

도시조경수의 우수차집 효과와 계량모델†

- 7개 향토수종을 대상으로 -

박혜미* · 조현길** · 김진영*

*강원대학교 생태조경디자인학과 강사 · **강원대학교 생태조경디자인학과 교수

Rainfall Interception by and Quantitative Models for Urban Landscape Trees - For Seven Native Species -

Park, Hye-Mi* · Jo, Hyun-Kil** · Kim, Jin-Young*

*Lecturer, Dept. of Ecological Landscape Architecture Design, Kangwon National University

**Professor, Dept. of Ecological Landscape Architecture Design, Kangwon National University

ABSTRACT

This study developed quantitative models to estimate the rainfall interception by seven native landscape tree species based on throughfall measurements. The tree species considered in this study were *Abies holophylla*, *Acer palmatum*, *Ginkgo biloba*, *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Prunus yedoensis*, and *Zelkova serrata*, which are frequently planted in the Korea. Among these species, 35.8% of the annual precipitation was intercepted by *P. koraiensis*, 34.1% by *A. holophylla*, 31.0% by *Z. serrata*, 27.6% by *P. densiflora*, 26.9% by *G. biloba*, 18.6% by *A. palmatum*, and 18.4% by *P. yedoensis*. All the quantitative models showed high fitness with r^2 values of 0.90-0.99. The annual rainfall interception from a tree with DBH of 20 cm were greatest with *Z. serrata* (5.1 m³/yr), followed by *P. koraiensis* (4.1 m³/yr), *A. holophylla* (3.1 m³/yr), *G. biloba* (2.8 m³/yr), *P. densiflora* (2.1 m³/yr), *P. yedoensis* (1.9 m³/yr), and *A. palmatum* (1.8 m³/yr) in order. Thus, evergreen tree species or those with a relatively high crown density were more effective in intercepting rainfall. In particular, the annual rainfall interception by *Z. serrata* was the greatest because its crown area, volume, and density were higher than those of the other species. This study pioneers in quantifying annual rainfall interception for landscape tree species in Korea. The study results can be useful for evaluating rainfall interception by landscape trees in urban greenspace design for governments and corporations.

Key Word: Urban Greenspace, Ecosystem Service, Crown Density, Throughfall, Ecological Landscape Architecture

† : 본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(2017043B10-1919-BB01; 2019151D10-2123-0301)의 지원에 의하여 이루어진 것임.

Corresponding author: Hyun-Kil Jo, Professor, Dept. of Ecological Landscape Architecture Design, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea, Tel.: +82-33-250-8345, E-mail: jhk@kangwon.ac.kr

국문초록

본 연구는 국내에서 식재빈도가 높은 7개 조경수종을 대상으로 수관의 우수차집비율을 분석하고, 이를 기반으로 수종별 단목의 연간 우수차집량을 유추하는 계량모델을 마련하였다. 연구대상 수종은 느티나무, 단풍나무, 소나무, 왕벚나무, 은행나무, 잣나무, 전나무 등이었다. 수종별 수관의 평균 우수차집비율은 각각 잣나무 35.8%, 전나무 34.1%, 느티나무 31.0%, 소나무 27.6%, 은행나무 26.9%, 단풍나무 18.6%, 왕벚나무 18.4% 등의 순이었다. 계량모델의 r^2 은 0.90-0.99 범위로서 적합도가 높았다. 수종별 연간 우수차집량은 흉고직경 20cm 기준 느티나무가 5.1m³/주/년으로서 가장 많았고, 이어서 잣나무 4.1m³/주/년, 전나무 3.1m³/주/년, 은행나무 2.8m³/주/년, 소나무 2.1m³/주/년, 왕벚나무 1.9m³/주/년, 단풍나무 1.8m³/주/년 등의 순이었다. 수관폭 4m 기준의 경우에는 잣나무가 5.0m³/주/년으로서 가장 많았고, 이어서 전나무 4.4m³/주/년, 느티나무 4.1m³/주/년, 은행나무 3.3m³/주/년, 소나무 2.9m³/주/년, 단풍나무 2.1m³/주/년, 왕벚나무 1.9m³/주/년 등의 순으로 나타났다. 즉, 도시조경수의 연간 우수차집량은 상록수 또는 수관밀도가 높은 수종이 많은 경향이였다. 본 연구는 도시녹지의 우수차집 효과 관련 연구가 미진한 국내 현실에서, 조경수의 연간 우수차집량을 산정할 수 있는 초석을 새롭게 마련하였다. 이 연구결과는 정부, 지자체, 및 기업에서 시행하는 생태조경 사업과 관련하여 조경수의 우수차집 효과를 평가하는 공공기반기술로서 유용할 것으로 기대한다.

주제어: 도시녹지, 생태계 서비스, 수관밀도, 수관통과율, 생태조경

1. 서론

도시는 일반적으로 수목, 토양 및 자연배수체계 대신 건물, 불투수성 포장 등이 우점하여 지하수량이 적은 반면, 강우 시 지표수량이 많고 그 정체시간이 짧은 편이다. 국내의 최근 5년간 연평균 강수량은 약 1,189mm로서, 그 강수량의 55%가 6~9월에 집중된다(KMA, 2015; 2016; 2017; 2018; 2019). 최근 10년 동안 여름철 태풍 및 호우로 인해 발생한 연간 경제적 피해액은 약 3천억 원이며(MOIS, 2019), 도시화에 따른 불투수면 증가는 이를 더욱 가중시킨다. 이러한 도시환경에서 녹지의 주요 시공재료인 조경수는 우수를 수관과 줄기에 차집 및 저장하여 증발에 의해 대기로 환원하고, 과도한 유거수량을 제어한다(Xiao and McPherson, 2002). 이에, 국내를 비롯한 세계 각국에서 도시의 홍수 제어와 우수의 효율적 이용을 위한 수단으로서, 도시조경수에 대한 관심이 증가하고 있는 상황이다.

미국에서는 1990년대부터 본격적으로 조경수의 우수차집량을 계량화하는 기반정보를 구축하고, 도시별 그 효과를 추정한 바 있다. 미국 새크라멘토의 도시조경수 수관은 연간 강우량의 약 11%를 차집하며(Xiao *et al.*, 1998), 침엽수림 수관은 강우가 지표면에 도달하기 전에 연 강우량의 약 40%를 활엽수림의 경우는 20%를 각각 차집하는 것으로 보고된다(Miller, 1997). 미국 도시조경수 1주당 연간 우수차집량은 도시에 따라 최소 1.8(새크라멘토)~최대 6.6m³/주(산타모니카)로서(Xiao *et al.*, 1998; Xiao and McPherson, 2002), 각 도시의 수종 구성이나 강우량에 따라 다소 차이를 보였다. 이 외에도, 오클랜드에 분포하는 은행나무(*Ginkgo biloba*), 미국풍나무(*Liquidambar*

styraciflua) 및 레몬나무(*Citrus limon*)는 우수를 각각 25.2%, 14.3% 및 27.0%를 차집하는 것으로 나타났다(Xiao and McPherson, 2011). 한편, 상기 선행연구들에 따르면 도시조경수의 우수차집량을 산정하는 방법은 다음과 같이 분류할 수 있다. 첫째, 도시조경수 수관 내외부에 차집통을 설치하여 강우시마다 대조구 대비 우수차집량을 실측하는 방법으로서, 연구결과와 정확도를 높이는 데 유리하나, 다수의 표본과 다년간의 실측기간이 소요된다. 둘째, 도시조경수의 수관 투영면적, 엽면적 지수, 연간 강우량 등을 기반으로 수관의 우수차집량을 산정하는 방법으로서, 단기간에 우수차집량을 예측할 수 있는 반면, 전자의 방법 대비 정확도가 낮을 수 있다. 아울러, 이 방법은 항공사진, 도시녹지 구조 인벤토리, 기상현황 등 별도의 기반자료가 요구된다.

