

ORIGINAL ARTICLE

수변구역 조성 녹지의 모니터링을 통한 식재방안 모색 - 가평군 시공지를 대상으로 -

조현길 · 박혜미^{1)*}

강원대학교 생태조경디자인학과, ¹⁾강원대학교 대학원 조경학과

Exploring Planting Strategies through Monitoring of a Greenspace Established in the Riparian Zone - The Case of an Implementation Site in Gapyeong County -

Hyun-Kil Jo, Hye-Mi Park^{1)*}

Dept. of Ecological Landscape Architecture Design, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

¹⁾Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

Abstract

The growth conditions of planted trees, invasion of nuisance herbaceous species, competition between species, and effects of erosion control were monitored over five years in a riparian greenspace in Gapyeong County that was established through multilayered and grouped ecological planting. Of 156 trees planted in the upper and middle layers, 5.8% died. This tree death was attributed to poor drainage or aeration in the rooting zone from the clay-added root ball and too deep planting as well as a small-sized root ball and scanty fine roots. Of all the trees, 21.6% grew poorly due to transplant stress in the first year after planting, but they started to grow vigorously in the third year. This good growth was largely associated with soil improvement before planting, selection of appropriate tree species based on growth ground, and control of dryness and invasive climbing plants through surface mulching and multilayered/grouped planting. Mixed planting of fast-growing species as temporary trees was desirable for accelerating planting effect and increasing planting density. Thinning of fast-growing trees was required in the fifth year after planting to avoid considerable competition with target species. To reduce the invasion of herbaceous and climbing plants that oppress normal growth of planted trees, higher density planting of trees (crown opening of about 15%), woodchip mulching to a 10-cm depth, and edge planting 2 m wide were more effective than lower density planting (crown opening of 70%), no surface mulching, and no edge planting, respectively. This reduction effect was especially great during the first three years after planting. Nuisance herbaceous plants rarely invaded higher density planting with woodchip mulching over the five years. Higher density planting or woodchip mulching also showed much greater erosion control through rainfall interception and buffering than lower density planting with no mulching did. Based on these results, desirable planting and management strategies are suggested to improve the functions of riparian greenspaces.

Key words : Ecological planting, Growth condition, Competition, Erosion control, Management

Received 24 August, 2016; **Revised** 21 September, 2016;

Accepted 30 September, 2016

***Corresponding author**: Hye-Mi Park, Dept. of Landscape Architecture,
Graduate School, Kangwon National University, Chuncheon 24341,
Korea

Phone: +82-33-250-8345

E-mail: bhm63@kangwon.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted
non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium,
provided the original work is properly cited.

본 논문은 2012년 한국조경학회 춘계학술대회, 2013년 한국환경생태학회 춘계학술대회, 2015년 한국환경과학회 추계학술대회의 발표내용(Jo et al., 2012; 2013b; Jo and Park, 2015a)을 발전시킨 것입니다.

1. 서론

수변녹지는 수질보전 및 수원함양, 생물서식, 탄소 흡수 및 대기정화 등의 환경생태적 기능을 발휘하며, 경관감상, 자연체험, 산책 등 다양한 여가활동의 장소를 제공한다(Binford and Karty, 2006; Jo and Park, 2015b; Johnson and Buffler, 2008; Noss, 2006; NRCS, 2007; Smith, 1993). 또한, 홍수 월류 시 제방의 안정성 향상, 범람유량 및 표토유실의 저감 등 치수상 기능을 발휘한다(KWRC, 2005). 이러한 수변녹지의 효과는 다층구조이면서 밀도 높고 폭 넓은 수림이 단층구조 및 저밀도의 좁은 수림보다 양호하다(Binford and Karty, 2006; Jo and Park, 2015b; Johnson and Buffler, 2008; Noss, 2006). 녹지경관 유형별 선호도 연구에 따르면(Jo and Ahn, 2012b), 대중은 저밀의 단층단식보다 밀도 높은 다층군식의 녹지경관을 더욱 선호하는 것으로 나타났다.

국내의 하천 유역은 1960년대까지 숲의 모습을 지니고 있었으나, 1970년대 이후 산업화가 급속하게 진행되면서 공업용지, 농업용지, 도로, 주거지 등으로 무분별하게 훼손되어 왔다(KEI, 2000). 따라서, 환경부는 1999년 4대강 유역을 대상으로 약 1,200 km²의 면적을 수변구역으로 지정하여, 수변녹지를 조성할 수 있는 제도적 기반을 구축하였다(KEI, 2013). 각 유역환경청은 2014년 기준 전체 수변구역의 약 5%에 해당하는 54.5 km²의 토지를 매수하여 수변녹지를 조성하여 왔다(ME, 2014). 그러나 식재의 적절한 준거를 마련하지 못한 채 사업을 진행하여, 단일종 내지 소수종 단층식재, 저밀식재 등 바람직하지 않은 구조가 수변녹지 기능을 제한하고 있다(Jo et al., 2014).

미국에서는 녹지 폭, 식재수종, 식재간격 등을 포함하는 수변녹지 조성기준을 마련하여 관련 사업에 적용하고 있고, 수변녹지의 기능을 조기에 달성하기 위해 자생수종의 다층식재와 속성수 식재를 권장하고 있다(Carmen et al., 2010; Karen et al., 2014; NRCS, 2001; 2007; Palone and Todd, 1998; TNDA, 2015). 일본에서도 이미 제내지 수림대 조성지침을 마련하여 추구하는 녹지기능에 따라 기후적 극상형, 토지적 극상형, 경관림형 등의 수변녹지 조성 유형을 제시하고, 녹지 폭, 식재수종, 식재밀도 등의 식재기준을 수립하

였다(JFRWEM, 2001). 수변녹지 본연의 기능을 증진하기 위해서는 조성 후에도 식재수목 성장, 위해식물 유입 및 경합 등을 모니터링하여, 사업 적부성을 진단하고 적합한 수변녹지 조성 및 관리방안을 모색할 필요가 있다. Matthew and Jon(2005)은 미국의 한 수변녹지 조성지를 모니터링하여 식재수종 선정, 식재초기 초본유입 제어 등의 관련 방안을 제시하였다. Ki and Kim(2012)이 낙동강 수변녹지 조성지를 대상으로 식생구조 변화를 모니터링하여 수목의 주요 고사원인과 식재개선 방안을 제시한 바 있으나, 국내의 경우 관련 연구가 아직 미진한 상황이다.

