

Case Report

Analysis of Soil Chemical Characteristics Changes According to Elapsed Time after the Forest Rehabilitation for Drawing Management of Abandoned Coal Mine Forest Rehabilitation Areas in Gangwon-do

Mun Ho Jung¹, Ju In Ko¹, Gwan In Bak¹, Won Hyun Ji^{2*}

¹Department of Research and Development, Mine Reclamation Corporation 2, Wonju 26464, Republic of Korea

²Department of General Education for Human Creativity, Hoseo University 20, Asan 31499, Republic of Korea

*Corresponding author : greenidea@hoseo.edu

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 11 August 2021

Received in revised form 24 August 2021

Manuscript accepted 24 August 2021

Available online 31 August 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.4.457>

Research Highlights

- Soil pH and Av. P₂O₅ were decreased according to elapsed time after forest rehabilitation
- TOC, Total-N and C/N ratio increased according to elapsed time after forest rehabilitation
- It needs long-term monitoring of soil chemical characteristics to establish management

ABSTRACT

The objectives of this study were to analyze of soil chemical characteristics of abandoned coal mine forest rehabilitation areas in Gangwon-do. The study sites were 8 areas and the investigations were performed 11 times according to elapsed time. Soil characteristics were soil pH, TOC, Total-N, C/N ratio, and Av. P₂O₅. Soil pH and Av. P₂O₅ were decreased according to elapsed time after forest rehabilitation, while TOC, Total-N, and C/N ratio increased. TOC and Total-N arrived at quality requirements of covering soil for forest rehabilitation in abandoned coal mine area passed 10 years after forest rehabilitation, while soil pH became lower than that. Therefore, it needs long-term monitoring of soil chemical characteristics after the forest rehabilitation and to establish post management.

Keywords : abandoned coal mine, forest rehabilitation, soil chemical characteristics, post management, elapsed time

Citation: Jung, M.H., Ko, J.I., Bak, G.I., Ji, W.H. (2021) Analysis of Soil Chemical Characteristics Changes According to Elapsed Time after the Forest Rehabilitation for Drawing Management of Abandoned Coal Mine Forest Rehabilitation Areas in Gangwon-do. Korea Economic and Environmental Geology, v.54, p.457-464, doi:10.9719/EEG2021.54.4.457.

✉ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

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 original work is properly cited. pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2021 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

보고

강원도 폐탄광 산림복구지 관리방안 도출을 위한 산림복구후 시간경과에 따른 토양 화학적특성 분석

정문호¹ · 고주인¹ · 박관인¹ · 지원현^{2,*}

¹한국광해관리공단 연구개발실, ²호서대학교 창의교양학부

*책임저자 : greenidea@hoseo.edu

요 약

본 연구는 강원지역 폐탄광 산림복구지에서 산림복구사업 후 시간경과에 따른 토양 화학적특성을 분석하여 관리방안 도출을 위해 수행하였다. 연구대상지는 강원도 정선군 5개 폐탄광과 영월군 3개 폐탄광 총 8개 폐탄광 산림복구지였으며, 경과시간별로 총 11회에 걸쳐 토양 화학적 특성을 분석하였다. 분석항목은 토양 pH, TOC, 총질소, 탄질률, 유효인산 등 5개 특성이었다. 분석결과 토양 pH와 유효인산 함량은 시간경과에 따라 감소하는 경향을, TOC와 총질소 함량, 탄질률은 증가하는 경향을 보였다. TOC와 총질소는 10년 경과시 폐탄광 산림복구를 위한 복토재의 품질기준을 만족하였으며, 토양 pH는 품질기준보다 낮아졌다. 따라서 산림복구사업후 토양 화학적 특성에 대한 장기모니터링 및 이를 통한 사후관리방안 수립이 필요하다.

주요어 : 폐탄광, 산림복구, 토양 화학적 특성, 사후관리, 경과시간

1. 서 론

우리나라의 석탄산업은 난방과 취사의 주 에너지 공급원 역할을 하여(Yang, et al. 2007) 우리나라의 경제발전에 큰 공헌을 하였다 (Min et al., 2004). 하지만 광산개발 과정에서 산림훼손과 폐석발생, 토양유실, 수질오염 등 많은 환경피해가 발생하였다(Min et al., 2004; Kwon, et al., 2007; Yang, et al., 2007; Jung et al., 2011). 우리나라 정부는 이러한 탄광지역의 환경피해를 해결하기 위해 2006년 한국광해관리공단을 설립하고 전국의 탄광지역을 대상으로 산림복구사업을 수행하고 있다(Jung et al., 2012). 산림복구사업은 광산개발 이전 상태와 최대한 가깝게 산림을 복원하는 것을 목적으로 하고 있다 (Jung et al., 2012). 이를 위해 우선 탄광개발시 발생한 폐석의 유실을 방지하기 위한 구조물을 설치하고 적치장 상부를 목본과 초본으로 피복하여 식생을 도입하는 방식으로 사업을 수행하고 있다.

