

우리나라 주요 침엽수종의 최적 경쟁지수 모형 선정

이정호^{1,3} · 이대성¹ · 서영완² · 최정기^{1*}

¹강원대학교 산림경영학과, ²강원대학교 산림과학연구소, ³강릉영동대학교 산림복지학과

Selecting the Optimal Method of Competition Index Computation for Major Coniferous Species in Korea

Jungho Lee^{1,3}, Daesung Lee¹, Yeongwan Seo² and Jungkee Choi^{1*}

¹Department of Forest Management, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

²Institute of Forest Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

³Department of Forest Welfare, Gangneung Yeongdong University, Gangneung 25521, Korea

요약: 본 연구는 국내 주요 침엽수종인 소나무, 잣나무, 낙엽송을 대상으로 거리종속 경쟁지수 모델 및 경쟁목 선정방법에 따른 최적 경쟁지수 모형을 선발하고, 수종별 간벌강도 및 입목밀도에 따른 경쟁지수 특성을 분석하고자 하였다. 사용 자료는 강원도와 경상북도의 국유림 내 분포하는 소나무림, 잣나무림, 낙엽송림을 대상으로 각 2회씩 조사된 표준지 80개소의 총 240개 시험구 내 입목정보를 활용하였다. 경쟁지수가 산출된 입목 수는 수종별로 소나무 1126본, 잣나무 4093본, 낙엽송 3399본 이었다. 최적 경쟁지수 모형 선정을 위하여 흉고단면적 정수, 수고 및 지하고의 각도를 이용하여 경쟁목을 선정하는 방법을 고려하였으며, 기존 Lorimer, Martin-EK, Braathe, Heygi, Daniels 모델과 본 연구에서 제안한 Modified Daniels 모델까지 총 6가지 경쟁지수 모델을 비교하였다. 최적 모형 선정을 위한 상관분석 결과, 흉고단면적 정수 4 m²/ha를 이용한 경쟁목 선정방법과 Modified Daniels 경쟁지수 모델이 이용된 모형에서 가장 좋은 상관성이 나타나 최종적인 모형으로써 경쟁지수가 산출되었다. 입분특성에 따른 경쟁지수를 파악한 결과, 소나무, 잣나무, 낙엽송 모두 간벌강도가 강할수록 입목밀도가 낮을수록 경쟁지수는 낮아지는 경향이 나타났다.

Abstract: This study was carried out to select the optimal method of competition index computation according to the competitor selection methods and distant-dependent competition index models, and to analyze the characteristics of competition indices in terms of thinning intensity and tree density targeting *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, and *Larix kaempferi*, which are the major coniferous species in Korea. Data was the re-investigated tree information from 240 permanent plots of 80 sites in the stands of *P. densiflora*, *P. koraiensis*, and *L. kaempferi*, which were located in the national forest of Gangwon and North Gyeongsang provinces. The number of subject trees with competition index calculated were 1126 trees for *P. densiflora*, 4093 trees for *P. koraiensis*, and 3399 trees for *L. kaempferi*. For the best competition index computation method, three kinds of competitor selection methods were considered: basal area factor, angle of height, angle of height to crown base. Also, six kinds of competition index models were compared: Lorimer, Martin-EK, Braathe, Heygi, Daniels, and Modified Daniels, which was developed in this study. Correlation coefficient was the best when the competitor selection method of basal area factor 4 m²/ha and the competition index model of Modified Daniels were used, and thus, it was selected as the best method for computing competition index. According to the best method by stand characteristics, competition index decreased in all species as thinning intensity was high and tree density was low.

Key words: subject tree, competitor, distant-dependent competition index, basal area factor, periodic annual increment


* Corresponding author

E-mail: jungkee@kangwon.ac.kr

ORCID

Jungkee Choi  <https://orcid.org/0000-0001-8205-267X>

Jungho Lee  <https://orcid.org/0000-0003-2027-1724>

Daesung Lee  <https://orcid.org/0000-0003-1586-9385>

서론

입목간의 경쟁은 햇빛, 수분, 영양소 등 자원에 대한 이용가능성이 최적 생장을 위한 요구조건에 미치지 못할 때 개체들 간의 상호작용으로 나타나며, 이는 상대적 크기와 차지하는 생육공간의 점유능력으로 표현될 수 있다(Brand and Magnussen, 1988; Linkevičius et al., 2014). 이러한 경쟁은 다양한 이론적 방법에 따라 수치화하여 경쟁지수로 일컫는데 이는 입분에서 특정 상태의 입목생장을 파악함으로써 개체목 단위 예측의 핵심을 구성하기 때문에 중요한 것으로 알려졌다(Pretzsch, 2009). 즉, 경쟁지수는 개체목의 생장을 예측하는 모델에 독립변수로서 이용되는데 모델에 있어 경쟁지수의 역할은 주변 경쟁목들에 대해 중심목의 경쟁상태가 고려되어 향상된 설명력을 제공하는 것이다(Shin et al., 2002).

경쟁지수를 파악하는 방법은 크게 각 개체목간 거리를 고려하는지 여부에 따라 거리종속 경쟁지수와 거리독립 경쟁지수로 크게 분류된다(Biging and Dobbertin, 1992; 1995; Davis and Johnson, 1987; Holmes and Reed, 1991; Tomé and Burkhart, 1989). 그 중 개체목간의 경쟁 상태는 거리독립 경쟁지수보다 거리종속 경쟁지수가 더 잘 추정하는 것으로 알려져 있으며, 이러한 경향은 단순 인공림에서 더욱 뚜렷한 것으로 보고되었다(Moore et al., 1973; Martin and Ek, 1984). 이에 따라 개체목의 생장예측에 사용하기 위하여 많은 거리종속 경쟁지수가 제안되어 왔다(Bella, 1971; Heygi, 1974; Daniels, 1976; Martin and EK, 1984; Tomé and Burkhart, 1989; MacDonald et al., 1990; Biging and Dobbertin, 1992; Brunner and Nigh, 2000; Radtke et al., 2003).

국내에서도 경쟁지수와 관련하여 천연림 및 인공림을 대상으로 한 연구, 거리독립 경쟁지수와 거리종속 경쟁지수에 관한 연구, 최적 경쟁지수 선발 및 경쟁목 선정방법에 관한 연구가 보고되었다(Chung and Lee, 1998; Shin, 1999; 2001; Shin et al., 2002; 2003; Seo et al.,

2005; Choi et al., 2013). 나아가 경쟁지수를 활용한 생장 모델의 개발연구, 경쟁지수 산출 프로그래밍 연구, 경쟁지수 정보를 포함한 산림경영계획의 방법론적 고찰에 관한 연구까지 수행되어 왔다(Lee, 1996a; 1996b; Lee et al., 1998; 1999; Kwon et al., 2003; 2007; Shin and Han, 2004). 하지만 다양한 영급, 입목밀도, 간벌강도 등 입분특성을 포함하여 주요 침엽수종 별 최적 경쟁지수 모형을 파악한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 인공림의 경우 거리종속 경쟁지수 활용이 적합하다는 선행연구를 참고하여(Shin, 2001; Shin et al., 2002; Linkevičius et al., 2014), 국내 주요 침엽수종인 소나무, 잣나무, 낙엽송을 대상으로 거리종속 경쟁지수 모델 및 경쟁목 선정방법에 따른 최적 경쟁지수 모형을 선발하고, 수종별 간벌강도 및 입목밀도에 따른 경쟁지수 특성을 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 및 표준지 설계

연구대상지는 위도 36°33'9.40"N ~ 38°18'40.50"N 경도 127°34'17.50"E ~ 129°22'7.05"E에 위치하는 지역으로 행정구역상 강원도와 경상북도의 국유림 내 분포하는 소나무림, 잣나무림, 낙엽송림을 대상으로 하였다(Lee, 2015). 수종별 입분 내에 설치된 표준지는 무간벌 20 m×20 m, 약도간벌 25 m×25 m, 강도간벌 30 m×30 m 크기의 시험구로 구성되었으며, 시험구간 입목밀도, 수종, 사면방향, 경사 등 입분의 동질성이 유사하도록 설계되었다(Lee and Choi, 2014). 본 연구는 시험구별 간벌율이 흉고단면적 기준 무간벌 0%, 약도간벌 20%, 강도간벌 40%로 시행된 표준지를 대상으로 분석하였다(Choi et al., 2015). 분석대상 표준지는 총 80개소로 사면방향 2°~359°, 경사 2°~44°, 해발고 100 m~900 m 범위에 분포하는 총 240개 시험구가 이용되었다(Table 1).

