Kor. J. Hort. Sci. Technol. 28(6):1057-1065, 2010

영산홍을 이용한 저관리 옥상녹화 시스템의 식물생육 및 토양특성 평가

김인혜[1] · 허근영[1*] · 신현철[2] · 박남창[2]

[1]진주산업대학교 조경학과, [2]국립산림과학원 남부산림연구소

Assessment of Plant Growth and Soil Properties of Extensive Green Roof System for *Rhododendron indicum* Sweet

In-Hea Kim[1], Keun-Young Huh[1*], Hyeon-Cheol Shin[2], and Nam-Chang Park[2]

[1]Department of Landscape Architecture, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea
[2]Southern Forest Research Center, Korea Forest Research Institute, Jinju 660-300, Korea

Abstract. Recent urban concerns over environmental problems have furthered interest in green roof system. Plant growth and load bearing capacity of an underlying roof are key factors to determine an optimal system. This study was carried out to develop an optimal extensive green roof system for shrubs assessing the effects of substrate type and soil depth on the growth of *Rhododendron indicum* Sweet. in the experimental systems with different soil types and depths from 2001 to 2008. Substrate types of perlite alone and blended with sandy loam (v/v, 1:1) were used on the experimental systems with depths of 30 cm, 45 cm, and 60 cm. The survival rate of the plants on the perlite alone + 45 cm soil depth system (RS-A-45) was 100% during the experimental period, while those on the perlite alone + 30 cm soil depth system (RS-A-30) and perlite blended + 60 cm soil depth system (RS-B-60) showed 33% and 67%, respectively, in 2008. The overall plant growth and soil properties of RS-A-45 were superior to the others. At 8 years after installation, the total weight of RS-A-45 including plant fresh weight was about 376.6 kg·m^{-2} in field capacity indicating RS-A-45 can be optimal extensive and light weight green roof system.

***Additional key words*:** artificial substrate, load bearing capacity, perlite, soil depth, survival rate

서 언

도시의 생태적 문제를 해결할 수 있는 방안으로서 옥상녹화에 많은 관심이 집중되고 있다. 옥상녹화는 대지의 부족 및 높은 지가 등으로 녹지공간을 확보하기 힘든 도심에서 쓸모 없이 버려진 옥상공간을 활용한다는 중요한 의미를 가진다(HICT, 1997). 옥상녹화는 건축 및 토목구조물 등의 불투수층 구조물 위에 토양층을 포함한 식재기반을 조성하고 식재하는 것을 의미한다(Huh와 Shim, 2000). 따라서 옥상녹화는 특수한 녹화기술이 요구되는데, 옥상녹화 기술의 핵심은 식물의 생육을 건전하게 유지할 뿐만 아니라 건축물에 미치는 하중을 최소화할 수 있는 토양층을 조성하는 것이다(Choi 등, 2001; Huh와 Shim, 2001; Lee와 Moon, 2000). 이 두 가지 필요조건을 동시에 만족시키기 위해서 식재지반 조성 시 경량의 인공토양이 사용되고 있으며 생육 가능한 범위 내에서 토심을 최소화하려는 시도가 연구되어지고 있다(Lee 등, 2002).

일반적으로 옥상녹화 유형은 저관리·경량형 옥상녹화(extensive green roofs), 관리·중량형 옥상녹화(intensive green roofs), 혼합형(절충형) 옥상녹화로 구분되고 있는데(Yang, 2004), 최근까지 수행된 옥상녹화 시스템 관련 연구들은 기존 건축물의 옥상녹화에 적용 가능한 저관리·경량형 옥상녹화에 관한 연구들이 대부분이다(Bang 등, 2004; Choi 등, 2003; Huh 등, 2003; Kim 등, 2005; Kim과 Huh, 2003; Lee 등, 2005, 2007; Moon 등, 2002). 기존 선행 연구들에서 도출된 저관리·경량형 옥상녹화 시스템은 보수성과 배수성이 우수한 경량의 인공토양을 단용 또는 혼용하여 토심 10-15cm의 토양층을 조성하고 그 위에 적합한 초본류를 식재하는

***Corresponding author:** sumoto@jinju.ac.kr

※ Received 17 May 2010; Accepted 10 August 2010. 본 연구는 2009년 국립산림과학원 위탁연구과제의 지원과 2010년 진주산업대학교 기성회 연구비 지원에 의해서 수행되었으며, 지원에 감사 드립니다.

것으로 요약될 수 있다. 이와 같은 연구들은 주로 초본류의 건전한 생육에 초점을 맞추고 있으므로, 관목류의 도입 및 이들의 건전한 생육을 중심으로 한 옥상녹화 시스템에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

관상용으로 널리 활용되는 관목류 중에는 영산홍이 포함되며 옥상녹화 시스템에 적용 가능할 것으로 예측된다. 영산홍은 일본이 원산이며 규슈와 혼슈 서부 등 고온 다습한 남부지방에 자생하고(Kim, 2007), 높이 1m까지 자라는 상록활엽관목으로 가지는 치밀하여 옆으로 퍼지고 잎은 진한 녹색으로 두텁고 가지 끝에서 총생하며 꽃은 5-7월에 걸쳐 가지 끝에 1개 또는 2개가 피어나고(Lee, 1996), 일반적으로 삽목 및 실생으로 번식된다. 또한 옥상녹화에서 가장 많이 사용되는 경량의 인공토양은 펄라이트인데(HICT, 1997; Huh와 Shim, 2001), 국내에서 사용되고 있는 펄라이트는 흑요석, 송지암 등과 같은 천연 유리질 암석의 하나인 진주암을 분쇄한 후에 900-1200℃로 급가열하면 얻어지는 속이 빈 공모양의 다공질 무기물이며(ECHAM, 1995), 건축물에 미치는 하중을 최소화하고 배수성 및 보수력의 향상을 위해서 단용 또는 자연토양과 혼용하여 사용되고 있다(Huh와 Shim, 2000).

