

우리나라 주요수종의 Allometry와 개체목 흉고단면적 성장모델 개발

최정기

강원대학교 산림환경과학대학

Development of Allometry and Individual Basal Area Growth Model for Major Species in Korea

Jung-Kee Choi

College of Forest & Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon-si 200-701, Korea

ABSTRACT : Allometry and basal area equations were developed with various tree measurement variables for the major species; *Quercus variabilis*, *Quercus mongolica*, *Pinus koraiensis* and *Larix leptolepis* in Korea. For allometry models, the relationships between total height-DBH, crown width-DBH, height to the widest portion of the crown-total height, and height to base of crown-total height were investigated. Multiple regression methods were used to relate annual basal area growth to tree variables of initial size (DBH, total height, and crown width), relative size (relative diameter and relative height) as well as competition measures (competition index, crown class, and live crown ratio).

Keywords : Allometry, Diameter growth, Basal area growth, Tree measurements, Multiple regression

서론

우리나라 산림은 2009년 말 현재 6,370천 ha로 전국 토의 63.8%를 차지하고 있으며, 산림면적 중 침엽수림이 41.9%, 활엽수림이 26.0%, 혼효림이 29.0%, 죽림과 무입목지가 3.1%로 구성되어 있다. 영급별 산림면적분포는 30년생 미만이 전체산림면적의 62%를 차지하고, 31년생 이상이 38%로 우리나라 산림은 대부분 청·장령림의 구조를 이루고 있어 숲 가꾸기 등을 통한 지속적관리와 투자가 필요한 시기에 놓여있다(Korea Forest Service, 2010). 숲가꾸기를 비롯하여 산림사업관리는 임목의 성장촉진과 재질향상을 통한 목재생산 외에도 수자원 함양, 휴양기능, 종다양성 증진, 기후변화 대응에 따른 탄소흡수원 확충 등 매우 중요한 기능을 갖고있다(Smith *et al.*, 1997).

따라서 합리적인 산림사업관리를 위해서는 천연림과 인공림에 따라, 수종에 따라 임목 및 임분의 구조적 특성 및 성장 규명이 우선적으로 파악되어야 한다(Byeon *et al.*, 1996; Oliver and Larson, 1996). 특히, 주기적인 임목 및 임분의

생장학적 모니터링을 통하여 환경변화에 따른 성장메카니즘을 파악하여 과학적인 임분구조진단 및 시업방안이 제시되어야 한다(Byeon *et al.*, 1996). 그러나 임목의 생장은 시간에 따라 다양한 인자들이 영향을 미치게 되고 생장에 대한 정확한 자료를 분석하기가 쉽지 않아 개체목 생장에 대한 정보를 종합적으로 제공하기 어려운 현실이다(Avery and Burkhart, 2002; Lee *et al.*, 2004).

그런 이유로 임업선진국에 비해 임업역사가 짧은 우리나라에서는 단목생장에 관한 자료 및 분석이 미흡한 실정이다. 앞으로 우리나라에서도 수종별 성장분석을 위해서 단지 몇 개의 임목 및 임분 측정 인자만으로 해당 임목 및 임분을 진단하기 보다는 임목 및 임분의 생물학적 특성과 환경적 특성을 고려한 다양한 측정인자를 이용해서 개체목의 성장상태를 정확히 분석하여야 한다(Belcher *et al.*, 1982; Cole and Lorimer, 1994; Choi *et al.*, 2001, 2007a,b; Choi and Yoo, 2006). 특히 복잡한 임분구조를 갖는 우리나라 천연 활엽수림의 경우 다양한 인자를 통한 성장조사 및 분석이 더욱 요구된다(Choi and Yoo, 2006; Choi *et al.*, 2007b;

Shin *et al.*, 2002).

본 연구의 목적은 우리나라 천연활엽수림의 대표수종인 굴참나무, 신갈나무와 인공침엽수림의 대표수종인 잣나무, 낙엽송을 대상으로 임목측정인자간의 관계를 수종별 allometry 모델로 구축하고, 다양한 임목 및 임분측정인자를 이용하여 수종별 개체목 흉고단면적 성장함수식을 제작하는데 있다.

자료 및 방법

1. 조사 대상지

본 연구대상지는 강원도 춘천시 남산면과 남면에 소재해 있는 춘천국유림관리소 관내 봉화산 일대(이하: 강촌 모델림)를 대상으로 하였다(Fig. 1). 강촌 모델림 면적은 총 867 ha로 동경 127° 34'-37', 북위 37° 45'-47'에 위치하고 있으며, 기후는 산악기후의 특성과 대륙성 기후의 특성이 복합적으로 일어나는 지역으로 연평균 강수량은 1266.8 mm로 내륙평균값과 비슷하지만 여름철 강수량은 772.5 mm로 다우지역에 속하고, 겨울철 강수량은 66.4 mm로 전반적인 과우지역의 특성을 가지고 있다. 연평균 기온은 10.9°C로 연평균 최고기온과 최저기온은 각각 17.0°C와 5.7°C이며 상대습도는 72.3%이다(Korea Meteorological Administration, 2011). 강촌 모델림 토양은 주로 사양토로 이루어져 있으며, 토심은 중(30-60 cm), 건습도는 적윤, 전체적인 지위는 중으로 대체로 생육조건이 양호한 지역이다.

