

# 한강 수변구역 복원지의 표토 특성 및 유기탄소 저장량 추정

이종문\* · 조용현\*\* · 김윤호\*\*\* · 박성우\*\*\*

\*공주대학교 대학원 조경·환경계획학과 박사수료 · \*\*공주대학교 조경학과 교수 · \*\*\*공주대학교 대학원 조경학과 석사과정

## The Topsoil Characteristics, and Estimation of Topsoil Organic Carbon Storage at Restoration Areas in Riparian Zones of the Han River

Lee, Jong-Mun\* · Cho, Yong-Hyeon\*\* · Kim, Yoon-Ho\*\*\* · Park, Sung-Woo\*\*\*

\*Ph.D. Candidate, Dept. of Landscape Architecture · Environmental Planning,  
Graduate School of Kongju National University

\*\*Professor, Dept. of Landscape Architecture, Kongju National University

\*\*\*Master's Student, Dept. of Landscape Architecture, Graduate School of Kongju National University

### ABSTRACT

This study was carried out to investigate and analyze the environmental characteristics of restoration areas in the riparian zones of the Han River, and to quantify the amount of topsoil organic carbon storage. As a result of investigation and analysis of 21 survey sites, the total number of species planted was found to be 17, and the mean number of species was  $2.86 \pm 0.13$  species per site. At least one species and a maximum of 7 species were planted at each site. The mean diameter at breast height was  $9.1 \pm 0.6$ cm, the mean height was  $6.2 \pm 0.3$ m and the root content in soil was  $0.13 \pm 0.18$  g/cm<sup>2</sup>. As a result of the analysis of the soil characteristics, 6 out of 21 items, such as the bulk density, solid ratio, gravel ratio, soil hardness, sand content, and pH increased as the soil layer deepened. The topsoil organic carbon storage by layer was  $11.54 \pm 1.08$  ton/ha at 0-10cm,  $8.69 \pm 0.81$  ton/ha at 10-20cm,  $7.97 \pm 0.79$  ton/ha at 20-30cm, and the total from 0 to 30cm was  $28.21 \pm 7.31$  ton/ha. The highest amount of topsoil organic carbon storage by land use in the past was  $35.17 \pm 5.31$  ton/ha in agricultural lands, followed by  $28.16 \pm 8.31$ ton/ha in residential areas,  $21.87 \pm 9.05$  ton/ha in commercial areas,  $19.23 \pm 12.48$  ton/ha in industrial areas, and  $17.07 \pm 11.33$  ton/ha in the barren areas. The highest amount of topsoil organic carbon storage in the restored areas was  $38.46 \pm 3.14$  ton/ha in 2006, followed by  $28.57 \pm 7.84$  ton/ha in 2016, and  $16.78 \pm 6.06$  ton/ha in 2011. The results of this study are expected to provide a basic database and evaluation criteria for enhancing the carbon abatement effects of the restoration sites in riparian zones in the future.

*Key Words: Topsoil, Organic Carbon, Carbon Storage, Environmental Characteristics, Land Use*

### 국문초록

본 연구는 한강 수변구역에 복원지를 대상으로 환경 특성에 대하여 현황조사 및 분석을 실시하고, 표토 유기탄소

---

**Corresponding author:** Yong-Hyeon Cho, Professor, Dept. of Landscape Architecture, Kongju National University, Yesan 32439, Korea, Tel.: +82-41-330-1446, E-mail: yhcho@kongju.ac.kr

저장량을 정량화하였다. 조사 대상지 21개소를 조사·분석한 결과, 대상지에 식재한 수종 수는 총 17개 수종이었으며, 대상지별로 평균  $2.86 \pm 0.13$ 종으로서 최소 1개 수종에서 최대 7개 수종이 식재된 것으로 나타났다. 흉고직경은 평균  $9.1 \pm 0.6$  cm, 수고는 평균  $6.2 \pm 0.3$ m, 뿌리량은 평균  $0.13 \pm 0.18$ g/cm<sup>3</sup>이었다. 토양특성을 조사·분석한 결과, 총 21개 항목 중 6개 항목인 용적밀도, 고상률, 석력비, 경도, 모래 함량, pH는 층위가 깊어질수록 증가하는 것으로 나타났고, 나머지 입단율, 함수율, 유기물, 전질소 등 15개 항목은 층위가 깊어질수록 감소하는 것으로 나타났다. 층위별 표토 유기탄소 저장량은 0~10cm에서  $11.54 \pm 1.08$ ton/ha, 10~20cm는  $8.69 \pm 0.81$ ton/ha, 20~30cm가  $7.97 \pm 0.79$ ton/ha로서 0~30cm까지의 총 표토 유기탄소 저장량은  $28.21 \pm 7.31$ ton/ha로 분석되었다. 과거 토지이용별 표토 유기탄소 저장량은 농경지였던 복원지가  $35.17 \pm 5.31$ ton/ha로 가장 높았고, 주거지역  $28.16 \pm 8.31$ ton/ha, 상업지역  $21.87 \pm 9.05$ ton/ha, 공업지역  $19.23 \pm 12.48$ ton/ha, 나지  $17.07 \pm 11.33$ ton/ha 순으로 나타났다. 조성연도별 표토 유기탄소 저장량은 2006년 조성된 복원지역이  $38.46 \pm 3.14$ ton/ha로 가장 높았고, 2016년 복원지역  $28.57 \pm 7.84$ ton/ha, 2011년 복원지역  $16.78 \pm 6.06$ ton/ha 순으로 분석되었다. 본 연구결과는 향후 수변구역 복원지의 탄소저감 효과 증진을 위한 기초자료 제공 및 평가기준이 될 것으로 기대된다.

주제어 : 표토, 탄소저장, 환경특성, 유기탄소, 토지이용

## 1. 서론

산업혁명 이후 산업화의 부작용으로 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 및 기타 온실가스(GHGs)의 대기농도가 크게 증가하였으며(Schlesinger, 1999; IPCC, 2001; Le Quéré, 2009), 이들 가스 중 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)는 화석 연료 연소에 의해 20세기 동안 급격히 증가하였다(Lal, 2004b). 지구 온난화의 주범인 온실가스 농도 증가에 따라 대기 온도 및 해수면 상승, 빙하 감소, 열섬현상 등 세계적으로 문제가 야기되고 있으며, 이러한 온실가스 농도는 최소한 지난 800,000년간 전례 없는 수준을 나타냈다(Park *et al.*, 2014). 배출량 대부분은 화석연료(이산화탄소 배출량의 80%) 연소로 인한 것이며, 나머지(10~30%)는 주로 토지이용 변화, 특히 산림 벌채로 인한 것이다(IPCC, 2001; Le Quéré, 2009; Park *et al.*, 2014).

기후변화에 따른 온실가스 배출저감 노력은 대체 에너지 개발, 에너지 이용 효율 제고 등 공학적 방법을 통해서 가능하다(RDA, 2013). 하지만 안전한 토양 구조 속에 많은 탄소량과 체류시간을 증가시키는 토양 탄소 격리는 대기 중 이산화탄소를 제어하는 중요한 기작 중 하나로서, 안전성과 비용 절감이라는 측면에서 감축 효과가 가장 큰 기술이라 할 수 있다(Lackner, 2003; RDA, 2013). 지구의 탄소 저장소는 해양, 지질, 토양, 생물 및 대기로서 총 5가지로 구분할 수 있으며(Lal, 2004a), 해양 다음으로 큰 탄소저장고인 토양의 탄소 저장량은 생물(식생 등)의 3~4배, 대기의 약 2~3배 정도이다(Lackner, 2003; Lal, 2004b; Waring and Running, 2007; Smith *et al.*, 2008). 토양은 육상 생태계의 가장 큰 탄소저장고를 대표하며, 전 세계적으로 탄소를 격리할 수 있는 가장 큰 잠재력을 가진 것 중 하나로 평가되어 있다(Jobbagy and Jackson, 2000; García-Oliva and Masera, 2004; Franzluebbers, 2008; Palosuo *et al.*, 2015; Me and KEITI, 2014). 이러한 토양 탄소는 경작

지가 초지나 녹지로 변경될 경우, 축적량이 증가할 수 있다(Guo and Gifford, 2002).

국내에서 토양 유기탄소 저장량을 증가시킬 수 있는 잠재지역으로 4대강 수변구역을 꼽을 수 있다. 왜냐하면 환경부는 4대강 분류 하천 주변의 일부를 수변구역으로 지정하고, 일정 행위를 제한하여 4대강 유역환경청을 통해 지속적으로 토지를 매수하고, 매수한 토지는 녹지를 조성하고 있기 때문이다(ME and HGWMC, 2013). 환경부가 지정한 수변구역은 제한된 국토 공간 내에서 상당한 규모의 녹지를 조성할 수 있는 잠재 공간으로써, 수질보전과 생물 서식의 효과에 부가하여 탄소 흡수 및 탄소 배출권 확보에 크게 기여할 수 있다(Jo and Park, 2015). 한강수계의 경우, 1999년 수변구역 지정 이후 2000년부터 2017년 12월 말까지 약 18년간 매수된 토지는 13,612km<sup>2</sup>로서 매수 대상 면적(1,403.7km<sup>2</sup>, 2017년 기준) 대비 약 1%이다. 이에 따라 향후 토지 매수 및 복원되어야 할 면적은 1,390,088 km<sup>2</sup>로 약 99%에 달한다(ME and HGWMC, 2018).

