ISSN 0367-6315 (Print) / ISSN 2288-2162 (Online)
Korean J. Soil Sci. Fert. 49(5), 564-571 (2016)
http://dx.doi.org/10.7745/KJSSF.2016.49.5.564

Article

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

Hyeon-Suk Cho*, Myung-Chul Seo, Jun-Hwan Kim, Wan-gyu Sang, Pyeong Shin, and Geon Hwi Lee

National Institute of Crop Science, Wanju-Gun 55365, Korea

(Received: September 30 2016, Revised: October 27 2016, Accepted: October 28 2016)

As the amount of rice straw collected increases, green manure crops are used to provide the needed organic matter. However, as green manure crops generate methane in the process of decomposition, we tested with different tillage depths in order to reduce the emission. The atmosphere temperature of the chamber was 25~40°C during the examination of methane and soil temperature was 2~10°C lower than air temperature. The redox potential (Eh) of the soil drastically fell right before irrigated transplanting and showed -300~-400 mV during the cultivating period of rice (7~106 days after transplant). When hairy vetch was incorporated to soil and the field was not irrigated, the generation of methane did not occur from 12 to 4 days before transplanting rice and started after irrigation. Regarding the pattern of methane generation during the cultivation of rice, methane was generated 7 days after transplanting, reached the pinnacle at by 63~74 days after transplanting, rapidly decreased after 86~94 days past transplanting and stopped after 106 days past transplanting. When tested by different soil types, methane emission gradually increased in loam and clay loam during early transplant, whereas it sharply increased in sandy loam. The total amount of methane emitted was highest in sandy loam, followed by loam and clay loam. In all three soil types, methane emission significantly reduced when tillage depth was 20 cm compared to 10 cm. The rice growths and yield were not affected by tillage depth. Therefore, reduction of methane emission could be achieved when application hairy vetch to the soil with tillage depth of 20 cm in paddy soil.

Key words: Rice yield, Tillage method, Soil texture, Methane emission

*Corresponding author: Phone: +82632385282, Fax: +82632385255, E-mail: chohs@korea.kr
[§]Acknowledgement: This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ00925502)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

논의 볏짚 수거율이 점차 증가되어 남부지역은 약 80%까지 수거되어 농경지에서 사라지고 있고 이런 현상은 앞으로 계속 증가될 것으로 전망되고 있다. 논 토양에서 생산되는 볏짚을 수거하고 다른 유기물을 투입하지 않은 상태에서 화학비료에만 의존하여 경작을 한다면 농경지 지력저하는 더욱 심해져 안정적인 식량생산을 위협할 수 있는 단계까지 이르게 될 것이다. 농경지의 지력증진을 위하여 농림축산식품부는 경작지에 유기질 비료시용과 녹비작물 재배를 권장하여 왔다. 농경지의 지력 증진에 꼭 필요한 유기물은 토양 비옥도를 높여주고 작물생육을 도와주는 긍정적인 효과를 가지고 있는 반면 토양에 환원되어 분해되는 과정 중에 지구 온난화에 영향을 주는 가스가 발생되는데 그 중 논 토양에서 주로 발생되는 가스는 메탄이다. 논 토양에서 메탄가스의 발생량이 많지 않지만 메탄 1개는 이산화탄소 21개와 같기 때문에 농경지에서 메탄가스 발생량 저감은 매우 중요한 일이다 (Kim et al., 2002). 게다가 우리나라는 2030년까지 온실가스 감축목표를 BAU (business as usual) 대비 37%까지 감축하기로 결정하였다. 따라서 농업분야도 온실가스 발생량을 감축시켜야 되는데 논 토양에서 온실가스 감축 방법으로는 볏짚 제거, 간단관개, 암거배수, 건답직파, 무경운, 가을철 경운 등의 재배방법이 개발되어 있다 (Lee et al., 1997; Kim et al., 2002; Kim et al., 2012; Kim et al., 2014). 농경지에서 메탄 발생량은 유기물의 종류, 시용량, 시용방법과 토양 특성, 온도, 물 관리 등에 따라 달라진다 (Ali et al., 2014, Kim et al., 2014; Neue and Sass, 1994; Yuan et al., 2014). 즉 메탄가스 발생량은 토양에 환원된 유기물이 부숙된 퇴비보다는 신선한 유기물일 때 더 많이 발생되며, 투입된 유기물 양이 많을수록, 토양온도가 높을수록, 담수기간이 길수록 증가된다고 하였다 (Pramanik et al., 2014; Pandey et al., 2014; Roh et al., 2010; Yagi et al., 1990).