Table 1. Summary of study site characteristics by species.

Species	Latitude	Longitude	Altitude	Aspect	Slope	Number of sites	Number of plots	Number of trees
<i>Pinus densiflora</i>	36°39'36.48"N ~ 38°18'40.50"N	127°47'22.22"E ~ 129°22'7.05"E	87-730 m	13-318°	7-38°	11	33	1816
<i>Pinus koraiensis</i>	36°33'9.40"N ~ 38°14'25.85"N	127°43'55.48"E ~ 129°17'19.13"E	334-965 m	5-342°	8-40°	33	99	5750
<i>Larix kaempferi</i>	36°35'9.57"N ~ 38°13'21.53"N	127°34'17.50"E ~ 129°13'41.75"E	88-1,010 m	0-350°	5-42°	36	108	4997

2. 조사인자 및 측정방법

경쟁지수 산출을 위해 설치된 본 연구의 표준지는 2012년~2014년에 표준지 설치 및 1차 조사를 수행하였으며, 2015년~2017년에 2차 조사를 실시하였다(Lee et al., 2017). 각 표준지에서는 흉고직경, 수고, 지하고, 입목 좌표, 고사목과 진계목의 여부가 조사인자로 수집되었으며, 1차 조사와 2차 조사는 3년 간격으로 측정하여 생장량을 산출하였다(Choi et al., 2015). 각 인자별 조사방법으로 흉고직경은 지상 1.2 m 높이의 직경을 직경테이프로 측정하였으며, 수고는 초두부 끝까지의 높이를, 지하고는 수관을 형성하는 최하단부까지의 높이를 Vertex-IV로 측정하였다. 입목좌표는 표준지 중앙부에 위치한 입목을 중심으로 선정한 후 방위각과 입목거리를 통하여 좌표를 취득하였는데, 방위각은 Suunto clinometer, 입목거리는 Vertex-IV를 사용하였다(Choi et al., 2014; 2015). 입목의 고사여부 및 흉고직경 6cm 이상 진계여부를 확인하여 고사목과 진계목을 기록하였다. 표준지는 평균적으로 수종에 따라 임령 38.8~57.2년, 흉고직경 23.9~28.2 cm, 수고 15.4~20.7 m, 지하고 7.8~12.5 m로 분포하였으며, 입분 단위에서는 입목밀도 550~644본/ha, ha당 흉고단면적은 28~38 m²/ha이었다(Table 2).

3. 경쟁지수 분석방법

1) 중심목 범위선정

경쟁지수 산출 시 중심목에 영향을 미치는 생육공간을 가진 입목이 경쟁목으로 선정되며 선정 시 해당 경쟁목에 대한 정보가 요구된다(Shin et al., 2002). 이때 표준지 경계 가까이에 위치한 입목을 중심목으로 선정할 경우,

경쟁지수 산출을 위해 필요한 경쟁목이 표준지 밖에 위치하게 되어 입목정보가 수집되지 않는다. 따라서 표준지 내 모든 입목의 경쟁지수 산출은 불가능함에 따라 분석이 가능한 입목만을 선정해야 한다(Linkevičius et al., 2014; Burkhart and Tomé, 2012). 본 연구에서는 경쟁지수를 계산하여야 할 중심목의 범위를 Pukkala and Kolstrom(1987)이 처음 소개하여 국내에 도입된 고정면적법(Fixed area)을 이용하여 표준지를 중심목으로 선별할 분석대상구역과 비중심목으로 선별할 완충구역으로 구분하였다(Shin, 2001; Shin et al., 2002). 이 방법은 연구표준지의 경계로부터 경쟁목으로 선정될 수 있는 최대가능 거리를 계산하여 그 최대거리만큼을 완충거리로 정한 후, 해당 완충거리에 따른 구역에 존재하는 입목은 경쟁지수를 산출하는 중심목에서 제외한다(Shin, 2001).

본 연구에서는 평균 ha당 흉고단면적, 평균 흉고직경, 흉고단면적 정수 등을 고려하여 표준지 상·하·좌·우 네 변의 경계로부터 안쪽으로 6 m까지를 완충구역으로 설정하였다(Figure 1). 이후 입목좌표를 확인하여 해당 완충구역에 포함되는 입목을 비중심목으로써 제외하고 분석대상구역에 생육하는 입목만을 중심목으로 선별하여 경쟁지수를 산출하였다. 본 연구에 사용된 입목좌표는 현장에서 수집된 방위각과 입목거리를 사용하여, 삼각함수를 통해 X-Y 평면좌표로 변환된 값을 최종적으로 이용하였다(Choi et al., 2015). 이러한 분석대상구역과 완충구역 설정에 따른 수종별 표준지 내 입목 수는 총 소나무 1,816본, 잣나무 5,750본, 낙엽송 4,997본 이었으나, 분석대상구역 내 생육하여 경쟁지수를 산출한 중심목 수는 총 소나무 1,126본, 잣나무 4,093본, 낙엽송 3,399본이었다.

Table 2. Summary statistics of subject trees and stands by species.

Species	Statistics	Trees				Stand	
		Age (year)	DBH (cm)	Height (m)	Height to crown base (m)	Tree density (N/ha)	Basal area (m ² /ha)
<i>Pinus densiflora</i> (n = 1126)	Mean	57.2	28.2	15.8	8.8	550	37.9
	SD	17.5	9.9	4.1	2.7	313	10.7
	Minimum	37	6.8	4	2.7	156	23.1
	Maximum	102	58.8	29	18.2	1775	59.1
<i>Pinus koraiensis</i> (n = 4093)	Mean	38.8	24.7	15.4	7.8	616	32.7
	SD	14.3	8.9	4.6	4.1	349	12.2
	Minimum	18	6.2	1.7	1.1	210	12.5
	Maximum	80	63.9	29.8	21.4	2091	71.7
<i>Larix kaempferi</i> (n = 3399)	Mean	37.7	23.9	20.7	12.5	644	27.9
	SD	12.1	7.5	5.1	4.2	313	9.6
	Minimum	22	7.4	5.1	1.4	168	11.9
	Maximum	63	58.9	34.8	25.7	1567	54.8

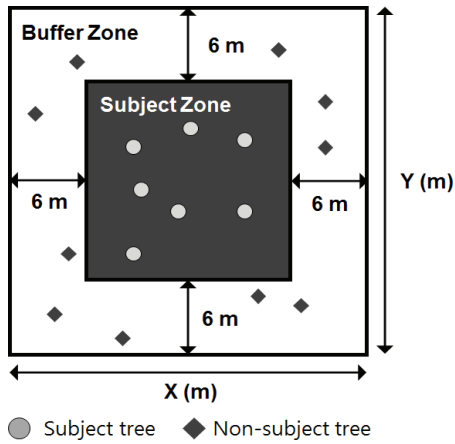


Figure 1. Plot layout to select the subject trees.

2) 경쟁목 선정

경쟁지수 산출 시 모델선정과 더불어 어느 입목을 경쟁목으로 포함시킬 것인지 결정하는 경쟁목 선정방법은 중요한 고려사항이다(Shin, 2001; Shin et al., 2002). 이에 따라 본 연구에서는 경쟁목을 선정하는 기준으로 가상적 표준지를 만드는 각산정측정법의 흉고단면적 정수를 통한 방법(BAF), 중심목의 근원부로부터 경쟁목의 수고에 시준된 각도를 통한 방법(HT), 중심목의 지하고로부터 경쟁목의 초두부에 시준된 각도를 통한 방법(HCB)을 사용하였다(Shin et al., 2002; Linkevičius et al., 2014).

