풍도목 근분의 구조형태학적 특성 분석

김동엽¹ · 안병규² · 김명필³ · 임상준^{2,4*}

¹국립산림과학원 산림방재연구과, ²서울대학교 산림과학부,

³서울대학교 학술림, ⁴서울대학교 농업생명과학연구원

Morphological Characteristics Analysis of Root Plate in Wind-Uprooted Trees

Dongyeob Kim¹, Byungkyu Ahn², Myeong Pil Kim³ and Sangjun Im^{2,4*}

¹Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

²Department of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

³University Forest, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

⁴Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

요약: 이 연구는 풍도목 근분의 구조형태적 특성을 파악하고, 풍향에 대응하는 수목뿌리의 발달 특성 및 수목의 지상부와 지하부 특성 간의 상관관계를 분석하고자 하는 목적으로 수행되었다. 이를 위해서 서울대학교 태화산 학술림에서 발생한 77 그루의 낙엽송과 24 그루의 잣나무 풍도목의 근분에 대한 현장조사를 실시하였다. 근분의 형태적 특성을 조사한 결과, 풍도목 근분은 타원형 혹은 원형의 평면형을 보이며, 측면에서 살펴보면 반 타원체의 형태를 보였다. 또한, 근분 내 뿌리의 발달 특성을 조사한 결과, 평균적으로 수목의 전도 방향에서 비전도 방향보다 뿌리의 개수가 더 많고, 뿌리 표면적이 더 큰 것으로 나타났다. 또한, 수목의 지상부와 지하부 특성 간의 선형상관관계를 조사한 결과, DBH는 수고보다 근분 크기와 뿌리 표면적에 대해 상대적으로 강한 선형적인 상관관계를 보였다. 이러한 상관관계 분석 결과를 토대로 상관관계가 뚜렷한 수목 지상부와 지하부 특성 간의 단순선형회귀식을 수립하였다.

Abstract: The objectives of this study were to identify the root plate dimension of wind-uprooted trees and to analyze the relationship among wind direction, aboveground and belowground properties of the trees. The root plates of 77 Japanese larches (*Larix kaempferi*) and 24 Korean pines (*Pinus koraiensis*), which were uprooted by a typhoon in 2012, in the Taehwa Experimental Forest of Seoul National University, Korea, were investigated. The results showed the root plate shape could be assumed to be an oval or a circle in above view, and half an ellipse in side view, respectively. Also, the number and surface area of individual roots in root plates were greater in uprooting direction than in non-uprooting direction. The results of correlation analyses between aboveground and belowground properties indicated DBH had more significant correlation with belowground properties than tree height. Finally, simple linear relationships were derived for significantly correlated tree aboveground and belowground properties.

Key words: wind-uprooted tree, root plate, morphological characteristics analysis, correlation analysis

서론

풍해(風害, windthrow damage)는 온대지역 산림의 주요 교란 요인 중의 하나이다(Achim and Nicoll, 2009). 풍해로 인하여 1차적으로 수목과 주변 환경의 파괴 및 교란이 발생하고, 풍해를 겪은 산림은 산사태나 산불 또는 충해에 대한 저항성이 약화되어 추가적인 피해를 입는다. 풍

해가 산림에 미치는 영향은 공간적 규모에 따라 서로 다른 형태로 나타나지만(Ulanova, 2000), 풍해에 대한 취약성 평가를 수행하거나 피해경감 대책을 마련하기 위해서는 바람에 대한 개별 수목의 저항 혹은 적응의 기작에 대한 이해가 선행되어야 한다.

바람에 의한 수목의 피해는 수목 지상부의 부러짐(breakage) 혹은 휘어짐(bending), 그리고 수목이 뿌리째 뽑히는 전도(uprooting) 등의 형태로 나타난다. 수목 지상부의 파괴나 휘어짐은 수간부의 휨 특성과 관련이 있는 반

*Corresponding author
E-mail: junie@snu.ac.kr

면 전도의 경우에는 수목 뿌리의 인장 및 전단 특성과 밀접하게 관련되어 있다. 수목의 전도는 산림에서 발생하는 바람의 피해 중 가장 큰 교란을 초래하며, 바람의 세기 등 외부적 요인뿐만 아니라 뿌리의 형태 등과 같은 내부적 요인과의 밀접하게 연관되어 있다.

