

Characteristics of Anthropogenic Soil Formed from Paddy near the River

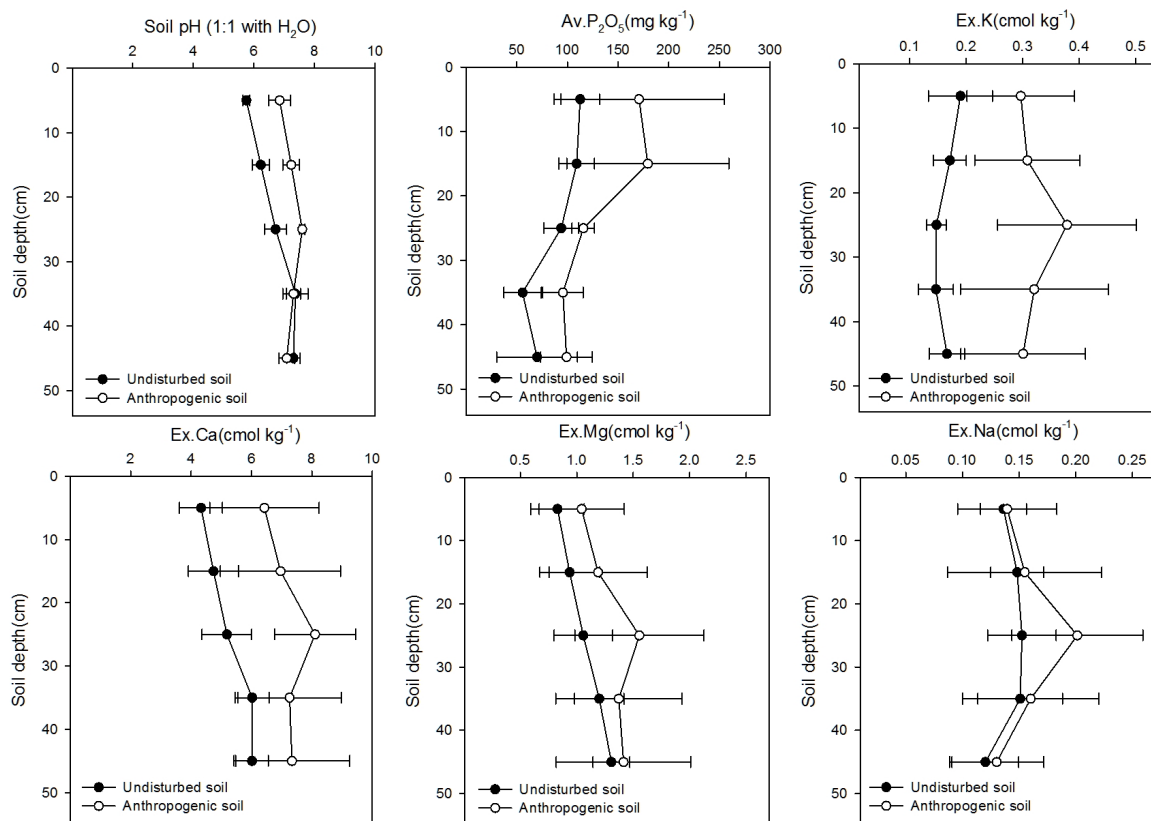
Yeon-Kyu Sonn, Yong-Seon Zhang*, Byung-Keun Hyun, Keun-Tae Kim, and Chang-Hoon Lee

Soil & Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Science, RDA, Wanju 55365, Rep. of Korea

(Received: September 5 2016, Revised: September 26 2016, Accepted: September 26 2016)

Anthropogenic soil in cropland is formed in the process of subsoil reversal and the refill of soil into cropland. However, there was little information on the chemical properties within soil profiles in anthropogenic soil under rice paddy near the river. In this study, we investigated the chemical properties within soil profiles in the anthropogenic soil located at 4 sites in Gumi, Kimhae, Chungju, and Euseong to compare with the natural paddy soil near the river. Among particle sizes, the sand content decreased under soil profiles but the silt and clay contents increased compared to the natural paddy soil in soil profiles. Organic matter content in topsoil of anthropogenic soil was lower than in that of natural soil, which was shown the contrary tendency within soil profiles. Also, the soil pH, available P_2O_5 , and exchangeable cations were higher in anthropogenic soil compared to natural paddy soil at topsoil, which was maintained these tendency into soil depth. Nutrients may be equally distributed in anthropogenic soil during the process of refill in paddy soil near the river. This results indicated that anthropogenic soil would contribute to carbon sequestration, the mitigation of compaction, and reduction of fertilizer application in paddy soil. Therefore, characteristics of anthropogenic soil can be used for the soil management in cropland.