국내에서는 도시조경수의 우수차집 효과를 산정한 연구가 부진하며, 주로 산림수목을 중심으로 관련 연구(Woo, 1993; Kim *et al.*, 2004; 2005; Jung *et al.*, 2007; KFRI, 2016)가 수행되어 왔다. 경기도의 낙엽활엽수림, 잣나무림 및 혼효림 내외부에 차집통을 설치하여 강우시마다 대조구 대비 우수차집량을 실측한 결과, 이들 수림은 연 강우량의 23.5%, 37.2% 및 22.6%를 각각 차집하는 것으로 나타났다(Kim *et al.*, 2005). 도시조경수는 인위적 관리, 수목 간 경합조건 등의 차이로 인해 그 수관생장이 산림수목과 상이하다. 따라서, 기존 산림수목의 우수차집량을 개방 성장한 조경수에 직접적으로 적용하는 것은 적지 않은 오차를 야기할 수 있다. 도시 스케일에서 전체 수목의 우수차집 효과를 진단하고, 이를 증진할 생태조경 디자인 및 시공방안을 강구하기 위해서는 도시조경수 개체별 우수차

집 효과를 계량화할 수 있는 기반자료가 필요하다. 그러나, 이에 대한 국내 연구는 매우 미흡한 상황이며, 국외의 연구결과는 수목의 성장환경과 기상환경의 차이로 인해 국내에 직접적으로 적용하는데 한계가 따른다. 따라서, 본 연구의 목적은 국내에서 식재빈도가 높은 도시 조경수종을 대상으로 현장실측을 통해 수관의 우수차집비율을 파악하고, 이를 기반으로 단목의 연간 우수차집량을 용이하게 추정할 수 있는 계량모델을 마련하여 도시녹지의 우수차집 효과를 산정하는데 필요한 실용적 정보를 구축하는 것이다.

II. 연구내용 및 방법

1. 측정대상수종 및 장소 선정

국내 도시조경수 식재현황 관련 선행연구 및 문헌(Bang and Lee, 1995; Jo *et al.*, 1998a; 1998b; 2019a; 2019b; 2020; Park and Kang, 2010; Jo, 2020)을 검토하여, 중부지방에서 식재빈도가 높은 향토 조경수종 중 7개의 교목종을 연구대상 수종으로 선정하였다. 선정 수종은 느티나무(*Zelkova serrata*), 단풍나무(*Acer palmatum*), 소나무(*Pinus densiflora*), 왕벚나무

(*Prunus yedoensis*), 은행나무, 잣나무(*Pinus koraiensis*) 및 전나무(*Abies holophylla*)이었다. 우수차집량 측정장소는 상기 수종들이 모두 분포하면서 연구장비의 설치 협조가 가능한 강원대학교 춘천 캠퍼스를 선정하였다. 연구대상 수목은 측정장소에서 건물이나 구조물에 의한 방해 없이 개방 성장하면서, 수종 고유의 수형을 유지하고, 수관 등이 정상적으로 성장한 개체를 채택하였다(Figure 1 참조).

2. 우수차집량 측정

조경수의 우수차집량은 강우량에서 수관통과율과 수간유량을 제감하여 산정하게 되는데, 이들은 현장 실측 또는 수관 투영면적과 강우량의 응용을 통해 유추가 가능하다. 본 연구에서는 도시조경수의 수관에 의한 연간 우수차집량을 실측하기 위해, 수목마다 지름 16cm, 높이 18cm의 원형차집통을 수관 내부에 5개, 외부 대조구에 1개씩 각각 설치하였다(Figure 2 참조). 수관 내부의 우수차집통은 그 위치에 따른 차집량의 차이를 고려하여 5개 등간격 방향으로 배치하였다. 설치된 차집통들은 강우 시 지표면의 이물질 투입과 강풍에 의한 전도를 방지하기 위해, 두께 6cm 높이의 벽돌 위에 고정하였다. 그리고, 2018년부터 2020년까지 3년 동안 총 33회에 걸쳐 강우 시마다



Figure 1. Location and growing conditions of study trees

Legend: ① *Abies holophylla*, ② *Acer palmatum*, ③ *Prunus yedoensis*, ④ *Pinus koraiensis*, ⑤ *Zelkova serrata*, ⑥ *Ginkgo biloba*, ⑦ *Pinus densiflora*, (C) control plot

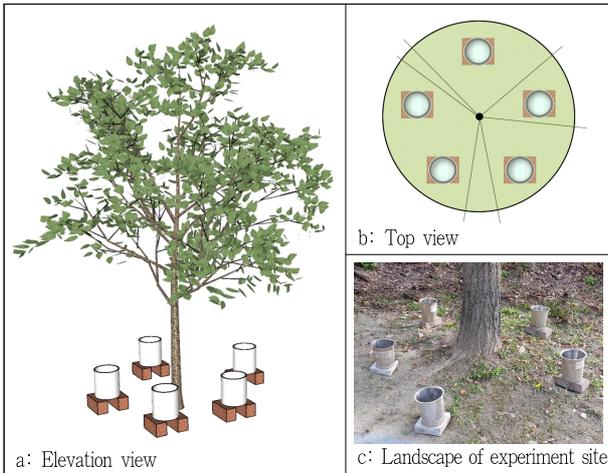


Figure 2. Experiment design for measuring rainfall interception of study trees

대조구 대비 수관의 우수차집량을 측정하고, 강우량, 강우빈도, 습도 등의 기상현황을 파악하였다. 우수차집통의 규격 및 샘플 수의 결정은 연구결과의 신뢰도를 결정하는 중요한 요인이다. 국내 산림수목 관련 선행연구에서는 산림의 수관통과우 측정을 위해 수림마다 지름 21cm의 원형차집통을 6개 배치한 바 있다(Jung *et al.*, 2007). 미국의 경우는 도시조경수의 수관 내부에 지름 10.2cm, 높이 15.2cm의 차집통을 10개씩 배치하여 수관통과우를 실측하였다(Xiao and McPherson, 2011). 이들 연구는 3영급의 수림(Jung *et al.*, 2007) 또는 흉고직경 약 10~65cm의 수목들(Xiao and McPherson, 2011)을 대상으로 실시되었고, 차집통의 규격은 수목의 크기나 성장환경에 따라 다소 상이하였다. 본 연구의 차집통 규격 및 샘플수의 결정은 상기 선행연구 결과, 연구 예산, 차집통 운반의 용이성, 데이터의 통계적 신뢰성 등을 감안하여 가감 조정한 것이다.

