

김천 작점고개 백두대간 마루금 복원사업지 내 식재수목의 생육 장애 요인에 관한 연구^{1a}

김수진^{2*} · 박현빈³

A Case Study on the Factors of Obstacles to Growth of Planted Trees in the Gimcheon Jakjungogae of Baekdudaegan Ecological Axis Restoration Site^{1a}

Su-Jin Kim^{2*}, Hyun-Bin Park³

요약

본 연구는 백두대간 생태축 복원사업지에서의 수목 생육 장애 요인을 평가하기 위해서 토양 및 미기상 환경모니터링을 실시했다. 그 결과 복원 사업지에서는 주변 산림과 비교하여 토양의 유기물, 전질소 및 양이온치환용량이 부족하여 양분 공급이 결핍된 것으로 나타났다. 복원사업 준공 직후인 가을철 토양수분은 복원사업지가 주변 임내와 비교하여 7배 이상 빠르게 감소했으며, 미사질과 점토 함량 부족으로 인해 보수력이 매우 낮은 것으로 평가되었다. 복원 사업지의 경우 주변 임내와 비교하여 연간 잠재증발산량이 약 2배 높은 975mm로 분석되었다. 복원사업지의 여름철 토양 수분은 일사량이 증가하는 낮 시간대에 급격하게 감소하는데 이는 잠재증발산량 증가의 영향이 큰 것으로 나타났다. 이상의 수목 생육 장애 요인을 개선하기 위해서는 낙엽, 부엽토, 토양개량제, 유기질 비료 시비 등을 활용하여 보수력 증진 등 물리성 개량과 양이온치환능을 증가시켜 식물에게 원활한 양분 공급이 이루어질 수 있도록 유도해야 할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 향후 생태축 복원사업의 설계와 시공 및 관리방안 수립의 기초 자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 산림복원, 잠재증발산, 토양수분

ABSTRACT

Soil and micro-climatic environmental monitoring was conducted to evaluate the factors causing tree growth impediments at the Baekdudaegan ecological axis restoration project site. As a result, it was found that the nutrient supply was insufficient in the restoration project site due to the lack of organic matter, total nitrogen and cation exchange capacity of the soil compared to the surrounding forest. After the completion of the

1 접수 2022년 3월 24일, 수정 (1차: 2022년 6월 3일), 게재확정 2022년 6월 9일
Received 24 March 2022; Revised (1st: 3 June 2022); Accepted 9 June 2022

2 국립산림과학원 산림생태연구과 임업연구사 Forest Ecology Division, National Institute of Forest Science, Hoegiro 57, Dongdaemungu, Seoul 02455, Korea (foresthdyro@korea.kr)

3 국립산림과학원 산림생태연구과 석사연구원 Forest Ecology Division, National Institute of Forest Science, Hoegiro 57, Dongdaemungu, Seoul 02455, Korea (phb1901@korea.kr)

a 본 논문은 국립산림과학원 일반연구과제(백두대간과 정맥의 산림공간 관리체계화 및 권역별 보전·복원체계 개발)의 일환으로 수행되었음
* 교신저자 Corresponding author: foresthydro@korea.kr

restoration, the soil moisture in the autumn decreased more than 7 times faster than that of the surrounding forest, and it was evaluated that the soil moisture was significantly low due to the lack of silt and clay content. In the case of the restoration site, the annual potential evapotranspiration was analyzed to be 975mm, which is approximately two times higher than that of the surrounding forest. The soil moisture of the restoration site in the summer decreased rapidly during the daytime when the amount of insolation increased and this was found to be strongly influenced by the increase in potential evapotranspiration. In order to improve the above factors affecting the tree growth at the Baekdudaegan ecological axis restoration project site, it is necessary to induce the smooth supply of nutrients and water to plants by improving physical proprieties and cation exchange capacity, i.e., using litterfall, humus soil, soil conditioner and organic fertilizer. The results of this study are expected to serve as basic data for the design, construction, and management of ecological axis restoration projects in the future.

KEY WORDS: FOREST RESTORATION, POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION, SOIL MOISTURE

서론

백두산 장군봉에서부터 금강산, 설악산, 태백산과 소백산을 거쳐 지리산까지 이르는 백두대간은 우리나라 중심 산줄기로서 우리 민족의 삶의 터전이자 역사와 문화의 진원지 그리고 생태계의 보고 역할을 맡아왔다(KFS, 2016; 2020a). 그러나 일제 강점기에 자원수탈을 목적으로 주요 산줄기를 통과하는 교통통로가 건설됨으로 인해 단절되기 시작했으며, 우리나라의 경제성장과 산업화가 진전됨에 따라 훼손이 가속화되어 산줄기의 약 10km마다 단절이 되는 결과를 초래했다(KFS, 2006; 2016; Lee *et al.*, 2017). 이러한 선적 훼손으로 인한 단절은 백두대간의 마루금을 관통하여 공간적인 연결성 저하를 야기하여 동물의 이동을 차단 및 종 다양성을 감소 등의 문제로 이어지고 있다(Kang *et al.*, 2005).

이와 같은 배경에서 다양한 가치를 지닌 백두대간의 보전과 복원을 위해 2006년 「백두대간보호에 관한 법률」이 제정·공포 되었으며, 해당 법률을 근거로 다양한 활동들이 이어오고 있다. 백두대간보호지역은 생태축을 연결하는 가장 강력한 보호구간으로 국제사회에 유례없는 성공적인 자연보호정책으로 손꼽히고 있는데, 산림청에서는 일제 강점기에 단절된 백두대간과 정맥을 연결·복원하여 민족정기 회복 및 생태계 건강성과 연속성 유지·회복을 목적으로 생태축 복원사업을 2011년부터 실시하여 2012년 괴산 이화령, 2013년 장수 육십령과 문경 별재 등 지속적으로 단절구간을 연결 중이다(KFS, 2016). 훼손에 의해 단절된 자연환경을 다시 연결하는 복원사업은 캐나다 ‘Banff 국립공원’, 네덜란드의 ‘Ecoducts’ 그리고 미국 콜로라도의 ‘I-70 Vail Pass’ 등 국외에서도 다양하게 이뤄졌으나, 이들은 동물서

식지 연결을 목적으로 하는 Green corridor 그리고 Wildlife pass 등의 용어로 불리는 생태이동통로(Eco-bridge)의 개념으로 산림청에서 시행하는 백두대간 생태축 복원과는 다소 차이가 있다(Bank *et al.*, 2002; G.Dickie, 2017; Summit County Safe Passages, 2020).