그 중 BAF방법은 중심목과 주변목 사이의 거리와 주변목의 흉고직경 크기를 비교하여 경쟁목으로 선별할 것인지 결정한다. 이 방법은 이론적으로 흉고단면적 정수(BAF: Basal area factor)에 따른 흉고직경과 거리와의 관계인 $R_i = cD_i$ 에 의하여 계산된 식이다(Daniels et al., 1986). 여기서 R_i 와 D_i 는 각각 선택된 입목이 갖는 가상적 표준지의 반경과 흉고직경이며 c 는 상수로 선택한 흉고단면적 정수에 의하여 계산되는데, 이론적으로 식 1과 같이 계산된다(Shin et al., 2002). 이에 따라 선택된 BAF

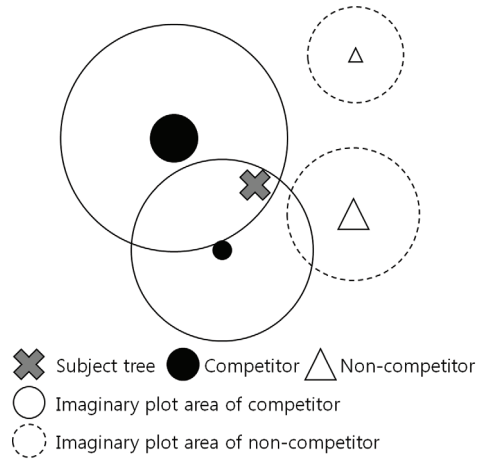


Figure 2. Diagram for searching competitors of a subject tree using basal area factor.

와 그 입목의 크기에 의해 만들어진 가상적표준지 내에 중심목이 포함되면 그 입목은 경쟁목이 되고, 그렇지 않으면 경쟁목에서 제외되는 것이다(Figure 2).

$$c = 0.5 \sqrt{\frac{1}{BAF}} \tag{1}$$

$$Dist_{ij} < R_i = cD_i \tag{2}$$

- c : Constant,
- BAF : Basal area factor,
- D_j : DBH of competitor trees j (cm), and
- $Dist_{ij}$ = distance between subject tree i and competitor trees j (m)

한편, 다른 두 가지 방법은 중심목의 근원부 혹은 지하고 높이에서 수평방향으로 경쟁목을 향할 때 지표면과 경쟁목 수고로 만들어지는 각도를 이용하는 것이다(Figure 3). 이에 따라 두 입목간 거리와 수고를 통해 계산된 값을 비

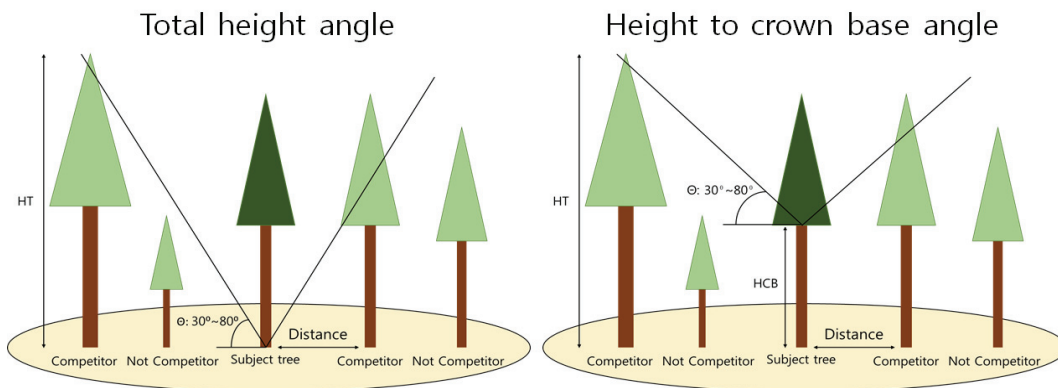


Figure 3. Competitor selection methods through angle gauge from a subject tree.

교하여 경쟁목을 선발하는 것이 앞선 흉고단면적 정수 방법과의 차이점이다. 본 연구에서는 흉고단면적 정수와 수고 각도 방법들을 이용하여 각 6단계 범주로 변화시킴에 따른 단계별 분석결과를 통해 최적 경쟁목 선정방법을 제시하고자 하였다(Table 3).

$$Dist_{ij} < HT_j \times \tan\theta \quad (3)$$

$$Dist_{ij} < (HT_j - HCB_i) \times \tan\theta \quad (4)$$

HT_j = height of competitor trees j (m),
 HCB_i = height to the base of the live crown (m),
 $Dist_{ij}$ = distance between subject tree i and competitor trees j (m), and
 θ = angle to the horizontal, starting from the ground or the crown base of the subject tree ($^\circ$).

Table 3. Competitor selection methods according to basal area factor and angle gauge.

Gauge name	Assessment standard of competitor	Gauge	Gauge explanation
BAF1	$Dist_{ij} < 0.5D_j$	1m ² /ha	Angle gauge of basal area factor
BAF2	$Dist_{ij} < 0.3536D_j$	2m ² /ha	
BAF3	$Dist_{ij} < 0.2887D_j$	3m ² /ha	
BAF4	$Dist_{ij} < 0.25D_j$	4m ² /ha	
BAF5	$Dist_{ij} < 0.2236D_j$	5m ² /ha	
BAF6	$Dist_{ij} < 0.2041D_j$	6m ² /ha	
HT1	$Dist_{ij} < \frac{HT_j}{0.58}$	30 $^\circ$	height angle to the horizontal, starting from the foot of the subject tree
HT2	$Dist_{ij} < \frac{HT_j}{0.84}$	40 $^\circ$	
HT3	$Dist_{ij} < \frac{HT_j}{1.19}$	50 $^\circ$	
HT4	$Dist_{ij} < \frac{HT_j}{1.73}$	60 $^\circ$	
HT5	$Dist_{ij} < \frac{HT_j}{2.75}$	70 $^\circ$	
HT6	$Dist_{ij} < \frac{HT_j}{5.67}$	80 $^\circ$	
HCB1	$Dist_{ij} < \frac{HT_j - HCB_i}{0.58}$	30 $^\circ$	height angle to the horizontal, starting from the crown base of the subject tree
HCB2	$Dist_{ij} < \frac{HT_j - HCB_i}{0.84}$	40 $^\circ$	
HCB3	$Dist_{ij} < \frac{HT_j - HCB_i}{1.19}$	50 $^\circ$	
HCB4	$Dist_{ij} < \frac{HT_j - HCB_i}{1.73}$	60 $^\circ$	
HCB5	$Dist_{ij} < \frac{HT_j - HCB_i}{2.75}$	70 $^\circ$	
HCB6	$Dist_{ij} < \frac{HT_j - HCB_i}{5.67}$	80 $^\circ$	

D_i = DBH of subject tree i , D_j = DBH of competitor trees j ($j \neq i$),
 HT_i = height of subject tree i , HT_j = height of competitor trees j ($j \neq i$),
 HCB_i = height to the base of the live crown, and
 $Dist_{ij}$ = distance between subject tree i and competitor trees j .

3) 경쟁지수 산출

거리중속 경쟁지수의 경우 어떤 변수를 이용하여 계산하느냐에 따라 크게 크기비율지수(size ratio index), 생육공간지수(growing spacing index), 수관중첩지수(crown overlap index) 등으로 구분된다(Doyle, 1983; Shin et al., 2002; Burkhardt and Tomé, 2012; Linkevičius et al., 2014). 이 중 크기비율지수 모형은 수관중첩의 상태가 복잡한 양상을 보이지 않아 입목의 상대적 크기와 입목 간의 거리만으로 경쟁지수를 비교적 간단하게 계산할 수 있는 이렇 다층림의 구성보다는 동령 단순림에 적합한 것으로 보고된 바 있다(Shin, 2001; Shin et al., 2002).

