

논토양에서 경운방법이 메탄발생과 쌀수량에 미치는 영향

조현숙*[†] · 서명철* · 박태선* · 강항원**

*농촌진흥청 국립식량과학원, **농촌진흥청 국립식량과학원 남부작물부

Effect of Tillage Depths on Methane Emission and Rice Yield in Paddy Soil during Rice Cultivation

Hyeoun-Suk Cho*[†], Myung-Chul Seo*, Tea-Sun Park*, and Hang-Won Kang**

*Crop Production and Physiology Research Division, NICS, RDA, Jeollabuk-do, Korea

**Upland Crop Breeding Research Division, Department of Southem Area, NICS, RDA, Miryang, Korea

ABSTRACT Green manure crops are organic materials that can supply organic matter and substitute chemical fertilizer, yet emit methane while being decomposed. Therefore, we experimented with different kinds of Green manure crops and tillage depth in order to decrease the amount of methane emitted when utilizing Green manure crops in paddy soil. The amount of methane emitted during the cultivation period of rice started to increase after transplanting and peaked at 63, and 74 days after transplanting, then decreased to almost none starting from 106 days. According to the kind of Green manure crop, it was highest in barley, then hairy vetch and chemical fertilizer. Depending on the tillage depth, the amount of methane emitted decreased by 22.5% in chemical fertilizer, 12.4% in hairy vetch and 11.7% in barley in 20cm tillage compared to 10cm tillage. The air temperature of methane test period was 30~40°C, and the soil temperature was more than about 2~10°C lower than the air temperature. Due to the irrigation started before transplanting, the oxidation-reduction potential (Eh) of soil was rapidly reduced, and showed negative (-) values. Eh values mostly kept the range of -300 ~-500 mV during rice cultivation. It rapidly increased 106 days after transplanting. Rice yield the highest in hairy vetch and did not show differences according to tillage depth. Methane emission could be effectively reduced if the paddy soil was tilled by 20 cm during the application of hairy vetch.

Keywords : green manure crop, methane emission, rice yield, tillage depth

논의 벧짚 수거율이 80% 이상 증대됨에 따라 농경지의 유기물 함량은 점차 감소되어 2010년에는 23g kg⁻¹까지 낮아졌다. 앞으로도 이런 추세가 계속되고 추가로 유기물을 투입하지 않는다면 농경지 지력저하는 더욱 심해져 안정적인 식량생산을 위협할 수 있어 이에 대한 대책이 요구된다. 농식품부에서는 농경지의 지력증진을 위하여 유기질 비료시용과 녹비작물 재배를 권장하고 있다. 지력 증진을 위하여 권장되는 녹비작물은 대부분 휴경기인 겨울철에 재배되고 있어 경지 이용율을 증대시킬 뿐만 아니라 토양에 환원하면 유기물 공급, 화학비료 절감, 토양의 물리·화학적 특성 개량, 토양유실 방지, 경관조성 등 다양한 효과를 줄 수 있다(Kim *et al.*, 2011; Jeon *et al.*, 2009; Song *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2009). 그러나 녹비작물을 토양에 환원하면 분해되는 과정에서 지구 온난화에 영향을 주는 가스 중 하나인 메탄가스가 발생한다. 메탄가스는 벧 재배 과정 중 논에 관개수가 공급되어 토양이 혐기적인 상태에서 유기물이 분해될 때 발생된다. 메탄 발생량은 유기물의 종류, 시용량, 시용방법과 토양특성, 온도, 물 관리 등에 따라 달라진다(Ali, *et al.*, 2014, Kim *et al.*, 2014; Neue and Sass, 1994; Yuan *et al.*, 2014). 즉 메탄은 토양에 환원된 유기물이 부속된 퇴비보다는 신선한 유기물에서 더 많이 발생되며, 투입되는 유기물의 양이 많을수록, 토양온도가 높을수록, 담수기간이 길수록 발생량이 증가한다고 하였다(Pramanik *et al.*, 2014; Pandey *et al.*, 2014; Roh *et al.*, 2010; Yagi *et al.*, 1990). 그러나 온실가스를 절감해야한다는 목표를 달성하기 위하여 농경지에 벧짚을 제거하고 유기물을 투입하지 않는다면 농경지의 지력은

[†]Corresponding author: (Phone) +82-63-238-5282 (E-mail) chohs@korea.kr

<Received 1 December, 2014; Revised 18 May, 2015; Accepted 19 May, 2015>

점차 악화되어 안정적인 식량생산에 차질이 생길 것이다. 따라서, 지력유지에 필요한 유기물을 투입하면서 온실가스의 주범인 메탄 발생량을 줄일 수 있는 방법을 모색하기 위하여 시험을 수행하였다.

