

간벌강도에 따른 잣나무 인공림의 성장변화 모니터링

최정기* · 이병기 · 이대성 · 최인화

강원대학교 산림경영학과

Growth Monitoring of Korean White Pine (*Pinus koraiensis*) Plantation by Thinning Intensity

Jungkee Choi*, Byungki Lee, Daesung Lee and Inhwa Choi

Department of Forest Management, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

요약: 본 연구는 잣나무 인공림을 대상으로 간벌강도를 다양하게 실시한 후 흉고직경, 수고, 수관폭, 수간제적, 수간바이오매스, 고사목의 성장변화를 파악하고자 실시하였다. 1차 간벌은 19년생 때 입목본수의 29~69% 강도로 실시되었으며, 간벌 직후(19년생), 5년 후(24년생), 12년 후(31년생)에 3차에 걸쳐 입목조사가 수행되었다. 흉고직경생장의 경우 대조구에 비해 강도간벌구의 평균성장량이 간벌 5년 후 19.6~19.9%, 12년 후 13.3~24.7% 높았으며 유의적인 성장차이가 나타났다. 또한 간벌 후 초기성장량이 후기성장량보다 좋은 것으로 나타났다. 대경목 후보(DBH ≥ 25 cm) 본수를 비교한 결과, 강도간벌구에서 약 31%가 나타난 반면, 대조구에서는 단지 2%에 불과했다. 수고생장은 간벌강도에 따라 생장의 차이가 나타나지 않았으며, 평균수관폭 성장량은 강도간벌구가 대조구에 비해 5년 후 30.6~33.3%, 12년 후 35.0~40.0% 높았다. 단독제적의 평균 성장량은 강도간벌구가 대조구에 비해 간벌 5년 후 39.8~46.8%, 12년 후 23.0~52.0% 높았다. 단위면적당 최대 입분제적 및 바이오매스량은 무간벌표준지에서 간벌 후 12년 동안 133 m³/ha (51 kg/ha)에서 344 m³/ha(132 kg/ha)로 증가하였다. 수관폭, 제적, 바이오매스는 간벌강도에 따라 모두 유의적인 성장 차이가 있는 것으로 나타났다. 고사목은 간벌 후 12년 동안 강도간벌구에서 전혀 발생하지 않은 반면 대조구에서는 27.9~37.8% 발생하였다. 2차 간벌시기를 결정하기 위하여 목편을 통해 연륜생장을 분석한 결과, 1차 간벌 후 10년 전후가 적합한 것으로 나타났다.

Abstract: This study was conducted to investigate growth changes of DBH, height, crown width, volume, stem biomass, and dead trees after thinning treatments with different thinning intensity for Korean white pine (*Pinus koraiensis*) plantation. First thinning was applied with 29~69% intensity based on number of trees in 19-year-old plantation, and trees were measured three times: right after thinning (19-year-old), 5 years later (24-year-old), 12 years later (29-year-old). In the case of DBH growth, average DBH growth of heavily thinned plots was 19.6~19.9% higher 5 years later, and 13.3~24.7% higher 12 years later, compared to that of unthinned plots. Initial diameter growth rate was higher than late growth rate. The proportion of large pole candidates (DBH ≥ 25 cm) was 31% in heavily thinned plot while only 2% was shown in unthinned plot. No difference was shown in height growth depending on plots, and average crown width growth in heavily thinned plots was 30.6~33.3% higher, 5 years later, and 35.0~40.0% higher, 12 years later, compared to that of unthinned plots. Average volume growth of individual trees in heavily thinned plots was 39.8~46.8% higher, 5 years later, and 23.0~52.0% higher, 12 years later, compared to unthinned plots. The maximum volume and biomass per unit area were shown in unthinned plot; the volume and biomass 5 and 12 years later after thinning were 133 m³/ha (51 kg/ha) and 344 m³/ha (132 kg/ha), respectively. The significant difference appeared in crown width, volume, and biomass depending on thinning intensity. No dead trees occurred in heavily thinned plots for 12 years after thinning, while mortality rate in unthinned plots was 27.9~37.8%. As a result of analyzing annual increment using cores to determine the timing of second thinning, it suggested that second thinning be suitable around 10 years after first thinning.

Key words: DBH growth rate, volume growth, stem biomass, mortality, second thinning

*Corresponding author
E-mail: jungkee@kangwon.ac.kr

서론

잣나무(*Pinus koraiensis*)는 1960년대 이후 44만 ha가 조림된 우리나라 대표 경제수종으로 현재 잣나무림은 침엽수 인공림 면적의 약 18.9%를 차지하고 있다(Korea Forest Research Institute, 2012; Korea Forest Service, 2012). 또한, 조림수종 중 세 번째로 많은 면적을 차지하고 있는 잣나무는 목재생산뿐만 아니라 종자생산이라는 효용성을 가지고 있어 지속적인 관리가 필요하다. 그 뿐만 아니라 우리나라 대부분의 잣나무 인공림이 IV영급 전후에 분포하고 있어 간벌을 통한 숲가꾸기가 필요한 시기이다(Bae et al., 2010).

간벌은 일반적으로 지력을 향상시키고 잔존목의 흉고 직경 성장과 임분 수준의 생산을 증대케 하고, 대경재 생산과 목재의 재질 향상을 통해 목재 가치를 향상시키고 나아가 임분 구조 개선을 통해 병충해 피해를 예방하는 효과가 있다(Nyland, 1996; Smith, 1986). 이런 이유로 임업선진국에서는 영구고정표준지를 설치하여 간벌강도에 따른 성장변화에 대한 모니터링 연구를 활발히 진행하고 있다(Amateis and Burkhart, 2005; Cao et al., 2000; Nishizono et al., 2008; Pelletier and Pitt, 2008; Pfister et al., 2007; Wallentin and Nilsson, 2011).

