

백두대간 마루금 복원사업지에서의 5년 경과 후 토양특성 및 소나무 생장 모니터링^{1a}

한승현² · 김정환³ · 강원석^{4*} · 황재홍⁵ · 박기형⁶ · 김찬범⁷

Monitoring Soil Characteristics and Growth of *Pinus densiflora* Five Years after Restoration in the Baekdudaegan Ridge^{1a}

Seung Hyun Han², Jung Hwan Kim³, Won Seok Kang^{4*}, Jae Hong Hwang⁵, Ki Hyung Park⁶, Chan-Beom Kim⁷

요약

본 연구는 이화령, 육십령, 벌재 등 백두대간 마루금 생태복원사업지에서 복원사업 5년 경과 후 토양특성과 소나무 생장을 모니터링하고 토양특성이 소나무 생장에 미치는 영향을 분석하였다. 복원사업은 소나무 조림목을 이용하여 2012년-2013년에 완료되었으며, 2018년 4월에 각 복원사업지에서의 토양을 채취하고, 소나무의 수고와 흉고직경을 측정하였다. 토양 pH는 복원초기에 비해 크게 변화가 없었으나, 이화령과 벌재에서 7.7과 6.4의 높은 값을 보였다. 복원초기에 비해 유기물함량은 전반적으로 70-80%가 감소하였고, 유효인산은 크게 변화가 없었다. 유기물함량의 감소는 복원 후 초기 고사유기물의 유입 및 분해가 제한됨에 따라 나타난 것으로 판단된다. 소나무 수고성장률($m\ yr^{-1}$)은 지역에 따라 유의한 차이를 보였는데, 육십령에서 1.02로 가장 높았으며, 그 뒤로 벌재(0.75), 이화령(0.17)순이다. 수고성장률은 토양 pH, 양이온함량(Na, Ca 등)과 부의 상관관계를 보인 반면, 유효인산과는 양의 상관관계를 보였다. 특히 이화령 지역의 저조한 소나무 성장률은 높은 토양 pH로 인한 낮은 양분가용성과, 높은 Na와 Ca 농도로 인한 뿌리로의 수분흡수 저해로 인한 것으로 판단된다. 한편 복원 5년 경과 후 나타난 유기물함량의 급격한 감소는 향후 화학비료, 바이오차 등을 이용한 토양개량이 필요할 것으로 보인다.

주요어 : 산림관리, 생태복원, 수고성장률, 양분가용성, 토양환경

1 접수 2019년 5월 27일, 수정 (1차: 2019년 7월 4일, 2차: 2019년 7월 10일), 게재확정 2019년 7월 11일

Received 27 May 2019; Revised (1st: 4 July 2019, 2nd: 10 July 2019); Accepted 11 July 2019

2 국립산림과학원 산림육성·복원연구과 박사연구원, Div. of Forest Restoration & Resource Management, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea(aryian@naver.com)

3 국립산림과학원 산림육성·복원연구과 석사연구원, Div. of Forest Restoration & Resource Management, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea(biostatistics@korea.kr)

4 국립산림과학원 산림육성·복원연구과 임업연구사, Div. of Forest Restoration & Resource Management, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea(wons4457@korea.kr)

5 국립산림과학원 산림육성·복원연구과 임업연구관, Div. of Forest Restoration & Resource Management, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea(topsoil@korea.kr)

6 국립산림과학원 산림육성·복원연구과 임업연구사, Div. of Forest Restoration & Resource Management, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea(bear1127@korea.kr)

7 국립산림과학원 산림육성·복원연구과 석사연구원, Div. of Forest Restoration & Resource Management, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea(misdb83@gmail.com)

a 이 논문은 국립산림과학원에서 지원하는 연구비(FE0100-2018-02)에 의하여 연구되었음.

* 교신저자 Corresponding author: wons4457@korea.kr

ABSTRACT

This study was conducted to monitor the soil characteristics and growth of *Pinus densiflora* and to determine the effect of soil characteristics on growth rate five years after an ecological restoration project in Baekdudaegan ridge including Ihwaryeong, Yuksimnyeong, and Beoljae sites. The ecological restoration project was executed with the forest of *P. densiflora* in 2012-2013. In April 2018, we collected soil samples from each site and measured the height and the diameter at breast height (DBH) of *P. densiflora*. Although there was no significant change of soil pH compared to the early stage of restoration (one year after the project), it was high in Ihwaryeong, and Beoljae with values of 7.7 and 6.4, respectively. Also, the organic matter decreased by 70-80%, and the available phosphorus (P) was unchanged in three restoration sites. The decreased organic matter can be attributed to restriction of inflow and thus decomposition of litter in the early stage after the restoration. The tree height growth rate (m yr^{-1}) of *P. densiflora* in Yuksimnyeong was the highest at 1.02, followed by Beolja at 0.75 and Ihwaryeong at 0.17. The height growth rate showed negative relationships with soil pH and cations, including Na and Ca concentrations and a positive relationship with available phosphate. The low growth rate in the Ihwaryeong site, in particular, might result from the poor nutrient availability due to high soil pH and the decrease in water absorption into the root due to high Na and Ca concentrations. The substantial reduction of organic matter after five years indicates that the need for soil improvement using chemical fertilizer and biochar.

