KIEAE Journal, Vol. 24, No. 5, Oct. 2024, pp.83-90.

KIEAE Journal

Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

129

인공지반녹화 토양의 장기간 성분 변화 기초 연구
- 20년 경과 옥상녹화 실험구 토양 분석 결과를 중심으로 -

Basic Study on Long-Term Changes in the Composition of Rooftop Greening Vegetation Using Artificial Soil
- Focus on the Soil Analysis Results of the 20-Year Green Roof Testbed -

문수영* · 장대희**
Soo-Young Moon* · Dae Hee Jang**

** Research Fellow, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, South Korea (symoon@kict.re.kr)*
*** Corresponding author, Research Fellow, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, South Korea (zzan1113@kict.re.kr)*

ABSTRACT

Purpose: Rooftop greening, first introduced in Korea in the mid-1990s as a solution to urban ecological challenges, has become a standard feature in the construction market following extensive research in the early 2000s. This study assesses whether green roof soil, originally composed of artificial substrates, can evolve into natural soil or become suitable for urban agriculture over time, thereby exploring the potential for transforming these artificially created spaces into sustainable environments. **Method:** The rooftop greening laboratory, established in the 2000s using various soil types on the rooftop of the KICT, has now aged over 20 years. After two decades, the research team analyzed the composition of the rooftop greening soil, comparing it with other soils to track the changes in the artificial soil components over time. **Results:** The analysis revealed that the rooftop greening soil had gradually transformed into natural soil, suitable for urban agriculture. It was confirmed that, if maintained over an extended period, rooftop greening on artificial grounds could evolve into an environment quantitatively similar to natural soil.

ⓒ 2024. KIEAE all rights reserved.

KEYWORD

옥상녹화
인공토양
자연화

Rooftop Greening
Artificial Soil
Naturalization

ACCEPTANCE INFO

Received Aug. 20, 2024
Final revision received Sep. 30, 2024
Accepted Oct. 7, 2024

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

기후변화로 인한 이상 기후 발현에 따라 탄소중립을 위한 노력과 함께 도심지를 생태적으로 개선하려는 노력이 곳곳에 가중되고 있다. 생태면적률을 비롯한 제도에서부터 탄소 저감형 친환경 건축과 관련한 다양한 건축 아이템으로 옥상녹화가 활용되고 있는 현실에서, 1990년대 중반부터 도시생태 문제에 대응할 대안으로서 국내에 도입되기 시작한 옥상녹화는 2000년대 초반부에 본격적인 연구를 통해 지금 건설 시장에 보편화된 아이템으로 자리 잡았다[1].

2000년대 다양한 토양을 활용하여 한국건설기술연구원 옥상에 시범 조성한 옥상녹화 실험구가 현재 20여 년이 지났고, 본 연구진은 20년이 지난 옥상녹화 토양의 주요 성분비를 다른 토양과 분석하여 시간에 따른 인공토양 성분의 변화를 추적 관찰하였다. 이를 통해 인공토양을 활용한 옥상녹화 토양이 장기간 유지되면 자연토양 또는 도시농업에 적합한 토양으로 활용할 수 있는지를 알아보고, 물순환 등 자연의 기능이 배제된 콘크리트와 아스팔트 일색의 도시에 조성된 인공지반 상부 옥상녹화가 장기간 유지되면 토양 성분 적 측면에서라도 인위적 조성 공간이 실제 자연지반과 정량적으로 유사한 환경으로 변화될 수 있는지에 대한 가능성을 모색하고자 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

옥상녹화를 장기간 유지 시 토양의 변화를 알아보기 위하여 2003년~2007년간 한국건설기술연구원에서 수행한 "복합기능 생태적 건물외피 조성기술 개발(KICT 주요사업)" 과업에서 2004년에 조성한 옥상녹화 실험구의 토양을 대상으로 분석하였다[2]. 실험구의 위치는 한국건설기술연구원 옥상에 설치되었고 위치는 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283(대화동)의 본관동이며, 위도 37.6712, 경도 126.7360에 위치하고 있다. 연구원의 옥상은 별도의 지붕 시설이 설치되지 않은 평지붕이며, 조성된 옥상녹화는 옥상 시설물 등에 의해 음영이 지지 않는 장소에 조성되었다.

옥상녹화 토양은 총 5가지 방식으로 조성된 토양으로 현재 한국건설기술연구원의 옥상에 녹화상태를 유지한 채로 존치되어 있다. 이들 토양을 2023년 8월~9월 사이 채취 시점으로부터 최소 2주간 비가 오지 않은 상태에서 동일한 날짜와 시간에 10cm 포트 각각 3곳에서 실험 유형별로 조성된 타입의 포트에서 채취하였다. 20cm 포트는 일부 훼손으로 본 실험에서 제외하였다. 옥상녹화 조성 후 20년 경과된 토양 중에 조성 당시 판매하던 인공경량토양(Sera Soil)의 성분 분석자료가 남아있는 A 토양을 분석 대상으로 선정하였다. 그리고 이 토양의 대조군으로 분석할 총 3가지 토양을 원예용 상토(horticultural substrate, Hanareumsangto, Shinsung Mineral, South Korea), 펄라이트(New Pearl Shine No. 1, GFC, South Korea)와 활성탄(perlite + activated carbon)(v/v, 8/2)을 선정하였

pISSN 2288-968X, eISSN 2288-9698
http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2024.24.5.083

다. 2004년 조성 당시의 판매되던 토양의 많은 수가 현재 다시 구하기 어려운 한계가 있어 본 연구에서는 자료가 남아있는 Sera Soil의 일부 항목과 이들을 비교하는 기초 연구를 수행하였다. 채취한 토양은 전문기관에 의뢰하여 일반적으로 수행하는 토양 분석항목(pH, O.M., P2O5, EC, 치환성 무기질)과 유기탄소를 비롯하여 Total N, P, K에 대하여 분석을 수행하였다. 그리고 분석 결과는 분석된 토양간 비교 및 기존 연구 및 조경설계기준 등과 비교하여 토양의 화학적 특성을 비교하였다.

2. 옥상녹화의 토양 변화 연구 고찰

한국에서 옥상녹화에 대한 연구가 2000년 전후부터 본격적으로 연구되기 시작하면서, 초기에는 한국 기후에 적합한 시스템을 도입하기 위해 토양과 토심, 식물 선택 및 식물의 생장 등 시스템 구성에 초점을 맞춘 연구가 주로 수행되었다[3]. 초반의 시스템 구성 연구를 바탕으로 다양한 형태의 옥상녹화가 조성되었고, 2010년대에는 다양한 옥상녹화에 의해 식물의 생육 변화와 이에 따른 토양 특성 변화에 대한 연구가 본격적으로 이루어졌다.