초기 생태축 복원사업지 중 일부는 주변으로부터 식생유입 등의 긍정적인 효과도 있었지만, 대부분 식재 수목이 고사하는 문제가 나타났다(Park *et al.*, 2016; Han *et al.*, 2019). 구조물 상부는 여름철의 고온과 겨울철 저온으로 인한 스트레스가 발생할 수 있는 수준으로 확인되었고 토양환경, 배수 및 방풍시설 등이 적절히 갖춰지지 않은 경우 수목 생육에 장애가 발생할 수 있다(Kwon *et al.*, 2018).

복원사업 대상지 선정 후 목표설정, 계획수립 및 시공을 통해 식재 식물의 생육에 적합한 환경을 조성하는 것뿐만 아니라 복원후 지속적으로 관리 및 모니터링을 통한 환류 과정이 중요하다(KFS, 2013; Kwon *et al.*, 2016).

따라서 본 연구는 백두대간 생태축 복원사업지인 김천 작점고개를 대상으로 식재 수목의 장애요인으로 예측되는 토양 이화학성 부족 및 건조 스트레스의 원인을 파악하고자 환경 모니터링을 통해 분석하여 향후 이뤄질 생태축관련 복원사업 및 연구를 위한 개선방안 제시 및 기초자료를 제공하고자 한다.

연구방법

1. 연구대상지

본 연구는 2019년 11월 준공한 김천 작점고개 백두대간

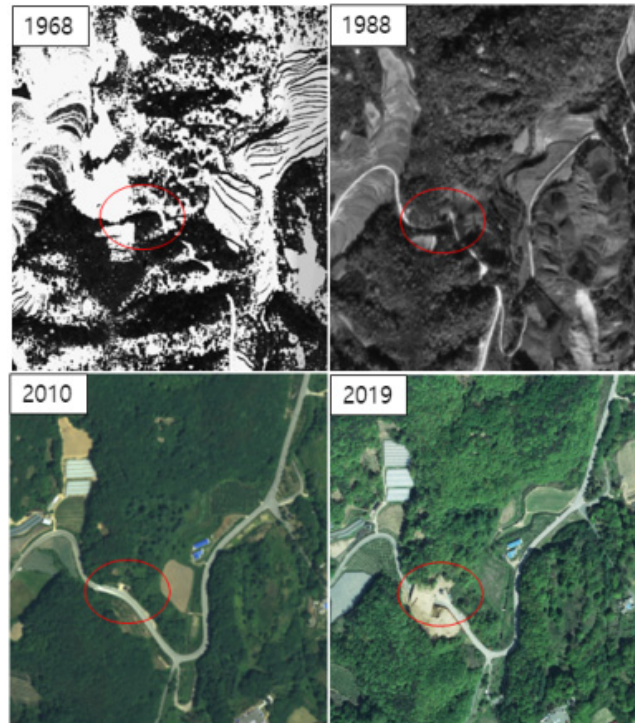


Figure 1. Changes of topography on aerial photographs in the study site.

Table 1. The planting species of tree and herb

Type	Species
Tree	<i>Pinus densiflora</i> , <i>Quercus aliena</i> , <i>Quercus variabilis</i> , <i>Quercus serrata</i> , <i>Sorbus alnifolia</i> , <i>Styrax obassia</i>
Shrub	<i>Hydrangea paniculata</i> , <i>Callicarpa dichotoma</i> , <i>Viburnum dilatatum</i> , <i>Sorbaria sorbifolia</i> var. <i>stellipila</i> , <i>Spiraea prunifolia</i> , <i>Euonymus alatus</i>
Herb	<i>Carex humilis</i> var. <i>nana</i> , <i>Pteridium aquilinum</i> var. <i>latiusculum</i> , <i>Liriope platyphylla</i> , <i>Hemerocallis fulva</i> , <i>Convallaria keiskei</i> , <i>Spodiopogon sibiricus</i>

생태축 복원사업지를 대상으로 실시했다. 조사대상지는 충북 영동군과 경북 김천시의 경계로 백두대간 마루금이 통과하는 지점이다. 항공사진 판독 결과 1980년대까지 소로가 통과하는 구간이었으나 도로 확장 및 직선화가 되어 단절된 것으로 나타났다(Figure 1).

조사대상지 주변 산림은 갈참나무, 상수리나무 등 참나무류가 우점하고 있으며, 백두대간보호지역 이외는 농경지, 의료시설, 골프장 등이 건설되어 개발압력이 가중되고 있는 상황이다. 본 생태축 복원사업지의 공간구획 면적은 5,009 m²로 2017년에 착공하여 개정된 법률을 반영하지 못했다. 구체적으로 2019년 개정된 산림자원 조성에 관한 법률에서 규정한 입지에 적합한 자생식물·자연재료를 사용하여 식생을 복원하는 산림복원의 기본원칙을 반영하지 못했다. 따라서 2019년 8월 주위 식생조사를 통해 식재 수종 및 초종

을 선발하여 설계를 변경했다. 식생 조사 후 선발되어 식재한 수종과 초종은 Table 1과 같으며, 교목성 수종인 소나무는 수고 5m 이하(H4.0×R20×W2.5), 참나무류는 4m 이하(H3.5×R12), 팔배나무는 2m 이하(H2.0×R4), 쪽동백나무는 2.5m 이하(H2.5×R4)의 소경목 위주로 식재했다. 또한, 식재 후 토양보습 및 매토종자를 통한 자연복원 유도를 위해 주변 임내에서 낙엽을 채취 후 1m²당 500g내외로 도포했다.

