

# 산성배수 비탈면의 생태적 녹화를 위한 산성배수 중화기법 연구

## A Study on the Acid Drainage Neutralizing System for Ecological Vegetation on the Acid Drainage Slope

조 성 록<sup>1)</sup> · 심 상 렬<sup>2)</sup> · 김 재 환<sup>†</sup>

Sung Rok Cho · Sang Ryul Shim · Jae Hwan Kim

Received: October 12<sup>th</sup>, 2018; Revised: November 8<sup>th</sup>, 2018; Accepted: December 17<sup>th</sup>, 2018

**ABSTRACT** : Research was initiated to find out acid drainage neutralizing techniques for ecological vegetative growth on the acid drainage slope. Four different acid drainage neutralizing techniques [no treatment, limestone layer treatment, phosphate treatment, and limestone layer + phosphate treatment] were treated on the acid drainage slope. There was a significant difference observed in treated acid neutralizing techniques for acidity, surface coverage rate, death rate and plant root status. Treated acid neutralizing techniques were effective for neutralizing acidity and vegetative growth in order of [first: limestone layer + phosphate treatment, second: phosphate treatment, third: limestone layer treatment and fourth: no treatment]. The limestone layer and the phosphate treatments were effective for neutralizing acidity and vegetative growth, respectively. However, the phosphate treatment was more effective compared to the limestone layer treatment on the acid drainage slope. We figured out that the phosphate treatment is more effective for neutralizing acidity and vegetative growth because of coating effect of sulfides.

**Keywords** : Acid drainage, Phosphate, Limestone, Acidity (pH), Surface coverage rate (%), Death rate (%), Plant root status

**요 지** : 산성배수가 발생하는 비탈면에서 생태적 녹화를 위한 산성배수 중화기법을 알아보기 위한 연구를 진행하였다. 산성배수 중화기법을 위한 4가지 유형의(무처리, 석회고토 처리, 인산염 처리, 석회고토 + 인산염 처리) 시험구를 조성하였다. 실험결과 산도(pH), 피복율(%), 고사율(%), 식물뿌리상태 등에서 중화기법에 따른 유의차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 중화기법에 따른 연구결과 (첫 번째 : 석회고토 + 인산염 처리, 두 번째 : 인산염 처리, 세 번째 : 석회고토 처리, 네 번째 : 무처리) 순서로 산도 중화 및 식물생장에 효과적이었다. 산성배수 비탈면에서 석회고토 처리와 인산염 처리는 토양산도 중화와 식물생장에 효과적이었으나, 석회고토 처리에 비해 인산염 처리가 더 효과적이었으며, 인산염 처리가 황화광물의 코팅 효과 때문에 토양산도 중화와 식물생장에 더 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

**주요어** : 산성배수, 인산염, 석회암, 산도(pH), 피복율(%), 고사율(%), 식물뿌리상태

## 1. 서 론

우리나라 국토는 산지지형으로 각종 도로건설, 도로확충, 대규모 산업단지 조성 등으로 인하여 계속해서 개발되고 있으며, 이러한 개발과정에서 지하에 존재하던 황화광물이 지표에 노출되어 산화되면서 황산을 생성하고 산성배수를 발생시킨다(Kim, 2007). 산성배수는 토양산성화, 중금속오염, 암석의 풍화축진, 사면안정성 저해 및 식생고사, 경관훼손 등 산성배수 피해 사례가 빈번하게 보고되고 있으나(Kalin et al., 2006), 기술력 부족으로 적절한 대책수립이 이루어지지 않고 있다.

각종 건설공사 현장에서 산성배수의 발생 피해 사례는 일반적으로 공사 시작 수개월 후에 발생하므로 조사·설계단계

에서 적절한 대책수립이 이루어져야 하며(Kim, 2007), 비탈면 녹화공사 후 식생의 생장 부진과 고사 등의 피해가 발생함으로써 건설현장에서 산성배수에 의한 피해는 사회현안으로 대두되고 있는 실정이다. 건설공사로 발생하는 비탈면의 경우 구조적 안정성만을 고려한 설계와 조기 식생도입을 위한 획일적인 녹화공법만을 시행한 결과 식생의 도입과 사면의 안정성 확보에 어려움을 겪는 사례가 증가하고 있으며, 특히 이와 같은 사례로 산성배수로 인한 피해를 꼽을 수 있다. 과거 산성배수(acid drainage)에 의한 피해는 휴폐광산지역의 환경오염만으로 인식되어 왔으나, 근래에는 도로건설 시 발생한 산성암반배수(ARD : Acid Rock Drainage)로 인한 피해가 빈번히 발생하여 대책수립이 시급한 실정이

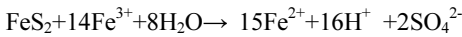
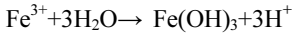
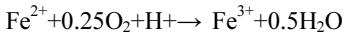
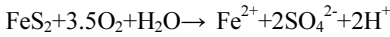
1) Graduate School, Environmental Landscape Architecture, Cheongju University

2) Professor, Environmental Landscape Architecture, Cheongju University

† Adjunct Professor, Environmental Landscape Architecture, Cheongju University (Corresponding Author : smileeye77@cju.ac.kr)

다. 산성배수가 사면을 따라 흐르면서 주변의 암석 혹은 토양과 반응하여 일부가 중화되고 중화과정에서 산화철광물이 침전된다. 산화철광물이 식물뿌리와 표면에 침전되면 뿌리의 호흡 및 영양분 흡수와 수분침투를 방해하여 식물 생장에 악영향을 미치고 있다.

