한국토목섬유학회논문집 제14권 4호 2015년 12월 pp. 79 ~ 86
J. Korean Geosynthetics Society Vol.14 No.4 December. 2015 pp. 79 ~ 86

DOI: http://dx.doi.org/10.12814/jkgss.2015.14.4.079
ISSN: 1975-2423(Print) ISSN: 2287-9528(Online)

라이시미터를 이용한 중화처리된 산성화경사지의 계절별 pH 용탈특성 평가

The Assessment of pH Variation for Neutralized Acidic Areas using Lysimeters by Seasons

오승진[1], 오민아[1], 박찬오[2], 정문호[3], 이재영[4]*
Seungjin Oh[1], Minah Oh[1], Chan-O Park[2], Munho Jung[3], Jai-Young Lee[4]*

[1]*Member, Graduate Student, Dept. of Environmental Engineering, The University of Seoul, 163, Seoulsiripdae-Ro, Dongdaemun-gu, Seoul, 02504, Republic of Korea*
[2]*Deputy Manager, Environmental Technical Instuitute, Korea Resource Corporation, 199, Hyeosin-ro, Wonju-si, Gangwon-do 26464, Republic of Korea*
[3]*Assistant manager, Mine Reclamation and Technology Center, Korea Mine Reclamation Corporation, 2, Segye-ro, Wonju-si, Gangwon-do 26464, Republic of Korea*
[4]*Member, Professor, Dept. of Environmental Engineering, The University of Seoul, 163, Seoulsiripdae-Ro, Dongdaemun-gu, Seoul, 02504, Republic of Korea*

ABSTRACT

Korean territories has formed about 70% of mountainous areas that have acidified serious level to average pH 4-5. There are a number of abandoned metal mines about 1,000 in Korea. However, mine tailings and waste rock included heavy metals are exposed to long-term environment without prevention facility or treatment system. Thus, ongoing management and monitoring of soil environment are required. Most of abandoned mine scattered in forest areas of slopes. Soil erosion due to continuous rainfall in the slopy areas can cause the secondary pollution by the influence eutrophication of water system and the productivity loss of the plant. Therefore, this study would like to estimate pH leaching rate by artificial rainfall using waste neutralization-agent in lysimeter. Moreover, the potentially of secondary pollution related to precipitation is figured out through the experiments, and the optimal planting methods would examinate after neutralizing treatment in soil. Experiments composed three kinds of lysimeter; lysimeter 1 had filled only acidic soil, lysimeter 2 had neutralized soil, and lysimeter 3 had planting plants after neutralized soil. In the results, lysimeter 2 showed the lowest pH leaching, and there is not specific relativity with pH leaching of the seasonal characteristics.

요 지

우리나라의 지형은 약 70% 이상이 산악지역으로 형성되어 있으며 평균 pH는 4 ~ 5로 산성화 정도가 심각한 수준이다. 현재 국내에는 약 1,000여개의 휴·폐광된 많은 금속광산이 오염 방지시설이나 처리시설이 갖춰지지 않은 채 중금속을 함유한 광미나 폐석이 장기간 환경 중에 노출되어 왔으며, 지속적인 관리 및 환경오염에 대한 모니터링이 미흡한 실정이다. 대부분의 휴·폐광산은 산림지역에 밀집하여 있어 경사지면으로 이루어진 곳이 많다. 경사지에서의 강우에 의한 토양유실은 작물의 생산성과 함께 수계의 부영양화 등에도 영향을 미치며 이로 인한 2차 오염원으로 발전할 수 있어 심각한 수준의 환경문제를 야기할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 산성화경사지와 유사한 조건의 라이시미터를 조성하고 과거 기 수행된 연구의 산출물인 폐자원을 활용한 중화제를 이용하여 중화처리를 실시한 후, 계절별 특성에 따라 인공강우를 살포하여 토양과 유출수의 pH 용탈에 따른 2차 환경오염 여부를 가늠하고 중화처리 후 식물식재 방안을 모색하고자 한다. 실험은 산성토양만을 충진한 대조군과 중화처리를 실시한 실험구 1, 중화처리 후 식물식재를 조성한 실험구 2로 구성하였다. 실험결과, 모든 계절에서 중화처리를 실시한 실험구 1, 2가 낮은 pH 용탈결과를 나타내었으며, 특히 실험구 2에서는 pH 용탈률이 가장 낮은 것으로 나타났다. 강우강도와 강우빈도 등 계절별 특성에 따른 pH 용탈은 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

Keywords **:** Soil neutralization, Lysimeter, Season, pH leaching

Received *30 Sep. 2015,* ***Revised*** *17 Nov. 2015,* ***Accepted*** *19 Nov. 2015*

