

Effects of Tillage and Cultivation Methods on Carbon Accumulation and Formation of Water-stable Aggregates at Different Soil Layer in Rice Paddy

Sukjin Kim, Jong-Seo Choi, Shingu Kang, Jeong-Hwa Park, Sunha Hong, Tae-su Kim¹, and Woonho Yang*

Crop Cultivation & Environment Research Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Suwon, 16430, Korea

¹Daejung-golf Engineering CO., LTD. Yongin, 17124, Korea

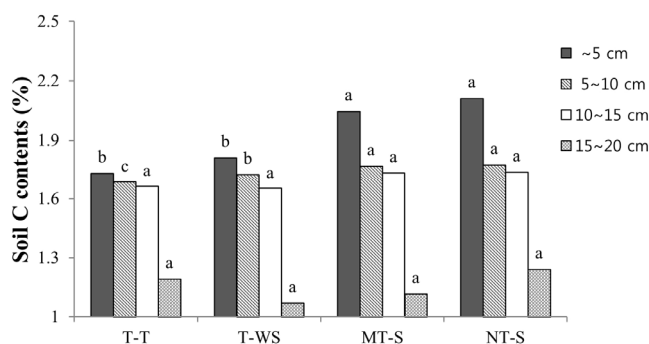
*Corresponding author: whyang@korea.kr

ABSTRACT

Received: November 7, 2017
Revised: November 17, 2017
Accepted: November 17, 2017

No-tillage is an effective practice to save labor input and reduce methane emission from the paddy. Effects of tillage and cultivation methods on carbon accumulation and soil properties were investigated in the treatments of tillage-transplanting (T-T), tillage-wet hill seeding (T-WS), minimum tillage-dry seeding (MT-S) and no-tillage dry seeding (NT-S) of rice. Soil carbon was higher in NT-S and MT-S, compared to T-T and T-WS. In NT-S and MT-S, soil carbon contents were the highest in the top soil (5 cm depth) and decreased with soil depth. In T-T and T-WS, however soil carbon contents showed no significant difference up to soil depth of 15 cm from the top. Carbon content was the highest in the soil particle size under 106 μm and decreased as the soil particle size increased. Contents of water-stable aggregates in NT-S and MT-S were higher than those of T-T and T-WS. In NT-S and MT-S, contents of water-stable aggregates were the highest in the top soil and significantly decreased with soil depth while no significant difference up to the soil depth of 15 cm in T-T and T-WS. Available SiO_2 contents in the top soil were the highest in NT-S and MT-S while the lowest in T-T and T-WS. It is concluded that minimum or no disturbance of soil in rice cultivation can increase carbon accumulation in the soil, especially in the top layer, and subsequently contribute to the formation of the water-stable soil aggregates.

Keywords: Paddy, Soil carbon, Water-stable aggregates, No-tillage, Soil layer



Contents of soil carbon with soil depth affected by the combination of tillage and cultivation methods (Means with the different letters in same depth are significantly different at $p < 0.01$ (LSD). T-T: tillage-transplanting, T-WS: tillage-wet hill seeding, MT-S: minimum tillage-dry seeding, and NT-S: no tillage-dry seeding).



Introduction

벼 무경운 재배는 이앙재배에 비해 노동력이 절감되며 토양탄소 축적이 촉진되어 생력형 저탄소 농산물 생산 농법으로 주목 받고 있다. 특히 경운 방법과 비교했을 때, 무경운 벼 재배는 메탄발생량이 감소되는 효과가 있으며 토양탄소 축적은 표토의 토양 입자 응집과 용적밀도의 변화 등에 영향을 받는다고 알려져 있다 (Bayer et al., 2014; Ko et al., 2002; Li et al., 2011; Zhang et al., 2016). 토양 용적밀도의 변화는 토양탄소 감소 혹은 증가의 간접 인자로 무경운 재배에 의한 토양 용적밀도의 감소는 이미 많은 연구에서 보고되었다 (Hill and Cruse, 1985; Kushwaha et al., 2001; Six et al., 1998). Davidson et al. (1967)은 무경운에서 용적밀도의 감소는 토양 유기물과 밀접한 관련이 있으며, Carman (1997)은 토양유기물의 축적은 용적밀도를 감소시키며 입단의 조성을 촉진한다고 하였다. 반면 관행 경운은 작물재배 시 지속적인 토양교란으로 유기물의 분해를 촉진시키고 입단의 파괴가 조장되어 토양의 물리성에 불리한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Gál et al., 2007). 한편 논에서 경운과 무경운에 의한 용적밀도의 변화는 토양 수분함량, 토심 등의 조건에 따라 달라진다고 하였다 (Mari et al., 2015).

보존경운 및 무경운에 의한 토양 유기물의 축적은 주로 토양 표층 (0~5 cm)에서 이루어지며 층위별 유기물의 축적에 따라 입단의 형성량이 달라지고 토심이 깊어질수록 토양 유기물 축적 및 입단형성 정도가 감소된다고 알려져 있다 (Bhattacharyya et al., 2012; Ding et al., 2002; Six et al., 2000; Zhang et al., 2017). 또한 Kern and Johnson (1993)은 관행경운과 무경운에 의한 토양 유기탄소의 축적은 15 cm 이상에서 대부분 이루어지며 토양 깊이 15 cm 이하에서는 유기탄소 함량에 차이가 없다고 하였다.