본 시험은 농경지에 다양한 효과를 줄 수 있는 우수한 유기물 자원으로 녹비작물을 활용할 때 발생하는 메탄을 줄이기 위하여 녹비작물-벼의 작부체계에서 경운방법을 달리하여 시험하였다. 먼저 동계 휴경지에 녹비작물을 재배하고 이듬해 봄에 토양에 환원 할 때 경운깊이를 10 cm와 20 cm로 환원하고 벼를 재배하면서 메탄과 이산화탄소 발생량, 벼 생육 및 수량을 조사하였다.

재료 및 방법

본 시험은 국립식량과학원 시험포장에서 2011년 10월부터 2012년 11월까지 수행되었다. 작물재배는 Fig. 1과 같이 가을에 녹비작물을 파종하여 겨울동안 재배하고 이듬해 봄 토양에 환원한 다음 벼를 재배하는 작부체계였다. 처리내용은 헤어리베치(HV), 녹비보리(B), 화학비료(C) 3개의 처리에 경운깊이를 10 cm, 20 cm로 조절하였다. 10 cm경운은 트랙터를 이용하였고, 20 cm경운은 쟁기로 경운하였다. 작물별 품종은 녹비보리는 영양보리, 헤어리베치는 H1, 벼는 운광벼를 사용하였다. 녹비작물 파종량은 녹비보리는 90 kg ha^{-1} , 헤어리베치는 40 kg ha^{-1} 을 사용하였다. 녹비작물 파종은 2010년 10월 16일에 세조파기를 이용하였고, 녹비작물 환원은 2012년 5월 22일에 10 cm와 20 cm깊이로 경

운하여 환원하였다. 벼 이앙은 6월 5일에 $30 \times 15 \text{ cm}$ 간격으로 중묘를 손 이앙 하였다. 작물재배 중 화학비료 사용량은 녹비작물 재배기간에는 헤어리베치, 보리 모두 질소(T-N), 인산(P_2O_5), 칼리(K_2O)를 무시용 하였고, 벼 재배기간에는 녹비(헤어리베치, 녹비보리)환원구는 3요소 모두 무시용하였고, 화학비료구는 질소 90 kg ha^{-1} , 인산 45 kg ha^{-1} , 칼리 57 kg ha^{-1} 을 시비하였다. 이 때 화학비료는 요소(질소), 용과린(인산), 염화칼리(칼리)를 각각 벼 분시비율에 맞게 사용하였다. 물 관리는 토양조건을 환원상태로 유지하기 위하여 이앙 4일전부터 수확기까지 상시담수를 실시하였다. 녹비작물의 수량은 토양에 환원하기 전에 1 m^2 의 식물체를 3반복으로 수확하여 50°C 에서 48시간 열풍건조 후 건물중을 측정하였다. 벼 수량 및 수량구성요소는 농촌진흥청의 농업과학기술연구 조사분석 기준(RDA, 2003)에 의거하여 조사하였다. 이산화탄소와 메탄 발생량을 조사하기 위하여 간이 폐쇄상태 챔버법에 따라 아크릴소재로 제작된 가스포집장치인 챔버($60 \times 60 \times 120 \text{ cm}$)를 설치하였다(Shin and Kim, 1994). 가스측정은 녹비작물 환원 후부터 이앙전인 5월 23일부터 6월 4일까지는 5일 간격으로 실시하였고, 이앙 후부터 수확기인 9월 27일까지는 7일 간격으로 조사하였다. 이산화탄소 측정과 메탄 분석을 위한 가스채취는 오전 10:00~12:00사이에 30분 간격으로 2회 실시하였으며, 이산화탄소는 Multy-REA (302)를 사용하여 챔버에서 직접 측정하였다. 메탄은 60 ml 주사기로 가스시료를 채취하여 가스크로마토그래피(Aligent 502)로 분석하였으며 검출기는 FID (Flame Ionization Detector)를 사용하였다(Shin and Kim, 1994).