****Corresponding author***
Tel: +82-2-6490-2864; Fax: +82-2-6490-2859
E-mail address: leejy@uos.ac.kr (J. Y. Lee)

1. 서 론

우리나라에서는 1970년대 이전에 폐광된 금속광산지역에 산재한 광미, 갱내수, 폐석 등으로 주변 농경지와 하천에 오염 등 환경문제가 지속적으로 대두되고 있다(Yang et al., 2007). 현재 국내에는 약 1,000여가의 휴·폐광된 많은 금속광산이 오염방지시설이나 처리시설이 갖춰지지 않은 채 중금속을 함유한 광미나 폐석이 장기간 환경 중에 노출되어 왔으며, 최근 일부 폐광산의 경우 광미 유실 방지 등 기초적인 광해 방지 사업이 이루어지고 있으나 지속적인 관리 및 환경오염에 대한 모니터링이 미흡한 실정이다(Park et al., 2001: Sharpley and Halvorson, 1994). 특히, 이러한 휴·폐광산 주변 토양은 갱도와 채굴갱내로 유입되는 산소와 물에 의한 광상의 산화로 pH 4 이하의 강한 산성을 띄는게 일반적이다(Zhang et al., 2004; Lim et al., 2004). 토양의 산성화는 농작물의 생산성이 급격히 감소되며, 경작 가능한 농작물의 수도 극히 제한된다. 산성토양에서는 토양 속에 들어있는 NH_4, K, Ca, Mg 등의 주요 영양원소들과 Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B, Si, Na, Co 등의 미량원소들의 용탈이 심해져 영양결핍이 일어나기 쉽다(Ok et al., 2002). 우리나라 토양이 산성화되는 가장 큰 요인으로는 조암광물의 풍화작용, 과도한 화학비료의 사용, 광범위하게 확산되는 산성비 등이 원인이다. 우리나라 대부분의 휴·폐광산은 산림지역에 밀집하여 있으므로 경사지면으로 이루어진 곳이 많다. 이러한 경사지에서는 강우에 의한 토양유실로 인해 토양침식이 발생하고, 낮은 pH의 용탈로 인하여 수계에도 악영향을 미치므로 적절한 관리가 요구된다. 특히, 경사도가 30°를 초과하는 급경사지의 경우 여름철 집중 강우시 토양유실로 인한 지력손실(Ok et al., 2005; Ok et al., 2002)과 토양 내 유해물질의 용출에 따른 2차 환경오염문제를 야기시킨다(Choi et al., 2000; Pimentel et al., 1995). 특히 토양유실은 입단의 안정성 저하 및 분산탈리를 초래하고 그 결과 표토의 자갈 및 모래의 함량이 높아져 토양 물리성의 저해 및 강우에 의한 유실을 가속화시킨다(Choi et al., 2000). 이에 대한 대책으로 등고선 경작, 승수로 설치, 초생대 및 초지 조성, 녹비작물 재배, 부초 설치 등 다양한 식물을 이용한 토양피복 및 토양 물리성 개선, 지형특성을 고려한 저감방안 등이 제시되고 있는 실정이다(Myers, 1993; Clark et al., 1985).

따라서, 본 연구에서는 실제 산성화경사지와 유사한 조건으로 한 라이시미터를 조성하고 과거 기 수행된 연구의 산출물인 폐자원을 활용한 중화제를 이용하여(Oh et al., 2012) 중화처리를 실시한 후, 계절별 특성에 따라 인공강우를 살포하여 토양과 유출수의 pH 변화를 파악하여 pH 용탈에 따른 2차 환경오염 여부를 가늠하고 추후 중화처리 후 식물식재 방안을 모색하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험재료

토양은 부산광역시 기장군에 위치한 'S'광산 부근에서 토양을 채취하였다. 본 연구에서 사용된 중화제는 (Oh et al., 2012)에서 연구된 중화제를 사용하였다. 자세한 토양 및 중화제의 특성은 Table 1에 나타내었다.

