

특이산성토의 중화처리기술에 따른 생태적 녹화*

조성록¹⁾ · 김재환²⁾

¹⁾ 산수그린텍(주) · ²⁾ 청주대학교 휴먼환경디자인학부 조경도시계획전공

The Ecological Vegetation by the Neutralizing Treatment Techniques of the Acid Sulfate Soil*

Cho, Sung-Rok¹⁾ and Kim, Jae-Hwan²⁾

¹⁾ Sansu Greentech., CO., Ltd.,

²⁾ Dept. of Human Environment Design, College of Science, Cheongju University.

ABSTRACT

This study was composed of four treatments [no treatment, phosphate + limestone layer treatment, phosphate + sodium bicarbonate + cement layer treatment, and phosphate + sodium bicarbonate + limestone layer treatment] for figuring out vegetation effects on the acid drainage slope. Treated acid neutralizing techniques were effective for neutralizing acidity and vegetative growth in order of [first: phosphate + sodium bicarbonate + limestone layer treatment, second: phosphate + sodium bicarbonate+cement layer treatment, third: phosphate + limestone layer treatment and fourth: no treatment] on the acid drainage slope. We found out that sodium bicarbonate treatment was additory effect on neutralizing acidity and increasing vegetaive growth besides phosphate and neutralizing layer treatments. In neutralizing layer treatments, Limestone layer was more effective for vegetation and acidity compared to cement layer treatment. Cement layer showed negative initial vegetative growth probably due to high soil hardness and toxicity in spite of acid neutralizing effect. Concerning plants growth characteristics, The surface coverage rates of herbaceous plants, namely as *Lotus corniculatus var. japonicus* and *Coreopsis drummondii* L were high in the phosphate + sodium bicarbonate + limestone layer treatment while *Festuca arundinacea* was high in the phosphate + sodium bicarbonate + cement layer treatment. We also figured out that soil acidity affected

* 본 연구는 한국지질자원연구원에서 수행한 주요사업의 협동연구지원을 받아 수행된 연구임.

First author : Cho, Sung-Rok, Sansu Greentech., CO., Ltd.,

Tel : +82-42-256-7311, E-mail : sansu0488@naver.com

Corresponding author : Kim, Jae-Hwan, Dept. of Human Environment Design, College of Science, Cheongju University,

Tel : +82-43-229-8507, E-mail : smileeye77@cju.ac.kr

Received : 29 November, 2018. **Revised** : 19 January, 2019. **Accepted** : 17 January, 2019.

more on root than top vegetative growth.

Key Words : Phosphate, Sodium bicarbonate, Cement, Limestone, Acid drainage slope

I. 서 론

우리나라에서 산성배수를 발생시킬 개연성이 높은 암석은 평안층군 탄층, 옥천층군 변성퇴적암, 중생대 화산암류, 제3기 퇴적암 및 화산암류, 광화대지역 암석 등으로(Figure 1) 국토면적의 약 20%정도가 매장되어 있으며(Kim, 2007; KIGAM, 2017), 각종 건설공사로 인하여 지하에 안전하게 존재하던 황화광물이 지표에 노출되어 산화되면서 황산을 생성하고 산성배수를 발생시켜(Stum and Morgan, 1995), 식생이 고사하고 경관이 훼손될 뿐만 아니라 농토를 오염시키는 등 다양한 환경문제와 민원이 발생하고 있다(Kalin et al., 2006).

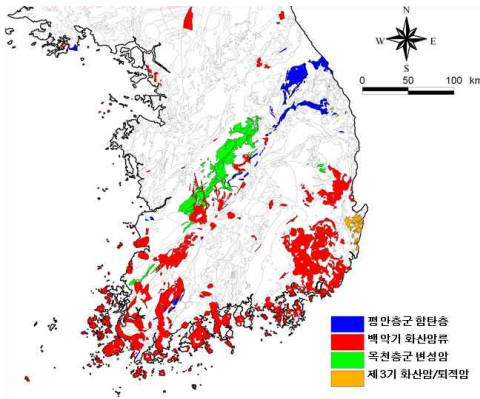


Figure 1. Distribution of rocks with high potential of acid drainage.

토양학에서는 산성배수를 발생시키는 토양을 특이산성토(acid sulfate soil)로 정의하고 있으며(Nordstrom et al., 1982), 산성배수를 저감하는 방법은 산성배수를 발생시키는 근원인 황화광물의 산화반응을 억제하는 방법으로 물리·화학적으로 여러 가지 방법이 적용되고 있으나, 비

용이 많이 들고 지속효과가 길지 않아 효율적이 지 못하다(Smith and Bradshaw, 1979).

각기비탈면에서 황철석의 산화에 의해 발생하는 산성배수는 강산성이며 높은 농도의 중금속을 함유하고 있으며, 산성배수를 발생시키는 암석을 성토재로 사용하는 경우 성토층으로부터 발생한 산성배수가 주변으로 유입되어 환경오염 피해, 농경지 피해, 비탈면녹화 불량 등의 대책수립 및 시행으로 막대한 추가 비용이 발생되고 있어 해결방안이 시급한 실정이다(Lee et al., 2013).

산성배수가 발생하는 비탈면에 알칼리성 시멘트로 황철석을 피복하고 대기 노출을 차단하여 황철석의 산화에 의한 산성배수의 발생을 일정부분 저감하고 비탈면의 안정성을 증진시킬 수 있으나(KIGAM, 2017), 불량한 경관이 연출되는 등 친환경적인 녹화와는 배치되는 행위이다. 비탈면에 식생을 도입하면 비탈면안정성을 증대하고 경관을 회복하는 효과가 크므로 식생을 도입하는 처리기법이 우선시 되어야 할 것이다. 비탈면을 식물로 녹화하면 토양의 유기물함량이 지속적으로 증가하여 성토층으로 침투하는 우수의 용존산소 농도를 저감시키며(Kim, 2007), 우수의 용존산소 농도저감은 황철석의 산화를 저감시켜 산성배수 발생을 저감시키는 등 산성배수 발생 비탈면의 녹화를 위한 매우 중요한 현안이다.

일반적으로 황화광물의 산화를 방지하여 산성배수의 발생을 억제하는 방법으로는 황화광물의 표면을 화학적으로 코팅하여 산소와의 접촉을 차단하는 표면코팅기법이 쓰이고 있다(Matlock et al., 2003). 하지만, 산성배수 발생물질은 일정 수준의 수분을 함유하고 있어 산성배수가 지속적으로 발생되며 하부에서 생성된 산

성배수는 모세관 현상에 의하여 표면으로 상승하여 상부의 식물을 고사시키므로 이를 해결하기 위한 중화방법 등이 모색되어야 할 것이다.