그러나 국내에서는 영구고정표준지를 통한 간벌 연구가 1990년대에 일부 진행되다가 지속되지 못한 현실에 처해 있다. 과거 잣나무 간벌 성장연구를 살펴보면 간벌방법별 성장에 관한 연구(Kim and Lee, 1998; Kim et al., 2004; Lee, 2003), 잣나무 인공림에 대하여 입목측정을 통한 성장모니터링에 관한 연구(Choi and Choi, 1998; 1999; Choi et al., 2003; Kang et al., 2004), 간벌에 따른 초기 직경생장과 환경인자에 관한 연구(Bae et al., 2010; Hwang et al., 2008)가 시행된 바 있다. 그러나 아직까지 간벌시업에 따른 주기적인 성장모니터링을 위한 연구가

부족한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 잣나무 인공림 영구표준지 19년생을 대상으로 다양한 강도로 1차 간벌을 실시한 후 5년 후와 12년 후의 흉고직경, 수고, 수관폭, 수간제적, 수간바 이오메스의 성장변화를 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

본 연구의 대상지인 잣나무 간벌시험림은 강원도 춘천시 동산면 봉명리에 소재하고 있는 강원대학교 학술림 6 임분 차소반에 위치하고 있다. 조사지의 기후는 온대대륙성 기후로써 하계에는 고온다습하고 동계에는 저온 건조하다. 연평균기온은 11.1°C로 최고 24.6°C, 최저 -4.6°C의 월별 분포를 보이며, 연평균 강수량은 1,347.3 mm이다(Korea Meteorological Administration, 2011). 토양은 대부분 양토 및 사질양토를 이루고 있으며, 낙엽분해산물과 광물질이 혼합되어 유기질이 풍부하고 식물생육에 적합하다(Choi, 2003). 본 간벌시험림은 1977년도에 약 3,000 본/ha 조림된 잣나무 인공림으로 사면방향은 남서이고, 평균표고는 640 m, 평균경사는 21도이다(Table 1). 본 잣나무림은 간벌표준지가 설치되기 전까지 풀베기 및 가지치기 등 일부 시업이 시행되었다.

2. 간벌시험림 설계 및 조사인자

본 잣나무 간벌시험림은 1996년(임령 19년생)에 20 m × 20 m 크기의 표준지 4개를 인접한 2개 지역에 설치하고(Figure 1), 정성 및 정량을 고려하여 다양한 강도로 하층간벌을 실시하였다(Choi et al., 1996). 1차 입목조사는 1996년 11월 간벌 직후 실시하였고, 2차 조사는 5년 후 2001년 11월, 3차 조사는 12년 후 2008년 12월에 각각 실시하였다(Choi and Ji, 1998; Choi et al., 2001; Choi et

Table 1. General description of experimental thinning study area.

Location	Temperature (°C)	Precipitation (mm/year)	Soil moisture	Soil texture	Altitude (m)	Aspect	Slope (°)	Site Index
Hillside	11.1 (-4.6~24.6)	1347.3	Moderate	Loam	640	S~SW	21 (11~28)	14

Table 2. Residual trees by thinning intensity in experimental thinned plots in 1996.

Plot	Site A				Site B			
	1	2	3	Control	1	2	3	Control
Thinning intensity by trees (%)	69	46	44	0	59	29	31	0
Thinning intensity by basal area (%)	59	32	28	0	53	20	25	0
Number of residual trees (15 m × 15 m)	16 (752)	28 (1316)	29 (1411)	47 (2366)	21 (951)	37 (1720)	36 (1714)	52 (2594)

Note : Numbers in parenthesis were converted to numbers of residual trees per ha

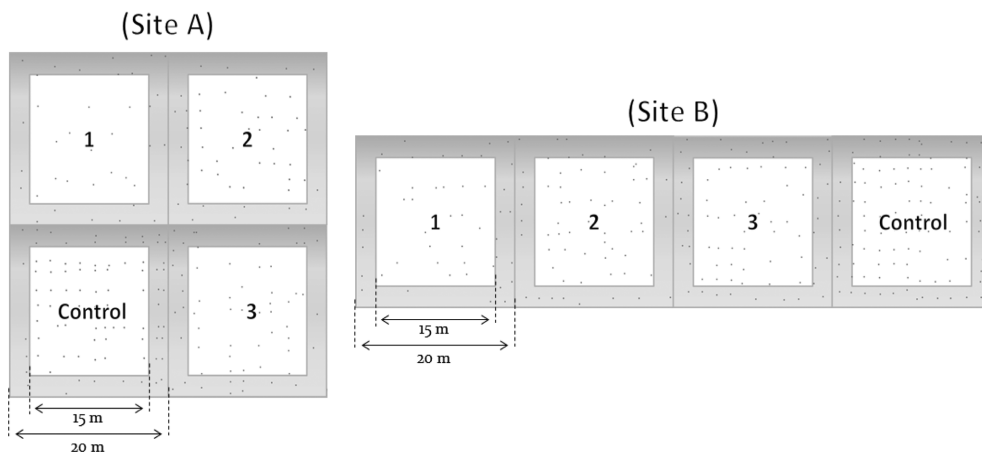


Figure 1. Plot layout for experimental thinning study.

al., 2010). 1996년 1차 간벌 당시 간벌된 입목의 정보가 없어 각 표준지의 간벌율은 대조구의 입목본수를 기준으로 산출하였다(Table 2). 각 표준지의 조사인자로는 입목 위치, 흉고직경, 수고, 지하고, 고사목, 4방위 수관반경이 측정되었고, 3차 조사에서는 각 표준지마다 우세목 5본을 선발한 후 성장추를 이용하여 지상 1.2 m 지점의 동일 방향에서 목편을 추출하였다.

3. 생장 모니터링 분석방법

본 연구는 간벌강도에 따른 입목 측정인자별 생장 모니터링 분석을 목적으로 영구고정표준지가 설치되었으나, 시험구가 완충구역 없이 인접하게 설치되어 있어 각 표준지 경계로부터 상·하·좌·우 2.5 m의 완충구역을 설정한 후, 15 m × 15 m내 입목에 한하여 생장 모니터링 분석을 실시하였다(Figure 1).