따라서 국내 주요 침엽수종을 대상으로 한 본 연구에서도 크기비율지수 모형을 적용하여 중심목과 경쟁목간의 거리와 흉고직경 또는 수고의 상대적인 비 또는 차이를 이용하여 경쟁지수를 산출하였다. 본 연구에 사용된 경쟁지수 모형은 기존 모형을 검토하여 국내외 널리 쓰이는 5개의 모형과 본 연구에서 개발한 신규 모형을 포함하여 총 6개의 모형을 이용하였다(Lee, 1996a; Lee et al., 1998; Shin, 2001; Shin et al., 2002; Seo et al., 2005; Linkevičius et al., 2014). 이 모형들은 흉고직경, 흉고단면적, 수고 등 성장인자의 상대비를 기본으로 한 식으로써 모형에 따라 경쟁목과의 거리, 경쟁목에 대한 분수 등이 고려되었다. 본 연구에서는 모형들을 산점도를 통해 경쟁지수를 살펴보고 선행연구 등을 검토하여 자연로그 형태의 Modified Daniels 모형을 제안하였다(Table 4).

4) 성장량 산출 및 상관분석

성장모형에 있어 경쟁지수는 개체목의 성장을 예측하는 능력에 의해 평가되기 때문에 흉고직경, 흉고단면적, 수고 성장량 등의 개체목 성장인자와 경쟁지수 간의 상관계수를 통해 평가되어 왔다(Daniels et al., 1986; Holmes and Reed, 1991; Radtke et al., 2003). 따라서 본 연구에서는 우선적으로 소나무, 잣나무, 낙엽송 입분에 존치목을 대상으로 1차 측정과 2차 측정 시기의 입목자료를 이용하여 3년간 흉고직경, 흉고단면적, 수고의 정기평균성장량을 식 5와 같이 계산하였다.

$$PAI = \frac{D_{A+T} - D_A}{T} \quad (5)$$

D_A = DBH, basal area, or height at age A,
 D_{A+T} = DBH, basal area, or height at age A+T,
 A = Age (year), T = growth year (year)

이후 경쟁지수와의 비교 및 선행연구의 검토를 통하여 가장 높은 상관을 보여 적합하다고 판단되는 흉고단면적

Table 4. Competition index models used in this study.

Model name	Equation
Hegy (1974)	$\sum_{j=1}^n \left[\frac{d_j}{Dist_{ij}} \right]$
Daniels (1976)	$\sum_{j=1}^n \left[\frac{d_j^2}{d_i^2} \right]$
Lorimer (1983)	$\sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i}$
Braathe (1984)	$\sum_{j=1}^n \left[\frac{h_j}{Dist_{ij}} \right]$
Martin-EK (1989)	$\sum_{j=1}^n \left(\frac{d_j}{d_i} \cdot e^{-\left[\frac{16Dist_{ij}}{d_i+d_j} \right]} \right)$
Modified Daniels	$\sum_{j=1}^n \left[\ln \left(1 + \frac{d_j}{d_i} \right) \right]$

$Dist_{ij}$ = distance of subject tree i to competitor j , d_i = DBH of subject tree i , d_j = DBH of competitor trees j ($j \neq i$), h_i = height of subject tree i , h_j = height of competitor trees j ($j \neq i$), n = number of competing trees.

정기평균성장량을 적용하여 최종적인 상관분석을 실시하였다(Radtke et al., 2003; Linkevičius et al., 2014). 상관분석은 피어슨(Pearson) 상관계수를 이용하여 유의수준별 p 값을 제시하였으며, 궁극적으로 상관계수에 따라 수종별 입분에 적합한 경쟁지수 모형과 경쟁목 선정방법을 선택하여 최적 경쟁지수 산출 모형을 선정하였다(Shin et al., 2002; Burkhardt and Tomé, 2012).

결과 및 고찰

1. 정기평균성장량 산출

상관분석을 통해 최적 경쟁지수 모형을 선발하기 위하여 우선적으로 수종별 간벌강도에 따른 흉고단면적 정기평균성장량을 산출하였다. 정기평균성장량은 경쟁지수를 산출한 분석대상구역의 중심목만을 대상으로 실시하였으며 이용된 입목 수는 소나무 1126본, 잣나무 4093본, 낙엽송 3399본이었다(Table 5). 각 수종별 간벌강도에 따른 구간별, 약도간별, 강도간별 시험구의 정기평균성장량은 소나무 18.4~21.8 cm^2/yr , 잣나무 16.9~23.8 cm^2/yr , 낙엽송 12.9~18.5 cm^2/yr 으로 소나무의 경우 간벌강도에 따른 성장량의 차이가 잣나무와 낙엽송의 경우보다 작았다.

Table 5. Periodic annual increments of basal area by species in this study.

(Unit : cm²/year)

Species	No. of subject trees	Thinning intensity			
		Control	Light	Heavy	Total
<i>Pinus densiflora</i>	1126	18.4±14.5	21.3±14.8	21.8±15.4	20.7±15.0
<i>Pinus koraiensis</i>	4093	16.9±11.9	19.1±12.5	23.8±13.6	20.3±13.1
<i>Larix kaempferi</i>	3399	12.9±10.2	16.0±11.1	18.5±11.8	15.9±11.3
Total	8618	15.4 ^a ±11.8	18.1 ^b ±12.5	21.6 ^c ±13.4	18.6±12.9

* one-way ANOVA: $p < 0.0001$, $F = 78.43$, $MSE = 160.05$, $df = 2, 2363$.

** Values with same letters are not significantly different (Tukey's HSD test, error rate of $\alpha = 0.05$).

전체적으로 흉고단면적 정기평균생장량은 무간벌구 15.4 cm²/yr, 약도간벌구 18.1 cm²/yr, 강도간벌구 21.6 cm²/yr 으로 간벌강도가 커짐에 따라 증가하는 경향이 나타났다. 다양한 영급 및 입목밀도 특성으로 인하여 정기평균생장량의 표준편차는 전반적으로 10 cm²/yr 이상이었던 반면, 분산분석 결과 간벌강도별 정기평균생장량의 평균은 유의적인 차이가 나타났으며($p < 0.0001$), 사후검정으로 실시한 Tukey의 다중비교 결과 집단 간 차이가 확인되었다. 이러한 생장특성은 동일한 임분 조건에서 간벌에 따른 입목밀도가 달랐기 때문인 것으로 판단된다(Shin et al., 2002).

2. 경쟁지수 산출

경쟁지수 계산은 앞선 18가지의 경쟁목 선정방법과 6가지의 거리종속 경쟁지수 모델을 이용하여 수종별로 108가지의 조합을 통해 산출되었다(Table 6). 경쟁목 선정방법과 경쟁지수 모델에 따라서 동일한 표준지 자료를 사용함에도 계산된 경쟁지수는 차이가 나타났다. 이는 경쟁목 선정방법에 따른 경쟁입목의 범위와 경쟁지수 모델에서 사용된 변수 차이에서 기인한 것으로 판단된다(Shin et al., 2002).

또한 어떤 경쟁지수 모형을 사용하였느냐에 따라서도

Table 6. Competition indices by competition index models and competitor selection methods.