KEY WORDS: ECOLOGICAL RESTORATION, FOREST MANAGEMENT, HEIGHT GROWTH RATE, NUTRIENT AVAILABILITY, SOIL ENVIRONMENT

서론

백두대간은 백두산에서 지리산에 이르기까지 하나의 산줄기 로만 이어져있고 지리적으로 1,400km 이상에 달하는 우리나라 생태계에 중요한 축이다. 또한 한반도 관속식물의 38%, 특산식 물의 25%, 희귀식물의 19% 등 중요한 자연자원이 분포할 정도 로 생물다양성이 높고, 다양한 산림의 공익적 기능을 제공해주 고 있어 보전가치가 높다(You *et al.*, 2009; Byeon *et al.*, 2014). 그러나 백두대간의 능선을 의미하는 마루금은 1970년 대 이후 도로, 댐 등의 개발사업으로 심각한 수준으로 훼손되었 다(Lee *et al.*, 2017). 백두대간이 단절됨에 따라 생태계 건강 성이 저하되고, 토사유출, 산사태 등의 재해에 취약해졌으며 등산객들에게도 안전사고 위험에 노출되었다(NIFoS, 2018).

생태적 복원은 지속가능한 개발과 보전의 기본적인 요소이 며, 생태적 피해에 대한 회복과 더불어 삶의 질을 향상시킨다 (Shackelford *et al.*, 2013). 백두대간을 연결·복원하기 위하여 2012년부터 이화령, 육십령, 구룡령, 별재, 정령치 등의 훼손된 마루금을 대상으로 복원사업이 지속적으로 진행되어 왔다. 백 두대간 마루금 복원사업의 목적은 역사성, 상징성 및 경관 증진 등의 인문학적 목적과 생태계 연속성, 생물다양성 증진 등의

생태적인 목적이 동반되어 있다(Lee *et al.*, 2017).

복원사업 시 적합한 환경을 조성하는 것뿐만 아니라 복원 후 지속적으로 관리 및 모니터링하는 것이 중요하다(NIFoS, 2018). 이러한 과정을 통하여 복원의 성공여부를 확인할 수 있고 복원 실패 시 요인을 분석하는데 중요한 자료로 활용될 수 있다(Park *et al.*, 2016). 생태적 복원 시 식생의 생육현황 모니터링뿐만 아니라 토양 온도, 수분함량 등의 토양미기후와 토양 pH, 양이온치환용량(Cation Exchange Capacity, CEC), 유기물함량 등의 토양 화학적 특성도 모니터링 되어야 한다 (Jeong *et al.*, 2002; Ruiz-Jaen and Aide, 2005). 특히 유효인 산, 무기질소 등의 화학적 특성은 식물의 생리적인 활동에 있어 서 필수 영양소로서 결핍 시 생장저하를 야기하므로(Nakaji *et al.*, 2001; Yu *et al.*, 2008), 지속적인 관리가 필요하다. 본 연구는 이화령, 육십령, 별재 마루금 복원사업지에서 소나무 식재 5년 경과 후 토양특성과 소나무 생장을 모니터링 하고, 소나무 생장에 밀접한 영향을 주는 토양특성을 구명하고자 수 행되었다.

연구방법

1. 연구대상지

본 연구는 충청북도 괴산군 연풍면에 위치한 이화령, 전라북도 장수군 장계면에 위치한 육십령, 경상북도 문경시 동로면에 위치한 별재 등 3개 지역의 백두대간 마루금 복원사업지를 대상으로 연구를 수행하였다. 이화령은 2012년 4월부터 11월에 걸쳐 수고 8.0-10.0 m와 3.0-5.0 m의 소나무 조림목과 굴참나무, 물푸레나무, 산벚나무, 산초나무, 청단풍나무 등을 식재하였다. 육십령은 2011년 12월부터 2013년 6월에 걸쳐 수고 8.0-10.0 m와 1.5-2.5 m 소나무 조림목과 털팽나무, 산초나무 등을, 별재는 2012년 4월부터 2013년 7월에 걸쳐 수고 8.0-10.0 m와 2.0-3.0 m 소나무 조림목과 산벚나무, 생강나무, 청단풍나무 등을 이용하여 복원사업을 진행하였다. 초기 소나무 조림목의 식재밀도는 이화령이 1200 본 ha⁻¹, 육십령이 1600 본 ha⁻¹, 별재가 2300 본 ha⁻¹이다. 복원사업지의 토성은 이화령, 육십령, 별재 순으로 각각 사질식양토, 사양토, 사질식양토이며, 석력함량은 76.8%, 53.9%, 61.2%이다(Table 1). 복원사업지에 대한 구체적인 개황은 Park *et al.*(2013)에 제시되어 있다. 3개 지역의 마루금 복원사업지에는 각 3개의 10 × 10 m의 조사구를 구획하였다.

3개 지역의 연평균기온과 평균 연강수량은 기상청에서 제시한 한국기후표(KMA, 2011)에 제시된 주위에 가장 가까운 관측소 자료를 이용하여 제시하였다(이화령: 충주 관측소, 육십령: 장수 관측소, 별재: 문경 관측소). 3개 지역의 토양수분과 온도는 토양수분센서(Water Scout SM 100, Spectrum Technologies, Inc.)와 토양 온도 센서(External Temperature Sensors, Spectrum Technologies, Inc.)를 연구대상지 중심부의 토양 깊이 30 cm에 묻어서 2017년 일 년 동안 측정하였다. 데이터는 데이터 로거(WatchDog 1650 Data Logger, Spectrum Technologies, Inc.)를 이용하여 1시간 간격으로 저장하였다.