우리나라에서는 무경운 재배 토양의 특성변화에 관한 연구는 무경운 재배 시 작물의 생산성이나 표토·심토의 삼상 변화와 유기물과 질소함량의 변화, 무경운 재배지의 유기탄소 및 입단분석 등 (Park et al., 2014; Seo et al., 2014; Yang et al., 2014) 단편적인 연구에 치중되어 무경운 재배토양에 관한 기초연구가 부족한 실정이다 (Park et al., 2014; Seo et al., 2014; Yang et al., 2014). 이에 본 연구에서는 무경운 골조성기 (무경운용 원형로터리날, 출원번호 10-2014-0137822)를 이용해 벼를 재배하여 경운이앙, 무논점파 및 최소경운 건답직파 재배양식 및 경운방법별 토양 특성변화를 비교하고자 하였다. 특히 벼 뿌리의 분포 깊이는 경운이앙, 무논점파, 무경운 이앙 등 재배양식별 큰 차이 없이 96% 이상이 20 cm 이내에 존재한다고 알려져 있다 (Cho et al., 1995). 또한 무경운 대비 경운이 이루어지는 깊이는 20 cm로, 재배양식 및 경운방법간 토양특성 변화를 알아보기 위하여 20 cm 깊이 토양의 이화학적 특성 변화를 분석하였다.

Materials and Methods

실험 장소 및 처리방법 본 연구는 국립식량과학원 중부작물부 작물연구동 시험포장에서 2014년부터 2016년까지 수행되었다. 경운이앙 (tillage-transplanting; T-T), 무논점파 (tillage + wet hill seeding: T-WS), 최소경운 + 건답직파 (minimum tillage + dry seeding: MT-S)와 무경운 + 건답직파 (no tillage + dry seeding: NT-S)로 경운 정도와 재배양식을 달리하여 3년간 벼를 재배하였다. 시험 포장의 토양은 강서통 (양토)으로 시험 전 토양의 이화학적 특성은 Table 1과 같았다.

Table 1. Soil physico-chemical properties before experiments.

Treatments [†]	Bulk density	Porosity	T-C	T-N	Av.P ₂ O ₅	Av.SiO ₂	Ex.cation (cmol _c kg ⁻¹)		
	Mg m ⁻³	----- % -----	-----	-----	----- mg kg ⁻¹ -----	-----	K	Ca	Mg
T-T	1.27 a	51.1 a	1.95 a	0.25 a	96 a	108 a	0.22 a	7.1 a	1.35 a
T-WS	1.29 a	52.0 a	2.01 a	0.28 a	91 a	116 a	0.20 a	7.5 a	1.41 a
MT-S	1.29 a	52.2 a	1.93 a	0.25 a	104 a	103 a	0.20 a	7.3 a	1.38 a
NT-S	1.27 a	51.7 a	1.98 a	0.26 a	101 a	111 a	0.21 a	7.9 a	1.55 a

Data in a column followed by the same letter are not significantly different at $p < 0.05$.

[†]T-T: tillage-transplanting, T-WS: tillage-wet hill seeding, MT-S: minimum tillage-dry seeding, and NT-S: no tillage-dry seeding, Av.: available, Ex.: exchangeable.

공시재배 벼 품종은 남평으로 경운이앙과 무논점파는 답수 후 로터리를 이용하여 약 20 cm 깊이로 경지 전체를 경운하였고 최소경운·직파 처리구는 최소경운직파기를 이용해 전체 재배면적의 20% 정도가 경운되었다. 경운이앙은 5월 하순에 중묘를 기계이앙 하였고 무논점파는 5월 중순 무논점파기를 이용해 40 kg ha⁻¹ 수준으로 최아종자를 논 표면에 직파하였다. 최소경운과 무경운 직파 처리구는 파종량을 70 kg ha⁻¹로 하여 5월 초 각각 최소경운 직파기와 무경운 골조성기를 이용해 약 4 cm 깊이로 직파하였다.

경운이앙과 무논점파 처리구는 표준시비량 (N-P₂O₅-K₂O = 90-45-57 kg ha⁻¹)에 준하여 분시하였고 최소경운과 무경운 직파 처리구는 질소를 증량하여 110-45-57 kg ha⁻¹ 수준으로 분시하였다 (NICS, 2010). 벼 재배 시 경운이앙 처리구의 물관리 및 재배관리는 농촌진흥청 벼 표준재배법을 따랐으며 무논점파, 최소경운·무경운 건답직파 처리구의 재배관리는 농촌진흥청의 직파재배 기준에 따랐다 (RDA, 2013).