2. 영구표준지 설정 및 임목측정방법

본 강촌 모델림은 효율적인 임분 및 단목성장 상태를 장

기적으로 진단하기 위하여 원형 영구표준지를 구상하였으며, 원형표준지 크기는 11.3 m의 표준지 반경으로 하는 주 원형표준지(main plot)와 반경 5.6 m크기의 주 원형표준지 내에 보조 원형표준지(subplot)를 설정하였다. 영구표준지는 강촌 모델림 임상을 고려하여 총 49개를 설치하였다(Fig. 1).

본 원형 표준지는 2005년 8-12월 향후 지속적인 모니터링을 위하여 영구표준지로 활용 될 것을 감안하여 임도로부터 접근이 용이한 임분을 무작위로 선정하였으며, 각 영구표준지들은 GPS를 이용한 위치정보와 지형 및 임황현황에 대한 정밀조사를 실시하였다. 영구표준지내의 지형측정인자로는 지형, 사면방향, 해발고, 경사가 측정되었으며, 임황측정은 주 원형 표준지내 흉고직경 6 cm 이상의 모든 임목에 대하여 수종, 임목간 거리, 방위각, 흉고직경, 총수고, 수관폭이 가장 넓은 지점의 수고, 지하고, 수관폭에 대한 측정인자가 조사되었다.

3. 직경성장량 측정 및 조사인자

본 영구표준지에서 조사된 임목측정인자를 이용하여 보조표준지내의 흉고직경 6 cm 이상의 주요수종인 굴참(*Quercus variabilis*), 신갈(*Quercus mongolica*), 잣나무(*Pinus koraiensis*)와 낙엽송(*Larix leptolepis*)을 중심목(subject tree)으로 정하고 임목측정 후 성장추를 이용하여 경사지 위를 기준으로 오른쪽 방향 흉고직경위치에서 연령과 최근 5년간의 연륜폭을 측정하여 연년 평균 직경 성장량 및 흉고단면적 성장량을 산출하였다.

또한, 임목의 구조적 특성을 파악하기 위하여 측정인자를 이용하여 상대직경, 상대수고, 수관투영면적, 수관장비율, 경쟁지수를 산출하였다. 상대직경(RD)과 상대수고(RH)

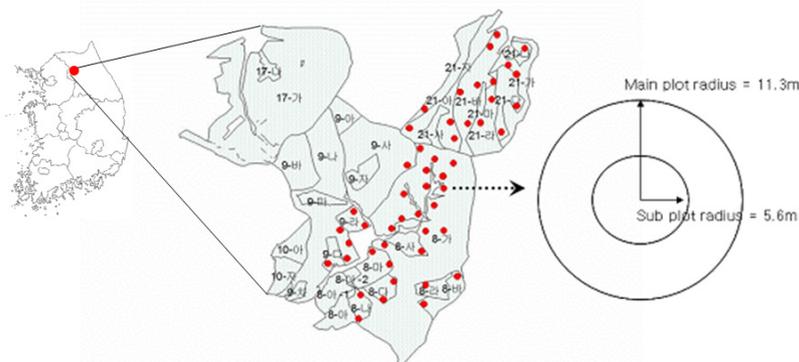


Fig. 1. The spatial distribution of permanent plots and plot diagram in Gangchon model forest.

Table 1. Tree variables calculated using tree measurements.

Abbreviation	Unit	Definition
△DBH	cm/yr	Annual diameter increment
△BA	cm ² /yr	Annual basal area increment
DBH	cm	Diameter at breast height
Ht	m	Total height
Hw	m	Height to the widest crown width
Hb	m	Clear length
TCA	m ²	Total crown area
LCR		Live crown ratio
RD		Relative diameter
RH		Relative height
CI		$\sum D_i/D_j$
AGE		Tree age
D	5	Dominant tree
CD	4	Co-dominant tree
I	3	Intermediate tree
S	2	Suppressed tree

는 각 표준지별로 해당 흉고직경 및 수고를 해당 임분의 우세목과 준우세목의 평균 흉고직경 및 평균수고의 비로 아래와 같이 계산되었다. 전체수관투영면적(TCA)은 수관직경을 이용하여 원면적 공식을 이용하여 계산하였고, 수관장비율(LCR)은 총수고에 대한 수관장(crown length)의 비율로 (총수고-지하고)/총수고로 산출하였으며, 경쟁지수(CI)는 중심목과 경쟁목을 이용한 흉고직경에 대한 거리독립 경쟁지수를 사용하였다. 경쟁목 선정은 보조원형표준지내의 각 중심목의 수관급보다 같거나 큰 수관급인 임목으로 선정하

였다. 이상의 임목측정인자를 통하여 조제된 독립변수들에 대한 산출방법을 정리하면 Table 1과 같다.

