

ORIGINAL ARTICLE

효과적인 식생복원을 위한 참나무류 군락 식재의 성장량에 관한 연구

김미진 · 조은숙 · 정희정¹⁾ · 조동길^{1)*}

동아대학교 도시계획·조경학과 ¹⁾동아대학교 조경학과

Growth Degree of *Quercus* Community Plantations for Effective Vegetation Restoration

Mi-Jin Kim, Eun-Suk Cho, Hee-Jeong Jeong¹⁾, Dong-gil Cho^{1)*}

Department of Planning and Landscape Architecture, Dong-A University, Busan 49315, Korea

¹⁾Department of Landscape Architecture, Dong-A University, Busan 49315, Korea

Abstract

The present study evaluated growth factors affecting oak community plantations through literature review and a field survey. Specifically, 41 related literature sources were analyzed and field surveys were conducted to collect growth data. Previous studies were analyzed to identify variables with high frequency of use. The frequency of use was in the order of tree size > environment > planting density > forest age. Analysis of factors impacting height and diameter growth revealed that the growth rate of species other than *Quercus variabilis* was negative in the field survey. This may be because of differences between the actual trees planted and specifications in the construction drawings, which may be attributed to the site conditions and decisions made by the project subject during construction. Furthermore, simple linear regression analysis was conducted with time, height at planting, density, and species code as the independent variables and growth rate as the dependent variable. A strong positive linear correlation was noted between height and diameter. This work builds a foundation for developing a forest restoration model and simulation program based on a regression model derived from the four variables tested.

Key words : Forest restoration, Community planting, Tree growth, Statistical Analysis, Linear regression, Vegetation change

1. 서 론

우리나라는 산림면적의 감소와 함께 자연재해, 인위적 개발 등 산림훼손 면적이 매년 증가하고 있다. 산림 황폐화에 따른 산림생태계 교란과 건강성 저하는 자연재해 발생의 피해 확대 원인이기도 하며 백두대간 단절, 채광지 등으로 지형·식생·경관 등 훼손이 발생하고 있다. 산림청에서는 적극적으로 복원의 개념을 도입하고 각종 사업을 추진하고 있으나 훼손에 따른 복원대상

현황이 파악되어 있지 않아 중장기 계획수립과 이에 따른 체계적인 관리가 어려운 실정이다. 산림복원 대상지의 범위는 산림 습원·해안·도서 등으로 확대하고, 백두대간, DMZ 일원, 가리왕산 등 생태 우수지역의 대규모 및 다양한 훼손지 유형에 대한 선정기술 등의 과학적 역량이 요구되고 있다. 산림청은 2019년 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」을 개정하여 산림복원 기본계획을 10년마다 수립·시행(법 제42조의 3, 시행령 제 48조의 2) 하도록 하였다. 같은 법 제42조의 5에

Received 13 February, 2023; Revised 28 February, 2023;

Accepted 28 February, 2023

*Corresponding author : Dong-gil Cho, Department of Landscape Architecture, Dong-A University, Busan 49315, Korea
Phone : +82-51-200-7573
E-mail : cdgileco@dau.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1. Site subject to on-site investigation

Investigation period	Year	Location	Project name
2022. 6. 21. ~ 2022. 6. 22.	2016	Asan	Restoration project for resuscitation of resuscitation using idle site
	2016	Dangjin	Ecological forest restoration project for For the habitat of urban resident birds(scops owl) in neglected forests
	2017	Pyeongtaek	Deokmokje endangered species(amphibian) alternative habitat conservation and restoration project
	2020	Asan	Small organism habitat restoration project using the abandoned railroad site in Baebang-eup
2022. 9. 16. ~ 2022. 9. 17.	2015	Seoul Guro	Seoul Waryongsan damaged ecosystem restoration project
	2017	Seoul Jungnang	Damaged ecosystem restoration project at the foot of Yongmasan mountain
	2017	Uijeongbu	Oak forest with urban creatures, openmom ecological forest restoration project

서는 지방자치단체의 장 및 지방 산림청장은 훼손된 산림을 복원하기 위하여 매년 훼손된 산림의 실태를 조사하도록 규정하고 있다. 이러한 법적 기반에 근거하여 산림생태복원, 백두대간 마루금 생태축 복원, 대규모 산림복원 등 산림복원을 위한 다양한 사업을 진행하고 있으나 각 지방자치단체의 수요에 따라서 수동적으로 실시한다는 점에서 한계가 있다. 또한 산림복원 설계에 대한 산림복원 분야의 예측 모델이 부재함에 따라 중장기 산림복원 사업의 효과 예측이 부정확하고 객관적인 근거 획득 및 구체적 실행까지 이어지지 못하는 어려움이 있다. 이에 따라 산림복원 대상지 선정시 자연적·인위적 훼손지에 대한 유형별 분류체계 정립 및 합리적 기준에 따른 복원대상지 우선순위 선정기술이 필요하다. 복원수종 선정 시 설계 전 단계에서 활용할 수 있는 유형별 군락 식재 모델 발굴·보급을 통해 개선이 가능하며, 특히 종의 구성, 식생도입방식(종자, 묘목식재 등), 밀도, 목표기간, 연년생장량, 관리주기, 토양, 기타 환경 등의 인자로 식생 변화과정을 예측하는 시뮬레이션 프로그램을 개발·활용하면 목표종 선정에 따른 시행착오를 줄일 수 있다.

