Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 39, No. 4: 493-503/ August, 2019
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2019.39.4.0493

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Environmental and Ecological Engineering 환경 및 생태공학

산성배수 비탈면의 중화층 종류에 따른 녹화효과

조성록* · 김재환**
Cho, Sung Rok*, Kim, Jae Hwan**

The Vegetation Effect of under Neutralizing Layer Type on the Acid Drainage Slope

ABSTRACT

This study is composed of nine treatments [Control : "no neutralizing layer+vegetation layer" 3 cm, Treatment 1 : "no neutralizing layer+vegetation layer" 5 cm, Treatment 2 : "no neutralizing layer+vegetation layer" 7 cm, Treatment 3 :"neutralizing layer (cement 3 %)+ vegetation layer (cement 1 %)" 3 cm, Treatment 4 : "neutralizing layer (cement 3 %)+vegetation layer (cement 1 %)" 5 cm, Treatment 5 : "neutralizing layer (cement 3 %)+vegetation layer (cement 1 %)" 7 cm, Treatment 6 : "neutralizing layer [(Ca·Mg)CO_3] +vegetation layer" 3 cm, Treatment 7 : "neutralizing layer [(Ca·Mg)CO_3]+vegetation layer" 5 cm, Treatment 8 : "neutralizing layer [(Ca·Mg)CO_3]+vegetation layer" 7 cm] to find out the vegetation effects according to neutralizing layer types of the acid drainage slope. There were no significant differences observed in soil hardness and soil moisture content of neutralizing layer type while highly difference of moisture content was observed according to the neutralizing and vegetation layer thickness. As for soil acidity, strong acid was shown in the control, treatment 1 and treatment 2. Neutralizing effects were outstanding in treatments of 3, 4, 5 (cement treatment group), 6, 7 and 8 (limestone treatment group). Concerning plants growth characteristics, surface coverage rates, number of germinating woody plants, plant height, and plant root status, there were excellent effects observed in the experimental groups mixed with cement (treatments 3, 4 and 5) and limestone (treatments 6, 7 and 8). At the initial stage, however, plant roots were negatively affected in cement layer treatments of 3, 4 and 5. However, no difference was shown in each layer thickness on the acid drainage slope whereas 3~5 cm thickness neutralizing layer was appropriate in consideration of economic feasibility.

Key words : Soil acidity, Coverage rate, Number of germinating woody plant, Plant height, Plant root status

초 록

산성배수 비탈면의 중화층 종류에 따른 녹화 효과를 알아보고자 9개의 실험구 [대조구: "무처리층+식생층 3 cm", 실험1구: "무처리층+식생층 5 cm", 실험2구: "무처리층+식생층 7 cm", 실험3구: "중화층(cement 3 %)+식생층(cement 1 %) 3 cm", 실험4구: "중화층(cement 3 %)+식생층(cement 1 %) 5 cm", 실험5구: "중화층(cement 3 %) + 식생층(cement 1 %) 7cm", 실험6구: "중화층[(Ca·Mg)CO_3]+식생층 3 cm", 실험7구: "중화층[(Ca·Mg)CO_3]+식생층 5 cm", 실험8구: "중화층[(Ca·Mg)CO_3]+식생층 7 cm"]를 조성하였다. 중화층 종류에 따른 표면경도 및 함수율의 유의차이는 없었으나 두께에 따른 함수율의 차이는 있었다. 토양산도(pH)는 중화제를 처리하지 않은 실험구(대조구, 실험1구, 실험2구)에서 높게 나타났고, 시멘트를 배합한 실험구(실험3구, 실험4구, 실험5구)와 석회고토를 배합한 실험구(실험6구, 실험7구, 실험8구)에서 중화효과가 크게 나타났다. 식물생육 특성은 지면피복율, 목본류 발아개체수 및 수고, 식물 뿌리상태 등이 시멘트를 배합한 실험구 및 석회고토를 배합한 실험구에서 우수했으나 시멘트를 배합한 실험구는 초기 식물 뿌리생장에 좋지 못한 결과가 나타나 주의가 요구된다. 또한, 산성배수 비탈면의 중화층 두께에 따른 차이는 없었으며 경제성을 고려할 때 3~5 cm가 적정할 것으로 판단된다.

검색어 : 토양산도, 피복율, 목본류 발아개체수, 수고, 식물 뿌리상태

* 산수그린텍 (Sansu Greentech., CO., Ltd · sansu0488@naver.com)
** 정회원 · 교신저자 · 청주대학교 휴먼환경디자인학부 조경도시계획전공 (**Corresponding Author** · Cheongju University · smileeye77@cju.ac.kr)

Received January 14, 2019/ **revised** March 31, 2019/ **accepted** July 11, 2019

Copyright ⓒ 2019 by the Korean Society of Civil Engineers
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.

1. 서 론

우리나라는 국토면적의 3/4이 산지지형으로 도로건설, 대규모 산업단지 및 주거단지 조성 등 각종 건설공사로 인하여 훼손 비탈면은 계속해서 증가하고 있는 추세이다. 최근 비탈면 녹화는 환경친화적인 건설사업의 일환으로 생태적 녹화를 위한 녹화공법 및 기술이 적용되고 있으나, 특이토질에서 발생하는 비탈면의 경우 적절한 대책 없이 획일적인 사면녹화를 적용한 결과 식생의 생장불량, 식물고사, 토양오염 등 많은 문제가 나타나고 있다(Lee et al., 2013).

근래 비탈면 녹화는 산성배수를 유발하는 황화광물과 같은 특이토질에 대한 문제가 크게 부각되고 있으며 그 피해는 심각한 수준이다(Lee et al., 2013). 황화광물은 우리나라 대부분의 금속 광화대에서 흔히 관찰될 뿐만 아니라, 조선계 및 옥천계의 탄층과 안산암 등의 화산암 내에도 상당량 포함되어 있는 광물로 국토 면적의 약 20 %정도가 매장되어 있다(Fig. 1; KIGAM, 2017). 황화광물(sulfides)은 퇴적물의 속성작용, 열수와 암석의 반응, 열수로부터 침전 등 다양한 지질작용에 의하여 생성되며(Matlock et al., 2003), 지반굴착, 배수, 지하수 수위 강하, 준설 등에 의하여 지표에 노출되어 용존산소와 반응하면서 황산을 생성하고 산성배수를 발생시켜 많은 문제를 야기하고 있다(Kim, 2007).

산성배수가 발생하는 비탈면은 다양한 물리·화학적 처리방법이 있지만, 비용이 많이 들고 지속효과가 길지 않아 효율적이지 못하므로(Smith and Bradshaw, 1979), 주변경관과 조화를 이루고 생태적 일체화도 가능한 저비용, 고효율, 친환경의 녹화기술을 개발하는 것이 시급한 과제이다(Jeong et al., 2010). 이에 대한 대안으로 산성배수 발생지의 기질특성을 분석하고, 식물의 생육에 적합하도록 식생기반을 개량하여 식생으로 피복하는 생태적인 접근방법이 제시되고 있으나(Lunt, 2003), 현재로서는 연구 및 기술이 미흡한 실정이다.