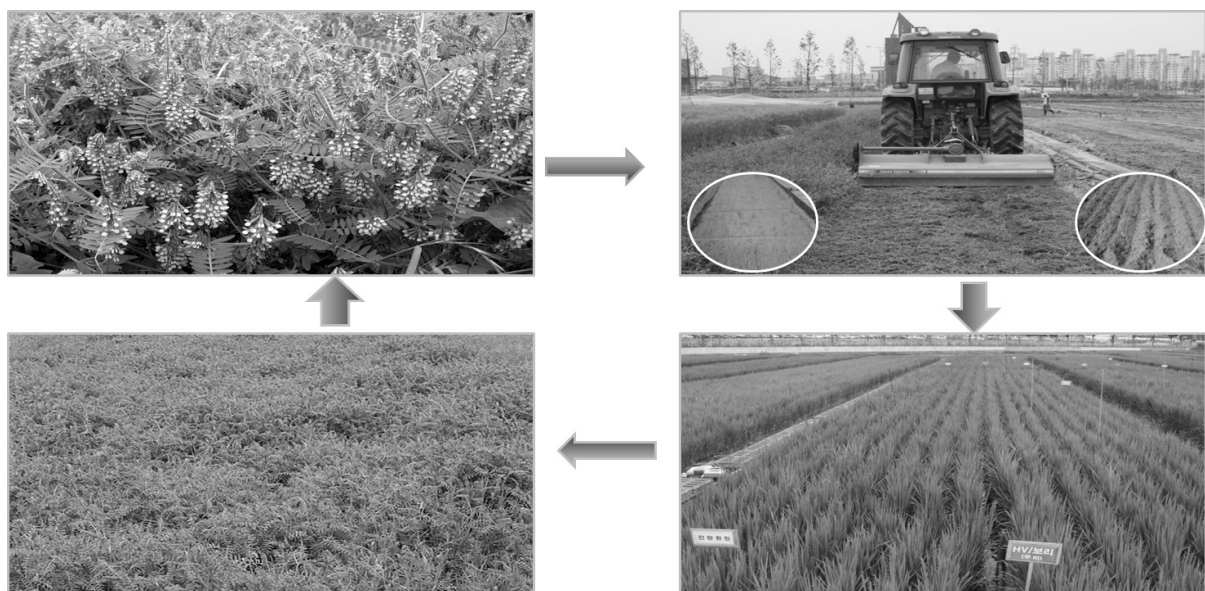


Fig. 1. Rice-green manure crop cropping process in paddy field.

이 때 대기온도, 지온, 산화환원전위와 물높이도 같이 측정하여 메탄 발생량을 계산하는데 이용하였다.

토양의 화학적 특성은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 2000)에 준하여 pH는 토양과 증류수를 1:5로 희석하여 pH meter로 측정하였고, T-C는 원소분석기(LECO CNS-2000), 치환성양이온과 인산함량은 동시침출법으로 추출하여 유도결합 플라즈마 분광분석기(ICP, Inductively Coupled Plasma Spectrometer, GBC SDS-270, AU)를 이용하여 정량하였다.

통계분석은 SAS 9.2 버전을 이용하여 작물별 수량 및 생육 등을 5% 유의수준에서 Duncan's multiple test를 수행하였다.

결과 및 고찰

시험토양은 사양토였으며 토양의 화학적 성분함량은 Table 1과 같이 pH는 5.33이고 토양탄소 함량은 6.8 g kg^{-1} , 인산은 112 mg kg^{-1} , 칼리 $0.57 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 이었다.

겨울동안 재배된 녹비작물의 수량은 Table 2와 같이 헤어리베치 $1,760 \text{ kg ha}^{-1}$ 이었고 녹비보리는 750 kg ha^{-1} 이었다. 녹비작물이 재배되는 동안 흡수한 탄소량은 헤어리베치 730 kg ha^{-1} 이었고 녹비보리는 320 kg ha^{-1} 이었다.

메탄은 토양이 혐기적인 조건에서 기온이 높고 화창한 날에 발생량이 증가한다는 보고와 같이 기상조건에 영향을 받기 때문에 벼 재배기간 동안 온도와 토양의 산화환원전위(Eh)의 변화를 Fig. 2와 같이 측정하였다(Nouchi *et al.*, 1994; Wang *et al.*, 1993). 챔버의 대기온도는 녹비작물 환원 직후에 33°C 였으며 벼 재배기간 동안에 $30\sim 40^\circ\text{C}$ 범위로 높았으며 등숙기인 이앙 후 94일부터 서서히 낮아져 30°C 미만으로 떨어졌다. 토양지온은 대기온도와 변이 패턴은 같았으나 온도는 대기온도보다 $2\sim 10^\circ\text{C}$ 가 낮았다. 대기온도와 지온에서 온도 차이가 나는 이유는 토양조건을 상시담수 상태를

유지하기 위하여 2~3일 간격으로 관개를 실시하였고 벼가 성장하면서 지표면을 덮어 그늘조건을 만들었기 때문으로 생각되며 온도차가 가장 큰 때는 식물체 생육이 가장 왕성한 이앙 후 63일로 대기온도와 약 10°C 정도 차이가 났다. Yamane & Sato (1964)는 지온이 $20\sim 40^\circ\text{C}$ (최적온도 $30\sim 40^\circ\text{C}$)일 때 메탄이 발생된다고 하였는데 벼 재배기간 동안 지온은 $20\sim 30^\circ\text{C}$ 사이로 메탄이 발생하기에는 적합하였으나 최적온도보다는 약간 낮았다.

