

급경사 복원 농경지 토양 유실 저감을 위한 개량제 효율 및 현장 적용성 평가

Evaluation of Amending Materials to Reduce Soil Loss from Sloping Remediated Agricultural Land

황원재¹ · 박민석¹ · 현승훈^{1*} · 지원현² · 이상환²

¹고려대학교 환경생태공학과, ²한국광해관리공단

Wonjae Hwang¹, Minseok Park¹, Seunghun Hyun^{1*}, Won hyun Ji² and Sang-Hwan Lee²

¹Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, 02841, South Korea

²Technology Research Center, Mine Reclamation Corporation, Wonju, 26464, South Korea

Received 18 September 2017, revised 20 September 2017, accepted 20 September 2017, published online 30 September 2017

ABSTRACT: Restoration of min-impacted arable land is often performed through stabilization of trace elements by amendment treatment combined with (clean) soil covering on the surface. Recently, soil loss problem from sloping remediated agricultural lands has risen as an emerging concern. In this study, efficacy of aggregation formation was assessed by single and binary treatments of four potential amendments (bentonite, lime, organic matter, and steel slag) applied on three cover soils having different clay contents (9.4, 14.7, and 21.2% for A, B, and C soils respectively). In results of single treatments, 5% organic matter for A soil and 5% lime for B and C soils were found most effective for the aggregation formation compared to the respective controls (without amendments). Among nine binary treatments, 3% organic matter + 1% lime for A soil and 1% organic matter + 3% lime for both B and C soils led to the highest formation of aggregation (30.4, 25.0, and 36.5% for A, B, and C soils). For a site-application, the soil erodibility difference between the cover soils (0.045, 0.051, and 0.054 for A, B, and C soils, respectively) and the national average of arable land (0.032) was assumed to be compensated by amendment addition, which is equivalent to 29.1% aggregation formation. To achieve the aggregation goal, 5% lime for A and B soils and 3% lime for C soil were best in the consideration of benefit/cost, thereby effectively and economically reducing soil loss from sloping remediation site. Soil alkalinity induced by lime treatment was not considered in this work.

KEYWORDS: Mine Reclamation, Soil Amendment, Soil Loss, Sloping Agricultural Land

요 약: 광산 활동에 의해 오염된 농경지의 복원은 개량제 처리와 복토를 기반의 미량원소 안정화 기법으로 진행되고 있다. 최근 복원된 부지 중 경사 농경지에서 토양 유실 문제가 대두되고 있다. 본 연구에서는 4종의 개량제 (벤토나이트, 석회, 유기물, 제강슬래그)를 다양한 비율로 단일 또는 복합처리 한 후 입단 형성의 효율을 평가했다. 복토제는 점토함량이 다른 3가지 토양 (A 토양=9.4%, B토양=14.7%, C 토양=21.2%)을 대상으로 했다. 단일처리 결과, A 토양은 유기물 5%, B와 C 토양은 석회 5%가 각 토양의 대조구에 비해 입단 형성이 가장 효과적이었다. 9가지 복합처리구 중에서 A 토양은 유기물 3% + 석회 1%, B와 C 토양은 유기물 1% + 석회 3% 처리구의 입단 형성이 가장 높았다 (A 토양=30.4%, B 토양=25.0%, C 토양=36.5%). 현장처리를 위해 각 복토제 (A 토양=0.045, B 토양=0.051, C 토양=0.054)와 국내 농경지의 평균 (0.032) 토양침식인자 차이만큼을 개량제에 의한 목표 입단 형성량으로 설정하였다 (29.1% 입단형성). 비용편익을 고려한 최적 개량제 선정 결과 A와 B 토양은 석회 3%, C 토양은 석회 5%가 가장 적합했으며, 이를 통한 경사진 복원된 경사 농경지에서 토양 유실을 효과적이고 경제적으로 저감할 것으로 예측된다. 본 연구에서 석회 처리에 의한 토양 알칼리도 상승은 고려하지 않았다.

핵심어: 광해 복원, 토양 개량제, 토양 유실, 급경사농경지

*Corresponding author: soilhyun@korea.ac.kr, ORCID 0000-0001-8806-5834

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

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. 서론

국내 금속광산은 1980년대 이후 대부분이 휴, 폐광된 상태로 전국에 2,000여 개가 산재되어 있으며, 광산 활동에 의해 발생된 폐광석 및 광미 등의 고형 광산폐기물들이 적절한 조치 없이 광산 부지 인근에 방치되어 있는 것으로 보고되어 있다. 결과적으로, 광산 하류에 위치한 농경지에서 광업 활동에서 유래된 금속성 원소(비소, 카드뮴 등)에 의한 오염이 발생되고 있다. 이러한 문제점으로 인해 한국광해관리공단에서는 2007년부터 광해방지사업을 시행하여 총 1,219개의 폐금속광산 및 647개소의 오염 농경지를 대상으로 토양개량 사업을 수행하였다 (MIRECO 2013). 현재 오염 농경지 토양개량 사업은 안정화제 처리를 병행한 복토 공법 기반으로 진행되는데, 최근 영월 이화광산, 제천 동아광산 등 경사도 15° 이상의 급경사 농경지에서 복원 후 강우에 의한 토양 유실이 발생되고 있다. 복원토양의 유실은 오염토양의 재노출과 토양입자유실에 의한 오염 확산 및 작물로의 전이 피해 등의 문제점이 발생했기 때문에 신속한 대책수립이 필요한 상황이다.

