J. Korean Soc. For. Sci. Vol. 107, No. 1, pp. 35~42 (2018)
https://doi.org/10.14578/jkfs.2018.107.1.35

한국산림과학회지
JOURNAL OF KOREAN SOCIETY OF FOREST SCIENCE
ISSN 2586-6613(Print), ISSN 2586-6621(Online)
http://e-journal.kfs21.or.kr

지황 및 토양 인자가 낙엽송 벌채지 내 낙엽송 조림목의 초기 생장에 미치는 영향

양아람 · 정재엽 · 조민석*
국립산림과학원 산림기술경영연구소

Site and Soil Factors Affecting Early Growth of *Larix kaempferi* Trees Planted in Harvested *Larix kaempferi* Plantations

A-Ram Yang, Jaeyeob Jeong and Min Seok Cho*
Forest Technology and Management Research Center, National Institute of Forest Science, Pocheon 11186, Korea

요 약: 본 연구는 낙엽송 수확 벌채지 내 식재된 낙엽송 조림목의 초기 근원경과 수고 생장에 영향을 주는 지황 및 토양 인자를 구명하기 위해 수행되었다. 낙엽송 조림목의 생장에 영향을 줄 것으로 판단되는 낙엽송 조림지 내 지황 및 토양 인자 15개를 이용하여 생장 영향 인자를 도출하였다. 도출된 인자들로 최적 조합에 의해 6년생 낙엽송 조림목의 근원경과 수고 생장추정식을 개발하였다. 근원경 생장에 영향을 주는 인자들은 유효 인산(+), 유효 토심(+), 유기물(-), 모래 비율(-), pH(-), 고도(-) 등의 순으로 6개가 도출되었고, 근원경 생장추정식의 결정 계수(R^2)는 0.51이었다. 수고 생장에 영향을 주는 인자들은 유효 토심(+), 고도(-), 경사(-), 유효 인산(+) 등의 순으로 4개가 도출되었고, 수고 생장추정식의 R^2는 0.46이었다. 낙엽송 조림목의 근원경과 수고 생장은 공통적으로 유효 토심, 유효 인산, 고도 인자들에 의해 영향을 받는 것으로 조사되었다. 따라서 도출된 영향 인자들은 낙엽송 조림목의 우수한 초기 생장을 위해 재조림 대상지 선정 시 고려해야 할 중요한 인자들로 작용할 것이다.

Abstract: This study was carried out to investigate site and soil factors affecting growth of root collar diameter (RCD) and height (HT) of *Larix kaempferi* trees planted in harvested *Larix kaempferi* plantations. We were found effect factors of growth of RCD and HT using 15 of site and soil factors. And then we made the growth estimated equations of RCD and HT of 6-years-old *L. kaempferi* tree by the derived affecting factors. The growth of RCD was affected in order of available phosphorus (+), effective soil depth (+), organic matter (-), sand separate in soil (-), pH (-), and elevation (-), and the coefficient of determination (R^2) of the growth estimated equation of RCD was 0.51. The growth of HT was affected in order of effective soil depth (+), elevation (-) slope (-), and available phosphorus (+) and the R^2 of the growth estimated equation of HT was 0.46. The growth of RCD and HT were commonly affected by effective soil depth, available phosphorus, and elevation. Therefore, planting site of *L. kaempferi* should be considered the mainly effect factors in order to keep better early growth based on the current study.

Key words: *effect factor,* Larix kaempferi*, reforestation, site characteristics, soil properties*

서 론

낙엽송은 1960년대부터 우리나라 주요 조림 수종의 하나로서 현재 낙엽송의 기준 벌기령은 국유림 50년, 공사유림 30년으로 정해져 있으며(Ministry of Government Legislation, 2017), 이를 감안하면 1960년대부터 식재된 낙엽송은 현재 벌기령에 도달한 임분이 상당한 것으로 볼 수 있다. 낙엽송의 벌채 면적과 이들 벌채지를 대상으로 한 조림 면적이 모두 증가하고 있기 때문에 낙엽송 벌채지에 다시 낙엽송을 재조림하는 면적도 증가할 것으로 예상된다. 따라서 낙엽송 재조림지 내 낙엽송 조림목의 생장에 영향을 주는 인자들을 파악하는 것은 낙엽송

* Corresponding author
E-mail: mscho1143@korea.kr
ORCID
Min Seok Cho https://orcid.org/0000-0003-2847-8412

재조림 기술 개발과 성과 향상을 위해 필요한 상황이다. 한편 Liu et al.(1998)과 Liu et al.(2011)의 문헌에서 잎갈나무속(*Larix gmelinii* Rupr., *L. olgensis* var. *amurensis* Kitag 및 *L. leptolepis* Gordon) 수종을 벌채한 다음 동일 수종으로 조림한 후 장기 생장 모니터링과 토양 지력 변화 및 임분 내 양분 순환에 대한 연구를 수행하였다. 연구 결과 지속적인 잎갈나무속 수종의 조림은 임지 내 지력 감퇴를 가져와 조림목의 생장이 저조하게 된다고 보고한 바 있다.