최근 30년간(1981년-2010년) 이화령, 육십령, 별재 지역의

연평균기온은 각각 11.2°C, 10.5°C, 11.8°C이며, 평균 연강수량은 각각 1212.7 mm, 육십령이 1464.3 mm, 별재가 1259.8 mm이다(KMA, 2011). 2017년 1월부터 2017년 12월까지의 일 년 동안 이화령, 육십령, 별재 복원사업지의 토양 깊이 30cm에서의 연평균기온은 각각 12.8°C, 10.4°C, 10.6°C이며, 토양수분함량은 각각 10.7 vol%, 9.2 vol%, 14.4 vol%이다(Figure 1).

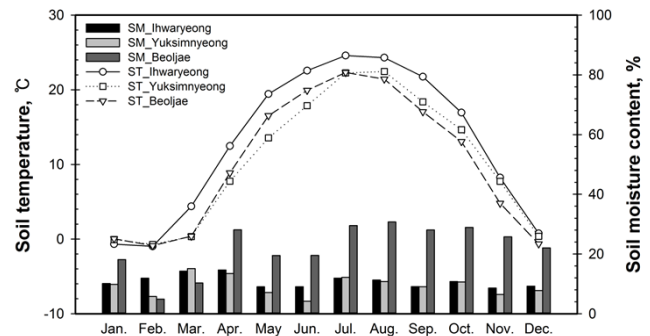


Figure 1. (a) soil temperature and (b) soil moisture content in the Ihwaryeong, Yuksimnyeong, and Beoljae sites from January to December, 2017.

2. 토양특성 분석

2018년 4월에 토양 화학적 특성(pH, 양이온치환용량, K, Na, Ca, Mg, 유효인산, 유기물함량 등)을 분석하기 위해 각 복원사업지의 3개의 조사구에서 임의의 한 지점에서 0-10 cm 깊이의 토양을 채취하였다. 채취한 토양 샘플은 지퍼백에 봉인하여 실험실로 운반하여 풍건시켰다. 풍건된 토양은 2 mm 토양체를 이용하여 2 mm 이상의 석력을 걸러냈다. 토양 pH는 풍건 토양 5 g으로 1:5 증류수 방법과 pH 미터기를 이용하여 측정하였다. 총 양이온치환용량은 Brown 간이법에 따라 풍건토양 5 g을 1M NH₄OAc(pH7.0) 용액과 1M Acetic acid(pH 2.31)을 각각 풍건토양 5 g에 가하여 H⁺ 이온과 총 양이온의 합으로

Table 1. Status of Ihwaryeong, Yuksimnyeong, and Beoljae sites.

	Ihwaryeong	Yuksimnyeong	Beoljae
Location	36°44'55.8"N 128°02'06.7"E	35°41'54.9"N 127°39'44.8"E	36°48'07.9"N 128°19'08.8"E
Altitude	551 m	710 m	648 m
Soil texture (sand:silt:clay)	Sandy loam (52:18:30)	Sandy loam (72:11:17)	Sandy clay loam (53:20:27)
Rock content	76.8%	53.9%	61.2%
Mean Annual temperature	11.2°C	10.5°C	11.8°C
Annual precipitation	1212.7 mm	1464.3 mm	1259.8 mm

양이온치환용량을 산출하였다. 각각의 치환성 K, Na, Ca, Mg 과 유효인산은 풍건토양 3 g으로 Mehlich II 방법으로 추출하여 유도결합플라즈마(ICP)가 장착된 ICP-OES (Varian, Vista PRO, Australia) 분석기를 이용하여 측정하였다. Mehlich II 추출액은 NH_4F , NH_4Cl , CH_3COOH , HCl 용액을 이용하여 제조하였다. 유기물함량은 회분로를 이용하여 500°C 에서 1시간 동안 강열하는 강열감량법으로 측정하였다. 모든 토양의 화학적 특성 분석법은 농촌진흥청에서 발간한 토양화학분석법을 참고하였다(NAS, 2010). 3개 지역에서의 2013년 토양환경자료는 Park *et al.*(2016)에 제시된 값을 인용하였다.

3. 식생조사

2018년 4월에 각 조사구 내에 1.6-5.0 m 소나무 조림목(복원 시 기준)을 대상으로 수고와 흉고직경(Diameter at Breast Height; DBH)을 측정하였다. 수고는 수고봉과 목측으로 측정하였고 흉고직경은 직경테이프를 이용하였다. 소나무의 생장률은 초기 데이터가 있는 수고에 한하여 경과년수 대비 수고의 변화량을 가지고 제시하였다. 식재된 소나무의 풍해에 영향을 확인할 수 있는 수고 대비 흉고직경 비율(Height/DBH ratio; H/D율)을 제시하였다.

4. 통계분석

일원 분산분석(one-way ANOVA)를 이용하여 3개 지역간 토양 화학적 특성(pH, 양이온치환용량, K, Na, Ca, Mg, 유효인산, 유기물함량 등)과 소나무의 수고생장률 및 H/D율의 차이를 분석하였으며, Duncan을 이용하여 사후검정하였다. 토양 화학적 특성과 수고생장률 및 H/D율간의 관계를 분석하기 위하여 상관분석(correlation analysis)을 실시하였고, 상관관계

가 유의하게 나올 경우 인자간의 관계를 종합적으로 제시하기 위해 주성분요인분석(principal component analysis; PCA)을 실시하였다. 주성분요인분석은 R 3.5.3 software(R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria)을 이용하였으며, 주성분요인분석을 제외한 모든 통계분석에는 SAS 9.4 software(SAS Institute Inc., USA)를 사용하였으며 유의수준은 0.05로 설정하였다.