헤어리베치는 두과 녹비작물로 식물체가 살아있을 때 경운하여 활용하기 때문에 신선한 유기물에 해당된다. 헤어리베치는 가을에 파종하여 휴경기간인 겨울철에 재배되기 때문에 경지 이용율을 증대시킬 뿐만 아니라 작물이 재배되는 동안에는 대기 중의 이산화탄소를 흡수하여 일시적으로 온실가스 발생을 줄이는 역할을 한다 (Cho et al., 2015). 뿐만 아니라 식물체가 자라는 동안에는 토양 및 양분유실을 방지하고 잡초발생을 억제하며 경관을 조성하여 아름다운 농경지를 가꾸어주고 경운하여 토양에 환원되면 화학비료 대체, 토양의 물리·화학적 특성 개량 등 농경지에 다양한 효과와 기능을 수행한다 (Kim et al., 2011; Jeon et al., 2009; Lim et al., 2012; Song et al., 2010; Yang et al., 2009). 헤어리베치의 이런 기능 때문에 농경지 재배를 권장하고 있지만 한편으로는 신선한 상태로 이용되기 때문에 다른 유기물보다 메탄가스 발생량이 많아 사용을 자제해야 한다는 우려를 동시에 하고 있다.

따라서 헤어리베치를 이용하여 농경지의 지력을 증진시키고자 할 때 헤어리베치 이용과정에서 발생되는 메탄가스를 줄이기 위한 기술개발이 요구되었다. 본 시험은 유기물로 농경지에 헤어리베치를 이용할 때 메탄가스의 발생을 줄일 수 있는 방법을 모색하기 위하여 우리나라 대표적인 논토양인 사양토, 양토, 식양토의 3개 토성에서 헤어리베치-벼의 작부체계로 시험을 실시하였다. 이 때 헤어리베치를 토양에 환원할 때 경운깊이를 달리하여 경운하고 벼를 이앙하여 재배하면서 농경지의 미세기상, 메탄 발생량, CO_2 발생량, 벼 수량을 조사하였다.

Materials and Methods

작물 재배 방법 및 생육조사 본 시험은 국립식량과학원의 토성별 시험포장에서 2011년 10월부터 2012년 11월까지 수행되었으며 토양의 종류는 사양토, 양토, 식양토을 사용하였다. 작물재배는 Fig. 1과 같이 10월에 헤어리베치를 파종하여 겨울 동안 재배하고 이듬해 5월 토양에 환원하고 6월 초에 벼를 재배하는 작부체계로 수행되었다. 헤어리베치를 녹비로 이용하기 위하여 토양에 환원할 때 경운 깊이를 10 cm, 20 cm로 경운 하였다. 경운횟수는 일반 경운방법을 기준으로 2회 실시하였으며 10 cm경운은 트렉터에 일반 로타리기를 부착하여 2회 경운 하였고, 20 cm경운은 쟁기로 깊이 경운 1회+로타리기로 경운 1회를 실시하였다. 작물 별 품종은 헤어리베치는 H1, 벼는 운광벼를 사용하였다. 헤어리베치 파종량은 40 kg ha^{-1}을 사용하였고, 파종방법은 10월 16일에 세조파기로 이용하여 파종하였다. 헤어리베치 환원은 이듬해 봄인 5월 22일에 각각의 경운 방법을 이용하여 실시하였으며 이 때 녹비 환원량은 녹비생산량이 가장 많았던 식양토의 건물중을 기준으로 사양토, 양토, 식양토 모두 3,000 kg ha^{-1}를 시용하였다. 각 토성에 헤어리베치 환원량을 동일하게 투입하기 위하여 생산량이 부족한 사양토, 양토는 자체 생산량에 부족분의 헤어리베치를 추가로 투입하여 환원량을 맞추어 주었다. 벼 이앙은 헤어리베치 환원 후 12일인 6월 4일에 30 × 15 cm 간격으로 중묘를 손 이앙 하였다. 헤어리베치와 벼 재배 기간 동안 화학비료는 질소 (T-N), 인산 (P_2O_5), 칼리 (K_2O)를 모두 무시용 하였다. 물 관리는 벼 일반재배법보다는 국제표준 방법에 의거, 토양조건을 환원상태로 유지하기 위하여 이앙 4일전부터 수확기까지 상시 담수를 실시하였다. 헤어리베치 수량은 토양에 환원하기 전에 1 m^2의 식물체를 3반복으로 수확하여 50°C에서 48시간 열풍건조 후 건물중을 측정하였다. 벼 수량 및 수량구성요소는 농촌진흥청의 농업과학기술연구 조사분석 기준에 의거하여 조사하였다 (RDA, 2003).