토양 이화학성 분석 시험 1년차 벼 재배 전과 3년차 벼 수확 후 오거를 이용해 경운이 이루어지는 20 cm 깊이까지 토양시료를 채취한 후 풍건하여 2 mm 체를 통과한 것을 이화학성 분석에 이용하였다. 또한 시험 후 작토층 깊이별로 토양 탄소 및 이화학성 변화를 보기 위해 루트로거를 이용하여 20 cm 깊이로 토양 시료를 채취한 후 5 cm 단위로 잘라 분석용 시료를 조제하였다. 공극률과 용적밀도는 100 cm³ core를 이용하여 농토양 물리성 측정법에 준해 조사하였고 wet sieving 장치 (Eijkelkamp 08. 13, Netherlands)를 이용해 내수성입단율을 분석하였다 (IRRI, 1987; Jeon et al., 2010). 토양 총질소와 총탄소 함량은 풍건한 시료를 분쇄하여 0.5 mm 이하 (35 mesh, No. 35) 체로 거른 후 원소분석기 (Vario max CN, Germany)로 측정하였다. 유효규산은 1N NaOAs (pH 4.0)로 침출하여 분광광도계 (Cintra 404, GBC Scientific Equipment Ltd.)로 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 유의성을 검정하였다.

Results and Discussion

작토층 토양의 이화학적 특성 변화 용적밀도는 경운이앙과 무논점파에서 증가하고 최소경운과 무경운 직파 처리에서 감소하는 경향이였다. 반면 공극률은 최소경운과 무경운 직파재배 시 증가하였고 경운이앙과 무논점파에

서 감소하였다 (Table 2). 이러한 결과는 논에서 경운에 의한 토양의 교란, 동결과 해동, 담수와 건조상태의 반복은 토양의 물리성 발달에 불리하고 특히 용적밀도를 증가시킨다는 이전의 연구와 유사한 경향을 나타내었다 (Beare et al., 1994; Mari et al., 2015). 토양입단은 유기물과 무기물의 복합적 요인으로 생성되며 작물의 생육에 이상적인 구조로 알려져 있다 (Braunack, 1995; Wright and Frank, 2004). 내수성입단은 토양의 구조적 특성과 유기물에 의해 영향을 받는다고 하였으며 경운에 의해 입단의 형성이 감소되고 보존경운 또는 무경운에 의해 내수성입단의 형성이 촉진된다고 하였다 (Carman et al., 1997; Hyun et al., 2007; Kushwaha et al., 2001; Zhang et al., 2017). 처리별 내수성입단율은 최소경운과 무경운 직파재배에서 각각 62.1%와 63.6%로 시험 전보다 증가하였고 경운이양과 무논점파에서 감소하였다. 이는 최소경운과 무경운 직파에서 경운의 정도가 상대적으로 적어 토양입단의 보존율이 높았기 때문으로 여겨진다.

Table 2. Soil physico-chemical properties before experiments.

Treatments [†]	Bulk density	Porosity	Water stable aggregates
	Mg m ⁻³	%	%
T-T	1.30 ab	50.4 ab	56.9 bc
T-WS	1.34 a	49.1 b	55.8 c
MT-S	1.28 ab	51.7 a	62.1 ab
NT-S	1.24 b	52.7 a	63.6 a

Data in a column followed by same letter are not significantly different at $p < 0.05$.

[†]T-T: tillage-transplanting, T-WS: tillage-wet hill seeding, MT-S: minimum tillage-dry seeding, and NT-S: no tillage-dry seeding, Av.: available, Ex.: exchangeable.

처리별 토양탄소함량은 경운을 한 경운이양과 무논점파에서 감소한 반면 최소경운과 무경운에서 증가되는 경향을 나타내었다 (Table 3). 이는 경운에 의한 토양표면의 지속적인 교란은 토양입단을 파괴시키며 이로 인해 입단 내 유기물의 분해를 촉진시켜 토양 유기물 함량이 감소된다는 보고와 일치하였다 (Beare et al., 1994; Rovira and Greacen, 1957). 한편, Hong et al. (1998) 등은 담수상태에서 경운 및 무경운 직파 재배 시 토양 유기물함량은 경운 담수직파에서 감소하고 무경운 담수직파에서 증가된다고 하였고 Kim et al. (2017) 등은 무경운 건담직파 재배 시 토양 탄소함량이 증가되는 반면 경운이양, 무논점파, 경운건담직파 재배에서는 감소된다고 하였다 (Kim et al., 2017). 이는 벼 재배 시 토양 탄소함량의 변화는 이양이나 직파 또는 담수상태 등의 재배양식에 의한 것보다 경운의 유무에 의한 영향을 더

Table 3. Soil chemical parameters in different tillage and cultivation methods.

Treatments [†]	T-N	T-C	Av.P ₂ O ₅	Av.SiO ₂	Ex.cation (cmol _c kg ⁻¹)		
	%	%	mg kg ⁻¹		K	Ca	Mg
T-T	0.24 a	1.83 b	64 b	71.9 bc	0.22 a	5.58 a	1.05 a
T-WS	0.24 a	1.88 b	65 b	69.2 c	0.16 a	5.34 a	1.05 a
MT-S	0.26 a	1.97 a	76 a	85.1 ab	0.44 a	5.47 a	1.06 a
NT-S	0.27 a	2.03 a	74 a	86.0 a	0.32 a	5.76 a	1.12 a

Data in a column followed by same letter are not significantly different at $p < 0.05$.