본 저자는 환경부 사업의 일환으로서 최근 4대강 유역권별 자연수변림 구조 및 성장환경을 실시하여 수변녹지 조성을 위한 군락모델을 유형화하고, 군락 유형별 토양조건, 목표수종, 종구성, 식재밀도, 식재거리 등을 포함하는 생태식재 기준을 수립하였다(CAER, 2011; Jo and Ahn, 2014). 그리고, 가평군의 한 수변구역 매수부지에 한강유역권에 해당하는 생태식재 기준을 적용하여 수변녹지를 조성하였다. 본 연구의 목적은 이 수변구역 시공지를 대상으로, 토양 이화학성, 식재수목 성장 및 경합, 초본유입과 경합, 침식제어 기능 등의 성장 및 성능변화를 다년간 모니터링하여, 수변녹지의 기능을 증진할 바람직한 식재 및 관리방안을 모색하는 것이다. 본 연구는 수변녹지의 생태적 복원 및 조성을 위한 기반정보가 부족한 국내 현실에서 4대강 유역의 수변녹지 조성사업에 유용하게 활용될 수 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상지와 생태식재

본 연구의 대상지는 북한강변에 위치하는 경기도 가평군 설악면 회곡리 744-2번지로서 한강유역권에 해당한다. 남측 방면에는 산림이 분포하며 북측으로 북한강 및 37번 국도와 인접해 있다. 경사는 평균 6.9%로서 북한강 방향의 서북측이 낮고 동남측이 다소 높았다. 식재규모는 동서 길이 약 50 m, 남북 폭 22~35 m으로서 면적이 약 1,500 m²이었다.

환경부의 생태식재 군락모델(CAER, 2011; Jo and Ahn, 2014) 중 대상지의 성장환경 조건과 주변 식생

반영하여, 신나무(*Acer ginnala*)-버드나무(*Salix koreensis*) 군락, 소나무(*Pinus densiflora*)-느티나무(*Zelkova serrata*) 군락, 졸참나무(*Quercus serrata*)-느릅나무(*Ulmus davidiana* var. *japonica*) 군락을 2010년 늦가을에 시공하였다(Fig. 1). 신나무-버드나무 군락은 지하수가 유입 및 집수되어 습윤한 상태를 유지하는 동남측에 배치하고, 평균 약 30 cm 깊이의 소형 저류지를 설치하여 다양한 생물서식 환경을 창출하면서 침전물 차집을 통한 수질보전 기능을 추구하였다. 식재수종은 Fig. 1과 같으며, 상층 및 중층의 목표수종은 군락유형에 따라 5~6종을, 하층의 경우는 2~3종을 다층 군식하였다. 아울러, 식재 조기효과를 달성하기 위해 목표수종 사이 빈 공간에 임시수종인 속성수를

목표수종 식재밀도 대비 평균 약 20%의 비율로 식재하였다. 식재규격은 비교적 단기간 내 성숙림에 근접할 수 있도록 흉고직경 기준 상층 10~15 cm, 중층(속성수 포함) 6~8 cm로 결정하였다. 목표수종의 식재밀도는 상층 5~7주/100 m², 중층 3~5주/100 m²이고, 평균 식재거리는 상층 5.3 m, 중층 3.8 m이었다. 도로측 경계부에는 내부 서식환경의 완충 차원에서 하층 관목으로 폭 2 m 내외의 주연부 식재를 실시하였다. 한편 상기한 다층군식의 생태식재 기준과 달리, 모니터링을 통한 연구 목적을 고려하여 대상지에 저밀식재 등의 고정조사구를 마련하였다(아래의 성능 모니터링과 분석 참고).

2.2. 성능 모니터링과 분석

연구 대상지의 토양환경 변화, 식재수목 성장 및 경합, 초본유입과 경합 등을 시공 후인 2011년부터 2015년까지 5년에 걸쳐, 그리고 침식제어 효과를 2013년까지 3년 동안 모니터링하였다. 모니터링 항목별 조사 및 분석방법은 아래와 같다.

2.2.1. 토양 이화학성

연차별 토양환경 변화를 분석하기 위해, 식재시공 전과 매년 성장기간 말기인 가을에 군락유형별 3반복으로 약 20 cm의 깊이에서 토양표본을 채취하였다. 이들 표본을 실험실에서 음건한 후, KIAST(2000)의 토양분석방법에 따라 성장지반의 이화학성을 분석하였다.

2.2.2. 식재수목 성장 및 경합

목표수종을 대상으로 성장기간에 걸쳐 수목의 고사율, 흉고직경 성장률, 성장불량 여부, 신초길이 및 엽장 등의 연간 추이를 조사하였다. 고사 수목은 뿌리를 굴취하여 그 원인을 구명하였다. 연간 흉고직경 성장률은 군락 우점종인 6개 수종별로 5개체씩을 임의 선정한 후, 지표면으로부터 1.2 m 높이의 수간부에 비대성장측정기(Relaskop-Technik, Dial dendro)를 부착하여 측정하였다. 성장불량 여부는 단풍 시작 전에 수관, 수간, 가지, 엽 등 부위별로 구분하여 조사하되, 한 부위라도 문제인 경우 불량한 것으로 판단하였다. 성장불량 판단기준은 수관의 경우 주가지 고사에 따른 수관 불균형, 수간은 동공이나 부패 발생, 가지는

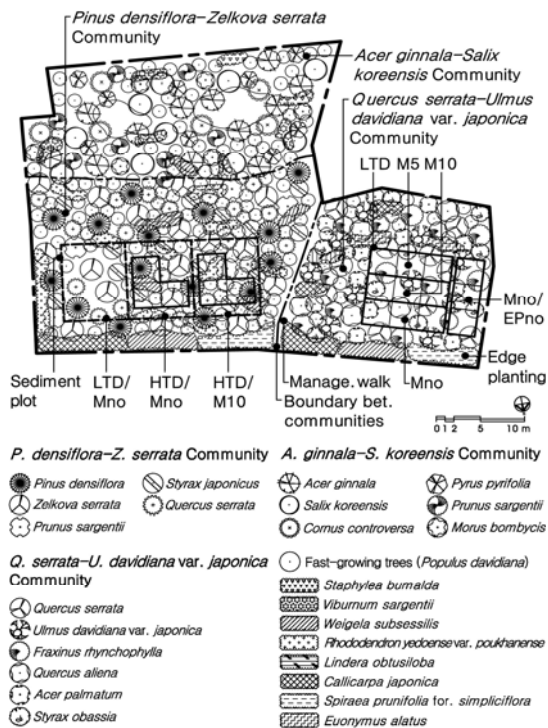


Fig. 1. Planting design for implementation of riparian greenspace and experiment plot layout at study site.*