2.2 라이시미터 개요

본 연구에서 사용한 라이시미터는 실제 광산현장의 경사지와 유사한 실험조건을 구현하기 위하여 경사각을 조절할 수 있도록 제작하였다. 라이시미터는 크게 1m × 2m

Table 1. The result of pysico-chemical characteristics for soil and waste materials

List		Soil	Neutralizing-agent
pH	Active	4.17 ± 0.02	6.61 ± 0.04
	Potential	2.82 ± 0.003	5.74 ± 0.04
EC(Eletric Conductivity) (dS/m)		2.61 ± 0.09	3.81 ± 0.02
CEC(Cation Exchange Capacity) (cmol/kg)		0.40 ± 0.02	21.76 ± 0.15
Soil texture		loamy sand	
Alkalimetals (cmol/kg)	Na^+	0.01	0.25 ± 0.01
	Mg^{2+}	0.03	0.07 ± 0.01
	K^+	N.D	0.05 ± 0.01
	Ca^{2+}	0.36	22.13 ± 0.13

크기의 토양충진부와 그 하단에 1m × 0.3m 크기의 유출수 포집부로 구분하여 제작하였다. 토양충진부에는 토양과 유출수 포집의 경계를 주기 위하여 약 0.2m 하단지점에 철재를 이용한 분리망을 설치하였다. 분리망 위로는 토양과 유출수가 서로 분리되도록 1m × 2m 사이즈의 200 mesh 체거름망을 설치하여 유출수에는 토양입자가 침투하는 것을 최소화 하였다. 유출수 포집부는 정면에서 보기에는 한 구조로 되어있으나 실제 토양충진층에서 토양과 함께 유실되는 유출수와 분리망을 통과한 순수 유출수를 구분하기 위하여 상단과 하단을 20cm와 5cm 간격으로 나누었다. 경사를 유지할 수 있도록 지랫대 원리를 이용하여 가운데 축을 기준으로 경사각을 조절할 수 있도록 설계되었으며, 재질이 단단한 철재를 이용하여 제작하였다. 본 연구에 사용한 라이시미터의 사진은 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1. Lysimeter

2.1.1 라이시미터 조성

실제 광산에 산재하여 있는 경사면은 지점에 따라 상이하지만 대체로 32~44°의 급경사를 이루고 있다(Oh et al., 2012). 따라서, 본 연구에서는 실제 현장보다 가혹한 경사각인 45°로 설정하였다. 라이시미터는 총 3개의 실험구로 조성하였다. 먼저 대조군(Control)은 산성토양만 충진하고, 나머지 두 실험구는 토양과 중화제를 배합한 실험구 1(Lysimeter 1)과 토양과 중화제를 배합한 후 그 위로 식물을 식재한 실험구 2(Lysimeter 2)로 조성하였다. 완성된 실험구의 모습은 Fig. 2와 같다.

2.1.2 라이시미터 운용

계절별 특성에 따른 강우조건을 설정하기 위하여 각 실험구에는 스프링클러를 설치하였다. 토양충진부에 골고루 살포되도록 교차적으로 설치한 후, 최초 유입호스에 유량계를 설치하여 유량을 조절함으로써 강우강도를 재현토록 하였다. 라이시미터에 스프링클러를 고정시키기 위하여 양쪽 벽에 지주대를 설치하여 그 위로 호스를 거치하였고, 지주대의 간격은 40cm에 총 3열로 이루어지며, 실험구당 10개의 스프링클러를 설치하였다(Fig. 3).

Fig. 2. The experiment appearance for Lysimeter

Fig. 3. Sprinkler and spray pump in Lysimeter

Table 2. The operation condition of Lysimeter

Conditions	Winter	Spring	Summer	Fall
Flow (mm/hr)	30	48	106	48
Time (min)	72	68	69	68
Frequency (times)	3	4	3	4
Angles(°)	45			
Soil weight (ton)	0.5 ton * (Volume (0.4) × soil bulk density (1.25)) ※ Netralization agent mixed 2 % (10 kg) in Lysimeter 1, 2			
Durations (day)	30	45	45	20

계절별 강우조건은 기상청 통계자료를 근간으로 최근 10년간 부산·경남 지역 강우강도 및 강우빈도로 설정하였다. 라이시미터 운용기간은 계절에 따른 강우강도 및 강우빈도가 다름을 고려하여 조건을 달리하였다. 다만, 가을철 라이시미터의 운용은 타 계절과는 달리 모든 라이시미터의 실험구를 중화처리한 후 경사도를 상이하게 설정하여 경사각에 따른 pH 용탈특성을 파악하였다. 구체적인 운용조건은 Table 2에 나타내었다.