국내·외에서 토양 유기탄소와 관련한 연구는 산림지역(Jeong *et al.*, 1998; Won *et al.*, 2002; Lal, 2005; Suh *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2009; KFRI, 2010; Li *et al.*, 2010; Ju *et al.*, 2015; Kim, 2015; Seo *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2018), 농경지역(Bird *et al.*, 2002; Lal, 2002; Leifeld *et al.*, 2005; Park *et al.*, 2008a; Yang *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2012; Woo, 2013; Han *et al.*, 2014a; Cho *et al.*, 2015; Cho *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2016), 도시지역(Jo, 1999; Park and Kang, 2010; Jo and Park, 2015; Seo, 2015; Zhao *et al.*, 2016; Jung *et al.*, 2018)을 대상으로 연구되었다. 또한, 토지이용변화(Guo and Gifford, 2002; Don *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2012)에 따른 토양탄소 저장량 변화에 대해서도 수행되어 왔다. 하지만, 하천의 제내지를 대상으로 복원된 녹지의 표토에 대하여 층위별로 이화학적 특성과 표토 유기탄소를 정량화한 연구는 미흡하다.

대기 탄소 수준을 줄이기 위한 상세한 녹색 공간 계획 지침을 제공하기 위해서는 녹지 공간의 토양 탄소 저장량을 정량화하는 연구가 필요하다(Jo and McPherson, 1995). 그러나 수변구역의 녹지 조성은 초기 단계로써 사업에 따른 탄소저감 효과가 어느 정도인지, 탄소 저장 및 흡수 기능을 충족시키기 위해 어떻게 조성해야 하는지 등 관련 연구가 부재한 상황이다(Jo and Park, 2015). 지상부 식생 관련 연구보다 식재기반인 지하부 토양 관련 연구는 상대적으로 더욱더 부재한 상황이다.

따라서, 본 연구는 향후 조성될 수변구역 복원지의 지하부에 다량의 탄소가 저장되고 증대되도록 하고자 한다. 이에 앞서 현재까지 복원된 수변구역 복원지의 식생 및 토양 등의 환경 특성 현황을 파악하고, 표토 유기탄소 저장량을 정량화하였다. 본 연구는 향후 한강수계 수변구역의 99%에 해당하는 잠재적인 공간에 탄소저감 효과 증진을 위한 기초자료 및 평가 지표로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## II. 연구내용 및 방법

### 1. 조사지 개황

본 조사 지역인 한강수계 수변구역의 총면적은 186.937km<sup>2</sup>로 남한강, 북한강, 경안천을 포함하는 경기도 광주시, 남양주시, 여주시, 용인시, 가평군, 양평군, 강원도 원주시, 춘천시, 충청북도 충주시로 9개 시·군 40개 읍면에 걸쳐 있다. 중·획적 범위는 팔당호, 남한강(팔당댐~충주 조정지댐), 북한강(팔당댐~의암댐), 경안천의 양안 중 특별대책지역 1km 이내의 지역, 그 외의 지역은 500m 이내의 지역을 수변구역의 범위로 정의한다(HGWMC and KEC, 2007). 조사 지역에 포함된 서울, 춘천, 충주, 원주의 기상관측소 자료에 따르면 2016년 기준 한강유역의 연중 최고 기온은 36.6°C, 최저 기온은 -20.1°C, 평균 기온은 13.1°C, 연평균 강수량은 1,029.3mm, 풍속은 1.55m/s, 습도는 63.65%였다(http://www.kma.go.kr).

### 2. 대상지 선정

한강수계 수변구역을 대상으로 2005년~2016년 말까지 매수되어 복원된 수변구역 복원지의 관리대상과 식재현황 자료를 검토하여 가장 빈번하게 식재된 수종 상위 5종(상수리나무, 졸참나무, 느티나무, 산벚나무, 느릅나무)을 도출하고, 조성연도, 조성면적, 소재지 등을 고려하여 제내지에 복원된 21개소(남한강 6개소, 북한강 8개소, 경안천 7개소)를 조사 대상지로 선정하였다(Figure 1 및 Table 1 참조). 식재밀도가 현저히 낮거나(1~2주/100m<sup>2</sup>), 초본 혹은 관목만 식재한 조성지는 배제하였다. 또한, 방형구를 설치할 수 있는 일정 면적 이상의 조성지를 선별하되, 지역 배분을 고려한 계층적 임의표본추출(stratified

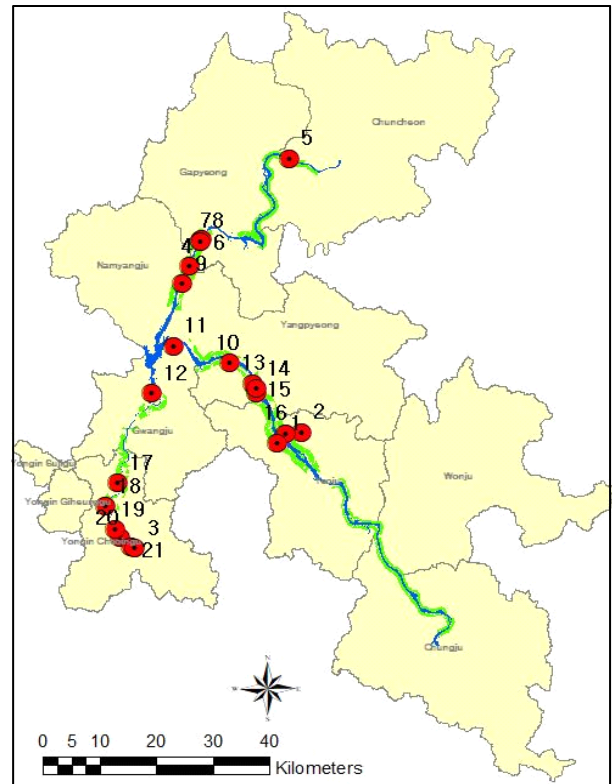


Figure 1. Location of study sites selected in riparian zones restoration area of the Han River watershed

Legend: ● Studies site    ■ River area    ■ Riparian zones

random sampling)을 통해 대상지를 선정하였다(Jo and Park, 2015).

### 3. 조사 및 분석

토양 호흡량이 많은 6~8월, 호흡량이 가장 낮은 12~2월(Han *et al.*, 2014b)을 제외하고, 낙엽량을 정량적으로 조사할 수 있으며, 토양 시료채취가 용이한 2018년 10~11월에 일반 환경, 식생 환경, 토양 환경으로 구분하여 현장 조사를 실시하였다. 지표가 심하게 교란된 곳이나 바람과 물에 의해 낙엽 낙지가 모이는 곳(KFRI, 2010), 기계 등에 의해 다져지거나, 물이 고인 곳을 피하여 교란의 영향이 최소인 곳을 중심으로(RDA, 2012) 지점을 선정하여 크기 10×10m의 방형 조사구를 설치하였다. 일반 환경 조사는 좌표, 경사, 방위, 토지이용, 토지피복 등을 조사하였고, 식생환경은 조사구의 모든 식재 수목을 대상으로 수종 조사와 함께 흉고직경과 수고를 측정하고, 식재밀도 식생 구조를 정량적으로 조사하였다.

토양 환경은 조사구에서 무작위로 3개 지점을 선정하여 0~30cm까지의 토양단면을 형성하고, 낙엽 및 부식층의 깊이를 확인하였다. 시료채취는 지름 5.1cm, 높이 5cm의 100mL 코어를 이용(Jo and McPherson, 1995; Bae and Ryu, 2015)하였고,

Table 1. The list of study sites at restoration areas in riparian zones of the Han River watershed

Num.	Management number	Address
1	Yeosu 44	150, Sangbaek-ri, Heungcheon-myeon, Yeosu-si, Gyeonggi-do
2	Yeosu 5	76-1, Chohyeon-ri, Daesin-myeon, Yeosu-si, Gyeonggi-do
3	Yongin 34	352, Haegok-dong, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do
4	Namyangju 65	1708-33, Bukhangang-ro, Hwado-eup, Namyangju-si, Gyeonggi-do
5	Chuncheon 17	643-4, Anbo-ri, Seo-myeon, Chuncheon-si, Gangwon-do
6	Gapyeong 7	118-1, samhoe-ri, Cheongpyeong-myeon, Gapyeong-gun, Gyeonggi-do
7	Gapyeong 4	108-5, samhoe-ri, Cheongpyeong-myeon, Gapyeong-gun, Gyeonggi-do
8	Gapyeong 13	189-4, samhoe-ri, Cheongpyeong-myeon, Gapyeong-gun, Gyeonggi-do
9	Yangpyeong 147	592-107, Munho-ri, Seojong-myeon, Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do
10	Yangpyeong 142	664-10, Gangnam-ro, Gangsang-myeon, Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do
11	Gwangju 173	555, Geomcheon-ri, Namjong-myeon, Gwangju-si, Gyeonggi-do
12	Gwangju 123	8-7, Musu-ri, Toechon-myeon, Gwangju-si, Gyeonggi-do
13	Yangpyeong 260	579, Hoehyeon-ri, Yangpyeong-eup, Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do
14	Yangpyeong 262	320, Hoehyeon-ri, Yangpyeong-eup, Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do
15	Yangpyeong 263	77, Angdeok-ri, Gaegun-myeon, Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do
16	Yeosu 47	561-2, Botong-ri, Daesin-myeon, Yeosu-si, Gyeonggi-do
17	Yongin 02	51-4, Yuun-ri, Pogok-eup, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do
18	Yongin 43	12, Yurim-ro 90beon-gil, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do
19	Yongin 259	23, Dongbu-ro 162beon-gil, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do
20	Yongin 163	23, Dongbu-ro 162beon-gil, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do
21	Yongin 165	325, Ho-dong, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do

유기물층을 제거하고 깊이 30cm까지 층위별(0~10, 10~20, 20~30cm)로 방형구 내 3개 지점을 채취하여 총 189개의 토양 시료를 채취하였다. 연구조사분석기준(RDA, 2012)의 토양분석방법에 따라 식재지반의 이화학성을 분석하였다(단, 토성과 토양 화학성 분석을 위한 토양 시료는 동일 조사구 내 동일층

위 시료를 250g씩 혼합하여 총 63개 시료를 분석하였음). 입단율과 뿌리 함량 조사는 토양 시료 채취 방법과 동일하며, 실험실로 가져와 48시간 풍건 후 입단율은 내수성 입단분석기(Wet sieving apparatus, Eijkelkamp, Netherlands)를 이용하여 분석하였고, 뿌리 함량은 증류수를 사용하여 0.25mm 체로 통과시켜 유지된 토양 뿌리를 모아 60°C에서 건조 후 층위별로 무게를 측정하였다(Nelson and Sommers, 1982; Reeder and Schuman, 2002).