4. Allometry 및 개체목 성장모델 개발 및 평가

본 연구에서는 강촌 모델림의 주요 수종인 굴참나무, 신갈나무, 잣나무와 낙엽송에 대하여 직경-총수고, 수관폭이 가장 넓은 지점의 수고, 지하고, 수관폭의 관계를 규명하기 위해서 일차 단순회귀 모델식을 이용하여 두 변수간의 allometric 모델을 개발하였다. 개체목 성장모델은 굴참나무, 신갈나무, 잣나무와 낙엽송에 한하여 임목측정인자 및 조제된 변수를 독립변수로 하여 다중회귀에 의한 방법으로 흉고단면적 성장모델을 개발하였다. 종속 및 독립변수들은 자연로그(ln) 또는 역수를 이용하여 변수변환을 실시하였다. 성장모델 검정은 수종별 개발된 allometric 모델과 흉고 단면적 성장모델들의 결정계수(R²), 표준오차(S_{y.x}), 잔차도를 이용하여 평가하였다.

결과 및 고찰

1. 임목자원 분석

본 영구표준지 보조표준지내의 신갈나무와 굴참나무의 세부적인 임목특성을 살펴보면, 연령의 경우 신갈나무가 평균 32년생으로 20-48년생의 분포를 보이며, 굴참나무는 평

Table 2. The attributes of 4 major species.

Species	Statistics	AGE	DBH (cm)	HT (m)	HW (m)	HB (m)	CL (m)	CW (m)
Quercus variabilis (n=143)	Min	18	6.8	4.3	3.8	3.4	0.5	2.0
	Max	50	28.4	18.5	14.3	12.1	10.5	8.0
	Mean	33	15.5	11.7	9.2	7.0	4.8	4.7
	CV(%)	24	29.7	25.6	28.3	24.3	45.8	25.5
Quercus mongolica (n=137)	Min	20	6.7	5.6	4.0	2.3	0.8	2.5
	Max	48	30.2	18.0	14.8	12.0	11.3	7.2
	Mean	32	15.4	11.6	8.9	6.8	4.8	4.4
	CV(%)	25	26.6	22.4	24.7	23.5	41.7	25.0
Pinus koraiensis (n=180)	Min	22	7.0	4.5	3.5	3.0	1.0	1.0
	Max	49	28.5	18.2	16.2	13.5	12.3	7.7
	Mean	32	15.9	12.3	9.0	6.8	5.5	4.4
	CV(%)	19	25.8	23.6	28.9	32.4	40.0	31.8
Larix leptolepis (n=82)	Min	32	12.3	10.0	6.2	5.6	2.0	2.7
	Max	48	34.2	27.4	24.5	17.5	17.4	7.7
	Mean	39	21.0	17.4	14.0	10.0	7.4	5.1
	CV(%)	10	25.7	25.3	29.3	17.7	39.2	21.6

균 33년생으로 18-50년생의 분포로 두 수종 모두 비슷한 연령분포를 갖는 것으로 나타났다. 흉고직경은 신갈나무가 평균 15.4 cm이고 직경범위가 6.7-30.2 cm이며, 굴참나무는 평균 15.5 cm, 직경범위가 6.8-28.4 cm로 파악되어 두 수종간의 직경은 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 총수고(HT), 수관폭이 가장 넓은 지점의 수고(HW), 지하고(HB), 수관폭(CW) 또한 두 수종 모두 비슷한 크기를 갖고 있는 것으로 나타났으며, 수관장(CL)의 경우 두 수종 모두 다른 변수들보다 변이가 큰 것으로 나타났(Table 2).

잣나무와 낙엽송의 경우를 살펴보면, 잣나무는 평균 32년생(22-49년생)으로 평균 흉고직경이 15.9 cm로 7.0-28.5 cm의 범위를 보이며, 낙엽송은 평균 39년생(32-48년생)으로 평균 흉고직경이 21.0 cm로 12.3-34.2 cm의 분포를 보이고 있어 잣나무가 낙엽송보다 넓은 연령분포를 갖는 것으로 나타났다. 기타 측정인자에 있어서 낙엽송이 잣나무보다 큰 것으로 나타났으며, 두 수종 모두 수관장의 경우 변이가 가장 심한 것으로 나타났(Table 2).