[†]T-T: tillage-transplanting, T-WS: tillage-wet hill seeding, MT-S: minimum tillage-dry seeding, and NT-S: no tillage-dry seeding, Av.: available, Ex.: exchangeable.

많이 받은 것으로 판단된다. 그러나 토양탄소함량 변화는 다양한 요인에 의한 것으로 어느 하나에 의해 영향을 받는 것은 아니며 경운 방법 또는 재배양식 각각의 재배적인 방법들이 미치는 영향력의 크기는 앞으로 더 연구되어야 할 것으로 판단된다.

토양 입단의 형성에 영향을 미치는 주요 요인은 유기물과 토양미생물 등으로 알려져 있다 (Lu et al., 1998; Mayers, 1937; Peele and Beal, 1943). 본 연구에서도 최소경운과 무경운 직파재배 시 내수성입단율은 각각 62.1%, 63.6%로 경운이랑과 무논점파 처리보다 높았으며 탄소함량 역시 1.97%와 2.03%로 최소경운과 무경운 직파재배에서 높은 경향이었는데 이는 탄소함량 변화에 의해 내수성입단율이 영향을 받은 것으로 판단된다. 토양 총질소 함량은 처리별 유의한 차이는 없었으나 최소경운과 무경운 재배에서 높게 나타났다. 입단의 형성에 중요한 역할을 하는 것으로 알려진 칼슘과 마그네슘 함량은 통계적 유의성은 없었으나 최소경운과 무경운 재배에서 높았다. 또한 시험 후 유효규산 함량은 경운이랑과 무논점파에서 각각 71.9와 69.2 mg kg⁻¹로 시험 전 대비 각각 33.3, 40%가 감소한 반면 최소경운과 무경운에서는 시험 전 대비 17.4, 22.5%가 감소되었다 (Fig. 1). 이러한 유효규산 감소율의 차이는 경운이랑과 무논점파에서 벼 수확 후 남아있는 그루터기가 경운에 의해 작토층에 섞여 비교적 빠르게 분해되어 작물에 이용된 반면 최소경운과 무경운에서는 그루터기가 토양 표면에 남아 느리게 분해되어 작물에 흡수. 이용된 양이 적기 때문으로 판단된다.

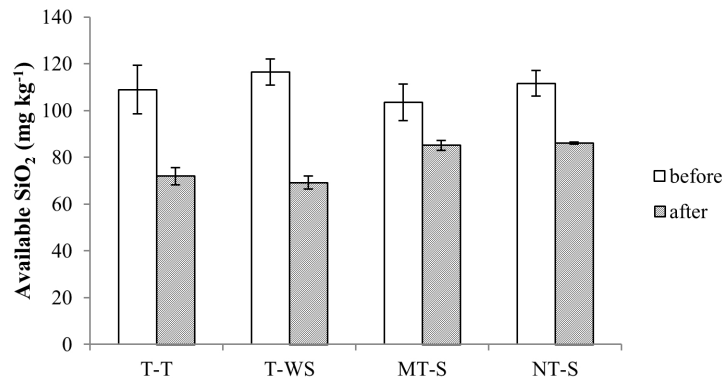


Fig. 1. Changes of available SiO₂ contents affected by tillage and cultivation treatments (Error bars are standard deviations of 3 replicates. T-T: tillage-transplanting, T-WS: tillage-wet hill seeding, MT-S: minimum tillage-dry seeding, and NT-S: no tillage-dry seeding.).

작토층 토양 깊이별 이화학적 특성 변화 경운이랑과 무논점파 처리에서 작토층 깊이에 따른 내수성입단율은 15 cm까지 각각 61~63%, 66~68%로 차이가 없었으나 최소경운과 무경운에서는 표층이 각각 71.4%와 74%로 높았고 토심이 깊어질수록 감소하는 경향이였다 (Fig. 2). Bhattacharyya et al. (2012)는 경운을 하지 않은 토양에서 경운을 할 때보다 표층의 (5 cm 깊이) 입단 함량이 증가되었으며 5~15 cm에서는 처리 간 입단 함량의 유의한 차이를 보이지 않는다고 하였다. 또한 Zhang et al. (2017)는 보존경운과 무경운 재배 시 유기탄소의 증가로 입단형성이 증진된다고 하였다. 본 연구에서도 최소경운과 무경운 재배에서 표층의 내수성입단율이 높고 10~15 cm 깊이에서는 차이를 보이지 않는 동일한 결과를 보였다.