옥상녹화를 조성한 이후 식생 또는 토양의 변화에 대한 첫번째 연구는 1993년에 조성된 옥상녹화의 초기 모델에 대하여 1999년까지 토양에 대하여 조사 후 발표되었다[4]. 해당 논문에서는 4개 도시에 조성된 14개소의 옥상녹화의 토양에서 나타난 공통적인 특성이 pH 수치가 5.26-7.4, O.M.수치는 0.43-1.43%, 치환성 이온 중 나트륨은 2.36~4.71mg/kg, Mg은 0.88-2.84mg/kg, K은 2.97- 9.61mg/kg, Ca은 9.39-28.23mg/kg 정도의 분포를 보여준다. T-N은 0.003-0.286%로 나타나며, 전반적으로 시간의 경과에 따라 토양의 pH와 soil bulk density가 낮아지는 경향을 보여준다.

대전광역시에 2003~2004년에 조사된 옥상녹화의 식생과 토양환경 특성 연구는 조성된지 약 7년이 경과된 옥상녹화의 식물과 토양 변화 연구를 수행하였다[5]. 해당 옥상녹화의 토심은 10cm 이하 토심과 30cm 정도 되는 토심이 혼재되어 있었고, 토양의 pH가 6.42~7.43 사이로 타 연구보다 다소 높은 수치를 보여주고 있었다. 녹화 토양에서 탄소 함량을 산출하였는데, 대전광역시청이 단위면적 당 3.66kg으로 조사되었다.

동국대학교 및 서울여자대학교 옥상녹화 이후 식물과 토양 변화에 대한 연구의 경우 2005년부터 2010년까지 조성된 옥상녹화에 대하여 2013년도에 식생과 토양의 변화를 관찰하였다[6,7]. 동국대학교 연구에서는 옥상녹화 후 식물의 이입종이 많아지고 다양해지는 경향을 보여주고 있고, 토양의 경우 식재 토양과 배수 토양의 pH, 유효인산, 전질소, 유기물함량 등이 서로 다르게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 특히 일부 항목에서는 산림토양의 평균치와 유사한 수치를 보여주는 경우가 나타났다. 서울여자대학교 연구에서는 옥상녹화 토양 pH가 5.25~5.96 범위로 나타났는데, 이를 자연적인 강우 때문에 약산의 지속적인 유입과 햇빛 노출로 인한 유기물 분해로 유기산 발생으로 판단하였다. 두 연구 모두 토양 분석을 통해 탄소량을 구하고자 하였다. 김인혜(2010)는 영산홍을 이용하여 옥상녹화 시스템을 구성 후 시간에 따른 식물 생육과 토양의 변화를 연구하였다[8]. 2001년에 영산홍을 이용한 옥상녹화시스템에 대하여 2008년에 식생과 토양 현황을 조사했는데, pH는 낮아지고 유기탄소는 증가하며 T-N과 유효인산, 치환성 이온의 경우 시스템별로 3배~10배 정도로 증가하는 경향을 보였다.

해외에서도 옥상녹화에 대한 효과, 시간에 따른 토양의 변화 등에 대한 연구가 다양하게 이루어졌다. 조성된 지 얼마 안 된 옥상녹화가 C를 빠른 속도로 격리하고, N과 P의 순환에 도움이 된다는 연구가 2015년에 발표된 이후 2011년에도 옥상녹화가 C, P, N의 순환에 긍정적인 영향을 미치며 역학적으로 2.9±1.1g N/㎡/yr 축적한다는 정량적 수치를 도출하였다[9, 10]. 이 연구에서는 옥상녹화가 하나의 작은 생태계이며, 인위적으로 훼손 또는 조성된 생태계가 자연화되는 과정과 유사하여 향후 도시생태계를 개발하기 위한 대안이 될 수 있다고 주장하였다.

3. 조사 대상 및 분석

3.1. 2004년 옥상녹화의 조성과 모니터링 결과

2004년에 조성된 옥상녹화 실험구는 "한국형 Green Roof System"을 구성하면서 기존의 무기질 성분의 토양층을 대체할 수 있는 토양층으로 적절한 유기질 토양을 선정 및 분석하고, 그에 따른 식물 종을 선정하고자 조성되었다[2]. 해당 실험을 준비할 당시에는 기존 무기질의 경량형 인공토양(펄라이트 등)과 생장 식물에 관한 연구는 매우 활발하게 진행되었으나 유기물 토양을 중심으로 한 옥상녹화 용 식물연구는 매우 미흡하였다. 이에 해당 연구는 무기질 경량토 이외에도 유기물계 토양의 한국형 옥상녹화 가능성을 검증하고자 하는 실험으로 진행되었다. 유기질이 경량토양 내 많이 혼합되면 관리수요가 늘어나고, 부족할 경우 자랄 수 있는 초종이 한정적이라 적정한 유기질 함량 기준 도출이 연구의 목표 중 하나였다.

한국형 Extensive형 옥상녹화 구현을 위해 기존의 옥상녹화에 사용되던 무기질 토양에 적절한 유기질 토양을 배합하고, 그에 적합한 초종 선정 작업을 위하여 세덤류와 지피류 등의 초종을 식재하여 1년 동안 모니터링을 수행하였다. 조성과 모니터링은 2004년 4월부터 10월까지 수행되었다. 실험구는 1×1㎡의 실험구 안에 전체 다섯 가지 토양을 기준으로 10㎝ 깊이의 토양과 20㎝ 깊이의 실험구를 만들었고(Fig. 1. 참조), 여기에 실험구마다 25종의 식물을 식재하고, 같은 방법으로 다른 25종의 식물을 심어 총 50종을 한 Unit(10cm 토양, 20cm 토양)으로 배치하였고 이들 실험구는 총 3회 반복하여 설치하여 비교 분석하였다. 실험에 사용된 5종의 토양은 Table 1.과 같다. 실험구의 설치는 한국건설기술연구원 본관동 옥상부에 설치되었으며, 2004년 4월 30일에 조성되었다. 실험구는 인위적인 관수 및 병충해 방제 등을 시행하지 않고, 우수에 의한 관수만을 지향하는 무관리·경량형으로 조성 관리되었다.

실험에 사용된 식물은 국내에서 유통되는 지피식물 또는 옥상녹화용 식물 중 수급이 용이하고 옥상녹화 조성에 주로 사용하는 식물로서 17과 50종을 전문가 그룹의 자문을 거쳐 선정하였다(Table 2.).