조림목의 생장에 영향을 주는 인자는 지황, 토양, 기후 인자 등이며, 이러한 제반환경 인자는 서로 유기적인 관계를 형성하여 영향을 준다(Schweingruber, 1993; Fekedulegn et al., 2003; Park et al., 2008). 또한 조림지의 토양 특성, 온도, 습도 등의 생육환경과 조림목의 식재 방법과 시기, 하층식생 관리 등은 조림 성과에 많은 영향을 미치게 된다(Beon and Bartsch, 2003; Lee and Son, 2004; Lee et al., 2006; Cho et al., 2010). 그러나 이와 같이 다양한 인자 중 어떤 것이 조림목의 초기 생장에 가장 밀접한 영향을 주는지에 관한 연구 결과는 부족한 편이다. 따라서 조림지의 지황 및 토양 특성 중 조림목의 생장에 영향을 주는 인자를 파악하여 조림 적지 정보에 근거한 임분을 조성하는 것이 필요하다(Kim et al., 2001; Lee et al., 2012; Shin et al., 2012; Kim et al., 2013; Moon et al., 2015). 한편 Baribault et al.(2010)은 참나무류와 단풍나무 조림목의 생장에 가장 큰 영향을 주는 인자는 토양 내 전질소, 유효 인산 및 치환성 Ca^{2+} 농도이며, 조림목의 생장과 토양 특성의 관계를 분석하는 것이 필요하다고 보고하였다. 그렇기 때문에 조림목의 생장에 영향을 주는 인자들을 도출하기 위해서는 기본적으로 조림지의 입지 및 토양 특성 분석이 필요하다.

본 연구의 목적은 낙엽송 수확 벌채지 내 식재된 낙엽송 조림목의 초기 근원경과 수고 생장에 가장 밀접한 영향을 주는 지황 및 토양 인자를 구명하는 것이다. 이를 위해 낙엽송 조림지의 지황 및 토양 인자를 기반으로 조림목의 근원경 및 수고와 인자들간의 상관관계를 분석하고 조림목의 생장에 영향을 주는 주요 인자를 도출하였다. 결과적으로 본 연구의 결과에서 도출된 인자들은 낙엽송 재조림 시 고려해야 할 중요한 인자들로 적용될 수 있을 것이라 기대된다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지 및 조림목 식재 방법

연구 대상지는 낙엽송을 수확 벌채하고 낙엽송을 다시 식재한 조림지로서 강원도(인제, 춘천)와 경상북도(김천, 영주)에 위치한 국유림 4개소이며, 임분 특성은 Table 1과 같다. 영주 조사지는 2008년 3월 말 3 ha, 김천 조사지는 2009년 3월 말 3.5 ha, 인제, 춘천 조사지는 2010년 3월 말 각각 4.5 ha, 9.0 ha에 낙엽송 노지묘 1-1을 3,000본 ha^{-1}의 밀도로 식재하였다.

2. 자료의 정리

낙엽송 조림목의 근원경과 수고 생장에 밀접한 영향을 주는 지황 및 토양 인자를 도출하기 위하여 단계적으로 연구를 수행하였다. 낙엽송 조림지의 지황 및 토양 특성과 조림목의 생장 특성을 분석한 연구는 Yang et al.(2017)에서 먼저 밝혔는데 낙엽송 조림지의 토양 특성은 2010년과 2013년에 채취하여 분석하였고, 조림목의 생장 특성은 2010년부터 2014년까지 매년 9월에 지역별로 90본씩 근원경과 수고를 측정하였다. Yang et al.(2017)에서 분석된 자료를 이용하여 본 연구에서는 낙엽송 조림목의 생장에 영향을 주는 주요 인자를 도출하였다.

낙엽송 조림목의 생장에 영향을 주는 주요 인자를 도출하기 위하여 이용한 지황 및 토양 인자는 총 15개로 지황 인자 3개 항목(고도, 경사, 사면 방향)과 토양 인자 12개 항목(모래 비율, 점토 비율, pH, 전질소, 유효 인산, 유기물, C.E.C., 치환성 Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, 유효 토심)이다(Table 2). 조림지에서 기후 인자는 중요하나 지역별 차이가 크기 때문에 이를 제외하였고, 지황 인자는 쉽고 간편하게 조사하여 얻을 수 있는 자료이며, 토양 인자는 분석에 시간이 다소 소요되지만 단기간에 얻을 수 있는 중요한 자료이기 때문에 위와 같은 인자들을 선택하였다. 또한 낙엽송 조림목의 생장추정식을 도출하기 위하여 조림목의 생장은 6년생일 때의 근원경과 수고 생장값을 이용하였다.