2020년 5월 현장 확인 결과, 낙엽 포설시 매토 종자가 유입되어 상수리나무 치수가 발아되었으며, 6월 이후 초본류가 다수 유입되었다(Figure 2). 수목 식재 후 약 11개월이 경과한 2020년 9월 고사목 조사를 실시한 결과, 쪽동백나무의 고사율이 높은 것으로 나타났다(Table 2). 또한, 산림복원지 품질평가 및 사후관리 용역 사업(KFS, 2020b) 결과에 따르면 작점고개 생태축 복원사업지 교목층 및 아교목층의



Figure 2. Changes of vegetation in the study site.

Table 2. The numbers of planting, decline tree, survial rate(%) and vigor rate

Species	Planting No.	Decline No.	Survial rate(%)	Vigor rate*
<i>Pinus densiflora</i>	14	-	100	3.6
<i>Quercus aliena</i>	50	5	90	-
<i>Quercus variabilis</i>	25	1	96	-
<i>Quercus serrata</i>	30	-	100	1.6
<i>Sorbus alnifolia</i>	30	3	90	-
<i>Styrax obassia</i>	30	12	60	1.2

*Date from KFS(2020b).

수관 활력도(5등급 기준)는 쪽동백나무 1.2(고사 진행)~소나무 3.6(중간 쇠퇴 및 중간 건강) 사이에 분포하여 식재목의 생육 장애가 발생하고 있는 것으로 나타났다.

2. 분석 방법

생태축 복원사업지 식재 수목의 생장 장애요인을 파악하기 위하여 토양이화학성, 토양수분, 미기상을 조사하였다. 모든 조사는 주변 산림을 대조구로 설정하여 동시에 관측했다.

1) 토양이화학성 분석

주변 산림토양과 복원지 토양의 이화학성 차이를 분석하기 위해서 2020년 10월 0~10cm, 10~20cm, 20~30cm의 토심에서 분석용 시료를 3 반복해 채취했다. 채취한 시료는 풍건을 하였으며, 토양채를 이용하여 2mm 이상의 석력을 제거했다. 토양의 이화학성 분석은 한국임업진흥원에 실시했으며, 주요 분석방법은 다음과 같다. 토성은 미농무부 분석법, 토양 pH 및 EC는 증류수를 1:5 비율로 희석한 후 측정했다. 유기물과 전질소는 원소분석기(Vario Max CN)를 이용하여 분석했고, 유효인산은 Lancaster법을 이용하여

다. 양이온치환용량은 1N-초산암모늄 침출 후 킬달증류적정법으로 산출하였다. 각각의 치환성 K, Na, Ca, Mg은 원자흡광도법으로 분석했다. 토양의 이화학성 분석 결과 차이는 t-test로 검정하였다.

2) 토양 수분 및 지온 관측

조사 대상지인 생태교량(N36° 12' 47", W128° 2' 59", 해발 345m)과 주변 임내(N36° 12' 47, W128° 2' 59", 해발 362m)에서 토양수분 및 지온 변화를 10분 단위로 관측을 실시했다. 두 지점 간의 이격 거리는 약 60m로 임내 관측은 생태교량의 남측에 위치한다. 각 조사 지점에서 토양수분의 수직적 분포양상과 변화를 파악하기 위하여 10, 30, 60cm의 심도에 TDR 센서(TEROS11, METER, USA)를 1개씩 매설하여 관측했다.

3) 미기상 관측

생태교량과 주변 임내의 토양 수분 및 지온 관측지점 2m 높이에 복합기상센서(ATMOS 41, METER, USA)를 각각 설치해 강수량, 일사량, 수증기압, 대기온도, 기압, 풍속, 풍

향, 상대습도를 10분 단위로 관측했다. 관측된 자료는 토양 자료와 함께 자료집록기(ZL6, METER, USA)에 기록하였다. 관측 자료 중 임내 자료는 전원 오류 발생으로 인해 2020년 6월 24일부터 7월 23일까지 1개월간 결측치가 발생했다. 또한, 임내 차단강수량의 경우 낙엽·낙지 유입 등으로

인하여 결측이 다수 발생하여 분석 대상 항목에서 제외했다.