Species	Competition index model	Competitor selection method																	
		Basal area factor (m ² /ha)						Total height angle (°)						Height to crown base angle (°)					
		1	2	3	4	5	6	30	40	50	60	70	80	30	40	50	60	70	80
<i>Pinus densiflora</i>	Hegyí	2.8±1.6	2.4±1.6	2.0±1.4	1.8±1.4	1.6±1.3	1.4±1.3	2.6±1.1	2.8±1.3	2.7±1.6	2.2±1.5	1.4±1.2	1.1±1.3	2.6±1.6	2.0±1.5	1.5±1.3	1.0±1.1	1.1±1.3	1.9±1.9
	Daniels	1.3±0.7	1.4±0.9	1.4±0.8	1.4±0.8	1.4±0.8	1.4±0.9	1.1±0.5	1.1±0.5	1.2±0.5	1.2±0.8	1.2±0.7	1.2±0.7	1.3±0.8	1.4±0.8	1.3±0.8	1.3±0.7	1.3±0.8	1.1±0.9
	Lorimer	19.1±7.3	12.9±6.1	9.2±4.6	7.1±3.8	5.9±3.3	4.9±2.8	23.8±6.9	22.1±7.5	17.7±7.6	10.7±5.7	4.8±2.8	1.7±1.3	16.2±7.1	9.6±5.1	5.2±3.1	2.6±1.7	1.6±1.2	1.3±0.6
	Braathe	2.7±1.5	2.3±1.4	1.9±1.2	1.6±1.2	1.5±1.2	1.3±1.1	2.6±1.1	2.8±1.4	2.7±1.6	2.1±1.4	1.4±1.1	1.1±1.1	2.6±1.5	2.0±1.3	1.4±1.2	1.0±1.0	1.0±1.1	1.8±1.6
	Martin-EK	2.4±1.0	2.3±1.0	2.0±1.0	1.8±1.0	1.7±0.9	1.5±0.9	2.3±1.0	2.4±1	2.4±1	2.1±1.0	1.5±0.9	0.9±0.7	2.3±1.0	2.0±0.9	1.5±0.9	1.0±0.7	0.9±0.6	1.0±0.6
	Modified Daniels	1.2±0.6	1.3±0.7	1.2±0.6	1.2±0.6	1.1±0.6	1.1±0.6	1.1±0.4	1.1±0.4	1.1±0.5	1.1±0.6	1.0±0.5	0.8±0.4	1.2±0.6	1.2±0.6	1.1±0.5	0.9±0.4	0.9±0.4	0.7±0.4
<i>Pinus koraiensis</i>	Hegyí	2.5±1.5	2.0±1.4	1.6±1.1	1.4±1.0	1.2±0.9	1.1±0.8	2.8±1.2	2.7±1.2	2.5±1.4	2.1±1.5	1.3±1.1	0.8±0.6	2.9±1.5	2.2±1.3	1.4±1.0	0.9±0.7	0.7±0.5	1.5±1.4
	Daniels	1.2±0.5	1.2±0.5	1.2±0.5	1.2±0.6	1.2±0.6	1.3±0.6	1.1±0.4	1.1±0.4	1.1±0.4	1.1±0.5	1.1±0.6	1.2±0.7	1.1±0.4	1.2±0.5	1.2±0.5	1.2±0.6	1.3±0.7	1.2±0.6
	Lorimer	16.0±8.2	10.1±6.1	7.1±4.5	5.5±3.6	4.6±3.0	3.9±2.5	24.5±7.2	20.9±7.3	16.4±8.3	10.8±7.4	4.9±3.8	1.8±1.1	19.1±7.7	11.3±5.3	5.9±3.3	2.9±1.8	1.5±0.7	1.4±0.5
	Braathe	2.5±1.4	1.9±1.2	1.5±1.0	1.3±0.9	1.2±0.8	1.0±0.7	2.8±1.2	2.7±1.2	2.5±1.4	2.0±1.4	1.3±1.0	0.8±0.6	2.8±1.5	2.1±1.2	1.4±0.9	0.9±0.6	0.7±0.5	1.5±1.2
	Martin-EK	1.9±1.1	1.7±1.1	1.5±1.0	1.4±0.9	1.3±0.8	1.2±0.8	1.7±0.9	1.7±0.9	1.8±1.0	1.7±1.1	1.3±0.9	0.8±0.5	1.8±1.0	1.6±0.9	1.2±0.8	0.8±0.6	0.6±0.3	0.7±0.3
	Modified Daniels	1.1±0.4	1.1±0.4	1.1±0.4	1.0±0.4	1.0±0.4	1.0±0.4	1.0±0.3	1.0±0.4	1.0±0.4	1.0±0.4	0.9±0.4	0.8±0.3	1.1±0.4	1.1±0.4	1.0±0.4	0.9±0.4	0.8±0.3	0.8±0.2
<i>Larix kaempferi</i>	Hegyí	2.4±1.2	1.8±1	1.4±0.9	1.2±0.8	1.1±0.8	1.0±0.7	3.0±1.2	3.0±1.2	2.9±1.3	2.4±1.3	1.6±1.0	0.8±0.7	2.7±1.3	2.1±1.1	1.4±0.9	1.0±0.7	0.7±0.5	1.1±0.6
	Daniels	1.2±0.5	1.2±0.5	1.2±0.5	1.2±0.5	1.3±0.5	1.2±0.5	1.0±0.3	1.0±0.4	1.1±0.4	1.2±0.4	1.2±0.5	1.2±0.5	1.2±0.5	1.2±0.5	1.2±0.5	1.2±0.5	1.2±0.6	1.2±0.5
	Lorimer	14.7±5.8	8.7±4.1	6.0±3.2	4.6±2.6	3.7±2.2	3.2±2.0	26.3±7.9	25.2±7.5	21.5±7.2	14.9±6.5	7.1±3.9	2.0±1.4	18.6±6.9	11.7±5.0	6.5±3.4	3.3±2.0	1.7±1.0	1.2±0.5
	Braathe	2.3±1.1	1.7±0.9	1.4±0.8	1.1±0.7	1.0±0.7	0.9±0.7	3.0±1.2	3.0±1.2	2.9±1.2	2.4±1.2	1.6±0.9	0.8±0.6	2.6±1.2	2.0±1.0	1.4±0.8	0.9±0.6	0.7±0.5	1.0±0.6
	Martin-EK	1.6±0.8	1.4±0.8	1.2±0.8	1.1±0.7	1.0±0.7	0.9±0.7	1.7±0.8	1.7±0.8	1.7±0.8	1.6±0.8	1.3±0.8	0.8±0.5	1.6±0.8	1.5±0.7	1.2±0.7	0.9±0.6	0.6±0.4	0.7±0.3
	Modified Daniels	1.1±0.4	1.1±0.4	1.1±0.4	1.0±0.4	1.0±0.4	1.0±0.4	1.0±0.3	1.0±0.3	1.1±0.4	1.1±0.4	1.0±0.4	0.8±0.3	1.1±0.4	1.1±0.4	1.1±0.4	1.0±0.3	0.8±0.3	0.8±0.2

추정된 경쟁지수의 차이가 심한 것으로 나타났는데 Lorimer 모델에서 가장 큰 값을 보인 반면 Martin-Ek와 Daniels 모델에서는 작은 값이 계산되었다. 구체적으로 모델별 경쟁지수의 범위는 Heygi 0.7~3.0, Martin-Ek 0.6~2.4, Braathe 0.7~3.0, Lorimer 1.2~26.3, Daniels 1.0~1.4, Modified Daniels 0.7~1.3 이었다. Lorimer 모델을 제외할 경우 0.7~3.0 사이에 모든 경쟁지수 값이 분포하여 모델별 경쟁지수 값의 차이가 크지 않았다. 경쟁목 선정방법에 따른 경쟁지수 범위는 BAF방법 0.9~19.1, HT방법 0.8~26.3, HCB방법 0.6~19.1로 수고를 이용한 방법이 상대적으로 큰 변화폭을 가졌다.

전체적인 경쟁목 선정방법에 따른 경향을 살펴보면 BAF 정수 값 혹은 수고 시준 각도가 커질수록 경쟁지수는 작아졌다. 또한 수종별 경쟁지수를 비교한 결과 잣나무와 낙엽송보다 소나무에서 모델 전반적으로 경쟁지수가 높았다. 이러한 모델별 경쟁지수의 크기는 모델에 사용된 변수와 모델의 수식 형태에 의거하여 모델이 가지는 고유특성으로써 단순히 경쟁지수의 대소만으로 적합 여부를 판단할 수는 없다(Shin et al., 2002). 따라서 본 연구에서는 실제 성장량과의 비교를 통하여 최적 모델을 선별하였다.