산성배수의 발생을 코팅제 및 중화제로 억제할 수 있지만 비탈면에서 시공할 수 있는 비탈면 깊이가 한정적으로 강우강도가 높은 경우 우수의 일부가 하부까지 침투하여 산성배수를 발생시킬 수 있으며, 하부에서 생성된 산성배수가 모세관현상에 의하여 식생기반재로 상승하여 식생의 활착을 방해할 개연성이 있으므로, 이를 해결하기 위해 상부에 중화층을 조성함으로써 상승하는 산성배수를 중화하고 산성배수에 의한 식물생장 장애를 근원적으로 방지할 수 있다 (Kim, 2007). 중화층은 산성배수에 대한 중화능력이 높은 석회고토[(Ca, Mg)CO₃], 시멘트, 정수장 슬러지 등을 다량의 유기물(완숙퇴비)과 혼합하여 사용한다(Kim, 2007). 중화층에 사용된 석회고토[(Ca, Mg)CO₃]는 많은 양을 투입하여도 약알카리(pH 8)로 유지되는 이점이 있지만 중화에 긴 시간이 소요되는 단점이 있으며, 고비용의 공사비가 발생한다. 시멘트는 석회고토에 비해 비용이 저렴하고 알칼리성을 띠며 반응속도가 빠른 장점이 있으나, 전반적으로 시멘트가 5% 이상 배합될 경우 알칼리에 의한 식생 약영향을 초래할 수 있으므로 주의가 요구된다 (Kim et al., 2008).

본 실험에서는 산성배수가 발생하는 이암 비탈면에 식물생육을 위한 코팅제 및 중화제를 처리하고 산성배수의 모세관현상을 차단하기 위한 중화층을 조성한 후 토양의 물리·화학적 특성과 식물생육특성을 기초로 생태적 녹화를 이루고자 한다.

II. 연구 방법

1. 시험구 처리 및 조성

본 시험 대상지는 제3기 퇴적암 및 화산암류가 분포되어 있는 포항지역이며, 산성배수가 발생하

는 한국지질자원연구원 포항지질자원실측연구센터 내 성토비탈면으로 비탈경사는 1 : 0.8 ~ 1 범위를 보였고 비탈면은 남향을 이루고 있었다. 먼저 비탈면을 정리한 후 식생기반재가 흘러내리지 않도록 코아네트를 설치하였으며, 처리구별로 구획을 나누고 시험구를 처리하였다. 대조구는 비탈면 위에 식생기반재(부엽토, 황토, 임목과쇄칩, 마사토, 슬러지 등으로 배합된 물질)를 1cm 두께로 포설하였으며, 처리1구는 물 1ℓ 기준으로 K₂HPO₄ 1g을 희석하여 30ℓ/m²의 수용액을 비탈면 위에 균일하게 살포하여 침투되도록 코팅제를 처리한 뒤에, 석회고토[(Ca, Mg)CO₃]가 10% 혼합된 식생기반재를 1cm 두께로 포설하여 중화층을 조성하였다. 처리2구는 물 1ℓ 기준으로 K₂HPO₄ 1g과 NaHCO₃ 10g을 혼합·희석하여 30ℓ/m²의 혼합수용액을 비탈면 위에 균일하게 살포하여 침투되도록 코팅제 및 중화제 처리를 한 뒤에, 시멘트가 3% 혼합된 식생기반재를 1cm 두께로 취부하여 중화층을 조성하였다. 처리3구는 물 1ℓ 기준으로 K₂HPO₄ 1g과 NaHCO₃ 10g을 혼합·희석하여 30ℓ/m²의 혼합수용액을 비탈면 위에 균일하게 살포하여 침투되도록 코팅제 및 중화제 처리를 한 뒤에, 석회고토[(Ca, Mg)CO₃]가 10% 혼합된 식생기반재를 1cm 두께로 취부하여 중화층을 조성하였다. 이후에 먼 네트를 추가로 설치한 후 대조구, 처리1구, 처리3구는 종자가 혼합된 식생기반재를 2cm 두께로 취부하였고, 처리2구는 종자와 시멘트가 1% 혼합된 식생기반재를 2cm 두께로 취부하여 시험구를 조성하였다(Figure 2). 시험구의 크기는 1m×1m (1m²)의 정사각형으로 처리구에 따라 4개의 시험구를 3반복 처리하여 총 12개의 시험구를 2018년 4월 19일에 완성하였다.

2. 공시식물

공시식물은 훼손지 비탈면 녹화에 많이 활용되고 건조에 강하며 쉽게 구할 수 있는 목본류(자귀나무, 낭아초), 초본류(별노랑이, 패랭이꽃,

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

Flora	Scientific name	Korean name	Germination rate(%)	Seeding amount(g/m ²)
Woody plants	<i>Albizia julibrissin</i>	자귀나무	53.4	5.0
	<i>Indigofera pseudo-tinctoria</i>	낭아초	61.8	2.5
	<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonicus</i>	벌노랑이	66.5	5.0
Herbaceous plants	<i>Dianthus sinensi</i>	패랭이꽃	68.7	5.0
	<i>Coreopsis drummondii</i> L	금계국	78.3	5.0
Cool-season turfgrass	<i>Festuca arundinacea</i>	톨웨스큐	88.9	2.5
Total				25.0

금계국)와 초기 생장이 빠른 한지형잔디류(톨웨스큐) 등의 종자를 선별하여 혼합하였다. 발아 실험은 2018년 3월 5일부터 1개월 동안 광, 온도, 습도 등의 생육환경 조절이 가능한 성장상(Growth Chamber: DS-54GLP)에서 실시하였다. 성장상 조건은 습도 70%, 8시간 동안 광조건으로 25℃, 16시간 동안 암조건으로 15℃의 온도를

유지시킨 후(Association of Official Seed Analysts, 1956), 식물별로 100립을 기준으로 3반복 처리하여 발아율을 조사하였다. 발아율 조사결과 식물종자의 발아율은 53.4~88.9%이었으며, 종자 파종량은 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2009) ‘도로비탈면 녹화공사의 설계 및 시공지침’에 준하여 코팅제,

