배출된 CH₄량은 투수속도별로 거의 차이가 없었다고 보고하여 본 연구결과와 상이하였다. Kimura et al.(1992, 2004)도 직경 7 cm의 column 하부에 주사기를 장착하여 투수속도를 0, 5, 15 mm d⁻¹로 조절할 수 있도록 한 실험에서 투수속도가 변화하여도 투수된 토양용액내 CH₄ 농도는 차이가 없는 것으로 보아 투수속도가 토양내 CH₄생성에 큰 영향을 미치지 못한다고 하였다. Murase et al.(1993) 및 Kimura et al.(1992, 2004)의 결과가 본 실험 및 Yagi et al.(1998)의 결과와 달랐던 것은 토양 투수속도를 시험포장상태에서 자연스럽게 조절된 것

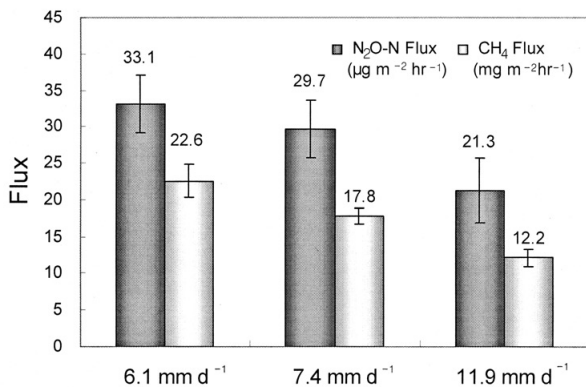


Fig. 5. CH₄ and N₂O emission amount by percolation rate of paddy field.

이 아니라 주사기의 압력으로 인위적으로 조절하여 산소공급에 따른 미생물상의 변화가 안정화되기까지의 시간이 충분하지 않을 수 있었던 것이 원인이 될 수 있을 것으로 생각되었다.

투수속도 증가에 따라 논토양에서 N₂O 배출도 뚜렷이 낮아진 것으로 생각되는데 이는 담수된 논토양과 같이 N₂O가 탈질과정의 중간대사물질로서 발생하는 혐기상태에서는 산소의 존재가 탈질작용 전체를 저하시켜 중간대사물질인 N₂O의 발생도 낮아진 것 때문에(Bleakley et al., 1982; Hwang and Hanaki, 2000) 저감된 것으로 생각된다. 또한 N₂O는 CO₂나 CH₄에 비하여 용해성이 상당히 큰 가스이므로(25°C, 59% 용해), 물과 함께 밑으로 용탈되어 대기로의 배출이 줄어든 것으로 생각되었다. N₂O의 이러한 높은 용해성은 암거배수시 대기로의 배출은 억제할 수 있었지만 배수로 및 논토양에 인접한 하천과 수계에서 N₂O의 간접 배출을 증대시킬 우려가 있으므로 암거배수시 배출수는 가능한 관개수로 다시 논으로 환류 시키는 것이 관개수의 이용효율 증진 및 N₂O의 간접 배출 저감의 측면에서 바람직 할 것으로 생각된다.

배수처리 및 볏짚사용에 따른 재배기간 배출량

Table 2는 처리별 재배기간 중 온실가스 배출총량을 나타낸 것으로 평균 CH₄ 발생량이 328 kg ha⁻¹, 690 kg ha⁻¹로 기존의 연구결과인 130~424 kg ha⁻¹(Lee et al., 2005; Ko et al., 2000)에 비하여 비교적 높은 편이었는데, 이는 시험이 수행된 토양의 유기물 함량이 상대적으로 높았기 때문으로 생각된다.

배수조건과 투수속도에 따른 CH₄ 총배출량은 투수속도가 6.1 mm d⁻¹로 가장 느렸던 무암거구(NSD 2)에 비하여 투수속도 7.4 mm d⁻¹ (NSD 1) 및 지하 암거배수 처리로 11.9 mm d⁻¹로 가장 빨랐던 구(SD)에서 각각 32%, 46% 배출이 감소하였으며, N₂O 배출량도 NSD 2에 비하여 NSD 1 및 SD에서 각각 7%, 33% 감소하였다. 이러한 뚜렷한 저감현상은 투수에

따른 토양 Eh의 변화가 중요한 원인 중 하나가 되는데(Yagi and Minami, 1990), 논토양에서 토양 Eh의 정밀 미세조절에 의한 온실가스 배출관리는 최근 관심이 부각되는 부문으로 논토양에서 온실가스의 발생이 거의 일어나지 않는 산화환원전위의 범위(redox window)인 + 180 mV ~ - 150 mV 로 토양 Eh를 관리하는 것이 수량에도 긍정적이면서 온실가스 저감 효과도 상당한 것으로 다수의 연구결과가 보고되고 있다. (Minamikawa and Sakai, 2006 ; Yu and Patrick, 2003, 2004)