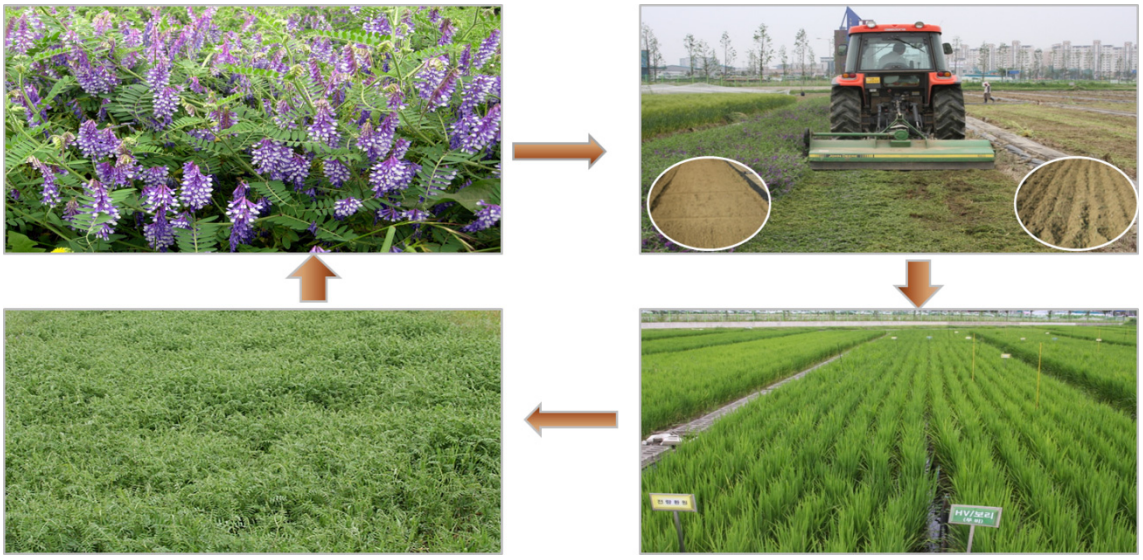

Fig. 1. The pictures of rice-hairy vetch cropping process in paddy field (cultivation of hairy vetch at flowering (top, left), tillage of hairy vetch (top, right), cultivation of rice (low, right), cultivation of hairy vetch (low, left)).

토양 및 가스 분석방법 이산화탄소와 메탄 발생량을 분석하기 위하여 간이폐쇄정태 챔버법에 따라 아크릴소재로 제작된 가스 포집장치용 챔버 (60×60×120 cm)를 설치하였다 (Shin and Kim, 1994). 메탄과 이산화탄소 측정은 헤어리베치를 환원하고 5월 22일에 바로 챔버를 설치하여 이앙 전인 6월 3일까지 5일 간격으로 측정하였고, 6월 4일에 벼를 이앙하기 위하여 챔버를 들어낸 다음 이앙이 끝난 6월 5일에 다시 설치하였다. 벼 재배기간 동안 가스 측정은 이앙 후부터 수확기인 9월 27일까지 7일 간격으로 조사하였다. 이산화탄소와 메탄 가스측정은 오전 10:00~12:00사이에 30분 간격으로 2회 실시하였으며, 첫 번째는 챔버를 열은 상태에서 가스를 채취하고 챔버를 닫은 다음 팬을 이용하여 약 25분 동안 내부 공기를 순환시켜주었고, 팬을 끄고 5분 후에 다시 가스를 채취하였다. 이산화탄소 가스측정은 Multy-REA (302)를 사용하여 챔버에서 직접 측정하였고, 메탄가스는 60 ml 실린지 (polypropylene syringe)로 시료를 채취하여 가스크로마토그래피 (Agilent 502)로 분석하였으며 검출기는 FID (Flame Ionization Detector)를 사용하였다 (Shin and Kim, 1994). 이 때 대기온도, 지온, 산화환원전위와 물 높이도 같이 측정하여 메탄 발생량을 계산하는데 이용하였다. 대기온도는 챔버 안에 온도계를 설치하여 측정하였고, 지온은 표토에서 약 5 cm 지점에서 측정하였다.

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, USA), 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 작물 별 수량 및 생육 등을 5% 유의수준에서 Duncan's multiple test를 수행하였다.

Results and Discussion

시험 전 토양의 화학적 특성 시험토양의 화학적 성분함량은 Table 1과 같이 pH는 5.3~6.3이었고, 토양 총 탄소 (T-C) 함량은 7.7~11.6 g kg^{-1}이었으며 유효인산함량은 169~101 mg kg^{-1}, 치환성칼리 0.41~0.63 $cmol_c$ kg^{-1}이었다. 시험토양의 화학성분 함량은 토성간에 차이가 많았으며 전반적인 지력은 식양토에서 가장 양호하였고 사양토와 양토의 지력은 비슷하였으나 식양토보다 낮았다. 화학성분 별로

Table 1. The chemical properties of soil before experiment.

Soil texture	pH	Total C	Avail. P_2O_5	Exch. cations		
				Ca	Mg	K
	(1:5)	g kg^{-1}	mg kg^{-1}	-------- $cmol_c$ kg^{-1} --------		
Sandy Loam	5.3	7.7	169	2.4	0.6	0.4
Loam	5.7	7.4	110	3.9	0.7	0.5
Clay loam	6.3	11.6	101	5.4	1.3	0.6

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

Items	Sandy loam	Loam	Clay loam
Dry weight (Mg ha^{-1})	10.1b	15.4a	15.7a
Carbon absorption (kg ha^{-1})	730b	920a	1,150a

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

는 유기물 함량과 치환성양이온 중 마그네슘, 칼슘함량은 약간 낮았고 유효인산 함량은 약간 높은 편이었으나 우리나라 논 토양의 권장함량에는 3개의 토성이 모두 벼를 재배할 때 정상적인 생육이 가능한 토양 조건의 범위에 속하였다 (Kang, 2014).

