

## Comparison of Soil Pore Properties between Anthropogenic and Natural Paddy Field Soils From Computed Tomographic Images

Hyen Chung Chun\*, Ki-Yuol Jung, Young Dae Choi, Su-min Jo, Sanghun Lee, Byung-Keun Hyun<sup>1</sup>,  
 Kooksik Shin<sup>1</sup>, Yeonkyu Sonn<sup>1</sup>, and Hang-Won Kang

*Crop Production Technology Research Division, National Institute of Crop Science, RDA, Miryang 627-803, Korea*

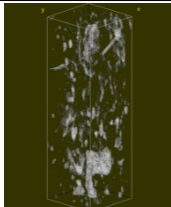
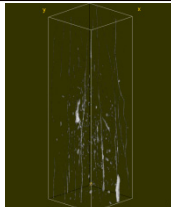
<sup>1</sup>*Soil and Fertilizer Division, National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju, 565-851, Korea*

(Received: August 6 2015, Revised: September 30 2015, Accepted: September 30 2015)

Human influence on soil formation has dramatically increased with human civilization and industry development. Increase of anthropogenic soils induced researches on the anthropogenic soils; classification, chemical and physical characteristics of anthropogenic soils and plant growth from anthropogenic soils. However there have been no comprehensive analyses on soil pore or physical properties of anthropogenic soils from 3 dimensional images in Korea. The objectives of this study were to characterize physical properties of anthropogenic paddy field soils by depth and to find differences between natural and anthropogenic paddy field soils. Soil samples were taken from two anthropogenic and natural paddy field soils; anthropogenic (A\_c) and natural (N\_c) paddy soils with topsoil of coarse texture and anthropogenic (A\_f) and natural (N\_f) paddy soils with topsoil of fine texture. The anthropogenic paddy fields were reestablished during the Arable Land Remodeling Project from 2011 to 2012 and continued rice farming after the project. Natural paddy fields had no artificial changes or disturbance in soil layers up to 1m depth. Samples were taken at three different depths and analyzed for routine physical properties (texture, bulk density, etc.) and pore properties with computer tomography (CT) scans. The CT scan provided 3 dimensional images at resolution of 0.01 mm to calculate pore radius size, length, and tortuosity of soil pores. Fractal and configuration entropy analyses were applied to quantify pore structure and analyze spatial distribution of pores within soil images. The results of measured physical properties showed no clear trend or significant differences across depths or sites from all samples, except the properties from topsoils. The results of pore morphology and spatial distribution analyses provided detailed information of pores affected by human influences. Pore length and size showed significant decrease in anthropogenic soils. Especially, pores of A\_c had great decrease in length compared to N\_c. Fractal and entropy analyses showed clear changes of pore distributions across sites. The topsoil layer of A\_c showed more degradation of pore structure than that of N\_c, while pores of A\_f topsoil did not show significant degradation compared with those of N\_f. These results concluded that anthropogenic soils with coarse texture may have more effects on pore properties than ones with fine texture. The reestablished paddy fields may need more fundamental remediation to improve physical conditions.

**Key words:** Anthropogenic soils, Computer tomography, Fractal dimension, Configuration entropy

Results of computer tomography scanning at resolution of 0.01 mm (left) and pore morphological properties (right): topsoil images from natural paddy field (N\_c) and anthropogenic paddy field (A\_c) with topsoil of coarse texture, D represents fractal dimension and Emax represents entropy values.

N_c	A_c	Soil	Pore radius (mm)	Pore length (mm)	D	Emax
		N_c	0.13	1.17	2.63	0.53
		A_c	0.03	0.02	2.09	0.4

\*Corresponding author : Phone: +82553501262, Fax: +82553523059, E-mail: hyen2010@korea.kr

§Acknowledgement : This project was supported by National Institute of Crop Science (PJ011638032015).

## Introduction

산업화와 인류의 활동영역의 확대는 직간접적으로 토양의 생성에 영향을 주고 있다 (Volungevičius and Skorupskas, 2011). 급격한 인구 증가, 집약적 농업활동, 화학비료의 투입과 중장비 기계의 발달은 표토 뿐만 아닌 심토 부분까지 토양 형성 및 발달에 막대하게 영향을 주기 시작하였다 (Bidwell and Hole, 1965). 자연토양 상태에서 토양 층위나 토양 분류에 변화를 줄 수 있는 정도의 인위적 영향이 있는 경우 인위토양으로 규정하고 있다 (Dudal et al., 2002). 인위토양은 자연상태의 원 토양과 비교해 보면 토양 내부까지 물리성과 화학성의 변화를 일으켰고, 이와 같은 변화에 따른 인위토양 특성들을 고려해서 토양관리에 차별을 두어야 한다는 연구가 발표되었다 (Dudal et al., 2002; Volungevičius and Skorupskas, 2011). 인위토양의 분류 (Dudal et al., 2002; Volungevičius and Skorupskas, 2011; Avery, 1980; Blume, 1989), 인위토양의 이화학적 특성 (Hur et al., 2008; Ibrahim et al., 2012; Massoura et al., 2006; Sonn et al., 2012), 인위토양이 식물에 미치는 영향 (Renison et al., 2004), 인위토양이 미생물과 작물의 생육에 미치는 영향 (Liang et al., 2003) 등 다양한 연구가 보고되고 있다. 여러 논문들에서 공통적으로 제시하는 결과는 인위토양이 물리성, 화학성 뿐만 아닌 토양 내 미생물 분포의 다양성에서도 자연토양에 비해 퇴화 되는 양상을 보이고 있다는 것이다. 특히 물리성을 살펴보면 토양 내부에 급변층의 생성에 의하여 배수불량을 일으킨다고 밝혀졌다 (Ibrahim et al., 2011). 현재까지는 이런 물리성과 화학성의 퇴화나 급격한 변화에 대해 명확하고 구체적인 연구가 없었고 이러한 이유로 문제점에 대한 뚜렷한 해결책이 제시되지 않고 있다.

토양 내부는 단순한 토양 입자들의 집합체가 아닌 생성 조건에 따라 다양한 구조를 보여준다. 토양 내 공극 구조의 다양성은 토양입자와 공극의 나열 모양에 따라 결정된다 (Dexter, 1988). 토양 구조는 토양 내 물질 이동, 식물 뿌리 성장 과 미생물 활동에 영향을 준다 (Dexter, 2004; Karlen, 2002; Young et al., 2001). 이런 토양 내부 구조를 관찰하는 방법으로 비파괴적이면서 삼차원적 분석이 가능한 단층촬영 (CT)이 이용되고 있다 (Wang et al., 2011; Peth et al., 2008). CT 촬영으로 얻어지는 토양의 삼차원적 이미지를 통하여 토양 공극의 정량적 특성을 분석할 수 있다. 삼차원 이미지에서 계산 가능한 토양 특성들로는 공극의 크기, 공극의 부피, 굴곡도, 길이 등이 있다 (Al-Raoush and Willson, 2005). 또한 공극의 형태학적 정보들을 바탕으로 토양 수분의 이동 특성도 예측할 수 있다 (Baveye et al., 2002; Peth et al., 2008). 이러한 공극의 정량적 특성뿐만 아닌 삼차원 이미지를 통해 공극 구조의 다양성도 계산이 가능하다.