본 연구는 관목류의 생육을 건전하게 유지하고 건축물에 미치는 하중을 최소화하는 저관리 옥상녹화 시스템 연구의 일환으로서, 건축물 옥상에 토심 30cm, 45cm, 60cm의 인공토양으로 구성된 식재지반에 영산홍(*Rhododendron indicum* Sweet.)을 식재한 옥상녹화 시스템을 조성하고 약 8년 동안 무관수 및 저관리 조건에서 식물 생육 및 토양층의 이화학적 특성 변화, 시스템의 하중에 대한 평가를 수행하고자 하였다.

재료 및 방법

공시재료

옥상녹화 시스템에 적용 가능할 것으로 예측되는 영산홍(*Rhododendron indicum* Sweet.)을 식물재료로 선정하였으며, 본 실험을 위해서 경상남도 사천 지역에서 삽목 번식으로 재배된 3년생 묘목들 중에서 2001년 3월에 수고가 대략 30cm, 생체중이 160-180g인 개체들을 선발하여 사용하였다. 토양재료는 다공질 무기물인 펄라이트(Samson Co., Korea)를 주재료로 하여 식재층에는 펄라이트 소립을 단용 또는 자연토양(sandy loam, pH=5.7)과 혼용하여 사용하였고 배수층에는 펄라이트 대립을 단용으로 사용하였다. 자연토양은 조경공사에서 일반적으로 사용되는 사양토이며 토양층 조성 시 유기물이 거의 함유되지 않은 상태였다.

실험 처리구

본 실험은 경남 진주시 칠암동에 위치한 건축물의 4층 옥상에서 수행되었다(Fig. 1). 식재기반 조성을 위하여 먼저 면적이 동일하며 서로 다른 높이를 가진 목재 용기를 제작하였는데, 그 면적은 53cm × 53cm이고 높이는 각각 30cm, 45cm, 60cm로 하였다. 목재 용기의 바닥에 직경 5cm의 배수구를 설치한 후, 내부에 비닐 필름을 토양이 포설되는 높이 이상으로 깔고 고정시켰다. 토양층 조성은 Lee 등(2002)의 방법으로 수행하였다. 먼저 뿌리의 생육을 위한 식재층과 배수를 촉진시키기 위한 배수층으로 구성하였다. 배수층은 모든 실험구에서 동일하게 펄라이트 대립을 별도의 다짐 작업 없이 토심 5cm 높이로 포설한 후 살수를 실시하여 안정화시켰다. 식재층은 펄라이트 소립을 단용 또는 자연토양(Table 2)과 부피비 1:1로 혼용하여 배수층 위에 토심 10cm 높이로 포설 후 물다짐 작업을 반복하는 방법으로 각각 25cm, 40cm, 55cm 높이로 조성하였다. 인공지반의 토양층은 자연지반과 단절되어 있어서 지하로부터 모세관수의 상승이 없고 구조물의 열전도율이 높기 때문에(Huh와 Shim, 2001), 무관수 조건에서 식물의 생존은 강우와 제한된 토양의 수분보유력에 의존할 수 밖에 없다고 가정하였고, 그에 따라서 처리구 구성은 Huh와 Shim(2000)과 Lee 등(2002)

Fig. 1. The overall view of the experimental green roof systems with different soil types and depths on the rooftop.

Table 1. Particle size distribution of perlite small grain and large grain.

Particle size (mm)	Distribution (weight, %)	
	Perlite small grain	Perlite large grain
> 5.60	0	0
3.35 - 5.60	1	9
1.70 - 3.35	41	80
0.85 - 1.70	27	9
0.50 - 0.85	7	1
< 0.50	24	1

Table 2. Extensive green roof systems with different soil types and depths used in the experiment.

System	Soil type	Soil depth (cm)		
		Total	Planting layer	Drainage layer
RS-A-30	Perlite alone	30	25	5
RS-A-45	Perlite alone	45	40	5
RS-A-60	Perlite alone	60	55	5
RS-B-60	Perlite blended with sandy loam[z] (v/v, 1 : 1)	60	55	5

[z]Soil properties: pH = 5.7, organic carbon (Org.C) = 0 $g \cdot kg^{-1}$, cation exchangeable capacity (CEC) = 3.0 $cmol^{+} \cdot kg^{-1}$

의 실험결과를 종합하여 Table 2와 같이 조성하였다. 수분보유력이 높은 펄라이트 소립 단용은 3가지 다른 토심으로 처리구를 조성하였고 수분보유력이 낮은 펄라이트 소립 혼용은 토심 60cm만으로 처리구를 조성하였으며 각 처리구는 다시 3반복으로 구성하였고 각 처리구 내에는 4개의 식물체를 식재하였다(4 토양층 처리 × 3 처리구 반복 × 4 식물체 반복). 2001년 3월 17일에 뿌리에 붙은 토양을 제거한 나근 상태의 영산홍을 각각의 처리구에 식재하였다. 식재 후 4주간 주 1회 관수를 실시하였고 그 이후에는 관수를 중단하였으며, 시비는 2001년과 2002년 5월에 복합비료(MAGAMO, DHC, Korea, 6N-40P-6K)를 5g·m^{-2} 실시하였고 그 이후에는 중단하였다.

자료의 수집 및 분석

최적의 저관리 옥상녹화 시스템을 제안하기 위해서 Fig. 2와 같은 장기적 평가 체계를 구성하였다. 옥상녹화 시스템에서 식물의 건전한 생육과 하중의 최소화는 시스템의 적정성을 평가하는데 중요한 요인이 되므로 식물체의 생존과 생육량, 토양의 물리적 안정성 및 화학적 변화, 시스템의 중량 등의 항목을 중심으로 평가가 수행되었다.