Kim et al.(2011)은 고정표본점의 정기평균생장량을 토대로 변수들을 추정하였으며 기존의 총평균생장량을 추정한 모델과 비교해 성장특성에 반영하여 개체목 성장 기능식(수관율, 잠재직경생장, 수정률, 고사율의 변수 추정치)을 도출하였다. Kang et al.(2018)은 제5차 국가산림자원조사 자료를 활용하여 지위지수, 임령, 밀도 등의 인자를 이용한 비선형식을 도출하고, 우세목 수고 추정 모델을 활용하여 평균 수고로 전환한 수고성장모델을 개발하였다. Lee(2009)는 전통적인

Empirical 성장모델에 환경인자를 독립변수로 사용하였으며 환경인자에 대한 성장모델의 변화를 분석하여 정도 높은 모델을 구축하였다. Moon et al.(2020)은 NFI(국가산림자원조사)에서 수집된 자료를 활용하여 유묘 및 유령림의 임목축적을 산출할 수 있는 방안을 제시하였으며 산림자원조사의 조사대상인 흉고직경 6 cm에 도달하는데 평균 12~13년이 소요되는 것으로 분석되었다. 생태복원지의 경우 복원 직후 식재수목의 생장으로 흉고단면적이 증가하는 한편, 고사목의 발생으로 개체수가 감소하는 등의 원인이 동일 대상지 내에서 혼재되어 있기 때문에 자연상태의 수목 성장과는 차이가 난다(Ki and Kim, 2012).

이와 같이 일반적인 성장 예측은 하나의 수종을 대상으로 산림에서 수확량을 예측하기 위한 개체목 중심의 성장모델이 만들어진다. 군락 식재의 경우 동반종 등의 다른 수종이 섞여 있으며, 빠르게 숲을 만들기 위한 생태복원지의 성장 예측 모델과 관련된 연구는 거의 없는 실정이다. 또한 우리나라 산림조사에서는 유령림(1영급), 흉고직경 6 cm 미만 등의 경우 임목축적에 관한 정보를 제공하지 않고 있으며(Moon et al., 2020) 대부분의 수목 성장 연구는 수령이 10-20년 이상인 연구가 많다. 이는 10년 이상의 임목 정보는 비교적 자료 수집이 용이하나, 초기생장에 대한 정보는 부족하여 현장조사를 통한 데이터 획득이 절대적으로 필요함을 의미한다.

따라서, 본 연구의 목적은 문헌조사와 현장조사 방법에 따른 성장 영향 인자 분석을 통해 참나무류 군락 식재의 성장량을 파악하는 것으로 이는 산림복원 시 식생 변화과정의 예측이 가능한 모델 개발과 시뮬레이션

Table 2. Growth data input by survey method

Survey method	Classification	Data items
Literature review	At the time of planting	Code, Tree species, Planting year, H(Height), B(Breast), W(Width), D(Density), Planting method, Control check
	N years later growth data	N(year post), NH(Height), Growth volume, Growth percentage, NW(Width), NR(Root), NB(Breast), ND(Density), Source, Planting position, remark
Field survey	At the time of planting	Code, Tree species, Planting year, H(Height), B(Breast)
	N years later growth data	N(year post), NH(Height), Growth volume, Growth percentage, NW(Width), NB(Breast), Source, Planting position, remark

프로그램 개발을 위한 기반으로 활용할 수 있다.

2. 범위 및 방법

2.1. 성장 데이터 구축

성장 데이터는 문헌조사와 현장조사 방법으로 구분하여 구축하였다. 문헌조사는 '성장'을 주요 키워드로 설정하여 조사하였으며 식재 기법과 성장력, 수종별 성장력, 성장예측 모델 3가지 항목으로 분류하여 정리하였다. 식재기법과 성장력 관련 연구는 식재방식에 따른 조림목 성장 특성(Cho et al., 2020), 조성목표 및 보전 강도에 따른 식재기준(National Institute of Ecology, 2015), 지속가능한 산림자원 관리지침(KFS, 2020), Ecological tree planting 식재기법(Miyawaki, 1999), 독일의 군집식재(cluster planting) 기술(Saha et al., 2017) 외 군락 식재 모델 관련 연구 16개를 추가적으로 분석하였다.

수종별 성장력과 관련된 연구는 산림생태계 복원 유형별 모니터링을 통한 연구(Kang, 2014), 자연림 복원을 위한 모듈군락식재지 효과성 연구(Han, 2022) 외 신갈나무, 상수리나무, 졸참나무, 굴참나무, 붉가시나무, 구실잣밤나무, 떡갈나무 등 참나무과 수종 관련 연구 13개를 추가적으로 검토하였다.

성장예측 모델 관련 연구는 비선형 성장 곡선 모델(Chapman-Richards, Gompertz, Logistic, Sloboda, Weibull, Yield table), 정기평균생장을 이용한 잣나무 임분의 흉고직경 성장예측모델 및 고사예측모델(Kim et al., 2011), 주요 산림수종의 동적 성장 모델(Kang et al., 2018), 환경인자를 이용한 직경 및 수고성장 모형 추정(Lee, 2009), 임목의 초기 성장 특성 파악(Moon et al., 2020) 연구를 검토하였으며 총 41개의

문헌을 파악하고 활용 빈도가 높은 변수를 도출하였다.

현장조사는 2022. 06. 21.~2022. 06. 22., 2022. 09. 16.~2022. 09. 17.에 실시하였으며 대상지 정보는 Table 1과 같다. 현장조사는 생태계보전부담금 반환사업(구 생태계보전협력금 반환사업) 중 1) 도면 확보가 가능한 지역, 2) 모니터링 데이터가 있는 지역, 3) 참나무류 식재지, 4) 산림·생태숲·서식처 복원 사업지역으로 선정했다. 도면은 자연환경보전사업 대행자들이 제공한 자료에 기초하였다. 수고(H)는 스타프와 직독식 수고측정기를 사용하여 주지의 최상단부까지 측정하였으며 흉고직경(B)은 윤척을 사용하여 지면에서 1.2 m 지점을 측정하였다. 수간이 1.2 m 이하에서 분지된 수목의 경우 분지된 수간마다 측정하였다.