결과 및 고찰

1. 토양 화학적 특성

복원사업지의 토양 pH, 양이온치환용량, K, Na, Ca, Mg, 유효인산 등은 지역에 따라 유의한 차이를 보인 반면, 유기물함량은 지역에 따라 차이가 나타나지 않았다(Table 2). 토양 pH는 육십령이 5.88 ± 0.25 으로 가장 낮았으며, 이화령이 7.68 ± 0.13 으로 가장 높았다. K를 제외하고 Na, Ca, Mg은 모두 이화령에서 다른 지역에 비해 유의하게 높은 값을 보였다. 토양 pH는 복원 초기인 2013년에 비해 5년 경과 후 3개 지역 모두 큰 변화가 없었으며, 이화령과 별재는 일반 산림토양에 비해 높은 토양 pH를 나타냈다(Table 2). Won *et al.*(2006)과 Yang and Cho *et al.*(2019)에서도 각각 산불피해지 소나무 묘목 복원 5년 경과 후와 일반 느티나무 묘목 조림 6년 경과 후에 토양 pH는 유의한 변화가 나타나지 않았다.

양이온치환용량은 육십령을 제외하고 이화령과 별재는 각각 7.6과 1.0 cmolC kg^{-1} 증가하는 것으로 나타났다.

일반적으로 양이온치환용량은 모암의 성질, 광물의 양, 부식함량 등에 의해 영향을 많이 받으며(Jeong *et al.*, 2002; Min

Table 2. Changes in soil chemical properties (mean±standard error) after five years in Ihwaryeong, Yuksimnyeong, and Beoljae sites.

Site	Year	Soil pH	CEC (cmolC kg^{-1})	K (cmolC kg^{-1})	Na (cmolC kg^{-1})	Ca (cmolC kg^{-1})	Mg (cmolC kg^{-1})	AP (mg kg^{-1})	OM (%)
Ihwaryeong	2013*	7.8	20.6	-	-	-	-	8.0	4.5
	2018	7.7±0.1a	28.2±3.5a	0.41±0.02a	0.37±0.03a	34.3±4.9a	3.55±0.64a	8.1±1.8b	0.8±0.2
Yuksimnyeong	2013*	5.9	8.2	-	-	-	-	53.6	1.3
	2018	5.9±0.2b	7.2±0.7b	0.28±0.03b	0.09±0.00b	1.45±0.11b	0.54±0.06b	58.3±3.1a	0.5±0.0
Beoljae	2013*	6.6	5.9	-	-	-	-	12.2	2.0
	2018	6.5±0.4b	6.9±0.2b	0.22±0.03b	0.07±0.01b	4.30±0.40b	3.09±0.35a	16.6±2.6b	0.4±0.1

CEC: cation exchange capacity, OM: organic matter, AP: available phosphorus. Values followed by a different letter are significantly different ($p<0.05$).

Asterisk indicates the data from Park *et al.*(2016).

et al., 2003), 특히 모암에 따라 높은 Ca, Na 농도는 양이온치환 용량도 높게 유지된다. 이는 암석이 풍화되어 유리된 염류가 운반, 집적, 용탈 등의 과정을 통하여 토양에 흡착된 염류를 해리시키면서 알칼리성을 나타내기 때문이다(Son *et al.*, 2016). 본 연구에서도 이화령은 복원 경과 후 Ca 농도가 $34.30 \pm 4.94 \text{ cmolC kg}^{-1}$ 으로 육십령과 벌재에 비해 8-24배 높은 수치를 보였으며

소나무림 적정 Ca 농도 기준으로 36배에 해당되는 수치이다(NIFoS, 2012b). Na 농도(cmolC kg^{-1})는 이화령에서 0.37으로 가장 높았으며, 육십령은 0.09, 벌재는 0.07 값을 보였다. 이는 소나무림 적정 Na 농도 기준이 $0.27 \text{ cmolC kg}^{-1}$ 임을 감안하면 이화령은 기준보다 높고, 육십령과 벌재는 기준보다 낮았다(NIFoS, 2012b). 이러한 이화령에서의 높은 Ca와 Na 농도는 다른 지역에 비해 높은 토양 pH와 양이온치환용량을 야기했다(Table 2; Park *et al.*, 2016). 유효인산(mg kg^{-1})은 육십령이 58.31 ± 3.15 이 가장 높았고, 이화령이 8.06 ± 1.76 으로 가장 낮았다. 유효인산은 육십령과 벌재에서 소량 증가하였으나 5년간 큰 변화는 없었다.

유기물함량은 조사지간 차이는 없었으나 복원 5년 경과 후 3개 지역 모두 1% 미만으로, 복원초기에 비해 70-80%가 감소하였다(Table 2). 일반 산림에서는 고사유기물(낙엽, 낙지 등)의 유입 및 분해를 통하여 양분이 토양에 축적되는 반면 생태복원지에서는 초기 고사유기물의 유입 및 분해가 제한됨에 따라 복원 초기에 유기물 함량이 감소하는 경우가 발생한다. 산불피해지 복원지에서도 비료처리가 없을 시 복원 6년 경과 후 유기물 함량이 초기 수준에 비해 약 50% 감소하는 현상이 나타났으며, 식재 후 토양 시비처리가 있을 경우 복원 6년 경과 후 유기물 함량이 증가하는 현상을 확인할 수 있었다(Won *et al.*, 2006).