지황 인자 중에서 고도와 경사는 실측치를 이용하였고, 사면 방향의 경우 Shin et al.(2008)의 방법을 참고하여 사면 방위각을 레디안(radian)으로 변환한 다음 분석에 이용하였다. 토양 인자는 모두 실측치를 사용하였으며, 토성의 경우 모래와 점토 비율을 분석에 사용하였다. 조림목의 6년생 생장을 기준으로 김천, 인제 및 춘천 조림지의 토양 특성은 2013년 자료를 이용하였고, 영주 조림지의 토양은 2010년의 자료를 이용하였다.

3. 통계 분석

낙엽송 조림목이 6년생일 때의 근원경 및 수고 생장값과 지황 및 토양 인자 간의 상관관계를 분석하기 위하여 근원경 및 수고 생장값과 인자들 간, 그리고 인자들 간의 상관분석을 실시하였다. 근원경과 수고 생장추정식을 도출하기 위해 생장과 상관이 상대적으로 높은 인자를 우

Table 1. The stand characteristics of *Larix kaempferi* plantations.

Stand characteristic		Region			
		Yeongju	Gimcheon	Inje	Chuncheon
Regeneration year		2008	2009	2010	2010
Elevation (m)		295-320	712-872	685-705	420-438
Slope (°)		18-33	25-28	19-24	21-25
Aspect		S, W	S, NW	NE, SE	N, SE
Effective soil depth (cm)		40	≥60	50	≥60
Average air temperature in January (℃)	2010[a]	-3.9	-2.8	-6.4	-7.3
	2013	-4.2	-3.2	-6.8	-6.4
Average air temperature in August (℃)	2010	26.7	27.5	25.2	25.8
	2013	25.5	26.1	25.5	26.4
Annual precipitation (mm)	2010	1,236	1,491	1,170	1,662
	2013	1,181	1,086	1,349	1,734
Location		36°57′19.9″N, 128°38′15.76″E	35°50′43.16″N, 128°03′05.39″E	37°58′31.49″N, 128°15′3851″E	37°58′23.81″N, 127°50′25.31″E
Before harvesting	DBH (cm)	16	21	15	18
	Height (m)	18	32	22	28
	Age class	Ⅳ	Ⅷ	Ⅳ	Ⅷ
	Site index[b]	18	16	16	18
6-year-old *Larix kaempferi* trees after planting	Root collar diameter (mm)	31.3	53.3	42.1	55.0
	Height (cm)	238	327	267	381

[a]2010 and 2013 were collection period of the soil sampling.
[b]Site index was calculated by height of trees before harvesting.

Table 2. The independent variables and code description in site and soil factors.

Factor	Independent variable	Independent variable name	Code description
Site	X_1	Elevation (m)	measured values
	X_2	Slope (°)	
	X_3	Aspect	measured values converted into radian
Soil	X_4	Sand separate in soil	measured values
	X_5	Clay separate in soil	
	X_6	pH	
	X_7	Total nitrogen (%)	
	X_8	Available phosphorus (mg kg^{-1})	
	X_9	Organic matter (%)	
	X_{10}	C.E.C. ($cmol_c$ kg^{-1})	
	X_{11}	Exchangeable Ca^{2+} ($cmol_c$ kg^{-1})	
	X_{12}	Exchangeable Mg^{2+} ($cmol_c$ kg^{-1})	
	X_{13}	Exchangeable K^+ ($cmol_c$ kg^{-1})	
	X_{14}	Exchangeable Na^+ ($cmol_c$ kg^{-1})	
	X_{15}	Effective soil depth (cm)	

선적으로 선발하는 단계적 회귀분석(stepwise regression)에 의하여 생장 추정에 필요한 최적 변수 조합을 도출하였다(Fritts and Xiangding, 1986). 이 과정에서 상관분석에 의해 선택된 독립변수 간의 내부상관이 있는지를 검증하기 위해 지황 및 토양 인자 사이에 존재하는 다중공선성을 분석하였다(Belsley et al., 1980; Myers, 1990). 다중공선성은 분산팽창계수와 조건지표값을 이용하여 다중공선성이 있는 변수들은 제외하거나 가장 설명력이 높은 변수만을 생장추정식에 포함시켜 산출하였다. 모든 통계 분석에는 SAS(ver. 9.2) 프로그램을 사용하였다(SAS Institute Inc., 2009).

