한작지(Korean J. Crop Sci.), 61(4): 251~256(2016)
DOI : https://doi.org/10.7740/kjcs.2016.61.4.251

ISSN 0252-9777(Print)
ISSN 2287-8432(Online)

Original Research Article

벼 재배 시 경운 및 재배방법에 의한 메탄발생 양상

김숙진[1] · 조현숙[2] · 최종서[1] · 박기도[3] · 장정숙[1] · 강신구[1] · 박정화[1] · 김민태[1] · 강인정[1] · 양운호[1,†]

Changes in Methane Emissions from Paddy under Different Tillage and Cultivation Methods

Sukjin Kim[1], Hyun-Suk Cho[2], Jong-Seo Choi[1], Ki Do Park[3], Jeong-Sook Jang[1], Shin-gu Kang[1], Jeong-Hwa Park[1], Min-Tae Kim[1], In-Jeong Kang[1], and Woonho Yang[1,†]

ABSTRACT The increase in carbon stock and sustainability of crop production are the main challenges in agricultural fields relevant to climate change. Methane is the most important greenhouse gas emitted from paddy fields. This study was conducted to investigate the effects of tillage and cultivation methods on methane emissions in rice production in 2014 and 2015. Different combinations of tillage and cultivation were implemented, including conventional tillage-transplanting (T-T), tillage-wet hill seeding (T-W), minimum tillage-dry seeding (MT-D), and no-tillage-dry seeding (NT-D). The amount of methane emitted was the highest in T-T treatment. In MT-D and NT-D treatments, methane emissions were significantly decreased by 77%, compared with that in T-T treatment. Conversely, the soil total carbon (STC) content was higher in MT-D and NT-D plots than in tillage plots. In both years, methane emissions were highly correlated with the dry weight of rice (R^2 = 0.62~0.96), although the cumulative emissions during the rice growing period was higher in 2014 than in 2015. T-T treatment showed the highest R^2 (0.93) among the four treatments. Rice grain yields did not significantly differ with the tillage and cultivation methods used. These results suggest that NT-D practice in rice production could reduce the methane emissions and increase the STC content without loss in grain yield.

Keywords : methane, no-tillage, paddy, rice

메탄(CH_4)은 기후변화의 주요 원인이 되는 온실가스의 하나로 이산화탄소 다음으로 지구온난화에 많은 영향을 미치고 있다(IPCC, 2014). 농경지에서 발생되는 온실가스는 메탄과 아산화질소가 대표적이며, 혐기 조건의 논에서는 메탄, 호기조건의 밭에서는 아산화질소가 주로 발생된다. 논에서 발생되는 메탄은 인간의 활동으로 인해 발생되는 총 메탄 발생량의 11%로 보고되었다(IPCC, 2014). 국가온실가스인벤토리 보고서(2015)에 의하면 2013년 우리나라 총 메탄 배출량 중 농업분야에서 발생된 비중은 48.4%, 벼 재배로 인해 발생량은 약 27%에 달하는 것으로 보고되었다. 논에서 발생되는 메탄은 혐기조건에서 메탄 생성균에 의한 유기물 분해에 의하여 발생되며 토양의 온도, 산화환원전위(Eh), 토양의 물리적 특성, 담수기간 및 품종 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Ju *et al*., 2013; Minami, 1994). 논에서 발생되는 메탄 저감을 위한 중간낙수·간단관개 등의 물 관리 방법, 유기물 환원 및 무기질 비료시용에 의한 메탄 발생양상, 무경운에 의한 메탄 발생량 저감효과, 관련 유전자의 변형 등 다양한 분양의 연구가 진행되어 왔다(Ahn *et al*., 2014; Bayer *et al*., 2012; Bayer *et al*., 2014; Ju *et al*., 2013; Metay *et al*., 2007; Su *et al*., 2015; Zhang *et al*., 2016).