토양 및 유출수에 대한 대조군과 실험구 1, 2의 중화제가 강우와 함께 유출수로 용탈되는지를 알아보기 위하여 pH 및 EC를 측정하였다. 토양시료는 분취 후 토양오염공정시험기준에 의거하여 Multi-meter(Neomet PDC-700L Multimeter, Istek, Korea)를 이용하여 측정하였으며, 유출수 시료는 현장에서 Portable-meter(Orion 3-star Multimeter, Thermo, USA)를 이용하여 즉시 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 겨울철 pH 용탈 특성

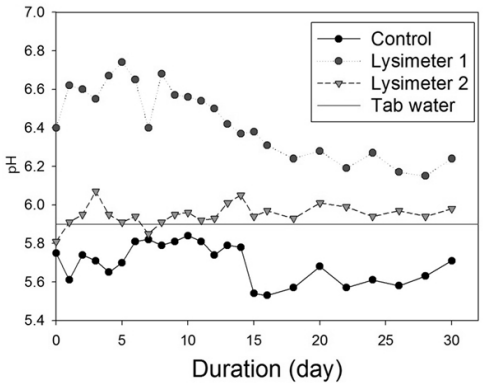
유출수에 대한 분석결과, 대조군은 수돗물 pH 보다 낮은 값을 나타내었는데 특히 15일 이후 더 저감되는 경향을 보였다. 이는 산성토양만 충진되어 있어 강우에 의해 발생하는 유출수가 토양과 반응하면서 약산성화 된 것으로 사료된다. 반면 실험구 1, 2는 수돗물의 pH 보다 높은 값을 나타내었다. 특히, 실험구 2의 경우 실험초반 pH 6.8 까지 상승하다가 후반에는 다시 안정화되어 6.2까지 내려가는 것으로 나타났다. 이는 중화제 배합 후 산성토양과 중화제가 제대로 입단화 되지 않아 모니터링 초반 강우에 의해 유출수로 다량 함유되어 높은 pH 변화를 나타내었지만 시간이 경과하고 토양 표면에 중화제의 주된 기반은 Ca 등이 입단형성을 시작하면서 점차 유출수의 pH가 낮아지는 것으로 판단된다(Ryu, 2013; Choi et al., 2009). 10일 간격으로 채취한 토양 pH 경우, 대조군은 큰 변화가 없었으며 실험구 1, 2는 pH 5.5~6.0을 상회하는 것으로 나타났다. 유출수의 전기전도도의 경우, 대조군은 수돗물과 비슷한 값을 나타내어 안정적인 반면 실험구 1, 2는 중화제의 영향으로 4~5 dS/m를 범위로 나타났으며 시간경과에도 특별한 영향은 없는 것으로 나타났다. 토양의 전기전도도 결과는 앞서 pH의 결과값과 비슷한 양상을 나타내어 시간경과에 따른 변화는 나타나지 않았다(Fig. 4).

3.2 봄철 pH 용탈 특성

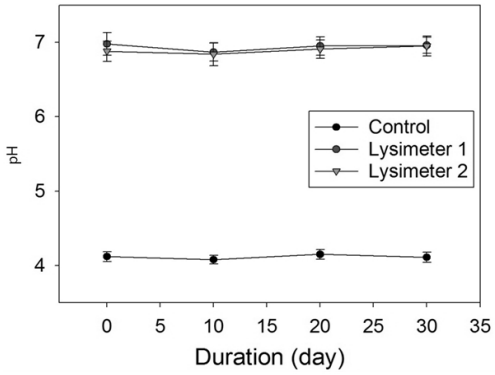
대조군은 중화제의 혼입이 없어 강우와 토양이 접촉하면서 유출수의 약산성화 현상이 나타났다. 실험구 1의 경우 겨울철 실험결과와는 달리 실험초기부터 20일까지 지속적인 용탈을 나타내어 pH가 6.8까지 증가하였다. 이는 겨울철보다 약 50% 증가한 강우강도의 영향과 함께 얼어있던 토양수분이 해빙되면서 강우와 함께 중화제가 쓸려내려가며 급격한 pH 증가현상이 나타난 것으로 해석된다(Choi et al., 1998). 반면 20일이 지난 시점부터 실험종료까지 pH가 약 6.0 부근까지 감소하였는데 중화제에 의한 토양경단화가 형성된 결과로 판단된다. 반면 실험구 2의 pH는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 식물식재에 따른 토양침식 방지 효과로 중화제의 용탈이 감소한 것으로 판단된다. 토양 pH는 시간경과에 따른 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 유출수의 전기전도도는 앞서 겨울철 전기전도도와 유사한 경향을 나타내었다(Fig. 5).