헤어리베치 수량 및 이산화탄소 흡수량 헤어리베치의 토성 별 녹비수량은 Table 2와 같이 사양토에서 10.1 Mg ha^{-1}가 생산되었고, 양토는 15.4 Mg kg ha^{-1}, 식양토는 15.7 Mg ha^{-1}가 생산되어 토성 중 녹비수량은 식양토에서 가장 많았다. 식양토는 식질이 많은 토양으로 토양특성상 작물재배에 좋은 토양은 아니지만 다른 토성에 비하여 헤어리베치 녹비 수량이 많았던 이유는 Table 1에서 보는 바와 같이 토양지력이 식양토에서 가장 좋았기 때문으로 사료되었다. 겨울동안 헤어리베치가 흡수한 이산화탄소량은 사양토가 730 kg ha^{-1}이었고 양토는 920 kg ha^{-1}, 식양토는 1,150 kg ha^{-1}으로 식양토에서 이산화탄소 흡수량이 가장 많았으며 이는 식물체가 흡수한 이산화탄소 양을 계산할 때 식물체의 수량에 탄소함량을 곱하여 계산하기 때문에 녹비수량이 많았던 식양토에서 가장 많았다.

논 토양의 미세기상 조건 Nouchi (1994)와 Wang et al. (1993)은 토양이 혐기적인 조건에서 메탄발생량이 발생량이 많고, 기온이 높고 화창한 날에 발생량이 증가한다고 하였다. 헤어리베치 환원 후부터 벼 수확일 까지 온도 (대기, 토양)와 산환환원전위 (Eh)를 조사한 결과는 Fig. 2와 같이 챔버 안에서 측정한 대기온도는 녹비작물 환원 직후에 33°C로 높았으나 헤어리베치 환원 후부터 벼 이앙 7일까지는 30°C미만이었으나 이앙 후 13일부터 기온이 상승하여 94일까지는 30~40°C 범위에 속하였다가 이앙 후 94일부터 다시 서서히 낮아져 30°C 미만으로 떨어졌다. 토양지온은 대기온도와 패턴은 같았으나 온도는 대기온도보다 약 2~10°C정도 낮았다. 대기온도와 지온에서 온도 차이가 나는 이유는 토양조건을 상시 담수 상태를 유지하기 위하여 2~3일 간격으로 지속적으로 관개를 실시하였고 또한 벼가 생장하면서 지표면을 덮어 그늘조건을 만들었기 때문이었다. 온도 차가 가장 큰 시기는 식물체 생육이 가장 왕성한 이앙 후 63일로 대기온도와 지온이 약 10°C의 차이를 보였다. Yamane & Sato (1964)는 지온이 20~40°C (최적온도 30~40°C)일 때 메탄이 발생된다고 하였는데 벼 재배기간 동안 지온은 20~30°C 사이로 메탄이 발생하기에는 적합하였으나 최적온도보다는 약간 낮았다.

메탄을 생성하는 요인 중 하나인 산화환원전위 (Eh)는 농경지에 관개를 하여 담수조건이 되면 토양은 환원상태가 되어 Eh는 (−)값을 띤다. 관개가 시작된 (이앙 전 4일) 후 토양은 급격히 환원상태가 되어 이앙 0일의 Eh는 −180~−300 mV가 되었으며 벼 재배기간 내내 −300~−450 mV를 유지하였다. Patrick (1981)과 Wang et al. (1993)은 토양의 Eh는 −150 mV 이하일 때 메탄가스가 발생된다고 하였는데 벼 재배기간의 Eh는 이보다 낮은 상태를 유지하여 메탄이 발생하기에 적절한 환원상태가 유지되었다. 토성 별로 보면 Eh의 변화는 3개 토성 모두 비슷한 패턴을 보였으며 관개를 시작한 이앙 전 4일의 토양 Eh 값은 양토, 식양토의 Eh 값은 +80 mV인 반면 사양토는 −15 mV를 보여 다른 토성보다 더 빠르게 환원이 진행되었다.