Key words: Anthropogenic soils, Particle distribution, Chemical properties, Paddy



Distribution of average chemical properties within soil profile under rice paddy in anthropogenic soils near the river.

*Corresponding author: Phone: +82632382310, Fax: +82632383819, E-mail: zhang@korea.kr

§Acknowledgement: This study was conducted by support of NAS research and development project (Project No. PJ008620) Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

우리나라에서 하천변 농경지는 하성층적토를 모재로 하는 토양으로 식량생산 기반으로서 중요한 부분을 차지하고 있다. 현재 하천에 인접한 농토양 중에서 지반이 낮아 하천의 수위보다 낮거나 비슷한 지형에서는 계절적 침수 위험이 존재하며, 지형적으로 배후습지인 곳은 하천쪽의 토양에 비해 토성이 비교적 세립질이어서 벼 재배에는 적당하지만 농작업과 논에 발작물을 재배하는 답전유환 등 농지의 범용적 활용에는 한계가 있다. 이러한 농경지를 대상으로 준설토를 활용하여 지반이 낮은 농경지에 성토하고 비교란 토양을 환원하여 복구하는 과정에서 인위토(人爲土; anthropogenic soils)가 형성되었다.

기존 관개 논은 답수를 위한 수평적 지형, 관개수로 포화된 상태에서의 썩레질, 벼 생육 기간 4~5개월간 10 cm 정도의 수위 유지, 수확기 배수이후 약 8개월간의 건답화, 이듬해 다시 시작되는 경운과 관배수 작업이 반복되는 농경지이다. 토양이 물속에 잠겨있는 동안 토양은 환원되어 암회색으로 변화한다. 철, 망간, 규산과 인산은 수용화되어 표토층에 분산되고 확산에 의해 집단류 형태로 벼 뿌리 표면이나 쟁기층 아래 심토로 이동한다. 농토양의 이러한 건습반복으로 토양이 침수되는 환원상태에서 이동된 철, 망간 등은 벼 뿌리나 쟁기층 아래 산화층에서 산화되어 규산이나 인산과 함께 침전되므로 산화층과 철이나 망간 집적층 사이에 위치하는 근권 층에는 적갈색의 줄무늬가 형성되기도 한다 (Brinkman, 1970). 그러나 저위 농경지를 성토하는 경우에는 토양단면의 교란이 발생되어 기존 토양특성이 달라 질 수 있음에도 이에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

하천변 준설토를 이용하여 농경지 리모델링하는 과정에서 인위토양이 형성될 수 있다. 이러한 경우에는 기존 농경지의 토양을 50 cm 까지를 걷어내어 별도 보관 후, 인근 하천에서 준설토 토사로 1~10 m 범위에서 성토를 한다. 이때 걷어낸 기존 토양을 성토한 농경지에 환원하는 과정에서 토양단면의 상하층이 혼합되어 인위토양이 발생하게 된다. 본 연구에서는 저위 농경지를 하천변 준설토로 성토하여 발생한 인위토양의 화학적 특성을 주변 농경지의 비교란 농토양과 비교하고자 하였다. 이를 위해 토양하층 10 cm 간격으로 토양깊이별 농토양의 화학적 특성을 조사하였다.

Materials and Methods

하천주변의 저위 농경지를 준설토로 성토하여 5년이 경과한 인위토양을 토양시료로 채취하였다. 조사지점은 구미시 도개면 가산리, 김해시 한림면 안하리, 충주시 엄정면 율농리, 의성군 안사면 쌍호리에 위치하고 있었고, 이 지역의 농경지는 조립질의 토양으로 상부 50 cm 까지 성토된 인위토양

이었다. 각 조사 지역의 인위토양 특성을 비교하고자 각 지역 별로 인근의 기존 농토양 (비교란 토양)을 대조구로 선정하였다. 각 지역에서 토양 깊이 10 cm 간격으로 토양 하층 50 cm 까지 토양시료를 채취하였다. 이후 토양시료를 풍건하여 2 mm체를 이용하여 토양시료를 분석하였다.