대부분의 탄광지역은 개발과정에서 토양이 유실되어 식생이 생육하기 위한 기반이 존재하지 않는다. 따라서 외부에서 토양을 반입하여 인위적으로 생육기반을 조성하는 것이 현재 산림복구 방식이다 (Jung et al., 2012; Jung et al., 2015). 하지만, 이는 토양을 채취하는 외부 토

취장에서의 산림훼손 등 2차 훼손이 발생할 우려가 있으며 (Yang, et al., 2007; Jeong, et al, 2010), 또한 채취한 토양이 심토인 경우 식생생육에 필요한 유기물과 필수 양분이 부족하여 식생생육이 원활하지 않을 수 있다 (Costigan et al, 1981; Woo, 2000; Jung et al., 2012; Jung et al., 2015).

이를 해결하기 위해서는 산림복구사업이 완료된 이후에도 지속적으로 식생생육과 토양특성을 모니터링하여 부족한 양분을 시비하는 등 지속적인 관리를 해야 한다. 외국의 경우 폐광지역에서 산림복구사업 후 시비가 식생생육에 주는 영향과 토양특성 변화 등에 대한 연구가 많이 진행되었다 (Bradshaw, 1983; Jochimsen, 1996; Šourková et al., 2005; Shrestha and Lal, 2010). 한국광해관리공단에서도 성공적인 산림복구사업을 위해 지속적으로 폐탄광 산림복구사업지를 대상으로 토양특성을 모니터링하고 이를 산림복구사업에 활용하고 있다 (Jung et al., 2011; Jung et al., 2012).

본 연구는 강원도 정선군과 영월군에 위치한 폐탄광 산림복구지 8개소를 대상으로 폐탄광의 산림복구지에서 지속적인 사후관리 및 산림복구 방안을 수립하기 위한 자료 확보를 위해 시간경과에 따른 산림복구지 토양의 화학적 특성을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지

연구대상지는 강원도 정선군과 영월군에 위치한 폐탄광 산림복구지로 정선군에서 5개 폐탄광, 영월군에서 3개 폐탄광 총 8개 폐탄광 산림복구지를 선정하였다 (Fig. 1). 정선군과 영월군은 강원도 내에서 상호 인접한 지역으로, 산림복구공사 특성상 인근지역에서 복토재를 공급하기 때문에 정선군과 영월군의 사업지에서 사용된 복토재의 특성이 거의 유사하다고 판단하여 대상지를 선정하였다. 복구공사 완료 후 경과시간에 따른 토양특성 변화를 분

석하기 위해 경과시간이 상이한 지역을 대상으로 하였으며, 동우성진탄광과 동원탄광은 5년, 함백탄광은 3년의 시간차를 두고 2회 조사하여, 경과시간별로 총 11회를 조사하였다. 각 대상지별 특징을 Table 1에 나타냈다. 해발고도는 모든 대상지가 500 m 이상이었으며, 동우성진탄광이 해발 1,120 m로 가장 높았다. 삼탄 및 함백탄광은 남사면, 그 외 탄광은 북사면이었으며, 정동탄광을 제외한 다른 지역은 경사 20° ~ 35°에 분포하였다. 조사대상지 하층에서는 주로 쑥과 민들레, 사초류, 산국, 양잔디류 등이 발견되었는데, 자생수종이 아닌 양잔디류의 경우 산림복구공사 시 토양 유실방지를 위해 파종된 것으로 사료된다.

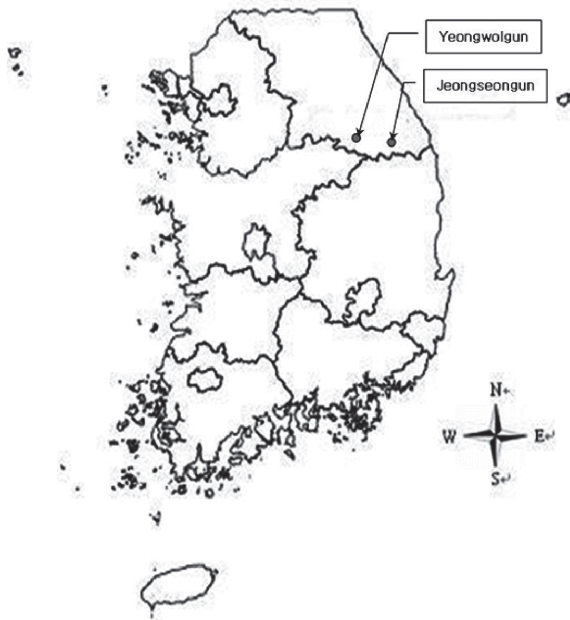


Fig. 1. Location of Study Sites in Korea.