영산홍의 생육

무관수 및 저관리 조건에서 영산홍의 생존 여부를 장기적으로 평가하기 위해서 각 처리구에서 매년 생존율을 측정하였다. 생육과 관련하여 기상청 자료를 활용한 실험지의 평균온도 및 강수량을 분석하였고(Table 3, 4), 부가적으로 2003년부터 2004년에는 실험구 주변에 일중온도계(SIGMA-II, Sato Keiryoki Mfg. Co., Japan)를 설치하여 기상청 자료와 실험구 주변의 온도를 상호 비교하였다. 생체량 증가를 평가하기 위해서 2001년 3월 17일 식물체 식재 직전에 뿌리에 붙은 흙을 제거한 상태에서 생체중을 측정하였고, 2008년 11월 4일 식물체 굴취 직후 동일한 조건에서 생체중과 건물중을 측정하였다. 또한 수고의 변화를 평가하기 위해서 매년 수고를 측정하였다. 수집된 데이터는 SPSS(SPSS Inc., 2003)를 이용하여 5% 유의수준에서 Duncan's multiple range test로 평균간 비교를 실시하였다.

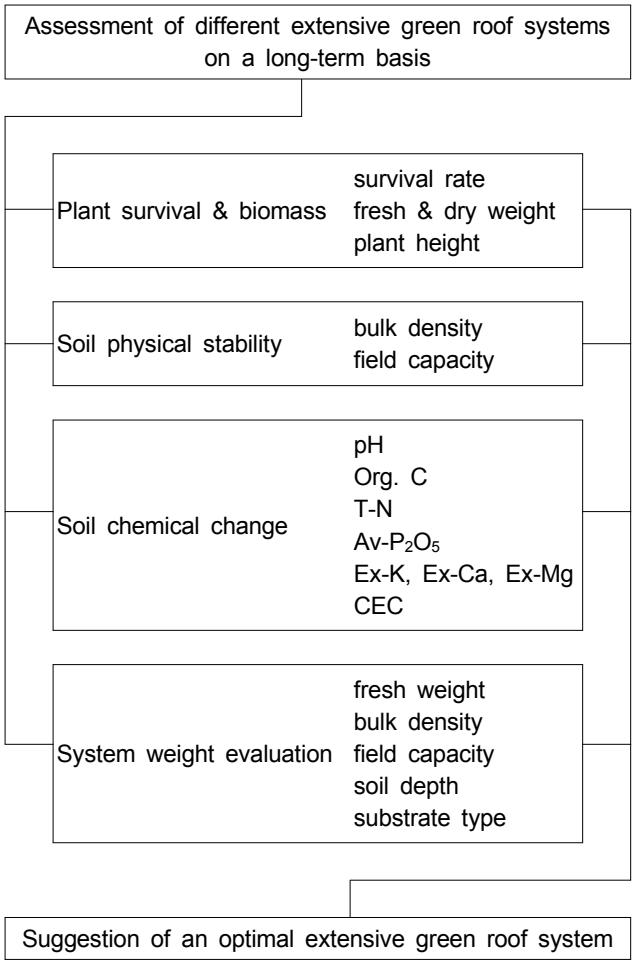

Fig. 2. The assessment scheme to suggest an optimal extensive green roof system.

토양층의 이화학적 특성

옥상녹화 시스템이 건축물에 미치는 하중, 토양층의 다짐 등을 평가하기 위해서 2003년 3월 17일과 2008년 10월 27일에 각 처리구에서 토양층의 용적밀도, 포장용수량 등의 물리적 특성을 측정하였다. 전반적인 화학적 특성 변화를

Table 3. Monthly precipitation at the experimental site from 2001 to 2008.

Month	Precipitation (mm)								Average
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
Jan.	58.9	55.1	30.4	0.1	11.7	28.0	2.8	46.1	29.1
Feb.	80.0	8.6	57.5	78.0	43.6	30.8	60.7	9.0	46.0
Mar.	15.5	100.7	58.0	42.6	85.0	14.0	96.7	36.3	56.1
Apr.	48.5	152.1	235.5	129.8	102.2	140.0	35.8	68.5	114.1
May	41.8	150.6	293.0	161.5	90.9	284.5	97.9	108.5	153.6
Jun.	323.5	81.7	259.6	243.0	113.5	268.6	54.5	337.6	210.3
Jul.	266.6	300.0	481.0	229.5	273.6	630.9	245.7	93.6	315.1
Aug.	137.1	760.1	343.0	348.5	297.3	106.6	507.0	100.4	325.0
Sep.	107.3	116.5	321.1	213.6	54.8	99.5	471.4	36.2	177.6
Oct.	82.6	52.1	10.0	12.2	9.0	39.5	96.5	35.2	42.1
Nov.	11.0	7.0	53.6	85.1	31.5	20.1	0.0	11.3	27.5
Dec.	43.5	32.6	8.5	31.1	0.6	11.5	32.5	2.9	20.4
Total	1216.3	1817.1	2151.2	1575.0	1113.7	1674.0	1701.5	885.6	1516.8

Source: Korea Meteorological Administration (www.kma.go.kr)

Table 4. Monthly mean temperature at the experimental site from 2001 to 2008.