메탄을 생성하는 요인 중 하나인 산화환원전위(Eh)는 토양이 담수조건이 되면 점차적으로 감소하게 되는데 관개가 시작된(이앙 전 4일) 후 토양은 급격히 환원상태가 되어 이앙 0일의 Eh는 -300 mV 가 되었으며 벼 재배기간 동안에는 $-300\sim -500 \text{ mV}$ 를 유지하였다. Patrick (1981)과 Wang *et al.* (1993)은 메탄 생성이 시작되기 위한 토양의 Eh는 -150 mV

Table 1. The chemical properties of soil before experiment.

Soil texture	pH	Total C g kg ⁻¹	Avail. P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	Exch. cations		
				Ca	Mg	K
	1:5			-----	cmol _c kg ⁻¹	-----
Sand Loam	5.33	6.8	112	3.26	0.62	0.57

Table 2. Carbon accumulation and green manure yield as affected by the cultivation of different green manure crops during the winter season.

Items	Hairy vetch	Barley
Dry weight (kg ha ⁻¹)	1760a [†]	750b
Carbon absorption (kg ha ⁻¹)	730a	320b

[†]a-d : Means within a column not followed by same letters are significantly different by DMRT 5%.

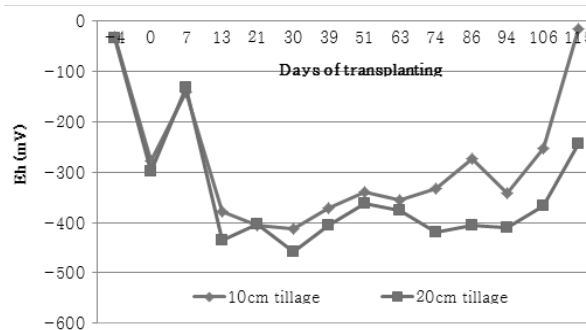
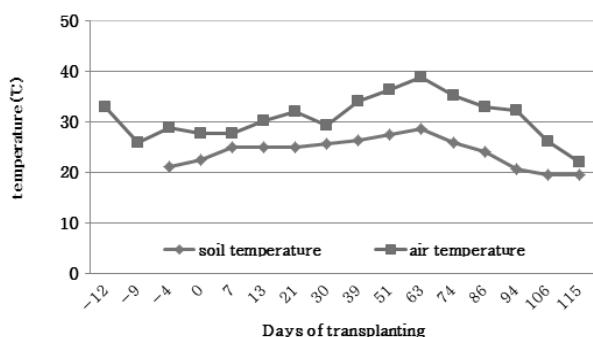


Fig. 2. The changes of temperature in soil and air(left) and soil Eh(right) during rice cultivation.

이하라고 하였는데 벼 재배기간의 Eh는 이보다 낮은 상태를 유지하여 메탄이 발생하기에 적절한 환원상태를 유지하였다. 경운 깊이별로 보면 10 cm 경운구와 20 cm 경운구 모두 관개를 시작하면서 토양은 아주 빠르게 환원상태가 되었으며 벼 재배기간 내내 환원상태를 유지하였다. 다만, 10 cm 경운구보다는 20 cm로 경운했을 때 Eh는 더 낮았으며 이는 벼 이앙 후 관개일수가 증가할수록 더 뚜렷한 차이를 보였다. 특히 관개가 중단된 이앙 후 116일에는 10 cm경운구는 빠르게 산화상태가 된 반면 20 cm 경운구는 여전히 환원상태를 보였다.

농경지에서 발생하는 온실가스에 가장 많은 비중을 차지하는 것이 메탄가스이다. 메탄 발생량은 유기물의 종류, 투입량에 따라 달라지는데 Fig. 3은 토양에 녹비작물을 환원하고 발생된 메탄량의 변화는 유기물을 환원하고 관개를 시작하기 전인 이앙 전 12일부터 이앙일까지 거의 발생되지 않았으나 이앙 후 급격히 발생되었다. 특히 화학비료구는 이앙 후 14일 이후에 발생되기 시작한 반면에 녹비작물 환원구는 이앙 후 8일부터 발생하기 시작하여 이앙 후 64일, 75일에 발생량이 가장 많았다. 이는 녹비작물 환원구나 화학비료 시용구 모두 같은 경향이였다. 유기물 시용에 따라