흉고직경 분석 시 직경성장률은 Pressler식을 이용하였으며, 수고 및 수관폭 분석시 이상치에 대해서는 회귀식을 이용한 추정값으로 대체하였다. 수관투영면적은 평균 수관반경을 이용하여 면적을 산출하였고, 수관경쟁지수는 수관투영면적에 대한 표준지면적 비율로 계산하였다. 입목의 수간재적과 수간바이오매스는 산림과학원에서 개발한 2변수 재적식과 건중량식을 이용하였다(Korea Forest Research Institute, 1998; Korea Forest Service, 2009). 3차 조사 시 채취된 목편은 연륜측정기를 이용하여 연륜폭을 1/1,000 mm 단위로 정밀 측정하였다. 또한, 간벌강도에 따른 조사인자별 생장 차이를 통계적으로 검정하기 위해 ANOVA를 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 간벌표준지의 조사인자별 분석

간벌강도에 따라 표준지별로 간벌 후 ha당 잔존본수를

기준으로 입목제원현황을 정리하면 Table 3과 같다. 일반적으로 간벌 이후 입목잔존본수는 간벌 직후(19년생), 5년 후(24년생), 12년 후(31년생)로 연도가 경과함에 따라 줄어들었으며, 특히 대조구(2,366 본/ha, 2,594 본/ha)에서 12년 동안 403~798 본/ha이 감소한 반면 강도간벌구(752 본/ha, 951 본/ha)에서는 고사목이 한 본도 발생하지 않았다. 8개 간벌표준지의 평균흉고직경은 조사시기별로 11.9~13.8 cm, 14.3~18.1 cm, 17.8~22.2 cm의 범위로 변화되었고, 평균수고는 8.7~9.8 m, 10.4~11.5 m, 12.7~13.5 m, 평균수관폭은 3.3~4.4 m, 3.6~5.2 m, 3.7~5.6 m로 증가하는 것으로 나타났다. 단목재적 평균값은 조사시기별로 0.056~0.074 m³, 0.103~0.160 m³, 0.175~0.266 m³이었다.

입분단위인 ha를 기준으로 3차에 걸친 조사결과에서는 입분흉고단면적이 11~32 m²/ha, 20~43 m²/ha, 31~52 m²/ha 증가하였으며, 입분재적은 53~160 m³/ha, 121~246 m³/ha, 200~344 m³/ha 증가된 것으로 나타났다(Table 3). 간벌강도에 따른 표준지의 수관울폐율 변화는 시기별로 110~247%, 158~272%, 189~307%로 증가하였다. 2개의 대조구 모두에서는 간벌 5년 후~12년 후까지 7년 동안 수관울폐율이 오히려 감소하는 현상이 발생했는데(272%→260%, 243%→232%), 이 결과는 시간이 경과하면서 입목간에 수관이 중첩되어 수관폭 성장량이 줄어들고 고사목 발생으로 인하여 수관울폐율이 감소하였기 때문이라 판단된다.

2. 흉고직경 생장의 변화

각 간벌표준지별 흉고직경변화는 시간이 경과함에 따라 넓어지는 양상으로 나타났다. 특히, 강도간벌구(752 본/ha; 간벌율 69%)의 직경생장은 시간이 경과함에 따라 월등히 좋은 것으로 나타났으며, 그 다음으로는 2번째 강도간벌구(951 본/ha; 간벌율 59%)가 생장이 높은 것으로 나타났다. 나머지 간벌구(1,316~1,720 본/ha; 간벌율: 29~46%)

Table 3. Summary statistics of experimental thinning plots for Korean white pine plantation after 1st, 2nd, and 3rd inventory.

Year (Age)	Plot	Residual trees (N/ha)	Trees					Stand				
			Average DBH (cm)	Average height (m)	Average crown width (m)	Average stem volume (m ³)	Average stem biomass (kg)	Basal area (m ² /ha)	Stem volume (m ³ /ha)	Stem biomass (ton/ha)	Crown closure (%)	
1996 (19)	A	1	752	13.3	9.2	4.4	0.071	26.5	11	53	20	121
		2	1316	12.9	9.1	3.9	0.067	25.4	18	88	33	165
		3	1411	13.8	9.0	3.8	0.076	28.5	22	108	40	164
		4*	2366	12.0	8.7	3.6	0.056	21.4	28	133	51	247
	B	1	951	13.3	9.8	3.8	0.074	28.3	14	71	27	110
		2	1720	12.9	9.4	3.6	0.070	26.4	24	120	45	184
		3	1714	12.8	9.5	3.5	0.069	26.1	23	117	45	170
		4*	2594	11.9	8.9	3.3	0.062	23.3	32	160	61	236
2001 (24)	A	1	752	18.1	11.3	5.2	0.160	60.3	20	121	45	158
		2	1316	16.1	11.3	4.6	0.130	49.3	28	171	65	222
		3	1411	16.4	11.0	4.2	0.133	50.3	31	187	71	195
		4*	2265	15.1	10.5	3.9	0.109	41.0	43	246	93	272
	B	1	951	17.1	11.5	4.7	0.144	54.0	23	137	51	169
		2	1720	16.1	11.2	4.3	0.129	48.7	37	222	84	255
		3	1714	16.0	11.1	3.7	0.125	47.2	36	213	81	182
		4*	2394	14.3	10.4	3.6	0.103	38.9	41	241	91	243
2008 (31)	A	1	752	22.2	13.5	5.6	0.266	103.4	31	200	78	189
		2	1316	18.8	13.2	5.1	0.198	76.2	39	260	100	275
		3	1314	19.3	13.0	4.6	0.204	78.5	41	268	103	226
		4*	1963	17.8	12.8	4.0	0.175	67.0	52	344	132	260
	B	1	951	20.4	12.9	5.4	0.219	84.2	33	209	80	222
		2	1627	19.0	13.0	4.8	0.197	75.4	48	321	123	307
		3	1714	18.1	12.8	3.7	0.176	67.5	46	302	116	189
		4*	1796	18.0	12.7	4.0	0.178	68.1	49	319	122	232

Note: 4* is a control plot.

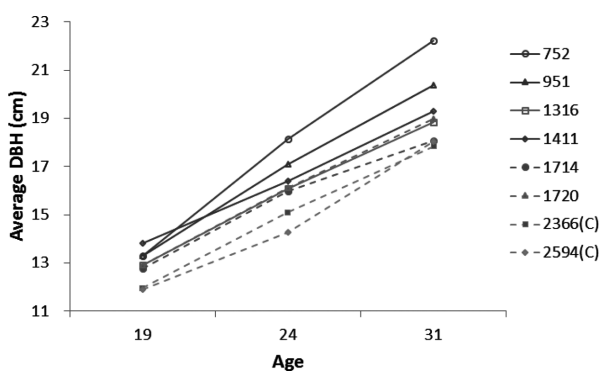


Figure 2. Growth change of average DBH during 12 years in experimental thinned plots by thinning intensity (ANOVA; $p=0.1156$ in 19 year, $p=0.0172$ in 24 year, and $p=0.0304$ in 31 year). Thinning intensity is expressed by residual trees per hectare in 1996 (19 year).

도 잔존본수가 적은 표준지가 일반적으로 평균직경이 좋은 것으로 나타났으나, 그 차이는 크지 않았다(Figure 2).