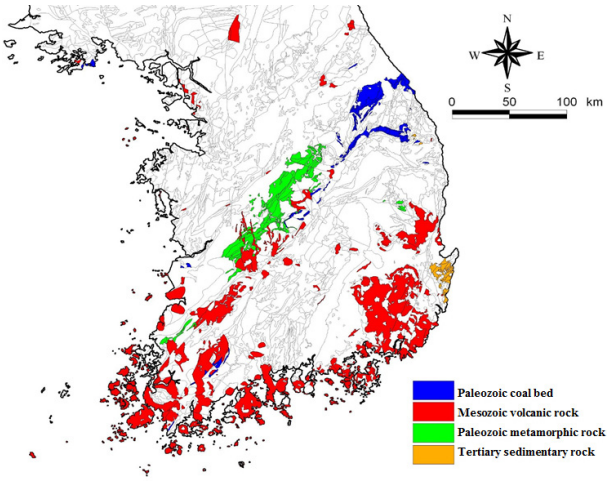

Fig. 1. Distribution of Rocks with High Potential of Acid Drainage (KIGAM, 2017)

산성배수 발생 비탈면의 성공적인 녹화를 위해서는 식생이 생육할 수 있도록 산성배수를 유발하는 황화광물을 중화시키는 방법과 산성배수가 모세관현상으로 상승해 식생에 피해를 주는 것을 방지해야 한다(KIGAM, 2017). 산성배수의 발생을 억제하는 방법으로 황화광물 표면코팅기법이 쓰이고 있으나(Matlock et al., 2003), 도로건설공사에서 황화광물을 성토재로 사용하거나 절리가 많은 비탈면의 경우 산성배수의 발생을 완벽하게 억제하기 어려운 실정으로 우수의 용존산소 제거와 산성배수의 중화처리가 가능한 보완대책이 필요하다(Lee at al., 2013).

산성배수 발생 비탈면에서 황화광물 코팅처리는 상부토양으로부터 산성배수의 발생을 일정기간 근원적으로 억제할 수 있지만 강우강도가 높은 경우 우수의 일부가 황화광물 코팅 처리층 하부까지 침투하여 산성배수를 발생시킬 수 있으며(Kim, 2007), 코팅 처리층 하부에서 생성된 산성배수가 모세관현상에 의하여 식생기반재로 상승하여 식생의 활착을 방해하므로, 이를 해결하기 위한 방안으로 코팅 처리층 상부에 중화층을 조성하는 방법이 모색되고 있다(KIGAM, 2017). 중화층을 조성하는 재료는 석회질 생석회(CaO), 소석회[$Ca(OH)_2$], 탄산석회($CaCO_3$), 고토(MgO), 시멘트 등 알카리 성분이 강한 것으로 산성토양의 토양산도(pH)를 조절해 주어야 하며(Chung, 2012), 중화층의 두께는 과다하게 조성할 경우 공사금액이 상승하는 문제가 발생하므로 적정한 두께에 관한 기초자료가 필요하다. 실험실 연구결과 중화층에 사용된 석회고토[$(Ca{\cdot}Mg)CO_3$]는 많은 양을 투입하여도 약알카리(pH 8)로 유지되는 이점이 있었으나 중화에 긴 시간이 소요되고 고비용의 공사비가 발생하는 단점이 있다(Kim et al., 2008). 반면, 시멘트는 석회고토에 비해 가격이 저렴하고 반응속도가 빠른 장점이 있으나 중화층에 배합된 시멘트 함량이 5 %이상일 경우 알칼리에 의한 식생의 피해가 나타날 수 있으므로 주의가 요구되며 현장에서 이에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다(KIGAM, 2017).

본 연구는 산성배수가 발생하는 비탈면에서 중화층의 종류에 따른 토양의 물리·화학적 특성과 식물생육특성을 알아보고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 실험구 조성 및 처리

실험 비탈면은 산성배수가 발생하는 한국지질자원연구원 포항지질자원 실측연구센터 내 성토사면으로 비탈경사는 1 : 1~1.2 범위를 보였고 비탈면은 남향을 이루고 있다. 먼저 사면을 정리한

후 식생기반재가 흘러내리지 않도록 코아네트를 설치한 후 구획을 나누고 실험구를 조성하였다.

대조구, 실험1구, 실험2구는 사면위에 식생기반재(부엽토, 황토, 임목파쇄칩, 마사토, 슬러지 등으로 배합된 조성물)를 1 cm, 2 cm, 3 cm 두께로 나누어 취부하였다. 실험3구~실험8구는 물 1 l 기준으로 K_2HPO_4 1 g과 $NaHCO_3$ 10 g을 혼합·희석하여 30 l /m^2의 혼합수용액을 사면위에 균일하게 살포하여 침투되도록 처리하고, 실험3구, 실험4구, 실험5구는 시멘트가 3 % 혼합된 기반재를, 실험6구, 실험7구, 실험8구는 석회고토[(Ca·Mg)CO_3]가 10 % 혼합된 식생기반재를 각각 1 cm, 2 cm, 3 cm 두께로 취부하여 중화층을 조성하였다. 이후 중화층 사면 위에 코아네트를 추가로 설치한 후 대조구, 실험1구, 실험2구와 실험6구, 실험7구, 실험8구는 종자가 혼합된 식생기반재를 2 cm, 3 cm, 4 cm 두께로 취부하였고, 실험3구, 실험4구, 실험5구는 종자와 시멘트가 1 % 혼합된 식생기반재를 2 cm, 3 cm, 4 cm 두께로 취부하여 식생층을 각각 조성하였다(Table 1). 실험구의 크기는 1×1 m (1 m^2)의 정사각형으로 실험구에 따라 9개의 실험구를 3반복 처리하여 총 27개의 실험구를 2018년 4월 19일에 완성하였다.

2.2 공시식물 발아율 및 파종량

공시식물은 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009) 지침에 준하여 비탈면 녹화에 많이 활용되고 건조에 강하며 쉽게 구입할 수 있는 목본류(자귀나무, 낭아초), 초본류(벌노랑이, 패랭이꽃, 금계국)와 초기 생장이 빠른 한지형잔디류(톨훼스큐) 등의 종자를 선별하여 혼합하였다. 종자 발아율 실험은 2018년 3월 5일부터 1개월간 광, 온도, 습도 등의 생육 환경 조절이 가능한 생장상(Growth Chamber: DS-54GLP)에서 실시하였으며, 생장상 조건은 습도 70 %, 8시간 동안 광조건으로 25 °C, 16시간 동안 암조건으로 15 °C의 온도를 유지시킨 후 식물별로 100립을 기준으로 3반복 처리하여 발아율을 조사하였다(Anonymous, 1965).

발아율 조사결과 식물종자별로 53.4~88.9 %가 나타났으며, 각 처리구의 종자 파종량은 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2009) "도로비탈면 녹화공사의 설계 및 시공지침"에 준하여 목본류 30 %, 초본류 60 %, 한지형잔디류 10 %의 배합비율로 총 25 g/m^2을 파종하였다(Table 2).