수목의 수관에 의한 우수차집량을 측정하기 위해서는 불가피하게 박피, 실리콘 왁스 부착 등으로 그 부위를 훼손하게 된다. 본 연구에서는 학교에서 공공자산인 수목의 훼손을 용인하지 않았고, 관련 선행연구(Kim *et al.*, 2004; 2005; Jung *et al.*, 2007; Xiao and McPherson, 2011)에 따르면 전체 우수차집량에서 줄기에 의해 차집되는 양이 1~4%로 미미하였기 때문에, 그 측정을 포함하지 않았다. 다만, 줄기에 따른 우수차집량은 수종, 해당지역의 강우량, 강우빈도 등의 기상현황에 따라 상이할 수 있기 때문에, 향후 추가 연구를 통해 선행연구 결과를 비교검증할 필요가 있다. 한편, 계절별 변화하는 수목의 수관밀도는 우수차집량의 고저를 좌우하는 주요 인자이다. 따라서, 우수차집량에 영향을 미치는 수관밀도를 파악하기 위해 매월 중순 1회에 걸쳐 각 연구대상 수목 내에서 수직방향으로 수관을 5반복 사진 촬영한 후, 0.5cm×0.5cm 간격의 격자를 중첩하여 개방된 격자점의 비율을 분석하였다.

3. 우수차집 계량모델

도시조경수의 개체당 생장에 따른 연간 우수차집량을 산정하기 위한 가장 바람직한 방법은 동일한 환경 내에서 유목에서 성목에 이르는 일정간격 크기의 수목들을 대상으로 강우시마다 대조구 대비 그 차집량을 실측하는 것이다. 그러나 기존 도시녹지의 구조는 대부분 단령구조로 대표되기 때문에(Jo *et al.*, 2019a; 2019b; 2020; Jo, 2020), 수종, 규격 등을 고려한 별도의 실험구를 조성하지 않는 한 해당 연구를 수행하는 것은 매우 난이하다. 이에 도시조경수의 탄소저감, 대기정화 등의 생태계 서비스와 달리 단목의 우수차집량을 유추할 수 있는 계량모델을 마련한 연구는 국내의 모두 부재한 상황이다. 다만, 미국에서는 29,229주의 도시조경수 현장실사 인벤토리와 기상자료를 토대로 산타모니카 도시조경수의 개체당 연간 우수차집량을 계량화한 바 있다(Xiao and McPherson, 2002). 즉, 수관 투영면적, 강우량 등에 기인하여 29,229주의 조경수 개체별 연간 우수차집량을 산정하고, 이를 직경급(15cm 미만, 15~31cm, 31~46cm, 46~61cm, 61~76cm, 76cm 초과)별로 분류 및 제시하였다. 그 결과, 흉고직경 15~30cm 크기의 도시조경수는 수종에 따라 연간 3.0~6.5m³의 우수를 차집하였으며, 직경이 커질수록 차집량 역시 함께 증가하는 경향을 보였다.

본 연구 역시 상기 선행연구와 유사하게 3년간의 우수차집량 실측 결과와 국내 5개 도시의 공원에서 수행한 녹지구조 현장실사 인벤토리(Jo *et al.*, 2019b; Jo, 2020)를 활용하여, 도시조경수의 개체별 연간 우수차집량을 유추하는 계량모델을 마련하였으며, 그 과정은 다음과 같다(Figure 3 참조). 첫째, 서

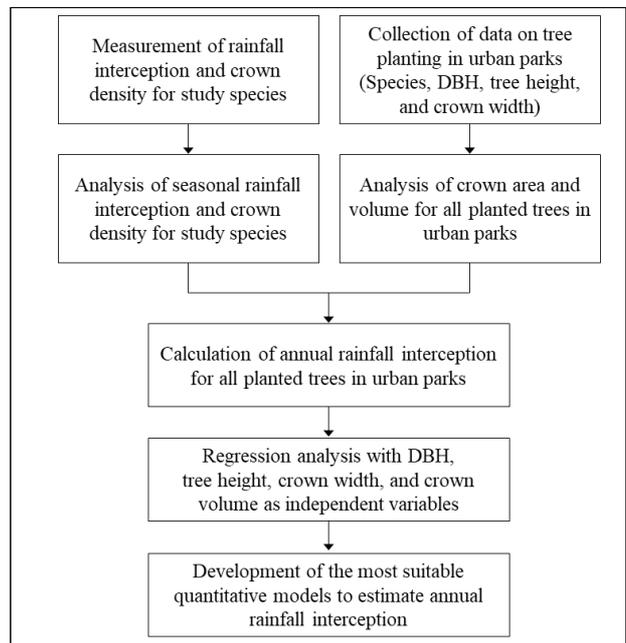


Figure 3. Systematic study flowchart

울, 대전, 대구, 춘천 및 순천을 대상으로 총 180개 공원에서 실시한 도시조경수 인벤토리에서 연구대상 수종이면서 흉고직경이 10cm 이상인 수목들을 표본으로 추출하였다. 본 연구에서는 우수차집량 실측 수목들 대부분이 성목이었기 때문에, 계량모델의 오류를 최소화하기 위해 흉고직경 10cm 미만의 유목들은 표본에서 제외하였다. 이 과정을 통해 추출된 수종별 수목의 개체수는 각각 느티나무 727개, 단풍나무 603개, 소나무 492개, 왕벚나무 313개, 은행나무 269개, 잣나무 513개 및 전나무 234개이었다. 둘째, 이들 모든 수목의 규격을 토대로 개체별 수관면적과 수관체적을 산출하였다. 셋째, 각 조경수의 수관면적에 우수차집비율, 수관밀도, 최근 5년간 월별 강우량(KMA, 2015; 2016; 2017; 2018; 2019) 등을 대입하여 모든 수목의 연간 우수차집량을 산정하였다. 넷째, 이들 산정치를 토대로 수목 인벤토리별 직경, 수고, 수관폭, 수관체적 등을 독립변수로 반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여, 수종별 생장에 따른 단목의 우수차집량을 산정하는 가장 적합한 회귀식과 변수를 결정하였다. 도시조경수의 우수차집 계량모델 관련 선행연구가 부재하여 직접적인 비교는 곤란하나, 흉고직경, 수고, 수관폭 및 수관체적은 수목의 탄소저장, 대기정화, 기온저감 등의 생태계 서비스를 추정하는데 전세계적으로 유용하게 활용되고 있는 변수이다(Nowak, 1994; Jo and cho, 1998; Jenkins *et al.*, 2003; Zianis *et al.*, 2005; Jo and Ahn, 2006; 2012; Nowak *et al.*, 2008; Jo *et al.*, 2013; 2014; 2019c; 2019d; KFRI, 2014). 이에 본 연구 역시 상기 항목들을 우수차집 계량모델의 독립변수로 활용하였다. 적합한 계량모델을 도출한 이후에는, 이에 근거하여 각 수종의 일정크기별 연간 우수차집량을 산정하고, 수종간 그 성능을 비교분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 연구대상 수목의 성장현황

연구대상 수목은 강원대학교 춘천캠퍼스의 가로변이나 정원에 분포하고 있으며, 수종별 흉고직경은 느티나무 26.0cm, 단풍나무 21.4cm, 소나무 18.5cm, 왕벚나무 25.5cm, 은행나무 24.2cm, 잣나무 33.5cm, 전나무 17.3cm 등이었다(Table 1 참조). 즉, 이들은 성장과정의 유목이라기보다는 성목에 가까운 수목들이었다. 연구대상 수목의 계절별 수관밀도는 각각 느티나무 67.3~95.6%, 단풍나무 60.4~80.4%, 소나무 74.0~75.7%, 왕벚나무 56.6~76.5%, 은행나무 50.7~91.9%, 잣나무 92.2~95.4%, 전나무 91.3~92.3% 등의 범위로서(Table 2 참조), 공통적으로 수목의 성장기간인 6~8월 여름에 가장 높은 경향이었다. 아울러, 상록수는 4계절 내내 수관밀도가 높았고, 낙엽수는 겨울에 그 수관밀도가 여름 대비 약 20~40% 감소하는 것으로 분석되었다.