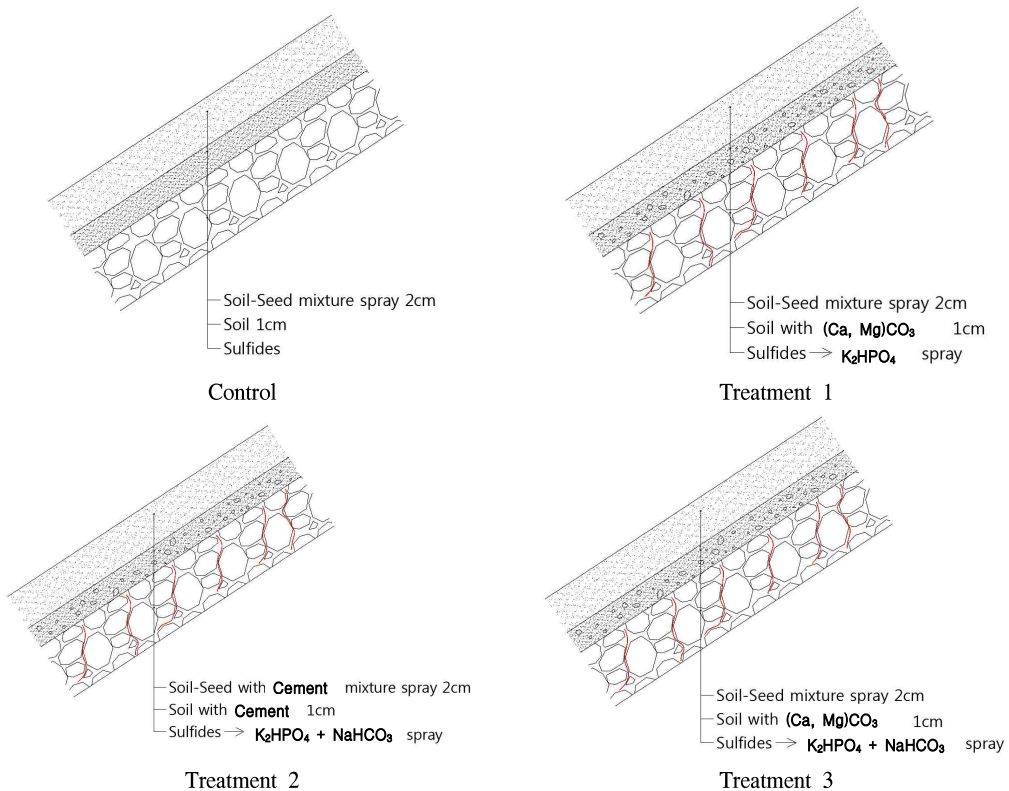
**Figure 2.** Four different acid drainage neutralizing systems.

Table 2. Soil properties of the acid drainage slopes used for seeding experiments.

Soil property	Mech. Analysis			pH	EC (dS/m)	C.E.C ^z (cmol/kg)	N (%)	O.M ^y (%)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	Exch. Cations (me/100g)			
	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)							Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺
Results	52.0	18.0	30.0	3.4	8.97	7.03	0.69	2.68	138.96	1.63	0.49	1.37	0.15

^zC.E.C: Cation Exchange Capacity.

^yO.M: Organic Matter.

Table 3. Vegetation base materials of the used for experiments.

Division	Water capacity	Salt concentration	pH	EC (dS/m)	C.E.C ^z (cmol/kg)	N (%)	O.M ^y (%)
Standards	40-80%	0.2% and less	5.5-7.0	1.0 and less	6 and over	0.06 and over	3.0 and over
Results	45.93	0.13	7.2	0.84	35.98	0.68	26.83

^zC.E.C: Cation Exchange Capacity.

^yO.M: Organic Matter.

중화제 및 중화층 처리구의 식물별로 발생기대 분수를 예측하여 2.5~5g씩 총 25g/m²을 파종하였다(Table 1).

3. 조사 및 분석방법

실험에 사용된 공시토양(원지반) 및 식생기반재의 토양특성을 파악하고자 토양의 물성과 이화학적 특성을 충남대학교 토양환경분석센터에 의뢰하여 분석하였다.

조사는 2018년 5월 18일부터 10월 16일까지 약 한달 간격으로 6차례에 걸쳐 실시하였으며, 표면경도는 산중식(山中式)경도계, 토양산도는 토양산도계(HI 99121 Soil pH Meter)를 이용하여 측정하였고, 식생의 생육특성은 피복율, 초본류와 한지형잔디류의 피복율을 조사하였다. 식물뿌리 길이(cm)와 중량(g)은 2018년 11월 11일에 실험구별로 파종한 식물을 모종삽과 손으로 채취하여 조사하였다. 측정결과는 SAS system for window V9.1(SAS instiute Inc, 2013)을 이용하여 통계처리 하였으며 측정별 평가의 차이는 최소유의차(LSD)로 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 토양의 물리·화학적 특성

1) 공시토양과 식생기반재 분석

황화광물이 다량 분포된 시험구의 토양성분을 분석한 결과는 Table 2에 나타난 바와 같다. 기초적인 이화학특성을 분석한 결과 Table 2에서 보는 바와 같이 양분이 많지 않으며 토양산도가 강산성(pH 3.4)으로 식물발아 및 생육에는 적합하지 않은 것으로 나타나는 등(Jang and Kim, 2006) 대상지 토양의 경우 토양중화 처리가 필요한 것으로 파악되었다.

실험에 사용된 식생기반재의 분석결과는 Table 3에 나타난 바와 같다. 물성은 토양과 비슷하며, 양분도 많고 토양산도가 pH 7.2로 나타나는 등 식물발아 및 생육에 양호한 조건을 제공해주는 등 평가기준에 모두 적합한 결과가 나타났다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009).

2) 표면경도

산성배수 비탈면의 코팅제, 중화제 및 중화층

Table 4. Soil hardness(mm) affected by four different acid drainage neutralizing systems.

Acid drainage neutralizing systems ^z	2018					
	5/18	6/16	7/15	8/15	9/15	10/16
Control	17.0b ^y	15.3b	17.3b	11.7b	12.7b	13.0b
Treatment 1	17.7b	15.7b	18.2ab	12.0b	14.3ab	14.3b
Treatment 2	28.7a	18.7a	19.3a	15.7a	16.3a	16.3a
Treatment 3	18.0b	17.7b	18.2ab	12.0b	14.7ab	14.7b
LSD(0.05)	2.2	1.7	1.5	3.4	2.1	3.1

^zControl : no treatment.

Treatment 1 : K₂HPO₄ and [(Ca, Mg)CO₃] treatment.

Treatment 2 : K₂HPO₄, NaHCO₃ and Cement treatment.