간벌 후 초기 5년 기간 동안의 직경생장을 살펴보면 강도간벌구(752 본/ha와 951 본/ha)의 생장이 대조구(2,594

본/ha와 2,366 본/ha)에 비하여 19.6~19.9% 좋은 것으로 나타났으며, 간벌 후 12년이 경과한 뒤에도 강도간벌구의 직경생장은 대조구에 비하여 13.3~24.7% 좋은 것으로 나타났다(Figure 2). Bae et al.(2005)은 1차 간벌 6년 후 간벌시험구가 대조구에 비해 직경생장이 5~21% 더 높다고 보고하였는데 이 결과는 본 연구결과와 유사한 것으로 나타났다.

간벌강도에 따라 각 표준지의 평균직경생장이 통계적으로 차이가 있는지 ANOVA분석을 실시한 결과, 간벌 직후 1차 조사에서는 간벌목을 벌도한 직후 조사되어 간벌 표준지간의 생장 차이가 없었지만($p=0.1156$), 5년이 경과한 2차 조사에서는 유의적인 생장차이가 있는 것으로 나타났으며($p=0.0172$), 3차 조사에서도 마찬가지로 간벌강도에 따라 생장 차이가 있는 것으로 나타났다($p=0.0304$).

간벌표준지별로 상위10% 우세목과 하위10% 열세목을 선별하여 간벌 후 12년 동안의 흉고직경생장량을 비교한 결과, 강도간벌구(752 본/ha와 951 본/ha)의 우세목생장량이 다른 간벌구의 우세목생장량보다 월등히 좋은 것으로

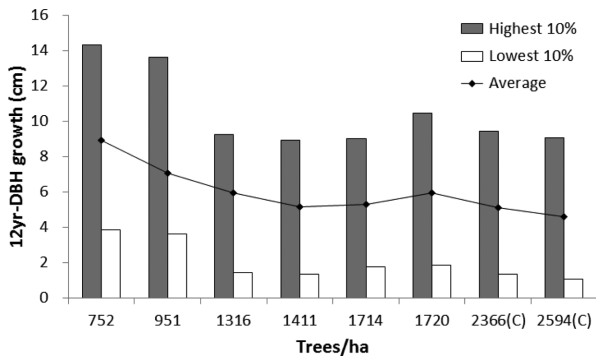


Figure 3. Growth of dominant trees (highest 10%) and recessive trees (lowest 10%) by thinning intensity during 12 years after thinning.

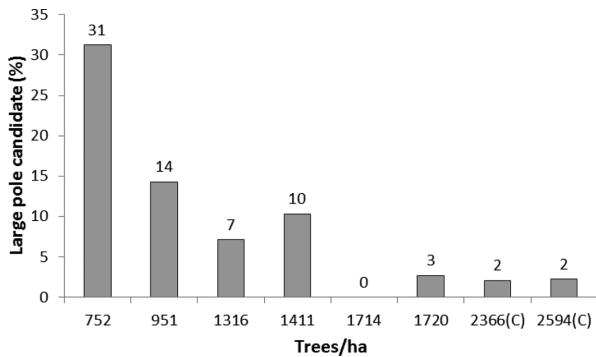


Figure 4. Proportion of large pole candidate trees (DBH ≥ 25 cm) during 12 years after thinning.

나타났다(Figure 3). 세부적으로 강도간벌구의 우세목직경 성장량은 13.6~14.3 cm으로 대조구의 우세목직경성장량 9.1~9.5 cm보다 49~51% 잘 자란 것으로 나타났다. 또한, 강도간벌구에서 가장 열세한 10% 입목의 직경성장량은 3.6~3.9 cm으로 대조구의 열세목직경성장량 1.1~1.4 cm에 비해 무려 179~227% 더 잘 자랐다. 이 결과는 강도간벌지의 우세목과 열세목 모두 무간벌표준지의 입목보다 월등히 생장이 좋다는 것을 입증하는 것이다.

다음은 간벌강도에 따른 표준지의 우량 대경목 비율을 파악하기 위하여 간벌 12년 후 흉고직경 25 cm이상의 미래목을 선별한 결과, 강도간벌구(752 본/ha; 간벌율 69%)에서 전체본수의 31%가 대경목 후보로 나타난 반면, 대조구에서는 2%밖에 되지 않았다(Figure 4). 그 외에 다른 간벌구(951~1,411 본/ha; 간벌율: 44~59%)에서는 7~14%의 대경목 후보가 존재하는 것으로 나타났다. 따라서 본 결과를 통하여 대경목 생산을 위해서는 간벌이 반드시 필요하며, 특히 강도간벌지역에서 더 많은 대경목이 생산된다는 것을 입증하였다.

간벌 후 흉고직경성장량의 변화를 파악한 결과, 초기성장률(간벌 직후~5년)이 후기성장률(6~12년)보다 월등히 좋은 것으로 나타났으며, 이들 성장률은 표준지의 입목본

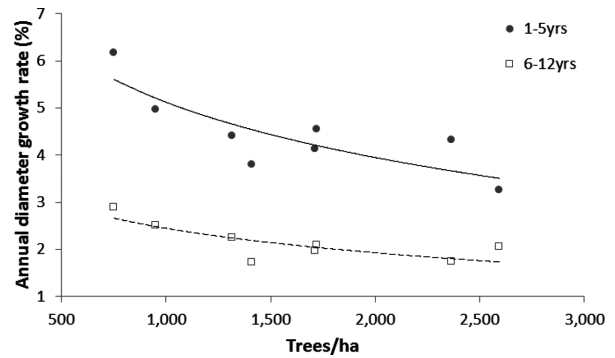


Figure 5. Change of annual diameter growth rate by pressler method the initial (1~5 years) and later (6~12 years) period after thinning.

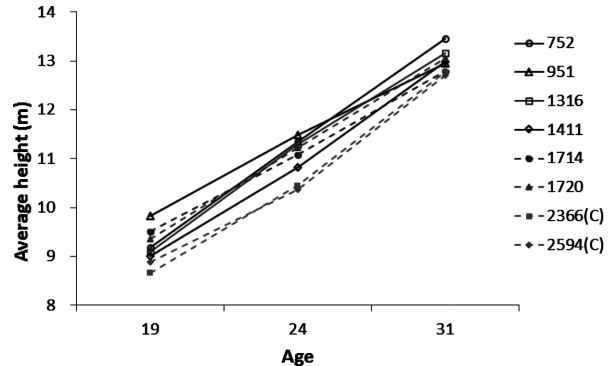


Figure 6. Growth change of average height in experimental thinned plots by thinning intensity (ANOVA; $p < 0.0001$ in 19 year, $p = 0.0009$ in 24 year, and $p = 0.1679$ in 31 year).