2.3 조사 및 분석방법

실험 대상지 원지반 토양의 이화학적 특성을 알아보기 위해 토양을 충남대학교 토양환경분석센터에 의뢰하여 분석하였으며, 조성한 실험구의 표면경도(mm)와 함수율(%)은 2018년 5월 18일부터 10월 16일까지 6차례 측정하였고, 토양산도(pH)는 5월과

Table 1. Nine Different Acid Drainage Neutralizing Systems

Systems	Soil neutralizing material	Neutralizing layer material	Neutralizing layer thickness	Vegetative layer thickness	Total thickness
Control	No neutralizing	No neutralizing	1 cm	2 cm	3 cm
Treatment 1	No neutralizing	No neutralizing	2 cm	3 cm	5 cm
Treatment 2	No neutralizing	No neutralizing	3 cm	4 cm	7 cm
Treatment 3	K_2HPO_4 + $NaHCO_3$	Cement 3 %	1 cm	Cement 1 % 2 cm	3 cm
Treatment 4	K_2HPO_4 + $NaHCO_3$	Cement 3 %	2 cm	Cement 1 % 3 cm	5 cm
Treatment 5	K_2HPO_4 + $NaHCO_3$	Cement 3 %	3 cm	Cement 1 % 4 cm	7 cm
Treatment 6	K_2HPO_4 + $NaHCO_3$	(Ca·Mg)CO_3 10 %	1 cm	2 cm	3 cm
Treatment 7	K_2HPO_4 + $NaHCO_3$	(Ca·Mg)CO_3 10 %	2 cm	3 cm	5 cm
Treatment 8	K_2HPO_4 + $NaHCO_3$	(Ca·Mg)CO_3 10 %	3 cm	4 cm	7 cm

Table 2. Plant Seeding Amount of Each Soil-Seed Mixture Spray Used in the Experiment

Flora	Scientific name	Germination rate (%)	Seeding amount (g/m^2)
Woody plants	*Albizzia julibrissin*	53.4	5.0
	Indigofera pseudo-tinctoria	61.8	2.5
herbaceous plants	*Lotus corniculatus* var. *japonicus*	66.5	5.0
	Dianthus sinensi	68.7	5.0
	Coreopsis drummondii L	78.3	5.0
Cool-season turfgrass	*Festuca arundinacea*	88.9	2.5
Total			25.0

10월 2차례에 걸쳐 측정하였다. 표면경도는 실험구의 기반이 어느 정도 안정화되었다고 판단된 후 산중식(山中式)경도계를 이용하였으며, 함수율은 Trase사의 토양수분측정기(Time Domain Reflectometry, 모델 : 6060ED6), 토양산도는 토양산도계(HI 99121 Soil pH Meter)를 이용하여 각 시험구마다 3회씩 일률적으로 측정하였다. 식물생육특성은 식물이 어느 정도 발아된 2018년 5월 18일부터 6차례에 걸쳐 각 실험구의 피복율, 목본류 발아개체수 및 수고 등을 조사하였으며, 식물 뿌리상태를 알아보기 위해 2018년 11월 11일에 식물뿌리의 길이(cm)와 중량(g)을 조사하였다.

본 연구에서 조성한 중화층 종류에 따른 9개 실험구의 물리·이화학적 특성과 식물생육특성 측정 결과는 SAS system for window V9.1 (SAS instiute Inc, 2013)을 이용하여 통계 처리하였으며 측정별 평가의 차이는 최소유의차(LSD)로 분석하였다.

3. 적용결과

3.1 토양의 물리 · 이화학적 특성

3.1.1 공시토양

실험에 사용된 공시토양의 분석 결과는 Table 3과 같다. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2009) 비탈면녹화용 기반재의 화학적 특성 평가기준을 토대로 분석한 결과 유기물 함량(%) 2.68 %로 매우 낮고 토양산도(pH) pH 3.4와 전기전도도(EC) 8.97 dS/m가 매우 높게 나타나는 등 식물생육에는 적합하지 않은 것으로 나타났다.

3.1.2 표면경도

산성배수 비탈면의 중화층 종류에 따른 표면경도를 측정하였으며 그 결과는 Table 4와 같다. 6번의 측정 결과 실험구간 통계적 유의차를 보이며 시멘트를 배합한 실험3구, 실험4구, 실험5구에서 높게 나타났으며 식물생장에도 영향을 미치는 결과가 나타났다.

2018년 5월 18일 측정 결과 실험3구, 실험4구, 실험5구는 표면경도가 28 mm이상으로 흙이 너무 단단해서 식물의 생육이 곤란한 값이 나타났으며(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009), 중화층의 두께가 두꺼울수록 표면경도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 실험3구, 실험4구, 실험5구의 경우 중화층에 시멘트가 배합되어 표면경도가 상승한데 기인된 결과로 판단된다. 비탈면 표면경도에 따른 식물생육 상태는 23mm이하일 때 식물의 근계생장에 적당한데(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009), 실험3구, 실험4구, 실험5구는 초기 식물생장에 악영향을 미치는 결과가 나타났으며, 특히 실험5구는 6월 측정 결과까지 표면경도가 다소 높게 나타나 주의가 요구되었다. 이후

Table 3. Soil Properties of the Acid Drainage Slopes Used for Seeding Experiment

Soil property	pH	EC (dS/m)	Cation Exchange Capacity (cmol/kg)	N (%)	Organic Matter (%)
Standards	5.5-7.0	1.0 and less	6 and over	0.06 and over	3.0 and over
Results	**3.4**	**8.97**	7.03	0.69	**2.68**

Table 4. Soil Hardness (mm) Treated by Type and Thickness of the Neutralizing Layer

Type and thickness of neutralizing layer	2018 (year)					
	5/18 (month/day)	6/16 (month/day)	7/15 (month/day)	8/15 (month/day)	9/15 (month/day)	10/16 (month/day)
Control	17.0d[z]	15.7f	17.3e	11.7c	12.7e	13.0d
Treatment 1	17.3cd	16.3e	17.3e	12.0c	13.3e	15.7bc
Treatment 2	17.3cd	16.8d	17.5de	12.3c	13.5ed	15.7bc
Treatment 3	28.7a	18.7b	19.3bc	15.7b	16.3b	16.4b
Treatment 4	28.8a	23.7a	20.0b	15.7b	17.0ab	18.0a
Treatment 5	29.0a	24.0a	23.2a	18.0a	17.7a	18.3a
Treatment 6	17.7bcd	17.7c	18.2de	12.0c	14.7cd	14.7c
Treatment 7	17.8bc	17.8c	18.4cd	12.3c	14.7cd	16.3b
Treatment 8	18.3b	17.8c	18.4cd	16.3b	14.8c	16.3b
LSD (0.05)	0.7	0.5	1.0	1.4	1.3	1.2

[z]Mean values with the same letter within columns are not significantly different at $p=0.05$ level by LSD-test

7월 15일부터 10월 16일까지 4차례 측정 결과 모든 실험구에서 식물의 근계 생장에 적정한 23 mm이하의 표면경도 수치가 나타났다. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2009)에 따르면 표면경도가 18 mm이하로 나타날 경우 식물생육은 양호하지만 비탈면이 무너질 위험성이 있는 것으로 보고되었으나, 실험기간 동안 모든 실험구에서 침식 및 세굴현상은 나타나지 않았다.

이런 결과로 미루어 보아 시멘트가 배합된 실험3구, 실험4구, 실험5구는 초기 표면경도가 높아 식물근계에 악영향을 미치는 결과가 나타났으므로 주의가 요구되고, 대조구, 실험1구, 실험2구와 석회고토를 배합한 실험6구, 실험7구, 실험8구는 모두 23 mm이하의 적정한 결과가 나타나 활용가치가 클 것으로 판단되었으나, 대조구, 실험1구, 실험2구는 식물생육이 불량해 주의가 요구된다.