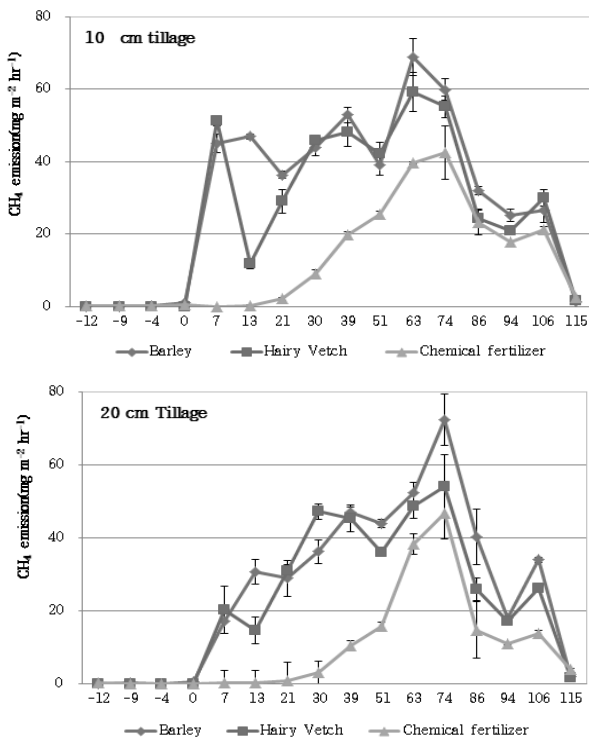


Fig. 3. The changes in CH₄ emission according to tillage depth and types of green manure crops during rice cultivation.

서는 화학비료 시용구보다 유기물을 사용한 헤어리베치, 녹비보리 환원구에서 더 많이 발생되었으며, 녹비종류별로는 화본과인 보리에서 더 많이 발생되었다. 경운 깊이별로는 10 cm경운보다 20 cm로 경운으로 메탄 발생량은 감소되었다. 특히 이앙 초기의 메탄 발생량이 10 cm경운구는 이앙 8일에 45~51 mg m⁻² hr⁻¹으로 급격히 증가된 반면 20 cm경운에서는 17~20 mg m⁻² hr⁻¹으로 10 cm경운보다 50% 이상 저감되었으며 상승폭도 서서히 발생되었다. 이러한 현상은 유기물을 투입한 헤어리베치, 녹비보리 환원구 뿐만 아니라 화학비료 시용구도 같은 경향이였다. 녹비작물을 토양에 환원할 때 20 cm로 깊이 경운함으로써 메탄 발생량이 저감되었으며 이앙 초기 발생도 서서히 진행되었다. 또한 논에서 상시담수보다는 간단관개나 중간낙수를 통하여 토양에 공기를 주입하여 일시적으로 산화상태를 만들면 메탄발생량을 80%까지 감축 시킬 수 있다고 하였는데 녹비작물 이용 시 논의 물관리를 통한 메탄발생량 저감에 대한 연구가 진행된다면 저감 효과를 더 높일 수 있을 것으로 생각되었다 (Kim *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2012; Pandey *et al.*, 2014, Rath *et al.*, 1999).

Fig. 4는 벼 재배하는 동안 측정한 총 메탄발생량을 나타낸 그림으로 녹비보리에서 메탄 발생량이 가장 많았고, 헤어리베치, 화학비료시용 순이었다. 경운 깊이별로는 모든 처리에서 10 cm경운보다는 20 cm경운으로 메탄 발생량이 저감되었다. 처리별 저감량은 화학비료구에서 22.5%로 가장 많았고, 녹비보리, 헤어리베치 환원구는 각각 11.7%, 12.4%가 저감되어 녹비환원구보다 화학비료 시용구에서 약 50% 정도 저감율이 높았다. 따라서 논토양에 유기물을 녹비작물로 활용할 때 메탄발생을 저감하기 위해서는 20 cm로 경운하는 것이 좋을 것으로 판단되었다. 이 외에도 Kim *et al.* (2014)은 간단관개를 통하여 메탄 발생량을 저감했다고 하였는데 녹비작물을 유기물원으로 활용할 경우 간단관개 방법, 관개회수, 물높이 등 메탄 발생량을 경감을 위하여 영농

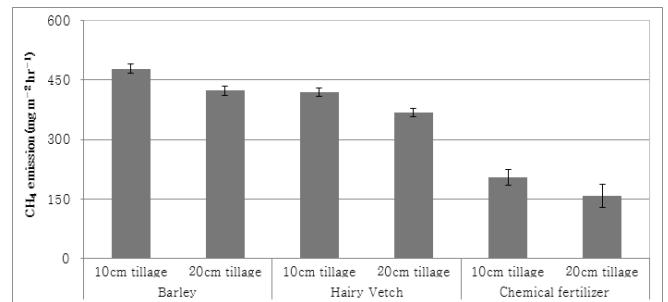


Fig. 4. The total CH₄ emission by kinds of different green manure crops and tillage depth.