Treatment 3 : K₂HPO₄, NaHCO₃ and [(Ca, Mg)CO₃] treatment.

^yMean values with the same letter within columns are not significantly different at $p=0.05$ level by LSD-test.

처리에 따른 표면경도를 측정하였으며, 그 결과는 Table 4에 나타난 바와 같다. 6번의 측정 결과 시험구간 통계적 유의차를 보이며 처리2구에서 가장 높게 나타났다. 처리2구의 경우 시멘트를 혼합한 식생기반재가 비교적 단단히 결합된 데에 기인된 결과로 판단된다. 2018년 5월 18일 측정 결과 처리2구에서 27mm 이상으로 흠이 너무 단단해서 식물의 생육이 곤란한 값이 나타났으며, 대조구, 처리1구, 처리3구는 식물근계 생장에 적당한 것으로 나타났다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009). 6월 16일 측정 결과 모든 시험구에서 표면경도가 낮아졌는데, 이는 강우에 의한 영향으로 식생기반재의 표면이 물러져 나타난 것으로 판단되며, 10월 16일까지 5번의 측정 결과 모든 시험구에서 23mm 이하로 식물의 생육 및 근계에 적당한 결과가 나타났다. 이와 같은 결과로 미루어 보아 시멘트를 혼합한 처리2구의 경우 초기 표면경도가 높아 주의가 요구되며, 시간이 지나면서 식생의 뿌리 신장에는 어려움이 없는 것으로 나타났다.

3) 토양산도(pH)

산성배수 비탈면의 코팅제, 중화제 및 중화층

처리에 따른 토양산도(pH)를 측정하였으며 그 결과는 Figure 3에 나타난 바와 같다. 6번의 측정 결과 대조구의 경우 최저 pH 3.1로 토양산도가 강산성으로 나타나 식물생장의 어려움이 있을 것으로 보이며, Jang and Kim(2006)의 연구 결과 pH 4.0이하가 되면 식물발아 및 생육이 잘 이루어지지 않는 것으로 보고되었다. 반면 처리 1구는 pH 6.4~pH 6.8로 나타났고, 처리2구는 7.6~7.9로 나타났으며, 처리3구는 pH 7.4~pH 7.5로 중화 효과가 큰 것으로 나타났다.

2018년 5월 18일 측정결과 대조구의 경우 pH 5.1로 시험구 조성 전 원지반의 토양산도 보다 높게 나타났는데, 이는 시험구에 조성에 적용된 식생기반재의 유기물에 의한 영향으로 초기 토양산도가 상승한 데에 기인된 결과로 판단된다. Yun et al.(2011)의 연구결과 산성배수가 토양으로 배출되면 고농도의 중금속(Fe, Cd, Cr, As, Pb 등)과 SO₄²⁻를 포함하게 되고 낮은 pH를 가지며, 토양을 중금속으로 오염시켜 식물의 생장을 방해하는 결과가 나타나므로 주의를 기울여야 한다. 2018년 6월, 7월, 8월 및 9월 측정 결과에서도 이와 같은 결과가 이어졌으며, 10월 16일 최종 측정 결과 토양산도는 대조구 pH 3.7,

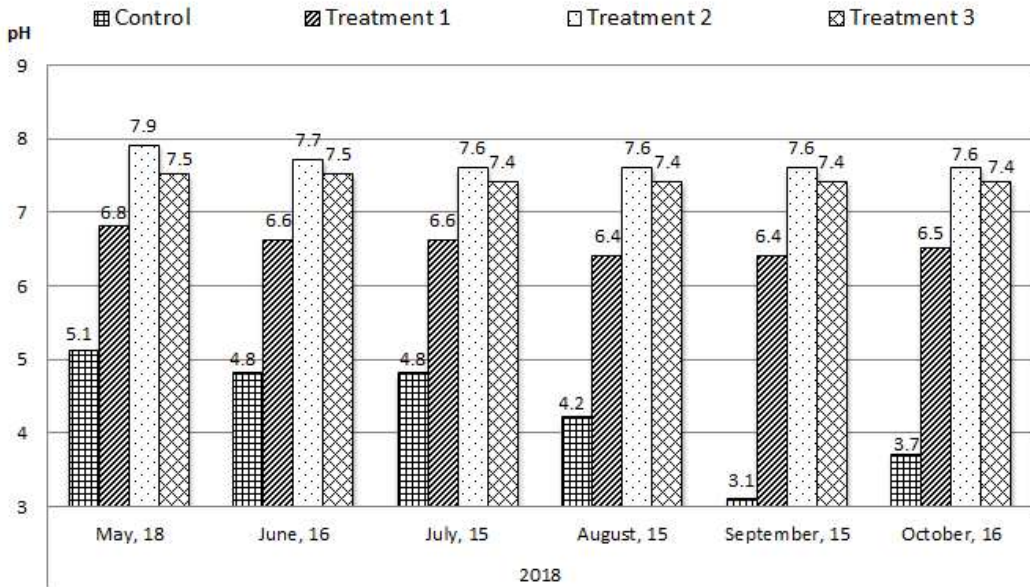


Figure 3. Acidity content(pH) affected by four different acid drainage neutralizing systems
 Control : no treatment, Treatment1 : K₂HPO₄ and [(Ca, Mg)CO₃] treatment, Treatment2 : K₂HPO₄, NaHCO₃ and Cement treatment, Treatment3 : K₂HPO₄, NaHCO₃ and [(Ca, Mg)CO₃] treatment.

처리1구 pH 6.5, 처리2구 pH 7.6, 처리3구 pH 7.4로 나타났다. 실험에 사용된 코팅제(K₂HPO₄)는 황철석 표면에 침전되어 산소와 황철석의 접촉을 차단하여 산성배수의 발생을 억제하고, 중화제(NaHCO₃)는 암석 또는 토사로부터 이미 발생한 산성배수를 중화처리하고 중금속을 침전시키며(Kim et al., 2008), 비탈면에 유기물과 중화제[(Ca, Mg)CO₃, Cement)가 혼합된 중화층은 모세관현상에 의하여 이동하는 산성배수를 중화시킨 것으로(Lee et al., 2013), 판단된다.

이런 결과로 미루어 보아 산성배수 비탈면의 토양산도를 중화시키는 방법으로 코팅제, 중화제 및 중화층 처리방법이 효과적인 것을 알 수 있었다.