Month	Mean temperature (℃)								Average
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
Jan.	-0.7	2.3	-0.9	-0.2	-0.1	1.0	1.1	1.8	0.5
Feb.	2.3	3.1	3.3	3.6	1.2	2.1	4.3	1.1	2.6
Mar.	7.0	8.7	6.9	7.6	5.9	6.9	8.0	8.1	7.4
Apr.	13.1	14.1	13.4	13.6	13.8	12.3	12.5	13.8	13.3
May	18.8	17.5	17.7	18.2	18.2	17.7	18.7	18.2	18.1
Jun.	22.5	22.0	21.9	22.2	23.4	22.0	22.4	20.9	22.2
Jul.	26.5	25.4	22.9	26.9	25.8	24.2	24.7	27.3	25.5
Aug.	26.2	25.0	24.8	26.2	25.9	27.6	27.1	25.9	26.1
Sep.	21.4	20.9	22.4	21.9	22.9	20.2	22.2	22.9	21.9
Oct.	15.9	13.4	13.9	14.7	15.1	17.5	16.3	16.8	15.5
Nov.	6.5	5.3	10.3	9.0	8.2	9.6	7.4	8.6	8.1
Dec.	1.7	3.2	2.3	3.8	-0.8	2.3	3.4	2.5	2.3
Average	13.4	13.4	13.2	14.0	13.3	13.6	14.0	14.0	13.6

Source: Korea Meteorological Administration (www.kma.go.kr)

평가하기 위해서는 pH, 유기탄소(Org.C) 함량, 전질소(T-N) 함량, 유효인산(Av-P_2O_5) 함량, 치환성 양이온(Ex-K, Ex-Ca, Ex-Mg) 함량, 양이온치환용량(CEC)을 측정하였다. 수집된 데이터는 SPSS(SPSS Inc., 2003)를 이용하여 5% 유의수준에서 Duncan's multiple range test로 평균간 비교를 실시하였다.

옥상녹화 시스템의 하중

각 처리별 옥상녹화 시스템에 대하여 조성 후 8년이 경과한 시점에서 식물체 생체중, 용적밀도, 포장용수량 측정값들을 활용하여 $1m^2$ 당 식물체가 포함된 토양층의 포장용수 시중량을 산출하고 옥상녹화를 고려한 건축물의 허용 적재하중과 비교 분석하였다.

결과 및 고찰

영산홍의 생육특성 평가

2001년부터 2008년까지 매년 생존율을 조사한 결과 2007년까지는 모든 식물체가 생존하였으나(Table 5), RS-B-60에서 2005년과 2007년에 줄기 상단부가 부분적으로 고사하는 현상을 발견할 수 있었다. 2008년에는 RS-A-30과 RS-B-60에서 가지의 상단부가 고사하는 현상이 뚜렷하게 나타났고

Table 5. Annual survival rate of *Rhododendron indicum* Sweet. grown in different extensive green roof systems from 2001 to 2008.

System	Survival rate (%)							
	Mar. 29, 2001	May 29, 2002	May 5, 2003	Jul. 19, 2004	Sep. 1, 2005	May 20, 2006	Apr. 17, 2007	Oct. 27, 2008
RS-A-30	100	100	100	100	100	100	100	33
RS-A-45	100	100	100	100	100	100	100	100
RS-A-60	100	100	100	100	100	100	100	100
RS-B-60	100	100	100	100	100	100	100	67

Table 6. Plant height of *Rhododendron indicum* Sweet. grown in different extensive green roof systems from 2001 to 2008.

System	Plant height (cm)							
	Mar. 29, 2001	May 29, 2002	May 5, 2003	Jul. 19, 2004	Sep. 1, 2005	May 20, 2006	Apr. 17, 2007	Oct. 27, 2008
RS-A-30	31.8 a[z]	35.0 a	35.0 ab	37.1 a	36.2 a	35.0 a	36.2 ab	35.3 ab
RS-A-45	33.6 a	35.3 a	36.3 a	37.6 a	37.0 a	35.8 a	36.8 a	36.8 a
RS-A-60	31.1 a	33.9 a	34.3 ab	35.0 ab	34.7 ab	34.7 a	35.4 ab	35.0 ab
RS-B-60	30.3 a	31.9 a	32.1 b	32.7 b	31.6 b	32.2 a	32.5 b	31.0 b

[z]Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at P = 0.05.

33%와 67%의 생존율을 나타냈다. RS-A-45와 RS-A-60에서는 전체 실험기간 동안 모든 식물체가 생존하였고 일부분이 고사하는 현상도 나타나지 않았다. 식물체들이 일부 고사하였던 2008년 실험지의 연간 강수량은 885.6mm로 실험기간 중 가장 낮았으며 연간 평균 강수량이 1516.8mm인 것과 비교하여 상당히 낮은 수준이었다. 특히 7월, 8월, 9월의 월 강수량은 매우 낮게 나타났다(Table 3). 이와 관련하여 연간 평균온도를 비교해보면, 2008년 연 평균온도는 14.0℃로 실험 기간 동안의 평균온도보다 0.4℃ 높았고, 고온기인 7월의 월 평균온도는 실험 기간 동안의 평균온도보다 1.8℃ 정도 높게 나타났다(Table 4). 부가적으로 2003년부터 2004년까지 실험구 주변의 일중 최고 또는 최저온도를 측정하여 기상청 자료와 상호비교 분석한 결과에서 실험구 주변의 7-8월의 최고온도는 7.5℃정도 그리고 12-1월의 최저온도는 4.1℃정도 상대적으로 높게 나타났다. 동시에 Huh와 Shim(2001)의 연구결과를 살펴보면 펄라이트 소립의 토양온도는 7월 중에는 대기온도보다 12.0℃정도 낮았고, 2월 중에는 유사한 것으로 나타났는데, 결과적으로 근권부의 토양온도는 펄라이트의 구조적 특성으로 인하여 여름철에는 단열효과를 나타내는 것으로 보고되었다(Huh와 Shim, 2001). 종합적으로 살펴보면 생존율의 감소를 보였던 2008년의 강수량은 다른 해에 비하여 현저히 낮은 경향을 보였고 이 결과는 강수량이 생존율에 분명한 영향을 미쳤으며, 토양층 조성 시 토양수분 함량이 중요하게 고려되어야 함을 보여주고 있다.