메탄 및 이산화탄소 배출량 Fig. 3은 벼 재배기간 동안 발생된 메탄가스를 측정한 그림으로 헤어리베치를 환원하고 관개를 시작하기 전인 이앙 후 −12일~이앙 후 −4일에

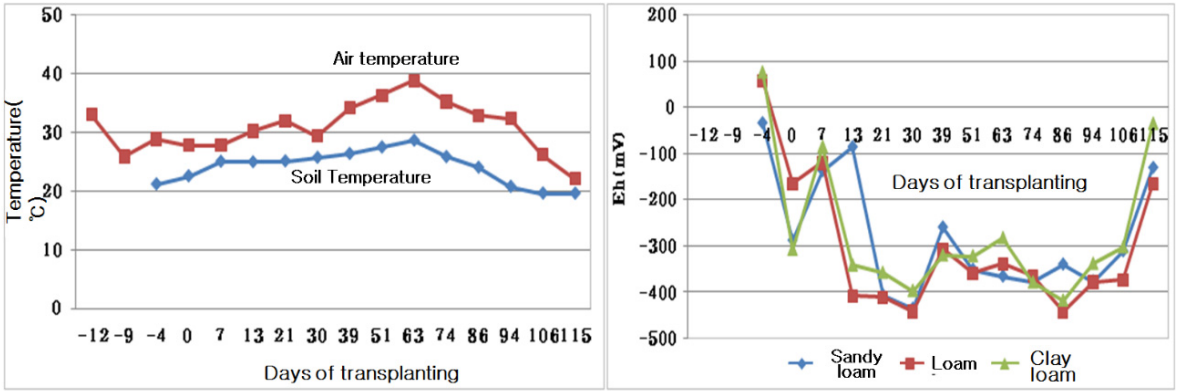

Fig. 2. The changes of temperature in soil and air(left) and soil Eh(right) during rice cultivation.

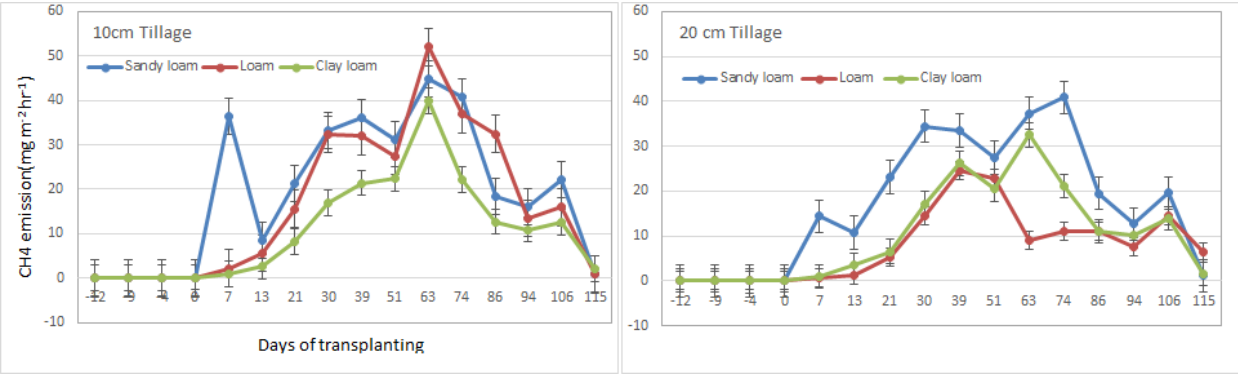

Fig. 3. The changes in CH_4 emission according to tillage depth and soil textures during rice cultivation.

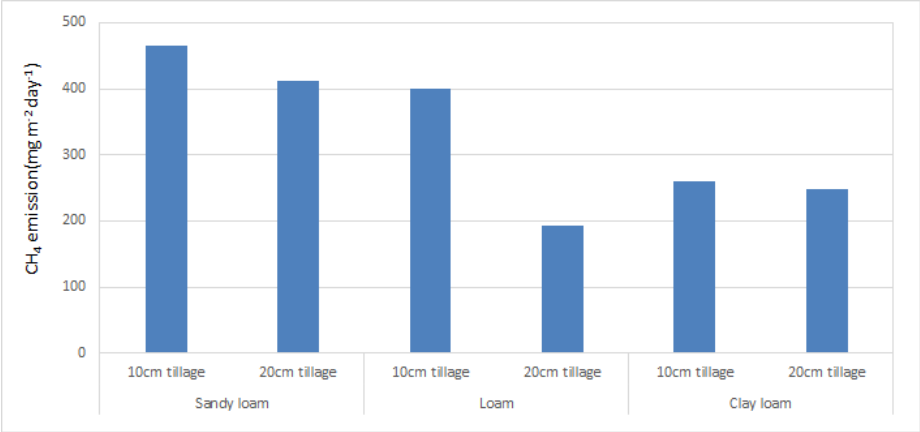

Fig. 4. The total CH_4 emission by kinds of soil texture and tillage depth during rice cultivation.