2.2. 조사 및 분석

조사 대상지의 토양특성을 분석하기 위해 각 대상지마다 10 m × 10 m 크기로 조사구를 설치한 후, 해발고도, 방위, 경사 등 지형과 분포 수종을 조사하였다. 토양특성 분석을 위한 토양시료 채취는 표토층의 낙엽층 및 부식토를 제거하고 20 cm 깊이 이내에서 각 대상지마다 5개씩, 총 55개를 채취하였다. 채취한 토양은 풍건한 후 10 mesh 체로 쳐 분석용 시료로 이용하였다. 분석한 항목은 토양 pH, 총유기탄소 (Total Organic Carbon, TOC), 총질소 (Total-N), 유효인산 (Av. P₂O₅) 등이었다. 토양 pH 측정은 pH meter (Orion 3STAR, THERMO, USA)를 이용하였다. 토양시료를 증류수와 1:5 비율로 혼합하여 30분 동안 진탕한 후 여과하여 측정하였다. TOC 함량은 Walkley-Black법 (Walkley, 1947)에 의해 분석하였다. 토양시료를 1N-K₂Cr₂O₇ 용액 및 진한 황산과 혼합한 다음, 지시약 (0.025M o-Phenanthroline-ferrous Complex)을 넣었다. 이를 0.5N-FeSO₄로 적정하여 총유기탄소 함량을 구하였다.

Table 1. Site characteristics of study sites

Elapsed time Year	Coal Mine	Area	Altitude m	Direction °	Slope °	Topography
1	Dongwoo Sungjin (1)	Yeongwol-gun	813	N 15 E	30	Slope
3	Dongwon (1)	Jeongseon-gun	900	N 40 E	33	Valley-Slope
4	Samtan	Jeongseon-gun	940	S 40 E	35	Slope
5	Saewon	Jeongseon-gun	945	N 35 E	28	Slope
6	Dongwoo Sungjin (2)	Yeongwol-gun	1,120	S 15 E	35	Slope
7	Dongwoo Saebang	Yeongwol-gun	900	N 40 E	33	Valley-Slope
8	Dongwon (2)	Jeongseon-gun	912	N 40 E	32	Valley-Slope
10	Hanil	Yeongwol-gun	670	N 20 W	22	Valley-Slope
11	Jungdong	Jeongseon-gun	650	N	10	Plate
14	Hambaek (1)	Jeongseon-gun	565	S 40 W	35	Slope
17	Hambaek (2)	Jeongseon-gun	560	S 25 W	33	Slope

총질소 함량은 Micro Kjeldahl법 (Kjeldahl, 1883)으로 정량하였다. 토양시료를 K_2SO_4 , $CuSO_4$ 혼합촉매와 진한 황산과 혼합한 뒤 약 4시간 동안 가열하여 분해시켰다. 이후, 분해액을 증류수로 희석하고 증류 플라스크에서 증류한 다음 표준 황산용액으로 적정하여 질소함량을 구하였다. 유효인산 함량은 Bray No.1 방법 (Bray and Kurtz, 1945)에 따라 분석하였는데, 먼저 토양 시료를 침출액 ($0.03N NH_4F + 0.025N HCl$)과 혼합하여 침출한 다음 ICP (ICP-1000IV, Shimadzu, Japan)가 장착된 Optical Emission Spectrometer를 이용하여 정량하였다. 토양 분석은 서울대학교농생명과학공동기기원 (Seoul National University National Instrumentation Center for Environmental Management, NICEM)과 한국광해관리공단 분석평가실에서 실시하였다. 시간경과에 따른 토양특성의 변화를 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 통계분석은 SPSS 26 (Embedded on SPSS Statistics 26 Professional, SPSS Inc.)을 사용하였다.

3. 결과 및 해석

3.1. 토양 화학적 특성

조사대상지별 토양 화학적 특성을 Table 2에 나타냈다.

토양 pH 조사대상지의 토양 pH는 한일탄광과 정동탄광이 각각 3.6과 3.7로 가장 낮은 값을 보였으며, 동우성진탄광과 동원탄광 (1), 삼탄탄광이 각각 6.7, 6.5, 6.4로 높은 값을 보였다. 11개소의 평균 토양 pH는 5.3이었다. Jeong et al. (2002)이 연구한 바에 따르면, 우리나라 강원지역 일반산림 토양 A층의 평균 pH는 5.8로 이와 비교하면 5개소는 이보다 높거나 같았고, 다른 6개소는 낮았다. 우리나라 타지역에 위치한 폐탄광 산림복구지의 평균 토양 pH는 전라남도 화순의 경우 약 5.8 (4.7 ~ 6.4) (Jung et al., 2011), 경상북도 문경에서는 약 5.4 (4.1 ~ 8.3) (Jung et al., 2012) 였으며, 충청남도 보령에서는 약 5.9 (4.5 ~ 7.0) (Jung et al., 2015)로 나타났는데, 강원지역에서는 평균 5.3으로 나타나 다른 지역에 비해 다소 낮은 값을 보였다. 특히 타지역에서는 토양 pH의 최소값이 4.1이상이었던데 비해 강원지역에서는 4.0 미만이 2개소였다.