토양 공극 분포의 다양성을 정량화하는 것은 토양 공극 구조를 분석하는 한 방법이다 (Dexter, 1988). 공극 구조 다양성을 정량화하는 방법으로 토양 보수력 측정과 같은 방법이 있으나 이것은 간접적인 공극 구조 측정 방법이다. 그래서 간접적인 측정 방법보다 상대적으로 간단하면서도 직접적인 방법으로 토양 이미지들로부터 공극 구조 다양성을 정량화하는 방법들이 사용되고 있다 (Gimenez et al., 1997; Taina et al., 2008). 토양 이미지로부터 공극 구조 다양성을 정량화 하는 방법엔 여러 가지가 있으나 이 중 배열 엔트로피 (Configuration entropy)와 프랙탈 (fractal) 분석이 많이 적용되어왔다 (Chun et al., 2008; Gimenez et al., 1997; Pozdnyakova et al., 2005). 이 두 분석 방법들은 공극 구조나 분포의 복잡성과 다양성을 정량화하여 나타낸다. 이 분석 방법들은 토양 관리 방법에 따른 공극 구조의 변화와 다양한 스케일의 토양 내부의 공극 구조 차이점을 찾는 데 다른 간접 측정방법들보다 정확하고 간편한 측정방법이었다 (Chun et al., 2008; Gimenez et al., 1997; Kravchenko et al., 2011).

이번 연구는 리모델링 농경지 토양의 물리성이 적토나 객토가 없는 일반 농경지와 다르다는 점과 이에 따라 리모델링 농경지의 토양에 맞는 관리방안을 제시하고자 하였다. 연구 목표는 인위토양 농경지와 일반 자연 농경지의 깊이별 물리성과 공극 구조 특성을 규명하고 두 토양간 차이점을 밝혀내는 것이다. 이를 위해서 4대강 사업으로 조성된 리모델링 농경지 두 곳과 같은 토성의 표토를 가진 일반 자연 농경지 두 곳을 깊이 별로 시료 채취하여 기본 물리성을 측정 비교하고 CT 촬영을 통한 공극 구조의 특성들을 비교하였다.

## Materials and Methods

본 연구에 사용한 시험지역은 표토의 토성이 비교적 조립질 토양인 2지역, 세립질 토양인 2지역으로 선정하였다. 표토를 사양질 토양으로 가진 일반 자연 농경지와 인위토양 농경지는 다음과 같이 선정하였다. 인위토양 농경지는 매립 적토형 인위토양으로 2012년 4대강 리모델링 사업의 완료로 다시 논으로 이용되어지는 곳을 선정하였다. 리모델링 인위토양의 정의와 분류에 관한 자세한 내용은 Sonn et al. (2012)와 Lee et al. (2013)에 설명되어져 있다. 인위토양 농경지는 원 논토양 표토를 50~60 cm까지 걷어내고 4대강 리모델링 사업에서 발생한 강바닥 준설토를 2~3 m 높이로 논 바닥에 쌓아 올렸다. 이렇게 쌓인 준설토 위에 걷어낸 원 논 토양 표토를 다시 쌓아놓은 형태이다 (Fig. 1a). 따라서 맨 위의 원 토양 표토는 상당히 교란된 상태로 다시 적토 되었다. 사양질과 식질 인위토양 농경지를 먼저 선정한 후 그 대조군으로 인근지역의 농경지들 중 같은 표토 토성을 가지고

있으면서 지상으로부터 1 m 깊이까지 객토나 적토한 적이 없는 농경지를 선정하였다. 한국의 농경지들은 객토나 복토가 자주 발생하므로 원하는 조건의 일반 자연 농경지를 찾기 못하는 경우들이 많았다. 이와 같은 이유로 표토 토성을 인위토양의 표토와 같은 토양속에 속해 있으면서 객토와 복토한 적이 없는 논토양을 선정하였다. 경기도 평택시 소사동에 위치한 논 토양으로서 (N<sub>c</sub>) 기존에 토양조사를 통하여 토양통 분류가 되어있으면서 지상으로부터 1m 깊이까지 객토나 적토한 적이 없는 조립질 농경지였다 (Fig. 1). 인위토양 시험포장 (A<sub>c</sub>)은 구미시 도개면 가산리에 위치한 매립적토형 조립질 인위토양으로 위에 설명한 4대강 리모델링 사업으로 형성되었다. A<sub>c</sub> 토양은 표토가 사양토였고 준설토는 사토였다 (Table 1). 표토를 식질 토양으로 가진 일

반 자연 과 인위토양 농경지는 다음과 같이 선정하였다. 일반 자연 농경지 시험포장은 전라남도 나주시 다시면 복암리에 위치한 논 토양으로 (N<sub>f</sub>) 역시 1m까지 객토나 적토한 적이 없는 세립질 농경지이다. 인위토양 시험지역은 전라남도 나주시 이창동에 위치한 4대강 리모델링 사업으로 조성된 매립적토형 세립질 인위토양이다 (A<sub>f</sub>). A<sub>f</sub> 시험지역은 표토뿐만 아닌 준설토도 모두 미사질양토였다 (Table 1). 인위토양들은 공사 완료 후 1년 (2012) 동안 벼를 재배하였다. 시료채취는 벼 재배 및 수확 후 인 2013년 3~6월동안 인위토양과 일반 자연토양 시험지역에서 이루어졌다.

일반 자연토양 농경지 N<sub>c</sub>와 N<sub>f</sub> 지역에서는 1 m 정도의 토양 단면을 파내어 층위를 먼저 구분한 후 층위 별로 시료 채취 및 물리성 측정을 실시하였다; 표토층 (Ap, 0~15 cm), 쟁기바닥층 (Ploughpan, 15~25 cm), 심토층 (B2, 40 cm 이하) (Fig. 1a). 반면 인위토양 농경지 A<sub>c</sub>와 A<sub>f</sub>은 표토 약 50 cm와 그 밑의 준설토로 나뉘었다 (Fig. 1). 인위토양의 층위 구분 및 명칭은 Lee et al. (2013)의 인위토양 분류 및 설정에 따라 정하였다. 깊이 별로 3곳에서 시료채취 및 물리성 측정이 실시되었다; 표토층 (^Ap1, 0~20 cm), 경계층 (Interference, 55~65 cm), 준설토층 (^C1, 65 cm 이하) (Fig. 1b). 현장에서 물리성 조사로는 각 깊이에서 경도와 수분함량을 측정하였고 토성 분석 시료, 비교란 2인치 코어 (3개)와 CT 촬영용 비교란 코어 (지름 5 cm, 높이 10 cm) 시료들을 채취하였다 (Fig. 1). 일반 물리성 분석은 총 3반복으로 토성, 용적밀도 등이 농촌진흥청 토양 및 식물체분석법 (NIAST, 2000)에 준하여 분석을 하였으며, CT 촬영은 한국건설기술연구원 (일산, 경기도)에 분석 의뢰하였다. 한국건

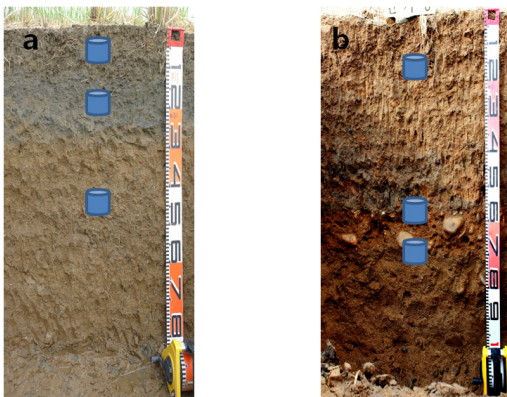


Fig. 1. Examples of soil profiles and sampling locations (blue cylinder): a. natural soil (Ansung, N<sub>c</sub>) and b. anthropogenic soil (Gasan, A<sub>c</sub>) site.

Table 1. Summary of physical properties from natural (N<sub>c</sub> and N<sub>f</sub>) and anthropogenic soil (A<sub>c</sub> and A<sub>f</sub>) sites at different depths: 1) N<sub>c</sub> and N<sub>f</sub> - a. Ap (0~10 cm), b. Ploughpan (15~25 cm) and c. B2 layer (> 40 cm), 2) A<sub>c</sub> and A<sub>f</sub> - a. ^Ap1 (0~20 cm), b. interference (55~65 cm), and c. ^C1 layer (> 65 cm).