4) 미기상 자료 검증 및 잠재증발산량 산정

2019년 10월 23일부터 2020년 10월 7일까지 10분 단위로 관측한 미기상 자료를 대상으로 자료 검증을 실시하였

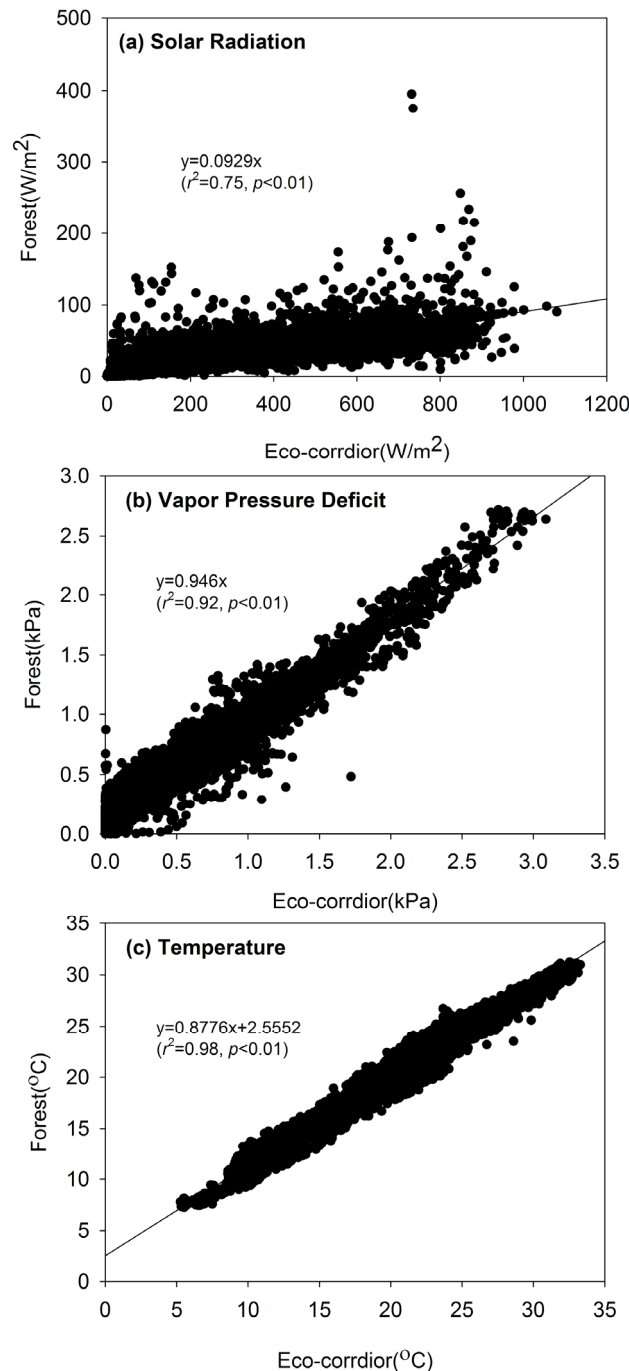


Figure 3. Comparison of (a) solar radiation, (b) vapor pressure deficit, and (c) temperature between forest and eco-corridor for gap-filling.

다. 임내에서 결측된 구간에 대해서는 결측 전후 각각 1개월 간의 자료 비교를 통해 보정을 실시하였다. 결측 기간 전후의 기온, 수증기압, 일사량은 0.75~0.98의 상관계수(r^2)를 나타냈다(Figure 3).

검증된 자료는 1일 단위로 환산하였으며, Penman-Monteith 복합방정식을 활용하여 일단위 잠재증발산량을 아래의 수식을 통해 산정했다(Hong *et al.*, 1997).

$$E = \frac{\epsilon(R_n - G - S)/L + g_a D}{(\epsilon + 1) + g_a/g_s}$$

여기서 ϵ 은 s/γ ($s = dq/dT$, 온도 변화에 따른 포화 수증기압의 기울기; $\gamma = L/C_p$, 건습구 상수), R_n 은 순복사, G 는 토양열 플럭스, S 는 열 저류량, L 은 기화열, g_a 는 공기역학 전도도, D 는 포차, g_s 는 균락 전도도이다.

결과 및 고찰

1. 토양의 이화학적 특성

토성 분석 결과 복원사업지 토양은 사질양토로 분석되었으며, 주변 임내는 심도 30cm 1개 지점을 제외하고 모두 양토로 분석되었다(Figure 4). 복원사업지는 콘크리트 구조

물 위에 2m 내외의 깊이로 토양을 복토한 것으로 주변 사면 안정화 작업중 절개한 토양을 사용한 것이다. 이 과정에서 토양의 물리적 성질이 파괴되었고, 모래의 함량이 높고 점토의 함량이 낮아 토양수분 유지에 매우 불리한 조건인 것으로 나타났다.

생태축 복원사업지의 토양 pH, 유기물함량, 전질소, 유효인산, 양이온치환용량, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 은 심도별로 유의한 차이가 나타나지 않았다(Table 3). 복원지의 토양 pH는 주변 임내에 비해 높았으며, 양 조사지 모두 심도가 깊어질수록 상승하는 경향을 나타내었다. 양이온 치환용량은 복원지 토양에서 3.55~3.86 $cmol_c.kg^{-1}$ 으로, 임내에서 8.51~11.32 $cmol_c.kg^{-1}$ 으로 분석되어 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 한편 Ca^{2+} 의 경우 복원지에서 높게 분석되었는데, 이는 암석이 풍화되어 유리된 염류가 운반, 집적, 용탈 등의 과정을 통하여 토양에 흡착된 염류를 해리시키고, 알카리성을 나타내기 때문에 토양 pH를 상승시킨 것으로 판단된다(Son *et al.*, 2016).

2. 강수량, 토양수분, 토양온도 모니터링 결과

약 1년간의 관측기간(2019.10.23.~2020.10.7.) 중의 총 강수량은 1,810mm로 기록되었다(Figure 5). 이는 과거 10년간 김천시 연평균강수량 1,273mm 대비 약 540mm 많은 것으로 나타났다.

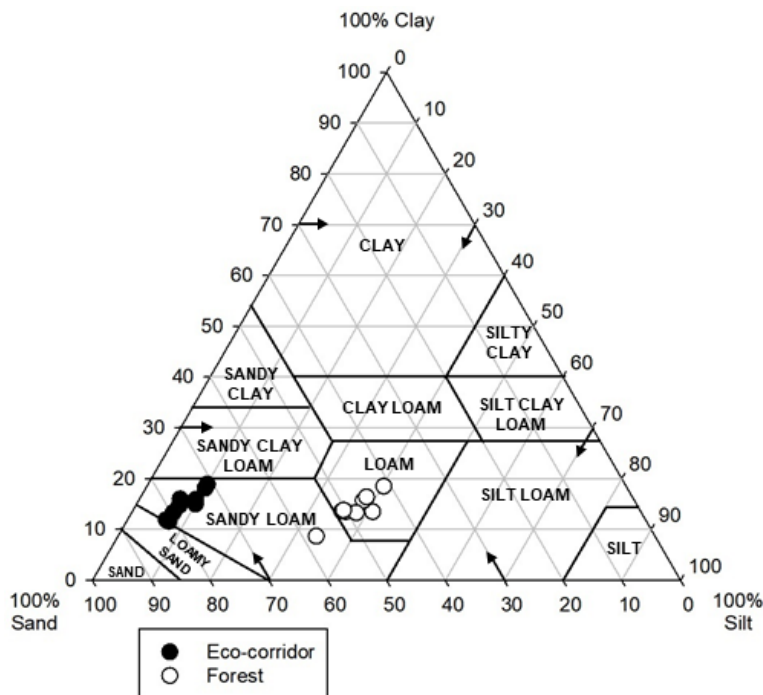


Figure 4. Soil textural triangle of the study site.