Stum & Morgan(1995)은 가장 흔한 황화광물인 황철석의 산화과정을 다음과 같이 기술하였다.



이의 해결을 위해 황화광물의 산화를 방지하여 산성배수의 발생을 억제하는 방법으로 황화광물 표면에 산화제의 접촉을 차단하여 코팅을 형성하는 황화광물 표면코팅기법이 쓰이고 있으며(Lee et al., 2005; Matlock et al., 2003), 한국 지질자원연구원의 선행연구결과 인산( $\text{PO}_4^{3-}$ )의 농도가 0.01M 이상일 때 황철석의 산화를 효과적으로 차단하여 산성배수의 발생을 억제하는 것으로 밝혀졌다. 또한, 선진국의 경우 석회석과 산성배수를 접촉시켜서 산성배수를 중성으로 변화시키는 연구가 진행되었으며, 농업분야에서도 산성토양의 중화를 위해 석회석을 토양에 투입하여 토양의 pH를 상승시켜 산성화된 토양을 중화시키는 것으로 보고되고 있다(정덕영, 2012). 그러나 이러한 연구 및 보고는 실험실에서 광물에 대한 시험결과의 데이터이거나 평지에서 생식회를 살포한 후 농업용 식생을 적용한 사례로, 건설공사 현장에서 발생하는 산성배수 비탈면의 녹화에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 건설공사로 인하여 발생된 산성배수에 의한 문제는 환경오염복원, 공사중단, 구조물 보호를 위한 대책수립 및 시행으로 막대한 추가 비용이 발생되고 있어 해결방안이 시급한 실정이다(Lee et al., 2013).

본 연구는 산성배수가 발생하는 비탈면의 생태적 녹화를 위한 방안으로 인산염과 석회고토를 처리한 후 토양의 이화학적 특성과 식물의 녹화특성을 파악하여 기초자료로 제시하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 시험구 조성

연구는 산성배수가 발생하는 충북 보은군 내북면 봉화리 내 황철석이 분포된 성토비탈면으로 비탈경사는 1 : 0.8~1 범위를 보였고 비탈은 남서향으로 대상지 토양을 분석한 결과 토양산도는 평균 pH 3.2를 나타내고 있었으며 식물생육이 전혀 이루어지지 않은 상태였다.

먼저 사면을 정리한 후 식생기반재가 흘러내리지 않도록 면 네트를 설치하였으며, 유형별로 구획을 나누고 시험구를 처리하였다. ‘A유형’(대조구)은 황철석(pyrite)이 분포된 사면 위에 부엽토, 황토, 임목파쇄칩, 마사토, 슬러지 등으로 이루어진 식생기반재를 1cm 두께로 포설하였으며, ‘B유형’은 황철석(pyrite)이 분포된 사면 위에 석회고토[(Ca, Mg)CO<sub>3</sub>]가 10% 혼합된 식생기반재를 1cm 두께로 포설하였다. ‘C유형’은 물 1ℓ에 인산염(K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>) 1g을 기준으로 희석하여 30ℓ/m<sup>2</sup>의 인산염(K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)을 황철석(pyrite)이 분포된 사면 위에 균일하게 살포하여 침투되도록 한 뒤에, 식생기반재를 1cm 두께로 포설하였으며, ‘D유형’은 물 1ℓ에 인산염(K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>) 1g을 기준으로 희석하여 30ℓ/m<sup>2</sup>의 인산염을 황철석(pyrite)이 분포된 사면 위에 균일하게 살포하여 침투되도록 한 뒤에, 석회고토[(Ca, Mg)CO<sub>3</sub>]가 10% 혼합된 식생기반재를 1cm 두께로 포설하였다. 이후 모든 시험구에 면 네트를 추가로 설치하고 종자가 혼합된 식생기반재를 2cm 두께로 포설하여 시험구를 조성하였다(Fig. 1).

시험구의 크기는 1m×1m(1m<sup>2</sup>)의 정사각형으로 처리유형에 따라 4개의 시험구를 3반복 처리하였으며, 2017년 6월 28일에 완성하였다.

### 2.2 공시식물 발아율 및 파종량

공시식물은 국토부(2009)에서 제시한 척박지에서 견디고 손쉽게 구할 수 있으며 조기녹화를 이룰 수 있는 식물로 목본류(자귀나무, 낭아초), 초본류(벌노랑이, 쑥부쟁이, 대금계국), 한지형잔디류(톨웨스큐) 등을 선정하여 배합하였다.