2. 직경생장과 흉고직경간의 산점도 분석

수종별로 최근 5년간의 흉고직경생장과 흉고직경과의 상관관계를 산점도로 표시한 결과, 일반적으로 모든 수종에 대해 직경이 증가함에 따라 직경생장은 양의 상관(상관계수 0.30-0.45) 갖는 것으로 나타났(Fig. 2). 4개 수종 중 잣나무가 가장 상관이 좋은 것으로 나타났으며($r=0.45$), 굴참, 신갈, 낙엽송 순으로 상관이 좋은 것으로 나타났다. 낙엽송의 경우 직경생장량은 흉고직경 25 cm이후에 다소 감소하는 경향이 있으나, 현재의 제한된 자료로 인해 아직 정확히 판단하기에는 어려움이 있다. 대체로 강촌 모델림의 주요 4수종은 대부분 10-30 cm의 흉고직경급으로 현재 선형적으로 양적생장을 하고 있는 것으로 사료된다.

강촌모델림의 수종별 연년 직경생장량의 범위는 굴참나무가 0.12-0.88 cm(0.45 cm), 신갈나무가 0.10-0.70 cm(0.41 cm), 잣나무가 0.21-0.95 cm(0.50 cm) 그리고 낙엽송이 0.38-1.10 cm(0.64 cm) 인 것으로 나타나, 4개 수종을 비교했을 때 낙엽송>잣나무>굴참>신갈 순으로 직경생장이 좋은 것으로 나타났다. 제5차 국가산림자원조사의 2007, 2008년의 강원도 자료를 확인한 결과, 수종별 연년 직경생장량은 굴참나무가 0.08-0.97 cm(0.35 cm), 신갈나무가 0.07-1.16 cm(0.32 cm), 잣나무가 0.06-1.16 cm(0.49 cm) 그리

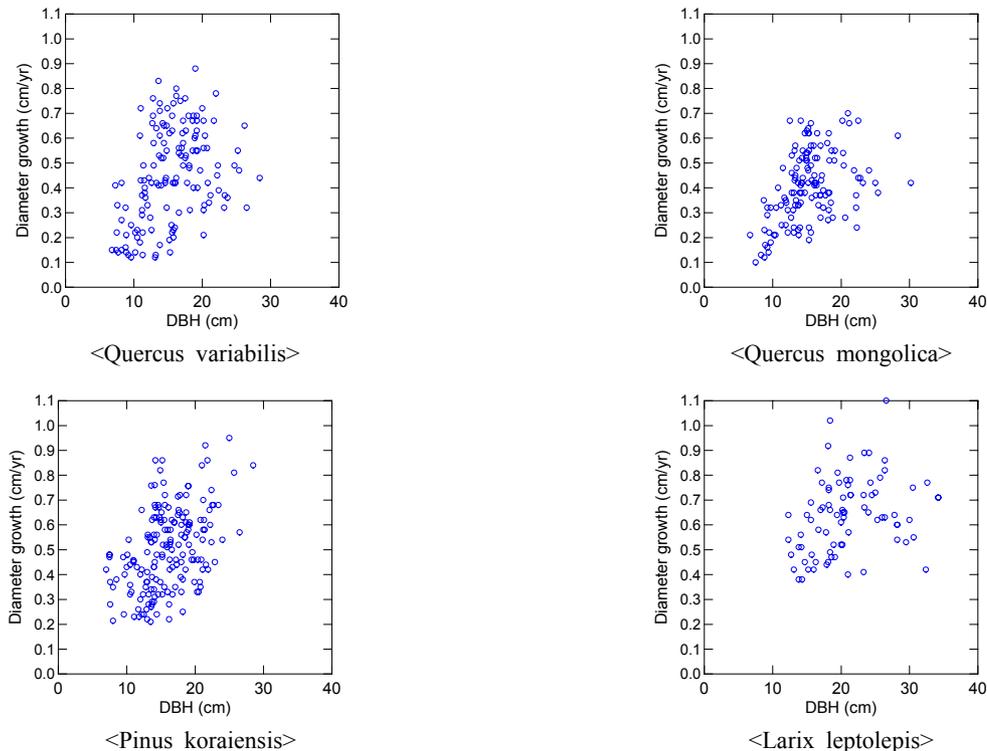


Fig. 2. Scatter plots between diameter growth and DBH for 4 major species.

고 낙엽송이 0.09-1.33 cm(0.52 cm) 인 것으로 나타나, 4개 수종을 비교했을 때 본 연구 결과와 같이 낙엽송>잣나무>굴참>신갈 순으로 직경생장이 좋은 것으로 나타났다(Shin, 2011).

3. 직경생장과 측정인자간의 상관분석

본 연구에서는 주요 4수종(굴참, 신갈, 잣나무, 낙엽송)과 최근 5년간의 직경생장량을 이용하여 연년직경생장량과 임목측정인자의 조제변수와 상관관계를 분석하였다(Fig. 3-4). 조제된 변수로는 앞에서 언급한 바와 같이 수관급(CC), 흉고직경(DBH), 총수고(HT), 수관폭이 가장 넓은 지점에서의 수고(HW), 지하고(HB), 수관장(CL), 수관폭(CW), 수관장비율(LCR), 전체수관투영면적(TCA), 상대직경(RD), 상대수고(RH), 경쟁지수(CI), 연령(AGE)으로 총 13개 변수를 사용하였다. 여기서 이들 변수들은 측정시점의 크기인자를 이용하였다.