조사대상지의 평균 TOC는 약 1.44 %으로 나타났다. 가장 낮은 값을 보인 탄광은 동우성진탄광으로 0.33 % 였으며, 가장 높은 값을 보인 대상지는 함백탄광 (2)로 4.12 %였다. 강원지역 일반산림 토양 A층의 평균 TOC는 2.80 %로 (Jeong et al., 2002) 이와 비교하면 함백탄광을 제외한 다른 대상지에서 모두 낮았다. 타지역 폐탄광 산림복구지의 경우 보령시와 문경시, 화순군이 각각

Table 2. Soil chemical characteristics of study sites

Coal Mine	Soil pH	TOC	Total N	C/N ratio	Av. P_2O_5
Unit	-	%	%	-	mg.kg ⁻¹
Dongwoo Sungjin (1)	6.71	0.33	0.04	9.07	21.10
Dongwon (1)	6.50	0.49	0.07	7.30	21.09
Samtan	6.40	0.63	0.09	6.91	21.09
Saewon	5.28	0.58	0.06	9.12	21.03
Dongwoo Sungjin (2)	5.91	0.65	0.06	10.81	15.72
Dongwoo Saebang	5.49	0.69	0.08	9.05	17.90
Dongwon (2)	5.83	0.62	0.07	8.40	18.00
Hanil	3.63	1.58	0.15	10.65	14.56
Jungdong	3.67	2.57	0.22	11.87	12.96
Hambaek (1)	4.17	3.62	0.28	13.20	11.12
Hambaek (2)	4.67	4.12	0.20	20.83	10.80
Average	5.30	1.44	0.12	10.65	16.85
Gangwon Natural Forest A-layer soil [†]	5.80	2.80	0.21	13.3	33.4
Hwasun [‡]	5.8 (4.7~6.4)	1.1 (0.2~2.0)	0.08 (0.02~0.13)	14.6 (7.9~16.7)	8.3 (2.7~14.6)
Mungyeong [‡]	5.4 (4.1~8.3)	1.92 (0.05~4.50)	0.12 (0.02~0.19)	14.7 (2.2~27.8)	55.0 (7.6~174.6)
Boryeong [‡]	5.2 (4.5~7)	1.5 (0.1~2.3)	0.09 (0.03~0.18)	16.7 (6.6~15.7)	14.0 (4.8~63.1)

[†]: Jeong et al. (2002), [‡]: Jung et al. (2011), [‡]: Jung et al. (2012), [‡]: Jung et al. (2015)

평균 1.5 % (0.1 % ~ 2.3 %), 1.9% (0.05 % ~ 4.50 %), 1.1 % (0.2 % ~ 2.0 %)를 보였는데 (Jung et al., 2011; Jung et al., 2012; Jung et al., 2015), 강원지역의 경우 평균값은 보령군과 문경시보다는 낮고 화순군보다는 높았으며, 최소값과 최대값은 타지역에 비해 높은 경향을 보였다.

총질소의 경우 평균 0.12 %였으며, 0.05 % ~ 0.28 %의 범위를 보였다. 강원지역 일반산림 A층 토양의 평균 0.21%에 비하면 평균값은 약 57 % 수준이었으며, 조사대상지 11개소 중 9개소가 일반산림보다 낮은 값을 보였다. 하지만 타지역과의 평균값 비교하면 보령시 (0.09 %)와 화순군 (0.08 %)보다 다소 높은 것으로 나타났다.

TOC와 총질소 값을 통해 탄질률을 계산한 결과 동원탄광 (1)이 7.3로 가장 낮았으며, 함백탄광 (2)가 20.8로 가장 높았다. 평균값은 10.7이었으며, 타지역의 평균값 (보령 16.7, 문경 14.7, 화순 14.6)이나 강원지역 일반산림 A층 토양 (13.3)보다 낮은 값을 보였다.

유효인산의 경우 평균값은 16.9 mg.kg⁻¹이었으며, 10.8 mg.kg⁻¹ ~ 21.1 mg.kg⁻¹의 범위를 보였다. 타지역과 비교 시 조사대상지의 평균 유효인산값은 보령시와 문경시의 평균값과 최고값이 낮았으나, 최소값은 오히려 보령시, 문경시, 화순군 등 3개 시군보다는 높은 것으로 나타났다.

3.2. 경과년수에 따른 토양 특성

산림복구 완료 후 경과년수에 따른 토양의 화학적 특성 변화를 알아보기 위해 회귀분석을 실시한 결과를 Fig. 2와 Table 3에 나타냈다. 5개 화학적 특성 모두 경과년수에 따라 유의한 변화를 보였다.

토양 pH는 시간경과에 따라 감소하는 경향을 보였다. Lee et al. (2008)은 우리나라 폐탄광 산림복구지에서 토양특성을 분석한 결과 토양 pH는 경과시간에 따라 감소한다고 하였다. 또한 Hur et al. (2009)이 영일사방사업지에서 연구한 바에 따르면 식생이 발달할 경우 식생에 의한 양이온 흡수량은 증가하는 반면 수소이온의 방출량이 많아지면서 토양 pH가 낮아질 수 있다고 하였는데, 본 연구도 사업완료후 식생이 발달함에 따라 이와 비슷한 결과를 보인 것으로 사료된다. 토양 pH에 따른 수중별생육 수종을 살펴보면 활엽수는 대부분 토양 pH 5.6 이상에서 생육하는 것으로 알려졌으며 (Jung and Ha, 2013), 국가표준 KS E 1001 (KSInfo, 2015)에서는 폐탄광 산림