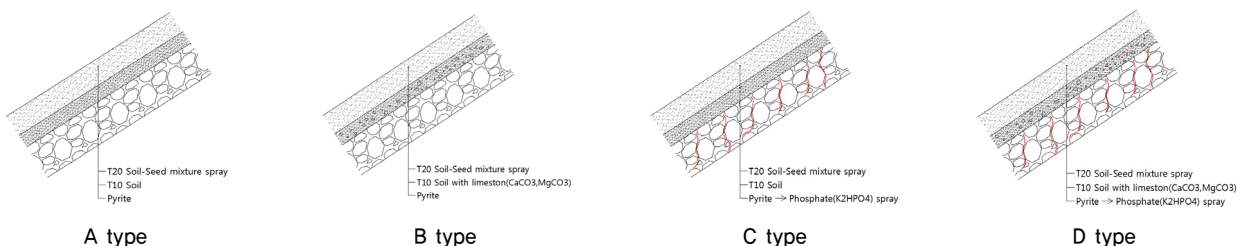


Fig. 1. Four different acid drainage neutralizing systems

Table 1. Plant germination rate and seeding amount of used in this experiment

Flora	Scientific name	Korean name	Germination rate (%)	Seeding amount (g/m <sup>2</sup> )
Woody plants	<i>Albizzia julibrissin</i>	자귀나무	53.4	5.0
	<i>Indigofera pseudo-tinctoria</i>	남아초	61.8	2.5
Native herbaceous plants	<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonicus</i>	벌노랑이	66.5	5.0
	<i>Aster yomena</i>	쑥부쟁이	58.8	5.0
	<i>Coreopsis drummondii</i> L	대금계국	78.3	5.0
Cool-season turfgrass	<i>Festuca arundinacea</i>	톨웨스큐	88.9	2.5
Total				25.0

발아실험은 2017년 5월 3일부터 1개월 동안 발아상(B.O.D. Incubator: DAE LIM) 내에서 실시하였으며, 식물의 유근이 2mm 이상 나온 것을 발아한 것으로 간주하였다. 발아상은 주간 광조건 25°C 8시간, 야간 암조건 15°C 16시간으로 설정하였으며, 종자당 100립을 기준으로 3반복으로 실험하였다(Anonymous, 1964). 종자 파종량은 국토해양부(2009) “도로비탈면 녹화공사의 설계 및 시공지침”에 준하여 시험구별 25g/m<sup>2</sup>를 적용하였다(Table 1).

### 2.3 조사 및 분석방법

산성배수 발생 비탈면의 중화기법에 따른 녹화특성을 알아보기 위해 토양 이화학적 특성과 식물생육을 2017년 7월부터 2018년 7월까지 측정하였다. 토양산도는 토양산도계(HI 99121 Soil pH Meter)를 이용하여 측정하였고, 식물생육조사는 식물이 어느 정도 발아된 시기부터 각 시험구의 지면피복율(%), 고사율(%), 식물뿌리 길이(cm)·중량(g) 등을 측정하였다.

실험 분석방법은 통계분석 프로그램 SAS system for window V9.1(SAS Institute Inc, 2013)을 이용하였으며, 측정별 평균의 차이는 최소유의차(LSD)로 검증하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 토양의 이화학적 특성

#### 3.1.1 토양 산도(pH)

산성배수 발생 비탈면의 중화기법에 따른 토양산도(pH)를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 8번의 측정 결과 처리들간에 유의차를 보였는데, pH 7.0을 기준으로 볼 때 A유형(대조구)에서 가장 낮게 나타났고, D유형에서 높은 것으로 나타났다. A유형(대조구)의 경우 최저 pH 3.6, 최고 pH 5.5로 토양산도가 낮게 나타나 피해가 발생할 것으로 판단된다. pH 5.0 이하의 강산성 토양에서는 A1의 작용으로 식물의 생장이 저해되는 것으로 보고되고 있다(정덕영, 2012; Kim, 2007). 반면, B유형은 최저 pH 5.8에서 최고 pH 6.2, C유형은 최저 pH 6.5에서 최고 pH 6.9, D유형은 최저 7.1에서 최고 7.2로 나타나는 등 인산염과 석회고토를 처리한 시험구에서 산성배수에 대한 토양중화 효과가 큰 것으로 나타났다.