는 신선한 유기물인 헤어리베치를 환원하였음에도 불구하고 메탄가스는 거의 발생되지 않아 농경지가 산화상태일 때는 메탄가스가 발생되지 않는다는 다른 연구 결과와 같은 결과를 보였다 (Kim et al., 2014). 그러나 농경지에 관개가 시작된 이앙 후 -4일부터 Fig. 2와 같이 토양은 빠르게 환원이 되었고 이앙 후 7일부터 메탄가스는 포집 되었다. 메탄 발생량의 패턴은 이앙 후 7일부터 점차 증가되어 이앙 후 약 64~75일인 유수형성기에 발생량이 최고로 많았다가 다시 서서히 감소되었다. 이 패턴은 경운 깊이나 토성에 관련 없이 일정한 경향이었다. 그러나 메탄발생량은 경운깊이, 토성에 따라 차이를 보여 그래프의 기울기나 피크의 높이는 현저한 차이를 보였다. 토성 별로는 사양토에서 발생량이 가장 많았고 식양토에서 가장 적었으며, 경운 깊이에서는 양토에서 가장 차이가 컸고, 식양토는 차이가 없었다. 토성 별로 경운 깊이에 따른 효과는 달랐으나 3개의 토성 모두 경운 깊이를 20 cm로 깊이 경운 함으로써 메탄 발생량은 감소되었다. 특히 10 cm 경운구는 이앙 초기인 이앙 7일에 메탄 발생량이 36 mg m^{-2} hr^{-1}으로 급격히 증가된 반면 20 cm경운에서는 14 mg m^{-2} hr^{-1}으로 10 cm경운보다 60% 이상 저감되었으며 발생량도 완만하게 증가되는 현상을 보였다. Lim et al., (2012)에 의하면 유기물을 시용하면 벼 생육초기에 메탄발생량이 증가한다고 하였는데 본 시험은 사양토는 이앙 초기에 급격한 증가를 보여 Lim et al., (2012)과 같은 결과를 보였으나 양토, 식양토는 서서히 증가되어 이와 상이한 결과를 보였다. 이상의 결과를 볼 때 헤어리베치를 농경지에 환원할 때 20 cm로 깊이 경운 함으로써 이앙 초기의 메탄 발생이 서서히 진행되었으며 발생량도 저감되었다. 또한 Kim et al. (2014)에 의하면 논에서 벼를 재배하는 동안 간단관개나 중간낙수를 통하여 토양에 공기를 주입하여 일시적으로 산화상태를 만들면 메탄발생량을 80%까지 감축 시킬 수 있다고 하였는데 녹비작물 이용시 논의 물관리, 물높이 등 다른 저감기술을 병행한다면 메탄 발생량의 저감 효과를 더 높일 수 있을 것으로 생각되었다 (Shin et al., 2003; Rath et al., 1999).

벼 생육기간 동안 일일 메탄발생량은 Fig. 4와 같이 사양토에서 가장 많이 발생되었고 양토, 식양토 순으로 토양에 식질이 많이 함유되어 있을수록 메탄 발생량은 적었다. 또한 경운 깊이 별로는 3개의 토성 모두 헤어리베치를 환원할 때 20 cm로 깊이 경운 하면 메탄 발생량은 감소되었다. 토성 별 저감정도는 양토에서 약 50% 가장 많았으며 사양토는 11%, 식양토는 0.1%로 사양토와, 양토에서는 저감효과가 높았으나 식양토에서는 저감정도가 낮아 원인 구명을 위한 추가 연구가 필요하였다. 따라서 농경지에서 헤어리베치를 녹비작물로 이용할 때 경운 깊이를 20 cm로 깊이 경운해 주는 것이 좋을 것으로 판단되었다. 이 이외에도 Kim et al. (2014)은 간단

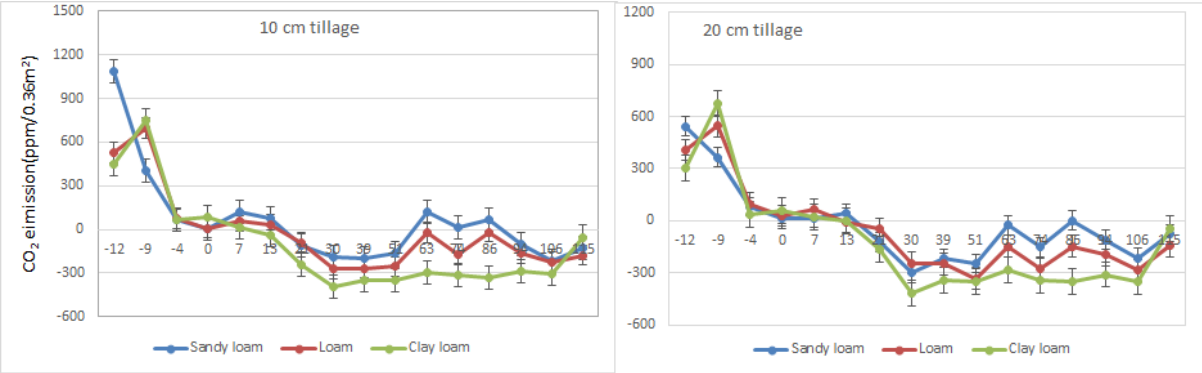

Fig. 5. The changes of CO_2 as affected by soil texture and tillage depth.