수가 많을수록 즉, 간벌강도가 약할수록 감소하였다(Figure 5). 초기직경성장률의 범위는 3.26~6.17%이었으며, 후기직경성장률의 범위는 1.72~2.89%이었다.

3. 수고 및 수관폭 생장의 변화

간벌강도에 따른 평균수고생장의 변화는 간벌 직후 8.7~9.8 m, 5년 후 10.4~11.5 m, 12년 후 12.7~13.5 m로 변화되었는데, 실제로 간벌강도에 따른 표준지별 평균수고는 1 m 내외로 큰 차이가 나타나지 않았다(Figure 6). ANOVA분석을 통해 간벌시험구별 평균수고가 유의적인 차이가 있는지 파악해본 결과, 간벌 직후에 간벌시험구별 평균수고가 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.0001$). 그 이유는 간벌시험구에서 간벌목 선정시 피입목 또는 열세목 위주의 하층간벌이 실시되어 간벌구의 평균수고가 무간벌시험구보다 높았기 때문이다. 이 현상은 5년 후에도 같은 양상을 보였고($p = 0.0009$), 간벌 12년 후에는 간벌강도에 따른 표준지별 평균수고가 유의적인 차이가 발생하지 않았다($p = 0.1679$). 결과적으로 수고는 간벌강도에 따라 즉 입분밀도에 따라 성장 차이가 발생하지 않음을 알 수 있었으며, 이 결과는 Kim et al.(1994)과

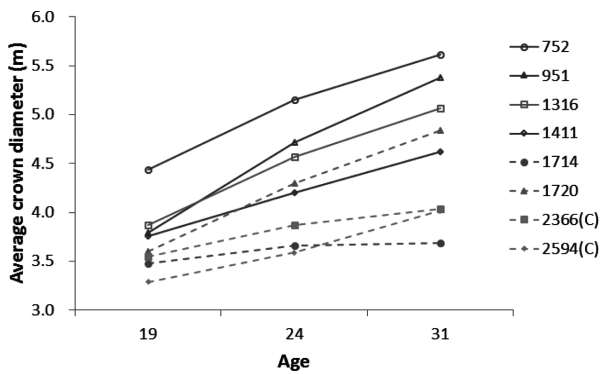


Figure 7. Growth change of average crown diameter in experimental thinned plots by thinning intensity (ANOVA; $p=0.0002$ in 19 year, $p<0.0001$ in 24 year, and $p<0.0001$ in 31 year).

Bae et al.(2005)이 보고한 잣나무 인공림에서 간벌효과는 흉고직경생장에 기여하는 반면 수고성장에는 영향을 미치는 않는다는 결과를 입증하였다.

간벌강도에 따른 수관폭생장은 간벌 직후 평균 3.3~4.4 m (19년생), 5년 후 3.6~5.2 m(24년생), 12년 후 3.7~5.6 m (31년생)의 범위로 증가하였다(Figure 7). 특히, 강도간벌구의 평균수관폭생장은 대조구에 비해 간벌 직후 15.2~22.2%, 5년 후 30.6~33.3%, 12년 후 35.0~40.0% 높아 간벌이 수관폭 성장에도 영향을 미친 것으로 나타났다. 이 결과를 선행논문과 비교해 보면 Choi and Choi (1998)는 강원도지역 잣나무 20년생, 평균흉고직경 10.6 cm, 평균수관폭 3.4 m라 보고하였는데 이는 본 연구 19년생, 평균흉고직경 11.9 cm, 평균수관폭 3.3 m와 유사한 것으로 나타났다. 또한, Kang et al.(2004)은 강원도지역 잣나무 32년생, 평균흉고직경 19.8 cm, 평균수관폭이 6.0 m라 보고하였는데 본 연구 31년생, 평균흉고직경 20.4 cm, 평균수관폭 5.4 m와도 거의 비슷한 것으로 나타났다. 간벌 강도에 따른 수관폭성장차이는 간벌 5년 후와 12년 후 간벌강도에 따라서 평균수관폭이 유의적인 차이가 있는 것

으로 나타났다($p<0.0001$).

4. 재적 및 바이오매스 생장의 변화

간벌강도에 따른 표준지내 평균 단목재적의 성장변화는 간벌 직후(19년생) 0.056~0.076 m³, 간벌 5년 후(24년생) 0.103~0.160 m³, 간벌 12년 후(31년생) 0.175~0.266 m³의 증가를 보였으며, 특히, 강도간벌구(752 본/ha)에서 단목재적은 시간이 경과하면서 다른 간벌구보다 월등히 생장이 좋은 것으로 나타났다(Figure 8). 특히, 간벌 5년 후 강도간벌구에서 재적생장이 대조구에 비해 39.8~46.8% 높았으며, 간벌 12년 후에도 강도간벌구의 재적생장이 대조구에 비해 23.0~52.0% 높았다. ANOVA 분석결과, 간벌 강도에 따른 표준지별 평균재적 차이는 간벌 5년 후, 12년 후 시간이 경과함에 따라 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났다($p=0.0471$, $p=0.0203$).

간벌강도에 따른 ha당 재적변화는 간벌 직후 53~160 m³/ha, 5년 후 121~246 m³/ha, 12년 후 200~344 m³/ha 이었다(Table 3). 이 결과는 Bae et al.(2005), Hwang et al.(2008), Lee(2003)의 연구결과와 유사한 것으로 나타났다. 본 연구에서 가장 많은 재적이 발생한 표준지는 본수가 가장 많은 대조구(2,366 본/ha)에서 발생하였으며 간벌 후 12년 동안 133 m³/ha에서 344 m³/ha로 증가하여, 연평균 재적성장량은 17.6 m³/ha⁻¹/year⁻¹이었다. 가장 적은 ha당 재적이 발생한 표준지는 본수가 가장 적은 강도간벌구(752 본/ha)로 간벌 후 12년 동안 147 m³/ha 증가하여, 연평균 12.3 m³/ha⁻¹/year⁻¹의 재적이 증가하였다. 위 결과는 입목의 크기와 상관없이 단위면적당 최대의 재적만을 생산(예: 펄프재생산)하기 위해서라면 본수를 대량 식재한 후 간벌하지 않는 것이 최대재적을 얻을 수 있는 것을 말해준다.