* LTD: lower tree density, HTD: higher tree density, Mno: no mulching, M5: woodchip mulching to 5-cm depth, M10: woodchip mulching to 10-cm depth, EPno: no edge planting (the same with Fig. 5 and 6)

Source: Jo and Ahn (2014): 109, revised for experiment

고사지 발생, 엽은 엽색 이상 등으로 설정하였다. 신초 길이와 엽장은 상기한 군락 우점종별 선정 개체를 대상으로, 생장기간 말기에 수관 중앙부위의 신초 및 엽 표본을 각각 20개씩의 임의 선정하여 1 mm 단위까지 측정하고, 타 조경식재지에서 정상적으로 성장하는 수목의 경우와 비교 분석하였다. 또한, 군락유형별로 생장에 따른 수목피도 변화를 조사하고 수직 상향으로 수관의 사진촬영을 병행하여 수중 및 층위 간 경합 양태를 파악하였다.

2.2.3. 초본유입 및 경합

수목 식재밀도 차이와 지표면 멀칭 여부에 따른 위해초본 및 덩굴식물의 유입과 목표수종과의 경합을 비교 분석하기 위하여 고정조사구를 설치하고(Fig. 1), 생장기간인 5~9월까지 매일 중순 식물종, 초장, 초 폭 등을 측정하여 조사구별 유입 초본의 종구성, 밀도, 피도 등을 계량 분석하였다. 고정조사구는 멀칭 두께 10 cm의 고밀식재(이하 고밀멀칭으로 지칭), 멀칭 부재의 고밀식재(이하 고밀나지), 멀칭 두께 10 cm의 저밀식재(이하 저밀멀칭), 멀칭 부재의 저밀식재(이하 저밀나지) 등의 처리구를 배치하였다. 또한, 주변부 식재 여부와 멀칭 두께 차이의 관련 효과를 비교하기 위해, 주변식재 미시시 구간에 인접한 저밀나지(이하 저밀나지주연부)와 멀칭 두께 5 cm의 저밀식재(이하 저밀멀칭5) 처리구를 추가하였다. 이들 처리구별 고정조사구의 크기는 각각 3×3 m이고 반복수는 3개소 이었다. 고밀과 저밀의 구분은 수목의 하층광량비와 수관개방비 측정결과에 근거하였으며, 멀칭 처리구는 폐목재를 파쇄한 우드칩을 이용하였다. 하층광량비는 광량계를 이용하여(LI-COR, LI-250) 초본 높이의 처리구 내부에서 10회, 직달일사의 방해가 없는 외부에서 3회에 걸쳐 각각 반복 측정하였다. 수관개방비는 각 처리구 내에서 수직 상향으로 수관을 5반복 사진 촬영한 후, 0.5×0.5 cm 간격의 격자를 중첩하여 개방된 격자점의 평균비율로 분석하였다.

2.2.4. 침식제어 효과 측정

우수 배수방향과 경사가 유사한 구역에 고밀멀칭, 고밀나지, 저밀나지 등 3개 유형의 처리구를 인접 배치하고(Fig. 1), 처리구별 침식제어 효과를 비교 분석하였다. 처리구 간 경계에는 두께 5 mm, 높이 20 cm

의 아크릴판을 설치하여 우수 흐름을 상호 격리하고, 우수 집수의 종점에 규격 47×38×32 cm의 플라스틱 침사조를 설치하였다. 처리구별 우수 집수면적은 고밀멀칭 약 74 m², 고밀나지 63 m², 저밀나지 54 m² 등이었다. 강우 시 유출된 침전물을 수거하여 항량이 될 때까지 음건시킨 후, 침식 건중량을 전자저울(AND, Electronic Balance FX-3200)을 이용하여 0.01 g 단위까지 측정하였다. 침식량의 수거 및 측정은 엽 생장이후 연간 강우가 집중되는 7~9월에 걸쳐 총 9회 실시하였으며, 이 기간 동안의 매회 강우량은 최소 30~최대 340 mm이었다(KMA, 2016).

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양 이화학성 변화

시공 전 당초 대상지의 토양 pH는 9.0의 알칼리성, 유기물은 0.5%에 불과한 등 수목생장에 불리한 조건이었다(Table 1). 따라서, 객토와 유기물 공급 등을 통해 토양을 개량한 후 수목식재를 실시하였다. 조경설계기준(KILA, 2013)에서 제시하는 토양의 항목별 평가등급에 준하면, 시공 전 토양은 Ca²⁺과 양이온치환능을 제외한 대부분 항목이 하급~불량에 해당하였다. 시공 후 3년이 경과하면서 유효인산과 K⁺를 제외한 대부분 항목이 중급 이상으로 향상되었다. 5년 경과 후 토양의 pH는 6.3의 약산성~중성으로 개선되고, 유기물과 전질소는 약 4~6배 증가하였다(p<0.01). 이는 주로 멀칭과 리터폴에 따른 유기물 분해에 기인하는 것으로 분석된다. 대상지의 생장지반 토성은 대개 사양토 내지 양질사토이었다.