2. 소나무 생장

복원사업지에 식재된 소나무의 수고생장률은 지역에 따라 유의한 차이를 보였다($p < 0.0001$; Figure 2a). 수고생장률(평균 \pm 표준오차; m yr^{-1})은 육십령에서 1.02 ± 0.03 로 가장 높았으며, 그 뒤로 벌재(0.75 ± 0.03), 이화령(0.17 ± 0.10) 순이다(Figure 2a). 임분수확표에 제시된 10년생 중부지방소나무의 수고생장률이 $0.45\text{-}0.72 \text{ m yr}^{-1}$ 인 것을 감안하면(NIFoS, 2012a) 이화령은 생장이 불량한 것으로 판단되고 육십령은 기준보다 빠르게 성장하는 것으로 판단된다.

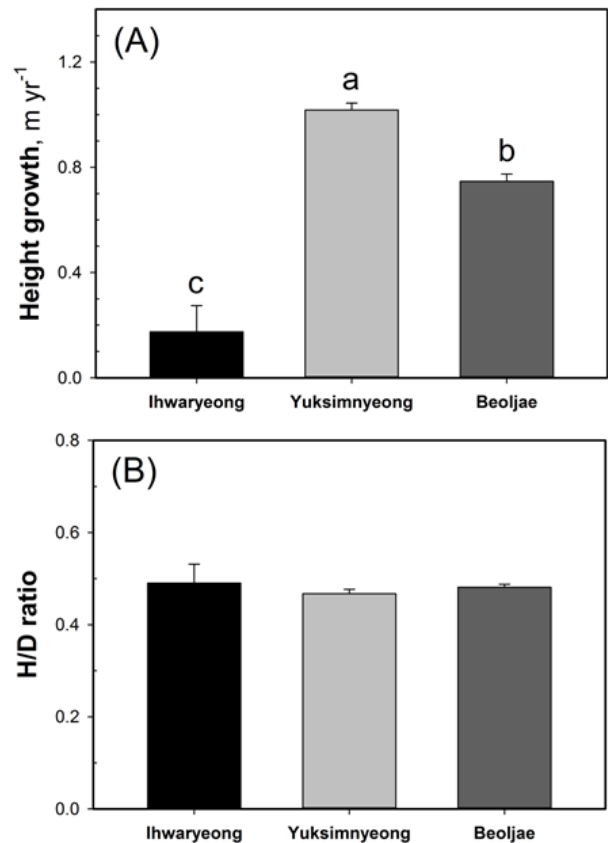


Figure 2. (a) Height growth rate and (b) H/D (height/diameter at breast height) ratio of *Pinus densiflora* in the Ihwaryeong, Yuksimnyeong, and Beoljae sites. Vertical bar indicates one standard error ($n=3$). Values followed by a different letter are significantly different ($p < 0.05$).

3개 지역에서의 수고생장률과 토양 화학적 특성간에 상관분석한 결과, 수고생장률은 토양 pH, 양이온치환용량, K, Na, Ca, Mg 등은 부의 상관관계를 보인 반면, 유효인산과는 양의 상관관계를 보였다(Table 3). 또한 주성분요인분석 결과, 수고생장률과 토양 화학적 특성간의 주성분요인 1과 2는 전체 변이의 91.6%를 설명하였다(Figure 3). 특히 주성분 요인 1은 75.9%에 해당되며, 수고생장률과 토양 pH 및 유효인산과의 관계, 그리고 토양 pH와 양이온들과의 관계에 의해 결정되었다(Figure 3).

Table 3. The results of correlation analysis between growth rate and H/D ratio of *Pinus densiflora*, and soil chemical properties.

	Growth rate	H/D ratio	Soil pH	CEC	K	Na	Ca	Mg	AP	OM
Growth rate	1	-0.38	-0.85**	-0.91***	-0.77*	-0.93***	-0.94***	-0.71*	0.81**	-0.38
H/D ratio		1	0.26	0.40	0.19	0.32	0.42	-0.07	-0.32	-0.58
Soil pH			1	0.84**	0.57	0.81**	0.88**	0.59	-0.74*	0.29
CEC				1	0.83**	0.97****	0.99****	0.43	-0.60	0.33
K					1	0.90***	0.81**	0.33	-0.31	0.58
Na						1	0.97****	0.48	-0.58	0.49
Ca							1	0.50	-0.67	0.32
Mg								1	-0.90**	0.48
AP									1	-0.16
OM										1

H/D ratio: Height/diameter ratio, CEC: cation exchange capacity, OM: organic matter, AP: available phosphorus.

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, and **** $p < 0.0001$.

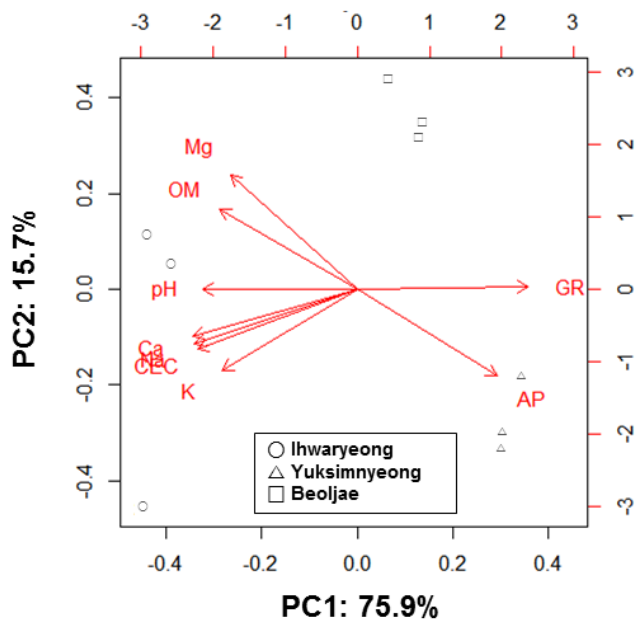


Figure 3. Principal component analysis (PCA) for growth rate (GR) of *Pinus densiflora*, cation exchange capacity (CEC), Na, Ca, and Mg concentrations, organic matter (OM), and available phosphorus (AP) in the Ihwaryeong, Yuksimnyeong, and Beoljae sites.