Sites	Layer	Texture	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Hardness (mm)	Water content (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
N <sub>c</sub>	Ap	Loam	1.47±0.05 <sup>c</sup>	44.46±1.72	14.40±1.78 <sup>c</sup>	0.26±0.02 <sup>b</sup>
	Ploughpan	Loam	1.55±0.01 <sup>a</sup>	41.34±0.36 <sup>a</sup>	22.90±1.66 <sup>a</sup>	0.17±0.04 <sup>c</sup>
	B2	Silt loam	1.49±0.02 <sup>b</sup>	44.60±0.78	17.00±1.69 <sup>b</sup>	0.32±0.02 <sup>a</sup>
A <sub>c</sub>	^Ap1	Sandy loam	1.71±0.03 <sup>a</sup>	35.59±1.08	8.90±1.10	0.16±0.02 <sup>a</sup>
	Interfer-ence	Sandy loam	1.63±0.07	38.50±2.81	22.90±1.73 <sup>a</sup>	0.02±0.00 <sup>c</sup>
	^C1	Sand	1.50±0.06 <sup>b</sup>	43.33±2.26 <sup>a</sup>	8.90±2.23	0.03±0.03 <sup>b</sup>
N <sub>f</sub>	Ap	Silty clay loam	1.18±0.02	55.47±0.57 <sup>a</sup>	11.70±1.16 <sup>a</sup>	0.31±0.03
	Ploughpan	Silty clay loam	1.35±0.04	49.04±1.32	18.30±1.89	0.19±0.04
	B2	Silty clay loam	1.39±0.02	47.65±0.94	17.20±1.23	0.22±0.07
A <sub>f</sub>	^Ap1	Silt loam	1.41±0.00 <sup>c</sup>	46.93±0.14 <sup>a</sup>	15.90±1.20 <sup>b</sup>	0.20±0.05
	Interfer-ence	Silt loam	1.60±0.03 <sup>a</sup>	39.52±1.08	26.20±4.71 <sup>a</sup>	0.19±0.04
	^C1	Silt loam	1.52±0.08 <sup>b</sup>	42.59±2.85	20.80±1.40 <sup>c</sup>	0.27±0.05

a, b, c: differences at 95% among three depth layers within a site.

Bold numbers represent significant differences at 95% between anthropogenic and natural sites.

설기기술연구원에서 직접 주문 제작된 multi x-ray 영상시스템으로 촬영 조건은 90 kV에서 0.01 mm의 해상도였다 (Fig. 2). Multi x-ray의 기기 사양과 촬영 조건은 Table 2와 같다.

여기서 생성된 이미지들은 믹셀 (mixing pixel) 모델의 임계값 설정 (thresholding)과 필터링 (filtering)을 거쳐서 이진 이미지들 (binary images, 21.5 x 21.5 x 43 mm)로 보정하였다 (Kobayashi et al, 2009) (Fig. 3). 이런 이미지 처리 과정은 Visual C++와 Image J (Research Services Branch, National Institute of Health, Bethesda, MD)를 이용하였다. 공극의 크기, 길이와 굴곡도 (tortuosity) 등은 공극 네트워크 (pore network) 방법으로 계산하였다 (Peth et al., 2008). 여기서, 굴곡도는 한 공극 내의 가장 짧은 길이와 긴 길이의 비율을 계산한 값이다. 1에 가까울수록 공극의 형태는 원에 가깝고 값이 클수록 긴 원통모형을 하고 있다 (Langmaack et al., 2002),

공극 구조의 공간분포 분석을 위해 배열 엔트로피와 프랙탈 분석을 적용하였다. 이 방법은 토양 이미지를 큐브 세기 (cube-counting) 방법으로 공극의 존재 또는 경우의 수를 계산하고 공극이 분포하고 있는 양상을 정량화하는 것이다 (Andraud et al., 1994). 즉, 큐브 세기 방법은 3D 토양 이미지 전체를 다양한 크기의 큐브 ( $L^3$ )를 반복적으로 덮어가며 큐브 안의 공극 존재여부를 계산하는 방법이다 (Andraud et al., 1997; Gimenez et al., 2002; Gibson et al., 2006). 배열 엔트로피 계산방법은 다음과 같다.

$$p_k(L) = \frac{N_k(L^3)}{N} \tag{Eq. 1}$$

$$H^*(L^3) = \frac{H(L^3)}{H_M(L^3)} = -\frac{1}{\log(L^3 + 1)} \sum_{k=0}^1 p_k(L^3) \log p_k(L^3) \tag{Eq. 2}$$

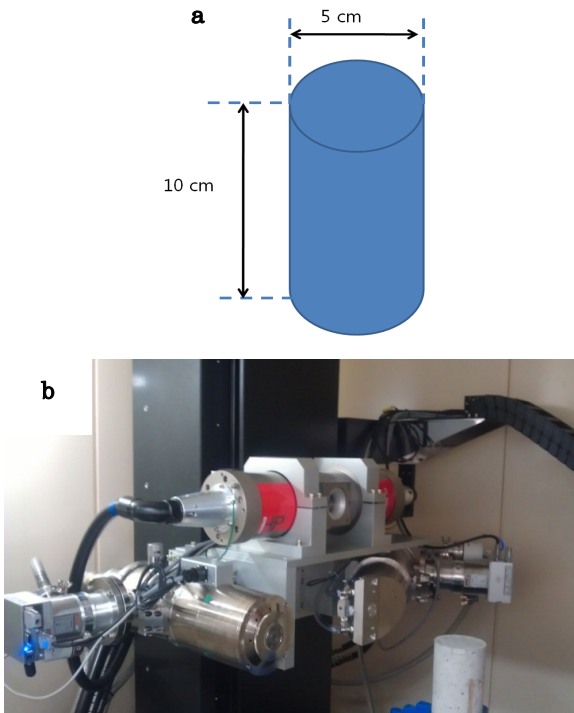


Fig. 2. Examples of soil sample for CT scanning (a) and CT scanning of a soil sample (b).

여기서, N: 전체 cube수

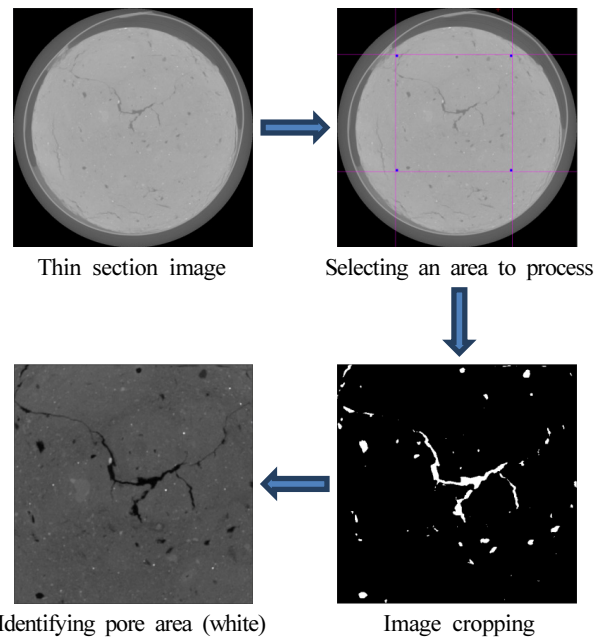


Fig. 3. Soil image handling procedure from CT scanning.

Table 2. Specifications of CT used in this study.