3.1.3 토양 함수율

산성배수 비탈면의 중화층 종류에 따른 함수율을 측정하였으며 그 결과는 Table 5와 같다. 5월, 6월, 7월 및 10월 4차례 측정 결과 실험구간 통계적 유의차를 보이며 중화층 및 식생층의 두께가 두꺼울수록 함수율이 높은 것으로 나타났다. 8월 15일과 9월 15일 2차례 측정 결과 함수율은 최저 2.1 %에서 최고 2.8 %로 매우 낮게 나타나 식물생육에 악영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 이는 중화층 종류에 따른 영향보다는 강우량(KMA, 2009) 부족의 영향이 크게 미친데 기인된 결과로 판단된다. Kim and Shim(2009)에 의하면 인공비탈면의 함수율을 5개월가량 측정한 결과 함수율이 2 %이하일 때 식물 고사율이 높게 나타났으며, 함수율이 3 % 이상일 때는 수분에 의한 식물고사는 발생하지 않는 것으로 나타났다. 10월 16일 측정결과 9월 15일 측정 결과보다 함수율이 높게 나타났는데 이는 강우에 의한 영향으로 함수율이 상승한데 기인된 결과로 판단된다.

이런 결과로 미루어 보아 함수율은 중화제 시멘트와 석회고토에 따른 차이보다 두께에 따른 차이를 보였으며, 강우량이 적은 경우 두께에 의한 차이도 크지 않은 것을 알 수 있었다.

3.1.4 토양 산도(pH)

산성배수 비탈면의 중화층 종류에 따른 토양산도(pH)를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 2과 같다. 2번의 측정 결과 통계적 유의차를 보이며, 대조구, 실험1구, 실험2구에서 토양산도가(pH) pH 5.0이하로 높게 나타났다. 반면 실험3구, 실험4구, 실험5구는 pH 7.5 ~ pH 7.9, 실험6구, 실험7구, 실험8구는 pH 7.4 ~ pH 7.6로 토양중화 효과가 큰 것으로 나타났다. Johnson and Hallberg (2005)에 따르면 유기물, 석회고토, 시멘트, 정수장 슬러지를 많이 함유한 물질을 취부하여 기능층을 조성하면 기능층의 유기물에 의하여 우수의 용존산소가 제거되고 석회고토와 정수장슬러지 등에 의하여 산성배수가 중화되는 것으로 보고되었다.

2018년 5월 18일 측정 결과 대조구, 실험1구, 실험2구의 경우 실험구 조성 전 원지반의 토양산도(pH) 3.2보다 pH 7.0에 가까운 수치가 나타났으며, 두께가 두꺼울수록 토양산도(pH)의 중화효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 식생기반재의 유기물에 의한 영향으로 기인된 결과로 보이며, 시간이 지나면서 토양산도(pH)는 높아져 2018년 10월 16일 측정 결과 대조구 pH 3.7, 실험1구 pH 3.8, 실험2구 pH 4.1로 식물생장에 악영향을 미치는 결과가 나타났다. 일반적으로 pH 3.5이하를 강산성토양이라고 하며, pH 4.0이하가 되면 식물발아 및 생육이 잘 이루어지지 않는 것으로 보고되고 있다(Jang and Kim, 2006). 실험3구, 실험4구, 실험5구의 경우 측정결과 산성토양에 대한 중화효과가 우수한 것으로 나타났으며,

Table 5. Moisture Content (%) Treated by Type and Thickness of the Neutralizing Layer

Type and thickness of neutralizing layer	2018 (year)					
	5/18 (month/day)	6/16 (month/day)	7/15 (month/day)	8/15 (month/day)	9/15 (month/day)	10/16 (month/day)
Control	23.4e[z]	19.8d	18.1e	2.6bc	2.1e	14.1d
Treatment 1	25.7bc	21.2c	18.4de	2.6bc	2.2e	18.3d
Treatment 2	26.8a	30.4a	24.6a	2.7ab	2.4bc	26.7a
Treatment 3	21.9f	15.8g	18.1e	2.1e	2.5ab	15.4d
Treatment 4	24.2de	18.5e	18.3de	2.4d	2.5ab	17.1c
Treatment 5	26.3ab	29.9a	21.9b	2.8a	2.6a	23.7b
Treatment 6	24.2de	16.8f	18.4de	2.4d	2.3d	14.5d
Treatment 7	24.8cd	17.3f	19.7cd	2.5cd	2.3d	17.4c
Treatment 8	26.9a	28.3b	20.4c	2.6bc	2.4bc	23.7a
LSD (0.05)	1.0	1.0	1.4	0.2	0.2	1.5

[z]Mean values with the same letter within columns are not significantly different at $p=0.05$ level by LSD-test

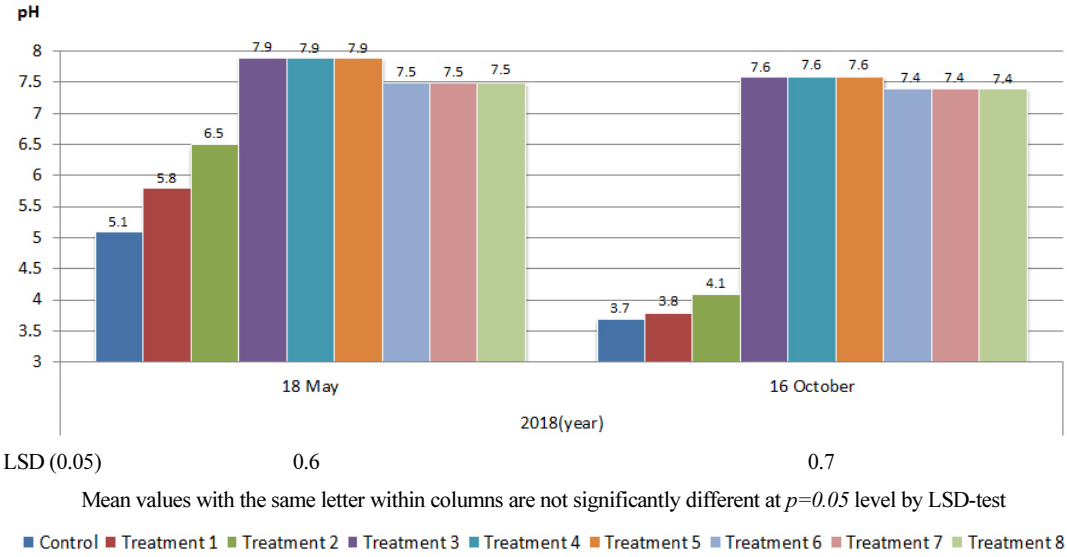

Fig. 2. Acidity (pH) Treated by Type and Thickness of the Neutralizing Layer

중화층 및 식생층에 배합된 시멘트가 알칼리성을 띠므로 산성배수 중화능력을 가지며, 기반재가 비탈면에서 탈락되는 것을 방지하여 식생기반재의 부착성을 증진시키는 장점이 있으나, 시공 초기에 표면경도가 높아져 식물발아에 악영향을 줄 수 있으므로 주의가 요구된다. 또한, 실험6구, 실험7구, 실험8구의 경우 실험기간 동안 산성토양에 대한 중화효과가 우수한 것으로 나타났는데, 중화층에 배합된 석회고토[$(Ca{\cdot}Mg)CO_3$]는 산성토양에 투입하면 토양의 pH가 상승하여 산성화된 토양을 중화시키고 석회고토로부터 용출되는 Ca와 Mg에 의하여 Al과 Mn으로부터 식물독성을 저감시키는 효과가 있는 것으로(Lee et al., 2013), 모두 식물생육에 적합한 토양산도(pH)의 범위가 나타났다.