Table 1. Size of study trees by species

| Species | DBH* (cm) | Height(m) | Crown | |
|-------------------------|-----------|-----------|----------|--------------------------|
| | | | Width(m) | Volume (m ³) |
| <i>Abies holophylla</i> | 17.3 | 9.3 | 4.3 | 26.6 |
| <i>Acer palmatum</i> | 21.4 | 4.7 | 5.2 | 36.1 |
| <i>Ginkgo biloba</i> | 24.2 | 9.5 | 4.4 | 30.4 |
| <i>Pinus densiflora</i> | 18.5 | 6.8 | 3.5 | 16.8 |
| <i>Pinus koraiensis</i> | 33.5 | 11.5 | 5.1 | 54.4 |
| <i>Prunus yedoensis</i> | 25.5 | 6.8 | 5.3 | 49.6 |
| <i>Zelkova serrata</i> | 26.0 | 7.5 | 5.8 | 59.4 |

* Stem diameter at breast height of 1.2m(the same with subsequent tables and figures).

Table 2. Seasonal crown density of study species for three years from 2018 to 2020

| Species | Crown density(%) | | | |
|-------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | Spring (Apr.-May) | Summer (June-Aug.) | Autumn (Sept.-Oct.) | Winter (Nov.-Mar.) |
| <i>Abies holophylla</i> | 91.3±1.8 | 92.1±1.2 | 92.3±3.8 | 91.5±0.9 |
| <i>Acer palmatum</i> | 72.1±1.1 | 79.3±1.2 | 80.4±0.6 | 60.4±2.6 |
| <i>Ginkgo biloba</i> | 72.6±1.9 | 91.9±2.5 | 88.5±0.4 | 50.7±6.1 |
| <i>Pinus densiflora</i> | 74.6±1.0 | 75.7±0.8 | 74.9±0.5 | 74.0±3.2 |
| <i>Pinus koraiensis</i> | 93.4±0.3 | 95.4±1.8 | 92.2±1.1 | 93.2±1.8 |
| <i>Prunus yedoensis</i> | 67.6±0.7 | 72.4±2.0 | 76.5±0.5 | 56.6±2.5 |
| <i>Zelkova serrata</i> | 81.8±0.3 | 95.6±0.2 | 93.0±0.2 | 67.3±0.7 |

2. 수종별 수관의 우수차집비율

2018년부터 3년 동안 총 33회에 걸쳐 우수차집량을 실측하였으며, 측정 당시 강우량을 비롯한 기상현황은 Table 3과 같다. 매회 강우량은 최소 4.2~최대 107.3mm이었으며, 연구기간 동안 총 8회에 걸쳐 호우주의보 및 경보가 발효되었다. 강우강도는 최소 0.5~최대 8.7mm/hr이었고, 최대 강우강도는 최소 1.8~최대 30.9mm/hr로서 강우량 및 강우강도와 비례하는 경향이었다. 수종별 수관의 평균 우수차집비율은 각각 잣나무 35.8±1.1%, 전나무 34.1±1.0%, 느티나무 31.0±0.9%, 소나무향이였다.

Table 3. Changes in air temperature, humidity, rainfall, and rainfall intensity for study years from 2018 to 2020

| Date | Air temperature (°C) | Humidity (%) | Rainfall (mm) | Rainfall intensity (mm/hr) | Maximum rainfall intensity (mm/hr) | |
|---------|----------------------|--------------|---------------|----------------------------|------------------------------------|------|
| 2018 | 04. 23. | 8.9 | 92.8 | 60.2 | 3.2 | 8.1 |
| | 05. 03. | 12.7 | 89.5 | 20.2 | 1.7 | 4.2 |
| | 05. 12. | 12.8 | 98.4 | 25.7 | 1.4 | 2.9 |
| | 05. 17. | 18.3 | 99.9 | 107.3 | 4.9 | 22.5 |
| | 06. 26. | 23.4 | 97.3 | 76.4 | 4.2 | 12.6 |
| | 06. 29. | 21.4 | 95.8 | 26.0 | 6.5 | 11.8 |
| | 07. 02. | 19.8 | 100.0 | 31.0 | 2.6 | 6.2 |
| | 07. 03. | 22.2 | 100.0 | 59.0 | 5.9 | 15.0 |
| | 09. 04. | 22.2 | 95.7 | 34.1 | 4.9 | 15.3 |
| 2019 | 03. 16. | 3.2 | 84.4 | 4.2 | 0.5 | 2.1 |
| | 03. 21. | 9.6 | 95.1 | 23.6 | 1.6 | 3.9 |
| | 04. 10. | 6.3 | 83.9 | 15.9 | 1.1 | 2.5 |
| | 04. 26. | 10.2 | 90.4 | 25.4 | 1.0 | 2.6 |
| | 05. 27. | 18.2 | 93.5 | 11.6 | 1.1 | 2.3 |
| | 06. 07. | 20.3 | 90.5 | 28.9 | 0.7 | 1.8 |
| | 06. 09. | 18.7 | 86.2 | 24.6 | 2.2 | 5.6 |
| | 07. 11. | 20.1 | 91.8 | 12.6 | 1.1 | 2.8 |
| | 07. 17. | 20.9 | 98.0 | 25.8 | 5.2 | 13.2 |
| | 07. 26. | 25.8 | 94.8 | 72.0 | 8.7 | 30.9 |
| | 07. 29. | 26.3 | 94.9 | 23.3 | 1.9 | 4.8 |
| | 07. 31. | 26.0 | 93.0 | 53.7 | 6.0 | 18.4 |
| | 08. 02. | 25.2 | 95.8 | 17.0 | 1.9 | 5.2 |
| | 08. 07. | 24.6 | 92.8 | 67.6 | 5.2 | 14.6 |
| | 08. 12. | 26.2 | 93.1 | 68.8 | 5.3 | 22.5 |
| 09. 06. | 22.7 | 95.1 | 68.6 | 6.0 | 28.9 | |
| 09. 11. | 22.4 | 94.0 | 57.2 | 2.7 | 6.6 | |
| 2020 | 01. 08. | 5.2 | 91.5 | 19.0 | 1.9 | 3.7 |
| | 02. 25. | 4.2 | 93.1 | 24.8 | 2.1 | 5.3 |
| | 05. 18. | 14.2 | 88.3 | 42.2 | 2.8 | 7.5 |
| | 05. 24. | 17.7 | 91.5 | 14.9 | 3.0 | 6.7 |
| | 07. 23. | 21.1 | 87.1 | 63.0 | 5.3 | 12.8 |
| | 08. 21. | 23.8 | 88.6 | 19.0 | 1.9 | 7.5 |
| | 09. 16. | 21.7 | 88.8 | 17.5 | 2.5 | 10.0 |

수종별 수관의 평균 우수차집비율은 각각 잣나무 35.8±1.1%, 전나무 34.1±1.0%, 느티나무 31.0±0.9%, 소나무 27.6±0.8%, 은행나무 26.9±1.2%, 단풍나무 18.6±0.8%, 왕벚나무 18.4±0.8% 등의 순이었으며, 상록수이거나 수관밀도가 높을수록 우수차집량이 많은 것으로 나타났다(Table 4 참조). 연구대상 수목의 계절별 우수차집비율의 경우, 상록수는 계절에 따라 큰 차이를 보이지 않은 반면, 낙엽수는 수관밀도가 최대치인 여름에 우수차집비율 역시 가장 높은 경향이였다. 관련 선행연구들에 따르면, 국내 산림수목의 우수차집비율은 잣나무림 37.2%, 소나무림 27.0% 및 낙엽수림 23.5%이었고(Woo, 1993; Kim *et al.*, 2005), 미국 도시조경수의 경우 은행나무 25.2%, 미국풍나무 14.3% 및 레몬나무 27.0%이었다(Xiao and McPherson, 2011). 이에 비하면 본 연구대상 수목의 우수차집비율은 대부분 상기 연구결과와 유사한 것으로 나타났다.