낙엽량 조사는 조사구 내에서 3개 지점을 선정하여 30cm×30cm의 정방형구를 낙엽층 위에 얹혀놓고, 내부에 살아있는 식생을 모두 제거하였다(KFRI, 2010). 이 후 전정가위로 안쪽 가장자리를 따라 낙엽, 낙지 등을 자르고, 방형구 내에 낙엽을 지퍼백에 담아 실험실로 운반하여(KFRI, 2010), 85°C 건조기에서 24시간 건조시켜 무게를 측정하였다(KFRI, 2007). 토양 층위별 표토 특성 및 탄소 함량 비교를 위해 SPSS statistics 24를 사용하여 일원 분산분석(one-way ANOVA)을 시행하고, 통계적으로 유의성이 인정된 평균값 간의 차이 확인을 위하여 Duncan의 다중범위검정을 실시하였다.

#### 4. 유기탄소 저장량

토양 시료는 층위별로 구분하여 무게를 측정한 용기에 담고, 건조기(DS-FCPO49, LAB24, KOR)에서 105°C로 24시간 동안 건조시켜 무게를 측정하였다(USDA-NRCS, 1992; Edmondson *et al.*, 2011). 용적밀도는 채취한 깊이별 시료의 건조량을 코어의 부피로 나누어 계산하고, 석력비의 경우 채취한 깊이별 토양 시료에서 입자크기 2mm 이상의 석력 무게를 측정하였다(KFRI, 2010). 전처리 과정을 거쳐 건조된 깊이별 토양 시료는 원소분석기(Flash 2000, Thermo Fisher Scientific, U.K)를 이용하여 건식연소법으로 유기탄소 함량을 분석하였다. 용적밀도, 석력비, 유기탄소 함량을 이용하여 깊이별 탄소 저장량을 구하고, 단위면적으로 환산하여 토양 깊이까지의 총 유기탄소 저장량을 계산하였다. 토양 유기탄소 저장량 산정식(Boix-Fayos *et al.*, 2009; KFRI, 2010; Rodríguez-Murillo, 2001; Muñoz-Rojas *et al.*, 2012)은 아래와 같다.

$$\text{SOCS}(\text{Mg}/\text{ha}) = T \times \text{BD} \times C \times (1 - \text{CF})$$

SOCS: 토양 유기탄소 저장량, T: 토양의 두께(cm),

BD: 토양 용적밀도( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) C: 유기탄소 함량(%),

CF: 석력비

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 일반 현황

한강수계 수변구역 조사 대상지의 면적은 지점에 따라 1,176~11,233m<sup>2</sup> 범위로서 평균 3,487.6±161.9m<sup>2</sup>이었고, 해발고도는 40~150m까지 평균 64.05±2.7m에 위치하는 것으로 나타났다. 경사는 1~12.3%이며, 평균 3.7±0.2%로 대부분 평지에 위치하였다. 대상지 주변지역의 주된 토지이용은 주거지가 5개소(23.8%), 상업지역 3개소(14.3%), 농경지 10개소(47.6%), 녹지 3개소(14.3%)로 조사되었고, 대상지의 과거 토지이용은 주거지가 3개소(14.3%), 상업용지가 2개소(9.5%), 공업용지 2개소(9.5%), 나지 4개소(19%), 농경지가 10개소(47.6%)로서 농경지였던 복원지가 가장 많았다. ME and HGWMC(2018)의 보고에서도 복원이 필요 없는 임야(56.9%)를 제외하면 농경지가 전체의 25.1%로 가장 많은 것으로 조사되었다. 대상지별 토지피복은 피복식물로 피복된 곳이 10개소(47.6%)로 가장 많았고, 오랜 시간 동안 축적된 낙엽으로 피복된 지점이 9개소(42.9%)였으며, 토양상태가 척박하거나 최근에 조성되어 토양상태 그대로 유지되는 곳이 2개소(9.5%)로 조사되었다. 수변구역 복원지의 토지피복은 초기에 묘목 식재로 인하여 나지 혹은 초본류로 피복되었다가 이후 수목이 일정 수준 성장하면 낙엽과 초본류가 혼재하고, 시간이 더 경과하면 낙엽으로 피복되는 것으로 나타났다.

## 2. 식생 현황

대상지에 식재한 수종은 총 17개였으며, 대상지별 평균 2.86±0.13종으로 최소 1개 수종에서 최대 7개 수종이 식재된 것으로 나타났다. 상대밀도가 높은 상위 5개 수종은 상수리나무(*Quercus acutissima*) 44.1%로 가장 높았으며, 느티나무(*Zelkova serrata*) 25.5%, 졸참나무(*Quercus serrata*) 8.5%, 갈참나무(*Quercus aliena*) 3.6%, 굴참나무(*Quercus variabilis* Blume) 3.2% 순으로 나타났다. 식재밀도는 100m<sup>2</sup>당 5주 이상 10주 미만인 지점이 총 21개소 중 9개소(42.9%)로 가장 많았으며, 10~15주 미만인 지점이 5개소(23.8%), 15~20주 미만인 지점이 6개소(28.6%), 20주 이상인 지점이 1개소(4.8%)로 평균 11.5±0.4주/100m<sup>2</sup>로 나타났다. Jo and Park(2015)의 10.4주/100m<sup>2</sup>보다는 조금 높았으나, 국내 자연수변림의 평균치(CAER, 2014) 16주/100m<sup>2</sup>보다는 낮은 수준이었다.

흉고직경은 평균 9.1±0.6cm로 대상지에 따른 범위는 0.5~34cm였다. 6cm 이하의 묘목이 전체 247주 중 139주(56.3%)로 가장 많았으며, 7~10cm 미만이 39주(15.8%), 10~15cm 미만이 41주(16.6%), 15~20cm 미만이 23주(9.3%), 20~25cm 미만이 4주(1.6%), 30cm 이상이 1주(0.4%)로 조사되었다. Jo and Park(2015)의 연구에서는 6cm 이하의 묘목이 전체의 47%로 약 10% 가량 차이가 있는 것으로 나타났다. 선행 연구에서는 조성된 지 5년 이상 된 복원지를 대상으로 조사하였고, 본 연구에서는 조성 후 2년 이상 된 복원지부터 포함되어 상대적

으로 묘목의 수가 많은 것으로 판단된다.

수고는 평균 6.2±0.3m로 대상지에 따른 범위는 1.2~15m이었다. 2m 이하의 수목은 전체 247주 중 73주(29.6%), 2~5m 미만은 44주(17.8%), 5~10m 미만은 94주(38.1%), 10~15m 미만은 34주(13.8%), 15m 이상이 2주(0.8%)로 나타남에 따라 5~10m의 수목이 가장 많은 것으로 나타났다. 낙엽 및 부식층은 대상지에 따라 0~2.5cm까지 평균 0.9±0.04cm인 것으로 나타났다. 단위면적당 낙엽량은 평균 3.97±0.41g/m<sup>2</sup>로 나타났다. 조성 후 오랜 시간이 지난 복원지는 상대적으로 낙엽량과 부식층이 발달했으며, 일부 지점에서는 조성 기간이 상당 시간 지났음에도 불구하고, 과거 토지이용 및 토양특성에 따라 최근 복원지보다 낮은 곳도 적지 않게 조사되었다.