2. 식물생육특성

1) 피복율

산성배수 비탈면의 코팅제, 중화제 및 중화층 처리에 따른 피복율을 측정하였으며 그 결과는

Table 5에 나타난 바와 같다. 6번의 측정 결과 시험구간 통계적 유의차를 보이며 처리3구에서 가장 높게 나타났고 대조구에서 가장 낮게 나타났다.

2018년 5월 18일 측정 결과 처리구들간에 유의차를 보이며 처리3구에서 가장 높게 나타났고 대조구에서 가장 낮게 나타났는데, 이는 대조구의 경우 토양산도가 높아 식물생장에 영향을 받은 것으로 보이며, 처리2구의 경우 식생기반의 표면경도가 높아 식물 발아세가 늦어진 데에 기인된 결과로 판단된다. 중화층 및 식생층에 시멘트를 혼합한 처리2구의 경우 표면경도가 높아 초기 식물의 발아세가 늦으므로 이에 대한 주의가 요구된다. 6월 16일 측정 결과 대조구를 제외한 모든 시험구에서 식물생장이 원활해지면서 피복율이 증가한 반면 대조구는 식물고사가 발생하면서 피복율이 낮아졌는데, 이는 대조구의 경우 토양산도가 낮아져 식물이 고사한 데에 기인된 결과로 판단된다. 산성배수는 토양을 산

Table 5. Vegetation Coverage rate affected by four different acid drainage neutralizing systems(%).

Acid drainage neutralizing systems ^z	2018					
	5/18	6/16	7/15	8/15	9/15	10/16
Control	10.0c ^y	7.7d	26.3c	12.7d	6.3c	14.7d
Treatment 1	24.3b	68.7b	89.5a	60.3c	45.0b	70.0c
Treatment 2	14.0c	61.7c	85.3b	65.7b	55.0a	74.0b
Treatment 3	30.0a	81.0a	93.1a	71.3a	58.3a	87.7a
LSD(0.05)	4.3	2.8	4.3	4.3	7.3	3.2

^zControl : no treatment.

Treatment1 : K₂HPO₄ and [(Ca, Mg)CO₃] treatment.

Treatment2 : K₂HPO₄, NaHCO₃ and Cement treatment.

Treatment3 : K₂HPO₄, NaHCO₃ and [(Ca, Mg)CO₃] treatment.

^yMean values with the same letter within columns are not significantly different at $p=0.05$ level by LSD-test.

성화 시키고 Fe, Al, Mn, As, 중금속을 부화시켜 식물에 독성을 나타내며, 토양과 식물의 뿌리에 침전되어 양분 흡수를 방해하여 식생을 고사시킨다(Hinwood et al., 2006). 7월 15일 측정 결과 대조구 26.3%, 처리1구 89.5%, 처리2구 85.3%, 처리3구 93.1%로 처리1구, 처리2구, 처리3구는 피복율이 80%이상으로 높게 나타났다. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009) ‘도로비탈면 녹화공사의 설계 및 시공 지침’의 녹화공법 평가표에 따르면 초본위 주형, 초본·관목혼합형의 경우 식생피복율의 기준을 3등급(하 : 60%미만, 중 : 60~79%, 상: 80%이상)으로 나누어 제시하고 있는데, 이 기준에 따르면 대조구와 비교해 처리1구, 처리2구, 처리3구의 피복율이 우수하게 나타난 것을 알 수 있다. 8월 15일 측정 결과 모든 시험구에서 피복율이 낮아졌는데 이는 여름철 극심한 더위와 건조의 이상기후([http : //www.kma.go.kr](http://www.kma.go.kr))로 인해 함수율이 낮아진데 기인된 결과이며, 전 측정 결과와는 다르게 처리2구에서 처리1구보다 높은 피복율이 나타났다. 이는 처리1구의 경우 피복율에 큰 영향을 미친 벌노랑이가 고사한 데에 기인된 결과로, 처리2구의 경우 초기 표면

경도가 높아 처리1구보다 피복율이 낮았으나 4개월이 지난 8월부터 높은 피복율이 나타났다. 9월 15일 측정 결과 이상기후가 이어져 식물고사가 증가하였고 이로 인하여 모든 시험구에서 피복율이 낮아졌다. 6개월이 지난 10월 16일 최종 측정 결과 대조구 14.7%, 처리1구 70.0%, 처리2구 74.0%, 처리3구 87.7%로 처리3구의 경우 80%이상의 매우 높은 피복율이 나타났다.

이런 결과로 미루어 보아 코팅제, 중화제 및 중화층을 처리한 시험구에서 식물생장이 원활하게 진행되는 것을 알 수 있었으며, 처리3구에서 가장 큰 효과를 보이는 것으로 확인되었다.

2) 초본류 및 한지형잔디류의 피복율

산성배수 비탈면의 코팅제, 중화제 및 중화층 처리에 따른 초본류 및 한지형잔디류의 피복율을 측정하였으며 그 결과는 Table 6에 나타난 바와 같다. 6번의 측정 결과 통계적 유의차를 보이며 코팅제, 중화제 및 중화층을 조성한 시험구에서 높게 나타났으며, 대조구에서 낮게 나타났다. 이는 산성배수가 발생하면 고농도의 중금속, 철(Fe)과 알루미늄(Al)을 함유하며, 높은 농도의 중금속과 알루미늄은 식물에 독성을 나타

Table 6. Native herbaceous plant and cool-season turfgrass coverage rate affected by four different acid drainage neutralizing systems(%).

Acid drainage neutralizing systems ^z	2018																							
	5/18				6/16				7/15				8/15				9/15				10/16			
	Lo ^y	Di	Co	Fe	Lo	Di	Co	Fe	Lo	Di	Co	Fe	Lo	Di	Co	Fe	Lo	Di	Co	Fe	Lo	Di	Co	Fe
Control	3.7b ^x	5.0b	0.0c	1.0d	2.2d	2.7b	0.5c	2.0c	6.3d	12.7b	2.7c	2.7c	1.7d	6.7c	2.8c	0.0c	1.3c	2.3c	3.0c	0.0d	3.3c	2.7b	6.7c	0.0d
Treatment 1	10.3a	10.3a	1.0b	2.7c	37.0b	13.0a	3.7b	13.3b	51.0b	19.2a	13.3a	3.7c	25.0b	14.7b	15.5a	3.5c	18.7b	11.3b	12.0b	3.0c	25.3a	5.0b	28.3a	9.7c
Treatment 2	4.0b	3.7b	0.0c	6.7a	18.3c	13.7a	2.7b	25.7a	4.7c	19.4a	8.7b	12.7a	18.4c	25.7a	9.3b	10.7a	15.7b	19.7a	11.7b	7.7a	20.0b	15.0a	23.3b	20.0a
Treatment 3	10.7a	11.3a	4.0a	4.0b	41.7a	18.3a	5.3a	14.7b	52.7a	19.2a	15.3a	5.0b	31.7a	16.0b	16.7a	5.0b	24.0a	13.5b	17.0a	4.3b	25.7a	13.3a	30.0a	14.3b
LSD(0.05)	1.6	2.1	0.9	0.8	2.1	5.2	1.3	3.0	4.2	4.3	3.9	1.3	3.3	4.8	2.3	1.2	3.3	2.1	2.6	1.2	4.1	2.7	4.1	1.2

^zControl : no treatment.