2017년 7월 24일 측정 결과 A유형(대조구)의 경우 pH 5.5로 조성 전 원지반의 토양산도보다 높게 나타났는데, 이는 시험구를 조성한 인공토양의 유기물에 의한 영향으로 초

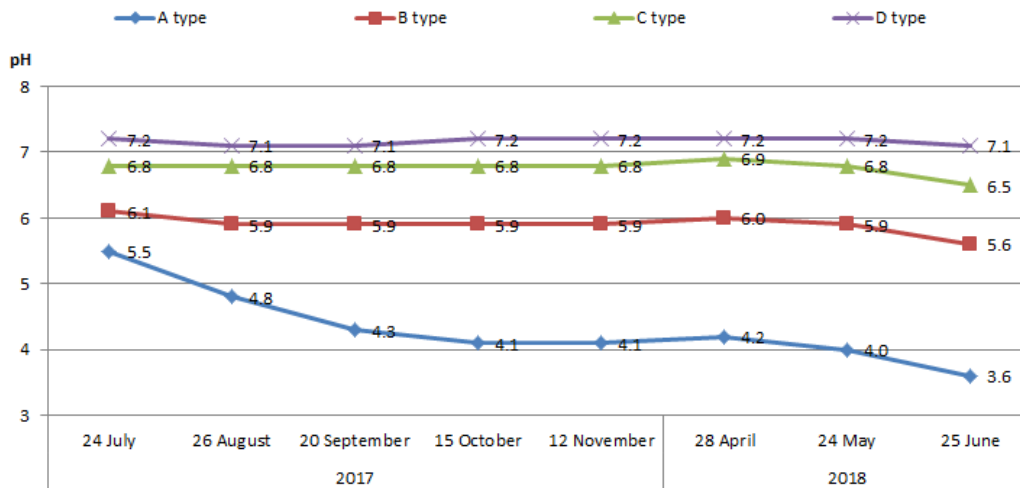


Fig. 2. Acidity (pH) affected by four different acid drainage neutralizing systems

기 토양산도가 상승한데 기인된 결과이며, 시간이 지나면서 pH는 계속해서 낮아져 실험중반 최종 토양산도는 pH 3.6으로 강산성으로 나타났다. 산성배수는 토양을 산성화시키고 Fe, Al, Mn, As, 중금속을 이온화시켜 식물에 독성을 나타내며(Golez & Kyuma, 1997), 토양과 식물의 뿌리에 침전되어 양분 흡수를 방해하여 식생을 고사시키므로(Hinwood et al., 2006), 산성배수 비탈면녹화에 중화처리가 요구된다.

2018년 6월 25일 측정 결과 실험측정 기간 동안 토양산도가 가장 낮아졌는데 이는 강우 강도가 높아 지만 하부까지 우수가 침투하여 산성배수가 발생해 모세관현상에 의해 상승한데 기인된 결과로 판단된다. 석회고토를 처리한 B유형보다 인산염을 처리한 C유형에서 중화 효과가 컸으며, 인산염과 석회고토를 모두 처리한 D유형에서 중화 효과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 이는 인산염의 경우 황철석 표면에 침전되어 안정한 코팅을 형성하고 산소와 황철석의 접촉을 차단하여 산성배수의 발생을 억제한데(Kim, 2007) 기인된 결과로 판단된다.

이런 결과로 미루어 보아, 산성배수가 발생하는 비탈면에서 인산염용액(K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)과 석회고토[Ca, MgCO<sub>3</sub>]가 토양중화에 효과가 있으며, 인산염용액이 석회고토보다 중화 효과가 큰 것으로 확인되었으며, 지속적인 유지를 위해 모니터링 후 인산염을 주기적으로 살포하는 방안이 모색되어야 할 것으로 판단된다.

### 3.2 식물생육특성

#### 3.2.1 지면피복율

산성배수 발생 비탈면의 중화기법에 따른 지면피복율을 측정하였으며, Table 2에 나타난 바와 같다. 8번의 측정 결과 통계적 유의차를 보이며 A유형(대조구)에서 가장 낮게 나타났고, D유형에서 가장 높은 지면피복율이 나타났으며, C유형과 B유형 순으로 높게 나타났다. 2017년 7월 24일 측정 결과 시험구간 통계적 유의차 없이 비슷한 값으로 나타났는데, 이는 시험구를 조성한 후 식생 발아 초기 단계로 산성배수에 의한 피해가 적게 미친데 기인된 결과로 판단된다.

다. 8월 26일 측정 결과 통계적 유의차를 보이며 A유형(대조구)에서 가장 낮은 지면피복율이 나타났고, D유형에서 가장 높은 지면피복율이 나타났으며, B유형과 C유형간에도 유의차를 보이며 C유형에서 높게 나타났는데, 이는 B유형의 경우 C유형보다 산도가 낮아 식물생육에 나쁜 영향을 주었기 때문이다(Koryak et al., 1972). 이와 같은 결과는 9월 20일과 10월 15일 두 차례의 측정 결과에서도 이어졌으며, 11월 12일 측정 결과에서는 모든 시험구에서 피복율이 낮아졌는데, 이는 산성배수에 의한 산도가 높아져 발생된 현상보다 늦가을로 접어들면서 식물특성에 의한 고사로 판단된다.