복구를 위한 복토재의 품질기준으로 토양 pH를 식물의 양분유효도가 가장 높은 토양 pH 범위인 5.6 ~ 7.3 (Trough, 1947) 으로 권장하고 있다 (KSInfo, 2015). 이는 산림토양이 산성화 되면 토양내 H⁺가 증가하며, 이에 따라 Al³⁺ 이온이 증가하게 되는데 (Jin et al., 2008) 이는 결국 식생생육의 저하로 이어져 산림복구사업의 효과성이 떨어지는 결과를 가져오게 되기 때문이다. 국내 폐광산 산성 토양 지역의 경우 식재 묘목이 고사하고, 주변로부터의 식생유입도 저조하여 식생회복이 원활하지 못한 사례들이 있다 (Jung et al., 2015; Jung et al., 2020). 본 연구결과에서는 산림복구사업 후 7년이 경과하면 토양 pH가 5.6 이하로 감소하였으며, 10년 이상 경과시 토양 pH는 5.0 이하로 나타났다. 따라서 산림복구사업 후 초기에는 식생생육에 대한 토양 pH의 영향은 적지만 시간이 경과할수록 토양 pH가 감소하면서 악영향을 미칠 수가 있다. 따라서 토양 pH에 대한 모니터링을 지속적으로 하고 석회비료 등 시비를 통해 토양 pH를 적정수준으로 유지하는 관리가 필요할 것으로 판단된다.

TOC는 시간경과에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이는 체코의 폐탄광 산림복구지에서 복구 초기 단계에 유기물 함량이 낮다고 한 Šourková et al. (2005)의 연구결과나, 인디아에서 폐광산을 복구한 후 시간이 경과함에 따라 토양내 탄소가 증가한다고 한 Singh et al. (2004)의 연구결과와도 유사한 결과이다. 또한, Shrestha and Lal (2010)은 미국 오하이오 폐탄광 42개소에서 토양내 탄소와 질소는 시간이 경과함에 따라 증가한다고 하였다. 토양내 탄소는 지상부 식생으로부터 발생한 낙엽이 부식되어 토양에 축적되는 유기물이 주 공급원이다 (Jung et al., 2011). 산림복구사업 완료후 초기에는 지상부 식생의 발달이 더디고 낙엽량이 적어 유기물 축적이 부족하여 탄소량이 적지만 (Šourková et al., 2005; Jung et al., 2011), 시간이 경과함에 따라 식생이 발달하면 낙엽량도 많아져 탄소량도 증가한다 (Cole et al., 1993; Jung et al., 2015). TOC는 토양내 유기물을 나타내는 지표이다. 토양 내 유기물은 식생과 상호작용을 하는 토양 미생물의 서식처의 역할을 할 뿐만 아니라, 식물생육에 필요한 각종 양분을 공급하는 한편, 토양의 보습, 보온 등 산림생태계가 유지되기 위해 중요한 역할을 하고 있다 (Jin, et al., 1994). 따라서 TOC 역시 국가표준 KS E 1001 (KSInfo, 2015)