3.2. 식재수목 생장 및 경합 추이

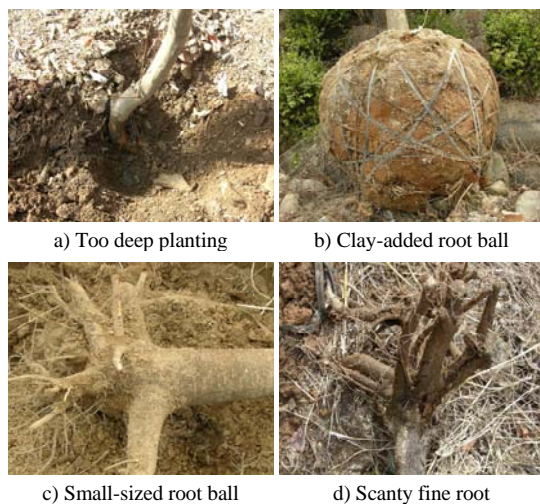
대상지의 상·중층 식재수목은 총 156개체로서 이들 중 약 5.8%가 고사한 것으로 나타났다. 주요 고사수종은 산벚나무(*Prunus sargentii*, 1.3%), 졸참나무(1.3%), 쪽동백나무(*Styrax obassia*, 1.3%), 때죽나무(*S. japonica*, 0.6%) 등이었다. 이들 수목의 고사원인은 과잉 복토에 따른 뿌리호흡 장애, 뿌리분의 진흙 보토, 뿌리분 과소 및 세균 부속 등인 것으로 분석되었다(Fig. 2). 즉, 고사목의 수간이 근계로부터 10~15 cm 깊이로 복토되고 뿌리분이 진흙으로 보토 처리되어,

Table 1. Physical and chemical characteristics of soils at study site

Year	pH	OM (%)	TN (%)	Ava. P (mg/kg)	EC (cmol ⁺ /kg)			CEC (cmol ⁺ /kg)	Major soil texture
					K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺		
Before planting	9.0 ± 1.2	0.5 ± 0.0	0.02 ± 0.00	46.4 ± 10.0	0.48 ± 0.08	6.10 ± 1.23	0.58 ± 0.06	8.3 ± 1.3	Sandy loam, Loamy sand
2011. 10.	6.8 ± 0.1	1.3 ± 0.2	0.02 ± 0.00	40.9 ± 9.4	0.27 ± 0.02	4.14 ± 0.67	0.73 ± 0.07	6.6 ± 0.5	Sandy loam, Loamy sand
2012. 10.	6.7 ± 0.1	1.1 ± 0.0	0.04 ± 0.00	34.2 ± 5.0	0.28 ± 0.02	2.54 ± 0.11	0.64 ± 0.01	6.0 ± 0.1	Sandy loam, Loamy sand
2013. 10.	6.7 ± 0.1	1.7 ± 0.3	0.09 ± 0.00	38.7 ± 6.3	0.34 ± 0.06	4.51 ± 0.44	1.17 ± 0.15	7.0 ± 0.6	Sandy loam, Loamy sand
2014. 10.	6.3 ± 0.1	1.7 ± 0.3	0.09 ± 0.01	46.3 ± 11.1	0.34 ± 0.05	4.57 ± 0.70	1.18 ± 0.12	7.3 ± 1.0	Sandy loam, Loamy sand
2015. 10.	6.3 ± 0.1	2.0 ± 0.4	0.11 ± 0.02	51.4 ± 12.1	0.44 ± 0.06	5.95 ± 0.63	1.18 ± 0.23	7.9 ± 0.6	Sandy loam, Loamy sand

Figures: mean ± standard error, OM: organic matter, TN: total nitrogen, Ava. P: available P₂O₅, EC: exchangeable cation, CEC: cation exchange capacity

뿌리의 통기성이 불량한 상태였다. 또한, 고사목의 뿌리분 체적은 조경공사표준시방서(KILA, 2014)의 표준규격에 근거하여 환산하면, 근원직경 8~15 cm에 따라 9,938~58,703 cm³로서 그 표준규격의 26~55% 수준에 불과하였다.

**Fig. 2.** Major cause of tree death.

연간 흉고직경 성장률은 버드나무를 제외한 5개 군락 우점종의 경우 시공 후 1년차에 평균 0.48 cm/년, 2년차에 0.65 cm/년이었고, 3~5년차 동안 평균 0.98

cm/년이였다. 국내 주요 조경수종인 느티나무, 단풍나무, 왕벚나무, 은행나무, 소나무 및 잣나무의 흉고직경 성장률은 평균 0.84 cm/년으로서(Jo and Ahn, 2012a; Jo et al., 2013a), 대상지 우점종의 흉고직경 생장은 시공 후 초기 활착과정 중에 더디다가 3년차부터는 비교적 양호하였다. 한편, 버드나무의 흉고직경 성장률은 시공 후 1~2년차에 평균 1.52 cm/년이고 3~5년차에 2.03 cm/년으로서, 타 수종에 비해 최소 2 배 큰 것으로 나타났다.

총 식재수목 중 고사목을 제외한 성장불량 개체비는 시공 1년 후 21.6% 이었고, 2년 및 3년 후에는 각각 8.9% 및 8.3%로서 현저히 감소하였다(Fig. 3). 부위별 성장불량 개체비는 시공 1년 후 수관 18.7%, 가지 16.4%, 엽 9.0%, 수간 0% 등이었고, 3년 후에는 2년 후와 유사하게 수관 6.2%, 가지 0.7%, 엽 1.4%, 수간 0% 등으로 감소하였다. 성장 불량이 지속된 주요 이유는 식재 후 자연적으로 형성된 강우 집수구에 산벚나무, 쪽동백나무, 느티나무 등의 소수 개체가 위치하여 배수성 불량에 따른 것으로 나타났다. 군락 우점종의 평균 신초길기와 엽장은 타 조경식재지의 정상적 성장수목 대비 시공 1년 후 각각 78.0% 및 87.4%이고, 3년 후에는 5년까지 유사하게 131.0% 및 119.4% 이었다. 이와 같이, 식재수목의 생장은 식재초기에 이식 스트레스에 의해 다소 저조하였으나 시공 후 3년차부터 현저히 양호해지기 시작하는 경향을 보였다.

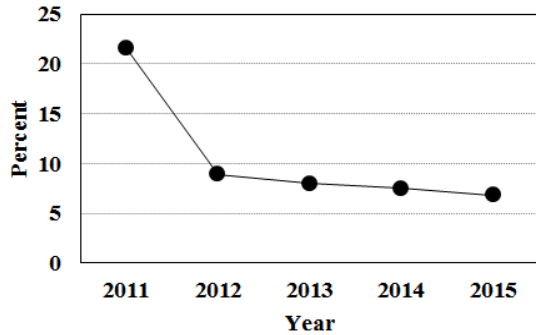


Fig. 3. Annual changes in percentage of planted trees showing poor growth conditions.