	Multi X-ray Tube		
	Source 1	Source 2	Source 3
X-ray tube	MXR-32HP/11AX	225 kV Open type Micro-focus X-ray tube	120 kV Open type Nano-focus X-ray tube
Voltage range	20 to 320 kV	30 to 225 kV	30 to 120 kV
Tube current range	22.5 mA	10 to 3000 $\mu$ A	10 to 200 $\mu$ A
Focal spot size	0.4 mm	6 $\mu$ m	0.4 $\mu$ m

Source: Korea Institute of Construction Technology

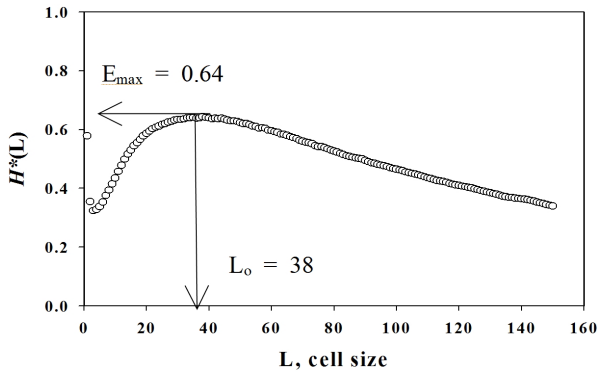


Fig. 4. Example of calculating  $E_{max}$  and  $L_0$  from the configuration entropy (Eq. 2).

$N_k$ : k 공극 수만큼을 포함하는  $L^3$  크기의 cube 수  
 $H_M(L^3) = \log(L^3+1)$ :  $L^3$  크기의 cube에서 가능한 최대 entropy 값

이 연구에서 L값은 1에서 250까지 변화였다.  $H^*(L^3)$  값은 오목한 곡선으로 나타나는데  $H^*(L^3)$  값이 0인 경우는 공극 구조가 가장 단조로울 경우이고 1인 경우는 모든 큐브에 같은 확률로 공극을 포함한다는 가장 다양성을 가진 공극 구조를 나타낸다 (Fig. 4).  $H^*(L^3)$  곡선 변화에서 최대치를 보이는 곳의 L값을  $L_0$ 로 대표 공극 구조를 구하기 위한 큐브 길이가 된다. Fig. 4에서 보여지듯이,  $L_0$ 에 상응하는 엔트로피 값은  $E_{max}$ 로 정의하고 이 값은 공극 구조의 최고 다양성을 정량화한 값이다 (Chun et al., 2008).

프랙탈 분석은 다음과 같다.

$$N_f(L) = KL^{-D} \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서, D: 프랙탈 차원

$N_f(L)$ : L 크기의 큐브 안에 공극 수

K: 프랙탈 차원의 초기 값 과 1로 가정 됨

프랙탈 분석도 배열 엔트로피와 마찬가지로 L 크기의 큐브들을 전체 토양 이미지에서 공극 존재여부를 조사하는 방법이다. 삼차원 토양 이미지에서 프랙탈과 배열 엔트로피 값들은 포트란 (Fortran) 프로그램에서 계산하였다. 모든 물리성 측정값들은 통계적 차이를 보여주기 위하여 변량분석 (ANOVA, IBM SPSS, NY, USA)을 수행하였다.

공극 형태학적 측정치들 (크기, 길이 등)은 정규분포를 보이지 않았다 (Fig. 5). 이에 따라 공극의 정량적 측정치들은 정규분포 데이터들처럼 평균과 분산의 크기로 표시하지 않고 최소값 (minimum), 최대값 (maximum) 및 중앙값 (median)으로 측정치의 대표값을 나타내었다. 이 연구 결과에서 공극의 반지름 크기 (pore radius) 최소값과 굴곡도 (tortuosity)

최소값은 나타나 있지 않았다. 공극 크기의 최소값은 pixel 최소값인 0.01 mm로 모든 토양들이 같이 나왔으므로 생략하였고 굴곡도 역시 최소값은 1로 다 같았기 때문에 자료정리 (Table 3) 결과에서 생략하였다. 집단간 크기의 비교를 위해서 Kruskal Wallis 비교 (IBM SPSS, NY, USA)를 실시하였다. 변량분석 와 Kruskal Wallis 비교 모두 95%의 신뢰구간으로 비교하였다.

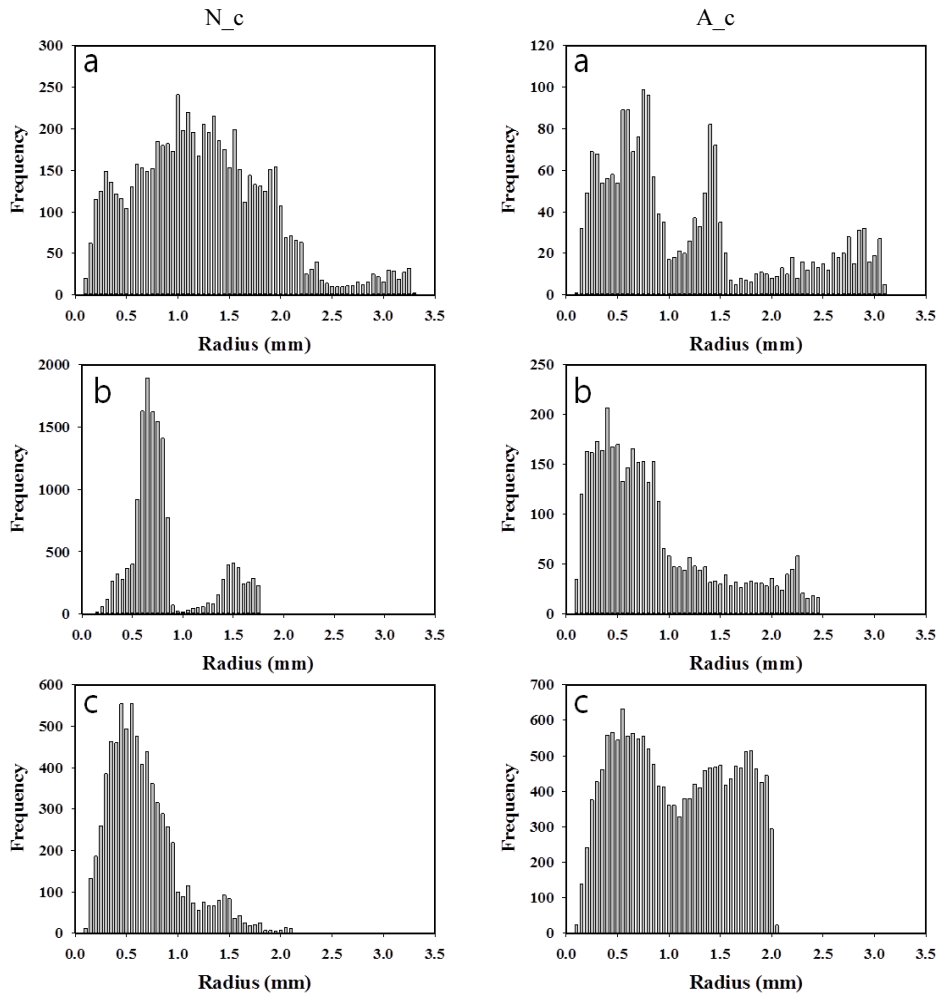
분석된 물리성과 형태학적 계수들 중에 위의 인위토양과 일반 자연토양을 설명해 주는 주요 요인들을 분석하기 위해 주성분 분석 (Principal Component Analysis)를 실행하였다 (IBM SPSS, NY, USA).

## Results and Discussion

**Measured physical properties** 일반 자연 농경지 연구 지역들 중 경기도 안성에 위치한  $N_c$  연구지역은 Ap층이 0~13 cm까지 분포하였고 토성은 양토인 보통답이었다. 전라남도 나주에 위치한  $N_f$  지역은 Ap층이 0~15 cm까지 분포하고 미사질식양토인 보통답이었다. 두 지역 모두 20 cm 전후로 쟁기바닥층을 갖고 있었고 그 밑의 층들은 B층으로 이루어져있다. 이 깊이 별 토양의 기본 물리성들은 Table 1에 나타나있다. 이번 연구에 조사된 인위토양 농경지들은 리모델링 사업으로 인하여 지역마다 준설토로 다른 조건의 토양들이 적토되었고 이로 인하여 인위토 농경지들이 지역마다 다른 기본 물리성을 보이고 있다 (Table 1).