당시 실험 목적에 따라 식재 모니터링이 이루어졌고, 실험 목적에 맞추어 유기물질이 배합된 저관리 경량형 옥상녹화에 식재 성장 정

Table 1. Overview of experimental soils

Classification	Manufacturer	Mixing Ration
A type	R Com.	Sera Soil : Bark : decomposed granite soil = 60 : 20 : 20
B type	M Com.	Peat Soil : Zeolite = 50 : 50
C type	Mix.	Peat Soil : Zeolite : decomposed granite soil = 20 : 25 : 55
D type	K Com.	Perlite : Soil of Earthworm = 90 : 10
E type	Control Group	General mineral Soil

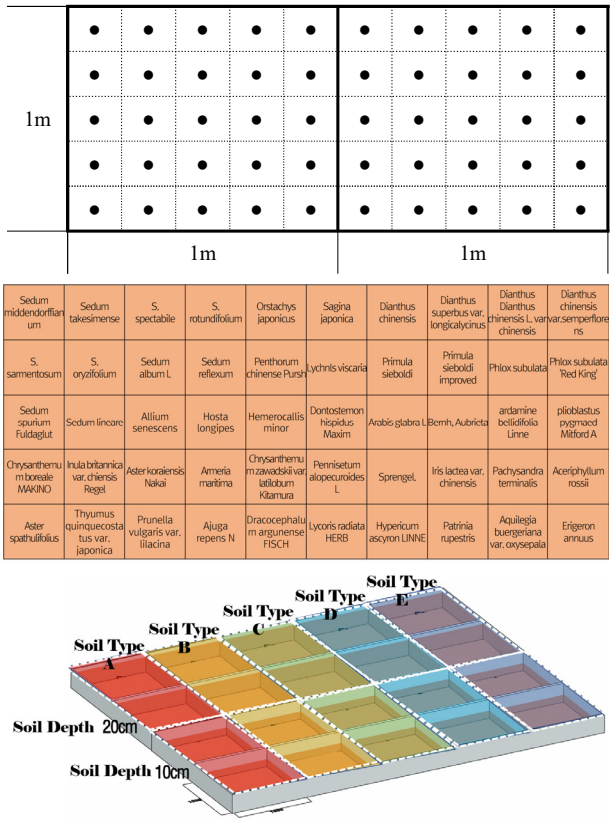

Fig. 1. Concept diagram for experiment

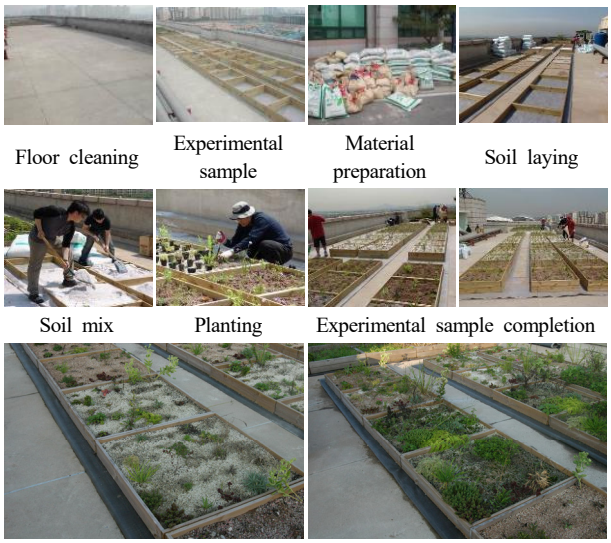

Fig. 2. Procedure of making experimental samples

Table 2. List of plants used in experiments

Scientific name	species	Specific name
Crassulaceae	12	Sedum middendorffianum, Sedum takesimense, S. spectabile, S. rotundifolium, Orstachys japonicus, S. sarmentosum, S. oryzifolium, Sedum album L., Sedum reflexum, Penthorum chinense Pursh, Sedum spurium Fuldaglut, Sedum lineare
Liliaceae	3	Allium senescens, Hosta longipes, Hemerocallis minor
Asteraceae	6	Chrysanthemum boreale MAKINO, Inula britannica var. chiensis Regel. Aster koraiensis Nakai, Armeria maritima, Chrysanthemum zawadskii var. latilobum Kitamura, Aster spathulifolius
Lamiaceae	4	Thyumus quinquecostatus var. japonica Prunella vulgaris var. lilacina, Ajuga repens N, Dracocephalum argunense FISCH
Caryophyllaceae	7	Sagina japonica, Dianthus chinensis, Dianthus superbus var. longicalycinus, Dianthus Dianthus chinensis L. var. chinensis, Dianthus chinensis var.semperflorens, Lychnls viscaria
Primulaceae	2	Primula sieboldi, Primula sieboldi improved
Polemoniaceae	2	Phlox subulata, Phlox subulata 'Red King'
Brassicaceae	4	Dontostemon hispidus Maxim, Arabis glabra L., Bernh, Aubrieta, ardamine bellidifolia Linne
Poaceae	2	plioblastus pygmaed Mitford A., Pennisetum alopecuroides L., Sprengel.
Iris	1	Iris lactea var. chinensis
Buxus	1	Pachysandra terminalis
Saxifragaceae	1	Aceriphyllum rossii
Amaryllidaceae	1	Lycoris radiata HERB
Hypericaceae	1	Hypericum ascyron LINNE
Valerianaceae	1	Patrinia rupestris
Ranunculaceae	1	Aquilegia buergeriana var. oxysepala
etc	1	Erigeron annuus

Table 3. Plant growth status by soil

number	Soil depths (cm)	Classification	Average growth rate (%)
1	10	A type	-82.56
2	10	B type	-50.20
3	10	C type	-70.72
4	10	D type	-18.33
5	10	E type	40.53
6	20	A type	-10.68
7	20	B type	95.43
8	20	C type	71.40
9	20	D type	223.63
10	20	E type	53.58

도를 관찰하였다. 실험구 조성 후 1년간 모니터링을 수행 한 결과 조성 10개 표본에 대한 토양별 평균 생장률은 Table 3.과 같았으며, 토양유형에 따라 초기 생착율의 단기적 효과를 극명하게 보여주었다.

이에 더하여 종별로 옥상녹화시스템에 적합한 식물종으로는 5개 이상의 실험구에서 원활하게 생육하는 종을 선정하였다. 선정된 종은 6개 실험구 이상에서 생육이 원활한 식물종이다(Table 4.).