Treatment1 : K₂HPO₄ and [(Ca, Mg)CO₃] treatment.

Treatment2 : K₂HPO₄, NaHCO₃ and Cement treatment.

Treatment3 : K₂HPO₄, NaHCO₃ and [(Ca, Mg)CO₃] treatment.

^yLo : *Lotus corniculatus*, Di : *Dianthus sinensis*, Co : *Coreopsis drummondii* L, Fe : *Festuca arundinacea*.

^xMean values with the same letter within columns are not significantly different at $p=0.05$ level by LSD-test.

내어 식물 뿌리의 활착 및 생장에 심각한 장애를 초래한데(Koryak et al., 1972) 기인된 결과로 판단된다. 초본류 벌노랑이, 금계국은 처리3구에서 가장 높게 나타난 반면 한지형잔디류 톨웨스큐는 처리2구에서 가장 높게 나타났는데, 이는 처리2구의 경우 표면경도가 높아 식물 발아에 영향을 미친 것으로, 톨웨스큐의 경우 봄철 발아세가 빨라 피복율이 높게 나타난 것으로 보이며(Shim et al., 2004), 쌍자엽 식물들은 복토층을 뚫고 나오는데 단자엽 식물보다 억압을 더 받아 신초출현이 낮은 것으로 판단된다(Kim and Shim, 2010). 처리2구의 경우 시공 초기 초본류의 피복율이 낮은 것으로 보아 시멘트 배합에 세심한 주의가 요구된다.

벌노랑이 피복율은 대조구 < 처리 2구 < 처리1구 < 처리3구 순으로 나타났으며, 토양의 표면경도가 높은 처리2구의 경우 초기 발아세가 늦은 데에 기인된 결과로 판단된다. 8월 15일 측정 결과 모든 시험구에서 피복율이 급격히 감소하였는데, 이는 고온 및 함수율 감소에 의한

영향이 크게 미친데 기인된 결과로 판단된다. 선행연구결과 인공지반에서 벌노랑이는 한지형잔디에 비해 건조에 강한 특성이 있으며 함수율이 낮은 조건에서도 활발히 생육하는 것으로 나타났으나(Kim and Shim, 2009), 본 연구결과와는 상이한 결과가 나타났다. 패랭이꽃의 경우 처리2구에서 표면경도가 높아 초기 발아세가 늦었으나 10월 16일 최종 측정결과 가장 높은 피복율이 나타났으며, 식물의 특성상 발아 후 4~5개월이 지난 후에는 식물생장이 낮아지는 것으로 나타났다. 금계국의 경우 처리3구에서 가장 높은 피복율이 나타났고, 대조구에서 가장 낮게 나타났으며 처리2구 < 처리1구 순으로 나타났다. 금계국의 경우 벌노랑이와 패랭이꽃 보다 시험 초기에는 발아세가 늦은 것으로 나타났으나, 발아한 식물이 고사하지 않고 생육이 지속되어 10월 16일 마지막 측정 결과 초본류 중 가장 높은 피복율을 보였다.