토양 분석은 Soil Survey Laboratory Methods Manual (USDA, 1996)와 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 2000a)을 기준으로 분석하였다. 토양의 입경분석은 30% H₂O₂로 유기물을 분해하고, 5% sodium hexametaphosphate로 분산시켜 pipette법으로 측정하였다. pH는 토양과 물의 비율을 1:1로 하여 초차전극법으로 측정하였으며, 전기전도도 (Electrical Conductivity, EC)는 토양과 증류수를 1:5의 비율로 혼합하여 30분간 진탕한 후 Conductivity Meter로 측정된 값에 희석배수 5를 곱하여 분석하였다. 유기물 함량은 Walkley-Black 법으로 정량하였으며, 유효인산은 Lancaster법으로 분광광도계를 이용하여 분석하였다. 치환성 Ca, Mg, Na 및 K는 1 N-NH₄OAc (pH 7.0)용액으로 침출하여 원자흡광분광분석기로 정량하였다.

통계분석은 SAS 프로그램 (version 9.1)에서 ANOVA 분석을 수행한 후 5% 유의수준으로 DMRT (Duncan's multiple range test)를 이용하여 평균간 비교를 수행하였다.

Results and Discussion

하천주변에서 준설토로 성토한 4개 지역의 인위토양의 입경분포 평균치는 Fig. 1과 같다. 인위토양 깊이별 모래, 미사, 점토 함량의 범위는 각각 36.9~45.0%, 44.0~50.4%, 10.9~12.8%를 나타내었고, 모래함량은 감소하는 경향을, 미사와 점토는 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 비교란 농토양의 모래, 미사, 점토함량은 각각 43~47.6%, 42.9~46.5%, 9.4~10.2%로 인위토양에 비해 모래함량은 높았으나, 미사와 점토 함량은 낮은 결과를 나타내었다. 그럼에도 불구하고 비교란 농토양의 토양깊이별 입경분포는 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다.

구미, 김해, 충주 및 의성의 토양 모두 자갈함량은 0~15%로 실제로는 거의 0%에 가까웠으며, Table 1과 같이 토성속으로 볼 때 모래, 미사, 점토의 분급이 유사한 (점토함량이 18% 미만이고 모래함량이 15% 이상) 사양질로 나타났다. 이는 하천에 쌓이는 퇴적물은 유속에 따라 퇴적되는 입자의 크기가 다르지만 하천 자체가 크고 천천히 흐르는 하천은 하천 유역을 가로지르는 규칙적인 전후 운동을 함으로써 굵고 작은 입자들의 분급이 매우 양호한 층을 퇴적시키는데, 대상 토양이 전체적으로 큰 하천 주변에 위치한 지형적 특성에서 기인하는 것으로 판단되었다.

또한 토양관리 측면에서 인위토양은 토양의 구조적인 측면에서 볼 때 시비관리, 토양개량제 처리보다 물리성에 우선

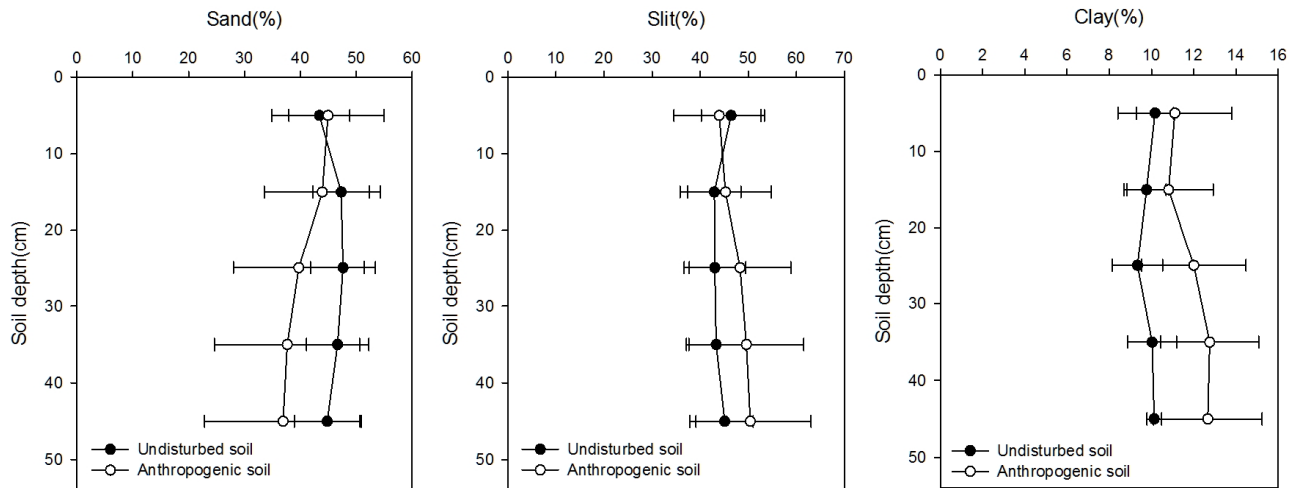


Fig. 1. Distribution of average particle size within soil profile under rice paddy in anthropogenic soils near the river.