2.2. 성장 영향 인자 분석

성장 영향 인자는 문헌조사와 현장조사에서 확인된 항목을 중심으로 조사 방법별 데이터 분석을 진행하였다. 문헌조사와 현장조사에서 획득한 항목별 데이터는 엑셀(2019, ver 1808)과 구글 스프레드시트(2022, ver 1.2022.38200)를 사용하여 정리하였고 조사 방법별 성장 데이터는 크게 식재 당시와 N년 후 성장 자료로 구분하여 입력하였다(Table 2). 수집된 데이터는 조사 방법에 따라 참나무류의 수종별 개체수를 파악하고 수목의 성장에 관련하여 다양한 영향 인자와 변수 분석의 기초데이터 구축을 위해 항목별 평균값, 최소값, 최대값, 결측치로 분석하였다. 또한 조사 방법별로 참나무류의 수종별 규격에 따라 수고성장, 직경생장의 성장률을 비교 분석하였다.

2.3. 성장량을 고려한 변수 분석

수집된 데이터를 활용한 변수 분석은 오픈소스 데이

Table 3. Comprehensive preceding research

References	Variable																
	tree size	planting density	community size	community interval	control	mulching	planting method	soil	environment	site index	index of similarity	Age of Stand	Defoliation Ingression	Competition Index	Crown	Volume	
Planting model	Szymanski(1986), Gockel(1995)	1	1	1	1												
	Lee et al.(1994)	1	1	1				1	1	1							
	Kang and Bang(2001)	1	1	1						1							
	Lee and Song(2011)		1							1		1					
	Kang et al. (2018)		1			1				1		1					
	Cho et al. (2020)	1	1	1	1												
Tree Growth volume	Choi and Yoo(2006)	1		1								1		1	1		
	Choi(2007)	1				1				1							
	Lee(2009)	1							1	1							
	Kim et al.(2011)	1								1			1	1			
	Kang et al. (2017)	1		1			1	1			1		1				
	Jeon(2018)	1					1	1								1	
	Park et al.(2018)	1								1							
	Han et al.(2019)	1							1								
	Park et al.(2019)	1								1			1				
	Cho et al.(2020)	1	1														
	Kang et al.(2020)	1		1						1		1	1				
	Park et al.(2015)	1										1					
	Park et al.(2020)	1										1					
	Son et al.(1997)	1															1
Son et al.(2003)	1									1							
Choi et al.(2014)	1	1							1			1				1	
Jeon(2008)	1								1							1	
Total	-	22	8	7	2	2	2	3	3	10	3	2	8	3	2	1	4

터 마이닝 및 데이터 시각화 툴인 Orange3(오렌지 툴, ver 3.32.0) 프로그램을 사용하여 변수 분석을 진행하였다. 해당 프로그램은 의사결정 분지도, 계층 클러스터링, 히트맵 등으로 데이터 분석을 수행하며, 통계적 분포와 박스 플롯, 산점도 등을 시각적으로 확인할 수 있어 데이터 마이닝과 데이터 시각화 모두에 유용한 프로그램이다.

변수 분석은 단순선형회귀분석을 진행하였으며 크게 산점도, 상관분석, 회귀분석의 과정으로 이루어진다. 데이터 추출은 조사 방법별 데이터 파일을 기준으로 수고생장과 직경생장의 파악이 가능한 인자만을 적

용하여 산점도를 분석하였다. 조사 방법별 수집한 자료의 규격 표기가 상이하여 분석의 편의를 위해 연구에서 활용할 자료 중 식재 당시와 N년 후 데이터가 모두 존재하는 값만을 추출하여 수고-수관폭, 수관폭-흉고직경, 수고-흉고직경, 수고-근원직경에 대한 상관분석을 통해 상관관계 유무를 입증하였다.

이를 토대로 문헌조사와 현장조사 데이터를 함께 고려하여 분석에 사용할 독립변수와 종속변수를 지정하였다. 독립변수는 생장 데이터 구축 시 활용 빈도가 높았던 변수와 생장 영향 인자 분석을 적용한 변수에서 수목 식재 시 조정할 수 있는 조건 중 영향이 큰 항목을

Table 4. By tree species Population count

Tree species	Count	
	Literature review	Field survey
<i>Quercus aliena</i> Blume	15	-
<i>Corylus heterophylla</i> Fisch. ex Trautv.	42	-
<i>Toxicodendron trichocarpum</i> (Miq.) Kuntze	21	-
<i>Quercus variabilis</i> Blume	19	6
<i>Juniperus rigida</i> Siebold & Zucc.	6	-
<i>Symplocos sawafutagi</i> Nagam.	15	-
<i>Zelkova serrata</i> (Thunb.) Makino	110	-
<i>Fraxinus rhynchophylla</i> Hance	88	-
<i>Elaeagnus umbellata</i> Thunb.	36	-
<i>Prunus sargentii</i> Rehder	43	-
<i>Quercus acutissima</i> Carruth.	57	28
<i>Lindera obtusiloba</i> Blume	28	-
<i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb.	271	8
<i>Acer tataricum</i> subsp. <i>ginnala</i> (Maxim.) Wesm.	10	-
<i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.	10	-
<i>Quercus serrata</i> Murray	201	49
<i>Rhododendron mucronulatum</i> Turcz.	51	-
<i>Styrax obassia</i> Siebold & Zucc.	92	-
<i>Sorbus alnifolia</i> (Siebold & Zucc.) K. Koch	7	5
<i>Euonymus alatus</i> f. <i>ciliatodentatus</i> Hiyama	20	-
And the rest	22	-
Total	1,164	96
	1,260	

변수로 선정하였다. 따라서 독립변수는 'N년 후'인 시간 데이터와 식재 당시 수고 데이터인 '수고(H/cm)', 식재 당시 밀도 데이터인 '밀도(주/m²)', 수종별 '코드'로 지정하였으며 종속변수는 '성장량(cm)'을 식재 당시 '수고(H/cm)'로 나눈 후 도출된 '성장률(%)' 데이터로 지정하여 각 항목의 상관관계 결과를 도출하였다. 상관관계에 따른 회귀분석으로 회귀 모델식을 도출하였으며 모델식은 수집한 성장 데이터가 수고만 제시된 경우가 많아 수고를 기준으로 도출하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1. 성장 데이터 구축 결과

수목의 성장량 확인을 위해 측정되는 수목규격 데이

터(수고, 수관폭, 흉고직경, 근원직경)가 확인된 문헌은 총 24개이며 '식재모델'과 '수목성장량'으로 재구분하여 활용 빈도가 높은 변수를 도출하였다(Table 3).