무경운 벼 재배는 1980년대 말부터 농업노동력 대체 및

[1)]재배환경과, 국립식량과학원, 경기도 수원시 권선구 수인로 126 (Crop cultivation & Environment Research Division, National Institute of Crop Science, RDA. Suwon 16430, Korea)
[2)]작물재배생리과, 국립식량과학원, 전북 완주군 이서면 혁신로 181 (Crop production& Physiology Research Division, NICS, RDA. Wanju 55365, Korea)
[3)]기초기반과, 국립식량과학원, 전북 완주군 이서면 혁신로 181 (Crop foundation Research Division, NICS, RDA. Wanju 55365, Korea)

[†]Corresponding author: Woonho Yang; (Phone) +82-31-695-4136; (E-mail) whyang@korea.kr
<Received 14 November, 2016; Revised 22 November, 2016; Accepted 24 November, 2016>

ⓒ 본 학회지의 저작권은 한국작물학회지에 있으며, 이의 무단전재나 복제를 금합니다.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

생력화의 일환으로 관련연구가 시작되었으며(Kim *et al*., 1991), 이후 무경운 재배시 토양의 물리적 특성의 개선, 화학적 특성의 변화, 잡초발생량의 변화, 벼 생육 및 미질의 변화, 이산화탄소 휘산방지, 탄소격리 및 화석연료 사용감소를 통한 온실가스 저감 등의 효과에 관한 연구결과가 보고되었다(Chung *et al*., 2000; Hong *et al*., 2003; Ko *et al*., 2002; Lee *et al*., 2007). 특히 벼 재배 시 무경운에 의한 온실가스 저감 효과, 품종 별 메탄 발생량, 2모작 및 단작 시 메탄 발생량, 볏짚 등 유기물 시용 후 메탄 발생량 변화 등 다양한 방면에서 이루어졌다(Ko *et al*., 2002).

본 연구는 벼 재배시 메탄의 발생량을 감소시키고 노동력을 절감할 수 있는 무경운 재배를 위해 새로 개발된 무경운 골조성기(무경운용 원형로터리날, 출원번호 10-2014-0137822)를 이용하여 무경운 벼 재배시 메탄 발생량 변화를 구명하고 이에 따른 작물의 수량 및 토양 탄소함량 변화를 알아보기 위하여 수행되었다.

재료 및 방법

작물 재배 및 관리

본 연구는 수원에 위치한 국립식량과학원 답작시험포장에서 2014년부터 2015년까지 2년간 진행되었다. 처리내용은 경운방법과 벼 재배양식을 조합하여 관행재배인 경운 + 이앙(Tillage-transplanting; T-T) 및 경운 + 무논점파(tillage - wet hill seeding: T-W), 그리고 최소경운 + 건답직파(minimum tillage + dry seeding: MT-D)와 무경운 + 건답직파(no tillage + dry seeding: NT-D)의 4 처리구를 두었다.

경운-이앙 처리구는 로터리를 이용하여 경운 후 5월 말~6월초에 중묘(남평벼)를 기계이앙 하였으며 경운-무논점파 처리구는 경운-이앙과 같은 방법으로 경운하여 논을 굳힌 후 5월 중순에 파종량 4 kg/10a 수준으로 무논점파기를 이용하여 파종하였다. 경운-이앙과 경운-무논점파의 시비량은 질소-인산-가리를 각각 9-4.5-5.7 kg/10a 으로 하였으며, 농촌진흥청 표준재배법에 준하여 시비하였다. 최소경운과 무경운 건답직파 처리구는 질소 시비량을 11 kg/10a으로 하였으며 다른 처리는 경운-무논점파와 같이 하였다(NICS, 2010). 시험 전 토양의 화학적 특성은 Table 1과 같았으며, 총탄소 및 질소함량은 경운-이앙 처리구에서 가장 낮았고 경운-무논점파와 최소경운 및 무경운-건답직파 처리구에서는 유의적인 차이를 나타내지 않았다(Table 1).