층위별 비교 분석 결과 표토가 조립질인  $N_c$ 가 공극률만 빼고 용적밀도, 경도 및 수분함량에서 모두 통계적 (95% 신뢰수준)으로 다르다고 나타났다.  $N_c$  표토층의 용적밀도, 경도가 다른 층위보다 확연히 낮았다 ( $p < 0.05$ ). 인위토양인  $A_c$ 는 표토층이 준설토보다 더 큰 용적밀도와 확연히 높은 수분함량을 갖고 있었다 ( $p < 0.05$ ).  $A_c$ 는 경계층과 준설토층은 낮은 용적밀도와 공극률을 갖고 있었고 또한 매우 낮은 수분함량을 갖고 있었다 ( $p < 0.05$ ). 표토가 세립질인  $N_f$ 는  $N_c$ 와 비교해 층위간 물리성 차이가 거의 없었다. 공극률과 경도가 표토에서 확연히 다르게 나타났다 ( $p < 0.05$ ). 인위토양인  $A_f$  토양은 용적밀도와 경도에서 각 층위별로 다르게 나타났다. 용적밀도와 경도값들이 표토층에서 다른 층위보다 더 작은 값을 가졌다. 인위토양에서 표토가 세립질인 경우 표토층의 물리성 악화가 세립질 인위토양보다 크게 나타나지는 않았다.

기본 물리성 측정에서 일반 자연토양과 인위토양간 비교에서 특이한 부분은 표토의 물리성들이 토양간에 모두 통계적으로 다르다고 나왔다 (Table 1). 이는 인위토양의 표토층이 적토작업으로 인해 일반 자연토양 농경지의 표토층과 비교해서 물리성의 차이를 크게 보이게 된 것으로 추정할 수 있다.  $N_c$  와  $A_c$  토양 간의 비교에서 심토층/준설토층에서



**Fig. 5.** Example of Pore radius size distributions from three dimensional images of Ansung site (N\_c) - a. Ap (0~10 cm), b. ploughpan (15~25 cm) and c. B2 layer (> 40 cm), 2) Gasan site (A\_c) - a. ^Ap1 (0~20 cm), b. interference (55~65 cm), and c. ^C1 layer (> 65 cm).

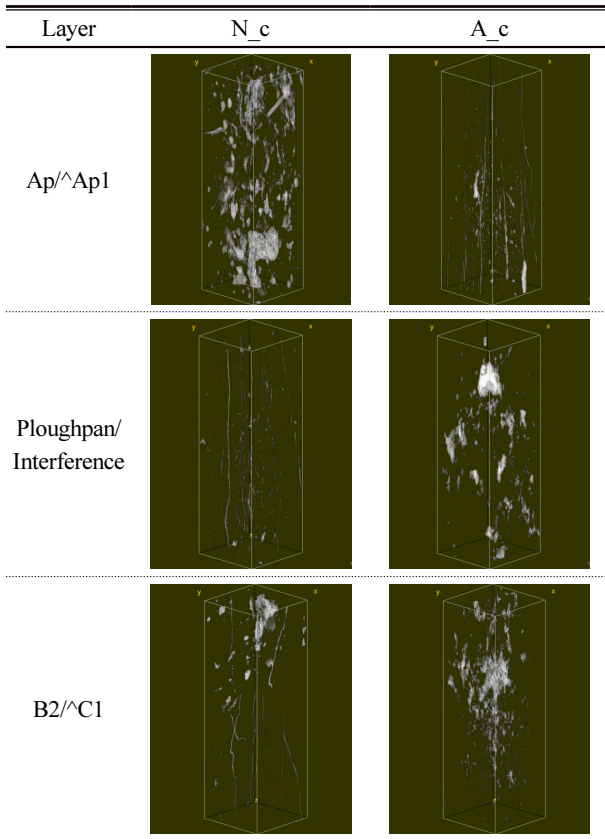
**Table 3.** Summary of pore morphological properties from natural (N\_c and N\_f) and anthropogenic soil (A\_c and A\_f) sites at different depths: 1) N\_c and N\_f - a. Ap (0~10 cm), b. ploughpan (15~25 cm) and c. B2 layer (> 40 cm), 2) A\_c and A\_f - a. ^Ap1 (0~20 cm), b. interference (55~65 cm), and c. ^C1 layer (> 65 cm).

Sites	Layer	Number of pores	pore radius (mm)		pore length (mm)			pore tortuosity (mm)	
			Max.	Median	Min.	Max.	Median	Max.	Median
N_c	Ap	6665	<b>1.86</b>	<b>0.13<sup>a</sup></b>	<b>0.09</b>	<b>3.25</b>	<b>1.17<sup>a</sup></b>	12.87	1.19 <sup>a</sup>
	Ploughpan	14713	<b>1.58</b>	<b>0.09</b>	<b>0.10</b>	<b>3.75</b>	<b>0.68</b>	2.21	1.16
	B2	7384	<b>1.38</b>	<b>0.07</b>	0.09	1.79	0.63	1.50	1.21
A_c	^Ap1	1965	<b>1.05</b>	<b>0.03<sup>a</sup></b>	<b>0.01</b>	<b>1.09</b>	<b>0.02</b>	4.79	1.20
	Interfer-ence	12594	<b>1.09</b>	<b>0.02<sup>b</sup></b>	<b>0.09</b>	<b>1.18</b>	<b>0.68<sup>a</sup></b>	9.50	1.20 <sup>a</sup>
	^C1	3647	<b>0.94</b>	<b>0.06<sup>c</sup></b>	0.08	2.45	0.65 <sup>b</sup>	2.84	1.18 <sup>b</sup>
N_f	Ap	14437	0.55	0.08	<b>0.17</b>	<b>1.15</b>	<b>0.70<sup>a</sup></b>	1.86	1.26
	Ploughpan	28626	0.76	0.07	<b>0.09</b>	<b>1.45</b>	<b>0.70<sup>b</sup></b>	5.46	1.16
	B2	3083	<b>1.38</b>	<b>0.09</b>	<b>0.09</b>	<b>1.85</b>	<b>0.58<sup>c</sup></b>	2.58	1.20
A_f	^Ap1	7273	1.35	0.08	<b>0.09</b>	<b>1.88</b>	<b>0.59<sup>a</sup></b>	5.15	1.19
	Interfer-ence	558	0.32	0.10	<b>0.09</b>	<b>0.66</b>	<b>0.30<sup>c</sup></b>	1.26	1.13
	^C1	2160	<b>0.90</b>	<b>0.07</b>	<b>0.09</b>	<b>1.15</b>	<b>0.38<sup>b</sup></b>	8.26	1.19

\*Minimum values for pore radius were 0.01 mm which was same as pixel unit value. Minimum values for tortuosity were 1.

a, b, c: differences at 95% among three depth layers within a site.

Bold numbers represent significant differences at 95% between anthropogenic and natural sites at the matching layer.