3.3 여름철 pH 용탈 특성

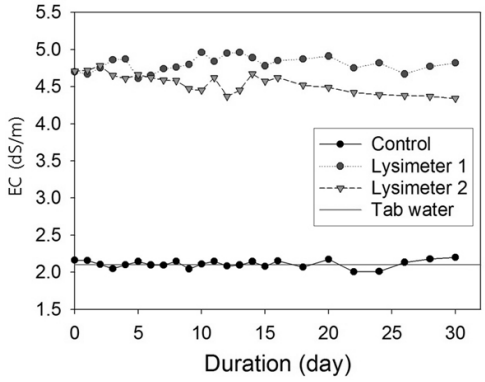
여름철 유출수의 pH 변화는 실험구 1과 2의 pH 용탈량이 극명한 차이를 나타내었다. 실험 초기부터 실험구 1은



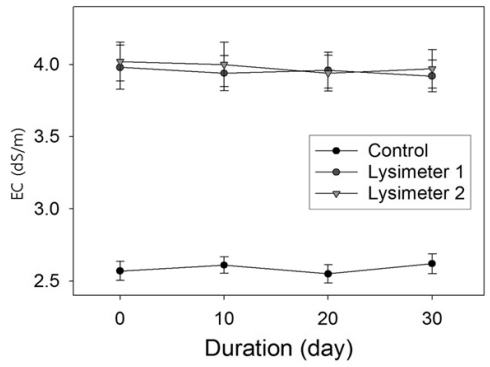
(a) effluent pH



(b) soil pH

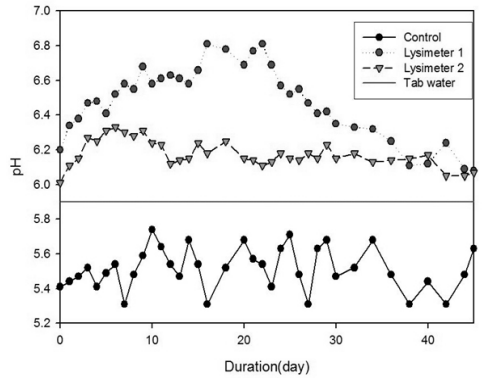


(c) effluent EC

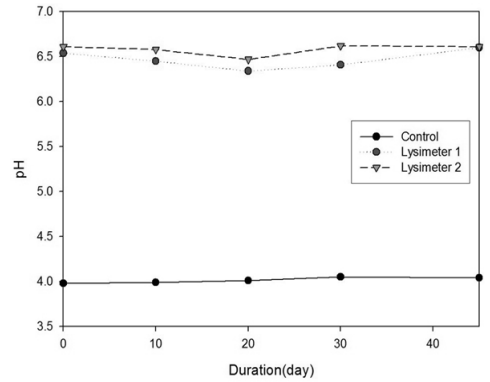


(d) soil EC

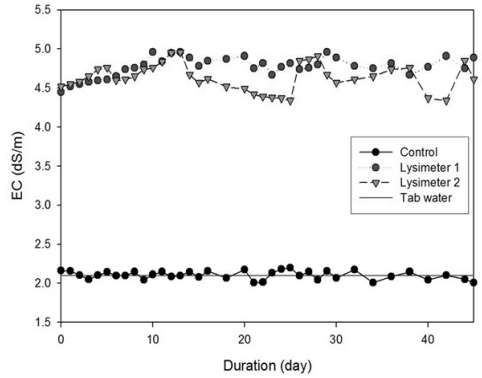
Fig. 4. The characteristics of pH and EC leaching for winter season