최소경운 건답직파 처리구는 최소경운 파종기를 이용하여 논 표면에서 약 4 cm 깊이로 경운하여 조파하였고, 무경운 건답직파 처리구는 무경운 골조성기(무경운용 원형로터리날, 출원번호 10-2014-0137822)를 이용하여 토양표면을 4 cm 내외의 깊이로 눌러 생기는 골 안에 조파하였다. 최소경운 건답직파 파종기의 경우 토양 표면이 약 19% 정도 교란되었으며 무경운 골조성기는 경운을 하지 않고 디스크 날이 약 4 cm 깊이로 토양표면을 가르게 하여 위로

Table1. Chemical properties of experimental soil before treatment.

	pH (1:5)	T-C (g kg^{-1})	Avail. P_2O_5 (mg kg^{-1})	Ex. cations(cmolc kg^{-1})			Avail. SiO_2 (mg kg^{-1})
				K	Ca	Mg	
Experimental soil	6.3	2.03	97.8	0.19	7.8	1.6	118
Optimal range	5.5 ~6.5	25~30	80~120	0.25~0.30	5.0~6.0	1.5~2.0	157~180

(A) Minimum tillage rotary blades (B) No-tillage disc blades

Fig. 1. Rotary blades used in the experiment.

종자가 파종되는 형태로 토양 교란 면적은 약 13% 였다 (Fig. 1).

온실가스 발생량 조사를 위해 경운이앙 처리구는 이앙 전 로터리 후부터 담수상태를 유지하였으며 경운무논점파 처리구는 입모 후 담수를 시작하였다. 최소경운과 무경운 건답직파 처리구는 건답상태에서 파종기를 이용하여 조파하였으며 입모 후 담수하였다.

벼 재배시 경운이앙 처리구의 물관리 및 재배관리는 농촌진흥청 벼 표준재배법을 따랐으며 경운무논점파, 최소경운, 무경운 건답직파 처리구의 재배관리는 농촌진흥청의 직파재배 기본법(RDA, 2013)을 따랐다.

메탄 발생량조사 분석

처리별 메탄 발생량을 분석하기 위한 시료는 아크릴 챔버(W × D × H = 60 × 60 × 120 cm)를 제작하여 각 처리구에 설치한 후 오픈챔버법으로 포집하였다. 온실가스 시료채취는 일 평균기온과 유사한 시점인 오전 10시에 60 ml 주사기를 챔버 내부로 이어진 튜브에 연결하여 1차 포집을 하였고, 즉시 30분간 챔버의 뚜껑을 닫은 후 1차와 동일한 방법으로 2차 포집을 하였다. 메탄의 정량은 기체 크로마토그래프 시스템(Agilent 7890B, USA, FID)을 이용하였다. 일일 온실가스 발생량은 '기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)'의 방법을 따라 30분간 측정된 온실가스의 양을 일 발생량으로 계산하여 사용하였다. 메탄 발생량 계산에 필요한 미세기상의 변화는 온실가스 시료 채취 시 챔버 내부의 온도, 시료 채취시의 수온, 지온, 토양 pH 및 Eh 등 미세기상을 측정하였고, 동시에 탄소와 질소함량 변화를 분석하기 위해 토양과 식물체 시료를 채취하였다. 챔버 내 온도는 챔버 안쪽에 수은온도계를 붙여 1차 및 2차 온실가스 포집 시 온도를 기록하였고, 수온과 지온, pH 및 Eh는 Cyberscan PCD650 (Eutech, PC650)와 Multimeter mit robuster (Eijkelkamp, 18.52.01)를 이용해 측정하였다.

식물체 및 토양 분석

작물의 생육과 메탄 발생량의 관계를 알아보기 위한 식물체 시료는 메탄 측정 시료 채취 시 처리별로 3포기(경운이앙과 무논점파 처리구) 또는 20 × 20 cm (줄뿌림 된 최소경운 및 무경운 건답직파 처리구)에서 3반복으로 채취하였다. 식물체 시료는 채취 즉시 뿌리의 흙을 씻어낸 후 70°C에서 3일간 건조하여 무게를 측정하고 단위면적당 건물중을 계산하였다. 토양시료는 표토의 부산물을 걷어낸 후 15 cm 깊이로 각 처리구 당 3반복으로 채취하였고, 이를 풍건한 후 2 mm 체로 거른 뒤 분석에 이용하였다. 토양 및 식물체의 탄소함량은 각 시료를 건조한 후 분쇄하여 입경 0.5 mm 이하(35 mesh, No.35)의 체로 걸러준 후 원소분석기 (Vario max CN, Germany)를 이용하여 측정하였다.