전도에 대한 수목의 저항은 주로 수목인발시험(tree pull-out test)을 통한 휨 모멘트(bending moment)로부터 실험적으로 해석할 수 있다(Peltola, 2006). 이러한 실험적 연구를 통하여 수목의 전도는 뿌리의 길이, 직경, 표면적, 최대 뿌리발달깊이 등에 따라 서로 다른 형태를 보여주고 있다(Bischetti et al., 2005; Dupuy et al., 2005; Stokes et al., 2005). 또한, DBH, 수고, 수간부의 중량 및 체적과 같은 수목의 지상부 특성(Moore, 2000; Achim et al., 2005; Ghani et al., 2009; Urata et al., 2012)과 토양점착력, 토양 단위중량, 토심 등과 같은 토양 특성(Bischetti et al., 2005; Dupuy et al., 2005; Khuder et al., 2007) 역시 수목의 전도에 복합적으로 작용하고 있다고 알려져 있다.

수목의 뿌리는 생리적으로 토양 내 수분과 영양분을 흡수하는 기능뿐만 아니라, 구조적으로 토양과 함께 수목의 지상부를 고정하고 지지하여 외력에 저항하게 한다. 수목에 바람과 같은 외부의 충격이나 힘이 지속적으로 가해지면, 지상부를 충분히 지지하기 위하여 뿌리가 힘의 작용 방향에 따라 편향적으로 발달하기도 한다(Nicoll et al., 1995; Stokes et al., 1997). 하지만, 수목의 뿌리는 고유의 유전적인 특성과 토양 및 지하수 등 환경 특성에 따라 공간적으로 생장 및 분포가 다른 형태로 나타나므로, 뿌리의 형태적 특성을 일반화하기가 쉽지 않다.

최근에는 수목 뿌리의 형태를 단순화하여 수목의 저항 과정을 역학적으로 해석하기 위한 연구가 시도되고 있다(Moore, 2000; Peltola, 2006; Lundström et al., 2007; Fourcaud et al., 2008; Coder, 2010). 이러한 연구에서는 수목의 지하부를 단순화한 ‘근분(root plate)’이라는 개념을 이용하는데, 이는 수목의 그루터기 바로 밑에 위치하는 딱딱하고 얇은 원반(disk) 모양의 뿌리 및 내부의 토양을 모두 포함하는 복합구조체를 지칭한다(Coder, 2010). 근분 개념을 도입함으로써 수목 저항력의 역학적인 해석이 가능해졌고, 직접 뿌리를 굴취하지 않고도 수목의 지상부 특성을 이용하여 지하부의 형태 및 크기를 간접적으로 결정할 수 있게 되었다(Danjon et al., 2005; Koizumi et al., 2007; Coder, 2010).

국내의 경우에도 1990년대 후반부터 대형 태풍의 잦은 내습으로 인하여 풍도목의 발생이 증가하고 있다(Youn et al., 2011). 2005년에 발생한 태풍 나비(Nabi)와 맛사(Matsa)는 전국적으로 200,000 그루 이상의 풍도목을 발생시켰다(Korea Forest Service, 2006). 하지만, 국내에서 풍도목과 관련된 연구는 풍도목의 발생 특성을 현상학적

으로 분석한 연구(Youn et al., 2011)나 구조적 관점에서 수목 인발시험을 통해 전도모멘트를 검토한 연구(Im et al., 2011) 등의 범위에서 제한적으로 실시되었다.

이 연구에서는 바람에 대한 수목의 저항을 파악하기 위해 수목 근분 및 근분 내 뿌리의 구조형태학적 특징을 조사하였다. 구체적으로 풍해 피해지에 대한 현장조사 자료를 바탕으로 근분 개념을 도입하여 풍도목 근분의 형태적 특성을 파악하고, 뿌리 분포에 대한 바람의 영향을 규명하고자 하였다. 풍도목 근분에 대한 조사는 수목인발시험에서 발생하는 수목과 토양에 대한 부차적인 피해를 발생시키지 않으며, 바람에 의해 발생한 비교적 동일한 형태를 갖추고 있는 근분을 일반화하여 다루기 쉽다는 장점이 있다. 한편, 수목의 지상부와 지하부 특성 간의 상관관계를 분석하여 근분의 형태를 결정하기 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 개황