활용 빈도가 높았던 변수는 수목규격, 환경, 식재밀도, 임령 순으로 도출되었으나 환경의 경우 매우 다양한 요소를 종합하여 카운팅한 것으로 임의로 변경하기 어렵다. 이에 식재 시 조정이 가능하고 영향이 큰 항목인 수목규격, 식재밀도, 임령을 성장량 파악의 주요 변수로 사용하였다.

3.2. 성장 영향 인자 분석 결과

분석에 사용된 데이터는 문헌조사 1,164개, 현장조사 96개로 총 1,260개의 데이터를 수집하였다(Table 4). 문헌조사에서 확인된 수종별 개체수 데이터 중 백

Table 5. Statistical analysis of oak trees by item of literature survey

Species	Statistics	At the time of planting				N years later growth data			
		H	B	W	D	NH	NB	NW	ND
<i>Quercus aliena</i> Blume	Min	200.0	6.4	60.0	0.7	210.0	6.7	-	0.8
	Max	760.0	10.8	60.0	0.9	780.0	11.8	-	1.1
	Mean	426.7	8.7	60.0	0.7	486.7	9.3	-	0.9
<i>Quercus variabilis</i> Blume	Min	500.0	5.9	-	0.9	500.0	8.5	-	0.6
	Max	1,200.0	13.2	-	0.9	1,230.0	15.9	-	0.9
	Mean	901.6	9.5	-	0.9	927.9	10.7	-	0.8
<i>Castanea crenata</i> Siebold & Zucc.	Min	50.0	-	22.5	0.7	110.0	0.7	52.5	0.8
	Max	50.0	-	22.5	0.7	180.0	0.7	60.0	0.9
	Mean	50.0	-	22.5	0.7	133.3	0.7	55.0	0.8
<i>Quercus acutissima</i> Carruth.	Min	42.9	8.3	180.0	1.0	42.9	-	141.5	-
	Max	280.0	8.3	180.0	3.0	237.2	-	185.5	-
	Mean	53.6	8.3	180.0	2.0	78.3	-	163.5	-
<i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb.	Min	50.0	0.5	37.5	0.7	50.0	0.5	-	0.6
	Max	1,200.0	22.4	102.5	3.5	1,220.0	23.8	-	3.5
	Mean	406.7	5.1	64.7	2.1	458.1	5.2	-	1.6
<i>Quercus serrata</i> Murray	Min	50.0	2.0	67.5	0.3	59.8	2.1	-	0.6
	Max	1,100.0	16.8	67.5	1.0	1,300.0	20.7	-	1.1
	Mean	344.5	6.4	67.5	0.8	411.0	7.3	-	0.8

개 이상의 수종은 신갈나무(271), 졸참나무(201), 느티나무(110) 순이었으며, 다음으로 쪽동백나무(92), 물푸레나무(88) 순으로 많았다. 현장조사에서는 졸참나무(49), 상수리나무(28) 순으로 많았고 5개 이하의 수종은 기타로 분류했으며, 광대싸리(1), 때죽나무(2), 리기다소나무(1), 밤나무(3), 병꽃나무(4), 산돌배(2), 산딸나무(2), 음나무(5), 자귀나무(2)로 기타 수종은 22개이다.

문헌조사 항목별 세부적인 성장 영향 인자를 살펴보면, 식재 당시 수고의 경우 굴참나무(500-1,200 cm), 신갈나무(50-1,200 cm), 졸참나무(50-1,100 cm)가 갈참나무(200-760 cm), 밤나무(50 cm), 상수리나무(42.9-280 cm) 보다 넓게 분포되어 있으며 흉고직경은 신갈나무(0.5-22.4 cm), 졸참나무(2-16.8 cm)가 갈참나무(6.4-10.8 cm), 굴참나무(5.9-13.2 cm), 상수리나무(8.3 cm) 대비 넓은 분포를 갖는 것으로 나타났다(Table 5). N년 후 수고의 경우 식재 당시 대비 갈참나무 14%, 굴참나무 2.9%, 밤나무 166%, 상수리나무 46%, 신갈나무 12.6%, 졸참나무 19.3% 성장하였

으며, 흉고직경은 갈참나무 6.8% 굴참나무 12.6%, 신갈나무 2%, 졸참나무 14% 성장률을 보였다. 밀도의 경우 식재 당시 대비 N년 후 값이 감소할수록 활착 속도가 느리거나 부적절한 환경으로 수목이 고사하고, 증가할수록 개체수, 이입률이 높아졌음을 예측할 수 있으며 이는 수고 및 직경 생장이 잘 이루어지는 것으로 판단된다.