통계분석

각 분석결과의 통계는 R 프로그램 3.2.1 버전(R Development Core Team, 2015)을 이용하여 ANOVA 분석 후 최소유의차(LSD) 방법으로 평균간 유의성($p<0.05$)을 검정하였다.

결과 및 고찰

경운 및 재배양식별 메탄 발생량

벼 재배 시 경운 및 파종에 의한 온실가스 발생량 차이를 구명하기 위해 2년간 메탄가스의 발생량을 측정한 결과 메탄의 발생량은 경운을 한 경운이앙 처리구와 경운무논점파 처리구에서 높았으며 최소경운 건답직파와 무경운 건답직파 처리구에서 낮게 나타났다(Fig. 2). 벼 재배기간 중 경운이앙 처리구의 메탄 총 발생량을 100으로 했을 때 최소경운건답직파와 무경운 처리구는 약 23% 수준으로 나타났으며 두 처리구의 메탄 발생량은 5% 유의수준에서 유의성이 없었다. 측정일 별 각 처리구의 메탄 발생량은 Fig. 3과 같이 경운이앙 처리구에서 다른 처리구보다 빠르게 증가되었으며 최소경운건답직파와 무경운 처리구에서 완만한 변화를 나타내었다. 이는 새로 개발된 무경운 골조성기를 이용해 벼 재배시 경운 대비 무경운에서 메탄 발생량이 감소되었으며 이는 기존의 연구결과와 같았다(Bayer *et al*., 2014; Ko *et al*., 2002; Li *et al*., 2011; Zhang *et al*., 2015). 무경운 재배에 의한 메탄 발생량의 감소는 적게는 약 30%가 감

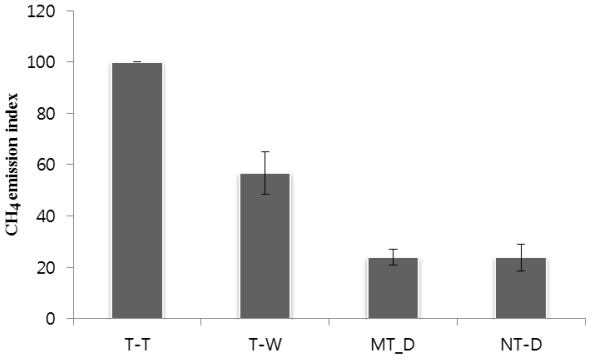

Fig. 2. Methane emissions affected by different tillage and cultivation methods. Data represent mean values of two years, and error bars indicate standard deviation of three replications. T-T: tillage-transplanting, T-W: tillage-wet hill seeding, MT-D: minimum tillage-dry seeding, and NT-D: no tillage-dry seeding