톨웨스큐의 경우 시험초기 시멘트 배합의 영향으로 인해 표면경도가 높은 처리2구에서 시험

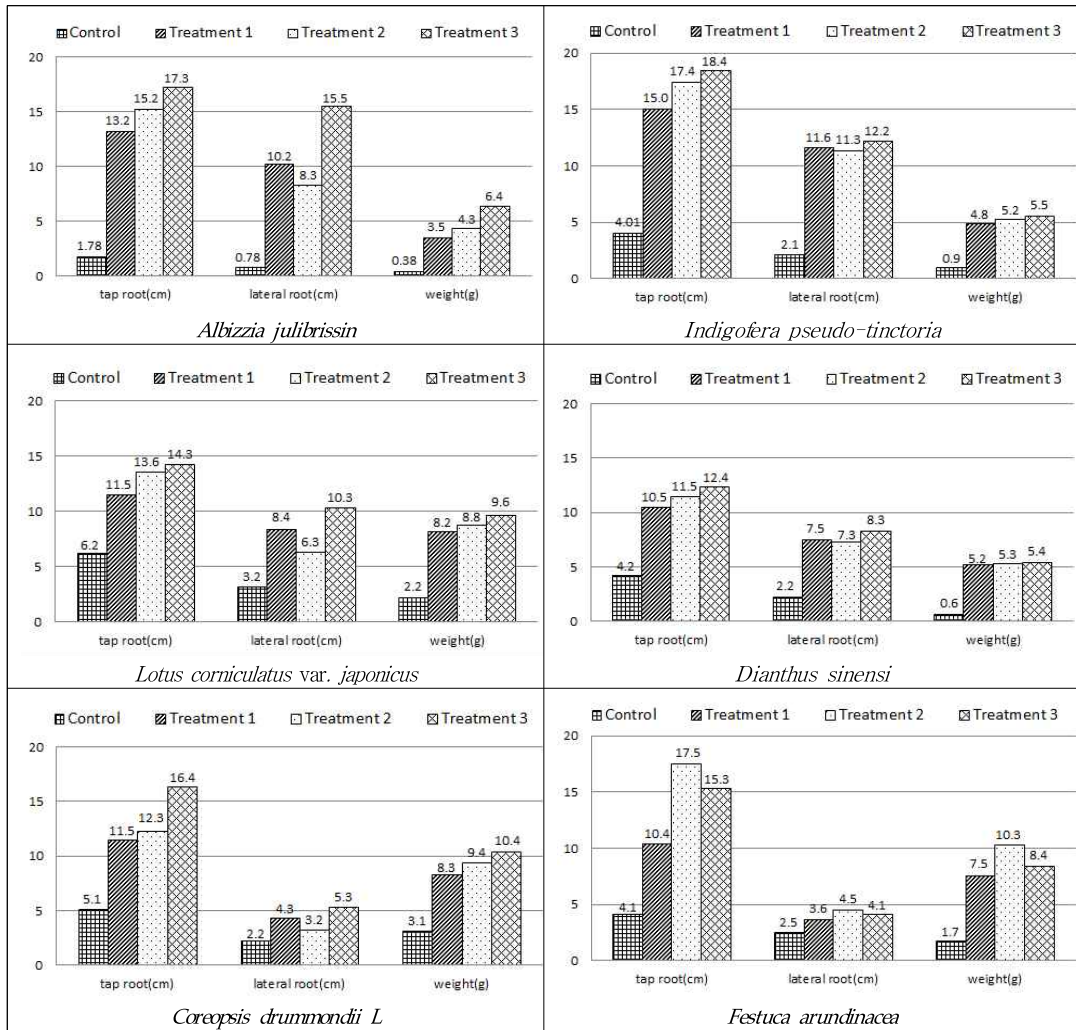


Figure 4. Plant root status affected by four different acid drainage neutralizing systems. (11 November, 2018)

에 파종한 식물 중 피복율이 가장 높았으나, 7월, 8월, 9월 측정결과 모든 처리구에서 톨웬스큐의 피복율이 감소하였다. 이는 한지형잔디류의 경우 여름철 이병성과 하고현상의 피해를 받아 고사한 데에 기인된 결과로(Shim et al., 2004) 판단된다.

3) 뿌리 현황

산성배수 비탈면의 코팅제, 중화제 및 중화층 처리에 따른 식물뿌리 길이(cm)와 중량(g)을 측

정하였으며 Figure 4에 나타난 바와 같다. 시험구 조성 후 6개월이 경과한 2018년 11월 11일 측정 결과 처리3구에서 뿌리가 가장 길고 중량도 가장 높게 나타났으며, 대조구에서 뿌리길이 가장 짧고 중량도 낮게 나타났다. 토양산도가 높은 경우 식물생장에 필요한 양이온(Na, K, Ca, Mg)을 용탈시키고, 근부의 성장을 억제시켜 식물의 뿌리생장을 저해하기 때문이다(Wilkins, 1978).

처리2구의 경우 중화처리기법을 적용한 처리

1구, 처리3구와 비교해 자귀나무, 낭아초, 벌노랑이, 패랭이꽃, 금계국은 측근의 길이가 가장 짧고 톨웨스큐는 가장 길게 나타났는데, 이는 중화층 및 식생층에 배합된 시멘트의 영향에 기인된 결과로 판단된다.

목본류 자귀나무, 낭아초의 뿌리길이(주근, 측근)와 중량은 처리3구에서 가장 길고, 높게 나타났으며, 대조구에서 가장 짧고 낮게 나타났다. 초본류 벌노랑이, 패랭이꽃, 금계국 또한 대조구에서 가장 짧고 낮게 나타났고 처리3구, 처리2구, 처리1구 순으로 길고, 높게 나타났다. 이는 산성토양의 경우 식물 유해금속인 Al, Mn 등을 용출시켜 식물의 세근발생이나 신장 성장을 억제하였기 때문이다(Ulrich et al., 1980).

또한 코팅제만을 처리한 처리1구보다 코팅제와 중화제를 모두 처리한 처리2구와 처리3구가 우수했으며, 중화층에 시멘트를 배합한 처리2구보다 석회고토를 배합한 처리3구가 뿌리생육이 우수한 것을 알 수 있었다. 반면, 톨웨스큐의 뿌리길이(주근, 측근)와 중량은 처리2구에서 가장 길고 높게 나타났는데, 이는 조성초기 표면경도가 높아 발아세가 높은 톨웨스큐가 우점한 데에 기인된 결과로 판단된다.

이런 결과로 미루어 보아 식물뿌리는 토양산도(pH)의 영향을 크게 받는 것으로 보이며, 코팅제만을 처리한 시험구보다 코팅제와 중화제를 모두 처리한 시험구에서 뿌리생육이 좋았고, 시멘트보다 석회고토를 처리한 시험구에서 뿌리생육이 가장 좋은 것으로 확인되었다.

IV. 결 론

본 연구는 특이산성토의 중화처리방법에 따른 생태적 녹화 방안을 알아보고자 4개 시험구 [대조구, 처리1구 : 코팅제(K_2HPO_4) 및 중화층 $[(Ca, Mg)CO_3]$, 처리2구 : 코팅제(K_2HPO_4)+중화제($NaHCO_3$) 및 중화층(Cement), 처리3구 : 코팅제(K_2HPO_4)+중화제($NaHCO_3$) 및 중화층

$[(Ca, Mg)CO_3]$ 를 3반복으로 조성하고 토양의 물리·화학적 특성과 식물생육특성을 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 토양의 물리·화학적 특성

대상지의 공시토양은 토양산도(pH) 3.4, EC (dS/m) 8.97, 유기물함량 2.68% 등으로 양분도 많지 않고 강산성으로 식물발아 및 생육에 적합하지 않았다. 표면경도는 시멘트를 배합한 처리2구에서 초기 식물 생육에 장애를 받는 결과가 나타났으나 시간이 지나면서 식생의 뿌리신장에 어려움이 없는 것으로 나타나 시멘트를 배합하는 경우가 주의가 요구된다. 토양산도는 “대조구”의 경우 최종 pH 3.7로 강산성으로 나타났으며, “코팅제 및 중화층 처리구”는 최종 pH 6.5, “코팅제, 중화제 및 중화층(Cement)처리구”는 최종 pH 7.6, “코팅제, 중화제 및 중화층 $[(Ca, Mg)CO_3]$ 처리구”는 최종 pH 7.4로 코팅제, 중화제, 중화층 등을 처리한 시험구는 토양중화 효과가 큰 것으로 나타났다.

2) 식물생육특성

식생 피복율은 전반적으로 “코팅제, 중화제 및 중화층 $[(Ca, Mg)CO_3]$ ” 처리구에서 가장 높게 나타났고, 다음으로 “코팅제, 중화제 및 중화층(Cement)” 처리구에서 높게 나타났으며, 대조구에서 가장 낮게 나타나는 등 토양산도(pH)에 따른 식생의 생육 차이가 발생했다. 산성배수 비탈면의 경우 코팅제, 중화제 및 중화층을 처리하는 기법이 식물생육에 효과가 있는 것을 알 수 있다.