산성배수 발생 비탈면의 문제점은 우기에 용존산소를 함유한 우수가 사면 내부로 침투하고 내부에서 발생한 산성배수가 건기에 모세관현상에 의하여 표면으로 상승하는 통로가 되어 영향을 미치는데(Kim, 2007), 실험3구, 실험4구, 실험5구, 실험6구, 실험7구, 실험8구의 경우 비탈면에 유기물과 중화제[$(Ca{\cdot}Mg)CO_3$, Cement]를 함유한 중화층을 조성하여 모세관현상에 의하여 이동하는 산성배수를 중화시킨 것으로 판단된다.

이런 결과로 미루어 보아 중화제 시멘트, 석회고토를 처리한 실험구에서 산성배수에 대한 토양중화효과 및 지속성이 있는 것으로 보이며, 중화층 두께에 따른 차이는 없는 것을 알 수 있었다.

3.2 식물생육 특성

3.2.1 피복율

산성배수 비탈면의 중화층 종류에 따른 피복율을 측정하였으며 그 결과는 Table 6과 같다. 6번의 측정 결과 통계적 유의차를 보이며, 실험8구에서 가장 높게 나타났고 대조구에서 가장 낮게 나타났으며, 실험7구, 실험6구, 실험5구, 실험4구, 실험3구, 실험2구, 실험1구 순으로 나타났다.

2018년 5월 18일 측정 결과 중화층에 석회고토를 처리한 실험6구 ≦ 실험7구 ≦ 실험8구에서 가장 높게 나타났고, 중화층에 시멘트를 처리한 실험3구 < 실험4구 < 실험5구 순으로 나타났으며, 대조구 < 실험1구 < 실험2구에서 낮게 나타났다. 시멘트를 배합한 실험3구, 실험4구, 실험5구의 경우 조성 초기 표면경도가 높아 식물 발아세가 늦은데 기인된 결과로 판단된다. 6월 16일 측정 결과 대조구를 제외한 모든 실험구에서 피복율이 증가하였는데, 대조구의 경우 토양산도(pH)가 높아지면서 식물이 고사하여 피복율이 감소된 것으로 판단된다. 7월 15일 측정 결과 식물생육이 원활해지면서 모든 실험구에서 피복율이 증가하였는데, 대조구, 실험1구, 실험2구의 경우 토양산도(pH)가 높아져 식물고사는 발생했으나 발아한 식물이 생장하면서 피복율이 증가한 것으로 나타났다. 8월 15일 측정 결과 모든 실험구에서 피복율이 감소하였는데 이는 강우(KMA, 2009) 부족으로 인한 함수율이 크게 낮아진데 기인된 결과로 식물 피복도에 영향을 미치는 인자로 표면경도, 온도, 강수량, 향 등이 있으며(Park, 2002), 이런 결과는 9월 15일 측정 결과까지 이어졌다. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2009) '도로비탈면 녹화공사의 설계 및 시공지침'의 녹화공법 평가에 따르면 초본위주형, 초본·관목혼합형의 경우 식생피복율의 기준을 3등급(하 : 60 %미만, 중 : 60~79 %, 상: 80 %이상)으로 나누어 제시하고 있다. 10월 16일 최종측정 결과 대조구 15 %, 실험1구 16 %, 실험2구 35 % 등 하급으로 나타났고, 실험3구 74 %, 실험4구 75 %, 실험5구 77 % 등 중급으로

Table 6. Vegetation Coverage Rate Treated by Type and Thickness of the Neutralizing Layer

Type and thickness of neutralizing layer	2018 (year)					
	5/18 (month/day)	6/16 (month/day)	7/15 (month/day)	8/15 (month/day)	9/15 (month/day)	10/16 (month/day)
Control	10.0e[z]	7.7f	26.3f	12.7d	6.3d	14.7e
Treatment 1	11.0de	17.7e	53.3e	13.0d	11.0d	16.0e
Treatment 2	12.0de	28.3d	60.0d	16.0d	13.3d	35.0d
Treatment 3	14.0cd	61.7c	85.3c	65.7c	55.0c	74.0c
Treatment 4	17.7bc	68.3b	89.3bc	66.7bc	61.7abc	75.1c
Treatment 5	19.3b	70.0b	91.3ab	68.3bc	65.0ab	77.3c
Treatment 6	30.0a	81.0a	93.1ab	71.3ab	58.3bc	87.7b
Treatment 7	32.0a	81.9a	94.3ab	75.0a	66.7a	95.0a
Treatment 8	32.4a	82.7a	96.0a	75.0a	68.3a	95.0a
LSD (0.05)	3.9	6.0	5.6	5.2	7.8	4.0

[z]Mean values with the same letter within columns are not significantly different at $p=0.05$ level by LSD-test

Table 7. The Number of Germinating Woody Species Treated by Type and Thickness of the Neutralizing Layer

Type and thickness of neutralizing layer	2018 (year)											
	5/18 (month/day)		6/16 (month/day)		7/15 (month/day)		8/15 (month/day)		9/15 (month/day)		10/16 (month/day)	
	Al[z]	In	Al	In	Al	In	Al	In	Al	In	Al	In
Control	1.7c[y]	0.0	1.0d	0.0c	0.7c	0.3c	0.3e	0.6b	0.3d	0.6b	0.3d	0.6b
Treatment 1	2.0bc	0.0	2.0bcd	0.0c	2.3bc	0.3c	1.0d	0.6b	0.7d	0.6b	0.7d	0.6b
Treatment 2	2.3bc	0.0	2.3bc	0.0c	2.7bc	0.7c	1.3d	0.7b	0.7d	0.7b	0.7d	0.7b
Treatment 3	1.5c	0.0	1.7cd	0.3b	3.0bc	0.7c	3.0c	2.0ab	3.0c	2.0ab	3.0c	2.0ab
Treatment 4	2.0bc	0.0	2.0bcd	0.3b	3.3b	1.7ab	3.3bc	2.0ab	3.3bc	2.0ab	3.3bc	2.0ab
Treatment 5	2.0bc	0.0	2.7ab	0.5b	3.6b	1.7ab	3.6bc	2.0ab	3.6abc	2.0ab	3.6abc	2.0ab
Treatment 6	2.7ab	0.0	2.7ab	1.0a	4.3a	1.7a	4.3ab	3.0a	4.3ab	3.0a	4.3ab	3.0a
Treatment 7	3.3b	0.0	3.7a	1.0a	4.5a	2.3a	4.5a	3.1a	4.5ab	3.1a	4.5ab	3.1a
Treatment 8	3.7a	0.0	3.7a	1.0a	4.7a	2.3a	4.7a	3.1a	4.7a	3.1a	4.7a	3.1a
LSD (0.05)	1.1	NS	1.1	0.3	1.0	0.3	1.1	0.2	1.0	0.2	1.0	0.2

[z]Al : *Albizzia julibrissin*, In : *Indigofera pseudo-tinctoria*
[y]Mean values with the same letter within columns are not significantly different at $p=0.05$ level by LSD-test
NS : statistically not significant

나타났으며, 실험6구 88 %, 실험7구 95 %, 실험8구 95 % 등으로 상급의 피복율이 나타났다. 이 기준에 따르면 석회고토를 처리한 실험구에서 피복이 우수한 것을 알 수 있으며, 시멘트를 처리한 실험구에서도 70 %이상의 중급정도 피복율이 나타나므로 현장여건 및 경제성을 고려한다면 충분히 적용 가능한 처리기법으로 판단된다.