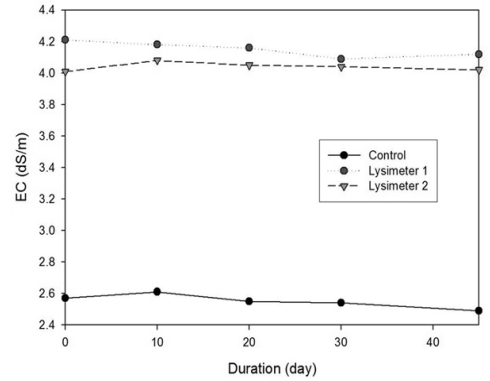
(a) effluent pH



(b) soil pH

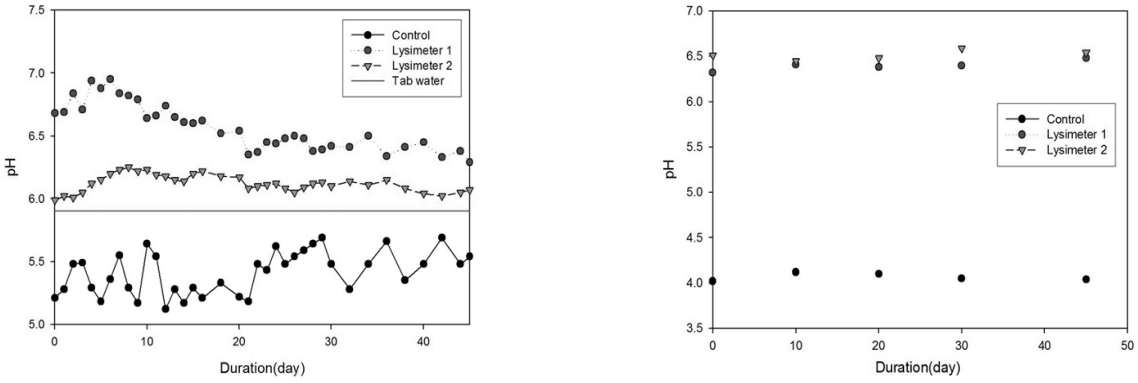


(c) effluent EC

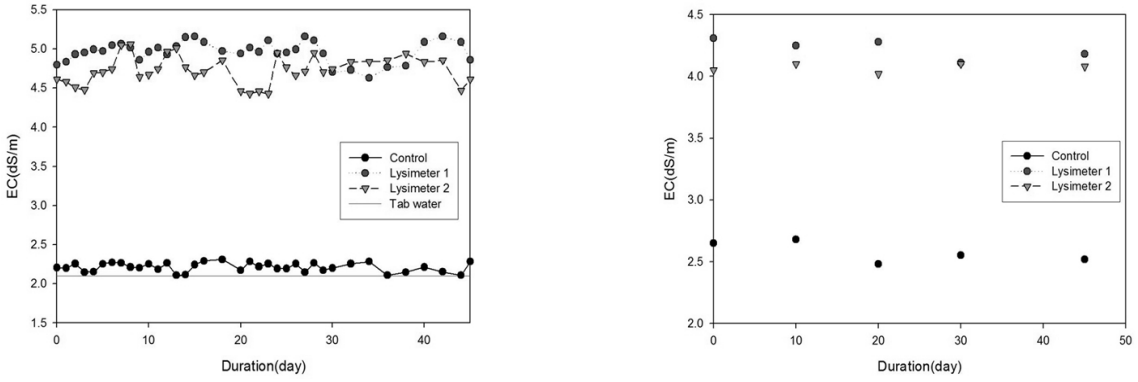


(d) soil EC

Fig. 5. The characteristics of pH and EC leaching for spring season



(a) effluent pH (b) soil pH



(a) effluent EC (b) soil EC

Fig. 6. The characteristics of pH and EC leaching for summer season

pH 6.5를 상회하면서 용탈이 진행되었으나 점차 용탈량이 감소하는 것으로 나타났다. 여름철 기후특성을 고려하여 매우 높은 강우강도 및 빈도에 따라 많은 양의 pH가 용탈할 것으로 예상하였으나 겨울철 및 봄철과 비슷한 양상을 나타내었다. 따라서 토양과 중화제 간의 Ca 입단형성이 pH 용탈의 가장 큰 영향으로 사료되며 강우조건과는 큰 상관관계가 없는 것으로 판단된다(Choi et al., 2010).