현장조사 항목별 세부적인 성장 영향 인자를 살펴보면, 식재 당시 수고의 경우, 상수리나무(275-400 cm), 졸참나무(250-275 cm)가 굴참나무(250 cm), 신갈나무(200-300 cm) 보다 넓게 분포되어 있으며 흉고직경은 상수리나무(6.3-12.5 cm), 신갈나무(3.3-6.7 cm)가 굴참나무(4.2 cm), 졸참나무(5.8-6.3 cm) 대비 넓은 분포를 갖는 것으로 나타났다(Table 6). N년 후 수고의 경우 식재 당시 대비 굴참나무 158.7%, 상수리나무 84.4%, 신갈나무 19.8%, 졸참나무 92.2% 성장하였으며, 흉고직경은 굴참나무 81%, 상수리나무 -3.9%, 신갈나무 -7.9%, 졸참나무 -3.2% 성장률을 보였다. 굴참나무 외 성장률이 음(-)의 값을 나타내는 것은 시공시 현장여건,

Table 6. Statistical analysis of oak trees by field survey item

Species	Statistics	At the time of planting		N years later growth data		
		H	B	NH	NB	NW
<i>Quercus variabilis</i> Blume	Min	250.0	4.2	550.0	6.9	265.0
	Max	250.0	4.2	800.0	8.5	410.0
	Mean	250.0	4.2	646.7	7.6	360.8
<i>Quercus acutissima</i> Carruth.	Min	275.0	6.3	303.0	2.6	125.0
	Max	400.0	12.5	1,000.0	13.0	390
	Mean	322.3	7.6	594.3	7.3	282.4
<i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb.	Min	200.0	3.3	273.0	3.5	175.0
	Max	300.0	6.7	387.0	7.7	255.0
	Mean	287.5	6.3	344.4	5.8	203.0
<i>Quercus serrata</i> Murray	Min	250.0	5.8	297.0	2.4	100.0
	Max	275.0	6.3	900.0	10.8	625.0
	Mean	274.0	6.2	526.5	6.0	288.2

사업 주체의 의견 등을 이유로 준공도면과 상이한 규격의 수목이 식재되었을 가능성이 높다.

문헌조사와 현장조사에 따른 최소값, 최대값, 평균 데이터가 없거나 같은 값으로 나타나는 것은 동일 규격의 수목을 식재하였거나 수종별 수량, 모니터링 정보가 부족하기 때문으로 사료된다.

현장조사에서 식재 당시의 수관폭, 밀도, 식재방법, 관리유무와 N년 후 근원직경, 밀도는 확인되지 않았다. 이는 식재 당시 데이터의 경우 도면 등 관련 자료에서 확인되지 않으며, N년 후 데이터의 경우 시공 당시 여건 반영 및 관리의 어려움 등을 이유로 도면과 상이하 여 측정 항목에서 배제하였다. 또한 일반적인 직경생장은 흉고직경의 성장을 의미하며, 연륜의 증가에 의한 비대생장을 말하므로(NFRI, 2003) 수고생장 및 직경생장에 대한 영향 인자만을 고려하였다. 참나무류 성장률의 경우 수고 성장률은 문헌조사 대비 현장조사에서 높은 성장률을 보였는데, 식재 당시 도면과 다른 규격의 수목을 식재하였거나 사업 대상지의 환경적 여건 등으로 활착이 잘되어 높은 성장률을 보이는 것으로 판단된다.

3.3. 성장량을 고려한 변수 분석 결과

조사 방법에 따른 성장량을 산점도로 표시한 결과, 문헌조사(상관계수 0.61)와 현장조사(상관계수 0.48) 모두 N년 후 수고-흉고직경 성장량의 상관이 좋은 것으

로 나타났다(Fig. 1 (c), (f)). 9개 산점도 중 현장조사 식재 당시 수고-흉고직경 성장량(0.93)의 상관이 가장 좋은 것으로 나타났으며(h), 다음으로 문헌조사의 N년 후 수고-근원직경 성장량(0.91)의 상관이 좋은 것으로 나타났다(i). 반면 문헌조사(0.03)와 현장조사(0.55)에서 N년 후 수관폭-흉고직경 성장량의 상관이 다른 변수들과 달리 상대적으로 낮게 나타났다(Fig. 1 (b), (e)). 수관폭은 수고와 흉고직경과 상관관계가 있다고 알려져 있는데, Kim and Oh(2015)는 흉고직경과 수관폭은 비례하며 특히 복엽을 가진 활엽수종들이 침엽수나 단엽을 가지는 수종들에 비해 높은 상관성을 나타낸다고 언급하였다. 본 연구에서는 현장조사에서 수관폭-흉고직경 성장량은 뚜렷한 상관을 보이는 반면 문헌조사는 상관관계가 있다고 보기 어렵다. 수고-수관폭((a), (d))의 상관계수가 수관폭-흉고직경의 상관보다 높은 것으로 나타나 문헌조사에서 도출된 결과는 Kim and Oh(2015)의 연구에 반증되는 결과이다.

문헌조사를 대상으로 상관분석 결과, N년 후 수고-수관폭은 38.43%(257주)로 뚜렷한 양의 선형 관계를 보이며, 수관폭-흉고직경은 0.11%(156주)로 상관관계가 거의 없고, 수고-흉고직경은 73.67%(733주)로 강한 양의 선형 관계를 보인다. 현장조사는 수목 96주를 대상으로 상관분석 결과, N년 후 수고-수관폭은 23.97%로 약한 선형 관계를 보이고, 수관폭-흉고직경은 30.62%로 나타났으며, 수고-흉고직경은 51.66% 반영

