

도시공원에 식재된 왕벚나무 수종을 중심으로 한 수목활력도의 정량평가지표 개발 및 이론적 고찰에 관한 연구*

송 영 근

서울대학교 Brain Korea 21 Plus 사업팀

Indicators for the Quantitative Assessment of Tree Vigor Condition and Its Theoretical Implications : A Case Study of Japanese Flowering-cherry Trees in Urban Park*

Song, Youngkeun

Brain Korea 21 Plus Team, Seoul National University.

ABSTRACT

The vigor condition of trees is an important indicator for the management of urban forested area. But difficulties in how to assess the tree vigor condition still remain. Previous efforts were limited in the 1) measurement of single indicator rather than using multiple indices, 2) purpose-oriented measurement such as for air-pollution effect or specific pathological symptom, and 3) ordinal-scale evaluations by field crews 4) despite human errors based on his/her experiences or prior knowledge. Therefore, this study attempted to develop a quantitative and objective methodology for assessing tree vigor condition, by measuring multiple modules and building the profile inventory. Furthermore, the possibility and limitations were discussed in terms of schematic frames describing tree vigor condition.

The vigor condition of 56 flowering cherry plants in urban park were assessed by *in-situ* measurements of following eight items; growth of crown(Gc), growth of shoots, individual tree

* 본 연구는 본인의 박사학위논문(Song, 2012) 내 미발표 부분 및 한국환경복원기술학회 2013년도 추계 학술대회발표집 초록(Song, 2013)을 바탕으로 작성되었음. 본 연구를 진행하는데 도움을 주신 Kyoto University의 Morimoto, Yukihiro 교수님과 Imanishi, Junichi 교수님께 사의를 표하는 바임.

First author : Song, Youngkeun, Brain Korea 21 Plus Team, Seoul National University,
Tel : +82-2-880-4741, E-mail : songkoon@gmail.com

Corresponding author : Song, Younkeun, Brain Korea 21 Plus Team, Seoul National University,
Tel : +82-2-880-4741, E-mail : songkoon@gmail.com

Received : 9 June, 2014. **Revised** : 13 August, 2014. **Accepted** : 23 July, 2014.

volume(Vol), plant area index, woody area index, leaf area index, leaf chlorophyll content(Lc) and leaf water content(Lw). For validation, these measurements were compared with the ranks of holistic tree vigor condition, which were visually assessed using a 4-point grading scale based on the expert's knowledge.

As a result, the measures of each evaluation item successfully highlighted a variety of aspects in tree vigor condition, including the states of both photosynthetic and non-photosynthetic parts. The variation in the results depending on evaluated parts was shown within an individual tree, even though the broad agreement among the results was found. The result of correlation analysis between the tested measurements and 4-point visual assessment, demonstrated that the state of water-stressed foliage of the season (Lw) or the development of plant materials since sapling phase (Vol) could be better viewed from the outer appearance of trees than other symptoms. But only based on the visual assessment, it may be difficult to detect the quality of photosynthesis (Lc) or the recent trend in growth of trees (Gc). To make this methodology simplified for the broad-scale application, the tested eight measurements could be integrated into two components by principal component analysis, which was labelled with 'the amount of plant materials' and 'vigor trend', respectively.

In addition, the use of these quantitative and multi-scale indicators underlies the importance of assessing various aspects of tree vigor condition, taking into account the response(s) on different time and spatial scale of pressure(s) shown in each evaluated module. Future study should be advanced for various species at diverse developing stages and environment, and the application to wide areas at a periodic manner.

Key Words : *Tree vitality, Tree health, Crown condition, Prunus × yedoensis, Somei-yoshino, Urban tree management.*

I. 서 론

도시에서의 수목은 녹지를 구성하는 기본 단
위이면서 다양한 생태계 서비스를 제공하고 지
역의 생물다양성에 기여하는 중요한 경관요소이
다. 따라서 더 나은 도시 녹지의 관리를 위해서
는, 단목(單木) 수준에서의 수목의 생육상태를
보다 정확하게 진단하고 지속적으로 모니터링하
는 것이 요구된다고 하겠다. 실제로 단목단위로

관리되어야 하는 가로수의 경우만 보더라도, 2008
년 조사 결과 우리나라 전국 약 481만본 이상의
가로수가 매년 1000억여원 규모의 사업규모로
조성, 관리되고 있는 바(Korean Forest Service,
2009), 체계적인 모니터링 수법의 수립이 절실
하고 할 수 있다.

이러한 수목의 상태를 진단하는 방법으로는, 미
국 농림부의 국유림 센서스(<http://fhm.fs.fed.us/>)¹⁾
나 유럽의 국제협력 산림모니터링프로그램에서

1) National Forest Health Monitoring Program by the USDA (United States Department of Agriculture) Forest Service, in cooperation with Forest Inventory and Analysis National Program; the Nation's Forest Census (<http://www.fia.fs.fed.us/program-features/indicators/>).

Table 1. Visual assessment of tree condition using 4-point grading scale method in Japan (translated from Hamano, 2007).