뿌리 함량은 평균 0.13±0.18g/cm<sup>3</sup>로 최소 0에서 최대 0.73g/cm<sup>3</sup>로 나타났다. 일원배치 분산분석(one-way ANOVA) 결과, 층위별로 뿌리 함량( $F=21.740, p<0.000$ )에 유의한 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 0~10cm 구간에서 뿌리 함량은 평균 0.26±0.4g/cm<sup>3</sup>(68.4%)로 나타났고, 10~20cm 구간은 0.07±0.1g/cm<sup>3</sup>(18.4%), 20~30cm 구간은 0.05±0.1g/cm<sup>3</sup>(13.2%)로 토양 층위가 깊어질수록 뿌리 함량은 줄어드는 것으로 나타났다. Qin *et al.*(2017)에서 자연수변림 0~20cm까지의 뿌리 함량은 4.1±2.29g/cm<sup>3</sup>, 대나무림에서는 5.6±2.61g/cm<sup>3</sup>로서 본 연구와 차이가 있었다. 이는 오랜 기간 지속되어온 자연림과 조성된 지 12년 이하의 복원지이기 때문에 나타나는 차이라고 판단된다. Bae and Ryu(2015)는 인위적으로 조성된 서울숲의 혼효림, 상록침엽수림, 낙엽활엽수림 및 습지의 경우 토양 1m 깊이 중 10cm 내에 뿌리 함량이 60.4%, 79.6%, 66.1%, 73.4%가 분포한다고 보고한 바 있어, 본 연구와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

## 3. 토양 현황

### 1) 물리적 특성

한강 수변구역 복원지 21개소의 층위별(0~10cm, 10~20cm, 20~30cm) 토양 물리성 12개 항목을 조사·분석한 결과, 6개 항목인 용적밀도, 함수율, 고상률, 공극률, 입단율, 경도가 유의미한 차이를 보였고, 나머지 6개 항목인 액상, 기상, 석력비, 모래, 미사, 점토에서는 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났다(Table 2 참조). 토양 층위별 용적밀도는 1.3~1.43g/cm<sup>3</sup>, 석력비는 0.22~0.26의 범위를 보였다. 용적밀도의 경우, 0~10cm에서 1.3±0.03g/cm<sup>3</sup>로 가장 낮은 것으로 나타났고, 석력비 또한 같은 구간에서 0.22로 가장 낮게 나타났으며, 두 변수 모두 토양 층위가 깊어질수록 증가하는 경향을 보였다. KFRI(2010)의 상수리나무림의 용적밀도 0.8±0.06g/cm<sup>3</sup>보다는 높았고, 석력비 0.25±0.05보다는 낮은 것으로 나타났다. 하지만, Jeong *et al.*(2003) 및 KFRI(2010)와 같이 지하부로 갈수록 용적밀도 및 석

Table 2. Analysis of physical soil properties by layer

Division		M	SE <sup>1)</sup>	F	P
Bulk density	0~10cm	1.3 <sup>a</sup>	0.03	6.344	.003*
	10~20cm	1.42 <sup>b</sup>	0.03		
	20~30cm	1.43 <sup>b</sup>	0.03		
Coarse fragments	0~10cm	0.22 <sup>a</sup>	0.27	.569	.569
	10~20cm	0.24 <sup>a</sup>	0.03		
	20~30cm	0.26 <sup>a</sup>	0.04		
Moisture content	0~10cm	17.46 <sup>b</sup>	4.91	4.263	.019*
	10~20cm	14.25 <sup>a</sup>	3.12		
	20~30cm	14.15 <sup>a</sup>	4.33		
Solid ratio	0~10cm	49 <sup>a</sup>	1.18	6.189	.004**
	10~20cm	53.63 <sup>b</sup>	1.15		
	20~30cm	54.06 <sup>b</sup>	1.05		
Liquid ratio	0~10cm	22.07 <sup>a</sup>	1.34	.183	.834
	10~20cm	21.35 <sup>a</sup>	1.43		
	20~30cm	20.89 <sup>a</sup>	1.41		
Gas ratio	0~10cm	28.92 <sup>a</sup>	1.41	2.898	.063
	10~20cm	25.02 <sup>a</sup>	1.39		
	20~30cm	25.05 <sup>a</sup>	1.13		
Porosity	0~10cm	53.77 <sup>b</sup>	1.26	28.137	.000**
	10~20cm	44.45 <sup>a</sup>	0.92		
	20~30cm	43.9 <sup>a</sup>	0.92		
Aggregate percentage	0~10cm	54.36 <sup>b</sup>	3.75	4.500	.015*
	10~20cm	41.35 <sup>a</sup>	3.84		
	20~30cm	39.07 <sup>a</sup>	4.07		
Soil hardness	0~10cm	16.08 <sup>a</sup>	0.6	12.783	.000**
	10~20cm	18.92 <sup>b</sup>	0.7		
	20~30cm	21.11 <sup>c</sup>	0.8		
Sand	0~10cm	67.68 <sup>a</sup>	2.21	.276	.760
	10~20cm	69.56 <sup>b</sup>	2.24		
	20~30cm	69.79 <sup>a</sup>	2.16		
Silt	0~10cm	16.11 <sup>a</sup>	1.21	.189	.828
	10~20cm	15.36 <sup>a</sup>	1.24		
	20~30cm	15.08 <sup>a</sup>	1.23		
Clay	0~10cm	16.21 <sup>a</sup>	1.05	.370	.692
	10~20cm	15.08 <sup>a</sup>	1.08		
	20~30cm	15.13 <sup>a</sup>	1.01		

<sup>1)</sup>: Standard error

\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$

<sup>a, b, c</sup>: A result of Duncan's multiple range test

력이 증가하는 부분은 유사하게 나타났다. 이는 입경분포, 유기물함량, 토양구조, 공극률, 점토의 집적 차이 등과 관련이 있는 것으로 사료된다(Jeong *et al.*, 2003).

토양 층위별 함수율 범위는 14.15~17.46%로서 토층 0~10cm 구간에서 17.46±1.07%로 한국 산림토양의 함수율 15.6%(Lee, 1981), 춘천 도심지 9.0%(Jo and Han, 1999)보다 높았다. 토층 10~20cm 구간과 20~30cm 구간에서는 14.25±0.68%, 14.15±0.94%로 춘천 도심지 토양보다 높았으나, 산림토양에 비해서는 낮은 것으로 나타났다. 이는 도심지에 비해 산림 및 복원지가 식피율이 높아 상대적으로 수분 증발량이 낮아서 나타나는 결과로 사료된다. 또한, 10~30cm 구간에 비해 0~10cm 구간에서 수분함량이 높은 것은 미사 및 점토의 함량과 유기물 함량이 높아 보수성이 높아진 것으로 판단된다.

토양삼상 중 고상률은 49.0~54.06%로서 토층 0~10cm 구간에서 가장 낮은 49±1.18%로 나타났으며, 20~30cm 구간에서 54.06±1.05%로 가장 높게 나타났다. 액상률은 20.89~22.07% 범위 중 0~10cm 구간에서 가장 높은 22.07±1.34%이었고, 20~30cm 구간에서 가장 낮은 20.89±1.41%이었다. 기상율은 25.02~28.92%로서 0~10cm 구간에서 가장 높은 28.92±1.41%로 나타났고, 10~20cm 구간에서 가장 낮은 25.02±1.39%로 나타났다. 공극률은 0~10cm 구간에서 53.77±1.26%이었고, 10~20cm 구간은 44.45±0.92%, 20~30cm가 43.90±0.92%로 지상부 10cm 이내에서 공극률이 가장 높았으며, 지하부로 내려갈수록 공극률은 낮아지는 것으로 나타났다. 전반적으로 고상률은 지하부로 갈수록 높아지고, 액상률과 기상률 그리고 공극률은 지하부로 갈수록 낮아지는 경향이 나타남에 따라 Jeong *et al.*(2003)의 산림지역 층위별 토양삼상 특성과 유사한 것으로 나타났다.

층위별 입단율의 경우, 39.07~54.36%로서, 토층 0~10cm 구간에서 54.36±3.75%로 가장 높게 나타났고, 10~20cm 구간이 41.35±3.84%, 20~30cm 구간이 39.07±4.07%로 가장 낮게 나타났다. 입단율은 유기물 함량과 점토 함량에 영향을 받기 때문에(Park *et al.*, 2008b) 상대적으로 점토 함량과 유기물 함량이 높은 0~10cm 부근에서 가장 높게 나타난 것으로 사료된다.

층위별 토양 경도는 16.08~21.11mm로서 토층 0~10cm 구간에서 가장 낮은 16.08±3.75mm로 나타났고, 20~30cm 구간에서 21.11±0.80mm로 가장 높게 나타났다. 0~10cm 구간의 토양 경도는 Lee *et al.*(2015)의 훼손 전 토양 경도 9.78±3.70mm 보다는 높게 나타났으나, 훼손 후의 토양 경도 19.33±3.74mm 보다는 낮은 것으로 나타남에 따라 수변구역 복원지 토양 경도는 자연지보다는 높고, 훼손지보다 낮은 것으로 분석되었다.

층위별 토양 입경분포는 모래 67.68~69.79%, 미사 15.07~16.11%, 점토 15.13~16.21% 범위로서, 모래 함량은 0~10cm 구간에서 가장 낮았으며, 층위가 깊어갈수록 함량이 높아졌다.

미사와 점토 함량은 모래 함량과 반대로 0~10cm 구간에서 가장 높았으며, 층위가 깊어갈수록 함량이 낮아지는 것으로 나타났다(Figure 2 참조). Jung *et al.*(1994)은 세립질인 미사 및 점토가 공극을 통한 물리적 이동으로 B층에 집적되어 상층에 비해 상대적으로 하부에 미사 및 점토함량이 더 높게 나타났다고 보고하였으나, 본 연구와 차이를 보이는 것으로 나타났다. 전반적인 토성은 총 4개 유형으로 구분되었으며, 사양토(SL)가 73.0%로 가장 많았고, 사질식양토(SCL) 15.9%, 양질사토(LS) 6.3%, 식양토(CL) 4.8% 순으로 나타났다. 토성의 차이는 과거 토지이용에 따라 달라질 수 있으며, 사양토의 비중이 높은 것은 토양환경이 불량한 지역의 경우 복원 전 토양특성

분석을 시행하여 복토 및 개토 등의 물리성 개량을 시행하기 때문에 판단된다(HGWMC and KEPA, 2016).