수종별 최근 직경생장량과 조제된 13개의 측정변수에 대한 상관관계를 분석한 결과, 천연활엽수종인 굴참나무와 신갈나무는 대부분 유사한 경향이 있으나 수관폭과 수관투영면적은 반대의 경향이 있는 것으로 나타났다(Fig. 3). 굴참나무의 경우 수관급($r=0.53$), 경쟁지수($r=-0.48$), 수관폭이 가장 넓은 지점의 수고($r=0.40$), 총수고($r=0.40$), 흉고직경($r=0.38$)순으로 상관관계가 높게 나타났으며, 신갈나무는 경쟁지수($r=-0.49$), 총수고($r=0.44$), 상대직경($r=0.44$), 흉고직경($r=0.43$), 수관폭이 가장 넓은 지점의 수고($r=0.43$) 순으로 파악되었다.

굴참나무의 경우 선행연구에서도 흉고직경, 경쟁지수, 수고가 직경생장량과의 상관이 좋은 것으로 나타났고, 신갈나무가 굴참나무의 상대직경과 상대수고가 상대적으로 높은 것으로 나타났다(Choi and Yoo, 2006). 그러나 신갈나무의 경우 선행연구와 달리 상대직경을 제외하고 직경생장과 변수간에 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 전반적으로 상관계수가 선행연구에 비하여 다소 낮은 것으로 나타났는데

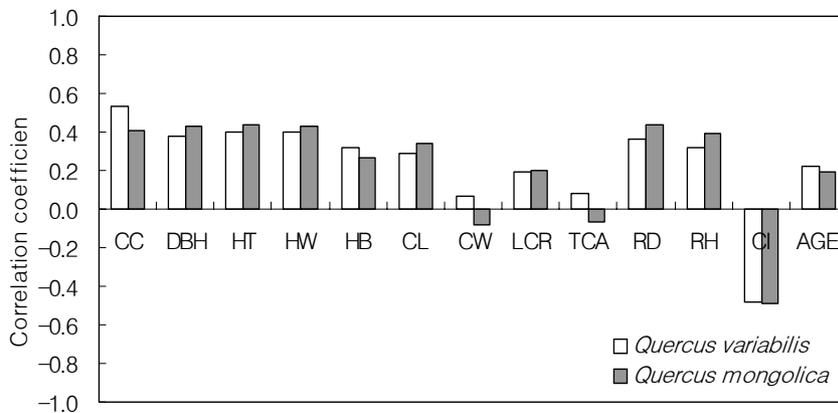


Fig. 3. Correlation coefficients between diameter growth and 13 measured variables in *Quercus variabilis* and *Quercus mongolica*.

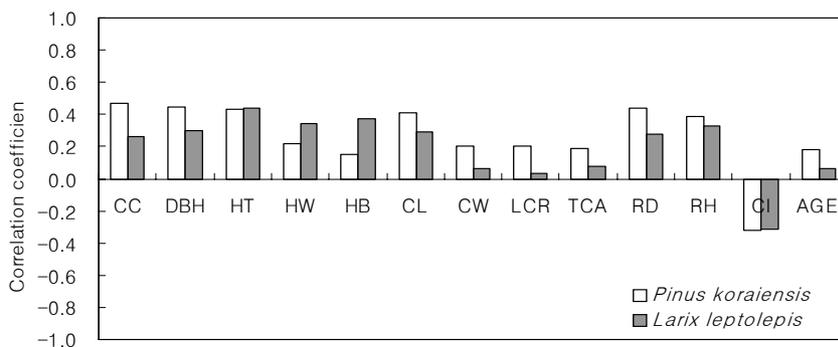


Fig. 4. Correlation coefficients between diameter growth and 13 measured variables in *Pinus koraiensis* and *Larix leptolepis*.

이는 연령범위가 과거연구에 비하여 제한되었기 때문인 것으로 사료된다(Choi and Yoo, 2006).

잣나무와 낙엽송 또한, 최근 5년간의 직경성장량을 이용하여 연년직경성장량과 임목측정인자의 조제변수와의 상관관계를 한 결과, 대부분 유사한 패턴을 갖고 있으나, 수종간에 차이가 있는 것으로 나타났다. 잣나무의 경우 직경생장과 변수간의 상관계수는 수관급($r=0.47$), 흉고직경($r=0.45$), 상대직경($r=0.44$), 총수고($r=0.43$), 수관장($r=0.41$) 순으로, 낙엽송의 경우 총수고($r=0.44$), 지하고($r=0.37$), 수관폭이 가장 넓은 지점의 수고($r=0.34$), 상대수고($r=0.33$), 흉고직경($r=0.30$) 순으로 나타났다(Fig. 4).