식재 직후인 2001년 3월 29일에 식물체 크기를 측정한 결과에서 4가지 처리구 모두는 서로 유의차를 나타내지 않았다(Table 6). 2003년에 측정한 결과에서는 RS-A-45는 가장 높은 값을 나타냈고 RS-B-60과 통계적 유의차를 나타냈다. 2004년과 2005년에 측정한 결과에서 RS-A-45 뿐만 아니라 RS-A-30도 RS-B-60과 비교하여 통계적 유의차를 나타냈다. 2007년과 2008년에 측정한 결과에서 RS-A-45는 가장 높은 값을 나타냈고 지속적으로 RS-B-60과 통계적 유의차를 나타냈지만, RS-A-30은 RS-B-60과 통계적 유의차를 나타내지 않았다. 전반적으로 RS-A-45에서의 식물 생장량이 실험기간 동안 지속적으로 가장 높은 값을 나타냈고, RS-B-60에서는 가장 낮은 값을 나타냈다.

Table 7. Fresh weight and dry weight of *Rhododendron indicum* Sweet. grown in different extensive green roof systems at the beginning and the end of the experiment

System	Mar. 17, 2001	Nov. 4, 2008	
	Fresh weight (g)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
RS-A-30	182.4 a[z]	215.6 a	143.1 a
RS-A-45	182.7 a	240.6 a	140.0 a
RS-A-60	162.1 a	199.4 a	116.9 a
RS-B-60	184.3 a	118.1 b	67.5 b

[z]Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at P = 0.05.

2001년 3월 식재 직전 생체중을 측정한 결과 4가지 처리구에 식재된 식물체 간에 유의적인 차이가 나타나지 않았다(Table 7). 그러나 식재 후 약 8년이 경과한 2008년 11월에 굴취하여 생체중을 측정한 결과에서 RS-A-45는 가장 높은

값을 나타냈고 다음으로 RS-A-30, RS-A-60, RS-B-60순으로 나타났으며, RS-B-60는 다른 처리구들과 통계적 유의차를 나타냈다.

토양층의 이화학적 특성 평가

펄라이트 소립을 단용으로 조성한 RS-A-30, RS-A-45, RS-A-60의 조성 시 용적밀도는 0.15g·cm^{-3}이고 자연토양과 부피비 1:1로 혼용하여 조성한 RS-B-60의 조성 시 용적밀도는 0.64g·cm^{-3}로 나타났다(Table 8). 조성 후 약 8년이 경과한 시점에서 RS-A-30, RS-A-45, RS-A-60의 용적밀도는 각각 0.15g·cm^{-3}, 0.17g·cm^{-3}, 0.16g·cm^{-3}으로 조성 시 용적밀도와 비교하여 큰 변화를 나타내지 않았고 RS-B-60의 용적밀도는 0.95g·cm^{-3}로 0.31g·cm^{-3}의 증가를 나타냈다. 이것은 펄라이트 소립을 단용으로 조성한 토양층의 침하는 미약하지만 자연토양과 혼용하여 조성한 토양층의 침하는 상당한 수준임을 보여주고 있다. 포장용수량은 조성 당시 RS-A-30, RS-A-45, RS-A-60의 경우 51.6%이었고 RS-B-60의 경우 34.8%로 나타났는데, 8년 경과 후 RS-A-30, RS-A-45, RS-A-60에서는 각각 8.4%, 14.6%, 13.3%가 증가한 것으로 나타났고 RS-B-60에서는 16%가 증가한 것으로 나타났다. 조성 8년 후의 포장용수량은 RS-A-45에서 가장 높았고 RS-A-30 및 RS-B-60과 통계적 유의차를 보였으며, RS-B-60에서 가장 낮았고 나머지 3가지 처리구들과 통계적 유의차를 보였다.

일반적으로 식물의 생육에 적절한 토양의 pH는 무기질 토양에서 6.5 정도이고 유기질 토양에서는 5.5 정도로 알려져 있다(Kim 등, 2006). 경작토양의 pH는 보통 6.0-6.5 사이이며 산림토양의 pH는 5.0-6.0 사이가 많고 5.0 이하가 되는 경우도 종종 나타난다(Pritchett와 Fisher, 1987). 펄라이트 소립을 단용으로 조성한 토양층의 초기 pH는 8.2로 적절한 범위를 벗어났으나 조성 후 약 8년이 경과된 시점에서 RS-A-30, RS-A-45, RS-A-60의 pH는 각각 6.2, 5.8, 6.0를 나타냈다(Table 9). Huh와 Shim(2001)은 식재 후 6개월이 경과하였을 때 펄라이트 소립의 pH는 약산성을 보였다고 하였는데, 본 연구 결과에서도 펄라이트 소립에서 산성화가 진행된 것을 확인할 수 있었다. 펄라이트 소립을 자연토양과 혼용으로 조성한 RS-B-60은 지속적으로 6.5-6.6 범위를 유지하는 것으로 나타났다. 식물 생육량과 비교했을 때 생육량이 가장 높게 나타났던 RS-A-45에서 산성화가 가장 많이 진행되었고, 생육량이 가장 낮게 나타났던 RS-B-60에서 가장 높은 pH 값을 보였으므로 산성화가 많이 진행된 토양에서 식물의 생육량이 증가하는 경향으로 나타났다(Table 6, 7). 토양 중 유기탄소 함량은 조성 후 약 8년이 경과했을 때 RS-A-45가 통계적으로 유의성 있게 가장 높은 값을 나타냈고 RS-A-30에서 가장 낮았으며 RS-B-60에서도 낮은 값을 보였는데 전반적으로 유기 탄소의 함량이 높을수록 생육량이 높은 경향을 보였다. 경작토양의 전질소 함량은 대개 0.1-0.6%인데(Kim 등, 2006), 펄라이트 소립을 단용과 혼용한 토양층의 조성 시 전질소 함량은 각각 0.0%와 0.1%로 낮게 나타났다. 조성 후 약 8년이 경과했을 때 RS-A-30, RS-A-45, RS-A-60의 전질소 함량은 각각 0.5%, 0.3%, 0.3%

Table 8. Changes of physical properties of the soils used in different extensive green roof systemsover the experimental period.