한편, 선행연구에 따르면 수관밀도 외에도 수목의 우수차집 효과의 고저를 결정하는 주요 인자는 강우량이었다(Woo, 1993; Kim *et al.*, 2004; 2005; Xiao and McPherson, 2011). 본 연구에서 도시조경수의 우수차집비율은 강우량이 증가할수록 오히려 감소하는 경향을 보였다(Figure 4 참조). 이는 강우량이 증가하면 도시조경수가 차집할 수 있는 우수의 양이 결국 포화점에 도달하여, 그 이후의 강우는 대부분 수관을 통과하기 때문이다(Figure 5 참조). 선행연구 역시 이와 유사한 경향을 보였는데, 강우량이 10mm일 경우 전체 강우량에서 산림수목의 수관통과율이 차지하는 비율은 37.6-60.7%인 반면, 강우량이 50mm일 경우에는 전자보다 약 1.5배 증가한 64.9-73.5%이었다(Kim *et al.*, 2004). 따라서, 도시의 제한된 식재공간 내에서 도시조경수에 의한 우수차집 효과를 증진하기 위해서는 교목 하부에 관목을 함께 식재하는 다층근식의 식재기법을 적용하여, 단위면적당 우수를 차집할 수 있는 수관면적을 확충함이 바람직할 것이다. 한편, 비록 직접적으로 비교할 수 있는 선행

Table 4. Rainfall interception of study species for three years from 2018 to 2020

| Species | Rainfall interception (%) | | | | |
|-------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|----------|
| | Spring (Apr.-May) | Summer (June-Aug.) | Autumn (Sept.-Oct.) | Winter (Nov.-Mar.) | Mean |
| <i>Abies holophylla</i> | 35.5±1.8 | 34.0±1.6 | 29.3±1.3 | 36.7±1.9 | 34.1±1.0 |
| <i>Acer palmatum</i> | 18.4±0.7 | 19.2±1.2 | 18.5±1.8 | 16.8±2.2 | 18.6±0.8 |
| <i>Ginkgo biloba</i> | 25.1±2.2 | 30.0±1.2 | 29.1±1.5 | 16.0±0.3 | 26.9±1.2 |
| <i>Pinus densiflora</i> | 27.6±1.3 | 28.3±1.3 | 25.9±1.4 | 26.7±0.9 | 27.6±0.8 |
| <i>Pinus koraiensis</i> | 37.0±1.9 | 35.7±1.9 | 34.2±0.9 | 35.3±1.2 | 35.8±1.1 |
| <i>Prunus yedoensis</i> | 17.6±1.3 | 18.9±1.4 | 18.7±0.8 | 17.3±0.8 | 18.4±0.8 |
| <i>Zelkova serrata</i> | 31.0±1.4 | 31.8±1.5 | 31.5±1.8 | 27.8±0.7 | 31.0±0.9 |

연구는 부재하나, 본 연구에 따르면 강우강도 또한 우수차집 효과를 좌우하는 주요 변수이었으며, 강우량과 마찬가지로 강우강도가 증가할수록 우수차집비율이 감소하는 경향을 보였다 (Figure 6 참조).

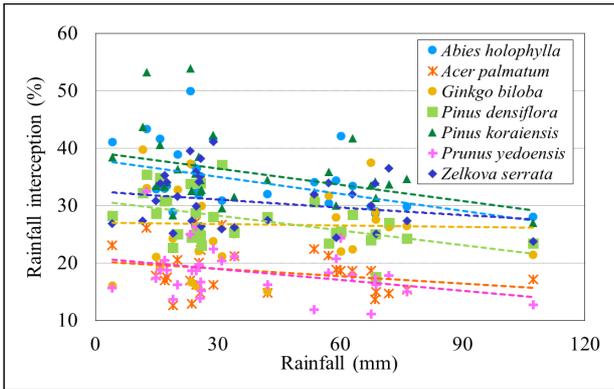


Figure 4. The relationship between rainfall and rainfall interception

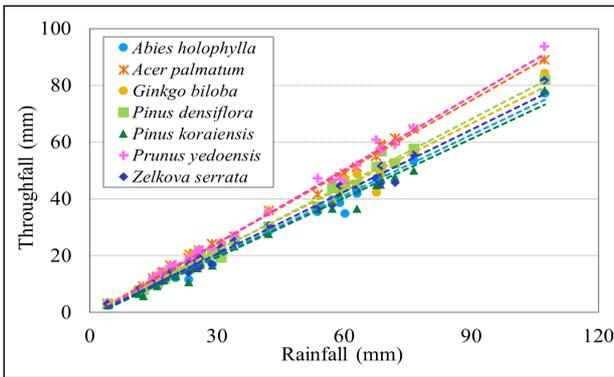


Figure 5. The relationship between rainfall and throughfall

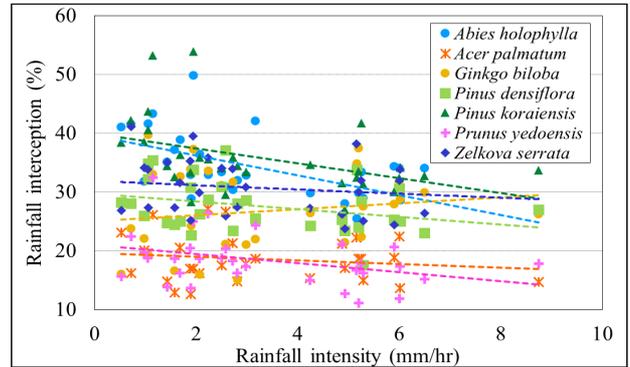


Figure 6. The relationship between rainfall intensity and rainfall interception

3. 우수차집 계량모델

Figure 7, Figure 8과 Table 5는 각각 수종별 단목의 직경 또는 수관생장에 따른 연간 우수차집량 변화와 우수차집량을 산정하는 계량모델을 나타낸다. 이들 계량모델은 F 검정 결과, 모두 통계적으로 유의하였고($p < 0.0001$), r^2 는 최소 0.90 이상으로서 적합도가 높았다. Y 절편 및 직경의 회귀계수도 t 검정 결과 모두 1% 수준에서 유의성을 나타냈다. 수고 또는 수관체적을 독립변수로 유도한 계량모델은 유의한 F 값을 보였으나, 전자의 계량모델 대비 r^2 가 훨씬 낮고(0.74 이하), 일부 수종의 모델들은 그 회귀계수가 5% 수준에서 유의하지 않았다. 조경수의 우수차집량을 계량화하는 독립변수로서 흉고직경, 수관폭, 수고, 수관체적 등을 함께 혼용할 수 있으나, 흉고직경과 수관폭이 함께 독립변수인 계량모델을 제외하고는 대부분 전자의 모델들보다 오히려 낮은 r^2 (0.70 이하)를 보였다. 또한, 수고 및 수관고의 경우, 현장에서 정확한 실측이 어렵기 때문에 이들을 고려한 회귀식은 오히려 추정오차가 클 수도 있다(Whittaker