볏짚사용에 따른 CH₄ 배출량은 무시용시 328 kg ha⁻¹에 비하여 시용시 690 kg ha⁻¹ 으로 약 2.1배 증가하여 투입된 유기물 내 탄소원에 의한 CH₄ 증가가 뚜렷하였는데, 이러한 경향은 기존의 보고와 일치하는 경향이였다(Yagi & Minami, 1990; Wassmann et al., 2000). 한편 N₂O 배출은 무시용에 비하여 볏짚 시용시 약간 증가하는 경향이였으나 통계적 유의성이 없었다. 이러한 결과는 토양내 가용성 N 가 증가하기 때문에 N₂O 발생이 증가한다는 결과(Lemke et al., 1999)와 토양미생물에 의한 N 부동화로 배출이 줄어든다는 연구결과 등으로 다양하였는데(Abao et al., 2000; Hwang and Hanaki, 2000) 이는 측정당시의 수분, 온도 등 토양조건 및 투입유기물원 등이 영향을 미치기 때문으로 생각되었으나, 이는 추가적인 연구로 명확히 구명되어야 할 부분이라 생각된다.

배수조건별 온실가스 배출량을 지구온난화지수(GWP : Global warming potential)로 환산하면 투수속도가 가장 느렸던 무암거배수 논에 비해 암거배수 논에서 45%가 저감되는 결과를 나타내었다.

배수조건과 볏짚 사용에 따른 벼 수확기 생육상황 및 수량

배수조건에 따른 수확기 생육 및 수량은 볏짚 시용 및 무시용 모두 지하 암거배수처리에서 생육이 양호하였고 수량도 2~3% 증가하였다(Table 3). 류 등(1993)이 배수약간 불량외 전복통에서 암거배수

Table 2. Amounts of greenhouse gases emission by drainage system and rice straw application.

Treatment	CH ₄			N ₂ O			GWP
	With rice straw	Without rice straw	Mean	With rice straw	Without rice straw	Mean	
	----- kg ha ⁻¹ -----			----- kg ha ⁻¹ -----			ton ha ⁻¹
SD	477	231	354 a	1.1	0.9	1.0 a	7.7
NSD 1	699	337	518 ab	1.4	1.3	1.4 ab	11.3
NSD 2	895	416	655 c	1.7	1.4	1.5 ab	14.2
Mean	690 a	328 b		1.4 a	1.2 a		

¹ SD is Subsurface drainage plot with percolation rate 11.9 mm d⁻¹; NSD 1 is Non-subsurface drainage next to subsurface drainage plot with percolation rate 7.4 mm d⁻¹; NSD 2 is Non-subsurface drainage next to NSD 1 plot with percolation rate 6.1 mm d⁻¹

Table 3. Yields and growth status by drainage system and rice straw application.

Drainage system	with rice straw				without rice straw			
	Culm length	Panicle length	Spikelet	Yield	Culm length	Panicle length	Spikelet	Yield
	cm	cm	No. panicle ⁻¹	ton ha ⁻¹	cm	cm	No. panicle ⁻¹	ton ha ⁻¹
SD [†]	83.6	21.0	14.9	6.73(103)	81.4	20.3	14.9	6.61(102)
NSD 1	77.1	20.9	14.4	6.61(101)	79.8	19.6	15.0	6.50(100)
NSD 2	76.9	20.5	14.6	6.53(100)	78.6	19.8	15.3	6.48(100)

[†] SD is Subsurface drainage plot with percolation rate 11.9 mm d⁻¹; NSD 1 is Non-subsurface drainage next to subsurface drainage plot with percolation rate 7.4 mm d⁻¹; NSD 2 is Non-subsurface drainage next to NSD 1 plot with percolation rate 6.1 mm d⁻¹

처리시 수량이 4~19% 증수되었다고 보고한 결과와 비슷한 경향이나, 증수정도는 낮았는데 이는 본 시험이 수행된 포장이 토양 투수속도는 느리지만 배수등급이 약간 양호한 토양이고, 벼 품종, 시험지역 및 시비량 등 재배조건이 달라 암거배수처리에 따른 증수 효과에 차이가 있었던 것으로 생각된다. 전 등(2003)에 의하면 암거배수시에는 단위 토양부피당 근층 밀도 및 뿌리깊이 지수가 증가하여 뿌리가 넓고 깊게 분포하여 도복이 줄어들고 등숙 비율과 천립중이 높아져 수량이 증가된다고 하였다.