2) 화학성

층위별 토양 화학성 9개 항목을 조사·분석한 결과, pH, 유기물을 비롯해 모든 화학성 항목의 유의성은 없는 것으로 나타났다(Table 3 참조). 토층별 토양 pH는 6.35~6.55로서 춘천지역 도심지 6.6과 비슷한 것으로 나타났고(Jo and Han, 1999), 하천 복원지 6.5~8.2보다는 낮게 나타났으며(Cho *et al.*, 2013), 한국 자연지의 평균치인 5.5보다는 높은 것으로 나타났다(Lee, 1981). 토양 pH에 영향을 주는 인자는 부식층, 모암, 토양의

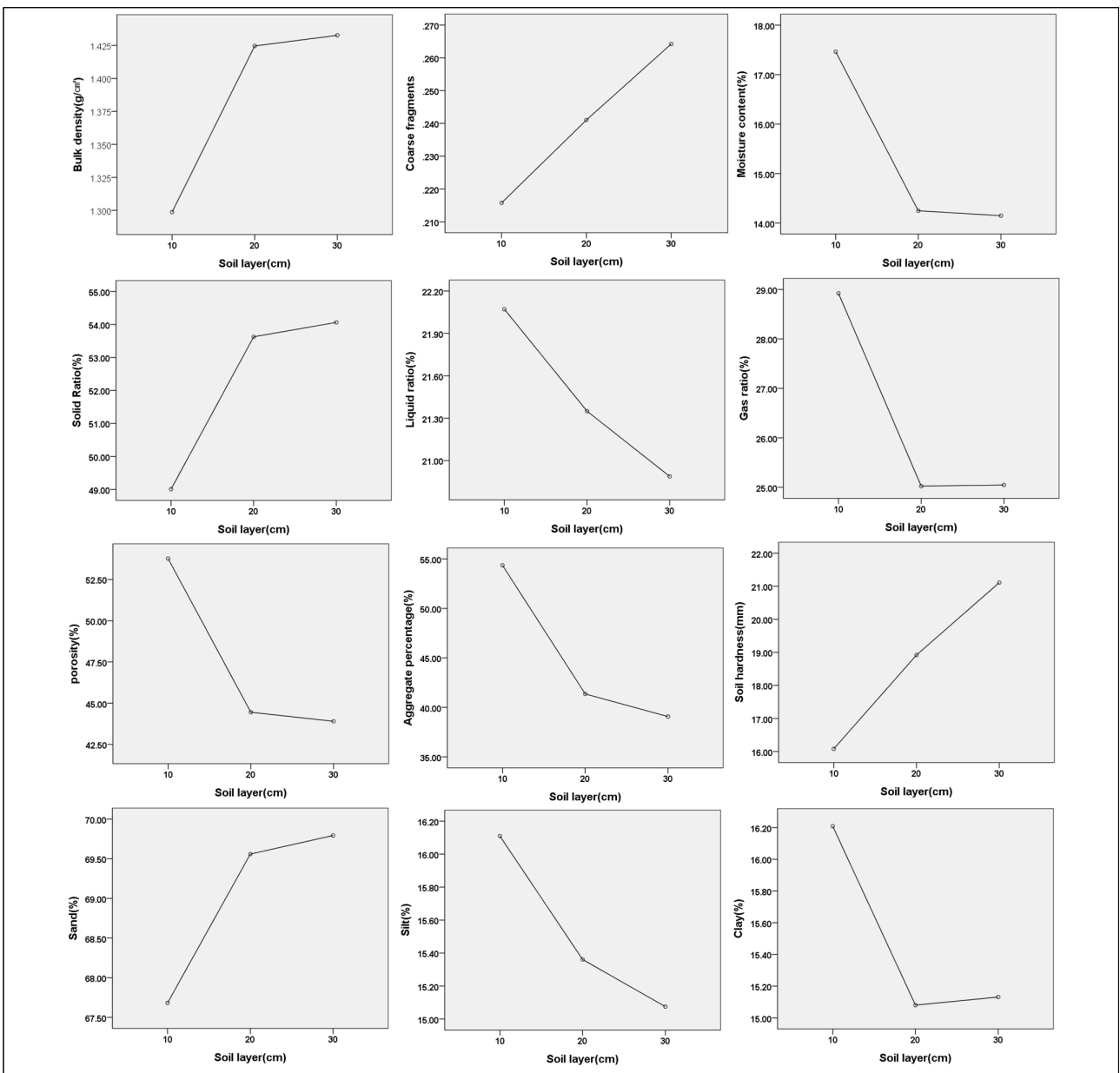


Figure 2. Comparison of changes in physical soil properties by layer

Table 3. Analysis of chemical soil properties by layer

Division		M	SE <sup>1)</sup>	F	P
pH	0~10cm	6.35 <sup>a</sup>	0.14	.460	.634
	10~20cm	6.51 <sup>a</sup>	0.16		
	20~30cm	6.55 <sup>a</sup>	0.17		
E.C	0~10cm	0.08 <sup>a</sup>	0.01	2.095	.132
	10~20cm	0.06 <sup>a</sup>	0.01		
	20~30cm	0.06 <sup>a</sup>	0.01		
C.E.C	0~10cm	9.21 <sup>a</sup>	0.64	.918	.405
	10~20cm	8.26 <sup>a</sup>	0.63		
	20~30cm	8.10 <sup>a</sup>	0.61		
O.M	0~10cm	1.94 <sup>a</sup>	0.30	.188	.188
	10~20cm	1.44 <sup>a</sup>	0.27		
	20~30cm	1.26 <sup>a</sup>	0.23		
T-N	0~10cm	0.09 <sup>a</sup>	0.01	.026	.974
	10~20cm	0.08 <sup>a</sup>	0.01		
	20~30cm	0.08 <sup>a</sup>	0.02		
Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0~10cm	154.55 <sup>a</sup>	31.61	.155	.857
	10~20cm	139.03 <sup>a</sup>	33.02		
	20~30cm	129.87 <sup>a</sup>	30.46		
K <sup>+</sup>	0~10cm	0.23 <sup>a</sup>	0.03	.885	.418
	10~20cm	0.19 <sup>a</sup>	0.03		
	20~30cm	0.19 <sup>a</sup>	0.03		
Ca <sup>++</sup>	0~10cm	6.28 <sup>a</sup>	0.62	.297	.744
	10~20cm	7.63 <sup>a</sup>	1.61		
	20~30cm	7.71 <sup>a</sup>	1.88		
Mg <sup>++</sup>	0~10cm	0.82 <sup>a</sup>	0.10	1.022	.366
	10~20cm	0.65 <sup>a</sup>	0.10		
	20~30cm	0.65 <sup>a</sup>	0.10		

1): Standard error

\* p&lt;0.05, \*\* p&lt;0.01

a, b, c: A result of Duncan's multiple range test

질산화물, 식생에 의한 양이온 흡수, 최근 증가하는 환경 오염물질 등에 의해 시·공간적으로 변화를 보이는 바(Armson, 1977), 자연지 토양은 식생 발달로 인하여 양이온 흡수 증가에 의해 수소이온을 방출하여 산성화가 진행되며(Hur *et al.*, 2009), 개발 지역의 토양 pH는 시멘트, 콘크리트, 아스팔트 등의 환경 오염물질 영향에 따라 Ca 함량이 증가하여 결과적으로 토양 pH가 상승하는 것으로 판단된다(Kim *et al.*, 2014).

층위별 전기전도도(Electrical conductivity)는 0.06~0.08dS/m로 0~10cm 구간에서 가장 높은 0.08±0.009dS/m이었고, 10~20cm 구간에서 0.06±0.008dS/m, 20~30cm 구간에서 0.06±0.008dS/m 순으로 분석되어, KILA(2007)의 토양 평가등급에 상급인 0.2dS/m 미만에 포함되는 것으로 분석되었다. 전기전도도는 염류와 상관성이 있는 항목으로 염류인 Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>이온이 상대적으로 토층 상부에서 높고, 하부로 갈수록 낮아

짐에 따라 동일하게 나타나는 것으로 판단된다.

층위별 양이온치환용량(Cation exchange capacity)도 마찬가지로 0~10cm 구간에서 9.21±0.64cmol<sup>+</sup>/kg으로 가장 높게 나타났으며, 10~20cm는 8.26±0.63cmol<sup>+</sup>/kg, 20~30cm 구간이 8.10±0.61cmol<sup>+</sup>/kg으로 가장 낮게 나타났다. 국내 산림토양의 평균치인 11.3cmol<sup>+</sup>/kg보다는 낮게 나타났고(Lee, 1981), 춘천 도심지 5.0cmol<sup>+</sup>/kg보다는 높게 나타났으며, 춘천 자연지 8.6cmol<sup>+</sup>/kg(Jo and Han, 1999), 하천 복원지역 5.3~11.3cmol<sup>+</sup>/kg(Cho *et al.*, 2013)과 비슷한 수준인 것으로 분석되었다. 일반적으로 양이온치환용량은 점토함량과 유기물함량과 밀접한 관계가 있기 때문에(Armson, 1977; Lee, 1981; Kim, 2008) 이들 항목과 유사하게 나타나는 것으로 판단된다.

토양 층위별 유기물 함량(Organic matter)은 0~10cm 구간에서 1.94±0.30%, 10~20cm가 1.44±0.27%, 20~30cm 구간이 1.26±0.23%로 분석됨에 따라 상부에서 가장 높게 나타났고, 하부로 갈수록 점차 줄어드는 것으로 나타났다. 산림 개발을 위한 훼손지역의 토양 유기물함량 0.7~1.8%(Kim *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2015)보다는 비교적 높았고, 국내 산림지역의 평균치 3.2%보다는 작은 것으로 나타났다.