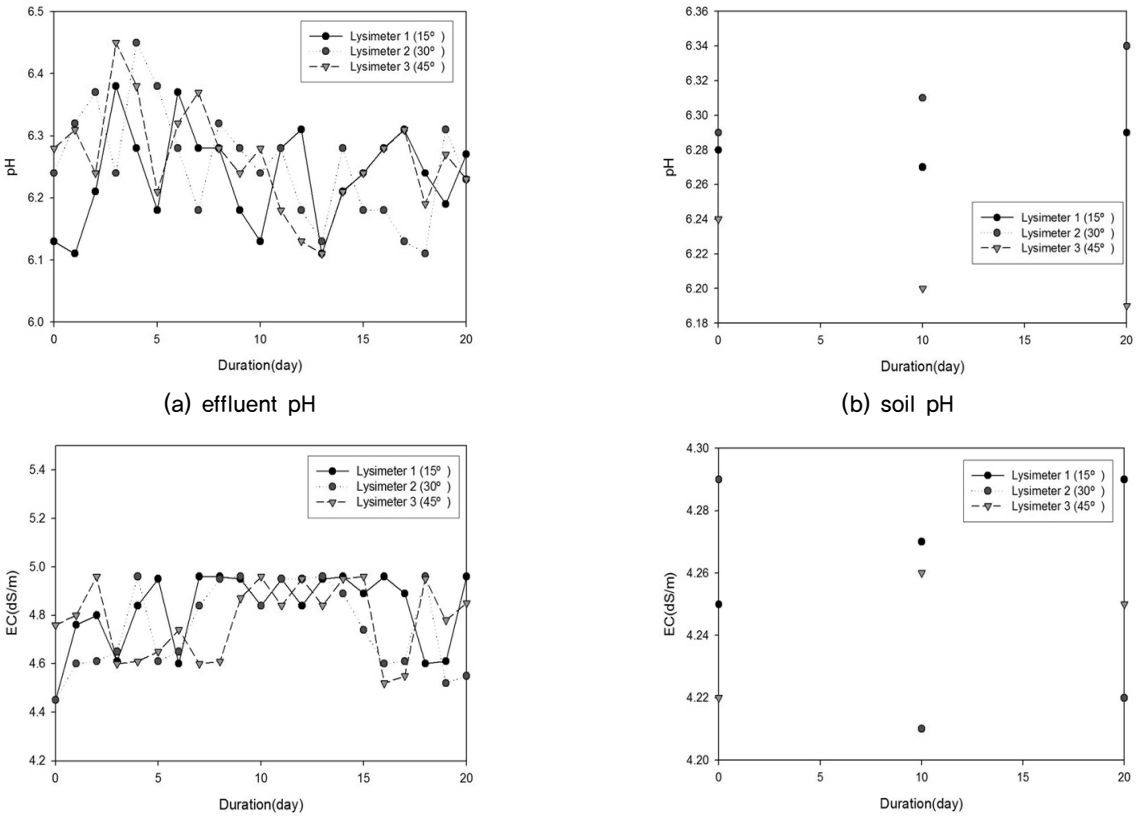
반면, 실험구 2의 경우에는 실험초반부터 pH 6.0을 유지하면서 시간이 지날수록 점차 용탈량이 증가하였으나 최종 pH는 약 6.1을 나타내어 매우 적은 용탈률을 나타내었다. 이는 식물식재를 통한 토양 침식 방지효과로 예상하며 여름철의 경우에는 봄철보다 식물의 생장이 무성하였고, 이 뿐 아니라 다른 식물종의 이입(잡초 등)으로 인하여 식물식재상태가 봄철보다 양호한 결과로 사료된다. 기존 문헌을 고찰한 결과, 추후 실험에서는 중화처리 후 토양 pH 범위에 따른 적합한 식물을 고려할 때, 초본류로는 알팔파와 전동싸리, 아스파라거스 등의 식물을, 나무 및 관목류로는 호두나무, 오리나무, 유칼립투스 등의 식종을 식재해야 할 것으로 사료된다(Nyle and Ray, 2010). 토양 pH는 다른 계절과 비교하였을 시 큰 변화는 없이 일정한 것으로 나타났다. 전기전도도 값은 앞서 다른 계절 실험결과들과 비슷한 양상을 나타났다(Fig. 6).

3.4 가을철 pH 용탈 특성

가을철 라이시미터 운용은 앞서 진행된 겨울, 봄, 여름철 pH 용탈 특성 결과를 토대로 계절별 특성(강우강도, 강우빈도, 기온 등)에 따른 pH 용탈 변화추이가 큰 영향이 없는 것으로 판단하여 계절별 특성이 아닌 경사지면의 경사도에 따른 pH 용탈 특성을 파악하였다. 실험결과, 유출수의 pH는 모든 실험구에서 큰 차이가 나타나지 않았다. 전기전도도 역시 경사도에 따른 변화추이는 나타나지 않았다(Fig. 7).

4. 결 론

(1) 계절별 라이시미터를 이용한 pH 용탈 변화는 급격한 경사와 계절별 특성(강우강도, 강우빈도, 기온 등)에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 모니터링 초기, 토양과 중화매질 간의 입단화가 제대로 형성되지



(a) effluent pH (b) soil pH

(a) effluent EC (b) soil EC

Fig. 7. The characteristics of pH and EC leaching for fall season

않아 유출수의 pH가 다소 높은 결과를 가져왔지만, 모니터링 중반 이후에는 점차 안정화 되었다.

(2) 토양과 중화매질간의 입단화 형성은 중화매질의 주요 성분인 CaO성분과 인공강우에 의해 수분과 결합하면서 토양 표면을 고형화시킨다. 따라서 본 실험에서도 실험초기 유출수에 의해 미처 토양과 결합하지 못하고 유출된 중화매질에 의해 토양 pH가 증가한 것으로 사료된다.

(3) 본 연구는 계절적 특성에 따른 중화처리된 토양의 pH 용탈변화를 살펴본 실험으로 모니터링 기간이 30~45일 가량으로 비교적 단기 모니터링에 해당된다. 따라서 좀더 구체적인 중화제 용탈 특성을 파악하기 위해서는 라이시미터의 규모를 확대하고 모니터링 기간을 100일 이상으로 하는 중장기적 모니터링이 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This research has been maintain with project “Development of acid soil neutralization and amelioration technology” from Korea Mine Reclamation Corporation.