한편, 국내 4대강 유역권의 수변녹지 시공지 중 최소 2년이 경과된 45개소를 대상으로 연구한 결과에 따르면(Jo et al., 2014), 식재수목의 고사율은 전체 개체의 약 11%이고 성장불량 개체비는 부위에 따라 가지 42%, 수관 및 엽 각각 35% 등이었다. 그리고, 신초 길이 및 엽장의 성장비는 정상수목 대비 각각 57%, 77%의 수준이었다. 본 대상지의 수목생장은 이들 결과에 비하면 시공 후 초기부터 훨씬 더 양호하였는데, 이는 토양 개량, 성장지반에 부합하는 수종선정, 멀칭과 다층근식을 통한 건조 및 경합초본 제어 등에 기인한다고 판단된다.

대상지의 수목피도는 시공 1년 후 군락에 따라 최대 약 85%이었고, 5년 후에는 140%까지 성장하면서 성숙한 자연수변림의 평균 피도인 180%(CAER, 2014)에 가까워지는 것으로 나타났다(Fig. 4). 식재 소나무는 인접한 활엽교목과의 광 경합에 따라 하부 가지의 일부가 자연 고사하고 상부 신초는 광을 향해 직립 성장하는 경향이였다. 식재공간 내부에 경합 대상의 활엽수종과 혼식하는 소나무의 경우, 인접 수종보다 큰 수목을 식재하거나 성장속도가 상대적으로 느린 활엽수종을 선정하여 수광조건을 개선함이 바람직하다. 식재 초기효과와 밀도증진을 위해 임시수종인 속성수로서 식재한 사시나무(*Populus davidiana*)는 식재규격이 상대적으로 작았음에도, 시공 5년차부터 목표수종보다 상층 수관을 형성하여 성장경합이 현저하였다. 따라서, 이 속성수는 시공 5년차부터 단계적으로 간벌하여 목표수종의 수관 성장공간을 확보할 필요가 있다.

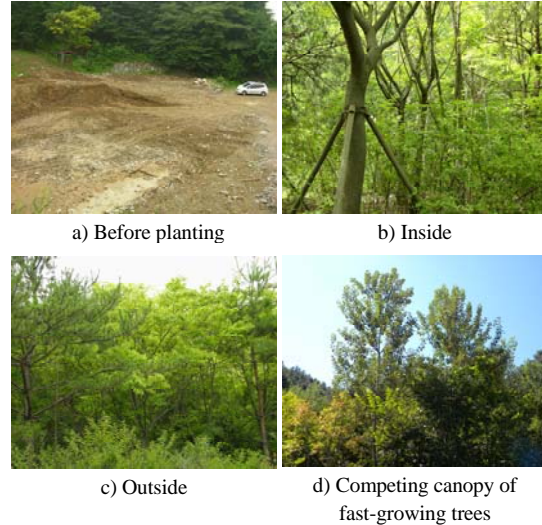


Fig. 4. The growing landscape in 5 years after planting.

3.3. 초본유입 및 경합 변화

모니터링 5년 동안 자연 유입된 초본의 종수는 멀칭부재구에서 총 16종이고, 멀칭처리구의 경우는 고밀 및 저밀식재에서 각각 1종 및 4종이었다. 상대피도가 상위인 주요 초본종은 돌콩(*Glycine soja*, 연평균 39.4%), 망초류(*Erigeron* spp., 24.2%), 환삼덩굴(*Humulus japonicus*, 13.0%), 단풍잎돼지풀(*Ambrosia trifida*, 9.2%) 등으로서, 위해 덩굴식물과 생태계 교란 외래식물을 포함하였다. 특히, 덩굴식물은 식재수목 활착과정의 식재초기에 수관을 감고 올라 소형 수목을 피압하는 것으로 나타났다.

연차별 성장기간 말기의 처리구별 초본피도는 시공 1년 후에 가장 높았고, 식재수목의 성장에 따라 수관개방비가 낮아지면서 4년차에는 현저히 감소하였다(Fig. 5). 시공 후 3년간 9월의 평균 초본피도는 저밀나지주연부에서 92.1%로서 가장 높았고, 다음으로 저밀나지 73.7%, 저밀멀칭 64.1%, 고밀나지 19.8%, 저밀멀칭 3.4% 등의 순이었다($p < 0.01$). 한편, 고밀멀칭의 경우에는 초본이 거의 유입되지 않았다. 월별 변화를 분석하면, 초본피도 및 밀도는 저밀멀칭과 고밀멀칭을 제외하곤 성장기간 초기에서 말기로 갈수록 계속 증가하였다. 시공 후 3년간 5월의 평균 초본피도 및 밀도는 각각 저밀나지주연부 37.7% 및 8.7개체/m², 저밀나지 22.9% 및 10개체/m², 고밀나지 5.2% 및 2.0

개체/m² 등이었다. 이들 처리구의 9월 초본피도는 5월 대비 2.4~3.8배, 그리고 초본밀도는 1.4~3.6배 증가하였다. 저밀멸칭5의 5월 초본피도 및 밀도는 각각 2.3% 및 0.9개체/m²로서, 9월에 초본피도 약 28배, 초본밀도 13배의 큰 증가폭을 보였는데, 5 cm 두께의 멸칭은 생장기간 초기에 한하여 초본유입을 지연시키기 때문인 것으로 분석된다. 연간 초장 생장은 식물종 및 처리구에 따라 최소 7~최대 170 cm의 범위이었으며, 저밀나지주연부에서 가장 큰 경향이였다.

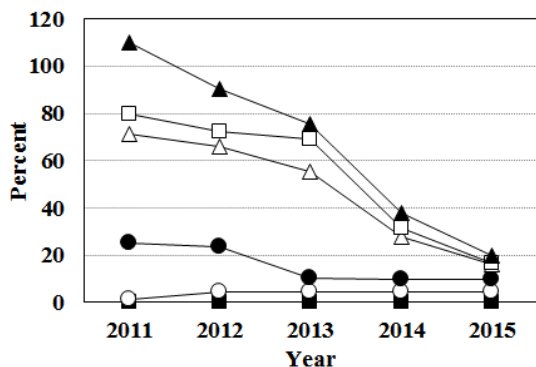


Fig. 5. Annual changes of herbaceous plant cover invaded by experiment plot in late growing season.
Legend: ▲ LTD/Mno/EPno, □ LTD/Mno, △ LTD/M5, ● HTD/Mno, ○ LTD/M10, ■ HTD/M10.