이 외에 전질소 함량(Total nitrogen), 유효인산(Available phosphate), 치환성 양이온(Exchangeable cation) 중 K<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup> 이온도 앞선 항목들과 마찬가지로 0~10cm 구간에서 가장 높은 수치를 보였으며, 토양 층위가 내려갈수록 수치가 낮아지는 것으로 나타났다. 다만, Ca<sup>++</sup>이온의 경우, 0~10cm 구간에서 6.28±0.62cmol<sup>+</sup>/kg으로 가장 낮게 나타났고, 10~20cm 구간이 7.63±1.62cmol<sup>+</sup>/kg, 20~30cm 구간이 7.71±1.88cmol<sup>+</sup>/kg으로 층위가 깊어질수록 더 높게 나타났다(Figure 3 참조). 이는 조사 지점 중 10~30cm 구간 사이에서 건설폐기물인 아스팔트 및 시멘트 잔여물 등이 발견됨에 따라서 상대적으로 하층부의 Ca 농도가 매우 높아진 것으로 판단된다(Table 3 참조).

#### 4. 표토 유기탄소 저장량 추정

##### 1) 층위별 표토 유기탄소 저장량

한강 수변구역 복원지의 층위별 표토 유기탄소 저장량을 분석한 결과, 0~10cm 구간에서 11.54±1.08ton/ha, 10~20cm 구간은 8.69±0.81ton/ha, 20~30cm 구간이 7.97±0.79ton/ha로 총 표토 유기탄소 저장량은 28.21±7.31ton/ha로 분석되었다(Figure 4 참조). 표토 유기탄소 저장량은 국내 산림의 토양 유기탄소 저장량 43.76~54.70ton/ha(KFRI, 2010; Jo and Ahn, 2013; Seo *et al.*, 2016)보다 확연히 낮게 나타났으나, 춘천 도심지역의 0~30cm까지의 유기탄소 저장량 16.2±1.2ton/ha(Jo, 1999)와 대전지역 갑천 및 유등천변 유기탄소 저장량 12.44±7.70ton/ha, 13.33±4.93ton/ha(Seo, 2015)보다 높게 나타났으며, 4대강 수변



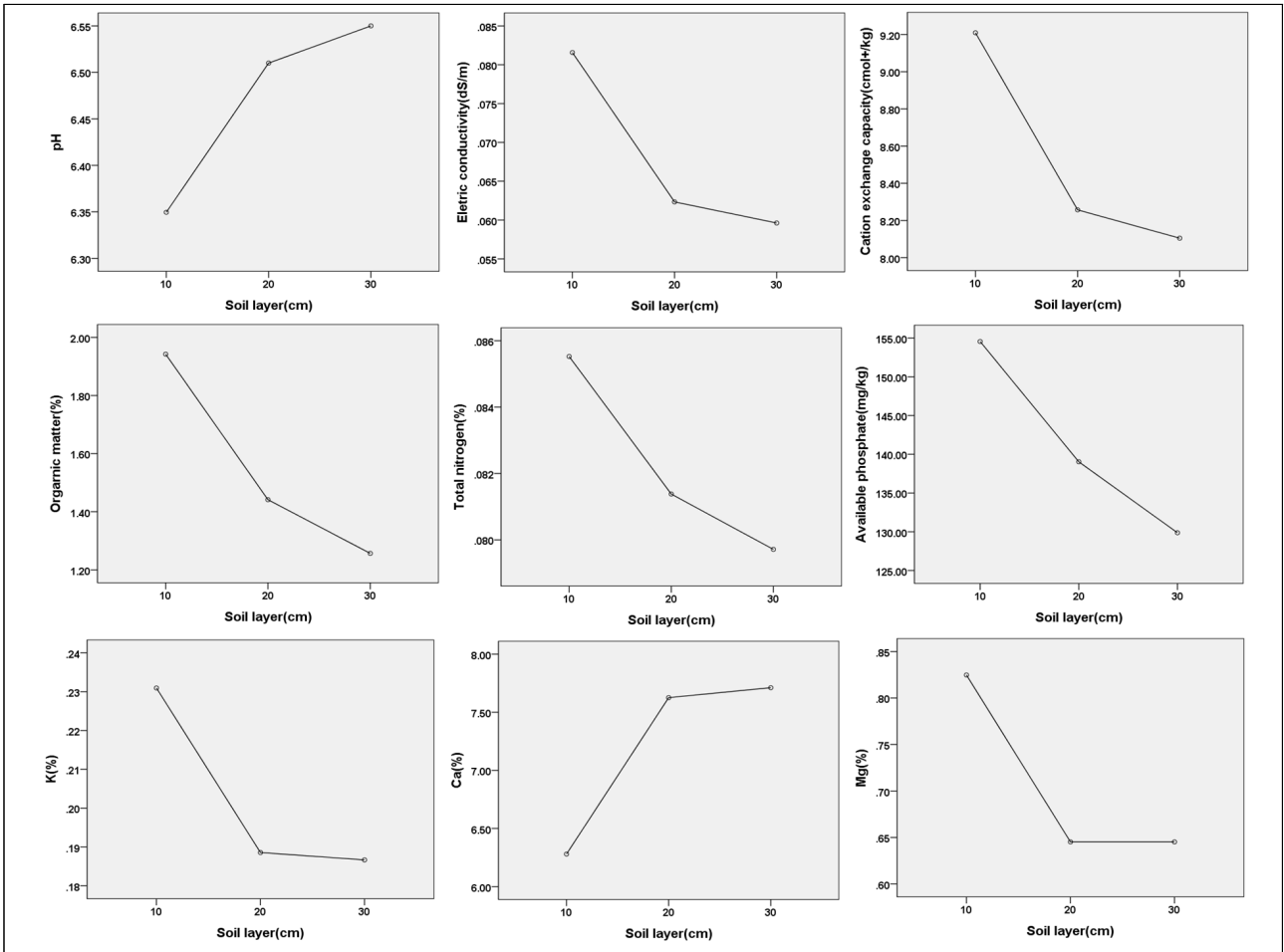


Figure 3. Comparison of changes in chemical soil properties by layer

구역 토양 유기탄소 저장량 26.4±1.5ton/ha(Jo and Park, 2015)와 유사하게 나타났다.

표토 층위별 유기탄소 저장량은 0~10cm 구간에서 가장 높은 값을 보였으며, 토양의 깊이가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 낙엽이 낙지 등의 분해 잔재와 식생의 뿌리가 주로 상부에 분포하기 때문이다(Jo and Han, 1999). 산림분야의

연구들(Lee and Mun, 2005; KFRI, 2010; Seo *et al.*, 2016)과 도시지역의 연구들(Jo and Han, 1999; Bae and Ryu, 2015; Seo, 2015) 모두 저장량은 차이가 있었지만, 층위별로 저장되는 패턴은 유사하게 나타났다.

2) 과거 토지이용별 표토 유기탄소 저장량

한강 수변구역 복원지 21개소에 대하여 과거 토지이용에 따른 조성 후 토양 유기탄소 저장량을 비교하였다. 비교 결과, 농경지로 사용되었던 복원지역의 표토 유기탄소 저장량은 35.17±5.31ton/ha로 가장 높았고, 주거지였던 복원지가 28.16±8.31 ton/ha, 상업지역이었던 복원지가 21.87±9.05ton/ha, 공업지역이었던 복원지가 19.23±12.48ton/ha, 나지였던 복원지가 17.07±11.33ton/ha로 나타났다. 농경지는 타 토지이용에 비해 비옥한 토양 조성을 위해 보다 세밀한 토양관리가 이루어진다. 때문에 토양 유기탄소 저장량과 관련 있는 용적밀도, 유기물 함량, 석력비, 점토함량, 토양삼상(Lee *et al.*, 2019)과 같은 토양특성 인자들이 상대적으로 양호한 것에서 비롯된 결과로 판단된다 (Figure 5 참조).

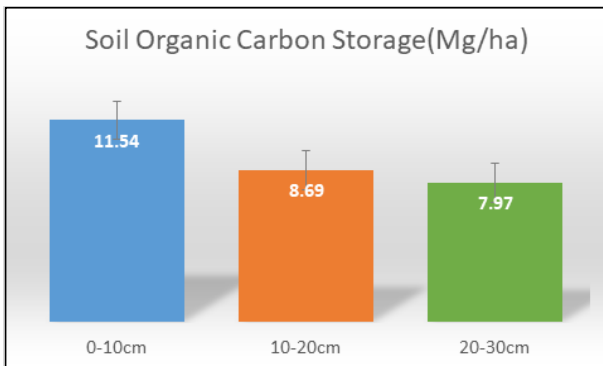


Figure 4. Amount of soil organic carbon storage by soil layer

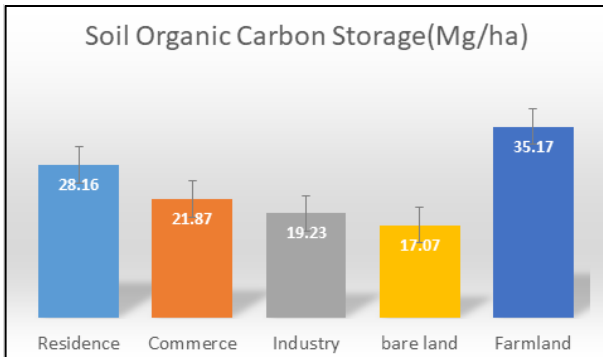


Figure 5. Amount of soil organic carbon storage by land use in the past

3) 조성연도별 표토 유기탄소 저장량

한강 수변구역 복원지를 조성연도별(2006년도 7개소, 2011년도 7개소, 2016년도 7개소)로 표토 유기탄소 저장량을 분석한 결과, 2006년에 조성된 복원지가 38.46±3.14ton/ha로 가장 높았고, 2016년에 조성된 복원지 28.57±7.84ton/ha, 2011년에 조성된 복원지 16.78±6.06ton/ha 순으로 분석되었다. 2011년에 조성된 복원지는 토양 유기탄소 저장량과 음의 상관관계가 있는 용적밀도, 석력비, 고상, 모래 함량이 상대적으로 높았고, 양의 상관관계가 있는 공극률, 입단율(Lee *et al.*, 2019)은 낮아서 나타난 결과라 판단된다(Figure 6 참조).