이 연구는 경기도 광주군 도척면 상림리에 소재한 서울대학교 태화산 학술림(37°18'43"N 127°18'44"W)에서 수행되었다. 태화산 학술림 일대의 연평균 기온은 약 11.5°C이고, 연강수량의 평년값(1981년~2010년 측정값 기준)은 1,371 mm이다. 태화산은 주봉의 해발고도가 약 600 m로 주변 일대가 전반적으로 완만한 지형을 이루고 있으며, 지질학적으로는 화강암 지대에 위치하고 있다(Taehwa Experimental Forest, 2009).

태화산 학술림에서는 2012년 8월 28일에 한반도를 통과한 태풍 볼라벤(Bolaven, 최대 풍속 51.8 m/s, 전남 완도군 측정)에 의하여 100여 그루 이상의 낙엽송 및 잣나무 풍도목이 발생하였다. 대부분의 풍도목은 학술림 2임반 내 다소반, 라소반 및 마소반에서 발생하였다. 다소반과 마소반은 낙엽송 조림지인 반면에 라소반은 잣나무 조림지이며, 식재년도는 각각 1965년, 1968년, 그리고 1963년이다. 하지만, 풍도목 발생 당시에는 각 소반 간의 경계를 중심으로 낙엽송 및 잣나무가 혼재하여 자라고 있었다. 풍도목은 학술림과 주변부 평야지의 경계부에서 발생하였으며, 주로 하층식생의 발달이 불량하고 점토질 토양의 환경사에서 발생하였다. 이 지역의 토양 단위중량은 1.597 g/cm³이었으며, 조사당시인 2012년 9월 26일에 측정된 토양의 함수율은 20.0%이었다.

2. 조사 및 분석 방법

1) 풍도목 현장 조사 방법

연구대상지 내 낙엽송 77 그루, 잣나무 24 그루 등 총 101 그루의 풍도목을 대상으로, 수목의 지상부 및 지하부

Figure 1. The location of the investigated, wind-uprooted trees in the study site.

특성에 대한 현장조사를 실시하였다. 수목의 지상부 특성을 파악하기 위하여 풍도목의 위치 좌표, 수고, 흉고직경(DBH) 및 수목의 전도방향 등을 조사하였으며, 지하부 특성으로는 근분의 형태 및 크기, 그리고 근분 내 뿌리의 구조적 특성을 조사하였다.

근분의 형태적 특성을 파악하기 위하여 Figure 2와 같이 근분에 대한 형태인자를 정의하였다. 수목의 전도 방향을 기준으로 근분의 정면(수목 전도방향), 측면 및 후면에서 각각의 형태인자를 조사하였다. 정면방향에서는 풍도목의 수간을 중심으로 근분의 가장자리까지의 풍상측 반경(windward radius, WWR), 좌측 반경(left-side radius, LSR) 및 우측 반경(right-side radius, RSR)을 측정하였다. 또한, 측면에서는 근분의 두께(depth)를 수간의 중심(center depth, CND) 및 좌우측 반경의 1/2 지점(left-side depth, LSD 및 right-side depth, RSD)에서 각각 측정하였다. 마지막으로 후면에서는 근분의 높이(root plate height, RPH)와 전체 폭(root plate width, RPW)을 측정하였다.

한편, 근분 내에 존재하고 있는 뿌리의 구조적 특성을 파악하기 위해서 풍도목의 근분을 굴취하여 흙을 제거한 후, 수목의 전도방향을 기준으로 8방위로 구분하여 뿌리의 개수, 직경 및 길이를 측정하였다. 각 요소는 근계의 중심에서부터 10 cm 지점에서 직경이 1 cm 이상인 뿌리만을 대상으로 Figure 3(b)와 같이 격자를 이용하여 측정하

였다. 측정된 뿌리의 직경과 길이를 토대로 뿌리를 원기둥의 형태로 가정하여 뿌리의 표면적을 계산하였다. 작업 과정에서 손상이 적은 낙엽송 42 그루, 잣나무 17 그루 등 총 59 그루를 대상으로 근분 내 뿌리 조사를 실시하였다.