Table 3. Regression analysis of soil properties according to elapsed time

Factors	Soil pH	TOC	Total- N	C/N ratio	Av. P2O5
p	*	**	**	*	**

*Significant at the 0.005 level of p-value

**Significant at the 0.001 level of p-value

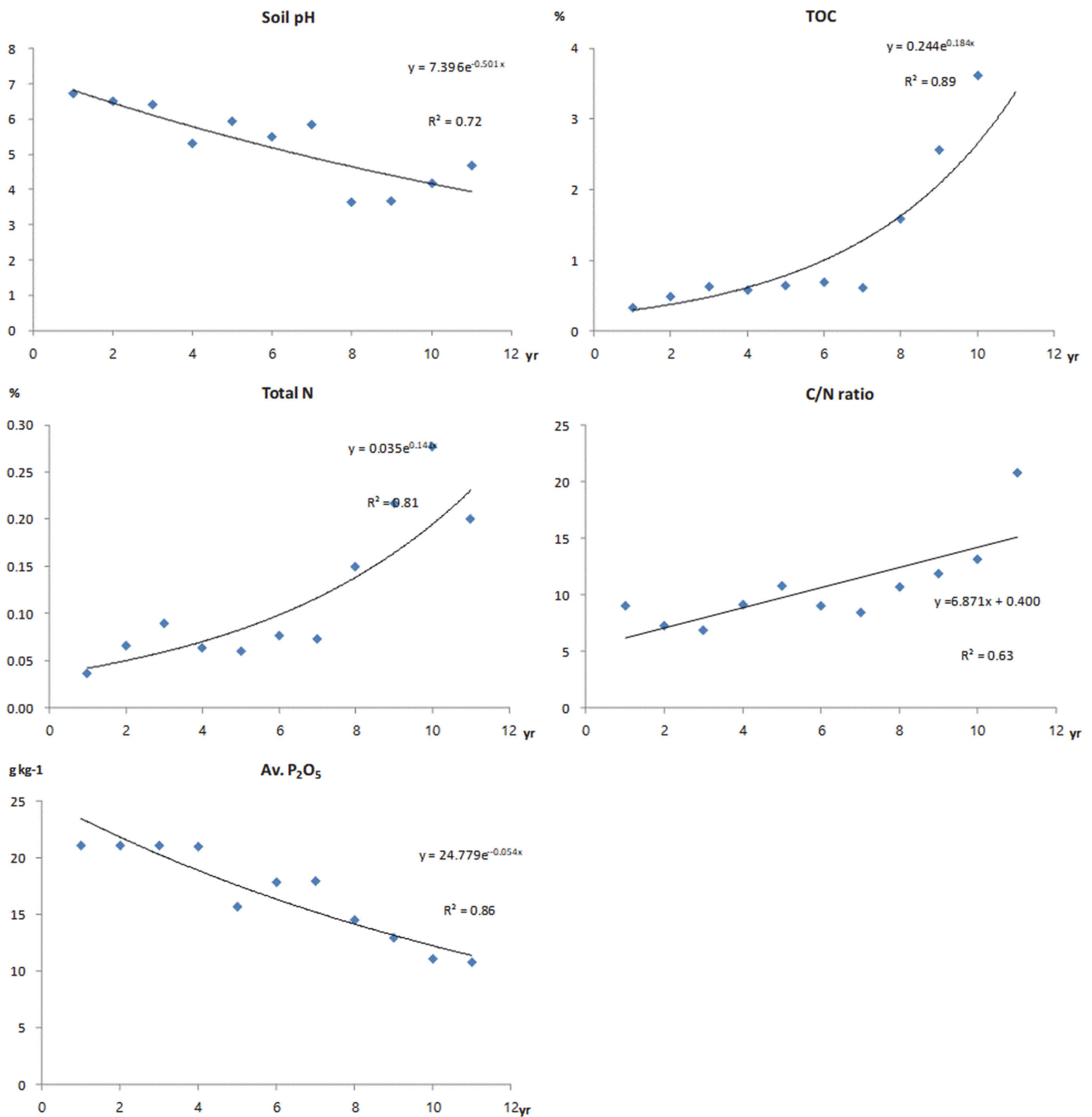


Fig. 2. Relationship between soil chemical characteristics and elapsed time.

의 폐탄광 산림복구를 위한 복토재의 품질기준에 포함되어 있는데, 권장치는 1.2 % 이상이다. 이와 비교하면, 총 11개소 중 7개소가 낮은 수치를 보였으며, 경과시간으로 보면 산림복구사업 후 10년 미만이다. 따라서 산림복구사업 후 식생이 발달하여 낙엽량이 충분히 발생하기 이전까지는 시비를 통해 토양에 유기물을 공급하기 위한 관리가 필요할 것으로 생각된다.

총질소는 TOC와 마찬가지로 시간경과에 따라 증가하는 경향을 보였다. 토양내 총질소 함량은 일반적으로 토양 유기물과 밀접한 관계를 보이는데 (Kim et al., 1991), 이는 TOC와 마찬가지로 산림토양에서 총질소의 주 공급원은 유기물이기 때문이다. 특히 TOC와 총질소 모두 산림복구사업 후 초기에는 증가속도가 느리다가 시간이 경과하면서 점차 빨라지는 경향을 보였는데, 이는 시간이

경과함에 따라 식생이 안정화되면서 낙엽량의 발생이 더 많아지기 때문인 것으로 사료된다 (Jung et al., 2015). 산림토양에서 총질소가 가지는 역할은 매우 중요하다. 산림토양에서 질소는 대부분 유기태로 존재하며 무기화 하는 속도가 느릴 뿐만 아니라 (Jin et al., 1994). 생장속도가 빠른 초기에 질소 요구량이 많다. 본 연구에서 총질소는 TOC와 마찬가지로 10년이 경과해야 국가표준 KS E 1001 (KSInfo, 2015)의 폐탄광 산림복구를 위한 복토재의 품질 중 총질소 기준인 0.09 % 이상을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 산림복구사업 초기에 유기물 뿐만 아니라 질소 시비를 통해 토양 양분을 적정 수준으로 유지하는 관리가 필요하다.

TOC와 총질소가 시간경과에 따라 증가하는 경향을 보인 결과 탄질물 역시 증가하는 경향을 보였다. 다만 TOC와 총질소는 지수함수 형태의 증가경향인 반면, 탄질물은 1차함수 형태인 것이 달랐다. 탄질물이 산림토양에서 중요한 이유는 토양내 질소에 대한 식생의 이용도에 영향을 주기 때문이다 (Jin et al., 1994). 토양내 질소의 함량이 충분하다 하더라도 탄질물이 지나치게 높거나 낮으면 식물이 이용할 수 있는 질소는 제한받게 된다. 일반적으로 산림토양의 A 층은 12 ~ 30을 유지한다. 이에 비한다면 본 연구결과에서 탄질물은 약 14년이 경과해야 안정적이 된다. 따라서 산림복구사업후 유기물과 질소 관리 등을 위해 시비할 경우 국가표준 KS E 1001 (KSInfo, 2015)에 따른 권장범위도 중요하지만 탄질물을 적정 수준으로 맞추기 위해 균형있는 시비를 해야 식생생육에 도움이 될 것으로 판단된다.