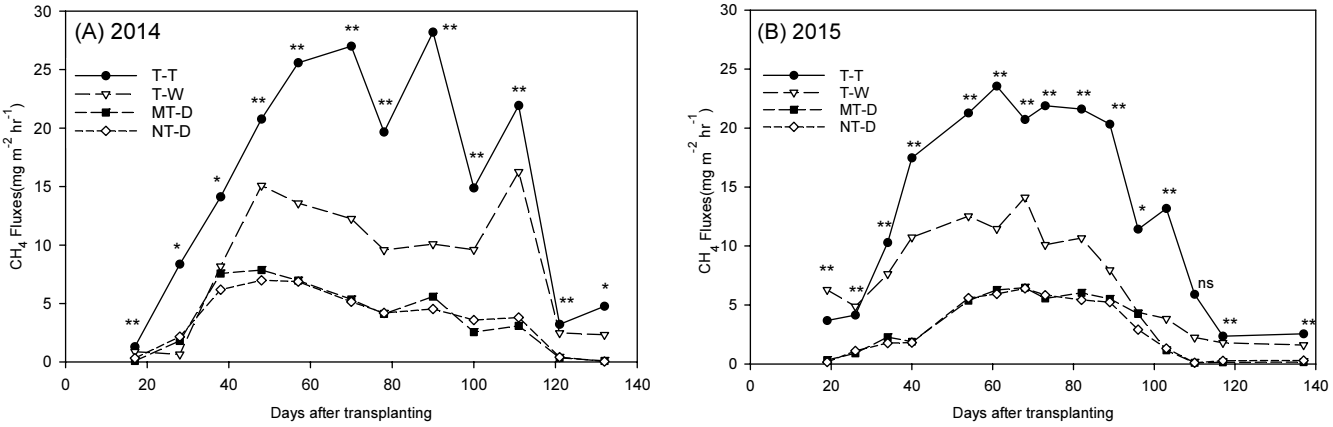

Fig. 3. Daily methane emissions affected by different tillage and cultivation methods. ns means not significant, * and ** denote significance at the P<0.05 and P<0.01 levels, respectively. T-T: tillage-transplanting, T-W: tillage-wet hill seeding, MT-D: minimum tillage-dry seeding, and NT-D: no tillage-dry seeding.

소되었으며(Bayer *et al.,* 2014; Ko *et al*., 2002), 경우에 따라 50% 이상 감소된다는 연구결과도 발표되었다(Metay *et al*., 2007; Li *et al*., 2011). Zhang *et al.* (2016)은 무경운 벼 재배 대비 관행경운 재배 시 메탄 발생량이 1.4배가 증가되었다고 하였다. 무경운 재배시 표토의 토양 입자 응집에 의해 메탄의 이동에 영향을 주는 것으로 설명하였다. 또한 Li *et al*. (2011)은 무경운 재배시 용존유기탄소의 함량이 감소되고 메탄 발생량이 50% 이상 저감되었다고 하였다. 무경운 논토양에서 용존유기탄소의 함량과 용적밀도의 변화는 메탄 발생량에 영향을 미치는 요인으로 판단된다. 한편으로 Bayer *et al*. (2014)에 따르면 무경운 재배 연수가 경과함에 따라 경운대비 메탄 발생량의 차이가 점차 줄어든다는 연구결과도 발표된 바 있다. 이는 무경운 벼 재배시 지역, 기후, 토양특성 및 재배방법이 메탄 발생량 감소 정도에 영향을 미치는 이유로 생각된다.

식물체의 생장과 메탄 발생량

논에서 발생되는 메탄은 벼의 통기조직을 통해 대기로 방출되며 이는 담수상태에서 벼 재배시 발생되는 메탄의 90% 정도를 차지한다(NAAS, 2013). 4개 처리구에서 2년간 이앙 후 벼 건물중과 메탄 발생량의 변화를 살펴본 결과 Fig. 4와 같이 건물중이 증가하면서 메탄 발생량이 증가되는 경향을 보였으며, 결정계수(R^2)는 0.81로 나타났다. 각 처리구별 건물중의 증가와 메탄 발생량 사이의 결정계수(R^2)는 0.62~0.96 이었으며 경운이앙 처리구에서 0.96(1년차), 0.91(2년차)로 가장 높은 값을 보였다. 결정계수는 생육 초기보다 최고분얼기와 출수기에 이를 때까지 증가되는 경향을 보였으나 출수기가 지나면서 감소되었다. 이는 벼

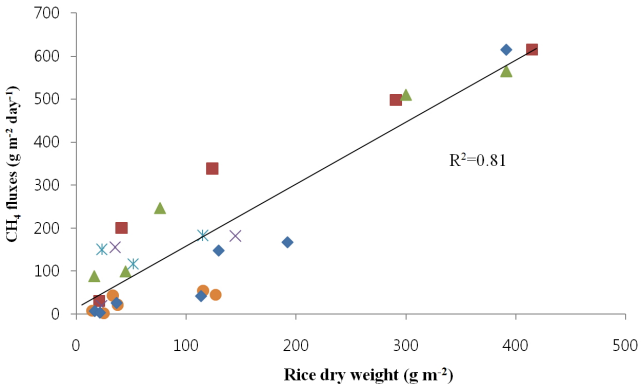

Fig. 4. Relationship between dry weight of rice and methane emission from the paddy fields. Data were pooled across different tillage and cultivation methods.