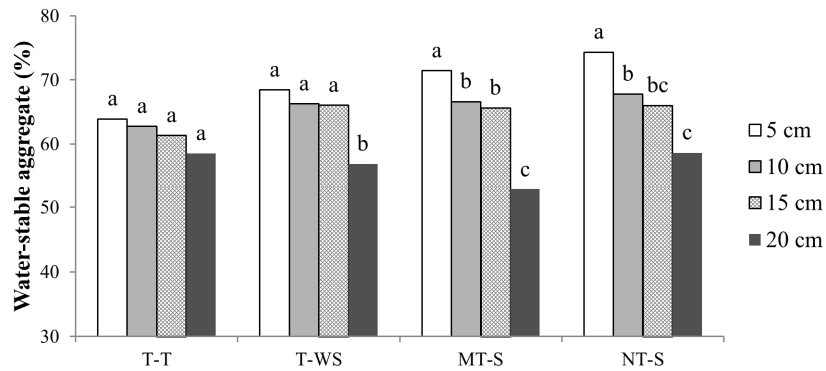


Fig. 2. Contents of water-stable aggregate at different soil depths (Means with the different letters in same treatment are significantly different at $p < 0.01$ (LSD). T-T: tillage-transplanting, T-WS: tillage-wet hill seeding, MT-S: minimum tillage-dry seeding, and NT-S: no tillage-dry seeding.).

토양탄소함량의 작토층 깊이에 따른 변화량을 알아보기 위하여 깊이별 토양탄소함량을 분석한 결과는 Fig. 3과 같이 작토층의 토심이 깊어질수록 감소되었다. 특히 최소경운과 무경운 처리에서 표층의 토양탄소함량은 각각 2.05와 2.11%로 가장 높았으며 표층과 5~10 cm 깊이의 탄소함량은 유의한 차이를 보이며 감소되었다. 그러나 5~10 cm와 10~15 cm 깊이의 탄소함량은 각각 1.73~1.78%로 깊이 간 비슷한 함량을 나타내었다. Arshad et al. (1990)는 관행적인 경운재배보다 무경운 재배에서 토양 유기물이 질적·양적으로 증대된다고 하였으며 Gál et al. (2007)은 무경운 재배에서 토양 표층에 유기탄소함량이 증가된다고 하였다. 본 연구에서는 최소경운 및 무경운 재배 시 수확 후 남아있는 벧짚 그루터기와 동계 잡초 잔사가 분해되어 토양표층에 집적되어 나타난 결과로 여겨진다. 반면 경운이양과 무논점파의 경우 토양표면에서 15 cm 깊이까지 처리 간, 깊이별 탄소함량의 유의한 차이를 보이지 않았다. 이는 약 20 cm 깊이까지 경운이 되지만 15 cm 깊이까지 토양탄소가 섞이는 반면 15~20 cm 깊이까지 경운의 영향이 미치지 못한 결과로 판단된다. 작토층의 깊이별 내수성입단율과 토양탄소함량은 Fig. 4와 같이 정의 상관관계 ($R^2 = 0.89^*$)를 보였는데 이는 토양탄소함량의 증가와 내수성입단의 생성이 서로 밀접하게 관련되어 있음을 보여준다.

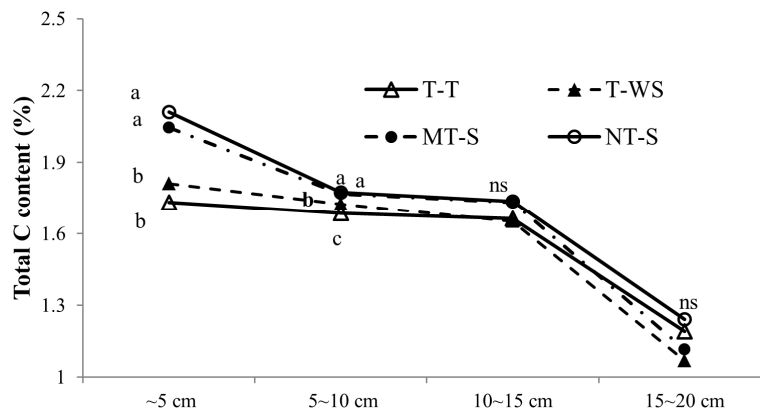


Fig. 3. Depth distribution of total carbon contents affected by tillage and cultivation methods (Means with the different letters in same depth are significantly different at $p < 0.01$ (LSD). T-T: tillage-transplanting, T-WS: tillage-wet hill seeding, MT-S: minimum tillage-dry seeding, and NT-S: no tillage-dry seeding.).

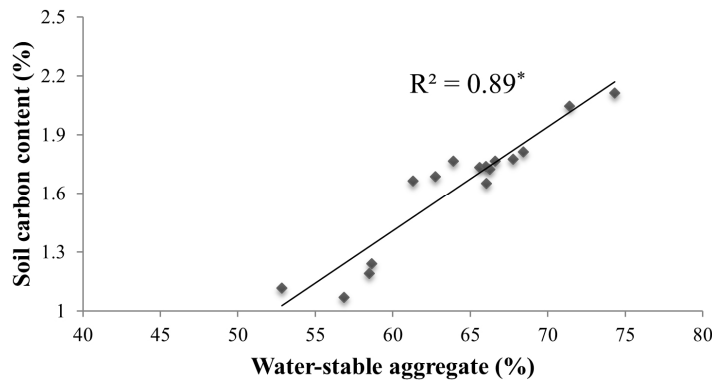


Fig. 4. Relationship between water-stable aggregate and soil carbon content (T-T: tillage-transplanting, T-WS: tillage-wet hill seeding, MT-S: minimum tillage-dry seeding, and NT-S: no tillage-dry seeding.).