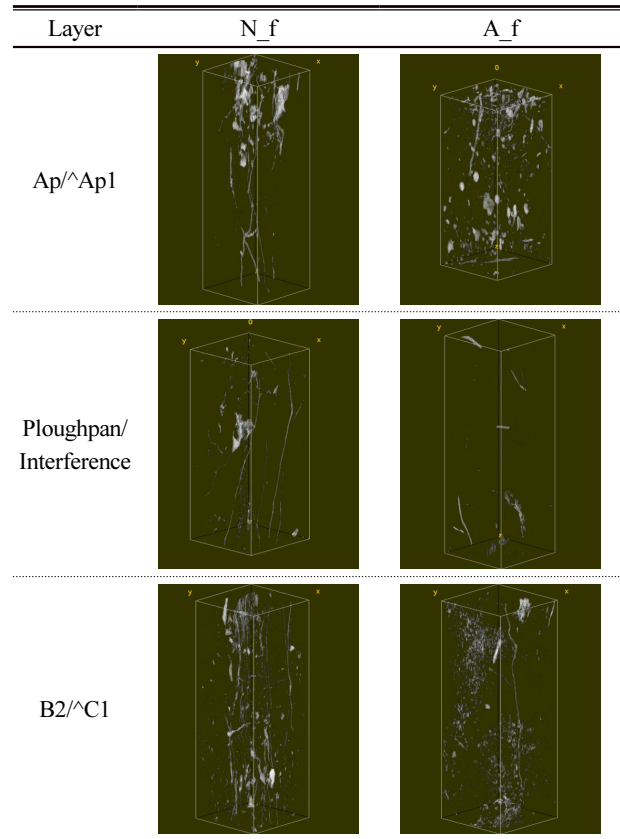


**Fig. 6.** Three dimensional images of natural (Ansung, N\_c) and anthropogenic (Gasam, A\_c) soil sites at three depths: 1) N\_c - Ap (0~10 cm), ploughpan (15~25 cm) and B2 layer (> 40 cm), 2) A\_c - ∧Ap1 (0~20 cm), interference (55~65 cm), and ∧C1 layer (> 65 cm). White represents pore in soil.

경도와 수분함량의 차이가 확연하게 나타났다 ( $p < 0.05$ ). N\_c의 쟁기바닥층과 A\_c의 경계층은 용적밀도, 경도, 공극률 등은 크게 차이가 없었다. 그러나 이 두 층은 수분함량에서 크게 차이가 나타났고, 심토층과 준설토층에까지 수분함량의 차이를 나타내고 있다.

세립질 표토의 N\_f와 A\_f 토양간 비교에서 용적밀도와 공극률의 토양간 각 층위마다 다르게 나타났다 ( $p < 0.05$ ). N\_f에서 각 층의 용적밀도가 A\_f보다 전체적으로 값이 작고 공극률이 더 컸다. 반면 경도는 A\_f의 표토층과 경계층이 N\_f보다 더 큰 값을 가졌으나 심토층과 준설토층간에 경도는 차이가 없었다. 수분함량에서도 표토층을 제외하고는 자연토양과 인위토양간에 차이가 없었다. 이는 쟁기바닥층과 심토층의 공극 연결정도가 경계층과 준설토층과의 연결 정도와 크게 차이가 없는 것으로 보인다. 이는 조립질 토양의 비교와 확연히 차이가 나는 점이다. 이러한 물리적 특성은 공극의 형태학적 분석에서 더 자세히 나타났고, 공극의 형태학적 측정은 다음과 같았다.

**Pore morphological properties** 토양 시료들의 CT 촬영 결과는 Fig. 6 과 7에 나타나있다. 각 이미지들은 이차원



**Fig. 7.** Three dimensional images of natural (Dasi, N\_f) and anthropogenic (Ichang, A\_f) soil sites at depths: 1) N\_f - Ap (0~10 cm), ploughpan (15~25 cm) and B2 layer (> 40 cm), 2) A\_f - ∧Ap1 (0~20 cm), interference (55~65 cm), and ∧C1 layer (> 65 cm). White represents pore in soil.

적 이미지가 1000장이 쌓여서 형성된 삼차원적 이미지들로서 토양 시료 내의 공극들이 하얀색으로 표시되어 있다. 이 이미지들에서 계산된 공극의 형태학적 결과는 Table 3에 요약되어있다. 첫째로, 공극 수는 A\_f 토양을 제외한 모든 토양에서 쟁기바닥층과 경계층이 다른 층위들보다 공극 수가 더 컸다. Chun et al. (2008)은 공극 크기별 공극 수를 비교한 결과 공극 크기가 작은 소공극들의 분포가 많을수록 공극수가 더 크다고 발표하였다. 이는 쟁기바닥층과 경계층이 소공극들의 수가 다른 층보다 더 많을 것이라는 추론이 가능하다.

N\_c 토양에서 표토층의 공극은 크기와 길이, 굴곡도까지 다른 층위의 공극들과 확연한 차이를 보였다. 표토층의 공극은 크기와 길이에서 다른 층의 공극들보다 훨씬 더 컸다. 특히 굴곡도의 최대값이 12.87로 긴 관형태의 공극이 존재하고 이것은 공극의 연결성이 다른 층위의 공극들보다 좋다고 볼 수 있다. 쟁기바닥층과 심토층은 공극의 크기와 길이 등은 크게 다르지 않았다. 반면 인위토양인 A\_c는 공극 크기가 각 층위마다 차이가 있었고 ( $p < 0.05$ ), 중앙값은 준설토층의 공극이 가장 크고 경계면은 가장 작은 중앙값을 갖고 있었다 ( $p < 0.05$ ). 공극 길이는 표토층이 가장 작았다

( $p < 0.05$ ). Vogel and Roth (2001)은 같은 공극률을 가졌으나 공극 크기가 다르게 분포하는 토양들을 CT촬영하여 공극 길이와 크기를 측정하고 이를 바탕으로 연결성을 분석하였다. 또한 공극의 형태학적 정보를 이용하여 수분의 이동 특성을 연구하였다. Vogel and Roth (2001)의 연구결과 소공극들이 연결해서 연결되어 있는 구조와 비교하여 대공극이 많을수록 공극의 길이와 크기가 커지고 이는 연결성이 좋아졌다. 대공극들은 소공극들의 집합보다 공극의 연결성이 좋아지면서 더 많고 원활한 수분이동 결과를 보였다. 이번 연구에서도 조립질 인위토양은 표토의 교란으로 공극의 크기와 길이가 상당히 작아지고 이는 밑의 층위들과 공극 연결성을 떨어뜨려 수분과 같은 물질의 이동에 제한을 줬고, 이에 따라 경계층 밑의 층위에는 수분함량이 매우 적게 나타났다고 판단할 수 있다.

N<sub>f</sub> 토양은 공극 길이 외에 다른 형태적 특성이 층위별로 나타나지 않았다. 공극 길이도 표토층과 쟁기바닥층이 심토층보다 더 긴 것 외엔 크게 차이가 없었다. A<sub>f</sub> 토양은 공극 길이가 층위별로 차이가 나타났다 ( $p < 0.05$ ). 표토층의 공극들이 다른 층위의 공극들 보다 길이가 좀 더 긴 외에 다른 층위간 형태적 특성은 나타나지 않았다.

일반 자연토양과 인위토양간 비교에서 N<sub>c</sub>와 A<sub>c</sub>는 공극 크기와 길이가 확연한 차이를 보였다 ( $p < 0.05$ ). 공극 크기와 길이에서 일반 자연토양 N<sub>c</sub>의 표토층과 쟁기바닥층이 A<sub>c</sub>의 표토층과 경계층의 공극들보다 더 컸다 ( $p < 0.05$ ). A<sub>c</sub>의 표토층의 공극 크기는 N<sub>c</sub> 표토층과 비교하여 중앙값이 0.1 mm 작았고 최대값에서 약 0.8 mm 차이를 보였다. 크기보다 공극의 길이는 더 명확한 차이를 보였다. N<sub>c</sub> 표토층 공극 길이는 중앙값이 1.17 mm였고 최대값은 3.25 mm 였다. A<sub>c</sub>와 비교하여 중앙값은 1 mm이상 차이가 나고 최대값은 2 mm이상 차이를 보였다. 반면 세립질 토양인 N<sub>f</sub>와 A<sub>f</sub>는 공극 길이외에는 다른 특성을 보이지 않았다. 다만 공극 크기에서 N<sub>f</sub> 심토층이 A<sub>f</sub> 준설토층보다 더 컸다 ( $p < 0.05$ ). 인위토양은 토양의 교란으로 인해서 확연히 토양 길이는 자연 일반토양의 같은 층위와 비교하여 확연히 더 짧아졌다. 그러나 공극의 크기에서는 세립질 토양들간 통계적으로 차이가 없으므로 조립질 토양들보다는 세립질 인위토양이 공극 파괴 영향을 덜 받았다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 4대강 리모델링 사업으로 인위적으로 조성된 농경지들은 적토과정에서 공극 크기가 더 큰 대공극들이 더 영향을 받았고 결과적으로 공극 크기를 퇴화시켰다. 이는 기경과 같은 토양의 교란이 있으면 물과 양분의 이동과 직접적 연관이 있는 대공극들이 소공극들보다 더 쉽게 영향을 받고 대공극의 파괴 내지 퇴화가 심하다는 연구들은 기존에 많이 발표되어왔고 이 연구 또한 이를 뒷받침하고 있다 (Currie, 1966; Warkentin, 2001; Wang et al., 2011; Young and Crawford, 1991).