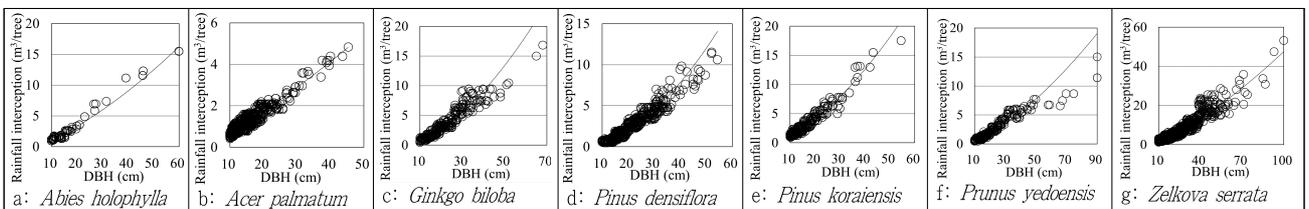


Figure 7. Changes in annual rainfall interception per tree by DBH growth of study species

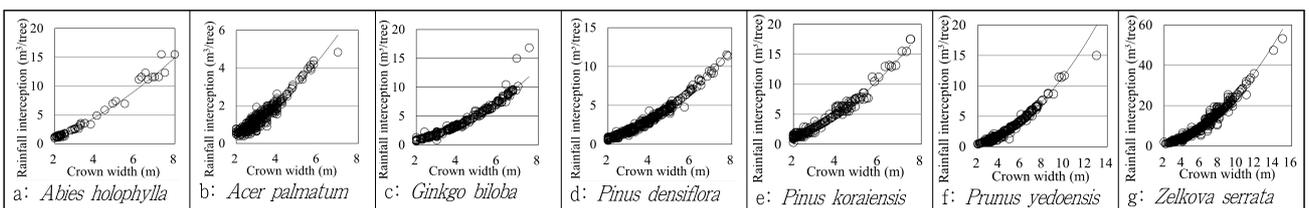


Figure 8. Changes in annual rainfall interception per tree by crown growth of study species

Table 5. Regression models to quantify annual rainfall interception per tree of study species

| Species | Regression model [*] | r ² | p | N | Range ^{**} | |
|-------------------------|-------------------------------|----------------|---------|-----|---------------------|-----------|
| <i>Abies holophylla</i> | lnY = -3.4548+1.5267 lnDBH | 0.9350 | <0.0001 | 234 | DBH | 10.0-59.8 |
| | lnY = -1.1541+1.8984 lnCW | 0.9524 | | | CW | 1.6-7.3 |
| <i>Acer palmatum</i> | lnY = -3.8542+1.4769 lnDBH | 0.9003 | <0.0001 | 603 | DBH | 10.0-45.3 |
| | lnY = -2.0157+1.9777 lnCW | 0.9739 | | | CW | 2.2-7.0 |
| <i>Ginkgo biloba</i> | lnY = -4.1479+1.7237 lnDBH | 0.9243 | <0.0001 | 269 | DBH | 10.0-68.0 |
| | lnY = -1.5127+1.9632 lnCW | 0.9772 | | | CW | 1.5-7.6 |
| <i>Pinus densiflora</i> | lnY = -5.105+1.9461 lnDBH | 0.9247 | <0.0001 | 492 | DBH | 10.0-54.3 |
| | lnY = -1.6367+1.9852 lnCW | 0.9711 | | | CW | 1.7-7.8 |
| <i>Pinus koraiensis</i> | lnY = -3.472+1.6281 lnDBH | 0.9157 | <0.0001 | 513 | DBH | 10.0-54.5 |
| | lnY = -1.0959+1.9457 lnCW | 0.9646 | | | CW | 1.8-7.5 |
| <i>Prunus yedoensis</i> | lnY = -3.9227+1.5249 lnDBH | 0.9298 | <0.0001 | 313 | DBH | 10.0-90.0 |
| | lnY = -2.108+1.9814 lnCW | 0.9857 | | | CW | 2.1-12.8 |
| <i>Zelkova serrata</i> | lnY = -2.4985+1.3769 lnDBH | 0.9007 | <0.0001 | 727 | DBH | 10.0-98.9 |
| | lnY = -1.3614+1.9926 lnCW | 0.9888 | | | CW | 2.0-15.0 |

* Y: Rainfall interception (m³/tree/yr).

** DBH: cm, CW (Crown width): m.

and Marks, 1975; Park and Lee, 1990). 흉고직경과 수관폭을 포함하는 계량모델은 흉고직경이나 수관폭만을 독립변수로 하는 계량모델과 적합도가 유사하였으나, 여러 변수를 혼용하기 보다는 흉고직경 또는 수관폭만을 독립변수로 선정하는 것이 그 활용 용이성과 실용성을 높이는데 유리할 것으로 판단된다. 탄소저감, 대기정화 등 도시조경수의 다양한 생태계 서비스를 산정하는 기존 계량모델들 역시 주로 흉고직경, 수관폭 등만을 독립변수로 적용하는 추세이었다(Nowak, 1994; Jenkins *et al.*, 2003; Zianis *et al.*, 2005; Nowak *et al.*, 2008; Jo and Ahn, 2012; Jo *et al.*, 2013; 2014; 2019c; 2019d).

상기한 계량모델들을 적용하여 수종에 따라 직경 및 수관폭 별 연간 우수차집량을 산정한 결과(Table 6 및 Table 7 참조), 수목 1주당 우수차집량은 그 생장과 비례하여 증가하는 경향이 었다. 즉, 직경 10cm 또는 수관폭이 2m씩 커질 때마다 각 수종의 우수차집량은 최소 1.3~최대 4.6배 이상 증가하였다. 흉고 직경 20cm 기준 수종별 연간 우수차집량은 느티나무가 5.1m³/주/년으로서 가장 많았고, 이어서 잣나무 4.1m³/주/년, 전나무 3.1m³/주/년, 은행나무 2.8m³/주/년, 소나무 2.1m³/주/년, 왕벚 나무 1.9m³/주/년, 단풍나무 1.8m³/주/년 등의 순이었다. 수관 폭 4m 기준의 경우에는 잣나무가 5.0m³/주/년으로서 가장 많 았고, 이어서 전나무 4.4m³/주/년, 느티나무 4.1m³/주/년, 은행 나무 3.3m³/주/년, 소나무 2.9m³/주/년, 단풍나무 2.1m³/주/년, 왕벚나무 1.9m³/주/년 등의 순으로 나타났다. 즉, 동일 직경 및 수관폭에선 대부분 잣나무, 전나무 및 느티나무의 우수차집량

Table 6. Rainfall interception per tree by DBH growth of study species (m³/tree/yr)

| Species | DBH (cm) | | | | |
|-------------------------|----------|-----|-----|------|------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| <i>Abies holophylla</i> | 1.1 | 3.1 | 5.7 | 8.8 | 12.4 |
| <i>Acer palmatum</i> | 0.6 | 1.8 | 3.2 | 4.9 | 6.8 |
| <i>Ginkgo biloba</i> | 0.8 | 2.8 | 5.6 | 9.1 | 13.4 |
| <i>Pinus densiflora</i> | 0.5 | 2.1 | 4.5 | 8.0 | 12.3 |
| <i>Pinus koraiensis</i> | 1.3 | 4.1 | 7.9 | 12.6 | 18.1 |
| <i>Prunus yedoensis</i> | 0.7 | 1.9 | 3.5 | 5.5 | 7.7 |
| <i>Zelkova serrata</i> | 2.0 | 5.1 | 8.9 | 13.2 | 18.0 |