초본류와 한지형잔디의 피복율은 전반적으로 “코팅제, 중화제 및 중화층 $[(Ca, Mg)CO_3]$ ” 처리구에서 벌노랑이, 금계국의 피복율이 높게 나타났고 “코팅제, 중화제 및 중화층(Cement)” 처리구에서 톨웨스큐의 피복율이 높게 나타나는 등 토양의 특성에 따른 식물생육의 영향이 큰 것으로 보인다.

식물 뿌리는 목본류 자귀나무와 낙엽활엽수의 경우 전반적으로 “코팅제, 중화제 및 중화층[Ca, Mg]CO₃]” 처리구에서 뿌리길이(주근, 측근)가 가장 길고 중량도 가장 높았고, 대조구에서 뿌리길이(주근, 측근)가 가장 짧고 중량도 가장 낮았으며, “코팅제, 중화제 및 중화층(Cecment)” 처리구와 “코팅제 및 중화층” 처리구 순으로 토양의 특성에 따른 차이가 있었다. 초본류 벌노랑이, 패랭이꽃, 금계국의 뿌리길이(주근, 측근)와 중량은 대조구에서 가장 짧고 낮았으며, “코팅제, 중화제 및 중화층[Ca, Mg]CO₃]” 처리구, “코팅제, 중화제 및 중화층(Cecment)” 처리구, “코팅제 및 중화층” 처리구 순으로 길고 높게 나타나는 등 식물뿌리는 토양산도(pH)의 영향을 많이 받은 것으로 보인다. 황화광물의 코팅 및 산성배수 중화로 인해 식물의 지상부와 지하부 모두 생장에 영향을 받지만 토양의 직접적인 영향을 받는 뿌리부에서 효과가 더 큰 것으로 산성배수 비탈면의 생태적 복원을 위해 코팅, 중화 및 중화층을 처리하는 방법이 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 성토 비탈면에 국한된 것으로 토질에 따른 다른 결과가 나타날 수 있는 한계가 있으며, 앞으로 본 연구의 결과가 보편화된 자료가 되기 위해서는 토질별 실험과 코팅제, 중화제, 중화층에 혼합된 조성물질의 배합비를 세분화하여 보완한 후속연구가 이루어져야 할 것이다.

References

- Association of Official Seed Analysts, Meeting. 1956. Proceedings of the Association of Official Seed Analysts. The Association : 1-112.
- Hinwood A · Horwitz P · Appleyard S · Barton C and Wajrak M. 2006. Acid Sulphate Soil Disturbance and Metals in Groundwater : Implications for Human Exposure Through Home Grown Produce. Environmental Pollution. 143(1) : 100-105.
- Jang CH and Kim MS. 2006. Chemistry of Strong Acidic Soil on Ulsan-Jungiadong Cut-Slope Affecting Seed Germination. J. Korean Env. Res. Tech. 9(6) : 133-142. (in Korea with English summary)
- Kalin M · Wheeler WN and Olaveson MM. 2006. Response of Phytoplankton to Ecological Engineering Remediation of a Canadian Shield Lake Affected by Acid Mine Drainage. Ecological Engineering. 28 : 296-310.
- Kim JG. 2007. Acid Drainage and Damage Reduction Strategy in Construction Site : An Introduction. J. Korean. Eco. Env. Geo. 50 : 651-660. (in Korea with English summary)
- Kim JG · Lee JS and Kim TG. 2008. Assessment of Acid Rock Drainage Production Potential and Damage Reduction Strategy : A Case Study of Tunnel Construction Area. J. Econ. Environ. Gel. 41(3): 335-344. (in Korea with English summary)
- Kim JH and Shim SR. 2009. A Vegetation Characteristics of a Cut-Slope Affected by Seeding Periods of the Winter Season. J. Korean Env. Res. Tech. 12(2) : 29-39. (in Korea with English summary)
- Kim JH and Shim SR. 2010. A Study on the Growth Characteristics of Native Plants by Seeding Amount of Cool-season Turfgrasses on the Disturbed Slope. J. Korean Env. Res. Tech. 12(5) : 1-12. (in Korea with English summary)
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGAM). 2017. Technology Development for Damage Reduction and Ecosystem Restoration in Acid Drainage

- Producing Construction Site. 5-83. (in Korean)
- Koryak M · Shapiro MA and Sykora JL. 1972. Riffle Zoobenthos in Streams Receiving Acid Mine Drainage. *Water Research*. 6 : 1239-1274.
- Lee JS · Kim JG · Park JS · Chon CM and Nam IH. 2013. Assessment and Damage Reduction Strategy of Acid Rock Drainage in Highway Construction Site: ○○ Highway Construction Site. *J. Korean. Econ. Environ. Geol.* 46(5) : 411-424. (in Korea with English summary)
- Matlock MM · Howerton BS and Atwood DA. 2003. Covalent Coating of Coal Refuse to Inhibit leaching. *Advances in Environmental Research*. 7 : 495-501.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. 2009. Design and Construction Guidelines for Road Slope Reconstruction Work. 34-80. (in Korean)
- Nordstrom DK · Hossner LR · Kittrick JA and Fanning DF. 1982. Aqueous Pyrite Oxidation and the Subsequently Formation of Secondary Minerals. *Acid Sulphate Weathering*. SSSA. Madison. WI. 37-56.
- SAS Institute Inc. 2013. The SAS system for window Release 9.1
- Shim, SR · Jeong DY and Ahn BJ. 2004. Effects of Cool-Season Turfgrass Overseeding onto Zoysiagrass. *J. Korean Env. Res. Tech.* 7(5) : 85-93. (in Korea with English summary)
- Smith RAH and Bradshaw AD. 1979. The Use of Metal Tolerant Plant Populations for the Reclamation of Metalliferous Wastes. *Journal of Applied Ecology*. 16 : 595-612.
- Stum W and Morgan JJ. 1995. Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters, 3th edition. *Aquatic Chemistry*. John Wiley and Sons Inc. New York.
- Ulrich B · Mayer R and Khnaan PK. 1980. Chemical Changes Due to Acid Precipitation in a loss Derived Soil in Central Europe. *J. Soil Science*. 130(4) : 193-199.
- Wilkins, DA. 1978. The Measurement of Tolerance to Edaphic Factors by Means of Root Growth. *New Phytologist*. 80 : 623-633.
- Yun HS · Gee ED · Ji MK · Lee WR · Yang J S · Park YT · Kwon HH · Ji WH · Kim K J · Jeon BH and Choi JY. 2011. Developing for Reduction Technology of AMD through Coating on the Surface of Pyrite Using Minerals. *J. Korean Geo. Env. Soc.* 12(2) : 15-22. (in Korea with English summary)