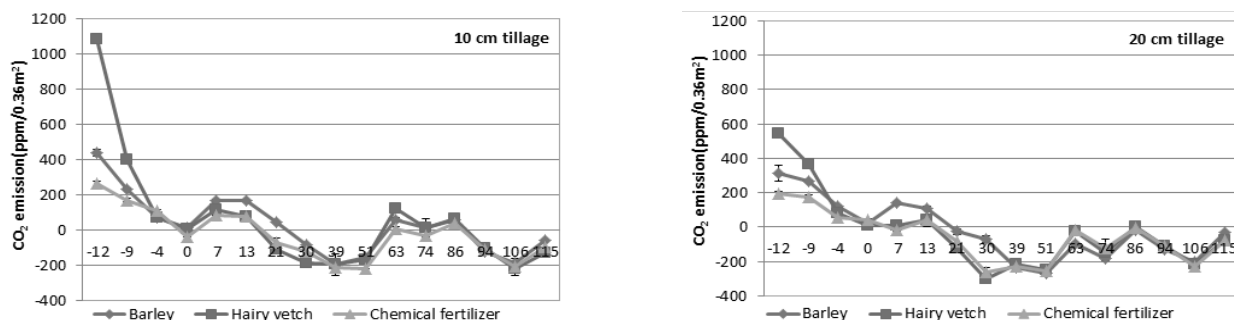


Fig. 5. The changes in CO₂ emission chamber as affected by the cultivation of different green manure crops and tillage depth.

Table 3. Yield and components of rice as affected by different treatments.

Treatments		Culm length	Panicle length	No. of panicles	No. of spikelet/	Percent	1000 grain	Rice yield
		cm	cm	per m ²	panicle	ripened grain	g	Mg ha ⁻¹
10 cm tillage	C [†]	55.3b [‡]	18.8ab	264.8b	89bc	78.1a	22.2a	4.98b
	HV	59.7ab	19.3a	318.4a	109ab	70.7b	22.2a	5.69a
	B	57.1b	19.8a	228.0c	94ab	73.0b	22.6a	4.37c
20 cm tillage	C	60.2ab	19.9a	280.8ab	89bc	78.1a	22.2a	4.98b
	HV	63.2a	20.0a	349.6a	113a	71.1b	22.1a	5.76a
	B	56.7b	19.6a	238.4c	101ab	80.6a	22.0a	4.45c

[†]C(chemical fertilizer), HV(hairy vetch), B(barley)

[‡]Means within a column not followed by same letters are significantly different by DMRT 5%.

방법에 대한 검토가 필요할 것으로 생각되었다.

논토양에서 벼 작물재배 기간에 발생하는 이산화탄소량은 Fig. 5와 같이 녹비작물 환원 직후에는 흡수량보다 배출되는 양이 많았으나 벼가 성장하는 동안에는 배출되는 양보다는 벼에 의하여 흡수되는 양이 더 많았다. 유기물 시용별로는 화학비료 시용구보다는 헤어리베치와 녹비보리 환원구에서 이산화탄소 배출이 심하였으며 헤어리베치 환원구가 녹비보리 환원구보다 배출량이 많아 메탄발생량과는 상반된 결과를 보였다(Fig. 4) 이산화탄소 배출이 가장 많았던 시기는 녹비작물 환원 직후인 이앙 전 12일이었으며 이 때 헤어리베치 환원구에서 녹비보리보다 약 2.5배 많은 1,084 ppm의 이산화탄소가 배출되었다. 경운 깊이별로는 10 cm 경운보다 20 cm 경운으로 이산화탄소 배출량도 현저히 감소되었으며, 녹비작물 환원 초기인 이앙 전 12일에 20 cm 경운구의 이산화탄소 배출량이 10 cm경운구보다 약 50% 이상 감소되어 메탄 배출과 같은 양상이었다. 10 cm, 20 cm 경운구 모두 벼가 성장함에 따라 이산화탄소 배출량은 점차 감소되어 이앙 후 24일부터는 배출되는 양보다 흡수되는 양이 더 많아졌다. 이산화탄소 배출량은 이앙 후 63일과 86

일에 일시적으로 높아졌는데 이는 기상과 관계가 많은데 일반적으로 날씨가 화창하고 기온이 높으면 벼에 의한 광합성이 활발해져 이산화탄소 흡수가 활발하게 이루어지지만 강우나 구름으로 인하여 빛이 차단되면 식물체는 광합성보다는 호흡량이 증가되어 이산화탄소를 배출하게 되는데 이 시기의 대기온도는(Fig. 3) 주변시기의 기온보다 낮았다. 벼 재배기간 동안 녹비 종류에 따른 이산화탄소 배출량은 이앙 전에는 헤어리베치 환원구에서 많았으나 이앙 초기인 이앙 일부터 이앙 후 39일까지는 녹비보리 환원구에서 더 많았다. Lim *et al.* (2012)과 Yagi *et al.* (1990)는 메탄 발생은 유기물의 C/N율이나 부숙 속도가 빠를수록 증가한다고 하였는데 이산화탄소 배출량에서도 같은 결과를 보였다.