2) 조사결과 분석 방법

조사된 풍도목의 지상부 및 지하부의 특성은 통계적인 방법을 이용하여 분석하였다. 풍도목 근분의 형태인자 간의 상관관계를 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)와 대응표본 t-검정을 이용하여 분석하였다. 또한, 수목전도 방향과 방위별 근분 내 뿌리의 개수와 표면적 간의 관계를 대응표본 t-검정을 이용하여 분석하였다. 마지막으로 수목의 지상부와 지하부 특성 간의 단순상관관계를 분석하고, 이를 토대로 단순선형회귀분석을 실시하였다. 이상의 통계분석은 Microsoft Excel 2010 및 IBM SPSS 18 소프트웨어를 이용하여 수행하였다.

결과 및 고찰

1. 지상부 특성 조사 결과

Table 1은 조사한 풍도목의 수고 및 DBH를 정리한 결과이다. 낙엽송의 평균 수고는 19.4 m, 표준편차는 1.9 m 이었으며, 잣나무의 평균 수고는 19.6 m, 표준편차는 2.7 m로 각각 나타났다. DBH를 조사한 결과, 낙엽송은 평균

(a) Variables at the front of root plate

(b) Variables at the side of root plate

(c) Variables at the rear of root plate

Figure 2. Morphological factors of root plate. (WWR: windward radius, LSR: left-side radius, RSR: right-side radius, CND: center depth, LSD: left-side depth, RSD: right-side depth, RPH: root plate height, RPW: root plate width)

(a) An excavated root plate

(b) Measuring the length of individual roots

Figure 3. Measurement of morphological dimension in root plates.

Table 1. Height and DBH of investigated uprooted trees.

	<i>Larix kaempferi</i> (N=77)		<i>Pinus koraiensis</i> (N=24)	
	Mean±S.D.	Min.-Max.	Mean±S.D.	Min.-Max.
Height (m)	19.4±1.9	15-27	19.6±2.7	15-24
DBH (cm)	24.2±4.1	12-35	28.1±3.9	18-35

Figure 4. Direction of tree uprooting.

Table 2. Result of measurement of root plate.

Root plate	Variables	<i>Larix kaempferi</i> (N=77)		<i>Pinus koraiensis</i> (N=24)	
		Mean±S.D.	Min.-Max.	Mean±S.D.	Min.-Max.
Radius	WWR (m)	0.98±0.26	0.46-1.95	1.05±0.45	0.47-1.95
	LSR (m)	1.14±0.36	0.49-2.00	1.26±0.38	0.60-2.00
	RSR (m)	1.09±0.37	0.42-2.07	1.17±0.35	0.53-1.87
Depth	CND (m)	0.74±0.20	0.40-1.22	0.69±0.20	0.40-1.10
	LSD (m)	0.63±0.17	0.16-1.12	0.62±0.20	0.16-1.10
	RSD (m)	0.65±0.18	0.30-1.10	0.63±0.22	0.30-1.10
Size	RPH (m)	1.55±0.37	0.54-2.70	1.71±0.53	0.54-2.70
	RPW (m)	2.23±0.63	0.98-3.81	2.42±0.75	1.50-3.68

값이 24.2 cm, 표준편차는 4.1 cm이었으며, 잣나무는 평균값이 28.1 cm, 표준편차는 3.9 cm이었다.

풍도목의 전도방향을 조사한 결과는 Figure 4와 같다. 낙엽송과 잣나무 두 수종 모두 80% 이상이 북서 방향으로 전도되었다. 학술림 외곽부에 위치한 조사대상지를 고려하면 임외에서 비교적 일정한 풍향(남동 방향으로 추정됨)의 강풍으로 인하여 대부분의 풍도목이 발생된 것으로 추측된다.

2. 지하부 특성 조사 결과

1) 근분의 형태적 특성

Table 2는 근분의 각 부분별 형태인자를 조사한 결과이다. 전도방향의 정면에서 측정한 WWR의 평균값은 낙엽송이 0.98 m, 잣나무가 1.05 m이었으며, LSR의 평균값은 낙엽송 1.14 m, 잣나무 1.26 m이었으며, 마지막으로 RSR의 평균값은 낙엽송이 1.09 m, 잣나무가 1.17 m으로 나타났다. 한편, 측면에서 측정한 근분 두께의 평균값은 CND의 경우 낙엽송이 0.74 m, 잣나무는 0.69 m이었다. 또한, LSD의 평균값은 낙엽송은 0.63 m, 잣나무는 0.62 m이었

으며, RSD의 평균값은 낙엽송의 경우 0.65 m, 잣나무의 경우 0.63 m로 조사되었다. 마지막으로 수목의 전도방향의 맞은편인 후면에서 측정한 근분의 높이(RPH)의 평균값은 낙엽송이 1.55 m, 잣나무가 1.71 m이었으며, 근분의 폭(RPW)의 평균값은 낙엽송이 2.23 m, 잣나무가 2.42 m로 각각 측정되었다.