Table 1. Particle distribution of various region within soil profile under rice paddy in anthropogenic soils near the river.

Region	Depth	Matured paddy Soils				Anthropogenic soils			
		Particle size distribution (w/w, %)			Texture (USDA)	Particle size distribution (w/w, %)			Texture (USDA)
		Sand	Silt	Clay		Sand	Silt	Clay	
Gumi	10	57.2	30.8	12.0	Sandy Loam	55.0	29.0	16.0	Loam
	20	55.5	33.1	11.4	Sandy Loam	53.9	32.2	13.9	Loam
	30	57.0	31.4	11.6	Sandy Loam	49.7	35.0	15.3	Loam
	40	57.6	31.0	11.4	Sandy Loam	48.9	34.9	16.2	Loam
	50	57.5	32.6	9.9	Sandy Loam	51.8	32.8	15.4	Loam
Gimhae	10	41.6	48.1	10.3	Loam	24.6	61.6	13.8	Silt Loam
	20	54.2	36.3	9.5	Sandy Loam	23.9	62.3	13.8	Silt Loam
	30	55.5	35.7	8.8	Sandy Loam	23.1	61.5	15.4	Silt Loam
	40	51.8	37.8	10.4	Loam	18.9	65.7	15.4	Silt Loam
	50	48.6	40.8	10.6	Loam	16.5	67.5	16.0	Silt Loam
Chungju	10	37.7	54.0	8.3	Silt Loam	37.1	53.9	9.0	Silt Loam
	20	40.7	51.6	7.7	Silt Loam	34.4	56.3	9.3	Silt Loam
	30	40.6	52.6	6.8	Silt Loam	22.7	66.3	11.0	Silt Loam
	40	39.8	53.1	7.1	Silt Loam	18.8	69.0	12.2	Silt Loam
	50	35.7	54.9	9.4	Silt Loam	16.1	71.0	12.9	Silt Loam
Euseong	10	36.9	52.9	10.2	Silt Loam	63.1	31.3	5.6	Sandy Loam
	20	38.8	50.6	10.6	Silt Loam	63.4	30.2	6.4	Sandy Loam
	30	37.4	52.4	10.2	Silt Loam	63.4	30.2	6.4	Sandy Loam
	40	37.5	51.3	11.2	Silt Loam	63.8	28.9	7.3	Sandy Loam
	50	37.5	51.9	10.6	Silt Loam	63.3	30.4	6.3	Sandy Loam

적으로 의존하여 관리가 필요하다. 또한 토심별 화학성의 분포양상은 리모델링 이후에 자연토양과의 비교로 교란된 토양의 초기 분포상황을 파악할 수 있는 측면이 있다.

농경지에 담수는 토양에 존재하는 양분의 용탈을 초래한다. 이러한 양분의 용탈은 토성, 담수기간, pH, 유기물 함량 등과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다 (Sommer and Ersboll, 1996; Vlek and Craswell, 1979). 이 중에서 퇴비 등 유기자원이 토양에 가해지면 1년 후 유기물질의 60~80%는 CO₂로 방출되고 3~8%는 토양미생물의 생체 구성물질로, 3~8%는 비부식물질로, 그리고 나머지 10~30%는 부식물질

로 남게 된다 (Brady, 1990).

비교란 논토양에서 유기물이 주로 표토에 분포하는 것은 토양 유기물질 중 수용성 형태로 존재하는 탄소가 관개수를 따라 심토로 용탈하면서 근권에서 유기탄소 함량의 투입과 배출사이에 일정한 균형관계가 형성되어 주로 표토에 분포하기 때문으로 알려져 있다 (Zhang and He, 2004). Fig. 2와 같이, 비교란 논토양의 평균 유기물 함량은 인위토양의 표토에 비해 높은 함량을 나타내었다. 일반적으로 토양유기물은 토양하층으로 갈수록 감소되는 경향을 보인다 (Lee et al., 2013). 그러나 준설토사로 성토한 이후에 기존 토층을 사용

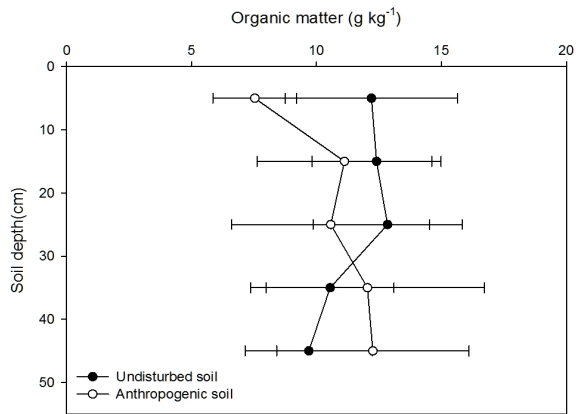


Fig. 2. Distribution of average organic matter content within soil profile under rice paddy in anthropogenic soils near the river.