Park et al. (2014)은 무경운 재배 시 토양 유기탄소의 증대는 토양의 입단을 증대시키며 이렇게 형성된 보다 안정된 소형입단 (micro-aggregate)은 관행경운 토양과 비교하여 1.4배 많아진다고 하였다. 또한 Six et al. (2000)은 소형입단이 많을수록 보다 안정된 토양구조를 형성한다고 하였고, Puget et al. (1995)는 대형입단 (macro-aggregate)은 소형입단과 비교하여 생성된 지 얼마 지나지 않았고 분해되기도 쉽다고 하였다. 본 연구에서도 토양 입경별 탄소함량을 분석하였는데 토양 입경별 탄소함량은 1 mm 이하의 토양에서 입경이 작을수록 증가되었으며 처리 간 탄소함량의 차이가 가장 많았던 표층 (5 cm)에서도 같은 경향이였다 (Fig. 5). 표층에서 입경별 탄소함량은 106 μm 이하의 토양에서 가장 많았고, 입경이 커질수록 감소하여 처리 간 차이가 줄어들는 경향이였다. 탄소함량의 차이가 가장 큰 106 μm 이하 토양의 깊이별 탄소함량은 5 cm 깊이에서 최소경운과 무경운 처리가 유의적으로 높았고 5~10 cm 깊이에서 급격히 감소한 반면 경운이양과 무논점파에서는 완만한 변화를 보였다.

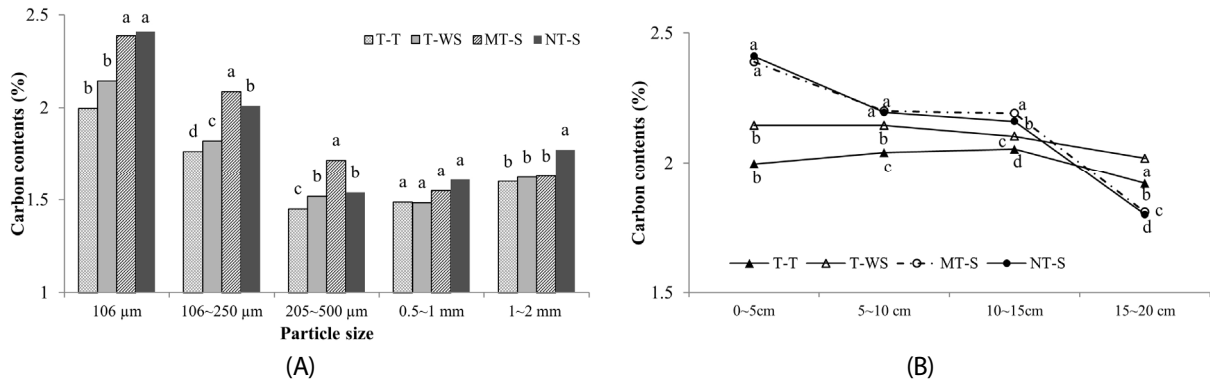


Fig. 5. Changes of carbon content by particle size. A: Changes of carbon content by particle size in the soil depth of 0~5 cm, B: Changes of carbon content in the soil particle size under 106 μm by soil depth (Means with the different letters in same particle size (A) and same depth (B) are significantly different at $p < 0.01$ (LSD). T-T: tillage-transplanting, T-WS: tillage-wet hill seeding, MT-S: minimum tillage-dry seeding, and NT-S: no tillage-dry seeding.).

총질소와 유효인산 및 치환성 양이온은 작토층 깊이별 유의한 차이를 나타내지 않았다. 그러나 유효규산 함량은 Fig. 6과 같이 경운이양과 무논점파는 표층보다 5~20 cm 깊이에서 높았고 반면 최소경운과 무경운 처리에서는 표층

에서 가장 높고 5~10 cm에서 급격히 낮아졌다가 토심이 깊어질수록 증가되는 경향을 보였다. 이는 벼 수확 후 남은 그루터기에 의한 영향으로 최소경운과 무경운에서는 토양 표층에 규산의 함량이 높게 유지되고 4 cm 깊이로 파종된 종자가 자라면서 분해된 벚짚 그루터기의 규산을 이용하면서 표층과 5~10 cm 깊이의 유효규산 함량이 상이하게 나타난 것으로 판단된다. 반면 경운이랑과 무논점파에서는 그루터기가 경운에 의해 토양 중 (10 cm 이상)으로 환원되어 5 cm 부근의 표층은 유효규산이 적은 반면 나머지 작토층에서는 깊이별 유효규산 함량에 유의적 차이가 없는 것으로 판단된다.