ⓒ 2024. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

Table 4. List of plant species suitable for Green Roof System

Scientific name	Specific name
Crassulaceae	Sedum middendorffianum, Sedum takesimense, S. spectabile, S. sarmentosum, Sedum reflexum, Penthorum chinense Pursh, Sedum spurium Fuldaglut, Sedum lineare
Liliaceae	Allium senescens
Asteraceae	Chrysanthemum boreale MAKINO, Chrysanthemum zawadskii var. latilobum Kitamura, Aster spathulifolius
Lamiaceae	Thyumus quinquecostatus var. japonica
Caryophyllaceae	Dianthus chinensis L. var. chinensis, Dianthus chinensis var. semperflorens
Brassicaceae	ardamine bellidifolia Linne
Poaceae	Pennisetum alopecuroides L., Sprengel.
Valerianaceae	Patrinia rupestris

Pictures of 10cm soil depth experiments

Pictures of 20cm soil depth experiments

Fig. 3. Pictures of plants used in experiments (After 20 years)

3.2. 20년 경과 후 옥상녹화 현황

2004년 실험구 조성과 모니터링을 마친 후 해당 실험구는 별도의 관리 등이 없이 현재에도 녹화 상태를 유지하고 있다(Fig. 3.). 목재로 만든 실험구가 20년 동안 일부 깨지거나 주변으로 토양이 흘러나와 실험구 주변으로 이끼 및 세덤류가 자란 모습 외에 전반적으로 큰 변화가 없이 유지되고 있다. 20년간 별도로 식생 관리 및 시비, 제초 등 유지관리를 하지 않아 세덤 위주로 우세종이 자리 잡았고, 외부에서 유입된 종으로 인하여 기존에 식재된 모습은 거의 사라지고 자연화된 모습으로 옥상녹화를 유지하고 있다.

실험구 중 10cm 토양을 담은 실험구는 20년간 실험구 자체에 훼손이 없이 대부분 건재하였으나, 20cm 토양을 넣은 실험구의 경우 여러 가지 사유로 일부가 훼손되었다. 상대적으로 깊은 토양에 키가 큰 식생이 유입되면서 식생 뿌리로 인해 실험구가 파괴되는 일도 있고, 연구원 건물을 사용하는 사용자들이 옥상에 텃밭을 가꾸는 등의 활동을 하면서 주로 20cm 토양의 실험구 중 훼손된 실험구에 추가로 흙을 부어 경작하는 데 사용하였다.

Table 5. Change in soil chemical properties

Components		Test Group	Control Group 1	Control Group 2	Control Group 3
pH		8.9	6.1	10.3	6.5
EC (dS/m)		0.34	1.14	3.48	-
OM (%)		6.2	12.08	1.05	-
TOC (%)		3.6	7.01	0.61	-
T-N (%)		0.279	0.159	0.006	-
Exch. Cations (mg/kg)	Ca	2185.36	2050.95	33.05	3.01
	Mg	83.37	673.6	28.29	1.77
	K	136.8	773.2	3942.2	1.29
	Na	129.94	542.67	353.77	-
T-P (mg/kg)		183.98	401.31	49.67	40.7
P_2O_5 (mg/kg)		21.84	173.03	125.77	-
Total K (mg/kg)		4852.82	10547.98	724.34	-

Test Group : 20-year-old green roof soil
Control Group 1 : Bed Soil
Control Group 2 : Soil Blending with Biochar and Perlite (2/8)
Control Group 3 : Sera Soil at the time of creation

3.3. 20년 경과 후 토양 성분별 분석 결과

조성 후 20년이 경과 된 옥상녹화 토양의 화학적 변화를 알아보기 위하여 20년 경과된 옥상녹화 토양(이후 녹화토양)과 상토, 펄라이트와 바이오차의 혼합토양(8/2), 그리고 조성 당시 활용했던 토양 일부의 자료를 비교하였다. 조성 당시에 다양한 인공경량토와 일부 유기물을 혼합하였는데, 20년 경과 된 시점에 당시 시판하던 인공경량토 대부분이 다시 구하기 매우 어려운 한계가 있었다. 이러한 한계로 본 연구에서는 조성 당시 사용한 인공경량토의 성분 분석자료가 남아있는 A 포트에 대해서 3가지의 대조군과 문헌자료를 바탕으로 녹화토양 성분 변화를 비교해 보고자 한다.

토양의 성분 변화는 기존 문헌 연구와 유사하게 pH와 치환성 이온, 유기물을 중심으로 분석하고, 이에 더하여 식생 성장에 관여하는 토양의 기능을 알고자 EC, 질소, 유기탄소, 인 등을 분석하였다. 20년 경과 된 토양(실험구/Test Group)과 비교할 자료로는 상토(대조군 1 / Control Group 1), 바이오차와 펄라이트(v/v: 2/8) 혼합토양(대조군 2 / Control Group 2) 그리고 20년 전 조성에 사용되었던 세라소일(대조군 3 / Control Group 3)의 토양 성분을 분석하였으며, 그 결과는 Table 5.와 같다.

치환성 이온의 경우 분석 단위를 mg/kg으로 수행하였으나, 전국의 밭 또는 산림토양 등과 같은 문헌에 나오는 기록과 비교 분석을 위해서 cmolc/kg 단위로 변환하여 비교 분석하였다.

1) pH

토양의 산성화 정도를 나타내는 pH를 비교해볼 때 녹화토양은 적정범위인 pH 6.0~7.0을 넘어선 8.9 정도의 염기성 토양으로, 대조군 2의 10.3보다는 낮지만 상토 보다는 다소 높은 수치를 보이고 있으며, 대조군 3보다도 높은 수치를 보여주고 있다.