Table 3은 근분의 평면 및 단면의 형태를 파악하기 위해서 WWR, LSR, RSR 및 CND, LSD, RSD 간의 대응표본 t-검정을 실시한 결과이다. 낙엽송의 경우, 전도방향에서 살펴 본 근분의 풍상측 반경(WWR)에 대하여 좌우측 반경(LSR, RSR)은 모두 통계적으로 유의한 차이가 있었으나, 좌우측 반경(LSR-RSR) 간에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 낙엽송 근분의 두께에 대해서는 가운데 두께(CND)에 대하여 좌우측 1/2지점 두께인 LSD, RSD 모두 통계적으로 유의한 차이가 있는 반면, LSD와 RSD 간에는 차이가 없었다.

잣나무의 경우에는 WWR과 LSR, RSR 각각에 대해서 낙엽송과 같은 뚜렷한 차이가 나타나지 않았으며, LSR과

Table 3. Results of statistical analyses to identify morphological characteristics of root plate.

Root plate	Variables	<i>Larix kaempferi</i> (N=77)		<i>Pinus koraiensis</i> (N=24)	
		Correlation coefficient (r)	P-value of pair-sample t-test	Correlation coefficient (r)	P-value of pair-sample t-test
Radius	WWR-LSR	0.448**	0.000	0.388*	0.046
	WWR-RSR	0.531**	0.001	0.422*	0.433
	LSR-RSR	0.461**	0.610	0.241	0.179
Depth	CND-LSD	0.668**	0.000	0.658**	0.018
	CND-RSD	0.618**	0.000	0.846**	0.003
	LSD-RSD	0.621**	0.156	0.625**	0.870

*p<0.05, **p<0.01

Figure 5. Idealized shapes of root plates (revised from Coder (2010); WWR: windward radius, LSR: left-side radius, RSR: right-side radius, CND: center depth, LSD: left-side depth, RSD: right-side depth)

RSR 간에도 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 또한, 근분 두께에서 CND에 대하여 LSD, RSD는 통계적으로 유의한 차이가 있는 반면에, LSD와 RSD 간에는 차이가 없는 것으로 나타났다.

조사 결과에 의하면 낙엽송은 타원형의 평면 형태이고 잣나무는 원형의 평면 형태를 갖는 것으로 나타났다. 하지만, 조사 과정에서 두 수종 모두 풍상측 반경 말단부가 접혀 있거나 불규칙하게 훼손된 근분이 많이 발견된 점을 감안하면 두 수종의 평면 형태를 타원형이나 원형 중 하나의 형태로 한정하기는 쉽지 않다. 선행연구에서도 수종에 대한 구분없이 근분의 평면 형태를 Koizumi et al. (2007)과 Achim and Nicoll(2009) 등은 타원형으로, Peltola (2006)는 원형으로 가정하였다. 종합적으로 근분의 평면 형태는 Figure 5(a)와 같이 타원형 혹은 원형의 사이에 있

는 것으로 가정할 수 있다. 타원형일 경우에 장반경(LSR 혹은 RSR)에 대한 단반경(WWR)의 비율은 조사결과를 바탕으로 하면 0.86~0.90에 이르는 것으로 나타났다. 한편, 근분의 측면 형태는 일반적으로 Figure 5(b)와 같이 원뿔(Peltola, 2006) 혹은 반타원체(Lundström et al., 2007)로 가정되는데, 조사결과에 따르면 수목 밑둥에서의 두께(CND)에 대하여 좌우측 1/2지점에서의 두께(LSD (LSD') 혹은 RSD(RSD'))의 비율은 0.85~0.88로서 원뿔형보다는 반타원체에 가까운 것으로 판단되었다.