결과 및 고찰

1. 조림목의 생장과 지황 및 토양 인자 간의 상관관계

Yang et al.(2017) 문헌에서 낙엽송 조림목의 생장 특성 분석 결과, 벌채 전 낙엽송 임분의 영급이 높고 토양 내 전질소, 유효 인산 및 유기물 농도가 높으며 유효 토심이 깊은 지역에서 낙엽송 조림목의 생장이 높은 것으로 나타났다(Liu et al., 1998; Byun et al., 2007; Liu et al., 2011; NIFoS, 2012; Yang et al., 2013). 이에 낙엽송 조림목의 초기 생장에 가장 밀접한 영향을 주는 인자가 무엇인가를 분석하기 위하여 6년생 낙엽송 조림목의 근원경 및 수고 생장값과 조림지 내 지황 및 토양 인자의 상관관계를 분석하였고, 결과는 Table 3에 제시하였다.

근원경 생장은 경사, 치환성 K^+을 제외한 모든 인자들에서 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타났다($P < 0.05$). 그 중에서 고도, pH, 전질소, 유효 인산, 유기물, C.E.C., 치환성 Mg^{2+}, Na^+, 유효 토심은 근원경과 양의 상관관계를 보였다. 그러나 사면 방향, 모래 및 점토 비율, 치환성 Ca^{2+}, Mg^{2+}은 근원경과 음의 상관관계를 보였다. 즉, 사면 방향은 1라디안(0-60°)인 북사면에서 근원경 생장이 높고, 모래와 점토 비율, 치환성 Ca^{2+}, Mg^{2+} 농도가 낮을수록 생장이 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 치환성 Ca^{2+}, Mg^{2+}은 높을수록 조림목의 생장이 높은 것으로 알려져 있으나(Binkley and Fisher, 2013), 본 연구에서는 치환성 Ca^{2+}, Mg^{2+}이 적정하게 낮아야 근원경 생장이 높은 음의 상관관계를 보였다.

수고 생장은 경사, pH, 치환성 Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+을 제외한 모든 인자들에서 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타났다($P < 0.05$). 그 중에서 고도, 전질소, 유효 인산, 유기물, C.E.C., 치환성 Na^+, 유효 토심은 수고와 양의 상관관계를 보였다. 그러나 사면 방향, 모래 및 점토 비율은 수고와 음의 상관관계를 보였다. 일반적으로 낙엽송은 고도 200~1100 m까지 넓은 범위에서 생장하는 것으로 알려져 있으며(Lee, 1986; NIFoS, 2012), 본 연구 시험지 4개소 모두 900 m 이하로 고도가 적정하게 높을수록 수고 생장이 높은 양의 상관관계를 보였다.

근원경과 수고 생장 모두 고도, 전질소, 유효 인산, 유기물, C.E.C., 치환성 Na^+, 유효 토심과 양의 상관관계를 보였다($r \geq 0.300$, $P < 0.001$). 이러한 인자들은 조림목의 근원경과 수고 생장에 영향을 주는 것으로 나타나 생장추정식의 영향 변수로 도출될 가능성이 있다. 또한 조림목의 생장과 전질소, 유효 인산, 유기물 등은 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있으며(Jin et al., 1994; Kim et al., 2013), 본 연구 결과도 같은 경향을 보였다.

지황 및 토양 인자의 상관관계 분석 결과, 전질소와 유기물($r = 0.9787$, $P < 0.001$), 전질소와 C.E.C.($r = 0.9612$, $P < 0.001$), 유기물과 C.E.C.($r = 0.9249$, $P < 0.001$) 간의 관계는 강한 양의 상관관계를 보이고 있다. 이 인자들 간의 높은 내부 상관은 근원경과 수고의 생장추정식을 산출하는데 영향을 미칠 수 있으므로 독립변수로서 제외해야 한다. 그러나 전질소, 유기물, C.E.C. 등의 인자는 근원경과 수고 생장 간의 상관관계가 모두 약한 양의 상관관계($r \geq 0.300$, $P < 0.001$)를 보여 생장추정식을 도출하는 변수에 포함해야할 것으로 보인다.

2. 조림목의 생장에 영향을 주는 인자

15개의 지황 및 토양 인자를 이용하여 6년생 낙엽송 조림목의 근원경과 수고 생장에 가장 밀접한 영향을 주는 주요 인자를 도출한 후 생장추정식을 산출하였다. 근원경과 수고 생장추정식 산출 과정은 Table 4에 제시하였다.