수확기 벼 수량 및 수량구성요소는 Table 3과 같이 쌀 수량은 녹비종류에 따른 차이는 있었으나 경운 깊이에 따른 차이는 없었다. 녹비종류별로 보면 헤어리베치 환원구에서 5.69~5.76 Mg ha⁻¹로 가장 많았고 녹비보리 환원구가 4.37~4.45 Mg ha⁻¹로 가장 낮았다. 수량구성요소도 수량과 같이 경운 깊이에 따른 차이는 없었으나 녹비작물 종류에 따라서는 수량이 많았던 헤어리베치 환원구에서 경장이나 m²당

수수, 수당립수는 많았던 반면 등숙률은 낮았다. 다른 처리에 비하여 헤어리베치 환원구에서 수량이나 수량구성요소가 월등히 높았던 이유는 화분과인 녹비보리보다 두과인 헤어리베치가 질소함량(40 g kg⁻¹)이 높고 분해가 빨라 토양에 환원되면 짧은 기간에 분해되어 후작물에 양분을 공급하기 때문이었다(Song *et al.*, 2010).

요 약

농경지의 벧짚 수거량이 증가하면서 부족한 유기물을 공급하기 위하여 녹비작물을 이용하고 있다. 녹비작물은 유기물공급과 화학비료 대체가 가능한 우수한 유기물원이다. 그러나 농경지에서 분해되는 과정에 메탄을 발생시키기 때문에 메탄발생량을 줄이기 위한 노력이 요구된다. 따라서 논토양에서 녹비작물을 이용할 때 메탄발생량을 줄이기 위하여 경운깊이를 달리하여 시험하였다.

벼 생육기간 중 메탄 발생량은 이앙 후 63일, 74일에 가장 많았고 이앙 후 74일 이후부터 감소되었으며 이앙 후 106일에는 거의 발생되지 않았다. 녹비종류에 따른 메탄발생량은 보리환원구에서 가장 많았고, 그 다음은 헤어리베치, 화학비료 순이었다. 경운 깊이에 따른 메탄발생량은 10 cm경운보다 20 cm로 경운함으로써 화학비료는 22.5%, 헤어리베치 환원구는 12.4%, 보리환원구는 11.7% 감소되었다. 벼 재배기간 동안 대기온도는 30~40℃였고, 지온은 대기온도보다 약 2~10℃ 정도 낮았다. 산화환원전위(Eh)는 이앙 전 관개를 시작하면서 급격히 토양이 환원되어 (-)값을 나타냈다. 작물 재배기간 동안 산화환원전위차는 -300~-500 mV으로 낮았으며 관개가 중단된 이앙 후 106일 이후에는 다시 급격하게 증가되었다. 쌀 수량은 경운깊이에 따른 차이는 없었으나 녹비작물중에서는 헤어리베치 환원구에서 가장 많았다. 논토양에서 헤어리베치를 이용할 때 20 cm로 경운하여 메탄발생을 효과적으로 줄일 수 있었다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(ATIS 과제번호 : PJ006512, PJ010055)의 지원으로 수행된 결과입니다.

인용문헌(REFERENCES)

Ali, M. A., M. A. Sattar, M. N. Islam, and K. Inubushi. 2014. Integrated effects of organic inorganic and biological amendments on methane emission, soil quality and rice produ-