3.2.2 목본류 발아개체수

산성배수 비탈면의 중화층 종류에 따른 목본류 발아개체수를 측정하였으며 그 결과는 Table 7과 같다. 6번의 측정 결과 통계적 유의차를 보이며, 목본류 자귀나무와 낭아초 모두 실험8구에서 가장 많이 나타났고 대조구에서 가장 적게 나타났다.

2018년 5월 18일 측정 결과 목본류 발아개체수는 자귀나무만 출현하였고 실험8구에서 가장 많이 나타났고 실험3구에서 가장 적게 나타났는데, 이는 조성 초기 시멘트가 배합된 실험3구의 경우 표면경도가 높아 식물 발아세가 늦은데 기인된 결과로 판단되며, 두께별 발아개체수는 3 cm < 5 cm < 7 cm 순으로 많이 나타났다. 낭아초의 출현개체수가 나타나지 않은 것은 자귀나무 보다 발아세

가 늦은데 기인된 결과로 보인다. 7월 15일 측정 결과 자귀나무와 낭아초 모두 석회고토가 배합된 실험6구, 실험7구, 실험8구에서 가장 많이 나타났으며 두께에 따른 차이는 실험구간 없었다. 9월 15일 측정 결과 자귀나무의 경우 대조구 0.3개, 실험1구 0.7개, 실험2구 0.7개로 가장 낮게 나타났고, 실험3구 3.0개, 실험4구 3.3개, 실험5구 3.6개, 실험6구 4.3개, 실험7구 4.5개, 실험8구 4.7개로 중화층 종류에 따라 석회고토를 배합한 실험구에서 높게 나타났으며, 두께에 따른 차이는 크지 않았다. 낭아초의 경우 대조구 0.6개, 실험1구 0.6개 실험2구 0.7개로 중화제를 처리하지 않은 실험구에서 가장 낮게 나타났고, 시멘트를 배합한 실험3구 2.0개, 실험4구 2.0개, 실험5구 2.0개, 석회고토를 배합한 실험6구 3.0개, 실험7구 3.1개, 실험8구 3.1개로 중화층 종류에 따라 석회고토를 배합한 실험구에서 가장 높게 나타났으며 두께에 따른 차이는 나타나지 않는 등 이런 결과는 10월 16일 측정 결과까지 이어졌다. '도로비탈면 녹화공사의 설계 및 시공지침'(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009)에 따르면 초본·관목혼합형 복원목표의 경우 3본/㎡ 이상이 적합한 것으로 제시하고 있는데 실험6구, 실험7구, 실험8구는 자귀나무와 낭아초 모두 적합한 것으로 나타났으며, 실험3구, 실험4구, 실험5구의 경우 자귀나무는 적합했으나, 낭아초에서 모두 3본/m^2이하로 나타나 이에 대한 조정이 필요할 것으로 판단된다.

이런 결과로 미루어 보아 산성배수 비탈면 녹화를 위해서는 중화층에 석회고토를 배합하는 것이 효과적이며 중화층 두께에 따른 발아개체수 차이는 없는 것을 알 수 있었다.

3.2.3 목본류 수고

산성배수 비탈면의 중화층 종류에 따른 목본류 수고를 측정하였으며 그 결과는 Table 8과 같다. 6번의 측정 결과 통계적 유의차를 보이며, 자귀나무와 낭아초 모두 실험8구에서 가장 크게 나타났고 대조구에서 가장 작게 나타났다. 이는 산성토양의 경우 식물 유해금속인 Al, Mn 등을 용출시켜 식물의 세근발생이나 신장 생장을 억제하였기 때문이다(Ulrich et al., 1980).

2018년 5월 18일 측정 결과 중화층에 석회고토를 배합한 실험6구, 실험7구, 실험8구에서 가장 크게 나타났으며, 목본류 자귀나무의 경우 실험구별 두께에 따른 수고 차이는 거의 없었다. 6월 16일 측정 결과 자귀나무의 경우 식물생장이 진행되면서 모든 실험구에서 수고 값이 계속해서 증가하였으나, 낭아초의 경우 대조구, 실험1구, 실험2구에서는 발아개체가 없어 수고 값이 나타나지 않았다. 7월 15일 측정 결과 중화층 종류에 따라 실험6구, 실험7구, 실험8구에서 높게 나타났고, 두께에 따라 7 cm에서 크게 나타났다. 8월 15일 측정 결과 대조구, 실험1구, 실험2구에서 자귀나무의 수고 값이 7월 측정 결과 보다 낮아졌는데, 이는 출현한 자귀나무가 고사한데 기인된 결과로 판단된다. 반면, 중화층에 시멘트를 배합한 실험3구, 실험4구, 실험5구와 석회고토를 배합한 실험6구, 실험7구, 실험8구는 자귀나무와 낭아초의 식물생장이 원활히 이루어져 수고 값이 모두 증가하였으며, 이런 결과는 9월 15일 측정 결과에서도 이어졌다. 10월 16일 측정 결과 자귀나무의 경우 대조구 2.7 cm, 실험1구 5.7 cm, 실험2구 8.7 cm, 실험3구 31.3 cm, 실험4구 33.0 cm, 실험5구 34.0 cm, 실험6구 36.7 cm, 실험7구 41.7 cm, 실험8구 45.3 cm로 중화층에 석회고토를 배합한 실험구에서 높게

Table 8. Plant Height (cm) Treated by Type and Thickness of the Neutralizing Layer

Type and thickness of neutralizing layer	2018 (year)											
	5/18 (month/day)		6/16 (month/day)		7/15 (month/day)		8/15 (month/day)		9/15 (month/day)		10/16 (month/day)	
	Al[z]	In	Al	In	Al	In	Al	In	Al	In	Al	In
Control	2.3c[y]	0.0	2.8f	0.0e	5.4c	1.7d	1.6d	2.3d	2.0e	4.0c	2.7e	5.3c
Treatment 1	2.3c	0.0	4.2e	0.0e	7.2c	1.7d	2.3d	2.3d	4.7d	5.3c	5.7e	6.0c
Treatment 2	2.4c	0.0	4.8cde	0.0e	7.5c	3.3d	5.3d	6.0d	7.3d	9.7c	8.7e	11.3c
Treatment 3	2.8b	0.0	4.6cde	0.6e	21.7bc	6.0c	24.3c	20.3bc	27.3bc	31.0b	31.3bc	45.7b
Treatment 4	3.2ab	0.0	5.4bc	1.8de	22.3b	6.3c	25.1bc	22.7bc	28.7bc	32.0b	33.0ab	45.7b
Treatment 5	3.7ab	0.0	5.8bc	2.8d	24.0ab	12.3bc	26.0b	24.7b	33.0ab	37.7b	34.0ab	45.8b
Treatment 6	4.1a	0.0	6.2b	4.0c	22.0b	16.5ab	25.0bc	27.0ab	29.0ab	48.0a	36.7ab	75.0a
Treatment 7	4.5a	0.0	6.5b	6.5b	25.0a	17.2a	27.0ab	31.3a	34.0a	49.3a	41.7a	78.3a
Treatment 8	4.7a	0.0	7.5a	8.4a	26.0a	16.3ab	30.7a	38.0a	38.0a	58.3a	45.3a	81.0a
LSD (0.05)	2.7	NS	3.3	5.3	5.3	4.2	3.9	3.7	3.1	2.8	2.2	3.4