2018년 4월 28일 측정 결과 2017년 11월 12일 측정 결과보다 모든 시험구에서 피복율이 높아졌는데, 이는 봄철로 접어들면서 식물생육이 시작되고 강우에(http://www.kma.go.kr) 의한 영향으로 pH가 다소 높아진데 기인된 결과로 판단된다. 2018년 5월 24일 측정 결과 통계적 유의차를 보이며 D유형에서 가장 높게 나타났고 A유형(대조구)이 가장 낮게 나타났으며, A유형(대조구)을 제외한 모든 시험구에서 4월 측정 결과보다 지면피복율이 높아졌는데, 이는 A유형(대조구)의 경우 pH가 낮아지면서 식물고사가 크게 나타난데 기인된 결과로 판단된다. 2018년 6월 25일 측정결과 모든 시험구에서 전 측정결과 보다 피복율이 낮아졌는데, A유형(대조구), B유형, C유형의 경우 토양산도와 함수율에 의한 영향이 컸으며, D유형의 경우 토양산도보다는 함수율에 의한 영향이 크게 미친 것으로 판단된다.

이런 결과로 미루어 보아, 산성배수 발생 비탈면의 경우 인산염용액의 살포와 석회고토의 배합은 식생 피복율에 효과가 있는 것으로 나타났으며, 인산염과 석회고토를 모두 처리한 D유형에서 가장 큰 효과를 보였다.

#### 3.2.2 고사율

산성배수 발생 비탈면의 중화기법에 따른 고사율을 측정하였으며 그 결과는 Table 3에 나타난 바와 같다. 8번의 측정 결과 유의차를 보이며 A유형(대조구)에서 고사율이 가장

Table 2. Vegetation coverage rate affected by four different acid drainage neutralizing systems (%)

Acid drainage neutralizing systems	2017					2018		
	7/24	8/26	9/20	10/15	11/12	4/28	5/24	6/25
A type (Control)	56.7 <sup>a</sup>	31.7 <sup>c</sup>	32.7 <sup>c</sup>	34.7 <sup>c</sup>	30.0 <sup>b</sup>	36.7 <sup>c</sup>	25.0 <sup>b</sup>	12.0 <sup>c</sup>
B type	61.6	63.6 <sup>b</sup>	65.7 <sup>b</sup>	69.3 <sup>b</sup>	51.7 <sup>ab</sup>	61.7 <sup>b</sup>	68.3 <sup>b</sup>	57.7 <sup>b</sup>
C type	61.7	76.0 <sup>a</sup>	78.7 <sup>a</sup>	79.3 <sup>ab</sup>	60.0 <sup>a</sup>	78.0 <sup>a</sup>	81.7 <sup>a</sup>	72.7 <sup>ab</sup>
D type	61.7	78.3 <sup>a</sup>	81.0 <sup>a</sup>	81.7 <sup>a</sup>	62.7 <sup>a</sup>	81.3 <sup>a</sup>	87.7 <sup>a</sup>	86.5 <sup>a</sup>
LSD (0.05)	NS	11.1	8.8	11.1	25.8	15.8	9.1	20.3

<sup>a</sup>Mean values with the same letter within columns are not significantly different at  $p=0.05$  level by LSD-test.

NS: statistically not significant.

Table 3. Death rate affected by four different acid drainage neutralizing systems (%)

Acid drainage neutralizing systems	2017					2018		
	7/24	8/26	9/20	10/15	11/12	4/28	5/24	6/25
A type (Control)	0.0 <sup>z</sup>	25.0a	25.0a	25.0a	29.7a	5.0a	11.7a	24.7a
B type	0.0	1.7b	1.7b	1.7b	19.4b	0.0b	3.3b	14.0b
C type	0.0	0.0b	0.0b	0.0b	19.3b	0.0b	1.7b	10.7b
D type	0.0	0.0b	0.0b	0.0b	19.0b	0.0b	0.0b	1.2c
LSD (0.05)	NS	8.6	8.6	8.6	5.8	0.0	6.7	5.9

<sup>z</sup>Mean values with the same letter within columns are not significantly different at  $p=0.05$  level by LSD-test.

NS: statistically not significant.

높게 나타났고, D유형에서 고사율이 가장 낮게 나타났는데, 이는 토양산도가 식물 생육에 영향을 크게 미친데 기인된 결과로 판단된다(Fig. 2). 이는 산성배수로 인한 토양산도가 높아 식재한 식물이 활착하지 못하고 고사하는 경우가 발생한다는 연구결과와도 일치한다(Kalin et al., 2006). 토양산도가 높은 경우 식물 생장이 원활하지 않고 고사하므로 중화기법처리를 통해 식물 고사율을 낮추어야 할 것이다.