Table 3. Soil chemical properties(mean±standard deviation) in the study site

Site and soil depth(cm)	pH	OM (%)	TN (%)	AP (mg kg ⁻¹)	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	Exchangeable Cation (cmol _c kg ⁻¹)				EC (dSm ⁻¹)
						K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	
0~10 Eco-corridor	6.03±0.12	0.57±0.23	0.08±0.00	36.27±13.98	3.86±0.48	0.18±0.07	0.07±0.02	4.35±0.35	0.96±0.15	0.06±0.02
0~10 Forest	4.70±0.17	8.78±1.92	0.36±0.05	22.53±1.80	11.32±1.74	0.13±0.02	0.05±0.01	1.78±0.63	0.49±0.18	0.28±0.06
10~20 Eco-corridor	6.10±0.20	0.17±0.22	0.06±0.01	28.77±7.20	3.81±0.45	0.15±0.02	0.09±0.03	3.90±0.99	0.93±0.17	0.04±0.01
10~20 Forest	4.87±0.06	3.23±1.43	0.18±0.06	17.10±1.77	9.12±1.03	0.10±0.02	0.05±0.00	0.43±0.12	0.16±0.06	0.16±0.05
20~30 Eco-corridor	6.27±0.15	0.13±0.21	0.06±0.01	29.80±2.59	3.55±0.28	0.15±0.04	0.09±0.04	4.09±0.49	0.87±0.11	0.05±0.02
20~30 Forest	5.07±0.06	1.76±0.64	0.13±0.02	6.93±0.55	8.51±0.88	0.09±0.02	0.06±0.01	0.29±0.13	0.13±0.05	0.11±0.02

OM : Organic matter, CEC : Cation exchange capacity, AP : Available phosphorus.
Each values are significantly different in the same depth(p<0.05).

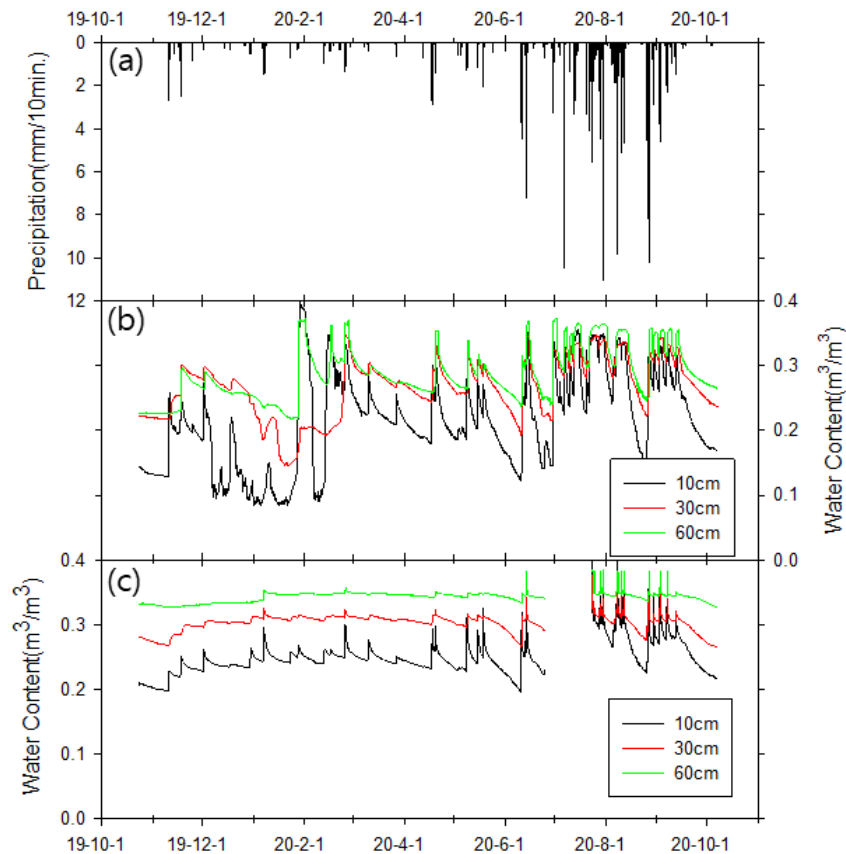


Figure 5. Measured (a) precipitation, soil water content in the (b) eco-corridor and (c) forest.

한편 생태교량 표층 토양(10cm)은 강수에 매우 빠르게 반응하여 토양수분이 급증하는 것으로 나타났으며, 임내 토양은 생태교량에 비해 토양수분이 안정적인 변화를 보였다.

강수기를 제외한 시기의 표층 토양수분은 임내 토양이 생태교량에 비해 2배 이상 함양하고 있는 것으로 나타났다. 심층 토양(60cm)의 경우도 생태교량내 토양은 강수에 대해 변화

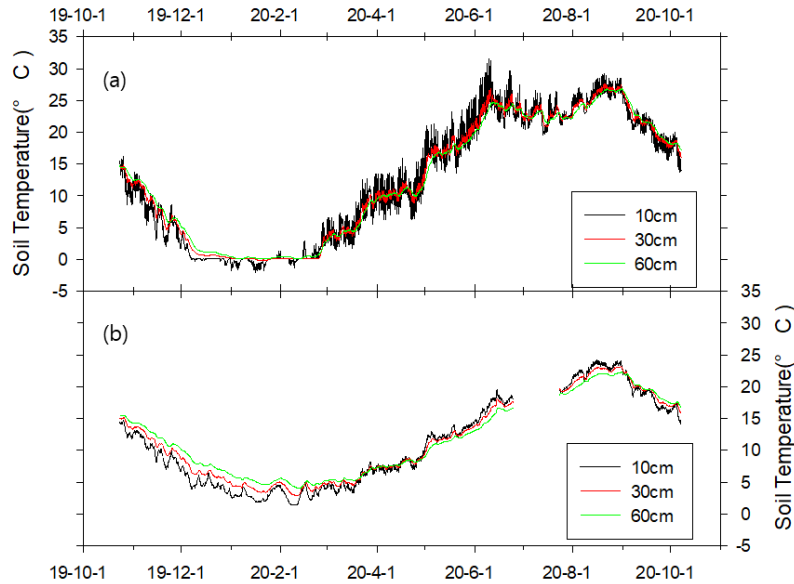


Figure 6. Measured soil temperature in the (a) eco-corridor and (b) forest.