[z]Al : *Albizzia julibrissin*, In : *Indigofera pseudo-tinctoria*

[y]Mean values with the same letter within columns are not significantly different at $p=0.05$ level by LSD-test

NS : statistically not significant

나타났고, 두께에 따라 3 cm < 5 cm < 7 cm 순으로 나타났으나 두께에 따른 차이는 거의 없었다. 낭아초의 경우 대조구 5.3 cm, 실험1구 6.0 cm, 실험2구 11.3 cm, 실험3구 45.7 cm, 실험4구 45.7 cm, 실험5구 45.8 cm, 실험6구 75.0 cm, 실험7구 78.3 cm, 실험8구 81.0 cm로 자귀나무와 같은 결과가 나타났다.

이런 결과로 미루어 보아 목본류 자귀나무와 낭아초의 수고는 석회고토를 배합하는 것이 시멘트를 배합한 것보다 우수한 것으로 나타났으며, 두께에 따른 차이는 거의 없었다.

3.2.4 식물뿌리 상태

산성배수 비탈면의 중화층 종류에 따른 식물 뿌리상태를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 3와 같다. 실험구 조성 후 6개월이 경과한 2018년 11월 11일 측정 결과 목본류 자귀나무, 낭아초와 초본류 벌노랑이, 패랭이꽃, 금계국의 뿌리길이(주근, 측근)와 중량은 실험 8구에서 가장 길고 높게 나타났으며, 토양산도(pH)가 높은 대조구에서 가장 짧고 낮은 것으로 나타났다. Wilkins(1978)에 따르면 토양산도(pH)가 pH 5.0이하로 산성이 강한 경우에는 식물생장에 필요한 양이온(Na, K, Ca, Mg)을 용탈시켜, 근부의 생장을 저해하는 것으로 보고되었다. 중화층 종류에 따라 중화층에 석회고토를 처리한 실험구(실험6구, 실험7구, 실험8구)에서 뿌리길이가 길고 중량이 높게 나타났고, 다음으로 중화층에 시멘트를 처리한 시험구(실험3구, 실험4구, 실험5구)에서 높게 나타났으며, 중화층을 처리하지 않은 시험구(대조구, 실험1구, 실험2구)에서 낮게 나타났다. 톨훼스큐의 뿌리길이(주근, 측근)와 중량은 처리5구에서 길고, 높게 나타나는 등 목본류, 초본류와는 상이한 결과가 나타났다. 이는 처리5구의 경우 조성초기 표면경도가 높아 발아세가 빠른 톨훼스큐가 우점한데 기인된 결과로 판단된다.

중화층 두께에 따른 뿌리상태는 3 cm < 5 cm < 7 cm 순으로

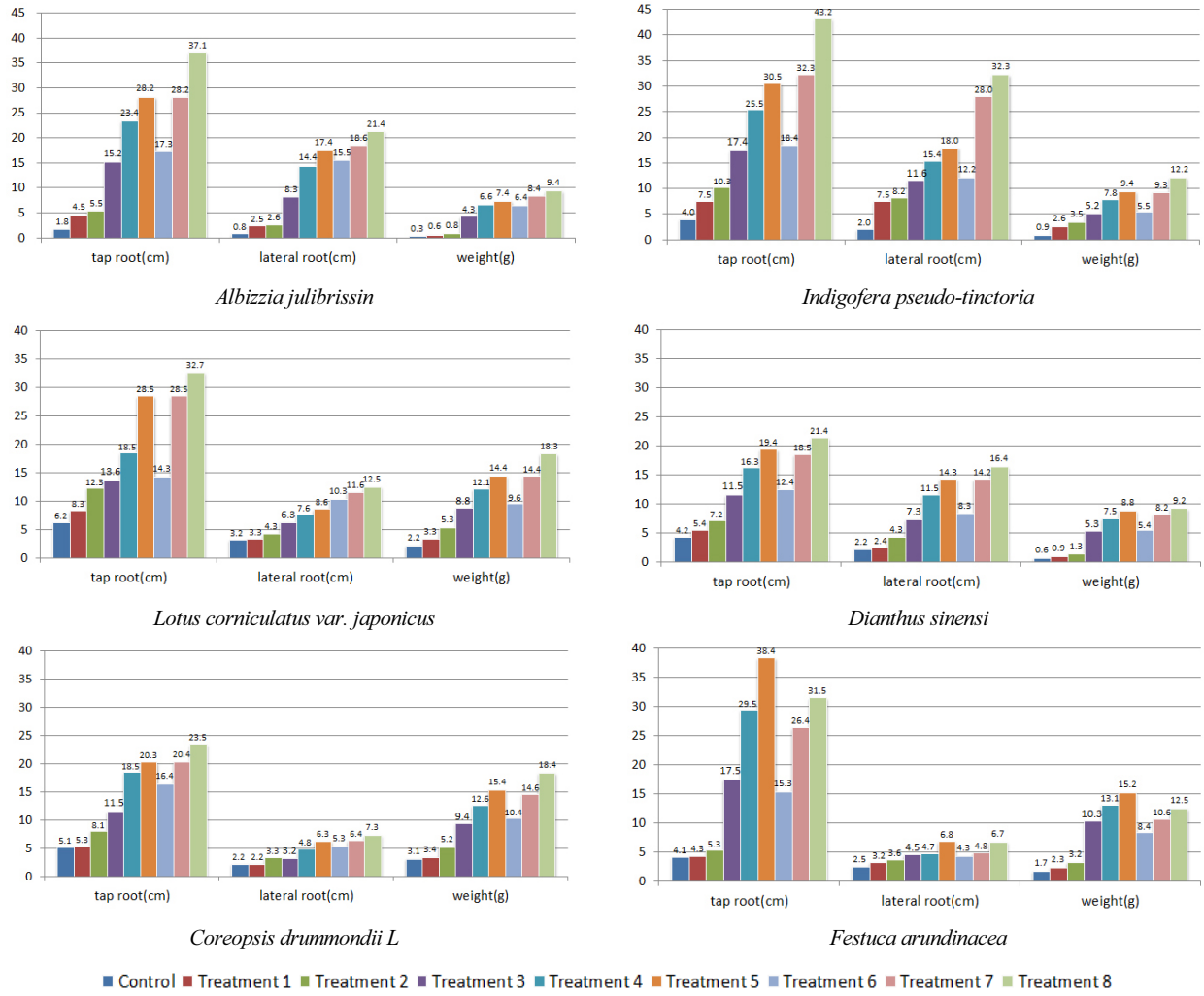

Fig. 3. Plant Root Status Affected by four Different Acid Drainage Neutralizing Systems (11 November, 2018)