System	Bulk density (g·cm^{-3})		Field capacity (v/v, %)	
	Mar. 17, 2001	Oct. 27, 2008	Mar. 17, 2001	Oct. 27, 2008
RS-A-30	0.15 b^{z}	0.15 b	51.6 a	60.0 b
RS-A-45	0.15 b	0.17 b	51.6 a	66.2 a
RS-A-60	0.15 b	0.16 b	51.6 a	64.9 ab
RS-B-60	0.64 a	0.95 a	34.8 b	50.8 c

^{z}Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at P = 0.05.

Table 9. Changes in pH, the amount of organic carbon (Org. C), total nitrogen (T-N), and available phosphorus (Av-P_2O_5) of the soils used in different extensive green roof systems over the experimental period.

System	pH		Org. C (%)		T-N (%)		Av-P_2O_5 (mg·kg^{-1})	
	Mar. 17, 2001	Oct. 27, 2008	Mar. 17, 2001	Oct. 27, 2008	Mar. 17, 2001	Oct. 27, 2008	Mar. 17, 2001	Oct. 27, 2008
RS-A-30	8.2 a	6.2 b	0.0 b	1.4 c	0.0 a	0.5 a	2 a	135 b
RS-A-45	8.2 a	5.8 c	0.0 b	4.0 a	0.0 a	0.3 b	2 a	195 b
RS-A-60	8.2 a	6.0 bc	0.0 b	2.2 b	0.0 a	0.3 b	2 a	125 b
RS-B-60	6.5 b	6.6 a	0.8 a	2.0 bc	0.1 a	0.3 b	2 a	335 a

^{z}Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at P = 0.05.

이고 RS-B-60의 전질소 함량은 0.3%로 모든 처리구들에서 증가를 보였다. 유효인산은 경작토양의 경우 114mg·kg^{-1} 정도이고 산림토양은 11mg·kg^{-1} 정도이며 이상적인 수준은 200 mg·kg^{-1}로 보고되었는데(Ryu와 Lim, 1995), 시스템에 사용된 토양의 유효인산 함량은 실험 초기에는 모두 낮았으나 약 8년이 경과한 후에 RS-A-30, RS-A-45, RS-A-60의 유효인산 함량은 각각 135mg·kg^{-1}, 195mg·kg^{-1}, 125mg·kg^{-1}으로 경작토양 수준을 보였고 RS-B-60의 유효인산 함량은 335 mg·kg^{-1}으로 이상적인 수준을 초과하며 통계적으로 유의성 있게 높은 값을 나타냈다. 치환성 양이온들은 조성 시 전반적으로 매우 낮은 값을 보였고 조성 후 8년이 경과했을 때 상대적으로 높은 값을 나타냈으며, 특히 RS-A-45가 전반적으로 높은 값을 보였다(Table 10). Ex-K는 보통 경작토양의 경우 0.32cmol^{+}·kg^{-1}, 산림토양의 경우 0.22cmol^{+}·kg^{-1} 정도이며 이상적인 수준은 0.5cmol^{+}·kg^{-1} 정도인데(Ryu와 Lim, 1995), 본 실험에 사용된 토양은 조성 후 약 8년이 경과되었을 때 모두 경작토양의 수준을 나타냈다. Ex-Ca와 Ex-Mg는 경작토양의 경우 각각 4.20cmol^{+}·kg^{-1}과 1.20cmol^{+}·kg^{-1}, 산림토양의 경우 각각 0.75cmol^{+}·kg^{-1}과 0.73cmol^{+}·kg^{-1} 정도이며 이상적인 수준은 각각 5.0cmol^{+}·kg^{-1}과 2.0cmol^{+}·kg^{-1} 정도인데(Ryu와 Lim, 1995), 본 실험에 사용된 토양은 조성 후 약 8년이 경과되었을 때 약간 상승하였지만 여전히 낮은 수준을 나타냈다. 양이온치환용량은 조성 시 전반적으로 매우 낮은 값을 보였고 조성 후 8년이 경과했을 때 상대적으로 높은 값을 나타냈으며, 특히 RS-A-45가 통계적으로 유의성 있게 높은 값을 보였다(Table 10). 양이온치환용량은 경작토양의 경우 10.3cmol^{+}·kg^{-1}, 산림토양의 경우 7.0cmol^{+}·kg^{-1} 정도이며 이상적인 수준은 15-20cmol^{+}·kg^{-1} 정도인데(Ryu와 Lim, 1995), 본 실험에 사용된 토양은 조성 후 약 8년이 경과한 시점에서 전반적으로 상승하였지만 RS-A-30과 RS-A-60은 여전히 낮은 수준을 나타냈으며, RS-B-60은 산림토양의 수준을 나타냈고 RS-A-45는 경작토양의 수준으로 양호하게 나타났다.