하여 형성된 인위토양은 유기물이 함량이 0~10cm 깊이에서 매우 낮은 것은 성토한 직후 토양층위의 안정화 이전에 많은 양의 유기물이 토양수와 함께 하층으로 이동한 결과로 사료된다.

기존 토양의 층위를 교란하여 형성된 인위토양 4개 지역의 토양깊이별 평균 화학적 특성 분포는 Fig. 3과 같다. 인위토양의 평균 유기물 함량을 제외하면, pH, Av, P₂O₅, 치환성 양이온 함량은 비교란 논토양에 비해서 인위토양이 더 높은 결과를 보였다. 관개 논에서 pH는 담수 후 중성으로 변화하

는 경향이 있는데 (Wang et al, 1993), 토심 30 cm 아래에서 비교란 논토양 pH가 인위토양에 비해 높았다. Fig. 2에 나타냈듯이, 비교란 논토양의 유기물 함량이 30 cm 아래일수록 급격하게 감소되었고, 낮은 점토함량을 가지고 있었다 (Fig. 1). 이러한 경우에는 유기물 함량이 CEC에 중요한 요인이 될 수 있는데, 비교란 논토양의 pH가 높아지는 것은 낮은 치환성 양이온용량 (CEC)에 따른 염기포화도가 높아진 이유로 해석된다.

토양 중 인은 점토광물 및 Fe, Al, Ca와 결합하여 침전 및 난용성염의 형태로 표토에 집적된다 (Fixen et al., 1983; Stout et al., 2000). 지하수위가 낮거나 조립질 토성을 제외하고 심토까지 이동하기 어려워 주로 표토에 분포하는 것으로 알려져 있다 (Bahman et al., 1995). 특히 알카리 토양에서는 Ca-P로 집적되지만, Ca-P는 Fe-P 및 Al-P 보다 인 유효도가 높다. 인위토양에서 유효인산 함량은 비교란 논토양에 비해 높은 결과를 보였다 (Fig. 3). 이는 토양 pH에 의한 인 유효도 증가 및 상대적인 Ca-P 형태가 비교란 논토양에 비해 높았던 이유로 판단된다. 그러나 유기태 인산의 경우 humic acid, fulvic acid, lignin과 결합되어 잔존하며 (Wright and Reddy, 2008), 가수분해에 의해 무기태 인으로 전환되어 인 유효도에 영향을 미칠 수 있다. Fig. 2에서 보듯이 인위토양의 평균 유기물 함량이 비교란 논토양에 비해 낮기 때문에 유기태 인의 가수분해에 의한 인 유효도 향상은 낮을 것으로