Evaluation item	Rank and Criteria			
	4 (good)	3 (above average)	2 (below average)	1 (poor)
Tree vigor trend	Vigorous	Partly affected but not apparent	Apparently abnormal state	Poor and the rehabilitation to be unexpected
Crown shape	Keeping natural	Partly disturbed but near to natural state	Substantially disturbed	Far from natural state, deformed
Growth of shoots (distance among bud scale scars)	Normal (more than 30-cm in the terminal shoot of high trees)	A little short	Getting short, narrow	Extremely short and shaped as ginger
Dieback on the edge of branches	Not found	Partly found but not apparent	Substantial dead branches, or apparent trimmed parts	Many dead branches, or large trimmed parts
Crown density	Closed, dense with leaves & branches	Less dense than rank 4	Apparent gaps, sparse leaves/branches	Many dead branches, few leaves, apparently sparse crown
Shape and size of leaves	Normal	A little deformed or partly small	Intermediately deformed or a little small overall	Severely deformed or small overall
Color of leaves	Normal	Getting light, a few local lesions	Abnormal (light green, getting red, or local lesions)	Apparently abnormal (changing to yellow/red/brown or many local lesions)
Bark	Rough by vigorous stem growth, or new	Normal	Rarely renewed or perforated, injured	Aged or remarkably injured, decomposed

제공하는 가이드라인(<http://icp-forests>)²⁾, 좀 더 간소화된 형태로는 일본의 목시(目視) 4단계 평가법(Hamano, 2007; Table 1) 등을 참고할 수 있다. 특히 이 4단계 평가법은 평가항목 및 기준(Table 1)이 간편하고 비교적 신뢰할 수 있어 일본 녹화공학 및 수목의학 분야에서 이용되어 왔다. 그러나 이러한 평가법의 한계로서 평가자의 숙련도나 배경지식의 깊이에 따라 결과가 달라질 수 있다는 점과, 정성적인 점수 구분과 각 등

급이 순위 척도로 되어 있는 경우가 많다는 점을 들 수 있다. 또한 그 평가기준이 만들어진 배경이 특정 병충해의 진단이나 대기오염의 피해 진단, 목재생산관리를 위한 조림학적 진단 등에 기초하고 있어, 일반적인 도시의 수목활력도 관리에 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 정량적이고 객관적인 지표에 기반한 수목활력도의 평가체계의 개발을 통해, 평가결과가 특정 시기, 장소, 증상 등에 국한되지 않고 시공간적으

2) International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests operating under the UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) Convention on Long-range Transboundary Air Pollution.

로 확장하여 응용할 수 있는 기반을 만들어가는 것이 중요하다.

수목활력도의 정량 측정의 예로써, 엽내 당질 측정(McCullough & Wagner, 1987; Martinez-Trinidad *et al.*, 2010), 엽록소 측정(Maxwell & Johnson, 2000), 광합성인자 측정(Xu & Baldocchi, 2003), 특히 국내 수목활력도 관련 연구들의 경우 디지털저항계(Shigometer)를 사용한 수간(樹幹) 내 형성층의 전기저항 측정(Kim *et al.*, 2002), 초음파측정기(PiCUS)를 사용한 수간 내부 부후율(腐朽率) 측정(Kang *et al.*, 2014) 등을 들 수 있다. 이러한 선행연구에서 흔히 지적되는 문제점으로는, 각각의 측정값과 앞서 언급한 전문가 평가 간의 불일치, 측정 지표들 간의 경향 불일치 등을 들 수 있다(Martinez-Trinidad *et al.*, 2010). 이는, 각 지표들이 반영하고 있는 수목의 상태와 요인이 다르기 때문에, 하나의 측정치만으로는 그 수목의 전체 활력도를 대변할 수 없다는 점을 나타낸다. 따라서 그 지표가 반영하고 있는 수목의 상태에 대한 이해가 선행되어야 하고, 나아가 복수의 지표사용을 통한 다면적 평가가 필요하다 하겠다.

이에 본 연구에서는, 일본의 도시 녹지에 널리 식재되고 있는 재배종인 왕벚나무(*Prunus × yedoensis*)³⁾ 수종을 대상으로, 복수의 정량평가 지표들을 이용하여 수목활력도를 진단하고자 하였다. 다면적이고 종합적인 평가를 위하여, 동화부분(잎)과 비동화부분(가지, 수간 등)의 각 구성요소의 진단뿐만 아니라 성장세 및 수형 등 전체적 형상 진단을 포괄할 수 있는 지표들이 적용되었다. 시도된 지표들을 검증하기 위해 목시 4단계평가법(Table 1)에 따른 전문가 평가결과와의 상관관계를 분석하였고, 수목활력도에 대한 개념도 제시를 통해 본 연구의 수법을 보다 널리 적용하기 위한 고려사항을 논의하였다.