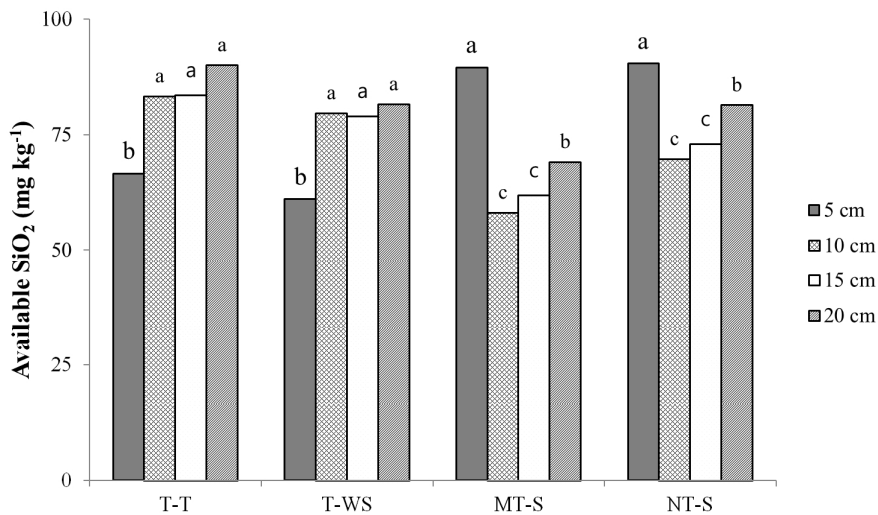


Fig. 6. Available SiO₂ contents at different soil depths affected by tillage and cultivation methods (Means with the different letters in same treatment are significantly different at $p < 0.05$ (LSD). T-T: tillage-transplanting, T-WS: tillage-wet hill seeding, MT-S: minimum tillage-dry seeding, and NT-S: no tillage-dry seeding.).

Conclusions

경운 정도와 재배양식에 따른 작토층 토양의 이화학적 특성변화를 알아보기 위해 국내에서 행해지고 있는 주요 벼 재배양식 (경운이랑, 무논점파)과 무경운 골직파기를 이용한 무경운 직파재배에 의한 토양 탄소함량과 내수성입단울을 분석한 결과는 다음과 같다.

경운의 정도가 적을수록 토양의 내수성입단울이 높아졌고 토양탄소함량이 증가하였다. 내수성입단울과 토양탄소함량은 유의한 정의 상관관계수 ($R^2 = 0.89^*$)를 나타내었다.

특히 무경운 건답직파시 논토양 탄소축적은 약 5 cm 깊이의 토양표층에서 주로 이루어졌으며 토심이 깊어질수록 탄소 축적량이 감소하여 경운 및 재배양식간 탄소함량의 차이가 줄어들었다.

작토층의 탄소함량과 내수성입단울의 깊이에 따른 변화는 비슷한 경향을 보였다. 탄소함량과 내수성입단울의 함량은 경운이랑과 무논점파에서는 표층에서 15 cm까지 유의한 차이를 보이지 않았으나, 최소경운과 무경운에서는 5~10 cm 깊이에 비해 표층 (5 cm)에서 유의하게 높았다.

Acknowledgement

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제명: 벼 무경운 직파재배 시 토양특성 변화 구명, 세부과제번호: PJ01005501)의 지원에 의해 이루어졌습니다.

References

- Arshad, M.A., M. Schnitzer, D.A. Anger, and J.A. Ripmeester. 1990. Effects of till vs no-till on the quality of soil organic matter. *Soil Bio. Biochem.* 22:595-599.
- 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.
- Beare, M.H., P.F. Hendrix, and D.C. Colman. 1994. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional- and no-tillage soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:777-786.
- Bhattacharyya, R., M.D. Tuti, S. Kundu, J.K. Bisht, J.C. Bhatt. 2012. Conservation tillage impacts on soil aggregation and carbon pools in a sandy clay loam soil of Indian Himalayas. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76:617-627.
- Braunack, M.V. 1995. Effect of aggregate size and soil water content on emergence of soybean (*Glycine max*, L. Merr.) and maize (*Zea mays*, L.). *Soil Tillage Res.* 33:149-161.
- Carman, K. 1997. Effect of different tillage systems on soil properties and wheat yield in middle Anatolia. *Soil Tillage Res.* 40:201-207.
- Cho, H.-J., I.S. Jo, B.K. Hyun, and J.S. Shin. 1995. Effects of different tillage practices on changes of soil physical properties and growth of direct seeding rice. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 28:301-305.
- Davidson, J.M., F. Gray, and D.I. Pinson. 1967. Changes in organic matter and bulk density with depth under two cropping systems. *Agron. J.* 59:375-378.
- Ding, G., J.M. Novak, D. Amarasiriwardena, P.G. Hunt, and B. Xing. 2002. Soil organic matter characteristics as affected by tillage management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:421-429.
- Gál, A., T.J. Vyn, E. Micheli, E.J. Kladvko, and W.W. McFee. 2007. Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing overestimated with tilled-zone sampling depth. *Soil Tillage Res.* 96:42-51.
- Hill, R.L. and R.M. Cruse, 1985. Tillage effects on bulk density and soil strength of two mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:1270-1273.
- Hong Y.G., S.J. Gwon, S.H. Jo, B.R. Go, and N.G. Oh. Study on the no-tillage cultivation of paddy rice. Res. Rept. J.B. Agric. Res. 1998. pp.198-203.
- Hyun, B.K., S.J. Jung, K.C. Song, Y.K. Sonn, and W.K. Jung. 2007. Relationship between soil water-stable aggregates and physico-chemical soil properties. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40:57-63.
- International Rice Research Institute (IRRI). 1987. Physical Measurements in Flooded Rice Soils. pp. 65.
- Jeon, W.T., K.-Y. Seong, M.-T. Kim, G.-J. Oh, I.-S. Oh, and U.-G. Kang. 2010. Changes of soil physical properties by glomalin concentration and rice yield using different green manure crops in paddy. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:119-135.
- Kern, J.S. and M.G. Johnson. 1993. Conventional tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:200-210.
- Kim, S.J., J.S. Choi, S.G. Gang, J.W. Park, and W.H. Yang. 2017. Effects of tillage and cultivation methods on methane emission. *Korean Crop Sci.* 2:71 (Abstr).