가 생장함에 따라 통기조직이 발달되면서 메탄 발생량이 증가된 결과로 생각된다.

토양 탄소함량

메탄 발생량 변화에 의해 감소되는 토양 탄소함량의 변화를 보기 위하여 메탄시료 채취와 동시에 토양시료를 채취하여 총 탄소함량을 분석한 결과는 Fig. 5와 같았다. 시험 첫해의 토양 총 탄소함량은 생육후기로 갈수록 경운이앙 처리구에서 감소하는 경향을 보였으며 무경운과 최소경운건답직파 처리구에서 높게 나타났다. 토양의 탄소함량이 높아지면 메탄 발생량은 증가하는 것으로 알려져 있다(Minamikawa *et al*., 2005). 토양 중 메탄의 발생은 메탄이 만들어지고 산화 및 방출의 복잡한 과정을 거치게 되며 생성된 메탄은 경운을 통해 토양 표면이 교란되었을 때 대기

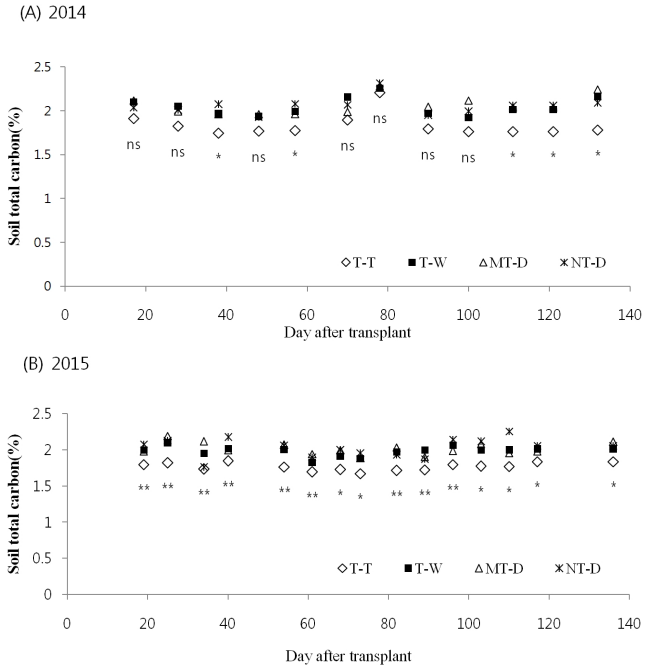

Fig. 5. Changes in soil total carbon contents affected by different tillage and cultivation. ns means not significant, * and ** denote significance at the P <0.05 and P <0.01 levels, respectively. T-T: tillage-transplanting, T-W: tillage-wet hill seeding, MT-D: minimum tillage-dry seeding, and NT-D: no tillage-dry seeding.

로 방출된다고 하였다(Ball *et al*., 1999). Zhang *et al.* (2016)은 무경운 벼 재배시 토양 용액 중 용존 유기탄소(dissolve organic carbon, DOC)의 함량이 증가되고 이로 인해 메탄의 발생량이 감소된다고 하였다.

본 연구에서 토양 탄소함량이 무경운과 최소경운건답직파 처리구에서 높게 나타나고 있으나(Fig. 5) 경운을 한 경운이앙과 경운무논점파 처리구에서 메탄 발생량이 많은 것은 무경운에 의한 효과로 판단된다. 이는 토양 내 탄소함량이 많아도 경운을 하지 않고 벼 재배시 메탄 발생량을 경감시킬 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 보다 정확한 메탄 발생량의 변화 구명을 위해서는 토양유기탄소, 용존탄소 및 총 탄소함량의 분석이 이루어져야 할 것으로 여겨진다.