근원경과 수고의 생장추정식을 산출하기 위해 15개 변수들을 단계적 회귀분석으로 영향 인자들을 도출하였다. 근원경 생장에 영향을 주는 인자들은 유효 인산(X_8), 유효 토심(X_{15}), 유기물(X_9), 모래 비율(X_4), pH(X_6), 고도(X_1) 등의 순으로 6개가 도출되었고, 이들 인자가 근원경 생장과 가장 밀접한 것으로 분석되었다. 이 6개 인자들을 이용하여 근원경 생장추정식을 산출하였으며, 결정계수(R^2)는 0.51이었다. 유효 인산과 유효 토심은 근원경의 생장과 양의 관계를 보였고, 고도, 모래 비율, pH, 유기물은 음의 관계를 보였다. 도출된 인자들을 이용한 근원경 생장추정식은 식 1과 같다.

$$\begin{aligned}\text{Root collar diameter (mm)} &= 37.460 - 0.015 \cdot X_1 - 0.427 \cdot X_4 - 11.063 \cdot X_6 \\ &\quad + 6.715 \cdot X_8 - 2.205 \cdot X_9 + 1.506 \cdot X_{15} \end{aligned} \quad (1)$$

수고 생장은 유효 토심(X_{15}), 고도(X_1), 경사(X_2), 유효 인산(X_8) 등의 순으로 4개가 도출되었고, 이들 인자가 수

Table 3. The correlation (*r*) of independent variables with root collar diameter (RCD) and height (HT) of 6-year-old *Larix kaempferi* trees and independent variables.

	Independent variable														
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
RCD	0.4882***	0.1266	-0.2528***	-0.5073***	-0.2752***	0.1929**	0.6391***	0.6347***	0.6187***	0.6267***	-0.0166	-0.2005**	0.0222	0.5834***	0.6896***
HT	0.2839***	0.0656	-0.2641***	-0.4010***	-0.2652***	0.0962	0.5386***	0.5184***	0.5144***	0.5508***	0.0823	0.0018	0.1229	0.4010***	0.6112***
X_1		0.2330***	0.0905	-0.7087***	0.0135	0.0737	0.8450***	0.6527***	0.8364***	0.7735***	-0.4398***	-0.6932***	-0.3782***	0.9389***	0.7398***
X_2			-0.0004	-0.2550***	-0.6319***	-0.1519*	0.2647***	0.1254	0.3345***	0.2247**	-0.5036***	-0.4209***	-0.4972***	0.2904***	0.3177***
X_3				0.3050***	0.2832***	-0.6925***	0.0273	-0.1591*	0.0769	-0.1302	-0.6780***	-0.3701***	-0.5664***	0.0043	-0.1841**
X_4					-0.0519	-0.1011	-0.7151***	-0.4150***	-0.6828***	-0.8064***	0.0774	0.1960**	-0.1324	-0.6351***	-0.6853***
X_5						-0.3530***	-0.2009**	-0.4129***	-0.2654***	-0.1784*	-0.0575	0.1299	0.1284	-0.2049**	-0.4154***
X_6							-0.0647	0.2870***	-0.0484	-0.0007	0.6428***	0.1491*	0.5086***	0.1106	0.1549*
X_7								0.7640***	0.9787***	0.9612***	-0.3003***	-0.4761***	-0.2488***	0.8970***	0.9355***
X_8									0.7789***	0.6743***	-0.1203	-0.4632***	-0.1735*	0.7576***	0.7600***
X_9										0.9249***	-0.3235***	-0.4588***	-0.2509***	0.8583***	0.9329***
X_{10}											-0.1149	-0.2902***	-0.0687	0.8115***	0.9329***
X_{11}												0.7844***	0.8925***	-0.4090***	-0.1004
X_{12}													0.8241***	-0.7368***	-0.3000***
X_{13}														-0.4235***	-0.0902
X_{14}															0.8230***
X_{15}															1.0000

*$P < 0.05$, **$P < 0.01$, and ***$P < 0.001$, The code of independent variables were presented in Table 2.

Table 4. The regression analysis for making growth estimated equations of root collar diameter and height of 6-year-old *Larix kaempferi* trees.