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

Treatments		Culm length	Panicle length	No. of panicles per m^2	No. of spikelet/ panicle	Percent ripened grain	1000 grain weight	Rice yield
		cm	cm				g	Mg ha^{-1}
Sandy loan	10 cm	59.7b	19.3a	318b	109a	70.7a	22.2a	5.69ab
	20 cm	63.2a	20.0a	350a	113a	71.1a	22.1a	5.76ab
Loam	10 cm	63.1a	19.0a	314b	106a	69.7a	22.3a	5.55ab
	20 cm	64.6a	19.9a	280c	106a	71.4a	22.3a	5.22ab
Clay loam	10 cm	64.6a	20.0a	326ab	107a	72.2a	22.1a	6.28a
	20 cm	63.6a	18.6a	282c	103a	72.5a	22.0a	6.13a

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

관개를 통하여 메탄 발생량을 저감했다고 하였는데 헤어리베치를 논토양에 이용할 때 간단관개 방법, 관개회수, 물높이 등 영농방법에 의한 메탄 발생량의 저감 정도를 구명하기 위한 연구가 추가된다면 더 많은 저감 효과를 얻을 수 있을 것으로 생각되었다.

논 토양에서 벼 생육기간에 발생한 이산화탄소 량은 Fig. 5와 같이 헤어리베치 환원 초기인 이앙 후 -12일에는 1,084 ppm/0.36m^2 이 배출되어 가장 많았으나 관개가 시작되고 벼가 자라면서 오히려 배출되는 양보다 벼에 의하여 흡수되는 양이 더 많았다. 토성 별 이산화탄소 배출량은 사양토에서 가장 많았고 다음은 양토, 식양토 순이었다. 헤어리베치 환원 시 20 cm로 경운함으로써 3개 토성 모두 이산화탄소 배출량은 현저히 낮아졌으며 특히 사양토에서 경운 직후인 이앙 후 -12일에 20 cm 경운구에서 이산화탄소 배출량을 약 50%정도 감소되었다. 10 cm, 20 cm 경운구 모두 벼가 생장됨에 따라 이산화탄소 배출량은 점차 감소되어 이앙 후 24일부터는 배출량보다 흡수량이 더 많아졌다. 이산화탄소 흡수량은 이앙 후 63일과 86일에 일시적으로 흡수량보다 배출량이 증가되었는데 이는 이산화탄소 발생이 기상과 밀접한 관계가 있어 날씨가 화창하고 기온이 높으면 벼에 의한 광합성이 활발해져 이산화탄소 흡수가 활발하게 이루어지지만 강우나 구름으로 인하여 빛이 차단되면 식물체는 광합성보다는 호흡량이 증가되어 이산화탄소를 배출된다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 이산화탄소 배출이 많았던 이앙 후 63일과 86일의 대기온도 (Fig. 3)는 주변시기의 기온보다 낮은 값을 보였다.

쌀 수량 및 수량구성요소 수확기의 벼 수량 및 수량구성요소는 Table 3과 같이 토양의 화학적 특성이 좋았던 식양토에서 쌀 수량이 6.13~6.28 Mg ha^{-1}로 가장 많았으며 사양토, 양토 순이었다. 경운 깊이별로는 유의성은 없었으나 양토, 식양토에서 깊이 경운을 함으로써 쌀 수량은 약간 떨어지는 경향을 보였다. 수량 감소한 요인은 양토, 식양토의 20 cm 경운구에서 수당입수가 적었기 때문이었다. 토양을 깊이 경운하면 토양의 지력이 낮아져 작물수량이 감소하는 경우가 많기 때문에 녹비작물로 질소비료 대체효과가 우수한 헤어리베치와 작부체계를 통하여 양분을 공급하였음에도 불구하고 깊이 경운으로 쌀 수량이 감소되는 걸 감안하여 반복되는 깊이 경운에 따른 쌀 수량변이를 추정하기 위한 추가 연구가 요구되었다 (Song et al., 2010).

Conclusion

농경지의 볏짚 수거량 증가로 부족한 유기물을 공급하기 위하여 헤어리베치를 이용하고 있다. 헤어리베치는 유기물 공급과 화학비료 대체가 가능한 우수한 유기물 원이지만 농경지에서 분해되는 과정에 메탄을 발생시키기 때문에 메탄

발생량을 줄이기 위한 노력 또한 요구된다. 따라서 논 토양에서 헤어리베치를 이용할 때 메탄발생량을 줄이기 위하여 경운 깊이를 달리하여 시험하였다.