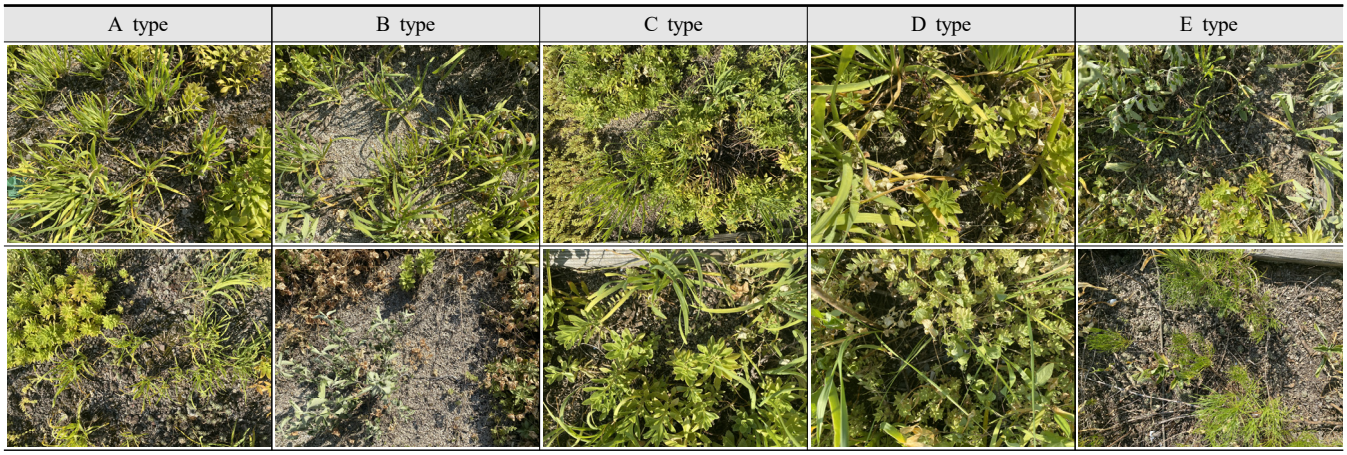

Fig. 4. Pictures of the experimental site by 5 types of soil (After 20 years)

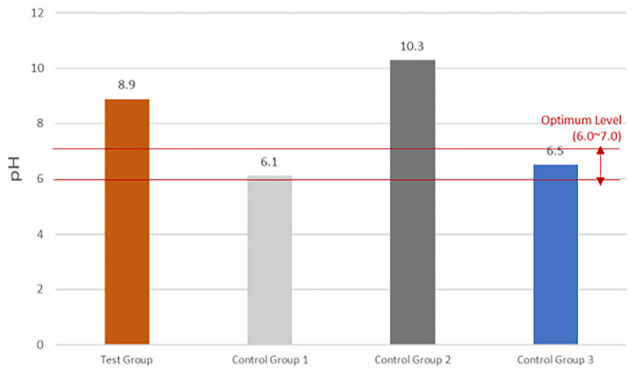

Fig. 5. Comparison of pH

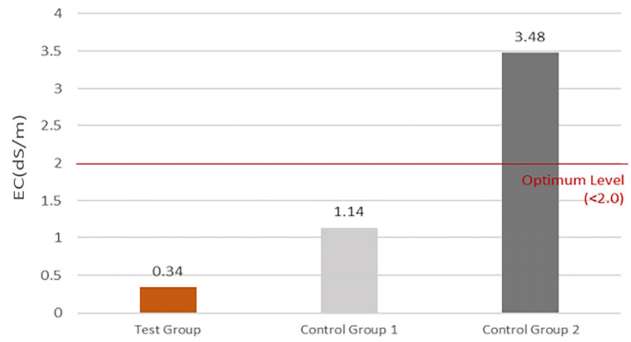

Fig. 6. Comparison of EC (ds/m)

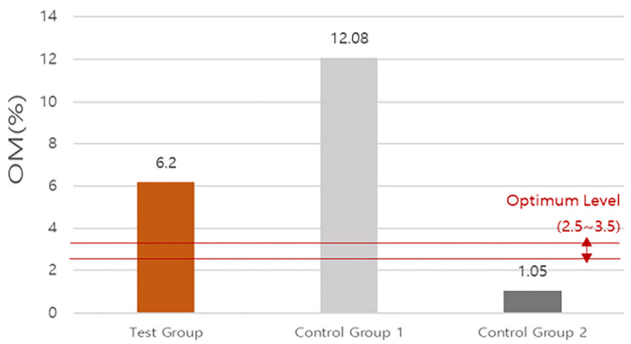

Fig. 7 Comparison of O.M. (%)

기존 연구에서는 옥상녹화 토양이 조성 당시 인공토양보다 산성화 경향을 보여주고 있으나 분석결과는 문헌과 달리 염기성의 경향을 보여주고 있다[6, 7]. 이에 대한 원인을 분석하기 위하여 일산의 강우와 관련된 문헌을 조사한 결과 일산 지역의 강우에서 염기성 성향을 나타내는 것을 알 수 있었다. 일산 호수 수질은 ph 8.8-9.0 정도로 측정되며, 이의 원인은 강우로 유입되는 수질로 인해 부영양화로 추정하고 있다[11]. 또한 경기도 물정보시스템에서 고양시 법곳동 2007년부터 수질검사 결과 연평균 7.8 이상으로 나오는 것으로 보아 일산 지역의 강우에서 염기성 물질이 20년간 지속적으로 유입된 것이 분석결과의 원인으로 추정할 수 있다[12].

2) EC(전기 전도도)

EC의 경우 옥상녹화 기존 연구에서 측정한 자료가 없어 전국 시설재배지와 관련된 연구를 분석한 결과, 시설재배지 적정 수준인 2.0 이하에 부합하지만 0.34ds/m라는 매우 경미한 수치를 보였다[13]. 이는 대조군 1보다도 낮은 수치이고, 대조군 2보다 낮은 수치로 나타난다. EC 수치가 1 이하이면 양분이 부족이고 2이상이면 양분 과다임을 추정할 때, 일반 작물이 자라기에는 매우 척박한 환경이며, Tabe 3.의 식생생장결과가 -82.56의 결과를 감안할 때 식물의 생장이 매우 어려운 토양 환경임을 알 수 있었으나, 우리나라 조경설계기준의 토양의 화학적 특성 평가항목과 평가기준에서는 EC 기준으로 '중급'에 해당하는 토양으로 판단된다[14].

3) OM(유기물)

OM의 경우 기존 연구보다는 낮은 수준인 6.2%로, 시공 당시 유기물을 20% 이상 투입한 것에 비해 상당히 낮은 수치를 유지하고 있다[6, 7]. 우리나라 시설재배지의 유기물 함량 적정수치로 제시된 2.5~3.5% 수치는 넘어서지만, 작물의 육묘를 목적으로 사용하는 대조군 1의 절반 정도 유기물 비율을 유지하고 있다[13]. 이는 조성 당시 토양에 있는 유기물은 유실되었지만, 20년 동안 식물이 실험구 내에서 유기물을 분해하면서 일정 수치를 유지하는 것으로 추정할 수 있으며, 해당 토양을 조경설계기준와 비교 시 상급에 준하는 수준임을 알 수 있었다[14].