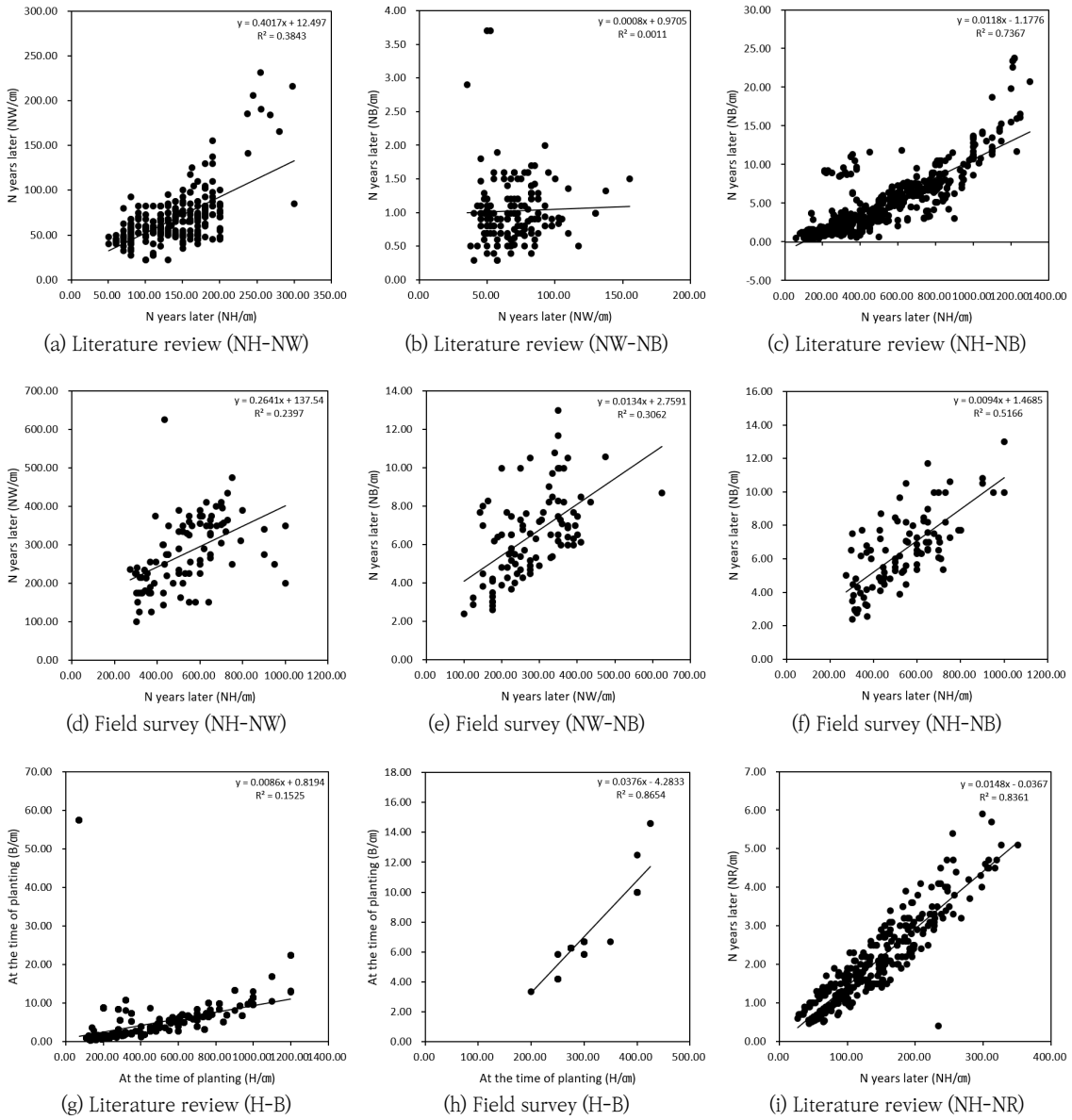


Fig. 1. Scatter plot by tree size according to survey method (At planting and after N years).

하며 뚜렷한 양의 선형 관계를 보인다. 식재 당시 수고-흉고직경 상관분석 결과, 문헌조사는 15.25%(629주)로 약한 양의 선형 관계, 현장조사는 86.54%로 강한 선형 관계이며 문헌조사 결과와 크게 차이를 보인다. 또한 문헌조사에서 수목 339주를 대상으로 N년 후 수고-근원직경의 상관분석 결과 데이터를 83.61% 반영하며 강

한 양의 선형 관계가 있는 것으로 나타났다. 조사 방법에 따라 결과 값이 크게 차이가 나는 것은 문헌조사와 현장조사 데이터 양의 편차가 크기 때문인 것으로 사료된다.

N년 후-생장률(%)의 상관계수는 +0.284로 적은 양(+의 상관관계)이 있어 식재 기간이 길어짐에 따라

성장률이 커진다. 식재 당시 수고-성장률의 상관계수는 -0.423으로 뚜렷한 음(-)의 상관관계가 있어 식재 규격이 작을수록 성장률이 커진다는 결과가 도출되었다. 식재밀도-성장률의 상관계수는 +0.248로 적은 양(+)의 상관관계가 있으며 식재밀도가 높아질수록 성장률이 커진다는 결과가 도출되었다. 이는 개체수가 증가할수록 신속히 양분을 얻기 위해 개체공간 경쟁 발생으로 빠른 성장을 유도한다는 결과로 해석할 수 있다.

‘성장률(%)’을 타겟으로 적용하였을 때 도출되는 4개의 변수를 사용한 회귀 모델식은 다음과 같으며, 이는 산림복원 모델 및 시뮬레이션 프로그램 개발을 위한 회귀식으로 활용 가능하다.

$$Y = 1a + 4.03011b - 1.80066c + 4.75181d$$

- Y = 성장률 (%)
- a = 식재규격 (수고)
- b = 식재기간
- c = 식재밀도
- d = 수종 (코드)

수집된 수고 데이터는 0~1,500 cm 범위로 분석되며, 시간에 따른 수고는 1~3년 경과 시 가장 많이 성장, 4~5년부터는 서식 환경 등 기타 변수에 따라 다양하게 나타난다. 같은 수종이라 할지라도 입지와 임분 관리에 따라 수고생장은 매우 다양하게 발달하며, 지위가 좋을수록 수고의 연년생장곡선은 일찍 정점에 도달하고, 정점 도달후의 감소도 빠르게 이루어진다. 따라서 수령이 증가할수록 지위에 따른 연년생장곡선의 차이는 적어진다(NFRI, 2003).