II. 연구대상 및 방법

1. 연구 대상

연구 대상으로는, 도시공원(일본 오사카부 스이타시 소재 만박기념공원)내에 가로수로 식재된 56주의 왕벚나무를 선정하였다. 수종 선정의 이유는, 본 수종이 일본에서도 도시의 가로수목 중 은행나무에 이어 가장 많이 식재된 수종이며, 우리나라에서도 전국 가로수의 23%에 달하는 약 1,111천본 이상이 현재 식재, 관리되고 있어(Korean Forest Service, 2009), 도시경관관리 차원에서 체계적인 관리가 요구되는 대상이라고 생각했기 때문이다. 대상목들은 1972년 공원 조성 당시 일제히 식재되었으며 보행자 안전상의 소규모 전정이나 갈수기의 관수 이외에는 특별한 관리 없이 자연 상태에서 생육하였으나, 2012년 현재 흉고직경이 36.5 ± 12.8 cm 정도로 생육상태에 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 이들의 활력도 차이는 생육조건에 기인한 것이며, 수종 및 수령간의 변이는 적절히 통제되었다고 볼 수 있으므로, 본 연구의 활력도 지표들을 테스트하기에 적합한 대상이라고 판단되었다.

2. 조사 및 분석

조사 항목은 수목활력도의 정량적, 다면적 측을 위해, 기존의 산림학 및 수목학 연구들에서 널리 쓰이는 지표들 중, 수관(樹冠)성장(Gc; Growth of crown), 가지성장(Gs; Growth of shoots), 수간의 부피(vol; Individual tree volume), 엽면적지수(LAI; Leaf Area Index), 지면적지수(WAI; Wood Area Index), 지엽면적지수(PAI; Plant Area Index), 엽수분함유량(Lw; Leaf water content), 엽록소함유량(Lc; Leaf chlorophyll content), 이상 8개 항목을 선정하였다(Table 2). 각각의 지표들은 수목의 다양한 모듈의 상태를 반영하고

3) 왕벚나무의 학명과 기원은 여전히 논쟁의 여지가 있다. 본 연구는 일본 도시공원에 식재된 왕벚나무를 대상으로 하였으므로, 교배종 소메이요시노의 학명을 사용하였다. Song (2012) 과 Song *et al.*(2011a,b)에서는 동일 대상에 대해 학명 *Cerasus × yedoensis* 'Somei-yoshino'를 사용하였다.

Table 2. Description of tree-condition indicators tested in this study (modified from Song *et al*, 2011a).

Indicator	Description	Unit	Data source & Measurement	Reference
Growth of crown (Gc)	Vertical growth per unit ground area for a given period	cm/m ²	Crown height from airborne laser scanning dataset in 2004, 2010	Yu <i>et al</i> , 2004
Growth of shoots (Gs)	Mean elongation of shoots for recent 9 years	cm/year	Mean length between the bud scale scars of sampled shoots	Takahashi & Yoshida, 2009
Individual tree volume (Vol)	Stand volume at the single-tree level	m ³	Field-measured DBH and remotely-sensed tree height	Ioki <i>et al</i> , 2009
Plant area index (PAI)	The area of plant per unit ground area	m ² /m ²	Hemispheric photo taken in the leaf-on season	Weiss <i>et al</i> , 2004
Wood area index (WAI)	The area of woody parts per unit ground area	m ² /m ²	Hemispheric photo taken in the leaf-off season	Bréda, 2003
Leaf area index (LAI)	The area of leaves per unit ground area	m ² /m ²	The difference between PAI and WAI	Bréda, 2003
Leaf chlorophyll content (Lc)	The content of chlorophyll <i>a</i> and <i>b</i>	µg/cm ²	Leaf spectra measured from the sampled leaves	Imanishi <i>et al</i> , 2010
Leaf water content (Lw)	The ratio between the quantity of water and the area	g/cm ²	Field weight, oven-dry weight, leaf area of the sampled leaves	Ceccato <i>et al</i> , 2001

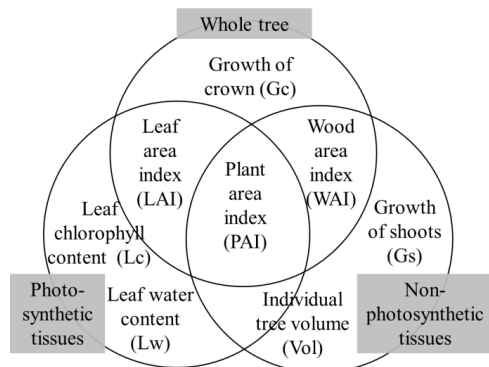


Figure 1. Measurement plan of the selected tree-condition indicators (Song *et al*, 2011a).

있으며, 이는 크게 동화부분, 비동화부분, 수목의 전체상을 골고루 반영하도록 계획되었다 (Figure 1).