하는 경향을 보였으며, 임내 심층 토양의 경우 장마기간을 제외하고 변화량이 거의 보이지 않으며 안정적인 것으로 나타났다(Figure 5).

관측기간 중 생태교량 10cm 토양온도는 최고 31.6°C, 최저 -2.0°C, 임내 10cm 토양온도는 최고 24.2°C, 최저 1.4°C로 관측되었다(Figure 6). 또한, 생태교량 심층(60cm) 토양은 최저 0.1°C(임내 60cm 0.1kg^{-1} 최저 4.0°C)로 관측되어 식재목 뿌리의 냉해가 우려되는 상황이었다. 토양온도의 경우도 생태교량 관측지점에서 기온변화에 따라 크게 변동되는 것으로 나타났다. 3월부터 6월까지 생태교량 10cm 토양온도는 5°C 이상의 일변화를 나타내었다. 이러한 일변화는 6월 이후 하층 식생 유입이 진행됨에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 생태교량 내 토양은 주변 절개지 토양을 복토한 직후로 물리적으로 안정이 되지 않은 것으로 판단되며, 향후 토양의 물리적 안정성 확인을 위한 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

3. 잠재증발산 비교

2019년 10월 23일부터 2020년 10월 7일까지 약 1년간 관측된 미기상 자료를 활용하여 1일 단위 잠재증발산량을 산정했다. Penman-Monteith 복합방정식을 이용하여 잠재증발산량 계산한 결과 복원사업지가 975mm로 임내(501mm)의 약 2배 정도 높은 것으로 나타났다(Figure 7). 복원사업지의 경우 임내와 달리 태양복사열을 직접 전달받아 일사량이 높은 봄, 여름, 가을철에 높게 관측되었다. 임내의 경우 4월 이후 개엽이 시작됨에 따라 태양광이 차단되어 잠재증

발산량이 감소하는 것으로 나타났다.

Rim *et al.*(2011)의 연구에서 우리나라 5개 댐 유역을 대상으로 물수지를 분석한 결과 잠재증발산량은 실제 증발산량보다 20~30% 높은 것으로 보고하였다. 해당 잠재증발산의 경우 자유수면에서 최대 증발될 수 있는 양을 기준으로 산정해 실제 증발산보다 과대 평가된 점을 고려하여 본 연구의 대상지인 복원사업지로 가정했을 경우 최소 연 700mm의 수분이 증발산을 통해서 대기로 환원되는 것으로 추정할 수 있는데, 해당 추정값은 에디공분산을 활용하여 실측한 중부지역 활엽수림의 실제 증발산량 581mm $\cdot\text{yr}^{-1}$ (Kwon *et al.*, 2009)과 경기도 파주시 산림지의 평균 연 증발산량 416mm(Lee *et al.*, 2014)과 비교해도 각각 연간 약 120mm 그리고 180mm 높은 것으로 나타났다. 수목의 생장에 있어서 건조는 병해충에 취약해지며 성장을 억제시키고 하는데, 광합성 억제 보다 더 낮은 스트레스 역치에서 발생하므로 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단 된다(Hasio, 1973; Hasio *et al.*, 1976).

4. 토양수분 감쇄곡선 비교

강우 종료 후 시간 경과에 따른 토양수분 변화 추세를 파악하기 위하여 심도 10cm 토양수분 감쇄곡선 분석을 실시했다. 분석기간은 잠재증발산량이 유사한 시기인 겨울과 2배 이상 차이가 나는 여름을 선정했다.

첫 번째 시기는 복원사업이 준공된 이후 초기인 2019년 11월 18일부터 24일까지 토양수분 감쇄곡선 분석을 실시하였다. 임내 토양에 비교해 복원지의 토양 수분 감쇄곡선은

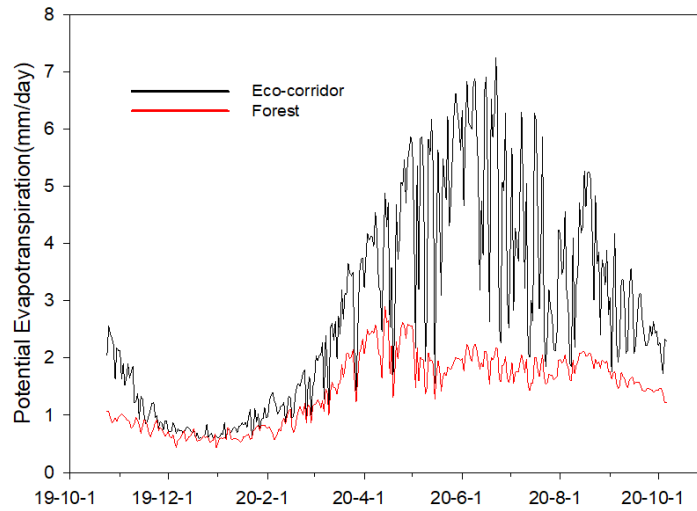


Figure 7. Daily potential evapotranspiration of the study site.

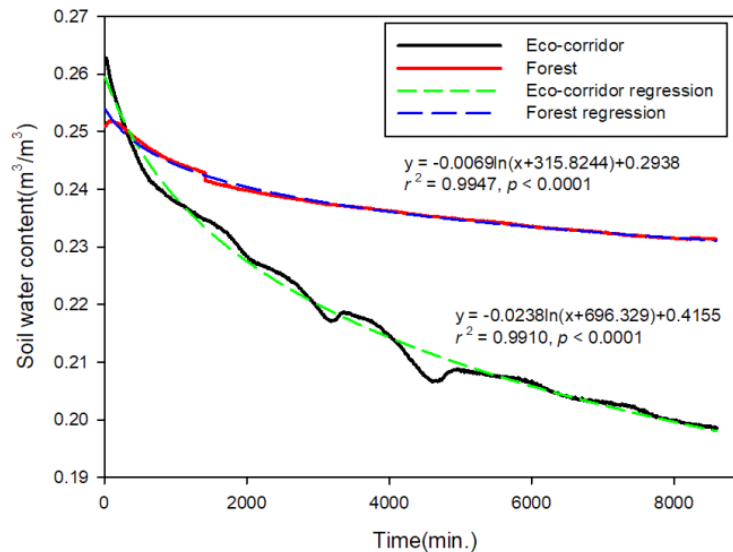


Figure 8. Surface soil water content recession curve in the study site during winter.