Table 7. Rainfall interception per tree by crown growth of study species (m³/tree/yr)

| Species | Crown width (m) | | | | |
|-------------------------|-----------------|-----|------|------|------|
| | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| <i>Abies holophylla</i> | 1.2 | 4.4 | 9.5 | 16.3 | - |
| <i>Acer palmatum</i> | 0.5 | 2.1 | 4.6 | 8.1 | - |
| <i>Ginkgo biloba</i> | 0.9 | 3.3 | 7.4 | 13.1 | - |
| <i>Pinus densiflora</i> | 0.8 | 2.9 | 6.5 | 11.4 | - |
| <i>Pinus koraiensis</i> | 1.3 | 5.0 | 10.9 | 19.1 | - |
| <i>Prunus yedoensis</i> | 0.5 | 1.9 | 4.2 | 7.5 | 11.6 |
| <i>Zelkova serrata</i> | 1.0 | 4.1 | 9.1 | 16.2 | 25.2 |

이 높은 것으로 분석되었다. 낙엽수인 느티나무의 연간 우수차집량이 많은 이유는 동일 직경의 타 수종들 대비 그 수관밀도, 면적 및 체적이 크기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에 따르면 느티나무의 수관밀도는 유사 직경의 타 낙엽수종들 대비 최소 3.7~최대 23.2% 높았고, 수관면적 및 체적은 타 수종들 대비 최소 1.2~최대 2.8배 더 큰 것으로 나타났다. 한편, 국내에서는 상기 도시조경수의 연간 우수차집량을 직접적으로 비교 고찰할 수 있는 연구가 부재하다. 미국의 경우, 산타모니카에 분포하는 도시조경수의 수종별 연간 우수차집량은 흉고직경 15-30cm 기준 최소 3.0(*Liquidambar styraciflua*)~최대 6.5(*Platanus acerfolia*)m³/주/년 범위이었는데(Xiao and McPherson, 2002), 성장환경이 상이한 이 결과를 본 연구와 직접적으로 비교하는 것은 곤란할 수 있다. 향후, 국내 도시조경수를 대상으로 줄기의 우수차집을 포함하는 추가연구를 통해 본 결과를 비교 검증할 필요가 있다.

IV. 결론

급속한 도시화로 인한 불투수 면적의 확대와 자연녹지 훼손은 지표수를 증가시키는 반면, 지하수를 저하시켜 홍수, 하천 건천화, 수자원 고갈 등의 문제를 가중시킨다. 국내의 연간 강수 이용율은 전체 강수량의 28%에 불과하며, 나머지 72%의 수자원은 급속히 바다로 유출되고 있다(<https://www.kwater.or.kr>). 도시에서 우수의 효율적 이용과 홍수 제어를 강구하기 위해서는 조경수를 포함한 녹지의 확충이 요구된다. 해당 사업에 필요한 우선적 당면과제는 도시조경수가 연간 얼마나 우수를 차집하는지에 대한 신뢰성 있는 정보의 구축이나, 관련 국내 연구는 아직 미진한 상황이다. 산림수목의 우수차집 효과를 산정한 연구들은 일부 존재하나, 개방 성장하는 도시조경수에 이 결과를 직접적으로 적용하는 것은 적지 않은 오차를 야기할 수 있다. 따라서, 본 연구는 국내에서 식재빈도가 높은 7개의 도시조경수를 대상으로 현장실측을 통해 수관의 우수차집비율을 분석하고, 이를 기반으로 수종별 연간 우수차집량을 예측하는 계량모형을 마련하였다. 연구대상 수종은 느티나무, 단풍나무, 소나무, 왕벚나무, 은행나무, 잣나무 및 전나무이었다.

2018년부터 2020년까지 3년 동안 연구대상 조경수의 수관 내외부에 원형차집통을 설치하여 강우 시마다 대조구 대비 수관의 우수차집량을 측정하고, 우수차집량의 고저에 영향을 미치는 수관밀도, 강우량, 강우강도 등을 분석하였다. 그리고, 수종별 우수차집비율, 3,151주의 도시조경수 현장실사 인벤토리, 최근 5년간 월별 강우량 평균치 등을 바탕으로, 3,151주의 조경수 개체별 연간 우수차집량을 계량화하였다. 이들 산정치를 토대로 줄기직경, 수관폭 등을 독립변수로 성장에 따른 수종별

단목의 연간 우수차집량을 예측하는 계량모형을 구축하였다.

현장실측을 통해 분석된 수종별 수관의 평균 우수차집비율은 각각 잣나무 35.8%, 전나무 34.1%, 느티나무 31.0%, 소나무 27.6%, 은행나무 26.9%, 단풍나무 18.6%, 왕벚나무 18.4% 등의 순으로서 수관밀도와 비례하는 경향이였다. 한편, 도시조경수의 우수차집비율은 강우량 및 강우강도가 증가할수록 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이는 강우량이 증가하면 도시조경수가 차집할 수 있는 우수량이 포화점에 도달하여, 그 이후에는 수관통과수가 증가하기 때문이다. 따라서, 도시의 제한된 식재공간 내에서 조경수에 의한 우수차집 효과를 증진하기 위해서는 교목 하부에 관목을 식재하는 다층군식의 식재기법을 적용하여, 단위면적당 우수를 차집할 수 있는 수관면적을 확충함이 바람직하다.

본 연구에서 도출한 우수차집 계량모델의 r^2 은 0.90~0.99 범위로서 적합도가 양호하였고, Y절편, 직경 및 수관폭의 회귀계수도 1% 수준에서 유의성을 나타냈다. 수종별 연간 우수차집량은 흉고직경 20cm 기준 느티나무가 5.1m³/주/년으로서 가장 많았고, 이어서 잣나무 4.1m³/주/년, 전나무 3.1m³/주/년, 은행나무 2.8m³/주/년, 소나무 2.1m³/주/년, 왕벚나무 1.9m³/주/년, 단풍나무 1.8m³/주/년 등의 순이었다. 수관폭 4m 기준의 경우에는 잣나무가 5.0m³/주/년으로서 가장 많았고, 이어서 전나무 4.4m³/주/년, 느티나무 4.1m³/주/년, 은행나무 3.3m³/주/년, 소나무 2.9m³/주/년, 단풍나무 2.1m³/주/년, 왕벚나무 1.9m³/주/년 등의 순으로 나타났다. 즉, 도시조경수의 연간 우수차집량은 상록수 또는 수관밀도가 높은 수종이 많은 경향이였다.

본 연구는 수종별 우수차집 계량모델을 도출하는 과정에서 줄기의 우수차집량을 반영하지 못하고, 특정 규격의 우수차집비율을 조경수 인벤토리의 모든 규격에 일괄적으로 적용한 한계를 지닌다. 도시조경수의 성장에 따른 연간 우수차집량을 계량화하기 위한 가장 바람직한 방법은 동일한 환경 내에서 유목에서 성목에 이르는 일정간격 크기의 수목들을 대상으로 강우시마다 그 차집량을 실측하는 것이나, 단령구조 위주의 기존 도시녹지에서는 해당 연구를 수행하는 것이 매우 난이하였다. 향후, 도시조경수의 다양한 규격과 줄기의 우수차집량을 고려한 추가 연구를 수행하여 본 연구와의 비교 고찰은 물론, 도시녹지의 우수차집 효과 계량화의 타당성과 신뢰성을 증진할 필요가 있다. 이러한 한계점에도 불구하고, 본 연구는 도시녹지의 우수차집 효과 관련 연구가 미진한 국내 현실에서, 조경수의 연간 우수차집량을 산정할 수 있는 초석을 새롭게 마련한 의의를 지닌다. 이 연구결과는 정부, 지자체, 및 기업에서 시행하는 생태조경 사업과 관련하여 조경수의 우수차집 효과를 평가하는 공공기반기술로서 유용할 것으로 기대한다.