일반적으로 양이온치환용량은 토양비옥도를 의미하는 중요한 인자로서, 식물생장에 긍정적인 효과를 주는 것으로 알려져 있다(Sharma *et al.*, 2015). 그러나 본 연구에서의 높은 양이온

치환용량은 필수영양소들의 높은 수치를 의미하기 보다는 특정 이온(Na와 Ca)에 의해 높게 나타난 것으로, 식물생장과는 부의 상관관계를 보인 것으로 판단된다(Figure 3). 토양 pH는 유효인산과 부의 상관관계를 보이고 양이온치환용량, Na, Ca 농도와는 양의 상관관계를 보였다(Table 3; Figure 3). 토양 pH와 유효인산의 관계는 선행 연구에서 보고된 양의 상관관계와는 반대의 결과가 나타났다(Hwang and Son, 2006, Yang *et al.*, 2018). 유효인산은 pH가 적정범위에서 높게 나타나는 데, 선행연구들에서는 토양 pH가 약산성을 띄는 반면 본 연구의 대상지는 육십령을 제외하고 토양 pH가 알칼리성을 나타내기 때문으로 판단된다.

소나무 생장이 지역별로 차이를 보인 것은 두 가지 이유로 사료된다. 첫 번째는 높은 토양 pH와 낮은 유효인산 때문인 것으로 보인다. 소나무는 토양 pH가 4.6-6.4 범위에서 서식하는 수종으로 이화령의 토양 pH는 소나무 생장에 적합하지 않다(NIFoS, 2012b). 유효인산은 식물의 핵산, 단백질, 인지질, ATP 등을 구성하는 필수요소일 뿐만 아니라(Duff *et al.*, 1994; Rausch and Bucher, 2002), 토양 내에 질소가용성에 영향을 주는 인자이다(Mehnaz *et al.*, 2019). 일반적으로 유효인산은 토양 pH에 영향을 크게 받는데 pH가 적정수준보다 높은 알칼리성 토양에서는 난용성화가 기인하여 유효인산이 낮게 나타나는 것으로 보고된다(Farid, 2013; Seo *et al.*, 2013). 또한 이화령과 같이 점토함량이 높은 지역에서는 토양 내 존재하는 인산이 불용화되고 고정시키는 인산흡수력이 높아져 유효인산이 감소할 수 있다고 보고되었다(Jeong *et al.*, 2002). 그러나 감소한 유효인산이 소나무 생장에 미친 영향을 직접적으로 분석하기 위해서는 향후 수목 내 양분함량 측정이 요구된다.

두 번째는 Na와 Ca 농도가 뿌리의 수분흡수에 영향을 주기 때문이다. 특히 이화령의 높은 Na와 Ca 농도는 토양의 삼투압을 높여 뿌리로의 수분흡수를 저해시킨 것으로 판단된다(Storey, 1995). Byun *et al.*(2011)은 해안매립지에서 곰솔(평균수고 2.5 m)의 성장반응을 분석한 결과, 높은 양의 Na와 Ca 농도는 수목의 성장을 저해시킨다고 보고하였다.

H/D율은 이화령, 육십령, 벌재에서 각각 $49.04 \pm 4.13\%$, $46.76 \pm 0.91\%$, $48.14 \pm 0.65\%$ 로 나타났으나, 지역별 유의한 차이는 없었다(Figure 2b). 또한 H/D율은 지역별 토양 화학적 특성과 유의한 관계를 보이지 않았다(Table 3). Yang *et al.*(2013)은 4-5년생 소나무의 H/D율이 26-38%라고 보고하였으며, 이는 본 연구결과의 값보다 약 10-20% 낮은 값이다. H/D율은 나무의 건전한 정도 및 생존율에 영향을 미치는 인자로서, 기존 연구에 비하여 본 연구에서의 높은 H/D율은 조림목의 건전한 정도가 낮다고 판단할 수 있다(Moore *et al.*, 2008; Han *et al.*, 2014). 토양의 양분유효도가 증가할수록 H/D율은 낮아진다고 보고되었는데(Kim *et al.*, 2015) 본 연구에서는 토양 화학적 특성들과의 관계는 나타나지 않았다. 마루금 복원사업지에서는 H/D율이 토양의 환경보다는 광양이나 주변 식생과의 경쟁에 영향을 더 크게 받는 것으로 사료된다(Dolezal *et al.*, 2009).

한편 마루금 복원사업지는 풍량과 풍속이 매우 높은 지대로서, 토양환경과 식생생장은 이들의 영향을 직간접적으로 받는다. 본 연구결과는 3개의 마루금 복원사업지에 국한되어 수행되었고 지역마다 적은 수의 샘플링이 이루어졌기 때문에 보다 명확한 기후환경, 토양환경, 식생생장간의 상호작용을 이해하기 위해서는 더 많은 마루금 복원사업지를 선정하고 면밀한 조사를 통한 전반적인 환경인자 영향 분석을 고려해야 한다.