강수 종료 후 기온이 7배 이상으로 빠르게 감소하는 것으로 나타났다(Figure 8). 동기간은 복원지와 임내의 잠재증발산량이 유사한 시기임을 고려할 때 모래를 다량 함유한 토양으로 인하여 보습효과를 가지지 못하고 중력 침투로 인해 토양수분이 빠르게 감소한 것으로 판단된다.

한편, 두 번째 분석대상 기간인 2020년 8월 13일부터 18일까지 토양수분 변화는 일사량이 증가하는 낮 시간 동안 생태교량의 토양수분 감소량은 $0.02\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ 로 임내보다 두배 이상 높은 것으로 나타났다(Figure 9). 강수 종료 직후 임내의 토양수분은 생태교량보다 낮게 관측이 되었는데 이는 수관 및 낙엽차단으로 인하여 발생한 것으로 추측할 수 있다(Figure 8, 9). 이상의 결과를 종합하면 생태축 복원사

업지 식재 수목의 생육 환경을 개선하기 위해서는 토양개량을 통한 보습력 확보가 시공 초기부터 적극적으로 동반되어야 할 것으로 판단된다.

5. 생태축 복원사업지의 식재 수목 선정에 대한 고찰

Oliet *et al.*(2019)은 큰 묘목의 경우 식재 1개월 후 더 많은 뿌리를 생성했지만, 가장 높은 수분포텐셜을 보여 증산량 수요에 미치지 못해 건조스트레스를 유발한다고 했다. 이를 고려했을 때 식재 수목의 활착율을 높이기 위해서는 어린 묘목 위주로 선발하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

일반적으로 식물이 건조 피해를 받을 경우 초기에는 기공

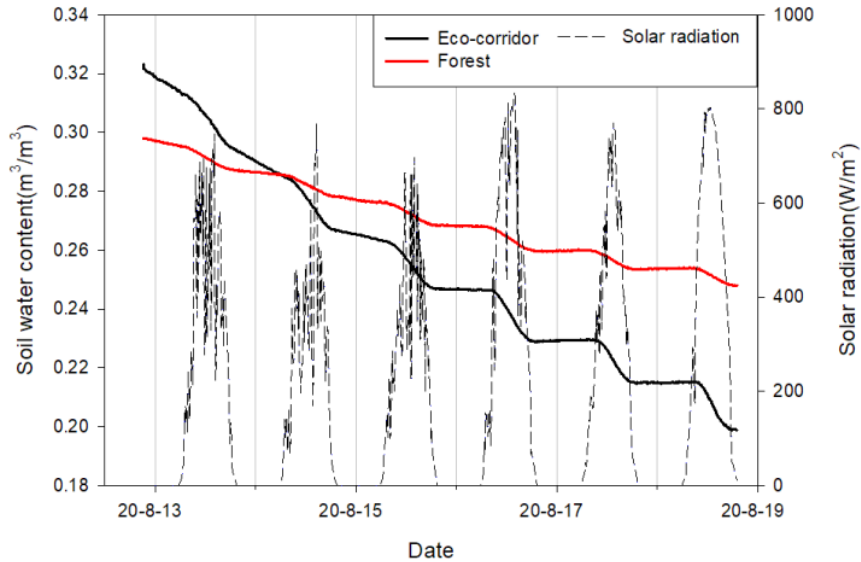


Figure 9. Temporal variation of surface soil water content and solar radiation in the study site during summer.

을 폐쇄하거나 잎을 떨어뜨리는 등 증산량을 최소화하지만, 최종적으로 광합성 속도의 급격한 감소와 세포 파괴로 인해 삼투조절기능을 상실한다(Taiz and Zeiger, 2006; Hopkins and Huner, 2008; Song *et al.*, 2020). 본 연구 대상지의 식재목 중에서 내음성 수종인 쪽동백은 가장 낮은 활착율을 나타내었다(Table 2). 내음성 수종은 낮은 광조건에서도 광합성을 효율적으로 수행할 수 있다(Lee, 2013). 이를 고려하면 생태축 복원사업지의 경우 식재 후 강한 일사량으로 인하여 내음성의 수종의 생육에 적합하지 않는 것으로 사료된다. 향후 복원사업지 식재 수종의 선택시 주변 임내에 분포하는 수종 중 내음성 수종의 식재는 지양하고, 수관이 울폐된 이후 자연천이 과정을 통해 유입을 유도하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

6. 종합고찰

본 연구는 2019년 조성한 백두대간 생태축 복원사업지를 대상으로 식재수목의 생육 장애 요인을 분석하기 위하여 실시했다. 그 결과, 생태축 복원사업지의 경우 강수 발생 이후 토양수분의 감소가 빠르게 진행되고 높은 증발산으로 인하여 식물이 생육하기에 불리한 조건인 것으로 나타났다. 이를 개선하여 유효수분을 유지하기 위해서는 부엽토 및 개량제 등을 활용하여 토성변경과 토양구조 개량을 통해 토양수분포텐셜 개선이 이루어질 수 있도록 유도해야 할 것이다(Lee, 2012). 한편, 복원지 조성 공사 마무리 단계에서 주변 임내에서 채취한 낙엽을 도포하였으나, 토양 전층에서 유기물 함량이 매우 낮아 적극적인 토양개량이 필요할

것으로 판단된다. 또한, ‘산림복원용 자생식물 및 자연재료의 공급 등에 관한 고시’에서는 복원용 토양의 오염여부에 대해서만 판단을 하고 있으나, 입도, 유기물 함량 등의 추가 분석을 통해 토양의 보습력 증진과 양분공급을 위한 토양개량 처방이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 생태축 복원사업지에서 토양 건조 문제를 중심으로 분석을 실시했다. 향후 종합적인 문제 해결을 위하여 토양의 물리적 안정화 과정, 식재수목의 생리적 반응, 자연천이 과정 등을 밝히기 위한 추가 연구가 필요할 것이다.