Dependent variable	Independent variable	Parameter estimate	F-value	*P*-value
Root collar diameter	X_1 (elevation)	-0.0147	5.82	0.0168
	X_4 (sand separate in soil)	-0.4272	11.58	0.0008
	X_6 (pH)	-11.0625	9.51	0.0023
	X_8 (available phosphorus)	6.7151	22.22	<0.0001
	X_9 (organic matter)	-2.2051	11.75	0.0007
	X_{15} (effective soil depth)	1.5058	21.88	<0.0001
	Intercept	37.4595	4.27	0.0400
Height	X_1 (elevation)	-0.1765	38.47	<0.0001
	X_2 (slope)	-2.3521	4.81	0.0295
	X_8 (available phosphorus)	11.9308	3.07	0.0813
	X_{15} (effective soil depth)	7.5801	71.85	<0.0001
	Intercept	-3.7422	0.01	0.9212

고 생장과 가장 밀접한 것으로 분석되었다. 이 4개 인자들을 이용하여 수고 생장추정식을 산출하였으며, R^2는 0.46이었다. 유효 토심과 유효 인산은 수고 생장과 양의 관계를 보였고, 고도와 경사는 음의 관계를 보였다. 도출된 인자들을 이용한 수고 생장추정식은 식 2와 같다.

$$\text{Height (cm)} = -3.742 - 0.177 \cdot X_1 - 2.352 \cdot X_2 + 11.931 \cdot X_8 + 7.580 \cdot X_{15} \quad (2)$$

근원경과 수고의 생장추정식은 0.46 이상의 결정계수를 보였는데, 이는 조림목의 근원경과 수고 생장을 설명할 수 있는 조림지의 입지 특성 내 여러 가지 인자들 중에서 지황 및 토양 인자만을 사용하여 분석하였기 때문인 것으로 보인다. 지황 및 토양 인자는 보다 용이하게 조사 될 수 있으며, 조림목의 생장에 영향을 주는 중요한 인자로서 향후 조림 대상지를 선정하는데 활용성이 높을 것으로 판단된다. 한편 Won et al.(2005)은 28개의 입지, 토양 및 환경 요인에 의한 임지생산력을 추정하였는데 4개의 영향 인자가 도출되었고 결정계수는 0.90 이상이라고 보고하였으며, Shin et al.(2008)은 18개의 미기후 인자를 이용하여 활엽수의 흉고직경과 수고 생장을 추정하였는데 2개의 인자가 도출되었고 결정계수는 0.72 이상이라고 보고한 바 있다. 반면 0.50 이하의 결정계수를 보고한 연구 결과(Shin et al., 2006; 2007; Lee et al., 2012; Shin et al., 2012; Kim et al., 2013; Ko et al., 2014; Chung et al., 2015; Moon et al., 2015)도 있는데 이들은 28~48개의 입지, 토양 및 기후 인자를 이용하여 지위지수 추정식을 개발하였으며 도출된 인자는 2~7개였다. 본 연구에서는 기후 인자를 포함하지 않았음에도 불구하고 상대적으로 높은 결정계수를 가진 생장추정식을 개발하였고, 이 식에 포함된 인자가 낙엽송의 생장에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

근원경과 수고 생장추정식에서 공통적으로 유효 토심, 유효 인산 및 고도 인자가 도출되었다. 이와 같은 결과는 유효 토심이 깊은 곳에서 낙엽송의 생장이 우수하다는 기존 연구 결과(Byun et al., 2007; NIFoS, 2012)와 일치하는 것이다. 그러나 우리나라 산림 토양은 일반적으로 유효 토심이 낮은 편이기 때문에 계곡부나 암석이 적어 상대적으로 유효 토심이 깊은 곳에 낙엽송을 식재하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 유효 인산의 영향이 큰 것으로 나타났는데 우리나라 산림 토양 내 유효 인산 농도는 높지 않은 편(Jeong et al., 2002; Hwang and Son, 2006; Yang et al., 2013)이므로 낙엽송 조림 대상지의 토양 내 유효 인산 농도를 식재 전에 파악하여 조림 전 토양 상태에 따라 시비 처리가 실시될 필요도 있다.

낙엽송 조림목의 우수한 초기 생장을 위해서는 유효 토심이 깊고, 유효 인산 농도가 높으며, 고도가 높은 지역에 식재하는 것이 효과적이라 판단된다. 인위적 조절이 가능한 유효 인산 농도의 경우 Ca^{2+}이 첨가된 비료로 pH를 증가시켜 유효 인산 농도를 높이거나 인산질 비료를 이용한 시비를 고려해 볼 수 있다. 본 연구에서 도출된 인자들은 일부 제한된 자료를 이용하여 얻은 결과이므로 모든 지역에 적용시키기 어려운 점은 있지만 향후 낙엽송 재조림 대상지 선정 시 고려해야 할 중요한 인자들로 적용될 수 있을 것이다.

결 론

본 연구에서는 낙엽송 수확 벌채지 내 식재된 낙엽송 조림목의 근원경과 수고 생장에 가장 밀접한 영향을 주는 지황 및 토양 인자를 구명하였다.