주된 지표의 측정은 8월중 약 2주간 강수가 기록되지 않은 기간 동안을 이용하여 실시되었다. 그 이유는 갈수 스트레스가 심한 이 기간에 활력도의 차이가 더 분명하게 날 것으로 기대했

기 때문이다. 측정을 위해 먼저 수목 개체별 중상부의 수관 중 수목을 대표한다고 생각되는 3개소의 가치를 샘플링 하였는데, 최근 3~9년간의 아린흔이 포함되도록 약 20~60 cm 길이를 절단 채취하였고 즉시 실험실로 운반하여 분석하였다. 가지성장(Gs)은 지난 9년간의 평균 아린흔 사이의 거리로부터 측정되었다. 잎 분석을 위해 끝가지와 곁가지를 포함하여 가지 당 3매, 즉 수목 개체 당 총 9매의 잎을 샘플링하였다. 각각의 잎에 대해서는, 미 Anaytical Spectral Devices 사의 분광측정기(FieldSpec HandHeld spectroradiometer)와 잎 측정 모듈(plant probe of 10-mm spot, leaf clip attachment)을 이용하여, 잎 중앙부 반경 10mm의 원형부에 대해 325nm에서 1075nm까지의 분광특성을 3.5nm 반높이 너비(FWHM, Full width at half maximum)로 측정하였다. 각 잎의 분광특성은 Imanishi *et al*. (2010)에 의한 엽록소함유량(Lc) 추정방법에 따라, Savitzky-Golay 필터링 후 일차미분 반사도 스펙트럼지수 $(fR_{555}-fR_{755})/fR_{560}$ 를 인자로 하는

회귀모형(cross validated $R^2 = 0.903$, cross validated root mean square error = 33.3)을 통해 동일수종의 엽록소량(chlorophyll $a + b$)으로 변환하여 사용하였다. 엽수분함유량(Lw)을 구하기 위해 잎의 면적과 무게, 60°C 오븐에서 48시간 건조한 건중량을 측정하여, (생중량 - 건중량)/엽면적을 계산하였다.

수관성장(Gc)은 2004년과 2010년에 각각 측량된 항공레이저스캐닝(airborne laser scanning) 데이터로부터 추정되었다. 통상 지형의 정밀측량에 이용되는 이 데이터에는 지상 대상물의 3차원 형상이 십 수센티미터 이하의 정확도로 기록되어 있으므로, 수관 형상의 변화도 신뢰가능한 범위 내에서 관측되었다고 보았다. 항공측량 영상에서 수목 개체별 수관범위를 폴리곤으로 작성 후 각 수관 내의 20cm격자 당 2004년에서 2010년 내의 높이변화, 즉 수직방향 성장량을 산출하여 단위면적당 수관성장(Gc)을 계산하였다. 또한 개체별 수관범위 내의 최대 높이값인 수고와 현장 측정된 흉고직경으로부터, 지상 바이오매스 상대성장식을 이용하여 수간의 부피(Vol)를 계산하였다.

추가로 착엽시(6월)와 낙엽시(1월)에 각각 개체별 수관에 대하여 반구형 어안렌즈 사진(hemispheric fish-eye image)을 동일지점에서 천정방향으로 촬영하였다. 개체별 화상분석을 위해 주변 수목을 마스크처리 후, 수관 내부 틈새 정도(Gap fraction)로부터 착엽시의 지엽면적지수(PAI), 낙엽시의 지면적지수(WAI)를 구하였고, 엽면적지수(LAI)는 두 지수의 차이로부터 산출하였다.

나아가 본 연구에서 시도된 지표들이 기존의 목시 평가방법에 따른 진단결과와 어떤 관계에 있는지 검토하기 위해, 일본의 목시 4단계평가법(Table 1)을 동시에 수행하여 그 상관관계를 분석하였다. 또한 본 연구에서 시도된 다양한 정량지표들을 실제로 다수의 개체를 모니터링하는 데에 적용하기에는 많은 시간과 노동력이

들 것으로 생각되므로, 다면적 평가의 효율적 적용을 위해 주성분분석(PCA; Principal Component Analysis)을 통해 지표들의 통합을 시도하였다. 끝으로, 수목의 생애주기 및 환경요인이 활력도 평가결과에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 개념도를 제시하고, 각각의 지표가 반영하는 시공간스케일에 대한 이해의 중요성을 고찰하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수목활력도의 정량적 평가와 인벤토리 구축

우리가 시도한 Figure 1의 8개의 지표를 통해, 수목의 다양한 구성요소(동화부분, 비동화부분, 수목 전체)에 대한 활력도 평가결과를 얻을 수 있었다. 56그룹의 대상 수목은 8개의 세부 평가항목별로 정량화된 활력도 인벤토리가 작성되었는데 (예를 들어 Figure 2), 이는 타 지역 다른 시기의 상태라 할지라도 서로 직접적으로 비교될 수 있는 기록이라는 점에서 의미있는 평가치라고 보았다. 세부적으로 보면, 한 수목 안에서도 각각의 항목별 활력도의 양호/불량의 정도 간에는 다소 차이가 있었으나, 전반적인 경향은 Table 1에 의한 4단계평가법의 결과와 높은 상관관계를 보였다(Table 3). 이로 미루어 볼 때 수목의 어떤 모듈이나 부분의 상태만을 가지고 그 개체의 종합적 활력도를 결정해 버리는 것은 바람직하지 않다고 생각되었다. 따라서