위와 같이, 수목의 고밀식재는 저밀식재보다, 우드칩 멸칭은 멸칭하지 않은 나지보다, 그리고 주연부 식재는 미시시한 경우보다 식재수목과 경합하는 위해초본의 유입을 제어하는데 더 효과적이였다. 이 효과는 식재수목의 활착과정인 시공 후 초기 3년 동안에 특히 현저하였다. 본 연구의 고밀식재구는 시공 1년 후 수관개방비가 약 15%이고 하층광량비는 외부 광량의 20%이였다. 저밀식재구의 경우 수관개방비가 고밀식재구보다 약 4.7배 높은 70%이고 하층광량비는 3.3배 높은 66%이였다. 즉, 저밀의 수목식재는 활착시기에 지표면 입사 광량이 높아 덩굴식물을 포함한 호광성 위해초본의 유입 및 생장을 조장하였다. 이 수관개방비와 하층광량비는 식재수목의 생장과 더불어 특히 저밀식재구에서 연평균 약 15.5%씩 현저히 감소하여, 시공 5년 후에는 고밀식재와 저밀식재 간의 초본피도 차이도 대폭 감소하였다. 저밀멸칭의 초본피도는 고

밀나지보다도 시공 후 5년간 계속 더 낮았으나, 저밀멸칭5는 저밀나지의 높은 초본피도에 근접한 경향을 보였다(Fig. 5). 이 결과는 두께 5 cm의 멸칭이 초본유입을 제어하는데 한계가 있으며, 특히 저밀식재에서는 10 cm 두께의 멸칭이 필요함을 시사한다. 기존 연구에서도 본 결과와 유사하게, 두께 5 cm 내외의 멸칭은 위해초본의 유입을 제어하는 성능이 미미하였고 (CAER, 2014), 10~15 cm 두께의 우드칩 멸칭이 효과적이라고 보고하였다(Chalker-Scott, 2007; WRC, 2002).

3.4. 침식제어 효과

수목 식재밀도와 멸칭 여부가 강우에 따른 침식에 미치는 효과를 분석한 결과, 처리구별 단위면적당 침식량은 시공 후 3년간 평균 저밀나지가 104.2 g/100 m²/hr로서 가장 많았고, 이어서 고밀나지 21.5 g/100 m²/hr, 고밀멸칭 0.1 g/100 m²/hr 등의 순이였다 (p<0.01). 즉, 고밀멸칭에서는 침식이 거의 발생하지 않았고, 저밀나지의 침식량은 고밀나지에 비해 약 4.8 배 더 많았다. 저밀나지와 고밀나지의 연차별 침식량은 시공 후 지표면이 안정화되고 수관이 성장하면서 점점 감소하는 경향을 보였다(Fig. 6). 이와 같이, 지표면의 우드칩 멸칭이나 수목의 고밀식재는 강우의 완충 및 차집을 통해, 저밀 식재한 나지에 비해 녹지조성 초기단계의 침식제어 효과가 현저하게 높았다. 따라서, 수변녹지 조성 시 지표면을 멸칭하고 식재밀도를 높여 하천으로 유입되는 침전물의 양을 저감함이 바람직하다.

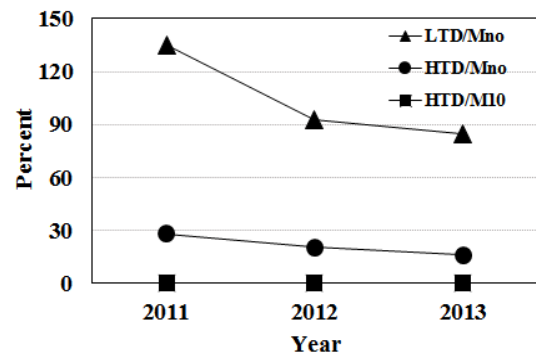


Fig. 6. Effects and annual changes of sediment control by experiment plot.

3.5. 식재 및 관리방안

생태식재 후 다년간의 모니터링 결과에 근거하여, 수변녹지의 조성에 필요한 식재 및 관리방안을 제시하면 다음과 같다. 첫째, 수목 굴취 시 뿌리분은 세균 밀도를 고려하여 적정한 규모를 확보하되(KILA, 2014), 근계의 배수성 및 통기성을 저해하는 진흙 보토는 금지하여 이식수목의 양호한 활착을 위한 기반을 마련한다. 양분과 수분을 흡수하는 세균은 대개 통기성이 양호한 표토에 분포하므로, 식재 시 근원부위 이상의 과도한 복토는 지양해야 한다. 식재수목의 생장을 저해하는 주요한 원인 중의 하나는 불량한 토양 환경이다(Jo et al., 2014). 수변구역의 녹지조성 후보지는 대개 논, 밭, 건축물 철거지 등으로서, 식재 전 객토, 유기물 공급, 유효토심 확보 등 식재수종의 성장요건에 부합하는 토양의 이화학성을 구비할 필요가 있다.

둘째, 다층군식을 통해 식재밀도를 높이고 우드칩 등으로 지표면을 두께 10 cm 이상 멀칭하여, 식재초기 활착과정에서 호광성 덩굴식물을 비롯한 위해초본의 유입 및 식재수목 피압을 제어한다. 저밀도로 식재하는 경우 특히 상기한 두께의 멀칭이 필요하다. 녹지 조성지 경계부에 관목으로 폭 2 m 이상의 주연식재를 실시하면 위해식물의 유입차단 효과를 부가할 수 있다. 국내 수변녹지 조성지들의 경우, 멀칭이 부재하고 수목피도가 평균 28%로서 지표면 유입광량이 높아, 식재초기 수분증발에 의한 토양건조와 위해초본과의 경합으로 식재수목의 생장이 불량하고 매년 제초비용도 적지 않았다(Jo et al., 2014). 멀칭과 더불어 밀도 높은 식재는 수변녹지의 주요 기능 중의 하나인 침식 제어에 효과적이다. 또한, 다층군식을 통한 식재밀도 증진은 저밀의 단층단식보다 생물 다양성과 탄소흡수의 기능에도 더 바람직하다(Hellmund and Smith, 2006; Jo and Park, 2015b). 한편, 식재공간 내부에 경합 대상의 수종과 혼식하는 소나무 등 양수는 인접 수종보다 큰 수목을 식재하거나 성장속도가 상대적으로 느린 수종을 선정하여 수광조건을 개선한다.