6년생 낙엽송 조림목의 근원경과 수고 생장에 밀접한 영향을 주는 주요 인자를 도출한 결과, 근원경 생장은 유효 토심, 유효 인산, 유기물, 모래 비율, pH, 고도 등의 순으로 영향을 받는 것으로 나타났으며, 근원경 생장추정식의 결정계수(R^2)는 0.51이었다. 수고 생장은 유효 토심, 고도, 경사, 유효 인산 등의 순으로 영향을 받는 것으로 나타났으며, 수고 생장추정식의 R^2는 0.46이었다. 근원경과 수고 생장추정식에서 공통적으로 유효 토심, 유효 인산, 고도가 도출되었고, 유효 토심이 가장 큰 영향을 주는 인자로 분석되었다.

낙엽송 조림목의 우수한 초기 생장을 위해서는 유효 토심이 깊고, 유효 인산 농도가 높으며, 고도가 높은 지역에 식재하는 것이 효과적이라 판단된다. 인위적 조절이 가능한 유효 인산 농도의 경우 Ca^{2+}이 첨가된 비료로 pH를 증가시켜 유효 인산 농도를 높이거나 인산질 비료를 이용한 시비를 고려해 볼 수 있다. 본 연구에서 도출된 인자들은 일부 제한된 자료를 이용하여 얻은 결과이므로 모든 지역에 적용시키기 어려운 점은 있지만 향후 낙엽송 재조림 대상지 선정 시 고려해야 할 중요한 인자들로 적용될 수 있을 것이라 기대된다.

References

Baribault, T.W., Kobe, R.K. and Rothstein, D.E. 2010. Soil calcium, nitrogen, and water are correlated with aboveground net primary production in northern hardwood forests. Forest Ecology and Management 260(5): 723-733.

Belsley, D.A., Kuh, E. and Welsch, R.E. 1980. Regression diagnostics. John Wiley & Sons, New York, USA. pp. 292.

Beon, M.S. and Bartsch, N. 2003. Early seedling growth of pine (*Pinus densiflora*) and oaks (*Quercus serrata*, *Q. mongolica*, *Q. variabilis*) in response to light intensity and soil moisture. Plant Ecology 167(1): 97-105.

Binkley, D. and Fisher, R.F. 2013. Ecology and Management of Forest Soils. 4th eds. Wiley-Blackwell, New Jersey, USA. pp. 347.

Byun, J.K., Kim, Y.S., Yi, M.J., Son, Y., Kim, C., Jeong, J.H., Lee, C.Y. and Jeong, Y.H. 2007. Growth response of *Pinus densiflora*, *Larix leptolepis*, *Betula platyphylla* var. *japonica* and *Quercus acutissima* seedlings at various levels of fertilization. Journal of Korean Forest Society 96(6): 693-698.

Cho, M.S., Kim, G.N., Kwon, K.W. and Lee, S.W. 2010. Effect of planting season and vegetation competition on growth performances of containerized seedlings of *Pinus densiflora*. Journal of Korean Forest Society 99(3): 359-367.

Chung, J., Kim, H., Lee, S., Lee, K., Kim, M. and Chun, Y. 2015. Correlation analysis and growth prediction between climatic elements and radial growth for *Pinus koraiensis*. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 17(2): 85-92.

Fekedulegn, D., Hicks Jr, R.R. and Colbert, J.J. 2003. Influence of topographic aspect, precipitation and drought on radial growth of four major tree species in an appalachian watershed. Forest Ecology and Management 177(1): 409-425.

Fritts, H.C. and Xiangding, W. 1986. A comparison between response-function analysis and other regression techniques. Tree-Ring Bulletin 46: 31-46.

Jeong, J.H., Koo, K.S., Lee, C.H. and Kim, C.S. 2002. Physico-chemical properties of Korean forest soils by regions. Journal of Korean Forest Society 91(6): 694-700.

Jin, H.O., Yi, M.J., Shin, Y.O., Kim, J.J. and Jeon, S.K. 1994. Forest Soil. Hyangmunsa, Seoul, Korea. pp. 325.

Hwang, J. and Son, Y. 2006. Short-term effects of thinning and liming on forest soils of pitch pine and Japanese larch plantations in central Korea. Ecological Research 21(5): 671-680.

Kim, I.H., Shin, M.Y., Kim, Y.C. and Chon, S.K. 2001. Evaluation of vegetative growth in a mature stand of Korean pine under simulated climatic condition. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 3(2): 105-113.

Kim, S., An, J.H., Lim, Y.K., Pee, J.H., Kim, G.S., Lee, H.Y., Cho, Y.C., Bae, K.H. and Lee, C.S. 2013. Ecological changes of the *Larix kaempferi* plantations and the restoration effects confirmed from the results. Korean Journal of Ecology and Environmant 46(2): 241-250.