ⓒ 2024. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

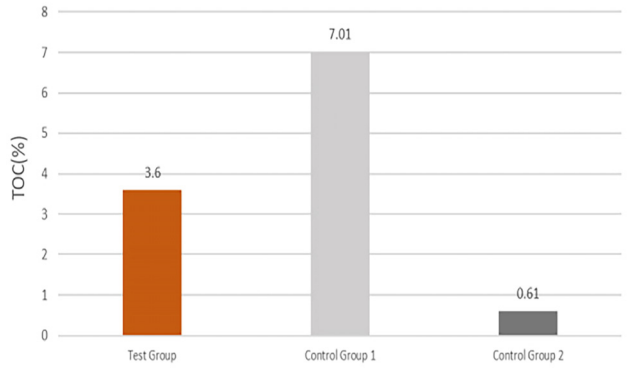

Fig. 8. Comparison of TOC (%)

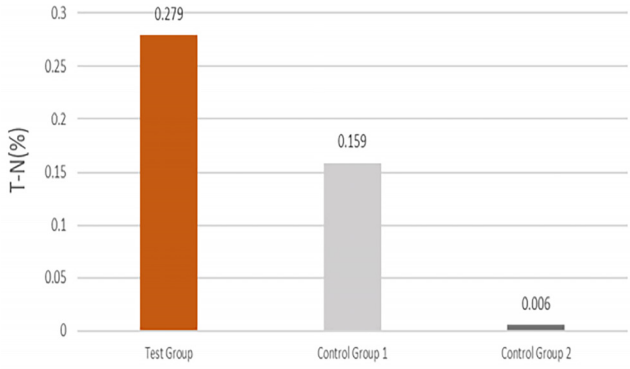

Fig. 9. Comparison of T-N (%)

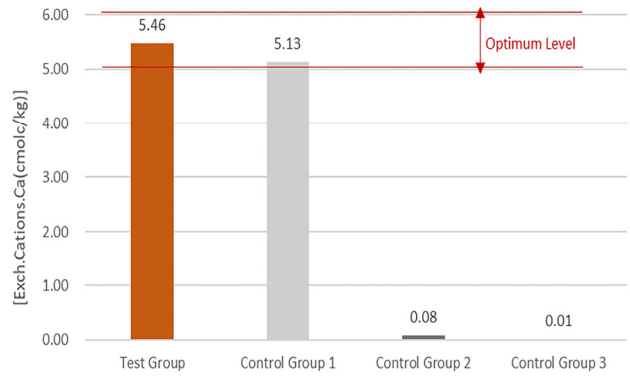

Fig. 10. Comparison of Exch.Cations.Ca (cmolc/kg)

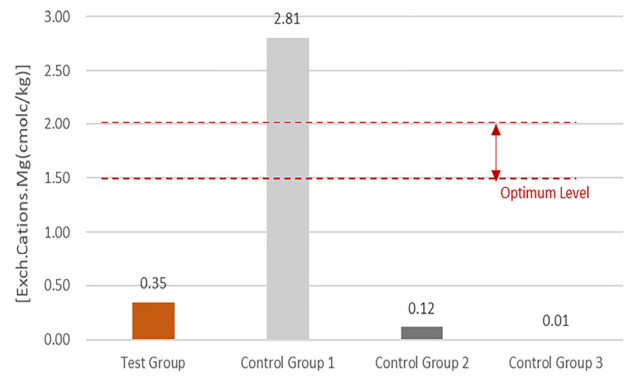

Fig. 11. Comparison of Exch.Cations.Mg (cmolc/kg)

4) TOC(유기탄소)

유기탄소는 대조군 3보다 높고, 상토의 절반 정도 수준을 유지하고 있다. 이는 앞선 O.M.과 유사한 추세를 보여준다. 조성 당시 토양의 TOC 분석결과가 존재하지는 않지만, 대조군 2와 대비하여 매우 높은 수준으로 증가하였고, 기존 연구에서 유기탄소가 조성 당시보다 증가한다는 근거로 판단할 때, 유기물 등이 축적되고 있음을 추론할 수 있다[8]. 이는 향후 추가 연구를 통해 옥상녹화의 탄소 흡수량을 도출하기 위한 근거로 활용하고자 한다. 조경설계기준에 따르면 유기물 함량 기준으로 대조군1이 '상급'에 해당하고, 20년 경과 토양은 '중급', 그리고 대조군 2는 '하급'이라고 판단할 수 있다[14].

5) T-N(전질소)

전질소(T-N)의 경우 앞서 고찰한 연구에서 옥상녹화의 탄소격리 기능에 중요하다고 언급된 지표로 대조군 1에 비해 약 1.7배 증가하였고, 대조군 2에 비해 46.5배 증가한 것으로 나타났다[9,10]. 이는 향후 옥상녹화의 탄소 흡수량 도출에 중요한 근거가 된다고 판단할 수 있다. 기존 연구에서 전질소 함량이 0.14~0.50%와도 유사한 경향을 보이고 있으며, 조경설계기준에서 전질소량으로 판단한다면 해당 토양은 '상급'이라 판단할 수 있다[6, 14].

6) 양이온 치환용량

Table 5.의 양이온치환용량 4가지는 cmolc/kg으로 환원하여 분석하였다. 먼저 Ca의 경우 실험구와 대조군 1,2,3을 분석한 결과(Fig. 10.) 실험군과 대조군의 수치는 큰 차이가 나지 않았으나 대조군 2, 3과는 매우 큰 차이를 보여주고 있다. 기존 연구에서는 조성당시 수치보다 일정시간 경과 후 토양의 치환성 Ca 수치가 낮게 나오는 반면, 본 연구의 실험구 토양 치환성 Ca 수치는 상토와 유사 수준이거나 조성당시 인공토양보다 현저히 높은 수준을 유지하고 있어, 실험구의 토양 화학성이 시설재배지 토양 수준과 유사함을 알 수 있다[6]. 치환성 Ca가 토양의 산성화를 막아주는 역할을 하는 것으로 유추해 볼 때 실험구의 pH가 높은 것과의 연계성을 좀 더 연구해 볼 필요가 있다. 실험구 토양은 기존 연구에서 적정수준 범주 내 수치이고, 조경설계기준에서도 '상급'에 속함을 알 수 있다[13,14].

치환성 Mg은 작물 생장에 관여하는 요소로 양이 너무 많거나 또는 적어도 문제가 되는 요인으로 알려져 있다. 기존 연구에서 제시하는 적정수준과 비교하면 Mg의 경우 실험구와 대조군 2, 3은 낮은 수준, 대조군 1은 초과하는 수준으로 적정한 수준을 유지하는 토양은 없는 것으로 나타났다[13]. 조경설계기준에서 평가하는 기준으로 실험구의 토양은 '하급'에 해당한다[14].