토양의 이화학성을 전반적으로 살펴보면 RS-A-45가 가장 우수하고, 토심을 제외한 나머지 조건들이 동일한 RS-A-30과 RS-A-60의 이화학적 특성은 상대적으로 식물 생육에 불리한 것으로 나타났다. 펄라이트 소립을 자연토양과 부피비 1:1로 혼용하여 조성한 RS-B-60의 이화학적 특성은 조성 당시에는 상대적으로 우수하였지만 약 8년이 경과한 후에는 RS-A-45와 비교하여 식물 생육에 불리하게 나타났다. 이 결과는 식물에 적합한 토심으로 조성된 토양층이 장기적으로 왕성한 생육을 유도하여 근권부의 유기물 함량을 증가시키고 그 결과로 양이온치환용량을 향상시키며 보비력을 증가시키므로 토양의 이화학적 특성을 향상시키는데 보다 효과적임을 보여주고 있다(Kim 등, 2006; Warncke, 1986).

옥상녹화 시스템의 하중 평가

처리에 따른 옥상녹화 시스템의 하중을 평가하기 위해 조성 후 8년이 경과한 시점에서 식물체를 포함한 포장용수 시 토양층의 중량을 앞서 제시한 용적밀도, 포장용수량 측정값들과 식물체의 생체중을 이용하여 산출하였다(Table 11). 수고와 수관폭이 각각 0.3m인 영산홍을 Kim 등(1993)이 제시

Table 10. Changes in the amount of exchangeable cations (Ex-K, Ex-Ca, Ex-Mg) and exchangeable capacity (CEC) of the soils used in different extensive green roof systemsover the experimental period.

System	Ex-K (cmol^{+}·kg^{-1})		Ex-Ca (cmol^{+}·kg^{-1})		Ex-Mg (cmol^{+}·kg^{-1})		CEC (cmol^{+}·kg^{-1})	
	Mar. 17, 2001	Oct. 27, 2008	Mar. 17, 2001	Oct. 27, 2008	Mar. 17, 2001	Oct. 27, 2008	Mar. 17, 2001	Oct. 27, 2008
RS-A-30	0.06 a	0.31 b	0.42 b	1.34 c	0.08 a	0.27 b	0.9 b	4.2 c
RS-A-45	0.06 a	0.45 a	0.42 b	3.71 a	0.08 a	0.83 a	0.9 b	11.4 a
RS-A-60	0.06 a	0.28 b	0.42 b	1.33 c	0.08 a	0.20 b	0.9 b	4.8 c
RS-B-60	0.05 a	0.33 b	0.67 a	2.72 b	0.26 b	0.79 a	4.7 a	7.0 b

[z]Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at P = 0.05.

Table 11. The weight of different extensive green roof systems at 8 years after installation.

System	Plant fresh weight (kg·m^{-2})	Soil weight (kg·m^{-2})	Field capacity (kg·m^{-2})	Total weight (kg·m^{-2})
RS-A-30	1.9	45.0	180.0	226.9
RS-A-45	2.2	76.5	297.9	376.6
RS-A-60	1.8	96.0	389.4	487.2
RS-B-60	1.1	570.0	304.8	875.9

한 식재 간격을 기준으로 1m^2 당 9주를 식재한 경우 1m^2 당 식물체의 생체중은 약 1-2kg 정도로 나타났고(Table 7), 1m^2 당 토양층의 총 중량은 펄라이트 소립을 단용으로 조성한 토심 30cm, 45cm, 60cm 토양층에서 각각 45.0kg, 76.5kg, 96.0kg, 펄라이트 소립을 자연토양과 부피비 1:1로 혼용하여 조성한 토심 60cm 토양층에서는 570kg으로 산출되었다(Table 8). 건축물의 옥상을 옥상플라자, 테라스, 옥상정원으로 이용할 경우 적재하중을 500kg로 제한하고 있는데(HICT, 1997), 펄라이트 소립을 자연토양과 부피비 1:1로 혼용하여 조성한 토양층은 토심 50cm를 초과할 경우 자체 중량만으로도 허용 적제하중을 초과하는 것으로 나타났다. 포장용수 시 토양층에 포함된 수분 중량은 펄라이트 소립을 단용하여 조성한 경우 자체 중량의 약 4배 정도, 펄라이트 소립을 자연토양과 부피비 1:1로 혼용하여 조성한 경우 자체 중량의 약 0.5배 정도로 나타났다(Table 8). 결과적으로 옥상녹화 시스템 구성 시 펄라이트 소립을 단용으로 사용하고 토양층의 토심을 60cm 이하로 조성하거나 펄라이트 소립을 혼용으로 사용하고 토양층의 토심을 35cm 미만으로 조성하면 포장용수량 시에도 500kg·m^{-2}을 초과하지 않을 것으로 예측되었다. 최종으로 조성 후 8년이 경과한 시점에서 식물체를 포함한 포장용수량 시 시스템의 총중량은 RS-A-45의 경우 376.6kg·m^{-2}으로 옥상정원 조성을 위한 허용 적재하중인 500kg·m^{-2}보다 상당히 낮은 안전한 시스템이라고 볼 수 있으며, RS-A-60의 경우 487.2kg·m^{-2}으로 사람의 활동, 부가적인 시설물들의 설치 등의 요인 발생 시 과도한 하중의 위험이 있을 것으로 평가되었다.