Yoo(2004)의 연구결과에서도 잣나무의 경우 측정인자와 연년직경성장량의 관계에서 흉고직경, 상대직경, 총수고 순으로 상관관계가 좋은 것으로 나타났으며, 낙엽송의 경우는 흉고직경, 상대직경, 총수고의 순으로 나타났다. 낙엽송의 경우 Yoo(2004)의 자료가 35본으로 제한되었기 때문에 본 연구결과와 차이가 있는 것으로 사료된다.

4. Allometry 모델

우리나라 주요 4 수종의 직경-총수고간의 allometric 모델은 일차식, power식과 역수식을 이용해서 산출하였다. 수종별 모두 수관이 가장 넓은 수고와 지하고는 흉고직경 변수에 비해 총수고와 더 좋은 상관을 갖기 때문에 총수고를 독립변수로 하는 일차 단순회귀식을 조제하였다. 이들 모델

식의 결정계수, 표준오차와 잔차도를 점검하여 최적모델식을 선정하였다(Table 3).

굴참나무와 신갈나무의 흉고직경-총수고의 관계가 매우 유사함으로 이들 두 수종을 합하여 power식을 조제 하였을 경우, 함수식은 $\ln Ht = 0.340 + 0.774 \ln DBH$ ($n=915$, $R^2=0.829$, $S_{y,x}=0.111$)으로 구축되어 천연활엽수림에 적용 될 수 있다. 그 외에도 흉고직경-총수고의 allometric 모델은 흉고직경에 따른 총수고의 재적을 산출할 때 활용될 수 있으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 수종별 개체목 표현을 위해서도 이용될 수 있다(Yoo, 2004).

수종별 직경과 수관폭의 allometric 관계에서는 4 수종 모두 거의 상관이 없는 것으로 나타났다. 산점도 분석을 통하여 흉고직경과 수관폭간의 단순회귀를 조제한 결과, 예상한 바와 같이, 매우 낮은 결정계수를 갖고 있어, 이 수종별 allometric 관계는 흉고직경-총수고에 비해 정확도가 매우 떨어지는 것으로 나타났다. 본 연구의 굴참 및 신갈나무의 allometric 함수식, 결정계수와 표준오차들은 기존의 연구결과와 유사한 경향이 있는 것으로 나타났다(Choi et al., 2007b).

5. 개체목 흉고단면적 성장모델

개체목 흉고단면적 모델은 ‘흉고단면적성장=f(초기크기, 상대크기, 경쟁크기)’의 영향을 받는다는 가설 하에 사용자 측면을 고려하여 흉고직경만을 독립변수로 하는 모델식과

Table 3. Allometric equations for 4 major species.

Species	Equations	R ²	S _{y,x}
<i>Quercus variabilis</i> (n=478)	$\ln Ht = 0.332 + 0.777 \ln DBH$	0.844	0.107
	$Hw = 0.040 + 0.767 Ht$	0.866	0.907
	$Hb = 2.390 + 0.390 Ht$	0.682	1.049
	$CW = 3.708 + 0.054 DBH$	0.058	1.258
<i>Quercus mongolica</i> (n=437)	$\ln H = 0.349 + 0.770 \ln DBH$	0.812	0.115
	$Hw = -0.048 + 0.775 Ht$	0.829	1.012
	$Hb = 2.170 + 0.412 Ht$	0.468	1.261
	$CW = 3.794 + 0.046 DBH$	0.045	1.011
<i>Pinus koraiensis</i> (n=589)	$\ln H = 0.264 + 0.804 \ln DBH$	0.768	0.128
	$Hw = -0.218 + 0.777 Ht$	0.758	1.288
	$Hb = 1.200 + 0.477 Ht$	0.479	1.461
	$CW = 3.235 + 0.078 DBH$	0.083	1.083
<i>Larix leptolepis</i> (n=327)	$\ln H = 3.515 - 13.711 DBH^{-1}$	0.539	0.191
	$Hw = -1.045 + 0.861 Ht$	0.868	1.579
	$Hb = 0.068 + 0.611 Ht$	0.663	2.044
	$CW = 3.578 + 0.067 DBH$	0.108	1.118

다양한 독립변수를 이용한 모델식을 각각 제조하였다(Cole and Lorimer, 1994; Choi *et al.*, 2001, 2007a,b; Yoo, 2004). 본 연구에서 흉고직경성장량 대신 흉고단면적 성장량을 종속변수로 택한 이유는 흉고단면적성장량이 측정인 자간의 상관성이 보다 높기 때문에 이를 종속변수로 선정하였다(West, 1980).

흉고단면적성장량과 흉고직경과의 함수식은 산점도를 고려하여, 흉고단면적성장 및 흉고직경을 자연로그, 역수 또는 제곱으로 변수변형을 통하여 함수식을 조제하였다 (Table 4).