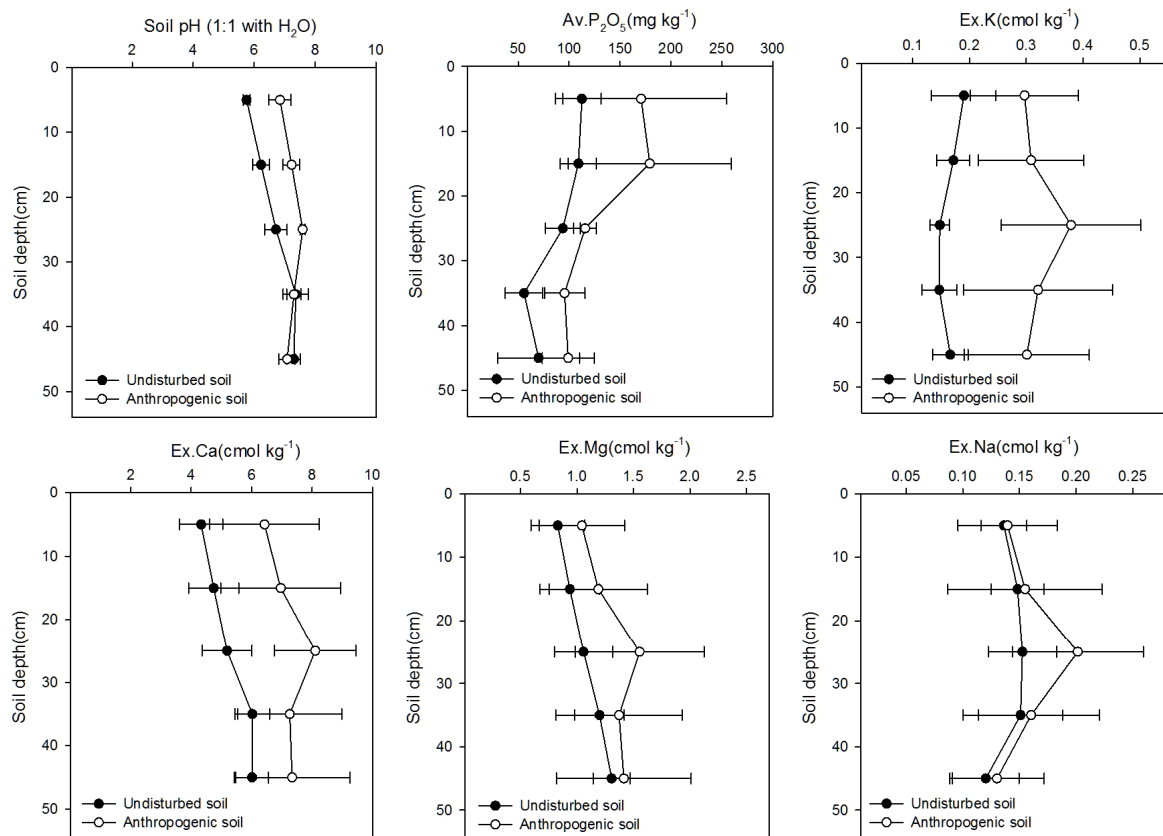


Fig. 3. Distribution of average chemical properties within soil profile under rice paddy in anthropogenic soils near the river.

Table 2. Chemical properties of various region within soil profile under rice paddy in anthropogenic soils near the river.

Region	Matured paddy Soils								Anthropogenic soils							
	Depth	pH	OM	Av.P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	Na	pH	OM	Av.P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	Na	
		(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----	cmol _c kg ⁻¹	-----		(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----	cmol _c kg ⁻¹	-----		
Gumi	10	5.78	13	120	0.12	3.76	0.66	0.15	6.82	5	382	0.51	3.89	0.12	0.12	
	20	6.17	13	113	0.13	4.10	0.73	0.14	6.68	5	379	0.50	3.97	0.18	0.10	
	30	6.52	14	111	0.13	4.41	0.80	0.14	7.62	3	106	0.70	4.86	0.08	0.15	
	40	8.04	14	31	0.08	5.69	1.06	0.12	7.00	3	117	0.65	4.70	0.09	0.13	
	50	7.81	9	15	0.10	6.01	1.40	0.10	6.84	3	136	0.56	4.49	0.10	0.12	
Gimhae	10	5.85	8	71	0.17	6.18	1.44	0.18	6.02	8	144	0.31	6.38	1.48	0.25	
	20	6.91	13	68	0.18	6.88	1.62	0.20	7.09	15	162	0.38	7.63	1.89	0.33	
	30	7.60	15	64	0.14	7.29	1.73	0.22	7.64	15	101	0.27	8.20	2.06	0.34	
	40	7.89	8	56	0.16	7.34	1.76	0.25	7.06	11	81	0.21	8.09	2.00	0.32	
	50	7.37	9	87	0.19	6.37	1.65	0.19	6.80	11	72	0.20	8.54	2.12	0.23	
Chungju	10	5.47	20	151	0.33	3.61	0.57	0.12	7.50	6	55	0.24	10.85	1.52	0.09	
	20	5.74	17	141	0.24	3.76	0.64	0.14	7.82	18	69	0.19	11.53	1.62	0.09	
	30	6.07	17	126	0.19	4.23	0.83	0.15	7.39	18	112	0.27	10.30	2.11	0.12	
	40	6.55	14	101	0.21	6.05	1.04	0.13	7.89	23	54	0.29	11.11	2.23	0.10	
	50	6.97	16	161	0.23	6.94	1.17	0.13	7.76	18	51	0.31	11.48	2.34	0.10	
Euseong	10	5.91	7	109	0.14	3.76	0.65	0.10	7.06	12	102	0.12	4.59	1.05	0.10	
	20	6.09	6	114	0.14	4.24	0.76	0.10	7.33	7	107	0.16	4.71	1.07	0.09	
	30	6.67	5	75	0.12	4.82	0.87	0.10	7.73	7	144	0.29	9.04	1.96	0.20	
	40	6.99	5	35	0.13	4.99	0.93	0.10	7.27	12	130	0.14	5.16	1.18	0.10	
	50	7.07	5	17	0.15	4.75	1.00	0.07	6.94	17	136	0.13	4.85	1.10	0.07	

Table 3. Chemical properties of top and sub-soil under rice paddy in anthropogenic soils near the river.