**Table 4. Summary of fractal dimension (D) values and parameters of normalized entropy ( $E_{max}$  and  $L_0$ ) from natural (N<sub>c</sub> and N<sub>f</sub>) and anthropogenic soil (A<sub>c</sub> and A<sub>f</sub>) sites at different depths: 1) N<sub>c</sub> and N<sub>f</sub> - a. Ap (0~10 cm), b. ploughpan (15~25 cm) and c. B2 layer (> 40 cm), 2) A<sub>c</sub> and A<sub>f</sub> - a. ^Ap1 (0~20 cm), b. interference (55~65 cm), and c. ^C1 layer (> 65 cm).**

Sites	Layer	D	$E_{max}$	$L_0$
N <sub>c</sub>	Ap	2.63	0.53	52
	Ploughpan	2.04	0.38	100
	B2	2.14	0.44	71
A <sub>c</sub>	^Ap1	2.09	0.4	83
	Interfer-ence	2.11	0.33	100
	^C1	2.32	0.42	71
N <sub>f</sub>	Ap	2.05	0.34	100
	Ploughpan	2.01	0.32	100
	B2	2.33	0.48	62
A <sub>f</sub>	^Ap1	2.40	0.47	60
	Interfer-ence	1.64	0.22	125
	^C1	2.29	0.38	83

**Spatial distribution of pore structure** 공극의 구조적 차이를 위해 이 연구에서는 프랙탈과 배열 엔트로피를 계산하였다. Giménez et al. (2002)은 토양 구조 특성을 정량화하기 위해 프랙탈 차원 (D)을 이용했고 여기서 D=3이면 공극 분포의 균일화가 극대치고 이보다 작을수록 공극 구조의 단순화가 이루어진다고 결론지었다.

Table 4에 프랙탈 차원 (D)에 대한 분석결과가 나와있다. D값의 분포는 토양마다 다른 결과를 보여주었다. N<sub>c</sub>와 A<sub>f</sub>는 표토가 가장 많은 공간에 공극이 분포하고 A<sub>c</sub>와 N<sub>f</sub>는 준설토층과 심토층이 다양한 공극 분포를 보였다. 공통적으로 쟁기바닥층과 경계층의 공극 분포가 다른 층위의 공극 분포보다 단순하다는 결과를 보였다. 이런 결과는 배열 엔트로피의 계수들인  $E_{max}$ 와  $L_0$ 에서도 나타난다.  $E_{max}$  값이 모든 토양에서 쟁기바닥층과 경계층에서 가장 작은 값을 보였고  $L_0$  값은 N<sub>f</sub> 토양을 제외하고 제일 컸다. Chun et al. (2008)은  $E_{max}$ 가 값이 클수록 공극 구조가 다양한 형상을 보여주고 있고  $L_0$ 는 대표적 공극 구조를 보여주는 cell의 크기로 크기가 클수록 대공극들보다는 소공극들의 영향을 더 받았다고 보고하였다. 이런 결과를 바탕으로 쟁기바닥층과 경계층의 더 작은 크기의 공극인 소공극들의 분포가 다른 층위들보다 많았고 공극들의 분포양상도 다른 층위들의 공극들보다 단순한 구조를 보였다.

표토층의 공극 구조는 N<sub>c</sub>는 A<sub>c</sub>보다도 다양한 공극 분포와 대공극들의 더 많은 존재를 보여주고 있다. 반면 심토층과 준설토층은 크게 차이가 없었다. N<sub>f</sub>와 A<sub>f</sub> 표토층은 조립질 토양들과 달리 인위토양이 더 다양하고 대공극들의



**Table 5. Eigenvalues (top) and loading matrix of all soil samples from PCA (bottom); D-fractal dimension,  $L_0$  and  $E_{max}$ -configuration entropy parameters, radius\_max and radius\_median - maximum and median radius size of pore, length\_max and length\_median - maximum and median length of pore, tortuosity\_max and tortuosity\_median - maximum and median tortuosity of pore.**

Factor	Eigenvalues		
	Sum	% variance	%Cumulative
1	5.64	37.58	37.58
2	3.28	21.86	59.439
3	2.08	013.87	73.31

Soil property	Factor 1	Factor 2	Factor 3
D	0.91	-0.13	-0.20
$L_0$	-0.88	0.12	0.33
$E_{max}$	0.88	-0.92	-0.30
radius_max	0.76	-0.30	0.20
length_max	0.68	-0.42	0.41
tortuosity_max	0.48	-0.41	0.41
bulk density	-0.34	-0.91	-0.03
porosity	0.34	0.91	0.02
water content	0.17	0.67	-0.09
pore number	-0.37	0.53	0.43
length_median	0.65	0.25	0.65
hardness	-0.48	-0.11	0.62
tortuosity_median	0.45	0.38	-0.49
radius_median	0.28	0.42	0.47

영향도 더 많았다. 앞서 형태학적 결과에서  $A_f$  표토층은 공극 길이와 굴곡도 최대값이 1.88 mm 와 5.15로  $N_f$ 의 1.15 mm와 1.86보다 월등히 컸다. 중앙값은 차이가 반대로 나오거나 없었으나 최대값에서 이러한 차이는  $A_f$  표토층에 부분적으로 긴형태의 대공극이 발생한 것으로 보인다. 이러한 결과는 인위토양들의 세립질 표토층이 교란되고 적토될 때 공극 구조에 대한 영향이 작았거나 이 과정에서 일부 대공극들이 생성되었을 것으로 추론된다.

이 연구에서 측정된 모든 물리성 값들과 형태학적 측정 값들, 그리고 프랙탈과 엔트로피 분석에서 나온 계수들이 모두 주성분 분석에 요인들 (loadings)로 적용되었다 (Table 1, 3, and 4). 주성분 분석 결과, 성분 1,2,3에 속한 요인들이 토양 특성에 대한 약 70%를 해석하였다 (Table 5). 성분 중 고유값이 높은 요인들로는 성분 1에 D,  $L_0$ ,  $E_{max}$ , 공극 반지름 크기 최대값 및 공극 길이 최대값들이 속하였다. 성분 2에는 용적밀도와 공극률이 높은 고유값을 보였다. 여기서 성분 1은 주로 형태학적 측정값들과 공극 구조 분석 값들 (프랙탈과 엔트로피)이 주축을 이루고 있었다. 반면 성분 2는 기본 물리성 측정치들 중 일부가 포함되었다. 이 연구에

서 인위토양과 자연토양의 특징을 설명하는데 있어서 공극의 형태학적 측정치들과 공극 구조의 통계적 공간분석 값이 매우 중요한 요인들이라는 것을 보여주고 있다.