토양내 유효인산 함량은 유기물과 토양 pH 등의 영향을 받는다 (Jin et al., 1994; Lee, 2001; Jung et al., 2011). 본 연구에서 유기물은 시간 경과에 따라 증가하였지만 토양 pH는 감소하였다. 따라서 본 연구에서 시간 경과에 따라 감소하는 경향을 보인 유효인산은 유기물보다 토양 pH의 영향을 더 받은 것으로 사료된다. 이는 토양 pH가 낮을 경우 인산의 불용화가 진행되어 토양 내 유효인산의 함량이 낮아지게 된다는 Jung et al. (2011)의 연구결과와도 유사한 결과이다. 유효인산은 국가표준 KS E 1001 (KSInfo, 2015)의 폐탄광 산림복구를 위한 복토재의 품질 기준에 포함되어 있지 않지만 질소와 마찬가지로 식물이 생육하기 위한 주요 양분에 포함되는데, Lee (2001)에 따르면 토양 pH 5.0 이하에서는 Fe나 Al과 결합하여 불용성 인산으로 바뀌기 때문에 식물이 흡수할 수 없게 된다. 본 연구에서는 산림복구사업시 10년 경과하면 토양 pH가 5.0 이하로 감소하는 것으로 나타났기 때문에 산림복구사업시 인산비료 시비를 실시함은 물론 지속적인 관리를 통해 인산의 적정수준을 유지해야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 시간경과에 따른 폐탄광 산림복구지 토양의 화학적 특성을 분석하여 폐탄광의 산림복구지에서 지속적인 사후관리 및 산림복구 방안을 수립하기 위한 자료를 확보하기 위해 수행하였다.

1. 토양 pH와 유효인산은 시간경과에 따라 감소하는 경향을 보였다. 특히 10년 경과시 토양 pH는 국가표준 KS E 1001에서의 폐탄광 산림복구를 위한 복토재의 품질기준 최소범위인 pH 5.6 이하로 감소하였다.

2. TOC와 총질소 함량, 탄질물은 시간경과에 따라 증가하는 경향을 보였다. 특히 TOC와 총질소 함량은 초기에는 증가속도가 느렸으나 시간이 경과함에 따라 점차 빨라지는 경향을 보였다. 또한 TOC와 총질소 함량은 10년이 경과해야 국가표준의 폐탄광 산림복구를 위한 복토재의 품질기준에 도달하는 것으로 나타났다.

3. 폐탄광 산림복구사업시 식생생육을 원활히 하기 위해 사업당시는 물론 사업후 토양특성에 대한 지속적인 모니터링을 실시하고 이를 바탕으로 토양 pH 중화, 유기물 및 총질소, 유효인산 등 필수 양분에 대한 시비가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2020년 한국광해관리공단으로부터 기술개발 사업비를 지원받아 수행되었습니다.

References

- Bradshaw, A.D. (1983) The reconstruction ecosystems: Presidential Address to the British Ecological Society, December 1982. *J. Appl. Ecol.*, v.20, p.1-17. doi: 10.2307/2403372.
- Bray, R.H. and Kurtz, L.T. (1945) Determination of Total Organic, and Available Forms of Phosphorus in Soils. *Soil. Sci.*, v.59, p.39-46.
- Cole, C.V., Paustian, K., Elliott, E.T., Metherell, A.K., Ojima, D.S. and Parton, W.J. (1993) Analysis of agroecosystem carbon pools. *Water Air Soil Poll.*, v.70. p.357-371. doi: 10.1007/BF01105007.
- Costigan, P.A., Bradshaw, A.D. and Gemmill, R.P. (1981) The reclamation of acid colliery spoil. I. Acid production potential. *J. Appl. Ecol.*, v.18, p.865-878. doi: 10.2307/2402377.
- Jeong, J.H., Koo, K.S., Lee, C.H. and Kim, C.S. (2002) Physico-Chemical Properties of Korean Forest Soil by Regions. *Jour. Korean For. Soc.*, v.91, p.694-700.
- Jeong, Y.H., Lee, I.K., Lim, J.H., Seo, K.W. and Lee, C.H. (2010) Comparison of Seedling Growth by Treatment of Vegetation Basis in an Abandoned Coal Mine Area. *J. Korean. Env. Res. Tech.*, v.13, p.87-96.
- Jin, H.O., Lee, M.J., Shin, Y.O., Kim, J.J. and Jun, S.K. (1994)