3. 최적 경쟁지수 모형 선별

최적 경쟁지수 모형을 선별하기 위해 경쟁목 선정방법별로 수종에 따른 경쟁지수를 산출하여 정기평균성장량과의 상관분석을 실시하였다(Table 7). 일부 경쟁지수 모델과 경쟁목 선정방법에서 상관계수의 *p*값이 0.05 수준에서 유의하지 않았지만, 대부분 유의하게 나타났다. 상관계수를 살펴보면 경쟁목 선별방법 및 경쟁지수 모델에 따라 -0.190부터 -0.499까지 다양한 음의 상관이 나타났다. 특히, 본 연구의 Modified Daniels 모델은 전반적으로 모든 수종의 경쟁지수 선별방법에서 더 높은 음의 상관이 나타났다. 따라서 최적 경쟁지수 모델은 경쟁지수와 흉고단면적 성장량의 관계에서 일반적인 음의 상관을 잘 나타낸 Modified Daniels 모델로 평가하였다. 경쟁목 선정방법에 따른 차이는 존재하였지만, 전체적인 Modified Daniels 모델의 상관계수 범위는 -0.319부터 -0.510으로 높은 음의 상관을 보였다. Shin et al.(2002)는 국내 잣나무 유령림을 대상으로 한 경쟁지수 연구에서 Martin-Ek 모델의 경우 흉고단면적 정기평균성장량과의 상관계수가 -0.513로 적합하다고 보고하였는데, 본 연구에서도 -0.5 이상의 상관이 나타났다.

최적 경쟁지수 모델인 Modified Daniels 모델을 경쟁지

Table 7. Correlation coefficients between annual basal area increment and competition index by competition index models and competitor selection methods.

Species	Competition index model	Competitor selection method																	
		Basal area factor (m ² /ha)						Total height angle (°)						Height to crown base angle (°)					
		1	2	3	4	5	6	30	40	50	60	70	80	30	40	50	60	70	80
<i>Pinus densiflora</i>	Heygi	-0.295	-0.358	-0.349	-0.344	-0.301	-0.301	-0.220	-0.247	-0.280	-0.354	-0.349	-0.183	-0.349	-0.344	-0.326	-0.227	-0.183	-0.072 ^{ns}
	Daniels	-0.371	-0.383	-0.401	-0.404	-0.383	-0.372	-0.329	-0.322	-0.356	-0.376	-0.363	-0.397	-0.378	-0.383	-0.377	-0.368	-0.381	-0.411
	Lorimer	-0.313	-0.344	-0.308	-0.292	-0.266	-0.285	-0.241	-0.241	-0.267	-0.322	-0.321	-0.232	-0.365	-0.361	-0.363	-0.252	-0.263	-0.330
	Braathe	-0.209	-0.285	-0.281	-0.283	-0.247	-0.253	-0.133	-0.175	-0.210	-0.285	-0.298	-0.146 ^{ns}	-0.271	-0.281	-0.280	-0.187	-0.158 ^{ns}	-0.035 ^{ns}
	Martin-EK	-0.166	-0.224	-0.230	-0.237	-0.228	-0.242	-0.108 ^{ns}	-0.119	-0.159	-0.226	-0.264	-0.157	-0.211	-0.252	-0.283	-0.191	-0.197	-0.247 ^{ns}
	Modified Daniels	-0.384	-0.409	-0.415	-0.418	-0.389	-0.393	-0.332	-0.324	-0.360	-0.389	-0.390	-0.395	-0.392	-0.401	-0.401	-0.376	-0.381	-0.417
<i>Pinus koraiensis</i>	Heygi	-0.467	-0.491	-0.500	-0.501	-0.489	-0.481	-0.313	-0.379	-0.452	-0.503	-0.506	-0.322	-0.424	-0.452	-0.445	-0.404	-0.292	-0.218 ^{ns}
	Daniels	-0.450	-0.463	-0.454	-0.445	-0.440	-0.427	-0.426	-0.432	-0.432	-0.436	-0.423	-0.367	-0.464	-0.468	-0.458	-0.447	-0.413	-0.385
	Lorimer	-0.427	-0.447	-0.458	-0.461	-0.439	-0.435	-0.248	-0.358	-0.426	-0.483	-0.487	-0.348	-0.388	-0.401	-0.396	-0.357	-0.250	0.038 ^{ns}
	Braathe	-0.397	-0.439	-0.453	-0.457	-0.443	-0.437	-0.212	-0.275	-0.373	-0.453	-0.466	-0.257	-0.351	-0.384	-0.387	-0.343	-0.205	-0.19 ^{ns}
	Martin-EK	-0.355	-0.399	-0.415	-0.427	-0.415	-0.416	-0.294	-0.255	-0.323	-0.417	-0.462	-0.311	-0.373	-0.415	-0.425	-0.387	-0.297	-0.213 ^{ns}
	Modified Daniels	-0.474	-0.495	-0.508	-0.509	-0.504	-0.488	-0.431	-0.442	-0.455	-0.491	-0.510	-0.425	-0.478	-0.491	-0.492	-0.477	-0.449	-0.336
<i>Larix kaempferi</i>	Heygi	-0.435	-0.419	-0.400	-0.371	-0.357	-0.329	-0.320	-0.357	-0.41	-0.456	-0.431	-0.283	-0.355	-0.353	-0.322	-0.288	-0.180	0.122 ^{ns}
	Daniels	-0.450	-0.439	-0.435	-0.430	-0.417	-0.413	-0.315	-0.348	-0.395	-0.435	-0.424	-0.401	-0.445	-0.455	-0.436	-0.411	-0.379	-0.422
	Lorimer	-0.400	-0.367	-0.344	-0.325	-0.322	-0.298	-0.162	-0.259	-0.382	-0.445	-0.408	-0.351	-0.228	-0.240	-0.219	-0.190	-0.185	-0.444
	Braathe	-0.380	-0.367	-0.351	-0.322	-0.310	-0.281	-0.250	-0.287	-0.35	-0.405	-0.387	-0.232	-0.293	-0.295	-0.269	-0.240	-0.118	0.242 ^{ns}
	Martin-EK	-0.275	-0.282	-0.278	-0.261	-0.265	-0.247	-0.270	-0.242	-0.239	-0.285	-0.311	-0.252	-0.255	-0.248	-0.234	-0.214	-0.135	0.051 ^{ns}
	Modified Daniels	-0.461	-0.459	-0.458	-0.455	-0.444	-0.427	-0.319	-0.353	-0.402	-0.449	-0.456	-0.432	-0.451	-0.462	-0.438	-0.402	-0.364	-0.458
Total	Mean of Modified Daniels	-0.440	-0.454	-0.460	-0.461	-0.445	-0.436	-0.361	-0.373	-0.406	-0.443	-0.452	-0.417	-0.440	-0.451	-0.444	-0.418	-0.398	-0.404

*ns: *p* > 0.05 (not significant).

수 선정방법에 따라 수종별로 평균하여 수치를 비교하여 최적 경쟁지수 모형을 선별하였다. BAF 정수값이 커질수록 상관계수가 음의 상관이 강해지다가 BAF 4 m²/ha에서 최대로 나타나고 다시 음의 상관이 약해지는 경향이 나타났다. 수고 선정방법에서는 각도가 커질수록 음의 상관이 강해지면서 70°에서 -0.452로 음의 상관이 최대가 되었다. 지하고 경쟁목 선정방법에서는 수고 방법과는 반대로 각도가 낮아질수록 음의 상관이 강해지면서 40°일 때 -0.451로 최대가 되었다. 전체적으로 BAF방법은 4 m²/ha, HT방법은 70°, HCB은 40°가 적절한 것으로 나타났으며, 그 중 가장 강한 상관이 나타난 BAF방법이 최적 경쟁목 선정방법으로 채택되었다. 따라서 Modified Daniels 경쟁지수 모델과 BAF방법 4 m²/ha 경쟁목 선정방법으로 구성된 모형을 최적 경쟁지수 모형으로 최종 선별하였다.