헤어리베치 녹비수량은 사양토 10.1 Mg ha^{-1}, 양토 15.4 Mg ha^{-1}a 식양토 15.7 Mg ha^{-1}이 생산되었고 이를 이산화탄소량으로 환산하면 730~1,150 kg ha^{-1}이었다. 챔버 내의 대기온도는 25~40°C였으며 이앙 후 63~74일에 가장 높았고 지온은 대기온도와 패턴은 같았으나 온도는 약 5°C 이상 낮았다. 토양의 산환원전위 (Eh)는 관개를 실시한 이앙 직전에 급격히 낮아져 (−)값을 보였으며 벼 재배기간 (이앙 후 7~106일까지) 동안 −300~−400 mV를 보였으나 관개를 중단한 106일 이후에는 다시 급격히 증가되어 (+)값을 보였다. 메탄 발생량은 헤어리베치를 토양에 환원하고 관개를 시작하기 이전인 벼 이앙 후 −12~−4일에는 발생하지 않았으며 이앙 후 7일부터 발생되어 이앙 후 63~74일경에 가장 많이 발생되었고 등숙기 이후인 이앙 후 86~94일 이후부터 다시 감소되어 관개를 중단한 106일 이후에는 거의 발생되지 않았다. 토성별 발생량은 사양토에서 가장 많았고 이앙 초기에 발생량이 급격하게 증가된 반면 양토, 식양토는 발생량도 적었고 발생시기도 지연되었다. 3개의 토성 모두 경운 깊이를 20 cm로 경운 함으로써 메탄발생량은 감소되었으며 감소 정도는 양토에서 50%로 가장 많았고 식양토는 0.1%가 감소되어 깊이 경운 효과는 낮았다. 벼 수량구성요소 및 현미 수량은 20 cm로 경운으로 양토, 식양토에서 약간 떨어졌으나 유의성은 없었다. 이상의 결과로 볼 때 논 토양에서 헤어리베치를 토양에 환원할 때 경운 깊이를 20 cm로 경운하여 메탄 발생량을 줄일 수 있었다.

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 productivity in irrigated paddy ecosystem of Bangladesh: field study of two consecutive rice growing seasons, Plant Soil 378:239-252.

Cho, H.S., M.C. Seo, T.S. Park, and H.W.K. 2015. Effect of tillage depths on methane emission and rice yield in paddy soil during rice cultivation. J. Crop Sci. 60(2):167-173.

Jeon, W.T., K,Y. Seong, J.K. Lee, M.T. Kim, and H.S. Cho. 2009. Effects of seeding rate on hairy vetch(Vicia villosa)-Rye(Scale cereal) mixtures for green manure production in upland soil. Korea J. Crop Sci. 54(3):327-331.

Kang, S.S., M.S. Kim, M.S. Kong, M.J. Chae, Y.K. Sonn, C.H. Lee, Y.H. Kim, and D.B. Lee. 2014. Setting up the optimum ranges of soil chemical properties according to agricultural land use. Korean Soil Sci. Fert. fall conference proceedings: 120. http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE02492488

Kim, G.Y., S.I. Park, B.H. Song, and Y.K. Shin. 2002. Emission characteristics of methane and nitrous oxide by management of water and nutrient in a rice paddy soil. K. J. Envier. Agri. 21(2): 136-143.

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. 56(2): 119-123.

Kim, H.K., B.H. Kim, S.K. Kim, H.W. Kim, J.D. Park, K.G. Choi, and H.C. J. 2012. The evaluation of methane emitted at paddy soil applied to organic matter while rice cultivated organically. Korean Soil Sci. Fert. fall conference proceedings: 273.

Lee, K.B., D.B. Lee, and Y.W. Kim. 1997. Seasonal variation of soil entrapped methane and dissolved methane flux in a paddy soil. Korean Soc. Soil Sci. Fert. 30(1):41-45.

Lim, S.S., W.J Choi, and H.Y. Kim. 2012. Fertilizer and organic inputs effects on CO_2 and CH_4 emission from a soil under changing water regimes, Korean J. Environ. Agric. 31(2): 104-112.

Neue, H.U. and R. Sass. 1994. Trace gas emissions from rice fields in: prinn R(ed). Global atmospheric-biosphere chemistry Plenum Press, New York. 119-1483.

NIAST. 2000. Analytical methods of soil and plant. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.

Nouchi, I. 1994, Mechanism of methane transport though rice plants CH_4 and N_2O, 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 Agric. Ecosyst. Environ. 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., MD.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 management and water regime on methane emission from rice fields, Agric. Ecosyst. Environ. 76:99-107.

RDA (Rural Development Administration). 2003. Standard measurement 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 sequestion and methane emission with organic amendment application at agricultural soil in korea, Korean J. Soil. Sci. Fert. 156-157.

Shin, Y.K., and K.S. Kim. 1994. Methods for measurement of methane and nitrous oxide emissions from agricultural fields, Korea J. Environ. Agric. 13(3):359-372.

Shin, Y.K., Y.S. Lee, M.H. Koh, and K.C. Eom. 2003. Diel change od methane emission through rice plant under different water management and organic amendment. Korean J. Soil. Sci. Fert. 36(1):32-40.

Song, B.H., K.A. Lee, W.T. Ieon, 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.

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 Sci. 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.

Yuan, Q., J. Pump, and R. Conrad. 2014. Straw application in paddy soil enhances methane production also from other carbon sources, Biogeosci. 11:237-246.