초 록

최근 도시의 환경문제로 인하여 옥상녹화에 많은 관심이 집중되고 있다. 옥상녹화 기술의 핵심은 식물의 생육을 건전하게 유지하는 동시에 건축물에 미치는 하중을 최소화할 수 있는 토양층을 조성하는 것이다. 본 연구는 옥상 환경에서 관목류의 생육을 건전하게 유지하면서 하중을 최소화할 수 있는 최적의 저관리 녹화 시스템을 구명하기 위한 연구의 일환으로서 상록관목인 영산홍을 식물재료로 선정하고 펄라이트를 주재료로 한 토심 30cm, 45cm, 60cm의 인공토양층을 건축물 옥상에 조성한 후, 2001년부터 2008년까지 식물 생육, 토양의 물리적·화학적 특성 변화, 건축물에 미치는 하중에 대한 평가를 수행하였다. RS-A-45와 RS-A-60에서는 실험 기간 동안 100%의 식물 생존율을 나타냈고 RS-A-30과 RS-B-60에서는 2008년에 각각 33%와 67%의 식물 생존율을 나타냈다. RS-A-45에서는 지속적으로 가장 높은 생육량이 나타났고 토양의 물리적·화학적 특성도 가장 우수하게 나타났다. 조성 후 8년이 경과한 시점에서 식물체를 포함한 포장용수 시 RS-A-45의 총중량은 376.6kg·m^{-2}으로 옥상녹화 허용 적재하중인 500kg·m^{-2}보다 상당히 낮아 하중 측면에서도 적합한 것으로 평가되었다.

추가 주요어 : 인공 배지, 적재 허용 하중, 펄라이트, 토심, 생존율

인용문헌

Bang, K.J., J.H. Ju, and S.H. Kim. 2004. Effects of soil depth and irrigation period on some of the native plants in an artificial substrate of roof garden. J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech. 7(6):75-83.

Choi, H.S., S.S. Lee, and Y.B. Lee. 2001. The growth of *Hosta longips* according to soil depth and composted growing media available to rooftop garden. J. Kor. Inst. Landscape Architecture 29(3):46-54.

Choi, H.S., S.Y. Hong, K.G. Kim, B.E. Yang, and W.Y. Oh. 2003. A study of management method of planted plants and invasive plants through monitoring on rooftop garden 'Chorokttteul' in Seoul City Hall. J. Kor. Inst. Landscape Architecture 31(3):114-124.

Editorial Committee of Handbook of Advanced Materials (ECHAM). 1995. Handbook of advanced materials. Sehwa Publishing Co., Ltd. Seoul. p. 744-747.

Huh, K.Y. and K.K. Shim. 2000. Characteristics of artificial soils used alone or in a blending with field soil for the greening of artificial ground. J. Kor. Inst. Landscape Architecture 28(2):28-38.

Huh, K.Y. and K.K. Shim. 2001. Development of artificial soil by advanced materials for the greening of artificial ground. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 42:355-364.

Huh, K.Y., I.H. Kim, and N.H. Ryu. 2003. Effects of substrate type, soil depth, and drainage type on the growth of *Sedum kamtschaticum* in extensive green roof systems. J. Kor. Inst. Landscape Architecture 31(4):90-100.

Hyundai Institute of Construction Technology (HICT). 1997. A study on the greenery on artificial ground. Hyundai Institute of Construction Technology. Seoul.

Kim, G.H., G.Y. Kim, J.K. Kim, D.M. Sa, J.S. Seo, B.K. Son, J.U. Yang, K.C. Yum, S.E. Lee, K.Y. Jung, D.Y. Jung, Y.T. Jung, J.B. Jung, and H.N. Hyun. 2006. Soil science. Hyangmoonsa. Seoul. p. 203.

Kim, I.H. and K.Y. Huh. 2003. Growth characteristics of *Sedum oryzifolium* in extensive green roof systems. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 21:346-352.

Kim, I.H., M.R. Huh, and K.Y. Huh. 2005. Studies on growth characteristics and shallow green-roof systems of *Sedum album* L. introduced in Korea. J. Kor. Inst. Landscape Architecture 33(5):69-82.

Kim, K.G., N.C. Kim, N.O. Kim, S.H. Kim, Y.B. Kim, Y.K. Kim, Y.S. Kim, Y.T. Kim, S.K. Moon, K.J. Bang, K.J. Song,

W.K. Shin, W.K. Shim, K.Y. Yun, B.R. Lee, M.B. Choi, and S.B. Choi. 1993. Landscape planting plan & design. Munundang Publishing Co., Ltd. Seoul. p. 89-91.

Kim, S.S. 2007. Landscaping woody plants in Korea. Kimoondang Publishing Co., Ltd. Seoul. p. 164-165.

Lee, E.H., E.J. Cho, M.Y. Park, D.W. Kim, and S.W. Jang. 2007. Selecting plants for the extensive rooftop greening based on herbal plants. J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech. 10(2):84-96.

Lee, E.H., K.Y. Kang, S.H. Shin, M.A. Nam, and K.W. Lee. 2005. Soil mixtures and depths selection for mat-type rooftop greening. J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech. 8(4):12-22.

Lee, E.Y. and S.K. Moon. 2000. Effects of drainage types of soil media on the plant growing in rooftop planting. J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech. 3(4):11-21.

Lee, S.K., N.H. Ryu, and K.Y. Huh. 2002. Load of soil layers established with perlite. J. Kor. Inst. Landscape Architecture 30(1):87-95.

Lee, Y.N. 1996. Illustrated guide to Korean plants. Kyohak Publishing Co., Ltd. Seoul. p. 582.

Moon, S.K., E.Y. Lee, and M.K. Guak. 2002. A study on selection of wild plants for the rooftop revegetation. J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech. 5(3):31-39.

Pritchett, W.L. and R.F. Fisher. 1987. Properties and Management of Forest Soils. 2nd ed., John Wiley & Sons. New York. p. 494.

Ryu, S.H. and S.G. Lim. 1995. Soil fertilizer. Korea National Open University Press. Seoul. p. 155.

Waddington, D.V. 1992. Soil, soil mixtures, and soil amendments. In D.V. Waddington, R.N. Carrow, and R.C. Shearman, Turfgrass. Agronomy No. 32. Wisconsin: American Society of Agronomy. p. 331-383.

Yang, B.E. 2004. Current status and issues of green roof technology in Korea. J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech. 7(4):1-7.