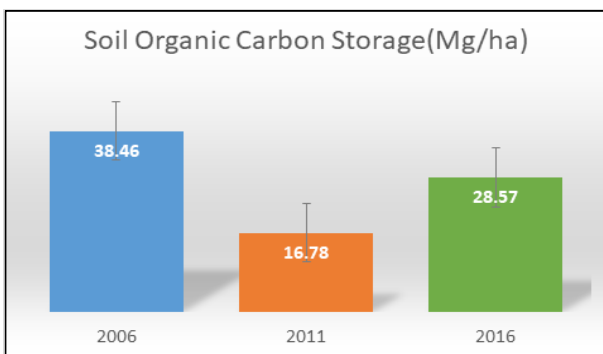


Figure 6. Amount of soil organic carbon storage by greening year

IV. 결론

현재 기후변화에 따른 온실가스 배출저감 노력은 대체 에너지 개발, 에너지 이용 효율 제고 등 공학적 방법(RDA, 2013)으로 가능하지만, 시간과 비용 절약 측면을 고려하면 생태계를 이용하는 방법이 가장 효율적이라고 판단된다. 국내에서는 이러한 잠재 공간으로 수변구역이 대표적이다. 그 이유는 국가에서 지속적 매수 및 녹지로 복원하는 공간이기 때문에 올바른 방향으로 수변녹지를 조성·관리한다면 향후 국가 탄소배출권 확보에 상당한 도움이 될 것이다. 따라서, 본 연구는 향후 조성

될 수변구역의 복원지가 비점오염원 저감 및 생물 서식과 더불어 다량의 탄소가 저장되고 증대될 수 있도록 하고자 하였다. 이에 현재까지 복원된 수변구역 복원지의 식생 및 토양 등의 환경 특성 현황을 파악하고, 표토 유기탄소 저장량을 정량화하였다.

대상지에 식재한 수종 개수는 총 17개 수종이었으며, 평균 2.86±0.13종으로 최소 1개 수종에서 최대 7개 수종이 식재된 것으로 나타났다. 흉고직경은 평균 9.1±0.6cm, 수고는 평균 6.2±0.3m, 뿌리 함량은 평균 0.13±0.18g/cm<sup>3</sup>이었다. 층위별(0~10cm, 10~20cm, 20~30cm) 토양특성 21개 항목을 조사·분석한 결과, 6개 항목인 용적밀도, 고상률, 석력비, 경도, 모래 함량, pH는 층위가 깊어질수록 증가하는 것으로 나타났고, 나머지 15개 항목은 층위가 깊어질수록 감소하는 것으로 나타났다. 층위별 표토 유기탄소 저장량을 분석한 결과, 0~10cm 구간에서 11.54±1.08ton/ha, 10~20cm 구간은 8.69±0.81ton/ha, 20~30cm 구간이 7.97±0.79ton/ha로서 총 표토 유기탄소 저장량은 28.21±7.31 ton/ha로 분석되었다. 과거 토지이용별 표토 유기탄소 저장량은 농경지로 사용되었던 복원지역이 35.17±5.31 ton/ha로 가장 높았고, 조성연도별 표토 유기탄소 저장량은 2006년에 조성된 복원지가 38.46±3.14ton/ha로 가장 높았다.

본 연구는 수변구역 복원지의 표토 특성 현황 및 표토 유기탄소 저장량에 대한 현황을 파악하고 정량화하였다. 그러나 다양한 복원 유형 중 숲 유형만을 조사·분석하였고, 낙엽, 낙지 등의 유입과 분해와 관련한 토양 탄소 유동은 배제하였으며, 30cm 이상의 토층에 대해서는 조사하지 않은데 한계가 있다. 따라서, 향후 수변구역의 타 식재 유형에 대한 표토 유기탄소 저장량 추정과 토양의 탄소 유입 및 유출을 계량화하는 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

References

1. Armonson, K. A.(1977) Forest Soils: Properties and Processes, University of Toronto Press 1-163.
2. Bae, J. and Y. Ryu(2015) Land use and land cover changes explain spatial and temporal variations of the soil organic carbon stocks in a constructed urban park. Landscape and Urban Planning 136: 57-67.
3. Bird, S. B., J. E. Herrick, M. M. Wander and S. F. Wright(2002) Spatial heterogeneity of aggregate stability and soil carbon in semi-arid rangeland. Environmental Pollution 116: 445-455.
4. Boix-Fayos, C., J. de Vente, J. Albaladejo and M. Martínez-Mena(2009) Soil carbon erosion and stock as affected by land use changes at the catchment scale in Mediterranean ecosystems. Agriculture Ecosystems & Environment Environ 133: 75-85.
5. Center for Aquatic Ecosystem Restoration(2014) Development of Technology to Establish Riparian Greenspace and Eco-belt. Ministry of Environment.
6. Cho, H. S., M. C. Seo, J. H. Kim, W. G. Sang, P. Shin and G. H. Lee(2016) Effect of application rate of oil cake fertilizer on soil carbon in upland soil. Proceedings of Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer p. 134.

7. Cho, H. S., M. C. Seo, T. S. Park, J. H. Kim, W. G. Sang, P. Shin and G. H. Lee(2015) Influence on the variation of soil carbon according to amount of livestock manure compost in upland soil. Proceedings of Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer 81-82.
8. Cho, Y. H., J. M. Lee, W. T. Kim, Y. H. Yoon, H. K. Kang, B. J. Park, T. S. Yoon, K. E. Jang, K. J. Shin, Y. J. Eo, M. Y. Kwak and H. S. Song(2013) A study on the actual condition of topsoil management at river restoration projects. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 41(1): 34-43.
9. Don, A., J. Schumacher and A. Freibauer(2011) Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks: A meta-analysis. Global Change Biology 17: 1658-1670.
10. Edmondson, J. L., Z. G. Davies, S. A. McCormack, K. J. Gaston and J. R. Leake(2011) Are soils in urban ecosystems compacted? A citywide analysis. Biology Letters 7(5): 771-774.
11. Franzluebbers, A. J.(2008) Linking soil and water quality in conservation agricultural systems. Electronic Journal of Integrative Biosciences 6(1): 15-29.
12. García-Oliva, F. and O. R. Maser(2004) Carbon sequestration in land-use, land-use change and forestry (Lulucf) projects under the Kyoto Protocol. Clim. Change 64: 347-364.
13. Guo, L. B. and R. M. Gifford(2002) Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. Global Change Biology 8(4): 345-360.
14. Han Gang Watershed Management Committee and Korea Environment Corporation(2007) General Plan of Riparian Buffer Zone Management in Han River Water System ('08~'13).
15. Han Gang Watershed Management Committee and Korea Environmental Preservation Association(2016) A Comprehensive Report on the Design of Riparian Ecosystem Belt in the Han River Watershed in 2016.
16. Han, K. H., Y. S. Zhang, K. H. Jung, H. R. Cho and Y. K. Sonn(2014a) Evaluating germination of lettuce and soluble organic carbon leachability in upland sandy loam soil applied with rice husk and food waste biochar. Korean Journal of Agricultural Science 41(4): 369-377.
17. Han, M. K., K. J. Kim and K. C. Yang(2014b) Comparison of carbon storages, annual carbon uptake and soil respiration to planting types in urban park: The case study of Dujeong Park in Cheonan City. Korean Journal of Environment and Ecology 28(2): 142-149.
18. Hur, T. C., S. H. Joo and H. J. Cho(2009) A comparison of the soil physicochemical properties of the forest stands in the Young-il Erosion Control District. Journal of Korean Forest Society 98(4): 444-450.
19. IPCC(2001) Climate Change 2001: The Scientific Basis, Cambridge University Press.
20. Jeong, J. H., W. G. Lee and C. S. Kim(1998) Estimation of carbon content in forest soil by region and forest. Proceedings of the Korean Journal of Ecology.
21. Jeong, J. H., C. S. Kim, K. S. Goo, C. H. Lee, H. G. Won and J. G. Byun(2003) Physico-chemical properties of Korean forest soils by parent rocks. Journal of Korean Forest Society 92(3): 254-262.
22. Jo, H. K. and E. G. McPherson(1995) Carbon storage and flux in urban residential greenspace. Journal of Environmental Management 45(2): 109-133.
23. Jo, H. K. and G. S. Han(1999) Comparison of soil characteristics and carbon storage between urban and natural lands: Case of Chunchon. Journal of Forest Science 15: 71-76.
24. Jo, H. K. and H. M. Park(2015) Effects and improvement of carbon reduction by greenspace establishment in riparian zones. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 43(6): 16-24.
25. Jo, H. K. and T. W. Ahn(2013) Evaluation of CO<sub>2</sub> storage and uptake by forest landscapes in the middle region of Korea evaluation of CO<sub>2</sub> storage and uptake by forest landscapes in the middle region of Korea. J. Environ. Sci. Int. 22(2): 139-149.
26. Jo, H. K.(1999) Carbon uptake and emissions in urban landscape, and the role of urban greenspace for several cities in Kangwon province. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 27(1): 39-53.
27. Jobbagy, E. G. and R. B. Jackson(2000) The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications 10(2): 423-436.
28. Ju, N. G., K. S. Lee, Y. H. Son, R. H. Kim, Y. M. Son and C. S. Kim(2015) Belowground carbon storage by stand age classes and regions of red pine (*Pinus densiflora*) and cork oak (*Quercus variabilis*) stands in western Gyeongnam province. Journal of Agriculture & Life Science 49(1): 29-39.
29. Jung, J. S., J. S. Yi, J. H. Lee, K. M. Shim and J. S. Lee(2018) Characteristics of accumulated soil carbon and soil respiration on vegetation in Namhangang basin. Korean Journal of Environmental Biology 32(4): 363-370.
30. Jung, S. J., G. S. Hyeon, Y. T. Moon and Y. K. Jo(1994) Characteristic, genesis and classification of soils derived from coarse grain granitic materials. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer 27(1): 3-9.
31. Kim, K. M., B. J. Lee and Y. S. Cho(2012) Differences of soil carbon by green manure crops in rotated cropping system. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer 45(6): 1027-1031.
32. Kim, S. K.(2008) Soil Science. Green Tomato Publisher. p. 134.
33. Kim, W. S.(2015) A Study on Forest Soil Carbon Storage Using the 5th Korea National Forest Inventory Data. Master Dissertation, University of Korea, Ahnam.
34. Kim, W. T., Y. H. Cho, J. M. Lee, Y. H. Yoon, H. K. Kang, B. J. Park, T. S. Yoon, K. E. Jang, K. J. Shin, Y. J. Eo, M. Y. Kwak and H. S. Song(2014) A study on actual condition of topsoil management at forest development projects. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology 17(1): 13-25.
35. Korea Forest Research Institute(2007) Survey Manual for Forest Biomass and Soil Carbon. p. 44.
36. Korea Forest Research Institute(2010) Carbon Emission Coefficients of Major Tree Species to Inventory Greenhouse Gases from Forests. Research Report.
37. Korean Institute of Landscape Architecture(2007) Landscape Design Standards.
38. Lackner, K. S.(2003) A guide to CO<sub>2</sub> sequestration. Science 300: 1677-1678.
39. Lal, R.(2002) Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. Environmental Pollution 116(3): 353-362.
40. Lal, R.(2004b) Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma 123: 1-22.
41. Lal, R.(2004a) Carbon sequestration in dryland ecosystems. Environ. Manage 33: 528-544.
42. Lal, R.(2005) Forest soils and carbon sequestration. Forest Ecology and Management 220(1-3): 242-258.
43. Le Quéré, C.(2009) Closing the global budget for CO<sub>2</sub>. Global Change 74: 28-31.
44. Lee J. M., Y. H. Cho, Y. H. Kim and S. W. Park(2019) A study on the correlation factors of soil organic carbon storage in the riparian zones. Proceeding of J. Korean Env. Res. Tech. pp. 36-37.
45. Lee, A. R., N. J. Noh, T. K. Yoon, S. K. Lee, K. W. Seo, W. K. Lee, Y. S. Cho and Y. H. Son(2009) Estimation of forest soil carbon stocks with tasso using a dendrochronological approach. Journal of Korean Society of Forest Science 98(6): 791-798.
46. Lee, J. M., Y. H. Cho, K. D. Kim, M. W. Lee, J. K. Kim, J. K. Choi,