Kim, T.U., Sung, J.H., Kwon, T.S., Chun, J.H. and Shin, M.Y. 2013. Assessment of productive areas for *Quercus acutissima* by ecoprovince in Korea using environmental factors. Journal of Korean Forest Society 102(3): 437-445.

Ko, S.Y., Sung, J.H., Chun, J.H., Lee, Y.G. and Shin, M.Y. 2014. Predicting the changes of yearly productive area distribution for *Pinus densiflora* in Korea based on climate change scenarios. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 16(1): 77-82.

Lee, C.B. 1986. Dendrology. Hyangmunsa, Seoul, Korea. pp. 161.

Lee, I.K. and Son, Y. 2004. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on soil chemical properties of *Pinus rigida* and *Larix kaempferi* plantations in Yangpyeong area, Gyeonggi province. Journal of Korean Forest Society 93(5): 349-359.

Lee, Y.S., Sung, J.H., Chun, J.H. and Shin, M.Y. 2012. Development of site index equations and assessment of productive areas based on environmental factors for major coniferous tree species. Journal of Korean Forest Society 101(3): 395-404.

Lee, S.W., Choi, J.H., Yoo, S.K., Kim, S.K., Bae, J.H. and Han, S.K. 2006. Effects of raw material properties on growth characteristics of broad-leaved container seedlings. Journal of Bio-Environment Control 15(3): 244-249.

Liu, S., Li, X. and Niu, L. 1998. The degradation of soil fertility in pure larch plantations in the northeastern part of China. Ecological Engineering 10(1): 75-86.

Liu, X., Lu, Y., Zhou, Y., Lei, X., Zhang, X. and Meng, J. 2011. The influence of soil conditions on regeneration establishment for degraded secondary forest restoration, southern China. Forest Ecology and Management 261(11): 1771-1780.

Ministry of Government Legislation. 2017.12.11. Enforcement Regulation of the Creation and Management of Forest Resources Act. Article 7, Clause 2 and 5 of Article 48. Addendum 3. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs Decree No.297.

Moon, G.H., Kim, Y.S., Lim, J.H. and Shin, M.Y. 2015. Mapping species-specific optimal plantation sites based on environmental variables in Namwon city, Korea. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 17(2): 126-135.

Myers, R.H. 1990. Classical and Modern Regression with Applications. 2nd eds. Duxbury Press, USA. pp. 488.

NIFoS. 2012. Economical Tree Species No.4 *Larix kaempferi*. National Institute of Forest Science pp. 180.

Park, N.C., Lee, G.S., Park, M.S., Shin, H.C., Jun, K.S. and Jung, S.Y. 2008. Relation of the physico-chemical properties of forest soil to site indices of *Larix leptolepis* stands. Journal of Korean Forest Society 97(6): 589-596.

SAS Institute Inc. 2009. SAS/STAT® 9.2 User's Guide. SAS Institute Inc., Cary.

Schweingruber, F.H. 1993. Trees and Wood in Dendrochronology: Morphological, Anatomical, and Tree-Ring Analytical Characteristics of Trees Frequently Used in Dendrochronology. 1st eds. Springer-Verlag, Berlin, Germany. pp. 402.

Shin, M.Y., Chung, S.Y., Han, W.S. and Lee, D.K. 2008. Effects of microclimate of different site types on tree growth in natural deciduous forest. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 10(1): 9-16.

Shin, M.Y., Jung, I.B., Koo, K.S. and Won, H.G. 2006. Development of a site index equation for *Pinus koraiensis* based on Environmental factors and estimation of productive areas for reforestation. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 8(2): 97-106.

Shin, M.Y., Sung, J.H. and Chun, J.H. 2012. Estimating forest site productivity and productive areas of *Quercus acutissima* and *Quercus mongolica* using environmental variables. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 14(2): 89-97.

Shin, M.Y., Won, H.K., Lee, S.W. and Lee. Y.Y. 2007. Site index equations and estimation of productive areas for major pine species by climatic zones using environmental factors. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 9(3): 179-187.

Won, H.K., Jeong, J.H., Koo, K.S., Song, M.H. and Shin, M.Y. 2005. Estimation of forest site productivity by regional environment and forest soil factors. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 7(2): 132-140.

Yang, A.-R., Hwang, J., Cho, M.S. and Song, S.W. 2013. Soil physical and chemical properties with plantation regions and stand age in *Pinus rigida* and *Larix kaempferi* plantations. Journal of Korean Forest Society 102(4): 578-586.

Yang A.-R., Jeong, J. and Cho, M.S. 2017. The early growth characteristics of *Larix kaempferi* trees planted in harvested *Larix kaempferi* plantations. Journal of Korean Forest Society 106(1): 10-18.

(Received: January 16, 2018; Accepted: February 27, 2018)