2017년 7월 24일 측정 결과 모든 시험구에서 고사율이 나타나지 않았는데, 이는 시험구 조성 초기로 산성배수에 의한 피해가 크게 미치지 않은데 기인된 결과로 판단된다. 8월 26일 측정 결과 시험구간 유의차를 보이며 A유형(대조구)에서 25%로 가장 높게 나타났고, C유형과 D유형은 고사율이 나타나지 않았으며, 이러한 결과는 9월과 10월 측정결과에서도 이어졌다. 시험기간 동안 A유형(대조구)의 경우 낮은 산도(pH)로 인하여 독성화합물의 용해도 증가에 따른 식물 피해가 나타났다(정, 2012). 2017년 11월 12일 측정 결과 통계적 유의차 없이 모든 시험구에서 고사율이 증가한 것으로 나타났는데, 이는 토양산도에 의한 영향보다는 식물의 특성상 가을로 접어들면서 휴면에 의한 식물고사로 판단된다.

2018년 4월 28일 측정 결과 A유형(대조구)에서만 고사율이 5% 나타났고 B유형, C유형, D유형은 고사한 식물이 나타나지 않았다. 5월 24일 측정 결과 D유형을 제외한 A유형(대조구), B유형, C유형에서 식물 고사율이 나타났는데, 이는 산성배수가 유출되면서 토양산도가 낮아져 식물생육에 영향을 미쳤기 때문이다(Kim, 2007). 6월 25일 측정 결과 모든 시험구에서 식물 고사율이 발생했는데, 이는 A유형(대조구), B유형, C유형의 경우 토양산도가 급격히 낮아지고 함수율이 낮아져 식물 고사가 발생한 반면, D유형은 산성배수에 의한 영향보다는 함수율이 큰 영향을 미친 것으로 D유형의 경우 산성배수에 의한 식물 고사가 거의 없었다.

이런 결과로 미루어 보아, 산성배수가 유출되는 비탈면의 경우 식물생육에 큰 장애를 받는 것으로 보이며, 인산염과 석회고토를 처리한 시험구에서 산성배수에 의한 피해가 적은 것을 알 수 있었다.

### 3.2.3 식물뿌리 현황

산성배수 발생 비탈면의 중화기법에 따른 식물뿌리의 길이(cm) 및 중량(g)을 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 3과 같다. 시험구 조성 후 13개월이 지난 2018년 7월 23일 측정 결과 식물별로 시험구간에 통계적 유의차를 보이며 A유형(대조구)에서 뿌리길이가 가장 짧고 뿌리중량도 낮게 나타났으며, D유형에서 뿌리가 가장 길고 중량도 가장 높게 나타나는 등 인산염과 석회고토가 살포된 시험구에서 식물의 뿌리생육이 우수한 것으로 나타났다. 이는 토양산도가 pH 5.0 이하로 산성이 강한 경우에는 토양 양분 중 인산, 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 붕소 등을 불용화시켜 유효도를 낮게 하고, 철, 알루미늄, 망간 등은 식물에 독성을 나타내어 뿌리의 생장을 억제시킨 것으로(Ulrich et al., 1980), 판단된다.

목본류 자귀나무의 뿌리길이(주근/측근)와 중량은 A유형(대조구) 3.4cm / 1.2cm / 1.0g, B유형 7.8cm / 3.2cm / 1.5g, C유형 10.1cm / 6.0cm / 4.1g, D유형 10.5cm / 10.2cm / 7.4g으로 D유형에서 모두 우수한 것으로 나타났다. 낙양초의 뿌리길이(주근 / 측근)와 중량은 A유형(대조구) 1.3cm / 2.0cm / 0.4g, B유형 6.3cm / 14.3cm / 2.5g, C유형 8.3cm / 22.3cm / 4.2g, D유형 12.3cm / 30.3cm / 7.2g으로 A유형에서 모두 낮게 나타났다. 일반적으로 pH 3.5 이하를 강산성토양이라고 하며(村井宏, 1995), pH 4.0 이하에서 철과 수소이온은 식물뿌리에 치명적이기 때문에 식물발아 및 생육이 잘 이루어지지 않았다(정덕영, 2012; Jang & Kim, 2006).

초본류 별노랑이의 뿌리길이(주근 / 측근)와 중량은 A유형(대조구) 6.2cm / 8.2cm / 2.5g, B유형 8.2cm / 12.2cm / 3.5g, C유형 12.2cm / 14.2cm / 5.5g, D유형 16.2cm / 18.1cm / 10.5g으로 나타났고, 쑥부쟁이의 뿌리길이(주근 / 측근)와 중량은 A유형(대조구) 1.2cm / 6.3cm / 0.9g, B유형 2.3cm / 12.2cm / 1.8g, C유형 3.2cm / 15.4cm / 2.3g, D유형 5.5cm / 19.8cm / 3.7g으로 나타났으며, 대금계국의 뿌리길이(주근 / 측근)와 중량은 A유형(대조구) 1.3cm / 6.3cm / 3.0g, B유형 1.5cm / 10.3cm / 4.0g, C유형 1.8cm / 12.3cm / 5.6g, D유형 2.3cm / 16.3cm / 6.6g으로 나타났다. 이와 같이 초본류