셋째, 식재 대상의 목표수종이 성숙할 때까지 임시 수종인 속성수를 목표수종 사이 빈 공간에 혼식하여 식재의 조기효과와 밀도증진을 추구한다. 수변녹지 고유의 경관에 부합하는 속성수종은 포플러류, 버드

나무류 등으로서, 본 연구에 근거하면 이들 수종은 목표수종 대비 연간 2배 이상의 성장속도를 보였다. 속성수의 식재밀도는 목표수종의 식재 시 규격과 수관 성장 속도를 고려하여 결정하되, 목표수종의 성숙기간 10~30년에 따라 그 식재밀도 대비 약 20~70%의 비율이 추천된다(Jo and Ahn, 2014).

넷째, 수변녹지 조성 후 의도하는 녹지구조와 기능을 달성하기 위해 최소한의 관리를 실시한다. 모니터링 결과 식재수목은 대개 시공 3년 후 정상적으로 활착되므로, 이전 기간 동안 하자 보수, 적습 유지, 위해 덩굴식물 및 초본 제거, 병든 가지나 포복지 약전정, 지주목 처리 등 꼭 필요한 인위적 관리를 투입한다. 이후에는 인위관리를 배제하고 식물군락의 생태적 자연 관리에 의존하여 관리비용을 최소화한다. 다만, 속성수는 시공 후 5년차부터 단계적인 간벌을 추진하여 목표수종의 수관성장 공간을 확보하고, 간벌목은 현장에 존치하여 야생동물 서식자원이나 우드칩 멀칭재로 활용한다. 시공단계에서 멀칭과 수목피도 증진은 멀칭 부재의 저밀식재보다 더 많은 예산을 요구할 수 있으나, 매년 반복되는 제초비용을 최소화할 수 있다.

4. 결론

환경부는 수질보전, 생물서식 등의 효과를 달성하기 위해 4대강 유역에 수변구역을 지정하고, 수변구역의 토지를 매수하면서 녹지를 조성하여 왔다. 초기 녹지조성 사업은 수변녹지 본연의 기능을 충족시킬 식재 및 관리기준이 부재한 상태에서 추진되었다. 따라서, 환경부는 최근 수변녹지 조성을 위한 목표수종, 종구성, 식재밀도, 식재거리 등을 포함하는 다층군식의 생태식재 기준을 수립하였다. 본 연구는 이 생태식재 기준을 적용하여 시공한 가평군 수변녹지를 대상으로, 식재수목 성장 및 경합, 초본유입과 경합, 침식제어 효과 등의 성장 및 성능변화를 5년간 모니터링하여, 수변녹지의 기능을 증진할 바람직한 식재 및 관리 방안을 모색하였다.

식재효과의 조기 달성을 위해 상·중층에 규격이 작지 않은 수목을 다층 식재하고 흉고직경, 신초길이, 엽장 등을 포함하는 성장상태의 연간 추이를 조사하였다. 식재수목의 생장은 식재초기에 이식 스트레스에

의해 다소 저조하였으나, 시공 후 3년차부터 현저히 양호해지기 시작하여 5년 후에는 의도하는 성숙림 구조에 가까워지는 것으로 나타났다. 본 대상지의 수목 생장은 국내 4대강 유역권에 조성된 기존 수변녹지에 비해 시공 후 초기부터 훨씬 더 양호하였으며, 이는 토양 개량, 생장지반에 부합하는 수종선정, 멀칭과 다층 군식을 통한 건조 및 경합초본 제어 등에 기인한다고 판단된다. 임시수종인 속성수의 혼식은 식재 조기효과와 밀도증진을 위해 바람직하였으며, 시공 5년차부터 목표수종과의 생장경합이 현저하므로 간벌을 요구하였다. 식재수목 중 일부가 고사하여 그 원인을 파악한 결과는 뿌리분 과소 및 세근 부족, 뿌리분의 진흙 보토와 식재 시 과잉 복토에 따른 배수성이나 통기성 불량 등이었다.

수목 식재밀도 차이와 지표면 멀칭 여부를 반영한 고정조사구를 설치하고, 위해초본 및 덩굴식물의 유입과 목표수종과의 경합을 조사 비교하였다. 수목의 고밀식재는 저밀식재보다, 우드칩 멀칭은 멀칭하지 않은 나지보다, 그리고 주연부 식재는 미실시한 경우보다 식재수목과 경합하는 위해초본의 유입을 제어하는데 더 효과적이었다. 이 효과는 식재수목의 활착과 정인 시공 후 초기 3년 동안에 특히 현저하였다. 저밀의 수목식재는 활착시기에 지표면 입사 광량이 높아 덩굴식물을 포함한 호광성 위해초본의 유입 및 생장을 조장하였다. 두께 5 cm의 멀칭은 초본유입을 제어하는데 한계를 보였고, 멀칭 부재의 고밀식재보다 저밀이라도 10 cm의 멀칭이 더 유효한 것으로 나타났다. 또한, 지표면 멀칭이나 고밀식재는 강우의 완충 및 차집을 통해, 멀칭 부재의 저밀식재에 비해 녹지조성 초기단계의 침식제어 효과가 훨씬 높았다.

상기한 연구결과에 근거하여 수변녹지 조성에 일조할 식재 및 관리방안을 제시하였다. 본 연구는 수변녹지에 부가하여 생태식재 관련 일반 녹지복원 및 조성 사업에도 유용할 것으로 기대한다. 식재 및 모니터링 과정에서 경험한 사안을 부연하면, 국내 고유의 수변녹지 경관을 형성하기 위해서는 자생수종의 식재가 바람직하나 일부 수종은 구입하는데 제한적이었으므로, 식재에 필요한 자생수종의 생산 및 공급이 선행될 필요가 있다. 생태식재 본연의 효과를 확보하려면, 유관 업체는 자연식생의 군락구조와 생장환경, 다층군