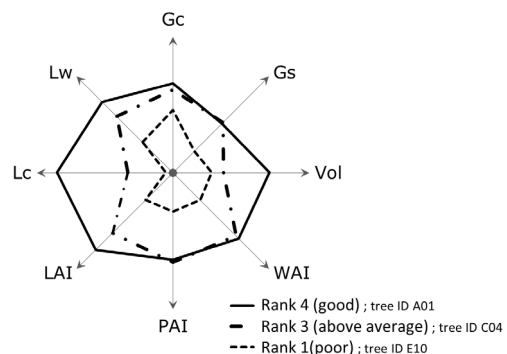


Figure 2. Example of tree condition profiles.

Table 3. Spearman's rank correlation coefficients between the tested indicators and tree condition rank. ($p < 0.01, N = 56$).

	Tree condition rank assessed by Table 1		
	Mean rank of assessments by each evaluation item	Assessment for a whole tree	
Quantitatively measured indicators in this study (Figure 1)	Lw	0.870	0.851
	WAI	0.808	0.790
	Vol	0.804	0.840
	Gs	0.789	0.725
	PAI	0.698	0.685
	LAI	0.648	0.640
	Lc	0.477	0.506
	Gc	0.416	0.456

여러 측면의 평가 결과들을 상호 참고한 뒤 종합적인 진단을 내리는 것이 중요하고, 다만 전정, 토양개량, 소독이나 방역처리 등 특정 관리의 목적에 따라 특정 항목의 결과를 더 중요하게 반영하여 평가할 수 있다고 생각된다.

2. 목시 평가와의 상관관계

Table 1에 의한 목시진단결과와 상관분석을 실시한 결과, 엽수분함유량(Lw), 지면적지수(WAI), 수간의 부피(Vol)와는 높은 상관 (Spearman $r > 0.8, p < 0.01, N = 56$)이, 수관성장(Gc) 및 엽록소함유량(Lc) 등과는 낮은 상관(Spearman $r < 0.5,$

$p < 0.01, N = 56$)이 나타났다 (Table 3). 이를 통해 우리는 갈수 스트레스, 개체 전체의 크기, 수세(樹勢) 등을 주로 염두하여 목시 평가를 하게 되며, 그에 비해 경년적 성장세나 광합성효율과 같은 요소들은 상대적으로 진단에서 간과하기 쉽다고 생각되었다.

3. 평가지표의 통합

시도된 8개 항목별 수목활력도 평가결과에 대해 주성분분석을 실시한 결과, 평가항목의 차원을 Table 4와 같이 줄일 수 있었다. Varimax 회전을 통해 고유값 1.0 이상인 요인만을 추출

Table 4. Integration of tested quantitative *in-situ* indicators using PCA (modified from Song *et al*, 2011a).

Tested Indicators (Figure 1)	Rotated Component Matrix		Label of group
	Principal Component 1	Principal Component 2	
PAI	0.960	0.149	The amount of plant materials
LAI	0.937	0.089	
WAI	0.911	0.331	
Vol	0.633	0.508	
Lw	0.602	0.598	
Gs	0.284	0.822	Vigor trend
Gc	-0.026	0.777	
Lc	0.329	0.712	

한 결과 크게 2개의 성분으로 구분되었으며, 총 누적분산은 76.5%로 나타났다. Lw를 제외한 나머지 지표들은 두 주성분 중 어느 한 쪽으로는 분명히 귀속되는 경향을 보였다. 그 내용을 보면 주성분 1그룹은 PAI, WAI, LAI, Vol 등을 포함하며, 현재의 외관 전체 상태의 풍성함을 나타내므로 ‘지엽량(枝葉量, the amount of plant materials)’으로 명명할 수 있었다. 주성분 2그룹에는 Gc, Gs, Lc 등이 속하므로, 최근의 광합성 효율과 성장세를 포괄하는 개념인 ‘활력경향(vigor trend)’으로 명명할 수 있었다.

IV. 이론적 시사점

1. 적절한 용어의 사용

본 연구와 선행연구간의 관계를 분명히 하기 위해, 먼저 본 연구에서 사용된 수목활력도의 성격을 명확히 할 필요가 있다. 선행연구들에서도 수목의 건강한 정도를 나타내는 용어로서, 수목활력도(樹木活力度), 수목건전도(樹木健全度), tree condition, tree vitality, tree vigor 등 다양한 단어들 사용되고 있다. Innes (1993)은 이러한 용어간의 공통분모가 있는 것은 사실이나 각 용어들이 의미하는 바와 차이는 분명하게 기술되어야 한다고 강조하였다. 각 용어들이 가리키는 바를 엄격히 구분하자면(Ferretti, 1997), tree health는 수목에 영향을 끼치는 생물적, 비생물적요인의 정도를 나타내며 특히 병리학적 측면이 강조된 개념이다. 이에 비해 tree condition이라 함은 보다 일반적인 용어로서 수목의 외관 상태를 주로 평가한 것이다. tree vigor는 최적 상태의 가정 하에서 시간에 따른 수목의 성장세를 나타내는 개념이다. Tree vitality나 crown vigor 와 같은 용어 역시 condition, health와 같은 맥락에서 동시에 쓰이고 있다. Song (2012) 및 Song *et al.* (2011b)은 수목관리에 실제 응용될 수 있는 기준으로서 일반적인 외관평가(condition)뿐만 아니라 시간에 따른 성장세