치환성 K(Fig. 12.)는 식생의 수분 상태를 조절하는 요소로 실험구는 기존 연구의 적정수준에 미달하나 대조군 3에 비해 100배 수치가 증가한 것으로 나타났다[13]. 그러나 기존 연구에서는 조성 당시의 치환성 K가 시간이 지난 후 급격하게 수준이 낮아진 것으로 나타난다[7]. 실험구의 토양 조성 당시의 화학적 특성이 대조군 2와 같았다면 기존 연구의 경향과 같은 것으로 판단할 수 있고, 대조군 3과 같았다면 대조군 1(상토)에 비해 수준은 미흡하나 오랜 시간 동안 토질이 개선된 것으로 추측할 수 있다. 조성 당시 대조군 3에 20% 이상의 유기물을 투입했고, 별도의 시비 관리가 없이 실험구 조성 당시의 초

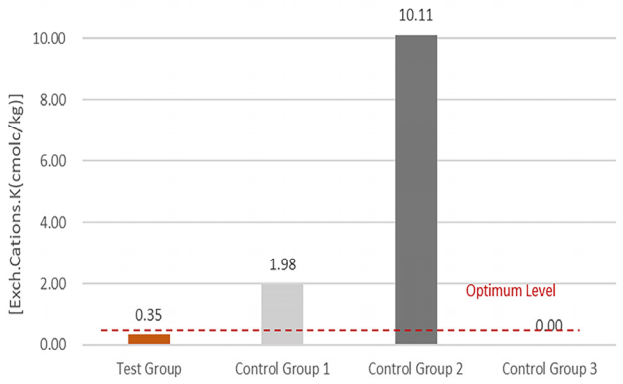

Fig. 12. Comparison of Exch.Cations.K (cmolc/kg)

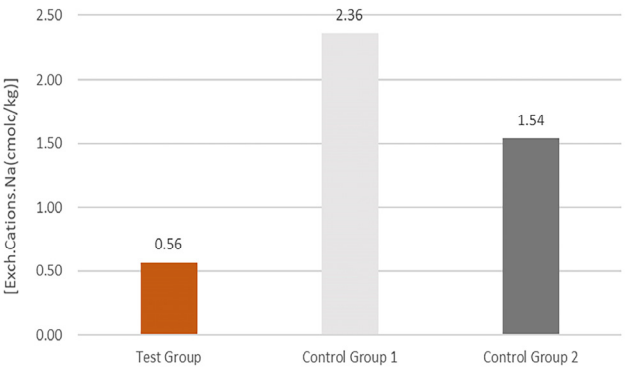

Fig. 13. Comparison of Exch.Cations.Na (mg/kg)

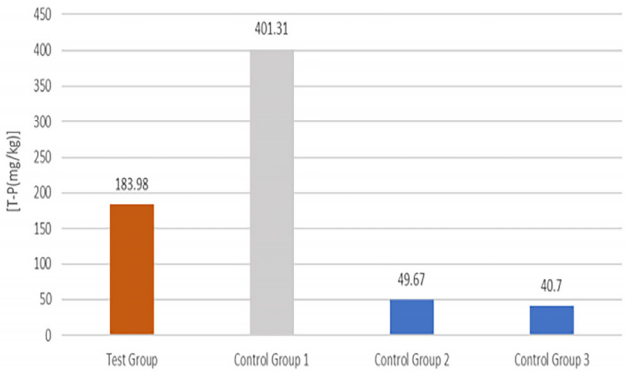

Fig. 14. Comparison of T-P

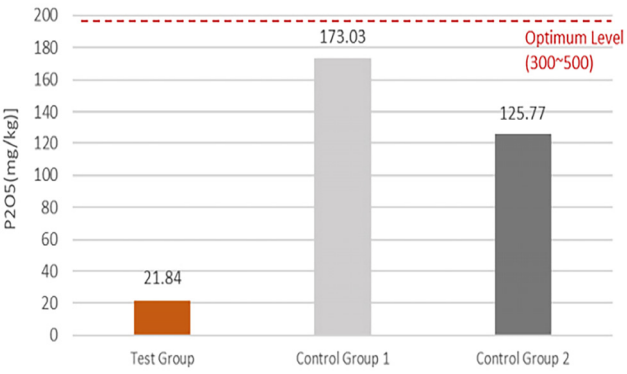

Fig. 15. Comparison of P2O5

종과 시간에 따른 이입종으로만 식생이 유지되는 것으로 보아 치환성 K는 다른 연구 결과와 같이 시간에 따라 유기물이 유실된 것으로 추정할 수 있으나 추가 연구를 통해 증명이 필요한 부분이다.

치환성 Na의 경우 실험구의 수치는 0.564cmolc/kg으로 대조군 1, 2보다 현저하게 낮은 수치이다. 그러나 치환성 Na의 경우 문헌 상 별도의 적정 기준이 존재하지는 않지만, 기존 연구의 전국 시설재배지 토양 화학성 변화에서 2012년도 토양에서는 0.71 수준으로 나타났다[13]. 이는 치환성 Na 측면에서는 실험구 토양이 시설재배지와 유사한 수준으로 토질이 개선된 것으로 추측할 수 있다. 조경설계기준에서는 토양 내 분포하는 비율로 토양의 등급을 결정하는데, 실험구의 경우 0.013%로 '상급' 토양을 만족한다[14].

7) T-P

기존 연구에서는 옥상녹화의 N 흡수량을 흡수량을 수치로 산출할 수 있었지만, C와 P는 산출하기가 다소 어렵다고 제시했다[10]. 그러나 P의 경우 shade와 상관성이 있고, 옥상녹화의 연식이 12년 이하와 12년 이상일 때 차이가 나타남을 제시하였다.

현재 실험구는 shade가 지지 않는 곳에 있고, 12년 이하의 토양과 비교가 불가한 상황이지만, 대조군 2와 3에 비해 월등히 높아진 수치로 보아 연식에 따라 P의 수치가 오름을 확인할 수 있었다.

8) P_2O_5(유효인산)

유효인산의 경우 분석한 세 토양이 모두 적정기준에 미달하지만, 실험구가 가장 낮은 경향을 보이고 있다. 이는 T-P와 유사한 경향을 보여주고 있다. 조경설계기준에 따르면 실험구 토양은 '하급'에 속한다[14]. 이는 지속적 시비 등이 없는 저관리 경량형인 것과도 연관이 있다고 추론할 수 있다.