식 및 수종배식을 포함하는 식재기법 등을 이해하고 이를 바탕으로 설계와 시공을 추진해야 한다. 생태식재를 통한 수변녹지 조성은 일종의 특수공사로 분류하고 시공 후 최소 3년간 필요한 관리비를 공사비에 포함시켜, 시공업체의 하자보수 부담을 완화하고 의도하는 식재효과를 달성함이 바람직할 것이다. 향후, 생태식재 기법을 적용한 수변녹지 조성의 성능 모니터링 연구를 다양화하여, 본 연구결과를 비교 고찰하고 조성효과를 증진할 실용적 정보를 축적할 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구구조성비로 연구하였으며(관리번호-520150477), 아울러 환경부 Eco-STAR project(수생태복원사업단)의 지원으로 수행된 결과로서, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Binford, M. W., Karty, R. J., 2006, Riparian greenways and water resources, in: Hellmund, P. C., Smith, D. S. (eds.), *Designing Greenways*, Island Press, Washington, D.C., 108-157.
- CAER (Center for Aquatic Ecosystem Restoration), 2011, Development of technology to establish riparian greenspace and eco-belt, Research Report III, Ministry of Environment, Chuncheon.
- CAER (Center for Aquatic Ecosystem Restoration), 2014, Development of technology to establish riparian greenspace and eco-belt, Research Report IV, Ministry of Environment, Chuncheon.
- Carmen, T. A., Sarah, J. W., Christopher, D. B., 2010, Planting a riparian buffer, University of Kentucky College of Agriculture, Lexington.
- Chalker-Scott, L., 2007, Impact of mulches on landscape plants and the environment, *J. Environ. Hort.*, 25(4), 239-249.
- Hellmund, P. C., Smith, D. S., 2006, *Designing greenways*, Island Press, Washington, D.C., 270.
- JFRWEM (Japan Foundation of River & Watershed Environment Management), 2001, Guidelines for planning and management of riparian forest corridors

- along river levee, Yamamido, Tokyo.
- Jo, H. K., Ahn, T. W., 2012a, Carbon storage and uptake by deciduous tree species for urban landscape, *J. Korean Inst. Landsc. Archit.*, 40(5), 160-168.
- Jo, H. K., Ahn, T. W., 2012b, Landscape preferences for greenspace structures, *J. For. Sci.*, 28(1), 56-62.
- Jo, H. K., Ahn, T. W., Kim, J. Y., Kwon, H. J., 2012, Monitoring of ecological planting applied to riparian zone-the case of an establishment site in Gapyeong county, *Proceedings of the Korean Institute of Landscape Architecture Conference*, 176-178.
- Jo, H. K., Ahn, T. W., 2014, Application of natural forest structures to riparian greenways, *Paddy Water Environ.*, 12(1), 99-111.
- Jo, H. K., Ahn, T. W., Son, C. Y., 2014, Improving riparian greenspace established in river watersheds, *Paddy Water Environ.*, 12(1), 113-123.
- Jo, H. K., Kim, J. Y., Park, H. M., 2013a, Carbon storage and uptake by evergreen trees for urban landscape -for *pinus densiflora* and *pinus koraiensis*, *Korean J. Environ. Ecol.*, 27(5), 571-578.
- Jo, H. K., Kim, J. Y., Park, H. M., 2013b, Monitoring tree growth and propriety after riparian greenspace establishment-the case of ecological planting site in Gapyeong county, *Proceedings of the Korean Society Environment and Ecology Conference*, 55.
- Jo, H. K., Park, H. M., 2015a, Changes in growth and performance by planting technique at an establishment site of riparian greenspace, *Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference*, 192.
- Jo, H. K., Park, H. M., 2015b, Effects and improvement of carbon reduction by greenspace establishment in riparian zones, *J. Korean Inst. Landsc. Archit.*, 43(6), 16-24.
- Johnson, C. W., Buffler, S., 2008, Riparian buffer design guidelines for water quality and wildlife habitat functions on agricultural landscapes in the Intermountain West, *General Technical Report RMRS-GTR-203*, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins.
- Karen, H., Jean, S., Douglas, F., 2014, A guide for the installation, establishment, and maintenance of riparian vegetation on restoration projects in North Carolina, *North Carolina Cooperative Extension*, Raleigh.
- KEI (Korea Environment Institute), 2000, A Study on establishment and management of riparian greenspace for water quality improvement, *Research Report*, Seoul.
- KEI (Korea Environment Institute), 2013, An Environmentally friendly management plan for small scale development projects in riparian areas, *Research Report*, Seoul.
- Ki, K. S., Kim, J. Y., 2012, Monitoring of plant community structure change for four years (2007-2010) after riparian ecological restoration, *Nakdong River, Korean J. Environ. Ecol.*, 26(5), 707-718.
- KIAST (Korean Institute of Agricultural Science and Technology), 2000, *Methods of analysis for soil and plants*, Suwon.
- KILA (Korean Institute of Landscape Architecture), 2013, *Landscape design standards*, Seoul.
- KILA (Korean Institute of Landscape Architecture), 2014, *Landscape construction standard specifications*, Seoul.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2016, <http://www.kma.go.kr>
- KWRC (Korea Water Resources Corporation), 2005, *Guidelines for establishment and management of riparian forest buffers*, Daejeon.
- Matthew, C. A., Jon, A. S., 2005, *Riparian restoration planting and establishment monitoring report*, Coos Watershed Association, Charleston.
- ME (Ministry of Environment), 2014, <http://www.me.go.kr>
- Noss, R. F., 2006, Greenways as wildlife corridors, in: Hellmund, P. C., Smith, D. S. (eds.), *Designing Greenways*, Island Press, Washington, D.C., 70-107.
- NRCS (Natural Resource Conservation Service), 2001, *NRCS conservation practice general specifications: Riparian systems*, Washington, D.C.
- NRCS (Natural Resource Conservation Service), 2007, *Riparian systems*, Washington, D.C.
- Palone, R. S., Todd, A. H., 1998, *Chesapeake Bay riparian handbook: A Guide for establishing and maintaining riparian forest buffers*, USDA Forest Service, Northeastern Area-State and Private Forestry, Radnor.
- Smith, D. S., 1993, An Overview of greenways: Their history, ecological context, and specific functions, in: smith, D. S., Hellmund, P. C. (eds.), *Ecology of green*

- ways, University of Minnesota Press, Minneapolis, 1-22.
- TNDA (Tennessee Department of Agriculture), 2015, Tennessee urban riparian buffer handbook: A
- Practical guide to establishing healthy streamside buffers, Nashville.
- WRC (Water River Commission), 2002, Long-term management of riparian vegetation, Perth.