수간바이오매스의 경우도 단목재적의 변화와 유사하게 나타났는데, 간벌 직후(19년생)의 간벌시험구 평균수간바이오매스는 21.4~28.5 kg, 간벌 5년 후(24년생) 38.9~60.3 kg,

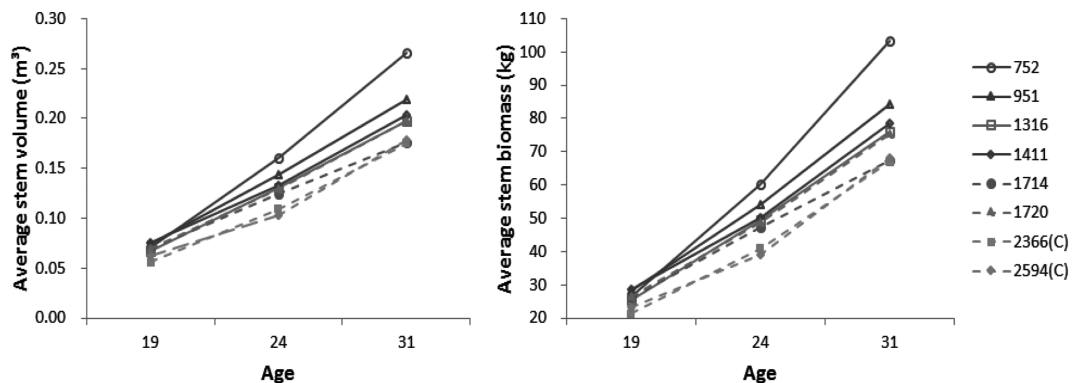


Figure 8. Growth change of average stem volume and stem biomass in experimental thinned plots by thinning intensity (ANOVA for stem volume; $p=0.2550$ in 19 year, $p=0.0471$ in 24 year, and $p=0.0203$ in 31 year; ANOVA for stem biomass; $p=0.2099$ in 19 year, $p=0.0426$ in 24 year, and $p=0.0172$ in 31 year).

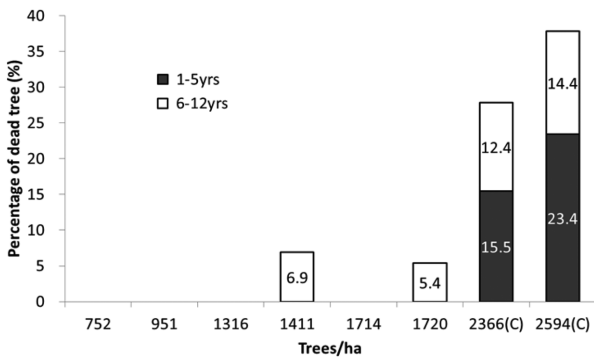


Figure 9. Percentage of dead trees in experimental thinned plots after thinning.

간벌 12년 후(31년생) 67.0~103.4 kg의 범위로 증가하였다(Figure 8). 분산분석을 통하여 간벌강도에 따라 표준지별 평균바이오매스량은 간벌 5년 후 유의적인 생장 차이가 나타났고($p=0.0426$), 간벌 12년 후에는 더욱 유의적인 생장 차이가 나타났다고 나타났다($p=0.0172$).

간벌강도에 따른 ha당 수간바이오매스 생장은 간벌 직후 20~61 ton/ha, 5년 후 45~93 ton/ha, 12년 후 78~132 ton/ha이었으며 임분재적과 같은 경향으로 대조구에서 가장 많은 바이오매스량(간벌 직후 51 ton/ha; 12년후 132 ton/ha)이 발생하였다(Table 3). 본 연구의 임령, 본수, 흉고 직경, 수고가 비슷한 선행연구(Lee and Park, 1987; Lee et al., 2009; Yi, 1998)를 비교한 결과 본 연구와 유사한 것으로 나타났다.

5. 고사목의 변화

간벌강도에 따른 표준지 내의 고사목을 분석한 결과, 고사목 발생은 대조구에서 가장 높은 고사율을 보였는데 간벌 후 5년 동안 15.5~23.4%, 그 이후 7년 동안에는

12.4~14.4%의 고사목이 발생한 것으로 나타났다(Figure 9). 또한, 다른 간벌구(1,411~1,720 본/ha; 간벌율: 29~44%)에서도 5.4~6.9%의 고사목이 발생하였다. 그러나 잔존본수가 1,411 본/ha 미만인 시험구(간벌율 46% 이상)에서는 12년 동안 전혀 고사목이 발생하지 않았다.

선행연구를 살펴보면 Kim et al.(1988; 1994)은 17년생 대조구(3,000 본/ha)에서 10년 동안 11.3%의 고사목이, Bae et al.(2005)은 19년생 대조구(3,000 본/ha)에서 6년 동안 12.9%의 고사목이, Lee(2003)는 18년생 임분(2,625 본/ha)에서 6년 동안 11.4%의 고사목이 발생했다고 보고한 바 있는데, 본 연구에서의 고사율은 선행연구보다 다소 높게 나타났다. 고사목의 발생은 생장학적으로 입목경쟁을 통해서, 미세지형 및 기후 등 환경적 요인에 따라서 영향을 받기 때문에 향후 보다 많은 자료를 통하여 규명이 필요하다고 사료된다.

6. 2차 간벌시기 결정

본 간벌시험림의 향후 2차 간벌시기를 결정하기 위해 각 표준지에서 우세목 5본의 목편을 추출하여 연륜생장을 분석한 결과, 1차 간벌 후 1~2년은 간벌효과가 크게 나타나지 않았다. 그 이후 8~9년간 간벌효과로 인한 생장량 차이가 나타났는데 강도간벌구에서 뚜렷한 차이를 보였다(Figure 10). Hwang et al.(2008)은 흉고단면적 기준 60% 간벌을 실시한 잣나무 34년생 임분에서 3년간 연륜생장이 유의적으로 증가하였다고 보고하였는데, 이는 본 연구 강도간벌구의 뚜렷한 연륜생장과 일치하는 결과이다. 그 이후 연륜생장은 점차 감소하여 간벌 12년 후 간벌시험구간에 연륜생장의 차이가 없는 것으로 나타났다. Kim et al.(2004)은 간벌을 실시한 후 15년이 지난 잣나무 임분에서 흉고직경생장량이 표준