- 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.
- Kushwaha, C.P., S.K. Tripathi, and K.P. Singh. 2001. Soil organic matter and water-stable aggregates under different tillage and residue conditions in a tropical dryland agroecosystem. *Appl. Soil Ecol.* 16:229-241.
- 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 Tillage Res.* 113(2):77-81.
- Lu, G., K.-i. Sakagami, H. Tanaka, and R. Hamada. 1998. Role of soil organic matter in stabilization of water-stable aggregates in soils under different types of land use. *Soil Sci. Plant Nutr.* 44:147-155.
- Mari, I.A., J. Changying, N. Leghari, F.A. Chandio, C. Arslan, and M. Hassan. 2015. Impact of tillage operation on soil physical, mechanical and rheological properties of paddy soil. *Bulg. J. Agric. Sci.* 21:940-946.
- Myers, H.E. 1937. Physio-chemical reactions between organic and inorganic soil colloids as related to aggregate formation. *Soil Sci.* 44:331-357.
- NICS. 2010. Core technology for direct-seeded rice cultivation. National Institute of Crop Science, RDA, Milyang, Korea.
- Park, J.N., S.S. Lee, H.J. Kim, G.Y. Yoo, and Y.S. Ok. 2014. Effects of tillage methods on aggregate stability and organic carbon in soils. *Agric. J. Life Environ. Sci.* 26:48-51.
- Peele, T.C. and O.W. Beale. 1943. Microbial activity and soil aggregate formation during the decomposition of organic matter. *Soil Sci. Soc. Proc. Proceeding.* 8:254-257.
- Puget, P., C. Chenu, and J. Balesdent. 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *Eur. J. Soil Sci.* 46:449-459.
- RDA. 2013. General publications of Agricultural Technology; Direct seeding.
- RDA. 2015. Nongsaro: Agricultural Technology Information. <http://www.nongsaro.go.kr>.
- Rovira A. and Greacen E. 1957. The effect of aggregate disruption on the activity of microorganisms in the soil. *Aust. J. Agric. Res.* 8:659-673.
- Seo, M.C., K.Y. Seong, H.S. Cho, M.T. Kim, T.S. Park, and H.W. Kang. 2014. Physicochemical properties of soils as affected by minimum tillage and direct seeding cultivation on dry rice paddy. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47:8-15.
- Six, J., K. Paystian, E.T. Elliott, and C. Combrink. 2000. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:681-689.
- Six, J., K. Paystian, E.T. Elliott, K. Paustian, and J.W. Doran. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1367-1377.
- Wright, A.L. and F.M. Hons. 2004. Soil aggregation and carbon and nitrogen storage under soybean cropping sequences. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:507-513.
- Yang, S.K., Y.W. Seo, S.K. Kim, B.H. Kim, H.K. Kim, H.W. Kim, K.J. Choi, Y.S. Han, and W.J. Jung, 2014. Changes in physical properties especially, three phases, bulk density, porosity and correlations under no-tillage clay loam soil with ridge cultivation of rain proof plastic house. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47:225-234.
- Zhang, X., A. Zhu, W. Yang, X. Xin, J. Zhang, and S. Ge. 2017. Relationships between soil macroaggregation and humic carbon in a sandy loam soil following conservation tillage. *J. Soils Sediments* DOI: 10.1007/s11368-017-1809-y.
- Zhang, Z.-S., C.-G. Cao, L.-J. Guo, and C.-F. Li. 2016. Emissions of CH₄ and CO₂ from paddy fields as affected by tillage practices and crop residues in central china. *Paddy Water Environ.* 14(1):85-92.