경운 및 재배방법별 쌀수량

Bayer *et al.* (2014)와 Zhang *et al.* (2016) 등은 메탄의 발생량이 쌀 수량에 영향을 미치지 않은 것으로 보고하였다. Huang *et al.* (2015)는 무경운 벼 재배 시 이삭수는 감소하나 영화수와 등숙률의 증가로 수량이 보상되며 재배적 관리에 의해 달라질 수 있다고 하였다. 본 연구에서도 2년간 각 처리간 쌀수량을 비교한 결과 통계적으로 유의한 차

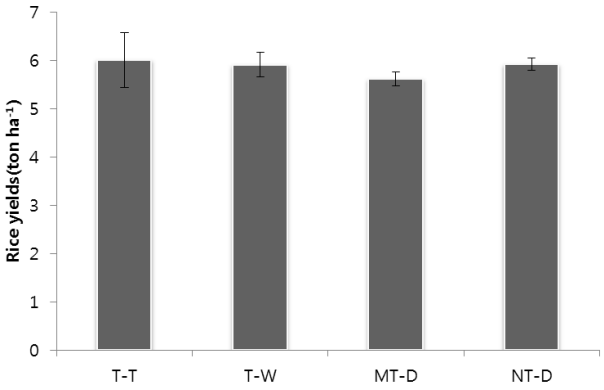

Fig. 6. Rice grain yields under different tillage and cultivation methods. Data are the means of two years and error bars indicate standard deviation. T-T: tillage-transplanting, T-W: tillage-wet hill seeding, MT-D: minimum tillage-dry seeding, and NT-D: no tillage-dry seeding.

이가 없는 것으로 나타났다(Fig. 6). 이러한 연구결과는 경운 및 재배방법에 의한 메탄 발생량의 차이와 토양탄소함량의 변화가 쌀 생산량에 절대적 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

적 요

벼 재배시 경운과 재배방법 따른 메탄 발생량 및 토양탄소함량변화를 구명하기위해 경운-이앙, 경운-무논점파, 최소경운-건답직파 및 무경운-건답직파를 비교하는 시험을 수행한 결과 다음과 같다.

1. 메탄 발생량은 경운-이앙 처리구에서 가장 많았으며 경운-무논점파>최소경운-건답직파=무경운 건답직파 순으로 적었다.
2. 메탄의 발생량과 벼 생육과의 관계를 보면 생육초기 작물의 생체량이 많아질수록 메탄 발생량이 증가는 경향을 보였다.
3. 토양 탄소함량은 시험전과 비교하여 경운-이앙 처리구에서 가장 낮은 값을 나타내었고, 최소경운-건답직파와 무경운 처리구에서 높은 값을 나타내었다.
4. 최소경운-건답직파 및 무경운 처리구의 쌀수량이 경운-이앙 처리구에 비해 다소 적었으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ01005503,

세부과제명: 벼 무경운 직파재배 시 탄소축적 및 온실가스 저감효과 구명)의 지원에 의하여 수행되었음.

인용문헌(REFERENCES)

Ahn, J. H., M.Y. Choi, B. Y. Kim, J. S. Lee, J. Song, G. Y. Kim, and H. Y. Weon. 2014. Effects of Water-Saving Irrigation on emissions of greenhouse gases and prokaryotic Communities in rice paddy soil. Microb Ecol. 68: 271-283.

Ball, B. C., A. Scott, and J. P. Parker. 1999. Field N_2O, CO_2, and CH_4 fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in scotland. Soil Till Res 53(1): 29-39.

Bayer, C., F. D. Costa, G. M. Pedroso, T. Zschornack, E. S. Camargo, M. A. de Lima, R. T. S. Frigheto, J. Gomes, E. Marcolin, and V. R. M. Macedo. 2014. Yield-scaled greenhouse gas emissions from flood irrigated rice under long-term conventional tillage and no-till systems in a humid subtropical climate. Field Crops Res. 162 : 60-69.