(growth) 및 병리학적 측면(health)을 포함하는 종합적 평가개념인 tree vigor condition이라는 단어를 제안한 바 있다. Table 4에서 보여지듯이, 본 연구에서 평가된 수목활력도는 일정 기간 내의 성장세(vigor)의 측면과 외관이나 전체적 형상에 나타나는 상태(condition)이 통합된 형태이므로, tree vigor condition (TVC)을 사용함이 적절하다고 생각된다.

2. 평가 지표에 반영되는 수목활력도의 다양한 시공간 스케일

이렇게 수목활력도에 대한 정의가 어려운 것은 평가되는 특정 부분의 상태가 수목 전체의 상태를 얼마만큼 대표할 수 있을 것인가에 대한 문제와 그 평가되는 항목이 어느 정도의 기간의 상태를 반영하는가가 각각 다르기 때문인 것으로 생각된다. 이상적인 수목활력도의 진단은 복수의 평가모듈, 즉 잎에서부터 줄기, 가지, 수간(樹幹), 수관(樹冠)등에 대해 다면적으로 행해져야 하는데(Dobbertin, 2005), 여기에서 필수적으로 고려되어야 할 것은 각 모듈의 상태는 각기 다른 시공간적 환경요인에 대한 반응의 결과라는 점이라 할 수 있다.

이 점을 좀 더 자세히 설명하기 위해, 시간에 따른 수목활력도(TVC; tree vigor condition)의 변화에 대한 간단한 개념도를 Figure 3에서 제시하였다. 수목이 이상적인 조건에서 경년 변동 없이 로지스틱 성장에 준하여 자란다고 가정했을 때, 유년목 시기의 활력도는 두드러지며 노령목으로 갈수록 활력도는 저하될 것이다(Figure 3(a)). 만약 어떤 수목의 활력도가 엽내엽록소(Lc)나 수분함량(Lw)을 기준으로 평가되었다고 한다면, 이는 그 시점에서의 잎의 상태, 즉 수목활력도 곡선 상의 한 점을 나타낸다. 그러나 일정 기간 동안의 수목의 변화와 관련된 것, 예를 들어 수관 부피의 성장(Gc)이나 가지의 성장길이(Gs)와 같은 지표를 통해 활력도가 평가되었다면, 이는 Figure 3(a)의 곡선 상에서

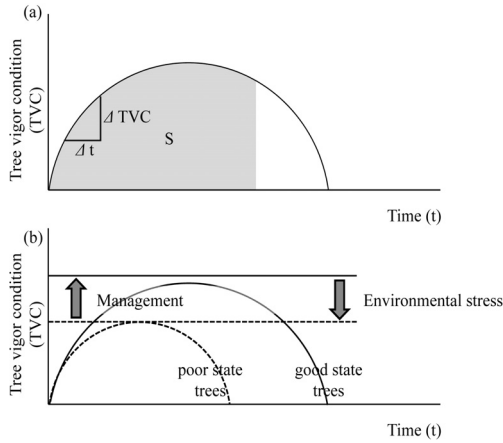


Figure 3. The schema of hypothetical tree vigor condition (Song, 2012).

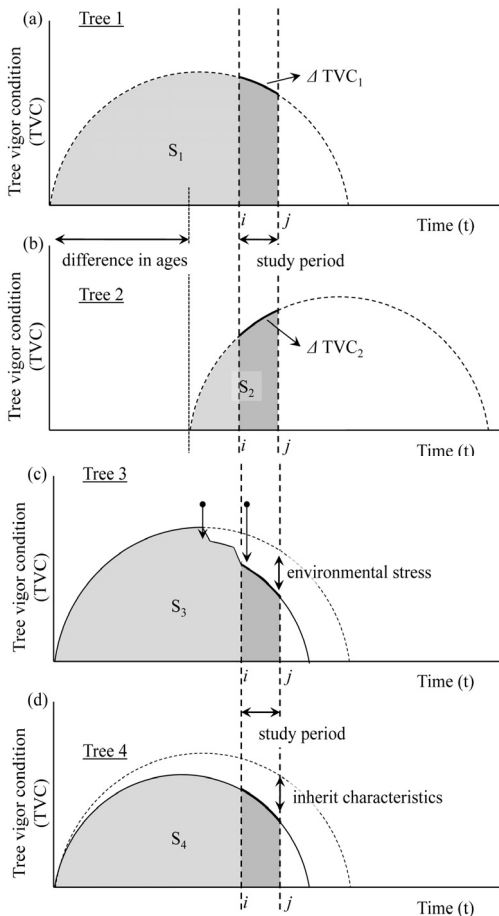


Figure 4. Hypothetical patterns of tree vigor condition depending on growing stages (Song, 2012).