4. 결론

20년이 경과된 옥상녹화 토양의 화학적 특성을 분석해 본 결과 많은 항목들이 기존 연구와 유사한 경향을 보여주고 있으나 pH와 같이 주변 환경에 따라 좌우될 수 있는 사항에 대해서는 다른 특성을 보여주고 있다. 식생을 재배하는 토양 특성으로 판단할 때 치환성 CA의 경우 상토와 유사하고 식생 재배를 위한 적정 수준으로 토양이 자연화된 경향을 보여주고 있다. 치환성 Mg은 조성 당시의 인공토양이나 펄라이트와 바이오차의 혼합보다 수치가 높지만, 상토나 적정 비료수준에는 못미치는 경향을 보여주고 있다. 치환성 Na의 경우 조성 당시의 인위적인 유기물이 빠지고 식재만으로 토양이 유지되다 보니 가장 좋은 수준으로 유지되고 있다. N의 경우 기존 연구에서 옥상녹화가 오래될수록 N의 흡수량이 커지는 경향과 같이, 20년 경과된 옥상녹화에서 전질소의 경우 상토보다 높은 수준을 유지하고 있고, 펄라이트와 바이오차의 혼합물보다도 월등히 높은 수준을 유지하고 있다[10]. 자연 생태계에서 C, N, P의 순환이 매우 중요한데, P 역시 상토 보다는 낮은 수준이지만 인공토양에 비해 매우 높은 수준으로 유지되고 있음을 알 수 있었다. C 역시 이 경향이 같이 유지되고 있어, 향후 추가 연구를 통해 20년 경과된 옥상녹화 토양에 C, N, P 흡수량을 도출하는 것이 필요할 것으로 판단한다.

ⓒ 2024. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

본 연구에서 조성 당시 토양에 대한 성분분석이 병행되었다면 녹화로 인한 토양의 C 흡수율을 도출할 수 있었겠으나 해당 부분에 대한 자료 부재로 C 흡수율 도출은 추가 연구와 분석을 통해 차후 연구 과제로 남겨야 할 것이다.

지속적으로 심각해지는 기후변화에 따라 대응적 측면의 탄소발생량 저감 및 적응적 측면의 탄소흡수에 대한 다양한 조치들이 필요한 상황이다. 현재 에너지 절감 위주의 정책이 주를 이루고 있지만 기 발생된 탄소의 흡수를 위한 현실적인 대안의 하나로 옥상녹화를 비롯한 도심 내 인공지반 녹화의 확대가 절실한 상황이다. 향후 추가 연구를 통하여 시간경과에 따른 옥상녹화시스템 전반의 탄소 흡수량 산정 등을 통하여 시스템 적용을 통한 영향력을 정량화하고 이를 확대 보급할 수 있는 근거의 마련이 필요할 것으로 본다.

Acknowledgement

본 연구는 2024년 한국건설기술연구원 주요사업 “(20240087) (24주요-대1-목적) 안전·쾌적·지속 가능한 정주 환경을 위한 건축·도시 구축 기술 연구” 지원으로 이루어졌습니다.

References

[1] 한국건설기술연구원, Green Town 개발사업 (Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ). // (Korea Institute of Construction Technology, Green Town development project (I, II, III).)
[2] 김현수 외 3인, 복합기능 생태적 건물외피 조성기술 개발, 한국건설기술연구원, 2004. // (H.S. Kim et al., Development of multi-functional skin for green building, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2004.)
[3] 강태호, 조홍하, 이홍, 식생모듈박스를 이용한 저토심 무관리형 옥상녹화, 한국조경학회 추계학술대회논문집, 2011, pp.113-117. // (T.H. Kang, H.X. Zhao, H. Li, Rooftop greening without management using vegetation module box, Conference Journal of KILA, 2011, pp.113-117.)
[4] 안원용, 김동엽, 옥상녹화 후 인공토양의 이화학적 특성 변화, 한국조경학회지, 제28권 제6호, 2001.02, pp.77-83. // (W.Y. An, D.Y. Kim, Changes in the physiochemical characteristics of artificial soil after rooftop planting, Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture, 28(6), 2001.02, pp.77-83.)
[5] 이상진 외 12인, 대전광역시 옥상녹화 지역의 식생현황 및 토양환경 특성에 관한 연구, 농업과학연구, 제38권 제4호, 2011.12, pp.641-649. // (S.J. Lee et al., A study on vegetation and soil environmental characteristics of green roof in Daejeon metropolitan city, CNU Journal of Agricultural Science, 38(4), 2011.12 pp.641-649.)
[6] 이상진 외 10인, 동국대학교 옥상녹화 지역의 식생 및 토양특성 변화, 한국환경복원기술학회지, 제16권 제1호, 2013, pp.193-206. // (S.J. Lee et al., Changes of vegetation and soil characteristics of green roofs in Dongguk University, Journal of the Korean Society for Environmental Restoration Technology, 16(1), 2013, pp.193-206.)
[7] 이상진 외 11인, 서울여자대학교 옥상녹화 지역의 식물 종 증감 및 토양환경 특성 변화, 한국환경복원기술학회지, 제16권 제6호, 2013, pp.109-117. // (S.J. Lee et al., A study on the changes of plant species and soil environmental characteristics on green roofs at Seoul Women’s University, Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology, 16(6), 2013, pp.109-117.)
[8] 김인혜 외 3인, 영산홍을 이용한 저관리 옥상녹화 시스템의 식물생육 및 토양특성 평가, 원예과학기술지, 제28권 제6호, 2010.12, pp.1057-1065. // (I.H. Kim et al., Assessment of plant growth and soil properties of extensive green roof system for Rhododendron indicum sweet, Journal of Horticultural Science and Technology, 28(6), 2010.12, pp.1057-1065.)
[9] I. Buffam, M.E. Mitchell,, Nutrient cycling in green roof ecosystems, In: Sutton RK, editor, Green roof ecosystems, Cham, Switzerland: Springer, 2015, pp.107-137.
[10] M.E. Mitchell, T. Emilsson, I. Buffam, Carbon, nitrogen, and phosphorus variation along a green roof chronosequence: Implications for green roof ecosystem development, Ecological Engineering, 164, 2021.06, 106211.
[11] 지재성 외 18인, 일산호의 최적 수질관리 연구, 한국건설기술연구원, 1997. // (J.S. Ji et al., Study on the optimal water quality management of Ilsanho, Korea Institute of Construction Technology, 1997.)
[12] 경기도 물정보시스템, 고양시 수질 부문(고양시 법곳동, 일산서구 법곳동 등), https://water.gg.go.kr // (Gyeonggi-do Water Information System, Goyang-si water quality sector, https://water.gg.go.kr)
[13] 이예진 외 10인, 흙토람 비료사용처방 프로그램 활용 매뉴얼, 농촌진흥청 국립농업과학원, 2013. // (Y.J. Lee et al., Soil Toram fertilizer prescription program utilization manual, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, 2013.)
[14] 국토교통부, 조경설계기준, 2019. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Landscape design standards, 2019.)