Bayer, C., J. Gomes, F. C. B. Vieira, J. A. Zanatta, M. D. Piccolo, and J. Dieckow. 2012. Methane emission from soil under long-term no-till cropping systems. Soil Till Res 124 : 1-7.

Chung, N. J., Y. H. Yoon, C. K. Kim, and Y. S. Kang. 2000. Weedy rice control by no-tillage direct seeding on flooded paddy field. Korea. J. Crop. Science. 45 : 194-194.

Hong, K. P., Y. G. Kim, W. K. Joung, G. M. Shon, G. W. Song, Y. J. Choi, and Z. R. Choe. 2003. Changes in physicochemical properties of soil, yield and milling quality of rice grown under the long-term no-till paddy field covered with Chinese milk vetch. Korean J. Soil Sci. Fert., 48 : 178-190.

Huang, M., X. F. Zhou, F. B. Cao, B. Xia, and Y. B. Zou. 2015. No-tillage effect on rice yield in china : A meta-analysis. Field Crops Res. 183 : 126-137.

IPCC. 2014. Edenhofer O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K., Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlomer, C. von Stechow, T. Zwickel, and J.C. Minx (eds.). Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Ju, O., J. H. Lee, B. R. Choi, T. J. Won, K. R. Cho, J. S. Seo, Y. S. Kim, and I. T. Park. 2013. Effects of PAA (Polyaspartic Acid) Contained Complex Fertilizer on Rice Growth and CH_4 emission from Rice Cultivation. Journal of Environmental Impact Assessment. 22(6) : 705-711.

KNIR, 2015. 2015 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.

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. Korean J. Soil Sci. Fert., 35 : 216-222.

Lee, B. J., Z. R. Choi, S. H. Oh, J. H. Kim, S. Y. Kim, and J. W. Ahn. 2007. Characteristics of growth of Korea native rice cultivas under the no-till rice-vetch cropping system. Korean J. Intl. Agri., 19 : 179-284.

Li, C. F., Z. S. Zhang, L. J. Guo, M. L. Cai, and C. G. Cao. 2013. Emissions of CH_4 and CO_2 from double rice cropping systems under varying tillage and seeding methods. Atmos. Environ. 80 : 438-444.

Li, D. M., M. Q. Liu, Y. H. Cheng, D. Wang, J. T. Qin, J. G. Jiao, H. X. Li, and F. Hu. 2011. Methane emissions from double-rice cropping system under conventional and no tillage in southeast china. Soil Till Res 113(2) : 77-81.

Metay, A., R. Oliver, E. Scopel, J. M. Douzet, J. A. Alves Moreira, F. Maraux, B. J. Feigl, and C. Feller. 2007. N_2O and CH_4 emissions from soils under conventional and no-till management practices in goiania (cerrados, brazil). Geoderma 141(1-2) : 78-88.

Minami. K. 1994. Methane from rice production. Fertilizer Research 37 : 167-179.

Minamikawa, K., N. Sakai, and H. Hayashi. 2005. The effects of ammonium sulfate application on methane emission and soil carbon content of a paddy field in japan. Agr Ecosyst Environ 107(4) : 371-379.

NAAS. 2013. Cultivation Methods to Reduce Greenhous gases. National Academy Agriculture Science. Jeonju, Korea.

NICS. 2010. Core technology for direct rice cultivation. National Institute Crop Science. Milyang, Korea.

RDA. 2013. General publications of Agricultural Technology; Direct seeding, RDA. 2013.

RDA. 2015. Nongsaro : Agricultural Technology Information. http : //www.nongsaro.go.kr.

Su. J., C. Hu, X. Yan, Y. Jin, Z. Chen, Q. Guan, Y. Wang1, D. Zhong, C. Jansson, F.Wang, A. Schnu¨rer, and C. Sun. 2015. Expression of barley SUSIBA2 transcription factor yields high-starch low-methane rice. Nature. 523 : 602-620.

Zhang, Z., C. Cao, L. Gau, and C. Li. 2016. Emissions of CH_4 and CO_2 from paddy fields as affected by tillage practices and crop residues in central China. Paddy and Water Environment 14(1) : 85-92.