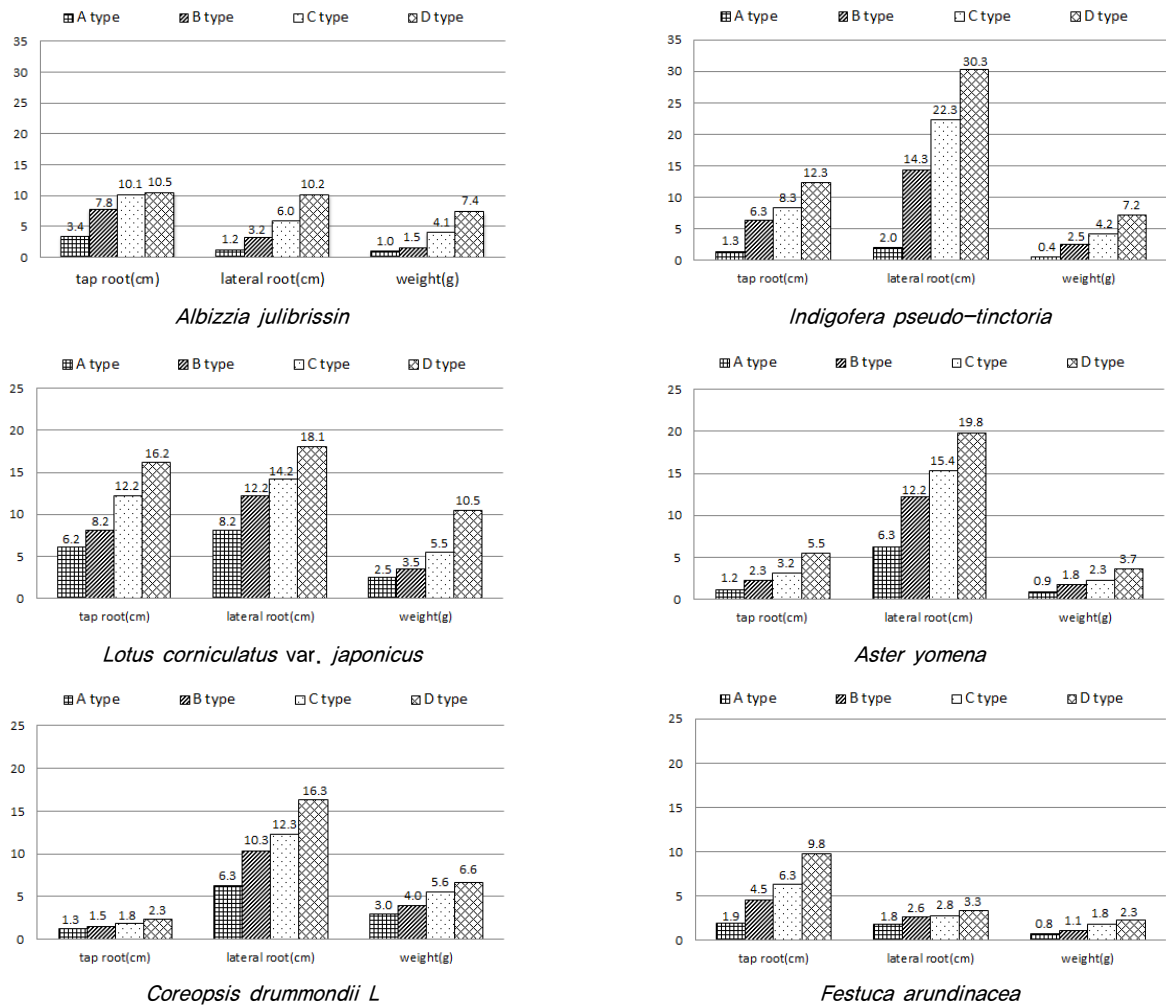


Fig. 3. Plant root status affected by four different acid drainage neutralizing systems (23 July, 2018).

역시 인산염과 석회고토를 살포하지 않은 A유형(대조구)에서 가장 낮게 나타났고, 인산염과 석회고토를 처리한 D유형에서 높게 나타났으며, 인산염을 살포한 C유형의 경우 석회고토를 살포한 B유형보다 뿌리 길이가 길고 중량도 높게 나타나서 인산염이 석회고토 보다 효과가 큰 것을 알 수 있었다. 벌노랑이, 쑥부쟁이, 대금계국 등 모든 초본류는 주근보다 측근이 길게 나타나는 식물특이성을 보였으며, 톨웨스큐의 경우 여름철 하고현상에 의해 식물생육이 원활하지 않아 뿌리의 생육상태가 좋지 못한 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구는 산성배수가 발생하는 비탈면에 생태적 녹화방안으로 4가지 유형의 시험구를 조성하고 산성배수 중화기법에 대한 생태적 녹화특성을 알아보려고 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 토양산도는 A유형(대조구)의 경우 유기물이 포함된 인공토양을 포설해 시공초기에는 pH 5.5까지 올라갔으나, 시간이 지나면서 최종 결과 pH 3.6의 강산성으로 나타났다. 석회고토를 포설한 B유형의 경우 pH 5.6~6.1로 토양중화 효과가 나타났고, 인산염을 살포한 C유형의 경우 pH 6.5~6.9로 석회고토를 포설한 것보다 더 효과적이었으며, 인산염과 석회고토를 모두 살포한 D유형의 경우 pH 7.1~7.2로 가장 효과가 큰 것으로 나타났다.
- (2) 식생의 지면피복율은 인산염과 석회고토가 살포한 D유형에서 가장 높게 나타났고, 인산염과 석회고토를 살포하지 않은 A유형(대조구)에서 가장 낮았으며, 석회고토를 살포한 B유형 보다 인산염을 살포한 C유형에서 높게 나타났다. 산성배수가 발생하는 비탈면의 경우 인산염과 석회고토의 처리가 식물생육에 큰 효과를 주는 것을 알 수 있었다.
- (3) 식물 고사율은 A유형(대조구)에서 가장 높게 나타났고 D유형에서 가장 낮게 나타났으며, 석회고토를 살포한