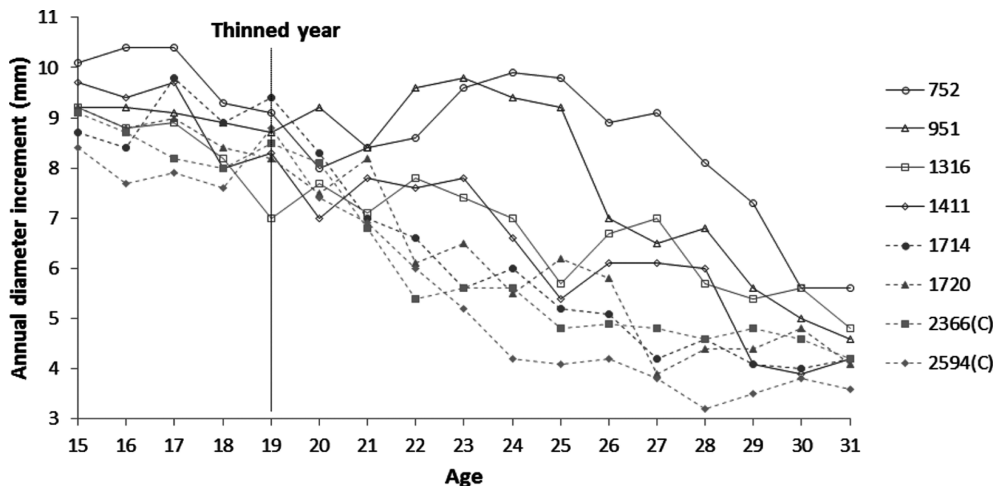


Figure 10. Change of average annual diameter increment in experimental thinned plots by thinning intensity after 1st thinning.

시간 유의적인 차이가 없다고 하였는데, 본 연구와 유사한 결과가 나타났다. 이상의 결과를 종합했을 때 2차 간벌시기는 1차 간벌 후 10년 전후가 적합하다고 사료된다.

결론

본 연구에서는 잣나무 인공림(19년생)을 대상으로 1차 간벌을 실시한 후, 간벌 직후(19년생), 5년 후(24년생), 12년 후(31년생) 측정된 입목자료를 이용하여 인자별 성장변화를 분석하였다. 연구 결과 각 간벌표준지별 평균고고직경은 간벌 직후 11.9~13.8 cm로 유의적인 차이가 없었지만, 간벌 5년 후 14.3~18.1 cm와 12년 후 17.8~22.2 cm로 증가하면서 유의적인 차이가 나타났다. 상위10%에 해당하는 우세목의 직경생장은 강도간벌구가 대조구에 비해 49.9~51.3% 월등히 높았으며, 대경목후보(DBH \geq 25 cm) 비율 또한 강도간벌구가 대조구에 비해 31%로 높았다. 반면에 간벌 후 잔존본수가 많은 1,720 본/ha 이상(간벌율: 46% 이하)인 표준지에서는 대경목 후보가 단지 2~3% 밖에 나타나지 않았다. 또한 간벌 후 초기성장량(3.26~6.17%)이 후기성장량(1.72~2.89%)보다 좋은 것으로 나타났다.

간벌표준지별 수고생장은 간벌 직후 8.7~9.8 m, 5년 후 10.4~11.5 m, 12년 후 12.7~13.5 m의 변화를 보였으며, 모든 조사시기에서 1 m 내외의 성장차이를 보여 간벌은 수고생장에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 표준지별 평균수관폭은 간벌 직후 3.3~4.4 m, 5년 후 3.6~5.2 m, 12년 후 3.7~5.6 m의 범위를 가졌으며, 분산분석결과 간벌강도에 따라 간벌 5년 후, 12년 후 수관폭생장이 모두 유의적인 것으로 나타났다.

간벌표준지별 단목재적은 간벌 직후 0.056~0.076 m³, 간벌 5년 후 0.103~0.160 m³와 12년 후 0.175~0.266 m³로 증가를 보였으며, 간벌 5년 후, 10년 후에 간벌표준지간에 유의적인 재적 성장 차이가 있는 것으로 나타났다. 표준지별 개체목 수간바이오매스 또한 재적과 매우 유사한 생장이 나타났다. 임분단위로 ha당 재적은 본수가 가장 많은 대조구(2,366 본/ha)에서 가장 많은 재적이 나타났다(간벌 직후: 133 m³/ha → 간벌 후 12년: 344 m³/ha). ha당 수간바이오매스(간벌 직후: 51 ton/ha → 간벌 후 12년: 132 ton/ha)도 유사한 결과로 나타났다.

간벌강도에 따른 표준지별 고사목의 발생을 살펴보면 대조구에서 간벌 후 5년 동안 15.5~23.4%, 그 이후 7년 동안 12.4~14.4%로 나타났으며, ha당 잔존본수가 1,411본 미만(간벌율 46% 이상)인 간벌표준지에서는 전혀 고사목이 발생하지 않았다. 끝으로 잣나무 인공림의 2차 간벌시기를 결정하기 위해 연륜생장을 분석한 결과, 10년 전후

가 적합한 것으로 나타났다.

본 연구는 제한된 8개 표준지를 대상으로 간벌강도에 따른 12년간의 성장변화를 알아보았다. 오늘날 숲가꾸기가 많이 시행되고 있는 우리나라 산림사업 현실에서 입목의 성장학적·임분구조적 특성에 맞는 간벌시행이 필요하다. 산림경영에 있어서 산림사업, 특히 인공림경영의 최종목표는 우수한 양질의 목재를 생산하기 위한 것으로 입목 및 임분성장 변화를 체계적으로 장기 모니터링을 통해서 얻어진 실증자료가 필요하다. 그러나 오늘날 산림사업 분야의 기초연구가 미흡한 우리의 현실을 직시하면서, 앞으로 다양한 간벌사업 장기모니터링 연구가 확대되길 기대해본다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 강원대학교 학술연구지원사업(연구과제:1009783-01-01)으로 수행되었습니다.