위 수종별 함수식들은 모두 유의적인 독립변수($P < 0.0001$)를 갖고 잔차도의 경우 등분산을 갖는 것으로 나타났다. 또한 수종별 함수식은 현재의 자료범위에서는 어느 모델식을 이용하더라도 큰 문제는 없으나, 향후 임분생장예측을 위한 시물레이션을 위해서는 흉고직경을 역수로 하는 함수식을 활용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 특히, 굴참나무와 신갈나무의 경우는 비슷한 직경성장량과 성장패턴을 갖기 때문에 사용자 편의를 위해서 두 수종을 하나로 묶어 흉고직경을 역수로 하는 함수식으로 만들어 활용 할 수 있다(ln

$\Delta BA = 3.445 - 16.162 DBH^{-1}$ ($n=280, R^2=0.519, S_{y,x}=0.340$)).

본 흉고직경 성장자료는 성장추에 의해 목편을 통해 최근 5년간의 직경생장을 측정된 자료이고, 현재 모델링 흉고 직경들이 10-30 cm에 편중되어 있어, 임목 및 임분 예측 시 물레이션을 위해서는 향후 5년, 10년까지만 제한을 두는 것이 바람직하다고 사료된다.

기타 다양한 독립변수를 이용한 흉고단면적 모델식은 초기크기, 상대크기, 경쟁에 따라 생장에 차이가 있다는 가정 하에 다중회귀로 수종별 흉고단면적 모델식을 개발하였다 (Table 5). 개발된 모델식들은 등분산의 잔차도를 갖고, 독립변수들 모두는 매우 유의적인 것($p < 0.0001$)으로 나타났다. 이들 성장모델식은 향후 시물레이션을 위해 흉고직경만으로 하는 함수식보다 좋은 설명력을 갖으며, 간벌이나 산림재해로 인해 임분구조가 바뀌게 되었을 경우 이를 인지할 수 있는 독립변수를 갖는 특성을 가지고 있다(Choi *et al.*, 2001, 2007a; Yoo, 2004). 다만, 이를 위해서는 수관급, 상대직경, 경쟁지수 계산들이 매년 업데이트되어야 하는 계산상의 복잡성이 있다.

굴참나무의 경우 직경과 수관급과 직경에 의한 함수식

Table 4. Basal area growth equations with DBH variable only for 4 major species.

Species	Form	Equation	R ²	S _{y,x}
<i>Quercus variabilis</i> (n=143)	V1	$\ln \Delta BA = -0.734 + 1.128 \ln DBH$	0.487	0.359
	V2	$\ln \Delta BA = 3.380 - 15.121 DBH^{-1}$	0.507	0.352
	V3	$\ln \Delta BA = -0.153 - 0.253 DBH - 0.006 DBH^2$	0.517	0.350
<i>Quercus mongolica</i> (n=137)	M1	$\ln \Delta BA = -1.116 + 1.268 \ln DBH$	0.510	0.337
	M2	$\ln \Delta BA = 3.543 - 17.692 DBH^{-1}$	0.539	0.327
	M3	$\ln \Delta BA = -0.400 - 0.271 DBH - 0.006 DBH^2$	0.543	0.327
<i>Pinus koraiensis</i> (n=180)	K1	$\ln \Delta BA = 0.150 + 0.936 \ln DBH$	0.415	0.306
	K2	$\ln \Delta BA = 3.543 - 12.324 DBH^{-1}$	0.402	0.309
	K3	$\ln \Delta BA = 1.179 - 0.134 DBH - 0.002 DBH^2$	0.414	0.307
<i>Larix leptolepis</i> (n=82)	L1	$\ln \Delta BA = -1.407 + 1.347 \ln DBH$	0.605	0.279
	L2	$\ln \Delta BA = 4.038 - 27.310 DBH^{-1}$	0.632	0.269
	L3	$\ln \Delta BA = -0.451 + 0.234 DBH - 0.004 DBH^2$	0.637	0.269

Table 5. Basal area growth equations with various variables for 4 major species.

Species	Form	Equation	R ²	S _{y,x}
<i>Quercus variabilis</i> (n=143)	V4	$\ln \Delta BA = -0.415 + 0.737 \ln DBH + 0.185 CC$	0.538	0.342
	V5	$\ln \Delta BA = 0.455 + 0.784 \ln DBH - 0.027 CI$	0.503	0.355
<i>Quercus mongolica</i> (n=137)	M4	$\ln \Delta BA = 0.862 + 0.614 \ln HT + 0.748 \ln RD$	0.480	0.349
	M5	$\ln \Delta BA = 0.312 + 0.934 \ln HT - 0.029 CI$	0.443	0.361
<i>Pinus koraiensis</i> (n=180)	K4	$\ln \Delta BA = 0.238 + 0.778 \ln DBH + 0.084 CC$	0.434	0.302
	K5	$\ln \Delta BA = 1.428 + 0.528 \ln HT + 0.546 \ln RD$	0.395	0.312
<i>Larix leptolepis</i> (n=82)	L4	$\ln \Delta BA = 1.130 + 0.564 \ln HT + 0.985 \ln RD$	0.610	0.279