## Conclusion

이번 연구에서 CT를 이용한 공극 구조의 형태학적 분석을 통하여 인위토양과 일반 자연토양의 농경지 사이의 공극 특성 차이점을 검토하였다. CT촬영을 통하여 인위토양과 일반 자연토양간 공극 구조의 특징 및 각 토양의 층위별 공극 구조 차이점도 구명할 수 있었다. 이번 연구를 통해서 표토가 조립질인 토양의 경우 표토층의 대공극 형성이 우선시 되어야 하고 인위토양의 경계층은 일반 자연 농경지의 쟁기바닥층과 비슷한 공극 구조를 보여주므로 쟁기바닥층과 같이 관리가 이루어지도록 해야 한다. 이 연구 결과를 바탕으로 좀 더 다양한 토성으로 이루어진 인위토양 농경지의 이화학적 특성 연구를 통해 인위토양 농경지의 관리방안 및 문제점 해결을 제시할 수 있을 것이다. 특히 CT 촬영으로 얻어진 공극의 형태학적 자료들은 차후 토양 내 수분의 이동 등과 같은 수문학적 데이터를 얻는데 도움이 될 것이다.

## References

- Al-Raoush, R.I. and C.S. Willson. 2005. Extraction of physically realistic pore network properties from three-dimensional synchrotron X-ray microtomography images of unconsolidated porous media systems. *J. Hydrol.* 300(1-4): 44-64.
- Andraud, C., A. Beghdadi, and J. Lafait. 1994. Entropic analysis of random morphologies. *Physica A.* 207:208-212.
- Andraud, C., A. Beghdadi, E. Haslund, R. Hilfer, J. Lafait, and Virgin, B. 1997. Local entropy characterization of correlated random microstructures. *Physica A.* 235:307-318.
- Avery, B.W. 1980. *Soil classification for England and Wales*, p.67, Harpenden.
- Baveye, P., H. Rogasik, O. Wendroth, I. Onasch, and J.W. Crawford. 2002. Effect of sampling volume on the measurement of soil physical properties: Simulation with X-ray tomography data. *Meas. Sci. Technol.* 13(5):775-784.
- Bidwell, O.W. and F.D. Hole. 1965. Man as factor of soil formation. *Soil Sci.* 99:65-72.
- Blume, H.P. 1989. Classification of soils in urban agglomerations. *Catena Cremlingen* 16:269-275.
- Brady, N.C. and R.R. Well. 1996. *The nature and properties of soils*. Pearson Prentice Hall, Ohio.
- Chun, H.C., D. Gimenez, and S.W. Yoon. 2008. Morphology, lacunarity and entropy of intra-aggregate pores: Aggregate size and soil management effects. *Geoderma* 146(1-2):83-93.

- Currie, J. A. 1966. The volume and porosity of soil crumbs. *J. Soil Sci.* 17(1):24-35.
- Dexter, A.R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil Till. Res.* 11:199-238.
- Dexter, A.R., 2004. Soil physical quality. Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*. 120:227-239.
- Dudal, R., F.O. Nachtergaele, and M.F. Purnell. 2002. The human factor of soil formation, pp.14-21S, Thailand.
- Gibson, J.R., H. Lin, and M.A. Burns. 2006. A comparison of fractal analytical methods on 2- and 3-dimensional computed tomographic scans of soil aggregates. *Geoderma*. 134:335-348.
- Gimenez, D., R.R. Allmaras, E.A. Nater, and D.R. Huggins. 1997. Fractal dimensions for volume and surface of inter-aggregate pores - scale effects. *Geoderma* 77(1):19-38.
- Hur, S.O., Y.K. Sonn, K.J. Lee, S.T. Lee, C.W. Park, S.H. Jeon, S.K. Ha, and J.G. Kim. 2008. Water movement characteristics by soil horizon of cumulants Anthrosol in highland, p.132.
- Ibrahim, M., S.G. Ha, K.H. Han, and Y.S. Zhang. 2011. Physico-chemical characteristics of artificially disturbed soils as affected by agricumulants of different textures, pp. 189-190.
- Ibrahim, M., K.H. Han, S.K. Ha, Y.S. Zhang, and S.O. Hur. 2012. Physico-chemical characteristics of disturbed soils affected by accumulate of different texture in south Korea. *Sains Malaysiana* 41(3):285-291.
- Karlen, D. L. 2002. Structure, plant establishment and. pp 1269-1275. In:Lal, R. (ed). *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, Inc.
- Klavchenko, A. N., A. N. W. Wang, A. J. M. Smucker and M. L. Rivers. 2011. Long-term differences in tillage and land use affect intra-aggregate pore heterogeneity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75(5):1658-1666.
- Kobayashi, Y., S. Kawasaki, M. Kato, T. Mukunoki, and T. Kaneko. 2009. Applicability of a method for evaluation of porosity to biogrooted geomaterials. *J. MMIJ.* 125(10):540-546.
- Langmaack, M., S. Schrader, U. Rapp-Bernhardt, and K. Kotzke. 2002. Soil structure rehabilitation of arable soil degraded by compaction. *Geoderma*. 105(1-2):141-152.
- Lee, S. B., Y. K. Sonn, H. C. Chun, C. W. Park, H. J. Cho, B. K. Hyun, K. C. Song, Y. S. Zhang and D. B. Lee. 2013. Comparison between Soil Taxonomy and WRB for classification of anthropogenic soils. *Kor. J. Soil Sci. Fer.* 67-67. (Abstr.)
- Liang, Y., Y. Yang, C. Yang, Q. Shen, J. Zhou, and L. Yang. 2003. Soil enzymatic activity and growth of rice and barley as influenced by organic manure in an anthropogenic soil. *Geoderma* 115(1-2):149-160.
- Massoura, S.T., G. Echevarria, T. Becquer, J. Ghanbaja, E. Leclerc-Cessac, and J. Morel. 2006. Control of nickel availability by nickel bearing minerals in natural and anthropogenic soils. *Geoderma* 136(1):28-37.
- Peth, S., R. Horn, F. Beckmann, T. Donath, J. Fischer, and A.J.M. Smucker. 2008. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72(4):897-907.
- Pozdnyakova, L, D. Gimenez, and P.V. Oudemans. 2005. Spatial analysis of cranberry yield at three scales. *Agron. J.* 97(1):49-57.
- National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAST). 2000. Analysis method of soil and plant. NIAST. pp.103-131.
- Renison, D., I. Hensen, and A.M. Cingolani. 2004. Anthropogenic soil degradation affects seed viability in *Polylepis australis* mountain forests of central Argentina. *Forest. Ecol. Manag.* 196(2-3):327-333.
- Sonn, Y.K., Y.S. Zhang, C.W. Park, Y.H. Moon, B.K. Hyun, K.C. Song, and H.C. Chun. 2012. A comparison of spatial variation on anthropogenic soils. *Kor. J. Soil Sci. Fer.* 45(6):897-899.
- Taina, I.A., R.J. Heck, and T. R. Elliot. 2008. Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review. *Can. J. Soil Sci.* 88(1):1-20.
- Treseder, K. K. and M. F. Allen. 2000. Mycorrhizal fungi have a potential role in soil carbon storage under elevated CO<sub>2</sub> and nitrogen deposition. *New Phytol.* 147:189-200.
- Vogel, H.J. and K. Roth. 2003. Moving through scales of flow and transport in soil. *J. Hydroal.* 272(1-4):95-106.
- Volungevičius, J. and R. Skorupskas. 2011. Classification of anthropogenic soil transformation. *Geologija* 53(4):165-177.
- Wang, W., A. N. Kravchenko, A. J. M. Smucker and M. L. Rivers. 2011. Comparison of image segmentation methods in simulated 2D and 3D microtomographic images of soil aggregates. *Geoderma* 162 (3-4).
- Warkentin, B.P. 2001. The tillage effect in sustaining soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164:345-350
- Young, I. M. and J. W. Crawford. 1991. The fractal structure of soil aggregates: its measurement and interpretation. *J. Soil Sci.* 42:198-192.
- Young, I. M., J.W. Crawford, and C. Rappoldt. 2001. New methods and models for characterizing structural heterogeneity of soil. *Soil Till. Res.* 61:33-45