References

- Bang, K. J. and J. S. Lee(1995) Studies on planting distribution status of landscaping plants in Korea. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 23(1): 67-94.
- Jenkins, J. C., D. C. Chojnacky, L. S. Heath, and R. A. Birdsey(2003) National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science* 49: 12-35.
- Jo, H. K.(2020) Development of Model and Technology for Establishment, Management and Evaluation of Urban Forests in Living Zone to Improve Carbon Sequestration Sources and Multi-dimensional Benefits against New Climate Change Regime. Research Report to Korea Forest Service.
- Jo, H. K. and D. H. Cho(1998) Annual CO₂ uptake by urban popular landscape tree species. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 26(2): 38-53.
- Jo, H. K., H. M. Park, and J. Y. Kim(2019a) Carbon offset service and design guideline of tree planting for multifamily residential sites in Korea. *Sustainability* 11(13): 3543.
- Jo, H. K., H. M. Park, and J. Y. Kim(2020) Carbon reduction and enhancement for greenspace in institutional lands. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 48(4): 1-7.
- Jo, H. K., J. Y. Kim, and H. M. Park(2013) Carbon storage and uptake by evergreen trees for urban landscape - For *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*. *Korean Journal of Environment and Ecology* 27(5): 571-578.
- Jo, H. K., J. Y. Kim, and H. M. Park(2014) Carbon reduction effects of urban landscape trees and development of quantitative models - For five native species. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 42(5): 13-21.
- Jo, H. K., J. Y. Kim, and H. M. Park(2019b) Carbon reduction and planning strategies for urban parks in Seoul. *Urban Forestry & Urban Greening* 41: 48-54.
- Jo, H. K., J. Y. Kim, and H. M. Park(2019c) Carbon reduction services of evergreen broadleaved landscape trees for *Ilex rotunda* and *Machilus thunbergii* in southern Korea. *Journal of Forest and Environmental Science* 35(4): 240-247.
- Jo, H. K., K. E. Lee, Y. H. Yun, and O. H. Seo(1998a) Land use and greenspace structure in several cities of Kangwon province. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 25(4): 171-183.
- Jo, H. K., K. J. Lee, and J. O. Kwon(1998b) Land use and greenspace structure in Seoul - case of Kangnam-gu and Junglang-gu. *Korean Journal of Environment and Ecology* 12(1): 30-41.
- Jo, H. K., S. H. Kil, H. M. Park, and J. Y. Kim(2019d) Carbon reduction by and quantitative models for landscape tree species in southern region- for *Camellia japonica*, *Lagerstroemia indica*, and *Quercus myrsinaefolia*. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 47(3): 31-38.
- Jo, H. K. and T. W. Ahn(2006) Exploring relationships between urban tree plantings and microclimate amelioration. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 34(5): 70-75.
- Jo, H. K. and T. W. Ahn(2012) Carbon storage and uptake by deciduous tree species for urban landscape. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 40(5): 160-168.
- Jung, M. H., D. K. Lee, and T. W. Um(2007) Differences of nutrient input by throughfall, stemflow and litterfall between deciduous forest and *Larix kaempferi* plantation in Mt. Joonwang, Kangwon-do. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 40(2): 136-144.
- KFRI(Korea Forest Research Institute)(2014) Carbon Emission Factors and Biomass Allometric Equations by Species in Korea. Research Report.
- KFRI(Korea Forest Research Institute)(2016) A Study on Evaluation of Forest Multi-Functions. Seoul.
- Kim, K. H., Y. H. Jeong, C. G. Jeong, J. H. Jun, and J. Y. Yoo(2004) Effects of thinning and pruning on canopy storage capacity, net rainfall and interception loss in *Pinus koraiensis* and *Abies holophylla* plots. *Journal of Korean Society of Forest Science* 93(7): 453-463.
- Kim, K. H., J. H. Jun, J. Y. Yoo, and Y. H. Jeong(2005) Throughfall, stemflow and interception loss of the natural old-growth deciduous and planted young coniferous in Gwangneung and the rehabilitated young mixed forest in Yangju, Gyeonggi-do(I)-with a special reference on the results of measurement. *Journal of Korean Society of Forest Science* 94(6): 488-495.
- KMA(Korea Meteorological Administration)(2015) 2015 Annual Climate Report. Seoul.
- KMA(Korea Meteorological Administration)(2016) 2016 Annual Climate Report. Seoul.
- KMA(Korea Meteorological Administration)(2017) 2017 Annual Climate Report. Seoul.
- KMA(Korea Meteorological Administration)(2018) 2018 Annual Climate Report. Seoul.
- KMA(Korea Meteorological Administration)(2019) 2019 Annual Climate Report. Seoul.
- Miller, R. W.(1997) *Urban Forestry: Planning and Managing Urban Greenspaces*. New Jersey: Prentice Hall.
- MOIS(Ministry of the Interior and Safety)(2019) 2018 Statistical Yearbook of Natural Disaster. Sejong.
- Nowak, D. J.(1994) Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest. In E. G. McPherson, D. J. Nowak, and R. A. Rowntree, eds., *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. General Technical Report NE-186. Radnor, PA: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. pp. 83-94.
- Nowak, D. J., R. E. Hoehn, D. E. Crane, J. C. Stevens, J. T. Walton, and J. Bond(2008) A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services. *Arboriculture and Urban Forestry* 34(6): 347-358.
- Park, E. J. and K. Y. Kang(2010) Estimation of C storage and annual CO₂ uptake by street trees in Gyeonggi-do. *Korean Journal of Environment and Ecology* 24(5): 591-600.
- Park, I. H. and S. M. Lee(1990) Biomass and net production of *Pinus densiflora* natural forests of four local forms in Korea. *Journal of Korean Forestry Society* 79(2): 196-204.
- Whittaker, R. H. and P. L. Marks(1975) Methods of assessing terrestrial productivity. In H. Lieth and R. H. Whittaker, eds., *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer-Verlag. pp. 55-118.
- Woo, B. M.(1993) Influences of forest environment on the water yield from small forested watersheds. *Journal of Korean Society of Forest Science* 82(3): 283-291.
- Xiao, Q. and E. G. McPherson(2002) Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest. *Urban Ecosystem* 6: 291-302.
- Xiao, Q. and E. G. McPherson(2011) Rainfall interception of three trees in Oakland, California. *Urban Ecosystem* 14: 755-769.
- Xiao, Q., E. G. McPherson, J. R. Simpson, and S. L. Ustin(1998)

Rainfall interception by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture* 24(4): 235-244.

37. Zianis, D., P. Muukkonen, R. Makipaa, and M. Mencuccini(2005) Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe. Research Report to Finnish Society of Forest Science, Finnish Forest Research Institute.

38. <https://www.kwater.or.kr>

Received : 15 December 2020

Revised : 2 July 2021 (1st)

Accepted : 12 July 2021

3인익명 심사필