4. 경쟁지수 특성분석

본 연구의 최적 경쟁지수 모형을 적용하여 수종별 간벌강도와 따른 경쟁지수와 성장량의 특성을 파악하였다. 먼저 경쟁지수와 흉고단면적 정기평균성장량의 관계를 수종 및 간벌강도에 따라 산점도로 도시하였다. 전반적으로 경쟁지수가 클수록 성장량은 작아지는 음의 상관관계가 나타났으며, 간벌강도가 커짐에 따라 더욱 가파르

게 성장량이 감소하는 경향이 나타났다(Figure 4). 전체적으로 간벌강도에 따른 경쟁지수는 무간벌 1.15, 약도간벌 1.06, 강도간벌 1.00로 간벌강도가 클수록 경쟁지수는 낮아지는 경향이 나타났으며, 이는 수종별 간벌에 따른 결과에서도 동일하였다. 종합적으로 집단 간 유의적인 차이가 분산분석 결과 확인되었으며($p < 0.0001$), 사후검정으로 실시한 Tukey의 다중비교 결과 집단 간 차이가 존재하였다(Table 8).

입목밀도에 따른 경쟁지수 특성을 파악해 본 결과 소나무와 잣나무의 경우 입목밀도가 낮은 임분에서 높은 임분으로 이동할수록 경쟁지수가 높아졌으며, 낙엽송의 경우 높은 입목밀도보다 750본/ha 미만에서 가장 낮은 경쟁지수가 나타났다. 입목밀도가 낮은 임분에서 높은 임분으로 이동할수록 경쟁지수가 높아졌으며, 전체적으로 살펴보면 750본/ha 미만 1.03, 750본 초과 1500본/ha 이하 1.10, 1500본/ha 이상 1.18이었다(Table 9). 전체 입목밀도에 따른 경쟁지수의 집단 간 평균차이는 분산분석 결과 유의적이었으며($p < 0.0001$), 사후검정으로 실시한 Tukey의 다중비교 결과 집단 간 차이가 확인되었다. Choi et al.(2013)은 산림사업에 따라 경쟁상태가 바뀌었으며 시업 후에 경쟁지수가 큰 폭으로 감소하여 입목생장에 유리한 방향으로 개선되었다고 보고하였는데, 본 연구에서 분석한 간벌강

Table 8. Competition indices using the best model of this study by thinning intensity.

Species	Thinning intensity			
	Control	Light	Heavy	Total
<i>Pinus densiflora</i>	1.30±0.77	1.19±0.52	1.12±0.49	1.18±0.58
<i>Pinus koraiensis</i>	1.13±0.52	1.03±0.40	0.98±0.33	1.03±0.41
<i>Larix kaempferi</i>	1.12±0.43	1.05±0.38	0.97±0.29	1.03±0.36
Total	1.15 ^a ±0.53	1.06 ^b ±0.41	1.00 ^c ±0.35	1.05±0.42

* one-way ANOVA: $p < 0.0001$, $F = 23.61$, $MSE = 0.17$, $df = 2$, 2363.

** Values with same letters are not significantly different (Tukey's HSD test, error rate of $\alpha = 0.05$).

Table 9. Competition indices using the best model of this study by tree density level.

Species	Tree density level (N/ha)			Total
	$N \leq 750$	$750 < N \leq 1500$	$1500 < N$	
<i>Pinus densiflora</i>	1.15±0.53	1.25±0.68	1.48±0.84	1.18±0.58
<i>Pinus koraiensis</i>	1.00±0.35	1.09±0.49	1.11±0.40	1.03±0.41
<i>Larix kaempferi</i>	1.01±0.32	1.09±0.44	1.05±0.38	1.03±0.36
Total	1.03 ^a ±0.38	1.10 ^{ab} ±0.49	1.18 ^b ±0.56	1.05±0.42

* one-way ANOVA: $p < 0.0001$, $F = 9.85$, $MSE = 0.17$, $df = 2$, 2363.

** Values with same letters are not significantly different (Tukey's HSD test, error rate of $\alpha = 0.05$).

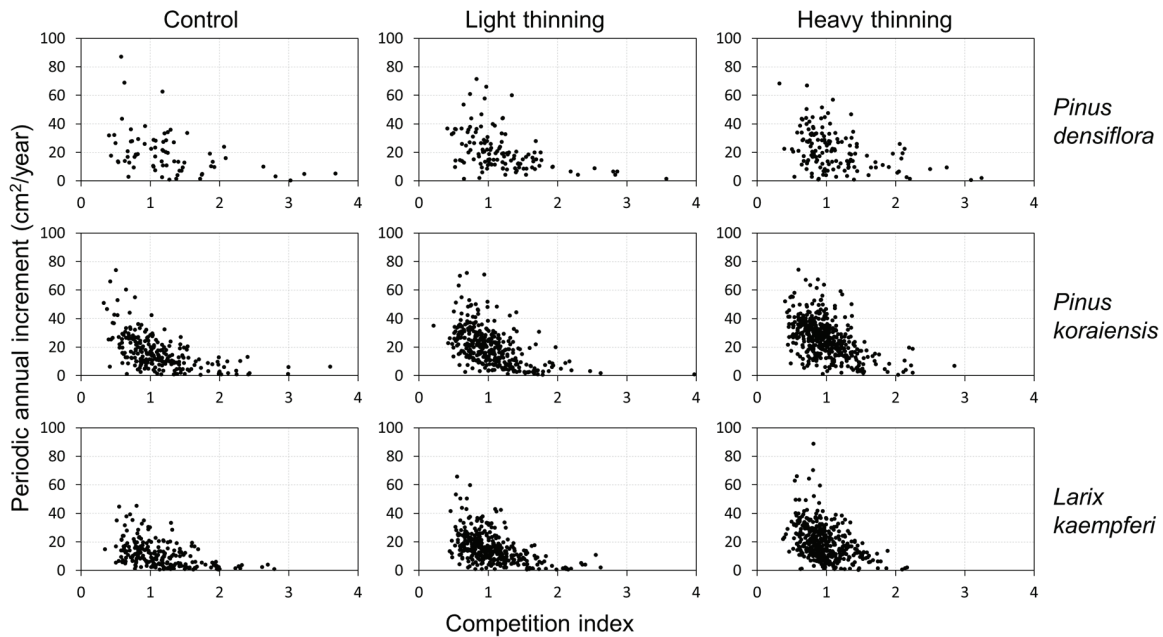


Figure 4. Scatter plot for competition index and periodic annual increment using the best model of this study by species and thinning intensity.

도와 입목밀도에 따른 경쟁지수 결과와 일치하였다. 종합적으로 간벌강도가 클수록 입목밀도가 낮을수록 경쟁지수는 낮아지고 이에 따라 흉고단면적 정기평균생장량은 높아지는 것으로 분석되었다.

결론

본 연구는 국내 주요 침엽수종인 소나무, 잣나무, 낙엽송을 대상으로 경쟁지수 산출을 위한 최적 모형을 선정하고 임분여건에 따른 경쟁지수 특성을 파악하였다. 최적 경쟁지수 모형은 다양한 경쟁목 선정방법과 거리중속 경쟁지수 모형에 따른 경쟁지수와 흉고단면적 정기평균생장량의 상관관계가 가장 좋은 방법으로 선택하였다. 경쟁목 선정방법은 흉고단면적 정수를 이용한 방법과 수고 혹은 지하고를 이용한 각도방법이 사용되었고, 경쟁지수 모형은 Lorimer, Martin-EK, Braathe, Heygi, Daniels, Modified Daniels 모형이 사용되었다.