결 론

논토양 물리성의 하나인 투수속도가 온실가스 배출에 미치는 영향을 구명하고자, 토양의 투수성에 직접적으로 영향을 미치는 암거배수 처리후 논토양 CH₄ 및 N₂O의 배출량을 조사한 결과, 투수속도 6.9 mm d⁻¹의 시험구에 비하여 암거배수로 11.9 mm d⁻¹로 증가한 구에서 생육기간 중 논토양 CH₄ 및 N₂O 배출이 각각 46%, 33% 저감되었고 GWP도 45%가 감소되었다.

논에서의 CH₄ 및 N₂O 배출은 생물학적 과정의 산물이며 자연 생태계내 물질순환의 한 과정이므로 완전한 저감방법의 개발은 실제적으로 불가능하다. 그러나 실제 논에서의 온실가스 배출에 의한 환경 부하를 최소화하기 위해서는 가능한 여러 가지 저감방법을 구명하여 복잡다양한 각각의 상황에 맞는 재배관리의 최적화가 바람직하다.

현재 논토양 배출 온실가스의 저감을 위해 간단관개의 물관리 방법, 신선 유기물원의 퇴비화 시용, 건답작과 등의 재배방법이 연구되었고 이런 방법들은 재배안정성과 온실가스 저감이 함께 고려된 바람직한 방법이며, 토양투수속도를 증진시킨 배수개선 처리역시 온실가스 배출저감 및 벼 수량증대라는 연구결과로 볼 때, 투수속도가 느린 배수불량 및 약간 불량답의 경우 추천할 만한 방법으로 판단되었다.

또한 배수개선 시설은 논에서 답리작 이용 및 쌀

생산량의 적정 비율 유지를 위한 벼 대체작물 도입가 능 등 논의 범용화로 논의 경지이용성 증대에도 효과적이고, 쌀 과잉공급을 막기 위한 적정 논 면적의 유지 정책 등의 국내 농업 여건 변화와도 일치하는 것으로 생각된다.

인 용 문 헌

Abao, E.B., K.F. Bronson, R. Wassmann and U. Singh, 2000. Simultaneous records of methane and nitrous oxide emissions in rice-based cropping systems under rainfed conditions. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 58:131-140.

Bleakley, B.H., H. Bruce and J.M. Tiedje. 1982. Nitrous oxide production by organisms other than nitrifiers or denitrifiers. *Appl. Environ. Microbiol.* 44(6):1342-1348.

Bollmann, A. and R. Conrad. 1998. Influence of O₂ availability on NO and N₂O release by nitrification and denitrification in soils. *Global Change Biology* 4(4):387-396.

Bosse, U. and P. Frenzel. 1997. Activity and distribution of methane-oxidizing bacteria in flooded rice soil microcosms and in rice plants (*Oryza sativa*). *Appl. Environ. Microbiol.* 63:1199-1207.

Bosse, U. and P. Frenzel. 1998. Methane emissions from rice microcosms the balance of production, accumulation and oxidation. *Biogeochemistry* 41:199-214.

Cai, Z., R. J. Laughlin and Stevens R.J. 2001. Nitrous oxide and dinitrogen emissions from soil under different water regimes and straw amendment. *Chemosphere.* 42(2):113-121.

Cicerone, R. J., and J. D. Shetler. 1981. Sources of atmospheric methane: Measurements in rice paddies and discussion. *J. Geophys. Res.* 86:7203-7209.

Conrad, R. and F. Rothfuss. 1991. Methane oxidation in the soil surface layer of a flooded rice field and the effect of ammonium. *Biology and Fertility of Soils.* V12(1):28-32.

Hwang, S. and K. Hanaki. 2000. Effects of oxygen concentration and moisture content of refuse on nitrification, denitrification and nitrous oxide production. *Bioresource Technology* 71(2):159-165.

Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis.* Cambridge University PRESS, Cambridge, UK.

Jeon, W. T., C. Y. Park, K. D. Park, Y. S. Cho, J. S. Lee and D. C.