Soil type	Depth	Soils	pH	OM	Av.P ₂ O ₅	Ex. cation			
						K	Ca	Mg	Na
			(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----	cmol _c kg ⁻¹	-----	
Undisturbed area	Top	Soils	5.98 b	12 a	112 ab	0.17 a	4.35 b	0.82 a	0.14 a
	Sub	"	7.33 a	10 a	58 b	0.16 a	6.02 ab	1.22 a	0.13 a
Anthropogenic area	Top	Soils	7.05 a	9 a	160 a	0.30 b	6.40 a	1.18 a	0.13 a
	Sub	"	7.14 a	12 a	99 b	0.29 b	7.09 a	1.46 a	0.13 a
Optimal Range			5.5~6.5	20~30	80~120	0.2~0.3	5.0~6.0	1.5~2.0	-

*Numbers followed by the same letter within a column are not significantly different (Duncan's multiple range test, p<0.05).

사료된다.

비교란 논토양의 치환성 양이온 중 Ca⁺², Mg⁺² 함량은 토양하층의 깊이가 0~50 cm인 조건에서 깊어질수록 서서히 높아지는 경향을 보였지만, 인위토양에서는 30cm까지만 증가하고 그 밑은 감소하는 것으로 나타났다. K⁺와 Na⁺ 등은 전층에서 뚜렷한 경향을 보이지는 않았으나, 인위토의 K⁺도 Ca⁺², Mg⁺²와 비슷한 경향을 보였다고 판단되었다. 토양 중 NO³⁻, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ 등이 먼저 토양하층으로 이동하고 다음에 Na⁺, 마지막으로 Ca⁺²와 Mg⁺²은 집단류 형태로 토양 단면을 따라 상하로 이동한다 (Prendergast, 1995). 대상 토양이 하천변에 위치하는 배수등급이 약간양호인 논토양이므로 K⁺, Na⁺는 토양단면에서 집적되지 않았고, Ca⁺²와 Mg⁺²는 심토층에 집적되는 것으로 판단된다.

교란 인위토양의 화학적 특성을 표토 (0~20 cm)와 심토

(30~50 cm)로 구분하여 비교란 논토양과 비교하였다 (Table 3). 교란 인위토양의 표토와 심토의 유기물 함량, 치환성 K, Mg 및 Na 함량 등은 비교란 논토양과 차이가 없었다 (p<0.05). 그러나 교란 인위토양의 표토 pH는 7.05로 비교란 논토양의 표토 pH 5.98에 비해 높았으나, 심토는 두 토양 간에는 차이가 없었다. 유효인산의 경우 교란 인위토양에서 표토에 많이 집적된 형태를 나타냈으며, Ca 함량은 비교란 논토양보다 교란 인위토양에서 더 많은 함량을 보였다. 치환성 K 함량은 비교란 논토양에 비해 교란 인위토양에서 약 2배정도로 높았다.

교란 인위토양에서 pH는 비교란 논토양과 마찬가지로 심토보다 표토에서 낮았으나 그 차이는 작았으며, 유기물은 비교란 논토양과 달리 표토에서 낮고 오히려 심토에서 높은 경우가 많았다. 유기물은 비교란 논토양과 달리 표토에서 낮고, 이는 교란이 된 채로 놓였기 때문에 교란되기 전의 논토

양 표토의 유기물이 전층에 섞여서 심토층 부분에 그대로 있는 것을 말해준다. 또한 치환성 Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ 와 Na^+ 는 토심과 상관없이 유사한 분포를 보였다. 이는 비교란 토양을 표토에서 50 cm까지 채취하여 보관하고 환원하는 과정에서 혼합되어 유사한 양분분포를 보인 것으로 나타났다. 논토양이 발달하려면 용탈과 집적에 의해 심토에 양분 등이 집적되어야 하나, 논토양의 생육기간 관개와 수확 후 건답화에 의한 건습 반복으로 환원상태에서 양분이동과 쟁기층 아래 산화층에서 철이나 망간 집적이 나타나는 전형적인 논토양으로 발달되지 못했음을 의미하는 것으로 판단된다. 이상의 결과는 심토층과 표토층이 혼합되게 하는 심경 또는 토양반전은 유기물의 하층 이동을 유발할 수 있음을 시사하고 있다. 이는 경중활동으로 발생하는 다짐층의 정도 완화 및 토양탄소저장으로 인한 탄소격리능 증대를 기대할 수 있다. 또한, 인산은 토지이용 변화시 환원상태의 변화로 용해도가 증가할 수 있고 (Moore and Reddy, 1994), 심토로 이동한 양분을 재이용할 수 있어 비료 사용량을 절감할 수 있을 것으로 판단되었다.