References

1. Choi, B.-S., Lim, E.-J., Choi, Y.-B., Choi, J.-D., Joo, J.-H., Yang, J.-U. and Ok, Y.-S. (2009), “Applicability of PAM (Polyacrylamide) in Soil Erosion Prevention: Rainfall Simulation Experiments”, Korean Journal of Environmental Agriculture, Vol.28, No.3, pp.249-257
2. Choi, J.-D., Lee, C.-M. and Kim, D.-H. (1998), “Groundwater and small stream Water Quality Changes of Rural Wastersheds in Kangwon-do”, Proc. of the Fall Conference on Korean Society of Agricultural Engineers, Korea, pp.558-564.
3. Choi, J.-D., Park, J.-S., Kim, J.-J., Yang, J.-U., Jung, Y.-S., and Yun, S.-Y. (2000), “Soil Quality Assessment for Environmentally Sound Agriculture in the Mountainous Soils -Analysis of Sediment Data and Suggestion of Best Management Practices-”, Korean Journal of Environmental Agriculture, Vol.19, No.3, pp.201-205.
4. Choi, Y.-B., Choi, B.-S., Kim, S.-W., Lee, S.-S. and Ok, Y.-S. (2010), “Effects of Polyacrylamide and Biopolymer on Soil Erosion and Crop Productivity in Sloping Uplands: A Field Experiment”, Korean Society of Environmental Engineers, Vol.32, No.11, pp.1024-1029.

5. Clark, E. H., Haverkamp, J. A. and Chapman, W. (1985), Eroding soils: the off-farm impacts, Conservation Foundation, Washington, DC, USA.
6. Lim, S.-M., Lee, D.-H. and Park, B.-Y. (2004), “Correlations between Soil Acidification and Leaching of Inorganic Salts”, J. Korean Soc. Hygienic Sciences, Vol.10, No.2, pp.125-135.
7. Myers, N., (1993), Gaia: An Atlas of Planet Management, Anchor/ Doubleday, Garden City, NY, USA.
8. Nyle C. B. and Ray R. W. (2010), Element of THE NATURE AND PROPERTIES OF SOILS, Third Edition, Practice Hall, pp.328.
9. Oh, S.-J., Cho, M.-H., Park, C.-O., Jung, M.-H. and Lee, J.-Y. (2012), “A Study on the Development of Soil Neutralizing-agent using Waste Materials (Waste-lime, Oyster, Bottom-ash)”, J. of Soil & Groundwater Env., Vol.17, No.6, pp.92-101.
10. Ok, Y.-S., Lim, S. and Kim, J.-G. (2002) “Electrochemical properties of soils: principles and applications”, Life Science and Natural Resources Research, Vol.10, pp.69-84.
11. Ok, Y.-S., Yang, J.-E., Park, Y.-H., Jung, Y.-S., Yoo, K.-Y. and Park, C.-S. (2005), Framework on soil quality indicator selection and assessment for the sustainable soil management, J. Environ. Policy, 4th edition, pp.69-87.
12. Park, B.-Y., Uh, Y.-W., Yang, S.-Y., Jang, S.-M., Kim, J.-H. and Lee, D.-H. (2001), “A Study on the Acidification of Soils”, J. of the Korean Environmental Sciences Society, Vol.10, No.4, pp.305-310.
13. Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R. and Blair, R. (1995), “Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits,” Sci., Vol.267, pp. 1117-1123.
14. Ryu, J.-S. (2013), Characteristics of soil loss and environmental load in slope upland of highland with different rainfall condition, Ph.D Thesis, Chungnam National University, Daejon, Korea.
15. Sharpley, A. N. and Halvorson, A. D. (1994). “The Management of Soil Phosphorous availability and its Impact on Surface Water Quality In R. Lal and B. A. Steward (eds.)”, Soil Processes and Water Quality (part of the series, Advance in Soil Science). Boca Raton, FL: Lewis publishers.
16. Yang, J.-U., Ok, Y.-S. and Park, Y.-H. (2007), “Ecology engineering forest restoration for mine damage area”, Mine reclamation Technique, Vol.1, No.1, pp.67-75.
17. Zhang, S., Wang, S., Shan, X.-Q, and Mu, H. (2004), “Influence of lignin from paper mill sludge on soil properties and metal accumulation in wheat”, Biology and Fertility of Soils, Vol. 40, No.4, pp.237-242.