(V4)이 가장 적합한 모델식으로 선정되었는데, 이는 Choi *et al.* (2007b)의 연구결과와 유사한 것으로 나타났다. 신갈 나무의 경우 M4와 M5 성장함수식은 흉고단면적생장이 흉고직경보다 총수고에 매우 유의적인 것으로 나타났으며, 수관급보다는 상대직경과 경쟁지수에 보다 유의적인 것으로 파악되었다. 잣나무의 경우 K4와 K5 함수식 즉, $f(\text{DBH}, \text{CC})$ 와 $f(\text{HT}, \text{RD})$ 식이 흉고단면적 성장에 매우 유의적인 것으로 나타났다. 낙엽송의 흉고단면적 함수식(L4)은 흉고직경과 상대직경만이 유의적으로 나타났다. 앞서 언급을 했지만, 개발된 흉고단면적 성장모델은 현 자료의 범위에 국한하여 추정값이 산출되었기 때문에, 현 자료의 한계를 벗어난 장기 성장예측에는 제한될 수 있다.

또한, 우리나라와 같이 복잡한 산지에 자생하는 입목의 생장을 예측하는데는 입목자체의 측정인자외에도 기후인자, 미세지형인자 및 토양인자 등에 의한 다각적인 요인별 분석이 필요할 것으로 판단된다.

인용문헌

- Avery, T.E. and H.E. Burkhart. 2002. Forest Measurements. 5th. ed. McGraw-Hill. New York.
- Belcher, D.W., Holdaway, M.R. and G.J. Brand. 1982. A description of STEMS-the stand and tree evaluation and modeling system. Gen. Tech. Rep. NC-79, USDA Forest Service, St. Paul, MN. 18pp.
- Byeon, W.H., Lee, W.K. and S.W. Bae. 1996. Forest Growth. Rycheonmedia.
- Choi, J., Lorimer, C.G., Vanderwerker, J.M., Cole, W.G. and G.L. Martin. 2001. A crown model for simulating long-term stand and gap dynamics in northern hardwood forest. *Forest Ecology and Management*. 152: 235-258.
- Choi, J.K. and B.O. Yoo. 2006. Diameter Growth Characteristics of *Quercus monolica* and *Quercus variabilis* in Natural Deciduous Forests. *Jour. Korean For. Soc.* Vol. 95(1): 131-138.
- Choi, J.K., Lorimer, C.G. and J.M. Vanderwerker. 2007a. A Simulation of the development and restoration of old-growth structural features in northern hardwoods. *Forest Ecology and Management*. 249: 204-220.
- Choi, J.K., You, B.O. and H.E. Burkhart. 2007b. Allometry, Basal Area Growth, and Volume Equations for *Quercus monolica* and *Quercus variabilis* in Gangwon Province of Korea. *Jour. Korean For. Soc.* Vol. 96(2): 189-196.
- Cole, W.G. and C.G. Lorimer. 1994. Predicting tree growth from crown variables in managed northern hardwood stands. *Forest Ecology Management*. 67: 159-175.
- Korea Forest Service. 2010. Statistical yearbook of forestry. 491pp.
- Korea Meteorological Administration. 2011. Climate characteristics by region in Korea. Available online at www.kma.go.kr/weather/climate.
- Lee, W.K., Gadow, K.v., Chung, D.J., Lee, J.K. and M.Y. Shin. 2004. DBH growth model for *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* mixed forests in central Korea. *Ecological Modelling*. 176: 187-200.
- Oliver, C.D. and B.C. Larson. 1996. Forest Stand Dynamics, second ed. Wiley, New York.
- Shin, J. W. (2011) Diameter growth model for major tree species using tree ring information of national forest inventory. M.Sc thesis. Kangwon National Univeristy, Chuncheon, Korea.
- Shin, M.Y., Lim, J.S. and D.K. Lee. 2002. Environment-Friendly Forest Management Methods by Using Stand Structure and Competition Status by Site Types for the Natural Deciduous Forest. *Jour. Korean For. Soc.* Vol. 91(6): 722-732.
- Smith, D.M., Larson, B.C., Kelty, M.J. and P.M.S. Ashton. 1997. The practice of silviculture. 9th ed. Wiley & Sons, New York.
- West, P.W. 1980. Use of diameter increment and basal area increment in tree growth studies. *Can. J. For. Res.* 10: 71-77.
- Yoo, B. O. (2004) Development of Forest Silviculture Model using Computer Simulation. M.Sc thesis. Kangwon National Univeristy, Chuncheon, Korea 103pp.

(Received March 23, 2011; Accepted April 20, 2011)