2) 근분 내 뿌리의 구조적 특성

근분 내 뿌리의 개수, 직경, 길이 및 표면적을 조사한 결과는 Table 4와 같다. 낙엽송의 경우, 평균적으로 뿌리의 개수는 15.8 개, 뿌리 직경은 3.7 cm, 뿌리의 길이는 115.7 cm 그리고 뿌리의 직경과 길이로 계산한 뿌리 표면적은 2.149 m²로 조사되었다. 한편, 잣나무의 경우에는 평균적으로 뿌리의 개수는 17.9 개, 뿌리 직경은 4.8 cm, 뿌리의 길이는 123.9 cm 그리고 뿌리의 표면적은 3.308 m²로 조사되었다. 각 요소간 평균값을 단순 비교하였을 경우에는 잣나무가 낙엽송보다 근분 내 뿌리 개수, 직경, 길이 및 표면적이 모두 큰 것으로 나타났다.

Figure 6은 조사된 뿌리의 분포를 수목의 전도방향을 기준으로 8방위로 구분하여 나타낸 것이다. 잣나무와 낙엽송 모두 모든 방위에서 평균적으로 1 개~3 개 정도의 뿌리를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 이에 대하여 전도방향(315°, 0°, 45°)과 비전도방향(90°, 135°, 180°, 225°, 270°)으로 나누어 대응표본 t-검정을 실시한 결과, 전도방향의

Table 4. Results of investigated properties of individual roots in root plate.

	<i>Larix kaempferi</i> (N=42)		<i>Pinus koraiensis</i> (N=17)	
	Mean±S.D.	Min.-Max.	Mean±S.D.	Min.-Max.
Number of roots	15.8±4.2	7-24	17.9±3.7	13-24
Root diameter (cm)	3.7±2.3	1.0-20.0	4.8±2.6	1.0-16.0
Root length (cm)	115.7±28.6	16-230	123.9±30.1	60-210
Root surface area (m ²)	2.149±1.135	0.308-5.175	3.308±1.238	1.263-5.639

Figure 6. Spatial distribution of the number of roots in root plate (*the direction of tree uprooting).

Figure 7. Spatial distribution of root surface area in root plate (*the direction of tree uprooting).

평균 뿌리개수가 비전도방향보다 많은 것으로 나타났다 [Figure 8(a)]. 한편, Figure 7은 뿌리 표면적의 평균값을 방위별로 구분하여 나타낸 것이다. 뿌리의 개수와 마찬가지로

지로 잣나무와 낙엽송 모두 전도방향의 평균 뿌리 표면적이 비전도방향보다 큰 것으로 나타났다[Figure 8(b)]. 하지만, 뿌리 표면적의 경우 뿌리의 형태를 원기둥으로 가정하고 산정된 것으로 실제 뿌리의 표면적 값과는 차이가 날 수 있다.

한편, 연구대상지가 숲의 외곽 경계부에 위치하고 있고 경사에 의한 영향이 크지 않은 완경사지라는 점을 감안하면, 연구대상지의 수목은 비교적 일정한 풍향의 임외풍에 대하여 풍하측의 뿌리를 상대적으로 발달시켜 왔다는 추측을 할 수 있다. 실제로 일정한 풍향의 바람이 지속되는 환경에서 자라난 수목은 풍상측(바람 방향)보다 풍하측(반대쪽 방향)의 뿌리 직경이 더 크다고 보고한 사례(Tobin et al., 2007)도 존재한다. 하지만, 이러한 추측에 대한 근거로서 연구대상지의 바람 특성, 특히 연중 풍향 및 풍도 목 발생 당시의 풍향에 대한 특성 자료가 필요하다.

3. 수목 지상부와 지하부 특성 간 상관관계 분석 결과

수목 지상부와 지하부 특성 간의 상관관계를 피어슨 상관계수를 이용하여 분석한 결과를 Table 5에 정리하였다. 지상부 특성 인자로서 수고와 DBH를 선정하였으며, 지하부 특성 인자로서 근분의 두께(CND), 근분의 높이(RPH), 근분의 폭(RPW), 근분 내 뿌리 개수 및 근분 내 뿌리 표면적을 선정하였다. 분석 결과, 낙엽송의 경우에는 수고와 DBH 모두 각각 근분 높이, 근분 폭 및 근분 내 뿌리 표면

Figure 8. Comparisons of root properties in the uprooting direction and the non-uprooting direction.