B유형보다 인산염을 살포한 C유형에서 고사율이 낮게 나타나 석회고토 보다 인산염의 효과가 큰 것으로 나타났다.

- (4) 식물 뿌리는 목본류 자귀나무와 낙엽송의 경우 pH가 낮은 A유형(대조구)에서 뿌리길이가 가장 짧고 중량도 낮았으며, D유형에서 뿌리길이가 가장 길고 중량도 높은 것으로 나타나는 등 뿌리는 pH의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있었다. 또한, 인산염을 살포한 C유형이 석회고토를 배합한 B유형 보다 뿌리길이가 길고 중량도 높게 나타났다. 초본류 벌노랑이, 쑥부쟁이, 금계국 등의 뿌리길이와 중량 또한 A유형(대조구)에서 가장 낮게 나타났고, 인산염과 석회고토를 처리한 D유형에서 높게 나타나는 등 인산염과 석회고토가 모두 살포된 시험구에서 식물의 뿌리생육이 우수한 것으로 나타났다.

## References

- 정덕영 (2012), 토양과 생활, 충남대학교 출판문화원, pp. 183~191.
- Anonymous. (1964), Rules for testing seeds Proceedings of the Association of Official Seed Analysts, Vol. 54, No. 2, pp. 1~112.
- Golez, N. V. and Kyuma, K. (1997), Influence of pyrite oxidation and soil acidification on some essential nutrient elements, Aquacultural Engineering, Vol. 15, pp. 107~124.
- Hinwood, A. L., Horwitz, P., Appleyard, S., Barton, C. and Wajrak, M. (2006), Acid sulphate soil disturbance and metals in groundwater: implications for human exposure through grown produce, Environ Pollution, Vol. 143, pp. 100~105.
- Jang, C. H. and Kim, M. S. (2006), Chemistry of strong acidic soil on Ulsan-Jungiadong cut-slope affecting seed germination, The Korea Society For Environmental Restoration And Revegetation Technology, Vol. 9, No. 5, pp. 133~142 (In Korean).
- Kalin, M., Wheeler, W. N. and Olaveson, M. M. (2006), Response of phytoplankton to ecological engineering remediation of a Canadian shield lake affected by acid mine drainage, Ecological Engineering, Vol. 28, pp. 296~310.
- Kim, J. G. (2007), Acid drainage and damage reduction strategy in construction site: an introduction, The Korea Society of Economic and Environmental Geology, Vol. 40, No. 5, pp. 651~660 (In Korean).
- Koryak, M., Shapiro, M. A. and Sykora, J. L. (1972), Riffle zoobenthos in streams receiving acid mine drainage, Water Research, Vol. 6, pp. 1239~1274.
- Lee, G. H., Kim, J. G., Chon, C. M., Park, S. G., Kim, T. H., Ko, K. S. and Kim, T. K. (2005), Generation characteristics and prediction of acid rock drainage (ARD) of cut slopes, The Korea Society of Economic and Environmental Geology, Vol. 38, No. 1, pp. 91~99 (In Korean).
- 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, The Korea Society of Economic and Environmental Geology, Vol. 46, No. 5, pp. 411~424 (In Korean).
- 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. (2009), Design and Construction Guidelines for Road Slope Reconstruction Work, pp. 34~80 (In Korean).
- SAS Institute Inc. (2013), The SAS system for window Release 9.1.
- Stum, W. and Morgan, J. J. (1995), Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters, 3th edition, John Wiley and Sons Inc., New York.
- Ulrich, B., Mayer, R. and Khnaan, P. K. (1980), Chemical changes due to acid precipitation in a loss-derived soil in Central Europe. J. Soil Science, pp. 193~199.
- 村井宏. (1995), 特殊環境面緑化技術(小橋 澄/治村井宏編 “のり面緑化の最先端”)東京 : ソフトサイエンス社, pp. 171~199.