- ctivity in irrigated paddy ecosystem of Bangladesh: field study of two consecutive rice growing seasons, *Plant Soil* 378 : 239-252.
- Kim, G. Y., S. B. Lee, J. S. Lee, E. J. Choi, J. H. Ryu, W. J. Park, and J. D. Choi. 2012. Mitigation of greenhouse gases by water management of SRI(System of Rice Intensification) in rice paddy field, *Koeran J. Soil Sci.Fert.* 45(6) : 1173-1178.
- Kim, G. Y., J. Gutierrez, H. C. Jeong, J. S. Lee, M. D. M. Haque, and P. J. Kim, 2014, Effect of intermittent drainage on methane and nitrous oxide emissions under different fertilization in a temperate paddy soil during rice cultivation, *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 57(2) : 229-236.
- Kim, M. T., J. H. Ku, W. T. Jeon, K. Y. Seong, C. Y. Park, J. H. Ryu, H. S. Cho, I. S. Oh, Y. H. Lee, J. K. Lee, M. Park, and U. G. Kang. 2011. Effect of barley green manure on rice growth and yield according to tillage date in spring, Korea. *J. Crop Sci Vol.* 56(2) : 119-123 (in Korean).
- Jeon, W. T., K. Y. Seong, J. K. Lee, M. T. Kim, and H. S. Cho. 2009. Effects of seeding rate on hairy vetch (*Viciavillosa*)-Rye (*Secalecereale*) mixtures for green manure production in upland soil. *Korea J. Crop Sci. Vol.* 54(3) : 327-331 (in Korean).
- Lim, S. S., W. J. Choi, and H. Y. Kim. 2012. Fertilizer and organic inputs effects on CO₂ and CH₄ emission from a soil under changing water regimes, *Korean J. Environ. Agric.*, Vol 31(2) : 104-112.
- Neue, H. U. and R. Sass. 1994. Trace gas emissions from rice fields in: prinn R(ed). *Global atmospheric-biospheric chemistry* Plenum Press, New york. pp. 119-1483.
- NIASST. 2000. Analytical methods of soil and plant. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Nouchi, I. 1994. Mechanism of methane transport through rice plants CH₄ and N₂O, pp. 86-104.
- Pandey, A., V. T. Mai, D. Q. Vu, T. P. L. Bui, T. L. A. Mai, L. S. Jensen, and A. D. Neergaard. 2014. Organic matter and water management strategies to reduce methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in vietnam, *Agriculture, Ecosystems and environment* 196 : 137-146.
- Patrick, W. H. Jr. 1981. The role of inorganic redox systems in controlling reduction in paddy soils. In: *Proc. Symp. Paddy Soil*, Science Press, Beijing, China, Springer-Verlag:107-117.
- Pramanik, P., M. D. M. Haque, S. Y. Kim, and P. J. Kim. 2014. C and N accumulations in soil aggregates determine nitrous oxide emissions from cover crop treated rice paddy soils during fallow season, *Science of the total Environment* 490 : 622-628.
- Rath, A. K., B. Swian, B. Ramarkrishnam, D. Panda, T. K. Adhya, V. R. Rao, and N. Sethunathan. 1999. Influence of fertilizer manuregement and water regime on methane emission from rice fields, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 76 : 99-107.
- RDA (Rural Development Administration). 2003. Standard mea-

- surement and analysis in agricultural research and development, RDA, Suwon, Korea.
- Roh, K. A., H. C. Jeong, G. Y. Kim, K. H. So, K. M. Shim, D. S. Lee, and Y. H. Kim. 2010. Estimation of carbon sequestration and methane emission with organic amendment application at agricultural soil in Korea, *Korean J. Soil. Fert.*, pp. 156-157 (in Korean).
- Shin, Y. K. and K. S. Kim. 1994. Methods for measurement of methane and nitrous oxide emissions from agricultural fields, *Korea J. Environ. Agric.* Vol 13(3) : 359-372 (in Korean).
- Song, B. H., K. A. Lee, W. T. Jeon, M. T. Kim, H. S. Cho, I. S. Oh, C. G. Kim, and U. G. Kang. 2010. Effects of green manure crops of legume and gramineae on growth responses and yields in rice cultivation with respect to environment friendly agriculture. *J. Crop Sci.* 55(2) : 144-150 (in Korean).
- Wang, Z. P., R. D. Delaune, P. H. Masscheleyn, and Jr. W. H. Patrick. 1993. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil, *Soil Soc. Am. J.* 57 : 382-385.
- Yagi, K., K. Minami, and Y. Ogawa. 1990. Effects of water percolation on methane emission from paddy field, *NIAES Res. Rep. Div. Environ. Planning.* 6 : 105-122.
- Yamana, I. and K. Sato. 1964. Decomposition of glucose and gas formation in flooded soil, *Soil Sci. Plant Nutri.* 10 : 27-133.
- Yang, C. H., J. H. Ryu, T. K. Kim, S. B. Lee, J. D. Kim, N. H. Baek, W. Y. Choi, and S. J. Kim. 2009. Effect of green manure crops incorporation with rice cultivation on soil fertility improvement in paddy field. *Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 42(5) : 166-173 (in Korean).
- Yuan, Q., J. Pump, and R. Conrad. 2014. Straw application in paddy soil enhances methane production also from other carbon sources, *Biogeosciences* 11 : 237-246.