3. 복원사업지의 향후 관리방안

마루금 복원사업은 생태계 연속성 및 생물다양성 증진에 목적이 있는데, 복원사업 이후 사업지에 주변 임분 식생인 아까시나무, 오리나무류 등이 유입되기도 하고 당초 파종된 초본식물들 외에 외래식물들이 유입되면서 생태계 연속성 및 생물다양성이 어느 정도 복구되어가는 단계라고 판단된다(Park *et al.*, 2016). 그러나 이화령 지역은 식재된 소나무들이 생장이 저조하고 고사되는 경우가 빈번히 발생했으며, 소나무와 함께 식재 하였던 산벚나무와 물푸레나무는 대부분 고사하였다. 마루금 복원사업은 초기 구조물 위에 복토를 통하여 지반을 구성하였기 때문에 주변 산림과는 다른 기후환경, 지형, 토양환경 등을 지니고 있다. 이화령, 육십령, 벌재에서 5년 경과 후 유기물함량은 주변 산림에 비해 각각 31%, 34%, 65% 등에 해당되는 매우 적은 값을 보였다(Kim, unpublished data). 토양 내 유기물이 부족한 상황에서 유기물 공급이 제한되면 임목은 충분한

질소가용성을 확보하지 못하여 성장저해 또는 고사에 이를 수 있다(Templer *et al.*, 2005). 마루금 복원사업지와 같이 유기물이 부족한 토양에는 복원초기뿐만 아니라 지속적인 비료 또는 바이오차를 이용한 유기물 공급이 요구된다(Cho *et al.*, 2017). 한편 본 연구의 모든 복원사업지에서는 복원 5년 경과 후 석력함량은 모두 주변 산림에 비하여 높게 나타났다(Kim, unpublished data). 이는 복원초기에 식생피복이 이루어지지 않으면서 토사 유출이 증가하고 상대적으로 석력함량이 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다(Lee *et al.*, 2006). 높은 석력함량은 토양 대공극을 형성하며 수분보유능력이 떨어지고 양분들의 빠른 용탈을 야기한다(Zhou *et al.*, 2009). 특히 이화령의 복원사업지는 석력함량이 약 77%에 해당된다. 이화령 지역과 같이 유효인산 등의 양분이 부족하여 식생의 양육현황이 양호하지 못한 지역에는 비료를 통하여 토양성질을 개선해줄 필요가 있다(Won *et al.*, 2006). 벌재 지역도 복원초기에 비해 유효인산이 증가하고 있으나 상대적으로 유효인산이 적은 지역이므로 지속적인 모니터링이 필요하다. 이화령 지역은 토양 pH가 7.7에 이르는 알칼리성 토양이므로 식물생육기반 조성을 위해서는 화학비료(황 비료)를 시비하여 토양 중화작업이 요구된다. 생태적 복원사업에 있어서 토양환경의 모니터링은 생태 안정화를 평가하는데 있어서 가장 중요한 요소로서, 본 연구의 결과는 생태적 복원사업방안을 개발하는데 있어서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Byeon, J.G., S.H. Oh, K.S. Lee, J.E. Yun, J.W. Jang, J.B. Jeong, J.C. Yang and H.J. Kim(2014) The flora vascular plants in Mt. Galjeongok-bong protected area for forest genetic resource conservation, Baekdudaegan, Korea. Korean Journal of Plant Resources 27(5): 477-484. (in Korean with English abstract)
- Byun, J.K., C.S. Kim, C.C. Lim and J.H. Jeong(2011) Soil chemical property, mortality rates and growth of planting trees from soil covering depths in coastal reclaimed land of Asan area. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer 44(3): 502-509.
- Cho, M.S., L. Meng, J.H. Song, S.H. Han, K. Bae and B.B. Park(2017) The effects of biochars on the growth of *Zelkova serrata* seedlings in a containerized seedling production system. Forest Science and Technology 13(1): 25-30.
- Dolezal, J., J.S. Song, J. Altman, S. Janecek, T. Cerny, M. Srutek and J. Kolbek(2009) Tree growth and competition in a post-logging *Quercus mongolica* forest on Mt. Sobaek, South Korea. Ecological Research 24(2): 281-290.
- Duff, S.M.G., S. Gautam and W.C. Plaxton(1994) The role of acid phosphatases in plant phosphorus metabolism. Physiology