- Forest Soil. Hyangmoonsa, Seoul, Korea.
- Jin, H.O., Bang, S.H., Lee, C.H. and Kim, S.Y. (2008) Effects of Artificially Acidified Soil on the Growth and Nutrient Status of *Pinus Densiflora* and *Quercus acitissima* Seedlings. Jour. Korean For. Soc., v.97, p.266-273.
- Jochimsen, M.E.A. (1996) Reclamation of colliery mine spoil founded on natural succession. Water Air Soil Poll., v.91, p.99-108 doi: 10.1007/BF00280926.
- Jung, M.H., Lee, J.S. and Ji, W.H. (2020) Soil Neutralizer Selection for Rehabilitation in the Acid Soil of Abandoned Metal Mine Using *Miscanthus sinensis* Anderss.. Korean J. Soil Sci. Fert., v.53, p.237-246. doi: 0.7745/KJSSF.2020.53.3.237.
- Jung, M.H., Shim, Y.S. and Kim, T.H. (2011) Characteristics of Soil Chemical Properties in Abandoned Coal Mine Forest Rehabilitation Areas in Hwasun, South Jeolla Province. Korean J. Soil Sci. Fert., v.44, p.1010-1015. doi: 10.7745/KJSSF.2011.44.6.1010
- Jung, M.H., Shim, Y.S., Kim, T.H., Oh, J.Y. and Jung, Y.S. (2012) Characteristics of Soil Chemical Properties in Abandoned Coal Mine Forest Rehabilitation Areas in Mungyeong, Gyeongsangbuk-do. Korean J. Soil Sci. Fert., v.45, p.733-737. doi: 10.7745/KJSSF.2012.45.5.733
- Jung, M.H., Shim, Y.S., Kim, Y.S., Park, M.J. and Jung, K.H. (2015) Characteristics of Soil Chemical Properties in Abandoned Coal Mine Forest Rehabilitation Areas in Boryeong City, Chungcheongnam-do. Korean J. Soil Sci. Fert., v.48, p.744-750. doi: 10.7745/KJSSF.2015.48.6.744
- Jung, Y.S. and Ha, S.G. (2013) Fundamental and application of Soil Science for Agriculture and Environment. 1st ed., Kangwon Univ., Chuncheon, Korea.
- Kjeldahl, C. (1883) A new method for the determination of nitrogen in organic matter. Z. Anal. Chem., v.22, p.366.
- Kim, T.H., Jung, J.H., Lee, C.H., Gu, K.S., Lee, W.K., Kang, I.A. and Kim, S.I. (1991) Growth of major species according to soil types. KFRI Res. Rep., v.42, p.91-106.
- KSInfo (2015) KS E 1001, Mine Reclamation — Mine Areas — Covering for Rehabilitation of Abandoned Coal Mine Areas — Requirement for Quality. http://standard.ats.go.kr/CODE02/USER/0B/03/SerKS_View.asp.
- Kwon, H.H., Shim, Y.S., Lee, J.S., Kim, T.H., Kim, J.A., Yoon, S.H. and Nam, K.S. (2007) Cause and Countermeasure of Mine Hazard. Mine Rec. Tech., v.1, p.5-25.
- Lee, C.S., Cho, Y.C., Shin, H.C., Lee, S.M., Oh, W.S., Park, S.A., Seol, E.S. Lee, C.H., Eom, A.H. and Cho, H.J. (2008) An Evaluation of the Effects of Rehabilitation Practiced in Coal Mining Spoils in Korea: 2. An Evaluation Based on the Physicochemical Properties of Soil. J. Ecol. Field Biol., v.31, p.23-29. doi: 10.5141/JEFB.2008.31.1.023.
- Lee, K.J. (2001) Tree Physiology. 2nd ed., Seoul Univ., Seoul, Korea.
- Min, J.G., Lee, J.H., Woo, S.Y., Kim, J.K. and Moon, H.S. (2004) Vegetation structure of some abandoned coal mine lands in Taebaek area, Gangwon Province. Journal of KSAFM, v.6, p.256-264.
- Shrestha, R.K. and Lal, R. (2010) Carbon and nitrogen pools in reclaimed land under forest and pasture ecosystem in Ohio, USA. Geoderma, v.157, p.196-205. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.04.013.
- Singh, A.N., Raghubanshi, A.S. and Singh, J.S. (2004) Impact of native tree plantations on mine spoil in a dry tropical environment. FOREST. ECOL. MANAG. v.187, p.49-60. doi: 10.1016/S0378-1127(03)00309-8.
- Šourková, M., Frouz, J. and Šantrůčková, H. (2005) Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic). Geoderma, v.124, p.203-214. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.05.001.
- Kjeldahl, J. (1883) Neue Methde zur Bestimmung des Stickstoffs in Organischen Kurpern. Z. Anal. Chem., v.22, p.366-382. doi: 10.1007/BF01338151.
- Walkely, A. (1947) A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. Soil Sci., v.63, p.251-257.
- Woo, B.M. (2000) Evaluation for Rehabilitation Countermeasures of Coal-mined Spoils and Denuded Lands. J. Korean. Env. Res. & Reveg. Tech., v.3, p.24-34.
- Yang, J.E. Ok, Y.S. and Park, Y.H. (2007) Rehabilitation Ecological Engineering Rehabilitation of Degraded Mine Areas. Mine Rec. Tech., v.1, p.67-75.