는 시간당 변화량인 ΔTVC 에 해당된다. 활력도 곡선을 시간에 따라 적분한 면적(S)에 해당하는 지표에는, 예를 들어 전체 잎이나 가지의 양(LAI, PAI, WAI), 수간의 부피(Vol) 등이 있으며, 이들은 그 수목의 묘목 때부터 누적된 종합적인 상태를 반영한다고 할 수 있다. Figure 3(b)는 건강한 수목과 건강하지 않은 수목의 활력도를 도식화한 것이다. 특히 조경수의 경우 토양이나 배수, 식재기반, 일사 조건 등 환경적 요인에 따라 활력도가 저하될 수 있는데, 이를 잘 관리해 줌으로써 활력도 곡선은 개선될 수 있다.

Figure 4는 수목의 성장단계와 장애요인에 따라 활력도평가 결과를 어떻게 해석해야 하는가를 보여주고 있다. Tree 1과 Tree 2는 수령 이외의 모든 활력도에 관한 조건이 동일하다고 가정된 경우이다. 따라서 수목활력도 평가 결과는 수령을 고려하여 같은 결과가 나와야 한다($TVC_1 = TVC_2$). 그러나 만일 수령이 고려되지 않는다면 어떻게 될까? 예를 들어 $t = i$ 인 시점에서는 Tree 1이 Tree 2 보다 활력도가 좋은 것으로 평가된다($TVC_1 > TVC_2$). 반면 $t = j$ 인 시점에서는 반대의 평가 결과가 나오게 된다($TVC_1 < TVC_2$). $t = i$ 에서 $t = j$ 까지 일정 기간 동안의 성장량으로부터 수목활력도를 평가하는 경우에도, 노령목 Tree 1의 경우에는 점점 활력도(ΔTVC_1)가 떨어지는 것으로, 유령목 Tree 2의 경우에는 활력도(ΔTVC_2)가 증가하는 것으로 평가될 것이다. 수목의 전체적 외관과 같은 생애주기의 누적상태 지표에 의한 평가에서는 아름드리 노령목이 최근 식재된 유령목보다 좋은 결과를 얻을 것이나($S_1 > S_2$), 이는 수목활력도라기 보다 단지 수령에 기인한 것일 수 있다.

Tree 3과 Tree 4의 예에서는 활력도 저하의 원인에 따라 결과의 해석이 달라질 수 있는 경우를 보인다. $t = i$, $t = j$ 각각의 시점에서의 평가 결과나 그 기간 동안의 상태변화 추이, 그리고 누적 상태의 평가의 경우(S_3 , S_4)에도 두 수목의

활력도는 비슷하게 진단된다($TVC_3 \approx TVC_4$). 그러나 관리 측면에서 두 경우에 대한 대처는 달라진다. Tree 3의 경우에는 환경적 스트레스에 의해 활력도가 저하된 경우이므로 원인을 제거하는 등의 노력이 유용할 수 있으나, Tree 4의 경우에는 유전적 특성이 그러하거나 분재와 같은 제한된 환경에서 자라는 경우이므로 관리 방식이 달라질 것이다.

V. 결 론

도시녹지경관의 관리단위인 단목수준에서의 수목을 객관적, 체계적으로 관리해 나아가기 위해서는 수목활력도의 정량적, 다면적 평가가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 도시공원 가로수로 식재된 왕벚나무수종을 대상으로, 잎 수준에서 수관 전체 레벨에 이르는 여러 모듈에 대한 다양한 정량지표계측을 시도하였다. 그 결과는 1) 전반적으로 기존의 목시평가 결과와 일치된 경향을 보였으며, 또한 2) 목시평가에서 중시되는 갈수 스트레스, 개체 전체의 크기, 수세(樹勢) 등을 정량적 수치로 상세히 진단할 수 있다는 점과, 3) 목시평가에서는 간과되기 쉬운 경년적 성장세나 광합성효율과 같은 요소들 또한 평가에 포함시킬 수 있다는 점에서 성공적인 진단방법이라고 생각되었다. 보다 간소화된 수목활력도의 다면적 평가를 계획할 때에는, 수목 외관 전체의 풍성함을 나타내는 '지엽량'과, 최근 성장세 및 광합성력 등을 나타내는 '활력경향', 이 두 부문에 대한 정량적 평가가 필요하다고 생각되었다.

수목활력도 진단지표 개발시 주의해야 할 점은 각 지표가 반영하고 있는 수목의 시공간 스케일을 고려하여 용어를 정확하게 사용해야 한다는 것이다. 본 연구에서는 수목활력도의 개념 도식을 통해, 각각의 지표가 반영하는 수목의 상태는 일 단위 변화에서부터 해당 계절, 최근 수년간, 나아가 묘목시부터의 누적된 생애 전체

에 이르기까지 상당히 다양하다는 점을 고찰하였다. 또한 같은 지표의 진단 결과라 하더라도 수목의 성장단계나 환경적 요인에 따라 해석이 달라진다는 점을 보였다. 따라서 수목활력도 평가시에는 측정치 이외에도 수령이나 식재 환경, 전지전정 등과 같은 관리 기록을 고려하는 것이 매우 중요하다.