조사 방법별 성장 데이터는 식재 당시와 N년 후 모두 존재하는 값이 한정되어 있고, 문헌조사 대비 부족한 현장조사 데이터 구축에 따라 결과 값의 변동 가능성을 배제할 수 없다. 또한 수고생장을 중심으로 성장률을 분석하여 실질적인 모델 개발을 위한 식으로 적용에는 한계가 있다. 직경생장에 대한 성장률과 수종별 성장량, 환경적 여건 등을 고려한 성장모델 개발을 통해 장기 성장 예측이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

문헌조사 및 현장조사를 통해 도출된 정량적 데이터

를 활용하여 참나무류 군락 식재의 성장량을 파악하고 회귀 모델식을 도출하였다.

산림청에서는 관련 법 개정을 통해 주요 산림복원지역에서 10년 이상의 모니터링을 의무화하고 있는 만큼, 최근의 산림복원 사례들을 문헌조사를 통해 리뷰하고 현장조사를 실시하였다. 수목의 생장은 기반 환경, 위치적·지리적 여건 등의 요인과 관련이 깊어 독립변수로 고려해야 하는 항목이나 초기 데이터 부족으로 모든 변수를 파악하기 어렵다는 한계가 있다.

모니터링을 통해 복원 효과를 유지시키고 관리하는 것이 복원사업에서 가장 중요하나, 현장조사 결과 준공도면과 상이한 경우가 많았다. 이는 지자체의 관리 미흡, 시공시 현장 여건 변화, 환경에 적응하지 못한 개체의 고사 등으로 인하여 수목이 대체된 경우로 판단된다. 실제로 생태계보전부담금 반환사업의 복원 비용은 생태계보전부담금으로 지급되지만, 유지 및 관리를 위한 비용은 전부 지자체의 몫으로 남겨진다. 따라서 별도의 관리 비용을 확보하지 못하여 방치되는 사례도 빈번하다. 이는 복원의 목적 중 하나인 생물다양성의 증진 효과를 저해할 뿐만 아니라 복원사업을 실패로 이끄는 요인이기도 하다.

본 연구는 산림복원 분야에서 학술적으로 유의미한 이론적 배경을 확립하고 연계 연구의 기초 자료를 제공하며 산림복원 시 최적의 복원 기법을 적용할 수 있음과 동시에 복원 후 발달 단계가 예측됨에 따라서 복원 후 관리의 효율성, 경제성, 생태적 측면에서의 발전을 가져올 수 있다. 우리나라에서 추진중인 산림복원 사업에 적용 가능하며, 이를 통하여 효율적인 사업 전개와 복원 후 효율성을 높이는데 기여할 수 있다. 성장량을 토대로 5년, 10년, 20년 뒤 복원 군락이 어떤 형태와 성장량을 보이는지 식생 변화과정의 예측이 가능한 모델 개발과 시뮬레이션 프로그램 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원)의 재원으로 산림과학기술 연구개발사업(2021358B10-2223-BD01)의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한, 이 연구 논문을 위해 현장조사 및 데이터 분석에 도움을 준 동아대학교 문다휘, 조종훈, 이혜지 연구원에게 감사드립니다.

REFERENCES

- Cho, M. S., Kwon, B. R., Kim, W. G., Jeong, D. H., 2020, Research on the development of afforestation technology for major hardwood species, Research report No. 20-03, National Institute of Forest Science(NIFoS), Seoul, Korea.
- Choi, J. K., 2011, Development of Allometry and individual basal area growth model for major species in Korea, Journal of forest and environmental science, 27(1), 47-54.
- Choi, J. K., Yoo, B. O., 2006, Diameter growth characteristics of *Quercus mongolica* and *Quercus variabilis* in natural deciduous forests, J. Korean Soc. For. Sci., 95(1), 131-138.
- Choi, K. M., Kim, M. I., Lee, W. K., Chung, D. J., Yun, B. H., Kim, C. H., 2014, Estimating the radial growth response of *Quercus mongolica* using climatic and topographic condition in south Korea, KSFMI-P5, Korean Forest Society, 2014(2014), 185.
- Choi, W. K., 2007, An Dadohaehaesang national park evergreen broad-leaved forest restoration work monitoring, Master's thesis, Honam University, Gwangju, Korea.
- Gockel, H. A., 1995, Die Trupp-Pflanzung, Ein neues Pflanzschema zur Begründung von Eichenbeständen. Forst und Holz, 50, 570-575.
- Han, S. H., Kim, J. H., Kang, W. S., Hwang, J. H., Park, K. H., Kim, C. B., 2019, Monitoring soil characteristics and growth of *Pinus densiflora* five years after restoration in the Baekdudaegan ridge, Korean J. Environ. Ecol., 33(4), 453-461.
- Han, Y. H., 2022, A Study on the effectiveness of modular community planting for natural forest restoration, Ph. D. Dissertation, Sunchon National University, Sunchon, Korea.
- Han, Y. H., Park, S. G., 2022, Experimental study on modular community planting for natural forest restoration, Korean J. Environ. Ecol., 36(3), 338-349.
- Jeon, E. J., 2008, A Study on the estimation of growth rates and amounts of volume stocks by forest type and species in Korea, Master's thesis, Kookmin University, Seoul, Korea.
- Jeon, G. S., 2018, A Study on the secular change analysis of monitoring plant for revegetation of ecological restoration on the unused road, Jour. Korea Soc. For. Eng., 16(3), 165-182.
- Kang, H. K., Bang, K. J., 2001, Restoration model of *Quercus mongolica* community in the case of Korean national capital region, Korean Institute of Landscape Architecture, 28(6), 1-15.
- Kang, H. M., 2014, A study for restoration effects through monitoring of forest ecosystem restoration types, Ph. D. Dissertation, Pusan National University, Miryang, Korea.
- Kang, H. M., Choi, S. H., Kim, D. H., Song, J. T., 2017, A Study on the restoration effects of vegetation restoration types, Korean J. Environ. Ecol., 31(2), 174-187.
- Kang, H. M., Kim, D. H., Park, S. G., 2020, Characteristics of *Quercus mongolica* dominant community on the ridge of the Nakdong-Jeongmaek -Focusing on the Baekbyeongsan, Chilbosan, Baegamsan, Unjusan, Goheonsan, Gudeoksan-, Korean J. Environ. Ecol., 34(4), 318-333.
- Kang, J. T., Son, Y. M., Yim, J. S., Lee, K. S., Lee, S. J., Ko, C. W., 2018, Development of dynamic growth models for major forest tree species, Research report No. 18-15, National Institute of Forest Science (NIFoS), Seoul, Korea.
- KFRI, 2003, Development of forest accumulation growth rate application method, Final report No. TRKO 201300009028, Korea Forest Research Institute, Seoul, Korea.
- Korea Forest Service (KFS), 2020, Ministry of Government Legislation(MOLEG), [https://www.law.go.kr/Administrative_rules/Sustainable_forest_resources_management_guidelines/\(1454,20200615\)](https://www.law.go.kr/Administrative_rules/Sustainable_forest_resources_management_guidelines/(1454,20200615)).
- Ki, K. S., Kim, J. Y., 2012, Monitoring of plant community structure change for four years (2007~2010) after riparian ecological restoration, Nakdonggang(River), Korean J. Environ. Ecol., 26(5), 707-718.
- Kim, S. Y., Seol, A. R., Chung, J. S., 2011, Development of diameter growth and mortality prediction models of *Pinus koraiensis* based on periodic annual increment, J. Korean Soc. For. Sci., 100(1), 1-7.
- Lee, K. J., Choi, S. H., Kang, H. K., 1994, Natural vegetation restoration and management plan by ecological approach, Korean J. Environ. Ecol., 8(1), 58-67.
- Lee, M. J., Song, H. K., 2011, Vegetation structure and ecological restoration model of *Quercus mongolica* community, J. Korean Env. Res. Tec., 14(1), 57-65.
- Lee, S. H., 2009, Estimation of diameter and height growth equations using environmental variables, J. Korean Soc. For. Sci., 98(3), 351-356.
- Lee, S. J., Yim, J. S., Kang, J. T., 2019, Standard carbon uptake of major forest species, NIFoS Forest Policy Issue No. 129, National Institute of Forest Science (NIFoS), Seoul, Korea.
- Miyawaki, A., 1999, Creative ecology: Restoration of