- W. T. Kim, C. W. Yun and H. K. Kang(2015) A study on damage factors and causes of natural forest in regional ecological network at Chungnam province. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 18(6): 97-110.
47. Lee, K. J. and H. T. Mun(2005) Organic carbon distribution in an oak forest. *The Korean Journal of Ecology* 28(5): 265-270.
48. Lee, S. I., J. S. Lee, G. Y. Kim, E. J. Choi, S. U. Suh and U. S. Na(2016) Effect of the application of carbonized biomass from residues on soil carbon pool in orchard. *Proceeding of the Korean Society of Environmental Agriculture*, p. 114.
49. Lee, S. W.(1981) Studies on forest soils in Korea(II). *Journal of Korean Forestry Society* 54(1): 25-35, p. 28.
50. Leifeld, J., S. Bassin and J. Fuhrer(2005) Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 105(1-2): 255-266.
51. Li, D., S. Niu and Y. Luo(2012) Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: A meta-analysis. *New Phytologist* 195(1): 172-181.
52. Li, P., Q. Wang, T. Endo, X. Zhao and Y. Kakubari(2010) Soil organic carbon stock is closely related to aboveground vegetation properties in cold-temperate mountainous forests. *Geoderma* 154: 407-415.
53. Liu, Y., J. Zhang, W. Yang, F. Wu, Z. Xu, B. Tan, L. Zhang, X. He and L. Guo(2018) Canopy gaps accelerate soil organic carbon retention by soil microbial biomass in the organic horizon in a subalpine fir forest. *Applied Soil Ecology* 125: 169-176.
54. Ministry of Environment and Han Gang Watershed Management Committee(2013) General Plan of Riparian Buffer Zone Management in Han River Water System('14~'18).
55. Ministry of Environment and Han Gang Watershed Management Committee(2018) General Plan of Riparian Buffer Zone Management in Han River Water System('19~'23).
56. Ministry of Environment and Korea Environment Industry & Technology Institute(2014) Development on Carbon Capturing Soil Materials for Enhancement of Ecosystem Services.
57. Munoz-Rojas, M., A. Jordan, L. M. Zavala, D. De La Rosa, S. K. Abd-Elmabod and M. Anaya-Romero(2012) Organic carbon stocks in Mediterranean soil types under different land uses (Southern Spain). *Solid Earth* 3: 375-386.
58. Nelson, D. and L. E. Sommers(1982) Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. *Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties*, pp. 539-579.
59. Palosuo, T., J. Heikkinen and K. Regina(2015) Method for estimating soil carbon stock changes in Finnish mineral cropland and grassland soils. *Carbon Management* 6(5-6): 207-220.
60. Park, E. J. and K. Y. Kang(2010) Estimation of C storage and annual CO<sub>2</sub> uptake by street trees in Gyeonggi-do. *Korean Journal of Environment Ecology* 24(5): 591-600.
61. Park, E. J., K. Y. Kang, S. R. Lee and S. H. JWA(2008b) The Status of Soil Exposure and Management Practices for Soil Conservation in Urban Watersheds. *Gyeonggi Research Institute*.
62. Park, I. S., Y. W. Jang, K. W. Chung, G. W. Lee, J. S. Owen, W. T. Kwon and W. T. Yun(2014) In-depth review of IPCC 5th assessment report. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 30(2): 188-200.
63. Park, K. D., C. H. Lee, K. Y. Jung, U. G. Kang, H. W. Kang and P. J. Kim(2008a) Effects of long-term compost fertilization on carbon storage in paddy soil. *Proceeding of Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer*, p. 98.
64. Qin, Y., Z. Xin, D. Wang and Y. Xiao(2017) Soil organic carbon storage and its influencing factors in the riparian woodlands of a Chinese karst area. *Catena* 153: 21-29.
65. Reeder, J. D. and G. E. Schuman(2002) Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands. *Environmental Pollution* 116(3): 457-463.
66. Rodríguez-Murillo, J. C.(2001) Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. *Biology and Fertility of Soils* 33(1): 53-61, p.55.
67. Rural Development Administration(2012) Research Analysis Standard.
68. Rural Development Administration(2013) Technology Development for Enhanced Soil Carbon Stabilization and Storage Capacity under Different Land-use Types.
69. Schlesinger, W. H.(1999) Carbon sequestration in soils. *Science*. 284(5423): 2095.
70. Seo, G. W.(2015) Estimation of Soil Carbon Storage by Urban Green Spaces, Ph. D. Dissertation, University of Korea, Ahnam.
71. Seo, Y. O., S. C. Jung and Y. J. Lee(2016) Estimation of carbon storage for pinus rigida stands in Muju. *Korean Journal of Environment and Ecology* 30(3): 399-405.
72. Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, O. Sirotenko, M. Howden, T. McAllister, G. Pan, V. Romanenkov, U. Schneider, S. Towprayoon, M. Wattenbach and J. Smith(2008) Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 363(1492): 789-813.
73. Suh, S. U., Y. K. Min and J. S. Lee(2005) Seasonal variation of contribution of leaf-litter decomposition rate in soil respiration in temperate deciduous forest. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 7(1): 57-65.
74. USDA-NRCS(1992) Soil survey laboratory methods manual, rep. 42. Washington, DC: Soil Conservation Service U.S., Department of Agriculture.
75. Waring, R. H. and S. W. Running(2007) Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales, ELSEVIER.
76. Won, H. G., G. S. Goo, J. H. Jeong, C. Y. Lee, Y. Y. Lee and C. S. Kim(2002) Effects of forest disasters and land use changes on soil carbon stocks. *Proceeding of Korean Society of Environmental Biology*.
77. Woo, S. H.(2013) Biochar for soil carbon sequestration. *Clean Technology*. 19(30): 201-211.
78. Yang, Y., J. Fang, Y. Tang, C. Ji, C. Zheng, J. He and B. Zhu(2008) Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology* 14: 1592-1599.
79. Zhao, S., Y. Tang and A. Chen(2016) Carbon storage and sequestration of urban street trees in Beijing, China. *Frontiers in Ecology and Evolution* 4: 1-8.
80. <http://www.kma.go.kr>

Received : 09 May, 2019

Revised : 10 June, 2019 (1st)

10 July, 2019 (2nd)

Accepted : 10 July, 2019

3인익명 심사필