Conclusion

인근 하천에서 준설한 토사로 성토하고 원래 논토양의 표토를 이용하여 형성된 인위토양의 특성을 토양깊이별 비교란 논토양과 비교하였다. 인위토양의 입경구분에 있어서 토양 깊이가 깊어질수록 모래 함량은 감소를 점토함량은 증가하는 경향을 보였다. 또한 유기물 함량은 표토에서 낮았으나, 토양하층으로 갈수록 유기물 함량은 증가되는 경향을 보였다. 인위토양의 pH, 유효인산, 치환성 양이온 함량은 인근 비교란 논토양에 비해 높았다. 이는 비교란 토양을 표토에서 50 cm까지 채취하여 보관하고 농경지에 표토로 재환원하는 과정에서 전 토층이 잘 혼합되어 토양층위에 양분이 잘 분포한 것으로 보인다. 이와 같이, 농경지의 심토반전은 토양특성 변화로 다짐층 정도 저하, 탄소격리, 비료 사용량을 감소에 기여할 수 있을 것으로 여겨지며, 농경지 관리를 위한 기술로 발전시킬 필요가 있다고 판단된다.

References

Bahman, E., G.D. Binford, and D.B. David. 1995. Phosphorus Movement and Adsorption in a Soil Receiving Long-Term Manure and Fertilizer Application. *J. Environ. Qual.* 25(6): 1339-1343.
 Brady, N.C. 1990. *The nature and properties of soils* (10th ed.), pp. 279-314. Macmillan Co., NY, USA.

Brinkman, R. 1970. Ferrolysis, a hydromorphic soil forming process. *Geoderma* 3(3):199-206.
 Fixen, P.E., A.E. Ludwick, and R.S. Olsen. 1983. Phosphorus and potassium fertilization of 316 irrigated alfalfa on calcareous soils: II Soil phosphorus solubility relationships. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:112-117.
 Hong, J.K. and C.W. Hong. 1977. The characteristics of phosphorus in major Korean soils. I. The characteristics of inorganic phosphorus. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 10(1):13-22.
 Lee, C.H., K.Y. Jung, S.S. Kang, M.S. Kim, Y.H. Kim, and P.J. Kim. 2013. Effect of long term fertilization on soil carbon and nitrogen pools in paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46(3): 216-222.
 Moore, P.A. and K.R. Reddy. 1994. Role of eH and pH on phosphorus geochemistry in sediments of Lake Okeechobee, Florida. *J. Environ. Qual.* 23:955-964.
 NIAST. 2000. *Methods of soil and crop plant analysis*. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.
 Prendergast, J.B. 1995. Soil water bypass and solute transport under irrigated pasture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1531-1539.
 Sommer, S.G. and A.K. Ersboll. 1996. Effect of air flow rate, lime amendments and chemical soil properties on the volatilization of ammonia from fertilizers applied to sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:153-160.
 Stout, W.L., A.N. Sharpley, and J. Landa. 2000. Effectiveness of coal combustion byproducts in controlling phosphorus export from soils. *J. Environ. Qual.* 29:1239-1244.
 USDA, NRCS. 1996. *Soil survey laboratory methods manual*. Soil Survey Investigations Report No.42 (revised). USDA, NRCS, Washington.
 Vlek, P.L.G. and E.T. Craswell. 1979. Effect of N source and management on ammonia volatilization losses from flooded rice systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:352-358.
 Wang, Z.P., R.D. DeLaune, P.H. Masscheleyn, and W.H. Patrick. 1993. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57(2):382-385.
 Wright, A.L. and K.R. Reddy. 2008. Catabolic diversity of periphyton and detritus microbial communities in a subtropical wetland. *Biogeochem.* 89:199-207.
 Yang, C.H., T.K. Kim, J.H. Ryu, J.D. Kim, and K.Y. Jung. 2009. Soil characteristic of plow and compaction layer in fluvio-marine deposit paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(5): 364-370.
 Zhang, M.K. and Z.L. He. 2004. Long-term changes in organic carbon and nutrients of an Ultisol under rice cropping in southeast China. *Geoderma* 118:167-179.