Table 5. Pearson correlation coefficient of aboveground and belowground properties.

	<i>Larix kaempferi</i>		<i>Pinus koraiensis</i>	
	Height	DBH	Height	DBH
Center depth of root plate (CND)	0.397	0.387	0.222	0.200
Height of root plate (RPH)	0.410**	0.635**	0.266	0.453*
Width of root plate (RPW)	0.435**	0.645**	0.305	0.385
Number of roots	0.256	0.317*	0.215	0.252
Surface area of roots	0.458**	0.525**	0.416	0.531*

*p<0.05, **p<0.01

Figure 9. Simple linear regression of aboveground and belowground properties, *Larix Kaempferi*.

Figure 10. Simple linear regression of aboveground and belowground properties, *Pinus koraiensis*.

적과 뚜렷한 양의 상관관계를 나타내었다. 잣나무의 경우에는 DBH와 근분의 높이 및 근분 내 뿌리 표면적에서 뚜렷한 양의 상관관계가 나타났으나, 다른 변수들 간에는 뚜렷한 상관관계를 발견할 수 없었다. 두 수종 모두 수고보다는 DBH가 지하부 특성 즉, 근분의 크기와 뿌리 표면적과 상대적으로 뚜렷한 상관관계를 가지고 있었다. 이러한 연구결과는 DBH와 근분 크기의 강한 상관관계를 보고한 선행연구(Lundström et al., 2007; Achim and Nicoll, 2009)의 결과와 일치한다. Figure 9와 Figure 10은 뚜렷한 선형 상관관계를 나타내는 수목의 지상부와 지하부 특성에 대해서 단순선형회귀식을 수종별로 도식화한 것이다. 추정된 회귀식은 모두 결정계수가 0.4 이하로서 수목 지상부와 지하부 특성 간의 선형관계를 잘 나타내지 못하고 있다. 보다 정확도가 높은 추정식을 도출하기 위해서는 많은 현장자료에 기반한 다중 회귀분석이 필요하다. 그럼에도 불구하고 수목 근분의 크기에 관한 자료가 미비한 현재 상황에서는 현장에서 수목 근분의 대략적인 크기를 추정하는데 이 연구에서 도출된 회귀식이 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

결론

이 연구에서는 수목 근분 개념을 도입하여 풍도목의 근분 형태를 단순화하여 각 부분별 형태인자를 조사하고, 그 결과를 통계적 방법을 이용하여 분석하였다. 연구 결과로서 풍도목 근분의 평면 형태는 타원형 혹은 원형으로, 측면 형태는 반타원체로 각각 분석되었다. 또한, 연구대상지의 풍도목은 전도방향이 비전도방향보다 근분 내 뿌리의 개수가 많고 표면적이 크게 나타났다. 마지막으로 풍도목의 지상부 및 지하부 특성 간의 상관관계를 조사한 결과, DBH-지하부 특성이 수고-지하부 특성보다 상대적으로 상관관계가 뚜렷하게 나타났으며, 이를 토대로 단순선형회귀식을 작성하였다.

종합적으로 이 연구를 통해서 바람에 의한 수목 뿌리의 편향적 발달에 대해서 확인할 수 있었으며, 풍도목 근분의 형태를 단순화시켜 지상부의 특성으로부터 근분 크기를 대략적으로 추정할 수 있는 관계식을 도출하였다. 뿌리의 공간적 분포에 내재한 불확실성과 다양한 외부인자들의 복잡한 상호관계를 고려할 때, 근분 개념과 같이 수목 지하부의 형태를 단순화하는 것은 한계를 가지고 있다 (Coder, 2010). 그럼에도 불구하고 이러한 방법론은 바람에 대한 수목 저항의 역학적 관계를 명료하게 함으로써, 기존의 경험적 혹은 실험적 연구결과를 구체화시킬 수 있는 출발점이 될 수 있다. 이 연구의 결과 역시 바람에 대한 수목의 저항 혹은 반응을 역학적으로 해석하는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 추후 다양한 수종