향후 과제로는 이러한 수목활력도 평가를 광역 스케일에서 어떻게 효율적으로 시행할 수 있을지를 들 수 있다. 우리나라의 경우 생활권 도시림의 면적이 전국 약 34,778 ha (Korean Forest Service, 2010)에 이르며, 그 중 단목단위로 관리되는 약 481만본 규모의 가로수도 향후 증가 될 것으로 보여(Korean Forest Service, 2009), 도시경관관리 차원에서 좀 더 효율적인 모니터링 방안이 요구된다고 하겠다. 다양한 원격탐사 자료의 활용은 그 대안이 될 수 있으나, 요구되는 시공간 해상도 및 정확도와 소요 비용, 노동력 등을 종합적으로 고려하여, 지상조사와의 적절한 병용방안을 모색해야 하겠다.

References

- Bréda, N. J. J. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *J. Exp. Bot.* 54(392): 2403-2417.
- Ceccato, P. 2001. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sens. Environ.* 77(1): 22-33.
- Dobbertin, M. 2005. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *Eur. J. For. Res.* 124(4): 319-333.
- Ferretti, M. 1997. Forest health assessment and monitoring - issues for consideration. *Environ. Monit. Assess.* 48(1): 45-72.
- Hamano, C. 2007. How to assess tree vigor

- condition (In Morimoto, Y. and T. Kobayashi eds., "Latest Environmental Revegetation Technology"). Tokyo: Asakura Publishing Co., Ltd. pp. 101-104. (in Japanese)
- <http://fhm.fs.fed.us/>
<http://icp-forests.net/>
- Imanishi, J · A. Nakayama · Y. Suzuki · A. Imanishi · N. Ueda and Y. Morimoto. 2010. Nondestructive determination of leaf chlorophyll content in two flowering cherries using reflectance and absorptance spectra. *Landsc. Ecol. Eng.* 6(2): 219-234.
- Innes, J.L. 1993. Methods to estimate forest health. *Silva Fenn.* 27(2): 145-157.
- Ioki, K · J. Imanishi · T. Sasaki · Y. Morimoto and K. Kitada. 2009. Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach. *Landsc. Ecol. Eng.* 6(1): 29-36.
- Kang BH · Cho SJ · Son JK · Kim NC and Kim MH. 2014. The health analysis of protected tree '*Zelkova serrata*' using an ultrasonic tomograph. *J. Kor. Environ. Restor. Tech.* 17(2): 73-83. (in Korean with English summary)
- Kim SK · Park SB · Nam JC and Kim SH. 2002. Effects of location and soil characteristics on the vegetation structure and tree vitality of urban park and green open space. *J. Kor. Environ. Restor. Reveg. Tech.* 5(5): 30-44. (in Korean with English summary)
- Korean Forest Service. 2009.6. Planning and management of street trees. (in Korean)
- Korean Forest Service. 2010.12. Statistics of urban forests in Korea. (in Korean)
- Martinez-Trinidad, T. · W. T. Watson · M. A. Arnold · L. Lombardini and D. N. Appel. 2010. Comparing various techniques to measure tree vitality of live oaks. *Urban For. Urban gree.* 9(3): 199-203.
- Maxwell, K. and G. N. Johnson. 2000. Chlorophyll fluorescence - a practical guide. *J. Exp. Bot.* 51(345): 659-668.
- McCullough, D. G. and M. R. Wagner. 1987. Evaluation of four techniques to assess vigor of water-stressed ponderosa pine. *Can. J. Forest Res.* 17(2): 138-145.
- Song YK. 2013. Developing quantitative indicators for assessing tree vigor condition. Proceedings of 2013 Fall Meeting & Symposium on Environmental Restoration Technology, pp. 142-144.
- Song YK. 2012. Assessment of tree vigor condition using airborne laser scanning and spectral remote sensing. Ph.D dissertation, Kyoto University, Kyoto.
- Song Y · J. Imanishi and Y. Morimoto. 2011a. Use of airborne laser scanning data for the assessment of tree condition. Proceedings of the 32nd Asian Conference on Remote Sensing, Sensing for Green Asia. October 3-7, 2011, Taipei, Taiwan.
- Song YK · J. Imanishi · H. Hashimoto · A. Morimura and Y. Morimoto. 2011b. Importance of the green spectral region for remote assessment of tree vigor condition: a case study of *Cerasus* species. *J. Environ. Inform. Sci.* 39(5): 87-96.
- Xu, L. and D. D. Baldocchi. 2003. Seasonal trends in photosynthetic parameters and stomatal conductance of blue oak (*Quercus douglasii*) under prolonged summer drought and high temperature. *Tree Physiol.* 23(13): 865-877.