- Lee. 2002. Changes of soil characteristics, rice growth and lodging traits by different fertilization and drainage J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert. 35(3):153-161.
- Kimura, M., Y. Miura, A. Watanabe, J. Murase and S. Kuwatsuka. 1992. Methane production and its fate in paddy fields. I. Effects of rice straw application and percolation rate on the leaching of methane and other soil components into the subsoil. Soil Science and Plant Nutrition 38:665-672.
- Kimura, M., J. Murase, L. Yahai. 2004. Carbon cycling in rice field ecosystems in the context of input, decomposition and translocation of organic materials and the fates of their end products (CO₂ and CH₄). Soil Biology and Biochemistry 36(9):1399-1416.
- Ko, J.Y., H.W. Kang, U.G. Kang, H.M. Park, D.K. Lim and K.B. Park. 1998. The effects of nitrogen fertilizers and cultural patterns on methane emission from rice paddy field. Koe. J. Env. Agri. 17(3):227-233.
- Ko, J. Y. and H.W. Kang. 2000. The effects of cultural practices on methane emission from rice field. Nutrient cycling in agroecosystems 58:311-314.
- Ko, J. Y., J. S. Lee, M. T. Kim, H. W. Kang, U. G. Kang, D. C. Lee, Y. G. Shin, K. Y. Kim and K. B. Lee. 2002. Effects of Cultural Practices on Methane Emission in Tillage and No - tillage Practice from Rice Paddy Fields J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert. 35(4):216-222.
- Lee, K. B., D. B. Lee, J. G. Kim and Y. W. Kim. 1997. Effect of Rice Cultural Patterns on Methane Emission from a Korean Paddy Soil. J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert. 30(1):35-40.
- Lee, K. B., D. B. Lee, T. Y. Uhm, J. G. Kim, C. H. Yoo and Y. W. Kim 1997. Influence of Different Rice Varieties on Emission of Methane in Soil and Exudation of Carbohydrates in Rhizosphere. J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert. 30(3):257-264.
- Lee, K. B. J. G. Kim, C. W. Park, Y. K. Shin, D. B. Lee, J. D. Kim. 2005. Effect of Irrigation Water Depth on Greenhouse Gas Emission in Paddy Field J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert. 38(3):150-156.
- McTaggart, I. P., H. Akiyama, H. Tsuruta, B.C.Ball. 2002. Influence of soil physical properties, fertilizer type and moisture tension on N₂O and NO emissions from nearly saturated Japanese upland soils. Nutrient Cycling in Agroecosystems 63(2):207-217.
- Murase, J., M. Kimura and S. Kuwatsuka. 1993. Methane production and its fate in paddy fields. III. Effects of percolation on methane flux distribution to the atmosphere and the subsoil. Soil Science and Plant Nutrition 39:63-70.
- Minami, K. 1993. Methane from rice production. Res. Rep. Div. Environ. Planning. 9:243-258.
- Neue, H.U. 1993. Methane emission from rice fields. Biosciences. 43:466-474.
- Neue, H. U., R. Wassermann, R. S. Lantin, M. C. Alberto and J. B. Aduna. 1994. Effect of fertilization on methane emission. Int Rice Research Notes 19(3):33-34.
- Renault, P. and J. Sierra. 1994. Modelling oxygen diffusion in aggregated soils. Anaerobiosis in topsoil layers. Soil Sci. Soc. Am. J. 58:1023-1030.
- Ruser, R., H. Flessa, R. Russow, G. Schmidt, F. Buegger, J.C.Munch. 2006. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. Soil Biology and Biochemistry. 38(2):263-274.
- 류철현. 암거배수 조건에서 답전윤환이 토양의 이화학성 변화에 미치는 영향 1993. 호남농업시험장 시험연구보고서.
- Shin, Y. K. 1996. Mitigation options for methane emission from rice fields in Korea. Ambio. 25(4):289-291.
- Yagi, K., K. Minami and Y. Ogawa. 1998. Effects of water percolation on methane emission from rice paddies. Plant and Soil. 198:193-200.
- Yagi, K. and K. Minami. 1990. Effect of Organic Matter Application on Methane Emission from Some Japanese Paddy Fields. Soil Sci. Plant Nutr. 36:599-610.
- Yu, K.W., and W.H. Patrick. 2003. Redox range with minimum nitrous oxide and methane production in a rice soil under different pH. Soil Sci. Soc. Am. J. 67:1952-1958.
- Wassmann, R., H.U. Neue, J.K. Ladha, M.S. Aulakh, 2004. Mitigating Greenhouse Gas Emissions from Rice-Wheat Cropping Systems in Asia. Environment, Development and Sustainability 6:65-90.
- Wrage, N., G.L. Velthoof, M. L. van Beusichem, O. Oenema. 2001. Soil Biochemistry. 33:1723-17327.
- Zheng, X., M. Wang, Y. Wang, R. Shen, J. Gou, J. Li, J. Jin, L. Li. 2000. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands: a case study on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China. Chemosphere - Global Change Science 2:207-224.