- Plant 90: 791-800.
- Farid, I.M.(2013) Phosphorus fractions in some Calcareous soils of Egypt as affected by aging and their properties. *Egyptian Journal of Soil Science* 53(4): 555-566.
- Han, S., J. An, T.K. Yoon, S.J. Yun, J.H. Hwang, M.S. Cho and Y. Son(2014) Species-specific growth responses of *Betula costata*, *Fraxinus rhynchophylla*, and *Quercus variabilis* seedlings to open-field artificial warming. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 16(3): 219-226. (in Korean with English abstract)
- Hwang, J. and Y. Son(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.
- Jeong, J.H., K.S. Koo, C.H. Lee and C.S. Kim(2002) Physico-chemical properties of Korean forest soils by regions. *Journal of Korean Forest Science* 91(6): 694-700. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.H., D.H. Kim and D.H. Lee(2015) Effects of fertilizer treatment on the growth characteristics of 2-years old *Pinus koraiensis* siebold & Zucc container seedlings. *Journal of Agriculture and Life Science* 49(1): 63-70. (in Korean with English abstract)
- Korea Meteorological Administration(2011) Climatological normals of Korea. Seoul, Republic of Korea, 663pp.
- Lee, C.W., C.Y. Lee, J.H. Kim, H.J. Youn and K. Choi(2006) Characteristics of soil erosion in forest fire area at Kosung, Kangwondo. *Journal of Korean Forest Society* 93(3): 198-204. (in Korean with English abstract)
- Lee, W.S., Y.D. Park and T.H. Kwon(2017) An analysis of landscape change factors on restoration project of ecological ridgeline using landscape adjectives. *Journal of Korean Environmental Restoration Technology* 20(1): 97-115. (in Korean with English abstract)
- Mehnaz, K.R., C. Keitel and F.A. Dijkstra(2019) Phosphorus availability and plants alter soil nitrogen retention and loss. *Science of The Total Environment* 671(25): 786-794.
- Min, E.S., G.S. Park, S.H. Song and S.W. Lee(2003) Soil properties in Panax ginseng nursery by parent rock. *Journal of Agricultural Science* 30(1): 31-40. (in Korean with English abstract)
- Moore, J.R., J.D. Tomblason, J.A. Turner and M. Colff(2008) Wind effects on juvenile trees: a review with special reference to toppling of radiata pine growing in New Zealand. *Forestry* 81(3): 377-387.
- Nakaji, T., M. Fukami, Y. Dokiya and T. Izuta(2001) Effects of high nitrogen load on growth, photosynthesis and nutrient status of *Cryptomeria japonica* and *Pinus densiflora* seedlings. *Trees* 15: 453-461.
- National Institute of Agricultural Sciences(2010) Methods of soil chemical analysis. Rural Development Administration, Jeonju, Republic of Korea. (in Korean)
- National Institute of Forest Science(2012a) Forest volumes, biomass and stand yield table. National Institute of Forest Science, Seoul, Republic of Korea, 175pp. (in Korean).
- National Institute of Forest Science(2012b) Commercial (1): *Pinus densiflora*. National Institute of Forest Science, Seoul, Republic of Korea, 27pp. (in Korean).
- National Institute of Forest Science(2018) Development of forest landscape restoration guideline to conserve topography of Baekdudeagan mountain system. National Institute of Forest Science, Seoul, Republic of Korea, pp. 1-2. (in Korean).
- Park, Y.D., T.H. Kwon and H.S. Ma(2016) Ecological monitoring on changes in microclimate, vegetation and soil properties after 2 years in restoration project sites linking the ridgeline of Baekdudaegan. *Journal of Agriculture and Life Science* 50(1): 125-136. (in Korean with English abstract)
- Rausch, C.M. and M. Bucher(2002) Molecular mechanisms of phosphate transport in plants. *Planta* 216(1): 23-37.
- Ruiz-Jaen, M.C. and T.M. Aide(2005) Restoration success: How is it being measured? *Restoration Ecology* 13(3): 569-577.
- Seo, D.J., C.Y. Oh, K.S. Woo and J.C. Lee(2013) A study on ecological niche of *Pinus densiflora* forests according to the environmental factors. *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology* 15(3): 153-160. (in Korean with English abstract)
- Sharma, A., D.C. Weindorf, D.D. Wang and S. Chakraborty(2015) Characterizing soils via portable X-ray fluorescence spectrometer: 4. cation exchange capacity (CEC). *Geoderma* 239-240: 130-134.
- Son, Y., C.D. Koo, C. Kim, P.S. Park, C.W. Yoon and K.H. Lee(2016) Forest ecology. Hyangmun Book Co., Republic of Korea, pp. 47-52. (in Korean)
- Storey, R.(1995) Salt tolerance, ion relation, and the effect of root medium on the response of citrus to salinity. *Australian Journal of Plant Physiology* 22(1): 101-114.
- Templer, P.H., G.M. Lovett, K.C. Weathers, S.E. Findlay and T.E. Dawson(2005) Influence of tree species on forest nitrogen retention in the Catskill mountains, New York, USA. *Ecosystems* 8: 1-16.
- Won, H.K., Y.Y. Lee, J.H. Jeong, K.S. Koo, C.H. Lee, S.W. Lee, Y.H. Jeong, C. Kim and H. Kim(2006) Fertilization effects on soil properties, understory vegetation structure and growth of *Pinus densiflora* seedlings planted after forest fires. *Journal of Korean Forest Society* 95(3): 334-341. (in Korean with English abstract)
- Yang, A.R. and M.S. Cho(2019) The growth performances and soil properties of planted *Zelkova serrata* trees according to

- fertilization in harvested *Pinus rigida* plantation over 6 years after planting. Journal of Korean Forest Society 108(1): 29-39. (in Korean with English abstract)
- Yang, A.R., J. Hwang, S.W. Song and M. Cho(2013) The comparison of soil properties and early growth of *Pinus densiflora* and *Larix kaempferi* seedlings in harvested *Larix kaempferi* and *Pinus rigida* stands. Journal of Korean Forest Society 102(3): 455-462. (in Korean with English abstract)
- Yang, A.R., J. Jeong and M.S. Cho(2018) Site and soil factors affecting early growth of *Larix kaempferi* trees planted in harvested *Larix kaempferi* plantations. Journal of Korean Forest Society 107(1): 35-42. (in Korean with English abstract)
- You, J.H., J.H. Ra, H.J. Cho and J.N. Ku(2009) Practical plan and vascular plants around construct-reserved site of ecological forest in Baekdudaegan. Journal of Korean Environmental Restoration Technology 12(5): 42-58. (in Korean with English abstract)
- Yu, Z.Y., F.S. Chen, D.H. Zeng, Z. Qiong and G.S. Chen(2008) Soil inorganic nitrogen and microbial biomass carbon and nitrogen under pine plantations in Zhanggutai sandy soil. Pedosphere 18(6): 775-784.
- Zhou, B., M. Shao and H. Shao(2009) Effects of rock fragments on water movement and solute transport in a Loess Plateau soil. Comptes Rendus Geoscience 341(6): 462-472.