에 대한 조사 결과와 수목인발시험 및 역학 모델링 결과가 축적된다면, 방풍림이나 비사방지림의 조성 계획 수립 단계에서 효과적인 수종 선정 및 수목 배치에 대한 자료로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Achim, A. and Nicoll, B.C. 2009. Modelling the anchorage of shallow-rooted trees. *Forestry* 82(3): 273-284.
- Achim, A., Ruel, J.C., Gardiner, B.A., Laflamme, G., and Meunier, S. 2005. Modelling the vulnerability of balsam fir forests to wind damage. *Forest Ecology and Management* 204: 35-50.
- Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P., and Zocco, A. 2005. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). *Plant and Soil* 278: 11-22.
- Coder, K.D. 2010. Root strength and tree anchorage. University of Georgia Warnell School of Forestry and Natural Resources Monograph Publication WSFNR10-19. pp. 88.
- Danjon, F., Fourcaud, T., and Bert, D. 2005. Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*. *New Phytologist* 168(2): 387-400.
- Dupuy, L., Fourcaud, T., and Stokes, A. 2005. A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. *European Journal of Soil Science* 56(3): 319-327.
- Fourcaud, T., Ji, J., Zhang, Z., and Stokes, A. 2008. Understanding the impact of root morphology on overturning mechanisms: a modelling approach. *Annals of Botany* 101(8): 1267-1280.
- Ghani, M.A., Stokes, A., and Fourcaud, T. 2009. The effect of root architecture and root loss through trenching on the anchorage of tropical urban trees (*Eugenia grandis* Wight). *Trees* 23: 197-209.
- Im, D., Kim, W., Choi, S., and Kim, Y. 2011. Investigation of critical breaking moment through field tree-pulling test. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 31(4B): 323-332 (in Korean).
- Khuder, H., Stokes, A., Danjon, F., Gouskou, K., and Lagane, F. 2007. Is it possible to manipulate root anchorage in young trees? *Plant and Soil* 294: 87-102.
- Koizumi, A., Oonuma, N., Sasaki, Y., and Takahashi, K. 2007. Difference in uprooting resistance among coniferous species planted in soils of volcanic origin. *Journal of Forest Research* 12(3): 237-242.
- Korea Forest Service. 2006. The number of typhoon and typhoon-induced, uprooted trees. Report Data for National Assembly (in Korean).
- Lundström, T., Jonas, T., Stöckli, V., and Ammann, W. 2007. Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root-soil plate geometry and root growth orientation. *Tree*

- Physiology 27(9): 1217-1227.
- Moore, J.R. 2000. Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types. Forest Ecology and Management 135: 63-71.
- Nicoll, B.C., Easton, E.P., Milner, A.D., Walker, C., and Coutts, M.P. 1995. Wind stability factors in tree selection: distribution of biomass within root systems of Sitka spruce clones. pp. 276-292. In: Coutts, M.P. and Grace, J. (Eds.). Wind and Trees. Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- Peltola, H.M. 2006. Mechanical stability of trees under static loads. American Journal of Botany 93(10): 1501-1511.
- Stokes, A., Nicoll, B.C., Coutts, M.P., and Fitter, A.H. 1997. Responses of young Sitka spruce clones to mechanical perturbation and nutrition: effect on biomass allocation, root development and resistance to bending. Canadian Journal of Forest Research 27: 1049-1057.
- Stokes, A. and others. 2005. Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps. Plant and Soil 278: 107-117.
- Taehwa Experimental Forest. 2009. The current status of Taehwa Experimental Forest. The Internal Report of Seoul National University (in Korean).
- Tobin, B. and others. 2007. Towards developmental modeling of tree root systems. Plant Biosystems 141(3): 481-501.
- Ulanova, N.G. 2000. The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review. Forest Ecology and Management 135: 155-167.
- Urata, T., Shibuya, M., Koizumi, A., Torita, H., and Cha, J. 2012. Both stem and crown mass affect tree resistance to uprooting. Journal of Forest Research 17(1): 65-71.
- Youn, H.J., Park, K.H., Lee, M., Won, M., and Kim, K. 2011. Analysis of the relationship between the characteristics of the wind damaged trees and the wind caused by typhoon 'Kompasu'. Journal of Korean Forest Society 100(2): 246-255 (in Korean).

(2014년 3월 11일 접수; 2014년 4월 6일 채택)