References

- Amaties, R.L. and Burkhart, H.E. 2005. The influence of thinning on the proportion of peeler, sawtimber, and pulpwood trees in loblolly pine plantations. *Southern Journal of Applied Forestry* 29(3): 158-162.
- Bae, S.W., Hwang, J.H., Lee, S.T., Kim, H.S., and Jeong, J.M. 2010. Changes in soil temperature, moisture content, light availability and diameter growth after thinning in Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation. *Journal of Korean Forest Society* 99(3): 397-403 (in Korean with English abstract).
- Bae, S.W., Kim, S.K., Lee, K.S., Kim, Y.S., and Kim, H.S. 2005. Effect analysis of stand growth by thinning methods of Korean pine planted stand. *Korean Journal of Forest Measurements* 8: 43-49 (in Korean with English abstract).
- Cao, Q.V., Dean, T.J., and Baldwin Jr., V.C. 2000. Modeling the size-density relationship in direct-seeded slash pine stands. *Forest Science* 46(3): 317-321.
- Choi, I.H. 2003. Income business and outline of the research forest of Kangwon National University. *Journal of Research Forest of Kangwon National University* 23: 64-79 (in Korean).
- Choi, I.H. and Ji, B.Y. 1998. Investigation of thinning experimental plots of Korean white pine stand(II). *Journal of Research Forest of Kangwon National University* 18: 115-130 (in Korean).
- Choi, I.H., Kim, J.H., Ji, B.Y., Shim, W.S., and Kim, H.S. 1996. Establishment of thinning experimental plots of Korean white pine stand(I). *Research Bulletin of the Experiment Forests* 16: 152-160 (in Korean).
- Choi, I.H., Won, H.K., and Choi, J.K. 2001. Investigation of

- thinning experimental plots of Korean white pine stand(III). Journal of Research Forest of Kangwon National University 21: 142-154 (in Korean).
- Choi, J.K. and Choi, I.H. 1998. A study of stand structure and growth on *Pinus koraiensis* plantations. Korean Journal of Forest Measurements 1(2): 27-35 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.K. and Choi, I.H. 1999. Investigation of permanent sample plot in the artificial stand of *Pinus koraiensis*(. Journal of Research Forest of Kangwon National University 19: 113-120 (in Korean).
- Choi, J.K., Lee, B.K., Cho, B.M., Shin, J.W., and Choi, I.H. 2010. Investigation of thinning experimental plots (1), (2), (3) of Korean white pine stand(III). Journal of Research Forest of Kangwon National University 30: 81-105 (in Korean).
- Choi, J.K., Woo, J.C., Kim, J.S., Seo, Y.W., You, B.O., and Jang, J.Y. 2003. Analysis of growth comparison on *Pinus koraiensis* plantations. Journal of Research Forest of Kangwon National University 23: 57-63 (in Korean with English abstract).
- Hwang, J.H., Bae, S.W., Lee, K.J., Lee, K.S., and Kim, H.S. 2008. Short-term effect of thinning on aboveground carbon storage in Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation. Journal of Korean Forest Society 97(6): 605-610 (in Korean with English abstract).
- Kang, S.H., Hong, S.W., You, B.O., Choi, J.K., and Choi, I.H. 2004. Growth monitoring by time series in *Pinus koraiensis* plantation -In case of permanent Korean pine plot in KNU-. Korean Journal of Forest Measurements 7(2): 1-8 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.K. and Lee S.W. 1998. Study on the stem growth by stand density in *Pinus koraiensis* plantation -Deriving the maximum size-density curve-. FRI Journal of Forest Science 59: 1-7 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.K., Kim, J.W., Park, S.K., Kim, T.O., and Kim, I.H. 1988. Study on the first thinning method in 20 year-old plantations of *Pinus koraiensis*, *Larix leptolepis*, *Pinus rigida* and *Pinus banksiana*. Research Reports of the Forest Research Institute 37: 1-7 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.K., Lee, H.J., Kim, J.W., and Park, S.K. 1994. Effects of planting density and thinning intensity in growth of Korean pine. Research Reports of the Forest Research Institute 50: 112-127 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.K., Lee, K.J., Bae, S.W., Lee, K.S., and Kim, H.S. 2004. A study on the diameter growth and thinning effects using dial dendrometer in *Pinus koraiensis* stand. Korean Journal of Forest Measurements 7(1): 10-16 (in Korean with English abstract).
- Korea Forest Research Institute. 1998. Applied tree volume equations by region and species (in Korean).
- Korea Forest Research Institute. 2012. commercial tree species 3 *Pinus koraiensis*. pp. 168 (in Korean).
- Korea Forest Service. 2009. Volume, Weight Table, and Yield Table. pp. 272 (in Korean).
- Korea Forest Service. 2012. Statistical Yearbook of Forestry. pp. 488 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration. 2011. Climatological Normals of Korea. http://www.kma.go.kr/down/Climatological_2010.pdf (in Korean).
- Lee, K.J. 2003. A study on systematization of silvicultural practice by analyzing growth and structure of Korean pine plantation in the central region of Korea. Ph.D thesis at Graduate School of Konkuk University. pp. 150 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.J. and Park, I.H. 1987. Primary production and nutrients distribution in 22-year-old *Pinus koraiensis* and *Quercus mongolica* stands in Kwangju district. Journal of Korean Forestry Energy 7(1): 11-21 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.J., Seo, Y.O., Park, S.M., Pyo, J.K., Kim, R.H., Son, Y.M., Lee, K.H., and Kim, H.H. 2009. Estimation of biomass for 27 years old Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation in Gangneung, Gangwon-province. Journal of Agriculture and Life Science 43(1): 1-8 (in Korean with English abstract).
- Nishizono, T., Tanaka, K., Hosoda, K., Awaya, Y., and Oishi, Y. 2008. Effects of thinning and site productivity on culmination of stand growth: results from long-term monitoring experiments in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forests in northeastern Japan. Journal of Forest Research 13(5): 264-274.
- Nyland, R.D. 1996. Silviculture: Concepts and Applications. McGraw-Hill. New York. pp. 633.
- Pelletier, G. and Pitt, D.G. 2008. Silvicultural responses of two spruce plantations to midrotation commercial thinning in New Brunswick. Canadian Journal of Forest Research 38(4): 851-867.
- Pfister, O., Wallentin, C., Nilsson, U., and Ekö, P.-M. 2007. Effects of wide spacing and thinning strategies on wood quality in Norway spruce (*Picea abies*) stands in southern Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research 22(4): 333-343.
- Smith, D.M. 1986. The Practice of Silviculture. 8th. ed. Wiley. New York. pp. 527.
- Wallentin, C. and Nilsson, U. 2011. Initial effect of thinning on stand gross stem-volume production in a 33-year-old Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand in Southern Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research 26(11): 21-35.
- Yi, M.Y. 1998. Changes in aboveground biomass and Nutrient accumulation of the korean-pine (*Pinus koraiensis*) plantation by stand age at Kangwondo province. Journal of Korean Forest Society 87(2): 276-285 (in Korean with English abstract).