모형에 따른 경쟁지수에서 큰 차이나 이상치는 발견되지 않았으며 수종별 흉고단면적 정기평균생장량과의 상관분석 결과 전반적으로 Modified Daniels 모형이 가장 적합하였다. 경쟁목 선정방법은 흉고단면적 정수 4m²/ha를 이용한 방법이 가장 적합하였음에 따라 Modified Daniels 모형과 결합한 모형을 최적 경쟁지수로 산출하였다. 산출된 경쟁지수를 수종별 간벌강도와 입목밀도에 따라 특성을 파악한 결과, 간벌강도가 강할수록 입목밀도가 낮을수록

경쟁지수는 낮아졌으며 이러한 경향은 수종별로 모두 동일하게 나타났다. 본 연구에서 제시된 모형을 통한 수종별 경쟁지수는 향후 국내 소나무, 잣나무, 낙엽송의 개체목 단위 성장모델개발에 있어 설명변수로 활용도가 높을 것이라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(No. NRF-2016R1D1A1B02011648)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Bella, I.E. 1971. A new competition model for individual trees. *Forest Science* 17(3): 364-372.
- Biging, G.S. and Dobbertin, M. 1992. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. *Forest Science* 38(3): 695-720.
- Biging, G.S. and Dobbertin, M. 1995. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. *Forest Science*, 41(2): 360-377.
- Brand, D.G. and Magnussen, S. 1988. Asymmetric, two-sided competition in even-aged monocultures of red pine. *Canadian Journal of Forest Research* 18(7): 901-910.

- Brunner, A. and Nigh, G. 2000. Light absorption and bole volume growth of individual Douglas-fir trees. *Tree Physiology* 20(5-6): 323-332.
- Burkhart, H.E. and Tomé, M. 2012. *Modeling Forest Trees and Stands*. Springer, New York, NY, pp 457.
- Choi, H.K., Park, B.B., Sung, J.H. and Shin, M.Y. 2013. Comparison of competition indices by silvicultural systems before and after treatments for natural deciduous forests in Pyeongchang. *Journal of Korean Forest Society* 102(4): 515-521.
- Choi, J.K., Lee, D.S., Seo, Y.W. and Choi, I.H. 2014. Investigation of Thinning Experimental Plots(1),(2) of Korean White Pine Stand(II). *Journal of Research Forest of Kangwon National University* 34: 1-26.
- Choi, J.K., Seo, Y.W. and Lee, D.S. 2015. Investigation of thinning experimental plots(4~10) of Korean white pine plantation(III). *Journal of Research Forest of Kangwon National University* 35: 49-102.
- Chung, D.J. and Lee, J.L. 1998. A study on competition status in mixed stands of *Pinus densiflora* - *Quercus variabilis* by using the competition indices. *Korean Journal of Forest Measurements* 1(1): 50-60.
- Daniels, R.F. 1976. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. *Forest Science* 22(4): 454-456.
- Daniels, R.F., Burkhart, H.E. and Clason, T.R. 1986. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. *Canadian Journal of Forest Research* 16(6): 1230-1237.
- Davis, L.S. and Johnson, K.N. 1987. *Forest Management*. McGraw-Hill Inc., New York, NY, pp. 790.
- Doyle, T.W. 1983. Competition and growth relationships in a mixed-aged, mixed-species forest community. Doctoral dissertation, University of Tennessee, Knoxville, USA.
- Hegyí, F. 1974. A simulation model for managing jack-pine stands. In: Fries, J. (Ed.). *Growth Models for Tree and Stand Simulation*, Royal College of Forestry, Stockholm, Sweden, pp. 74-90.
- Holmes, M.J. and Reed, D.D. 1991. Competition indices for mixed species northern hardwoods. *Forest Science* 37(5): 1338-1349.
- Kwon, S.D., Lee, K.H., Kim, H.H. and Chung, J.S. 2003. Development of individual-tree/distance-independent growth-and-mortality prediction equations for *Pinus koraiensis* stands. *Journal of Korean Forestry Society* 92(6): 590-597.
- Kwon, S.D., Kim, S.Y., Chung, J.S. and Kim, H.H. 2007. Development of thinning effect analysis model (TEAM) using individual-tree distance-independent growth model of *Pinus koraiensis* stands. *Journal of Korean Forestry Society* 96(6): 742-749.
- Lee, W.K. 1996a. Estimating the competition indices and diameter growth of individual trees through position-dependent stand survey. *Journal of Korean Forestry Society* 85(3): 539-551.
- Lee, W.K. 1996b. Methodological approach of forest management plan I. *Forest survey and growth model*. *Natural Resources Research of Korea University* 4: 29-48.
- Lee, W.K., Doko, S.J. and Byun, W.H. 1998. Development of a forest information analysis system (FIAS1.5) for position dependent forest survey. *Korean Journal of Forest Measurements* 1(1): 37-49.
- Lee, W.K., Seo J.H., Hwang, J.W. and Kim, Z.S. 1999. DBH-growth model by competition index for *Pinus koraiensis*. *Korean Journal of Forest Measurements* 2(1): 21-30.
- Lee, D. and Choi, J. 2014. A study on stand structure and growth characteristics of Korean white pine (*Pinus koraiensis*) in north central region of Gangwon province. *Journal of Forest Science* 30(1): 101-106.
- Lee, D.S. 2015. Studies on growth models for *Larix kaempferi*, *Pinus koraiensis*, and *Pinus densiflora* in Korea. Master thesis, Kangwon National University, Chuncheon, Korea.
- Lee, D., Seo, Y. and Choi, J. 2017. Estimation and validation of stem volume equations for *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, and *Larix kaempferi* in South Korea. *Forest Science and Technology* 13(2): 77-82.
- Linkevičius, E., Kuliešis, A., Röhle, H., Schröder, J. and Aleinikovas, M. 2014. The impact of competition for growing space on diameter, Basal area and height growth in pine trees. *Baltic Forestry* 20(2): 301-313.
- MacDonald, B., Morris, D.M. and Marshall, P.L. 1990. Assessing components of competition indices for young boreal plantations. *Canadian Journal of Forest Research* 20(7): 1060-1068.
- Martin, G.L. and Ek, A.R. 1984. A Comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. *Forest Science* 30(3): 731-743.
- Moore, J.A., Budelsky, C.A. and Schlesinger, R.C. 1973. A new index representing individual tree competitive status. *Canadian Journal of Forest Research* 3(4): 495-500.
- Pretzsch, H. 2009. *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Heidelberg, Springer, Berlin, pp. 664.
- Pukkala, T. and Kolström, T. 1987. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. *Silva Fennica* 21(1): 55-67.
- Radtke, P.J., Westfall, J.A. and Burkhart, H.E. 2003. Conditioning a distance-dependent competition index to

- indicate the onset of inter-tree competition. *Forest Ecology and Management* 175(1-3): 17-30.
- Seo, J.H. Son, Y.M., Lee, K.H. and Lee, W.K. 2005. The optimum competition index and the development of single tree growth model for *Pinus densiflora* stands in Anmyun-Island. *Korean Journal of Forest Measurements* 8: 125-135.
- Shin, M.Y. 1999. A study on the competition status of deciduous species in natural mixed stand -Comparison of a distance dependent competition index model with a distance independent competition index model-. *Forest Science of Kookmin University* 11: 67-78.
- Shin, M.Y. 2001. Selection of the best competition index model based on the stand types. *Forest Science of Kookmin University* 13: 47-61.
- Shin, M.Y., Chung, D.J. and Kim, J.H. 2002. A study on the selection of the optimal competition index for young stands of Korean white pine (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc). *Journal of Korean Forestry Society* 91(1): 59-70.
- Shin, M.Y., Lee, M.J. and An, H.S. 2003. Development of individual tree mortality equations for four coniferous species by using distance-independent competition index. *Journal of Korean Forestry Society* 92(6): 581-589.
- Shin, M.Y. and Han, S.H. 2004. Development of a computer program for estimating optimal competition index. *Journal of Korean Forestry Society* 93(5): 339-348.
- Tomé, M. and Burkhart, H.E. 1989. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *Forest Science* 35(3): 816-831.

Manuscript Received : April 25, 2018

First Revision : May 31, 2018

Accepted : June 9, 2018