이상의 결과는 생태축 복원사업의 설계와 시공에 활용할 수 있는 기초 자료가 될 수 있으며, 사업의 성공적인 수행을 위한 관리방안 수립의 기초 자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

Bank, F.G., C.L. Irwin, G.L. Evink, M.E. Gray, S. Hagood, J.R. Kinar, A. Levym, D. Paulson, B. Ruediger, R.M. Sauvajot, D.J. Scott and P. White(2002) Wildlife habitat connectivity across European highways (Report). U. S. Department of Transportation: Federal Highway Administration, pp.1-45.

Dickie, G.(2017) As Banff’s famed wildlife overpasses turn 20, the world looks to Canada for conservation inspiration. Canadian Geographic.

Han, S.H., J.H. Kim, W.S. Kang, J.H. Hwang, K.H. Park and C.B. Kim(2019) Monitoring soil characteristics and growth of *Pinus densiflora* five years after restoration in the Baekdudaegan

- ridge. *Korean Journal of Environmental Ecology* 33(4): 453-461. (in Korean with English abstract)
- Hong, J.K., T.J. Choi and J. Kim(1997) Evapotranspiration from plants into the atmosphere: Micrometeorological perspectives. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 33(3): 569-579. (in Korean with English abstract)
- Hopkins, W. and N. Huner(2008) *Introduction to Plant Physiology* (4th ed.). The University of Western Ontario, London.
- Hsiao T.C.(1973) Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology* 24: 519-570.
- Hsiao T.C., E. Acevedo, E. Fereres and D.W. Henderson(1976) Stress metabolism-Water stress, growth, and osmotic adjustment-. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 273: 479-500.
- Jung, T.Y., C.K. Kim and K.R. Kang(2018) A Survey on the Usage Pattern and Satisfaction among Visitor for a Strategy for the Operational Management of Baekdudaegan. *The Journal of Korean Institute of Forest Recreation* 22(2): 17-28. (in Korean with English abstract)
- Kang, H.S., J.Y. Kim and K. Park(2005) Habitat connectivity between Soraksan and Odaesan National Parks with a consideration of wildlife home range. *Korean Journal of Environmental Ecology* 19(2): 150-161. (in Korean with English abstract)
- KFS(Korea Forest Service)(2006) Baekdu Daegan Mt. White paper. Korea Forest Service, 23pp. (in Korean)
- KFS(Korea Forest Service)(2013) Casebook of Forest Ecological Restoration. 311pp. (in Korean)
- KFS(Korea Forest Service)(2016) Baekdudaegan Brochure. 28pp. (in Korean)
- KFS(Korea Forest Service)(2020a) BAEKDU-DAEGAN PROTECTION ACT. Act No. 17318. (in Korean)
- KFS(Korea Forest Service)(2020b) Quality evaluation and monitoring of forest restoration site. pp.1-206. (in Korean)
- Kwon, H.J., J.H. Lee, Y.G. Lee, J.W. Lee, S.W. Jung and J. Kim(2009) Seasonal variations of evapotranspiration observed in a mixed forest in the Seolmachun catchment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 11(1): 39-47. (in Korean with English abstract)
- Kwon, J., W.S. Kang, J.H. Kim, Y.S. Byun, M.H. Shin, S.J. Ahn, S.W. Bae, J.H. Lim and J.H. Cho(2016) Guideline for forest landscape restoration of degraded land in Baekdu-daegan Mountain System of Korea. National Institute of Forest Service(NiFoS), pp.1-132. (in Korean)
- Kwon, J., W.S. Kang, J.H. Kim, Y.S. Byun, M.H. Shin, S.J. Ahn, S.W. Bae, J.H. Lim and J.H. Cho(2018) Development of forest landscape restoration guideline to conserve topography of Baekdudaegan Mountain System. National Institute of Forest Service(NiFoS), 64pp. (in Korean)
- Lee, K.H.(2012) *Arboriculture* Forth Edition. Bioscience. (in Korean)
- Lee, K.J.(2013) *Tree Physiology*. Seoul National University Publishing and Culture Center, 86pp. (in Korean)
- 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)
- Lee, Y.K., S.W. Jeong, C.H. Baek and H.S. Cho(2014) Evapotranspiration Characteristics of Forest Land and Agricultural Land(Paddy Field). *Water for Future* 47(4): 26-33. (in Korean)
- Oliet, J.A., E. Ortiz de Urbina, M. Sanchez-Pinillos and G. Tardio-Cerrillo(2019) Matching seedling size to planting conditions: Interactive response with soil moisture. *iForest* 12: 220-225.
- 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 & Life Sciences* 50(1): 126-136. (in Korean with English abstract)
- Rim, C.S., G.H. Lim and S.E. Yoon(2011) A study on the hydroclimatic effects on the estimation of annual actual evapotranspiration using watershed water balance. *Journal of Korea Water Resources Association* 44(12): 915-928. (in Korean with English abstract)
- 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)
- Song, W.K., B.R. Lee, N.H. Cho, S.C. Jung, E.S. Kim and J.H. Lim(2020) Effects of drought stress and nitrogen fertilization on growth and physiological characteristics of *Pinus densiflora* seedlings under elevated temperature and CO₂ concentration. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 22(2): 57-67. (in Korean with English abstract)
- Summit County Safe Passages(2020) I-70 East Vail Pass Wildlife Crossings Feasibility Study.
- Taiz, L. and E. Zeiger(2006) *Plant Physiology*. Sinauer Associates Inc. Sunderland.