뿌리길이(주근, 측근)가 길고 중량이 높게 나타났으며, 두께별 생장 차이는 3 cm와 5 cm의 차이와 비교하여 5 cm와 7 cm의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

이런 결과로 미루어 보아 중화층에 석회고토를 배합한 실험8구에서 식물뿌리 생장이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 두께별로는 7 cm가 가장 높았으나 5 cm와의 생장차이가 크지 않은 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

산성배수 비탈면의 효과적인 녹화를 위한 중화층 종류에 따른 실험구별 표면경도는 두께에 따른 유의차는 없었으며, 중화층에 시멘트를 배합한 실험3, 실험4구, 실험5구에서 초기에 식물 근계에 영향을 주는 결과가 나타났으나 시간이 지나면서 식생의 뿌리신장에 어려움이 없는 것으로 나타났다. 함수율은 중화층 및 식생층의 두께가 두꺼울수록 함수율이 높게 나타났으며, 중화층 종류에 따른 차이는 없었다.

토양산도는 최종결과 대조구 pH 3.7, 실험1구 pH 3.8 실험2구 pH 4.1로 강산성으로 나타났으며, 중화층 및 식생층의 두께가 두꺼울수록 pH가 저감되는 경향을 보였다. 시멘트를 배합한 실험3구, 실험4구, 실험5구는 pH 7.6, 석회고토를 배합한 실험6구, 실험7구, 실험8구는 pH 7.4로 중화효과가 우수한 것으로 나타났으며, 두께에 따른 차이는 없었다.

식생 피복율은 석회고토를 배합한 실험구에서 88~95 %로 가장 높게 나타났고 시멘트를 배합한 실험구에서 74~77 %로 나타났으며, 무처리구에서 15~35 %로 가장 낮은 피복율을 보였다. 중화층과 식생층의 두께에 따라 3 cm < 5 cm < 7 cm 순으로 높게 나타났으나, 두께에 따른 차이는 크지 않았다. 산성배수 비탈면의 녹화를 위해서는 중화층에 시멘트와 석회고토를 배합하는 것이 효과적이며 두께는 경제성을 고려할 때 3~5 cm가 적정할 것으로 판단된다.

목본류 발아개체수는 자귀나무와 낭아초 모두 석회고토를 배합한 실험구에서 가장 많이 나타났고 대조구에서 가장 적었으며, 중화층 및 식생층 두께에 따른 발아개체수 차이는 없었다.

수고는 자귀나무와 낭아초의 모두 시멘트를 배합한 실험구보다 석회고토를 배합한 실험구에서 높게 나타났으며, 중화층 두께에 따른 차이는 없는 것으로 나타나는 등 성토비탈면의 녹화 두께는 5 cm이상을 초과할 필요가 없을 것으로 판단된다.

식물 뿌리는 목본류 자귀나무, 낭아초와 초본류 벌노랑이, 패랭이꽃, 금계국의 뿌리길이(주근, 측근)와 중량은 대조구에서 가장 저조한 것으로 나타났고, 석회고토를 배합한 실험구에서 가장 우수한 것으로 나타났으며, 두께에 따라 7 cm, 5 cm, 3 cm 순으로 높게 나타났으나, 두께별 생장차이는 3 cm와 5 cm의 차이와 비교하여 5 cm와 7 cm의 차이는 크지 않은 것으로 5 cm가 적정할 것으로 보인다.

References

Anonymous (1965). “Proceedings of the association of official seed analysts.” *Journal of Seed Technology*, Vol. 54, No. 2, pp. 1-112.

Chung, D. Y. (2012). *Soil and Life*. Chungnam National University Communication & Press All Right Reserved. pp. 183-191 (in Korean).

Jang, C. H. and Kim, M. S. (2006). “chemistry of strong acidic soil on Ulsan-Jungiadong cut-slope affecting seed germination.” *Journal of the Korean Env. Res. Tech*., Vol. 9, No. 6, pp. 133-142 (in Korean).

Jeong, Y. H., Lee, I. K, Lim, J. H, Seo, K. W. and Lee, C. H. (2010). “Comparison of seedling growth by treatments of vegetation basis in an abandoned coal mine area.” *Journal of the Korean Env. Res. Tech*., Vol. 13, No. 6, pp. 87-96 (in Korean).

Johnson, D. B. and Hallberg, K. B. (2005). “Acid mine drainage remediation options: a review.” *Science of the Total Environment*, Vol. 338, pp. 3-14.

Kim, J. G. (2007). “Acid drainage and damage reduction strategy in construction site: An introduction.” *Journal of the Korea Society of Economic and Environmental Geology*, Vol. 40, No. 5, pp. 651-660 (in Korean).

Kim, J. G., Lee, J. S. and Kim, T. G. (2008). “Assessment of acid rock drainage production potential and damage reduction strategy : A case study of tunnel construction area.” *Journal of the Korea Society of Economic and Environmental Geology*, Vol. 41, No. 3, pp. 335-344 (in Korean).

Kim, J. H. and Shim, S. R. (2009). “A vegetation characteristics of a cut-slope affected by seeding periods of the winter season.” *Journal of the Korean Env. Res. Tech*., Vol. 12, No. 2, pp. 29-39 (in Korean).

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) (2017). *Technology development for damage reduction and ecosystem restoration in acid drainage producing construction site*. pp. 5-83 (in Korean).

Korea Meteorological Administration (KMA) (2009). Available at: http://www. kma.go.kr (Accessed: October 18, 2018)

Lee, J. S., Kim, J. G., Park, J. S., Chon, C. M. and Nam, I. H. (2013). “Assessment and damage reduction strategy of acid rock drainage in highway construction site: OO highway construction site.” *Journal of the Korea Society of Economic and Environmental Geology*, Vol. 46, No. 5, pp. 411-424 (in Korean).

Lunt, I. D. (2003). “A protocol for integrated management, monitoring, and enhancement of degraded Themeda triandra grasslands based on planting of indicator species.” *Restoration Ecology*, Vol. 11, pp. 223-230.

Matlock, M. M., Howerton, B. S. and Atwood, D. A. (2003). “Covalent coating of coal refuse to inhibit leaching.” *Advances in Environmental Research*, Vol. 7, pp. 495-501.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2009). "Design and construction guidelines for road slope reconstruction work." pp. 34-80 (in Korean).

Park, M. S. (2002). "Dominant species and factors related with plant coverage in the cutting slopes of forest road." *Journal of the Korean Env. Res. Tech*., Vol. 5, No. 1, pp. 19-27 (in Korean).

SAS Institute Inc. (2013). *The SAS system for window Release 9.1*.

Smith, R. A. H. and Bradshaw A. D. (1979). "The use of metal tolerant plant populations for the reclamation of metalliferous wastes." *Journal of Applied Ecology*, Vol. 16, pp. 595-612.

Ulrich, B., Mayer, R. and Khnaan, P. K. (1980). "Chemical changes due to acid precipitation in a loss-derived soil in Central Europe." *Journal Soil Science*, pp. 193-199.

Wilkins, D. A. (1978). "The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth." *New Phytol*., Vol. 80, pp. 623-633.