- native forests by native trees, *Plant Biotechnology*, 16(1), 15-25
- Moon, G. H., Moon, N. H., Yim, J. S., Kang, J. T., 2020, Methodological consideration for estimating growing stock of young forests based on early growth characteristics of standing trees in Korea, *J. Korean Soc. For. Sci.*, 109(3), 300-312.
- National Institute of Ecology, 2015, Natural environment conservation project design guidelines, National Institute of Ecology, Seochon, Korea.
- Park, B. J., Cheon, K. I., Kim, J. J., Joo, S. H., Byeon, J. G., 2018, Stand structure of long term monitoring sites for *Quercus mongolica* in Mt. Myeonbong, *Journal of Agriculture & Life Science*, 52(3), 133-144.
- Park, B. J., Byeon, J. G., Huwanbin, Butoto, I. W. R., Cheon, K. I., 2019, Study for change of woody vegetation in *Quercus mongolica* forest, Mt. Myeonbong, *Journal of Agriculture & Life Science*, 53(2), 173-189.
- Park, J. H., 2002, Growth characteristics of *Quercus acutissima* seedlings planted in strip clear-cutting area of *Pinus rigida* stands, Master's thesis, Chonnam National University, Gwangju, Korea.
- Park, J. H., Oh, K. I., An, K. W., Kim, C. S., 2004, Growth characteristics of *Quercus acutissima* seedlings planted in various levels of strip clear-cutting of *Pinus rigida* plantations, *J. Korean For. Soc.*, 93(5), 360-371.
- Park, J. H., Jung, S. Y., Yoo, B. O., Ju, N. G., Lee, K. S., Park, Y. B., Kim, H. H., 2015, Comparison of height and DBH growth characteristics for *Quercus acuta* and *Quercus serrata* in southern Korea, *Journal of Agriculture & Life Science*, 49(6), 19-26.
- Park, J. H., Chung, S. H., Kim, S. H., Lee, S. T., 2020, Estimation of site index curve for 6 Oak species in Korea, *Journal of Agriculture & Life Science*, 54(3), 27-33.
- Saha, S., Kuehne, C., Bauhus, J., 2017, Lessons learned from oak cluster planting trials in central Europe, *Canadian Journal of Forest Research*, 47(2), 139-148.
- Son, Y. M., Lee, K. H., Chung, Y. G., 1997, Stand growth estimation using nonlinear growth equations, *Jour. Korean For Soc*, 86(2), 135-145.
- Son, Y. M., Lee, K. H., Chung, Y. G., Kwon, S. D., 2003, Growth characteristics and model development in four major *Quercus spp.*, Management·economy·measurement sectors, *Korean Forest Society*, 2003(2003), 71-73.
- Szymanski, S., 1986, Die Begründung von Eichenbeständen in "Nest-Kulturen", *Forst-und Holzwirt*, 41(2), 3-7.
-
- Integrated Master's and Doctorate Course, Mi-Jin Kim
Department of Planning and Landscape Architecture,
Dong-A University
mjkim741@naver.com
 - Integrated Master's and Doctorate Course, Eun-Suk Cho
Department of Planning and Landscape Architecture,
Dong-A University
y0942y@naver.com
 - The Master's Course, Hee-Jeong Jeong
Department of Planning and Landscape Architecture,
Dong-A University
pmn05125@naver.com
 - Assistant Professor, Dong-Gil Cho
Department of Landscape Architecture,
Dong-A University
cdgileco@dau.ac.kr