토양 유실 저감을 위해서는 토양의 입단 안정성 (aggregation stability)을 향상시키는 것이 가장 효과적인데, 높은 입단 안정성을 가지는 토양은 보수성 및 투수성이 높아 토양 유실량이 낮다고 알려져 있다 (Cantón et al. 2009). 토양 개량사업에서 입단 안정성을 증가시킬 수 있는 방법은 입단 촉진제를 혼합 처리하여 토양 입자 사이의 결합능력을 향상시키는 것이다 (Bronick and Lal 2005). 기존 여러 연구에서 제올라이트, 석회, 퇴비 등 다양한 물질을 이용해 입단 안정성 상승 및 토양 유실 저감 효과에 대한 연구가 진행되어왔다 (Baek et al. 2010; Doan et al. 2015; Wuddivira and Camps-Roach 2007). 또한 광해를 입은 농경지 토양개량 사업은 주로 폐광산 수계를 따라 조성된 광범위한 농경지를 대상으로 하기 때문에 개량제의 효율과 함께 처리 비용이 반드시 고려되어야 한다.

본 연구에서는 점토함량이 다른 복토재 (cover soil)로 이용되는 3가지 토양을 대상으로 유기물 (Organic Matter, OM), 석회 (Lime), 제강슬래그 (Steel Slag), 벤토나이트 (Bentonite) 개량제를 처리하고 입단 안정성 변화에 미치는 영향을 평가했다. 단일처리인 경우 1%, 3%, 5% 수준으로 개량제를 처리하였다. 복합처리인 경우 유기물 처리 (1%, 2%, 3%)를 기반으로 석회, 제강슬래그, 벤토나이트를 각각 혼합하여 최종 개량제 처리 수준을 4%로 조절하였다. 4주 처리 후 토양 입단 안정성 측정결과를 토대로 처리효율을 평가하였으며 처리비용을 함께 고려한 최적 처리방법을 모색했다.

2. 재료 및 방법

2.1 복토재 및 토양개량제 처리

본 연구에 사용한 복토재는 토양 개량사업에 사용될 토양으로서, 경기도 고양시와 의정부에 위치한 토취장에서 세 가지 종류의 시료를 확보하였다. 실험실 상에서 풍진한 후 체 거름을 통해 2 mm 이하 토양을 선별하고 균질화하여 사용했다. 3가지 복토재 토양의 점토 함량은 각각 9.4% (A 토양), 14.7% (B 토양), 21.2% (C 토양)로 서로 상이한 특성을 가지고 있었다. 각 토양의 pH는 7.2에서 8.3 범위로 약 알칼리성 이었으며, 자세한 기초 물리/화학적 특성은 Table 1과 같다. 본 연구에 사용한 토양개량제는 벤토나이트 (일성케미칼), 석회 (생석회, 주영석회), 제강슬래그 (한국광해관리공단), 유기물 (동물성 퇴비, 가립환경개발)이며, 선행 연구에서 확인된 입단 안정성 형성 능력과 개량제의 비용을 기반으로 선정했다.

4종의 개량제의 처리는 1, 3, 5% 수준으로 한가지 개량제를 처리한 단일처리구, 입단 안정성에 가장 효과적으로 알려진 유기물 (Tisdall and Oades 1982)을 기본으로 다른 개량제를 함께 처리하는 복합처리구를 만들었다 (Table 2). 개량제 처리구는 복토재와 개량제의 합

Table 1. Result of selected soil characteristics.

Soil sample	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture	pH (1:5)	OM (%)	TN (%)	TP (mg kg ⁻¹)	CEC (cmol(+) kg ⁻¹)
A soil	78.5	12.1	9.4	Loamy sand	7.8	1.3	0.01	162.9	7.4
B soil	66.3	19.0	14.7	Sandy loam	8.3	1.0	0.01	245.9	7.6
C soil	56.8	22.0	21.2	Sandy clay loam	7.2	1.2	0.02	157.0	4.9

Table 2. Treatment type and the amount of amendment addition in this study.

Treatment type	Amendment addition (%)
Control	No addition
Single treatment	OM (1, 3, 5)
	Lime (1, 3, 5)
	Steel Slag (1, 3, 5)
	Bentonite (1, 3, 5)
Binary treatment	OM + Lime (1 + 3, 3 + 1, 2 + 2)
	OM + Steel Slag (1 + 3, 3 + 1, 2 + 2)
	OM + Bentonite (1 + 3, 3 + 1, 2 + 2)

이 500 g이 되도록 각 수준(%)의 개량제 투입량을 결정하여 처리한 후 균질화를 진행하였다. 개량제 처리 후 토양시료는 실험실 조건에서 4주간 field capacity의 25 - 35% 수준의 수분상태를 유지시킨 후 입단 및 토양 분석을 실시하였다.

2.2 토양 분석방법

복토재의 기초 물리 화학적 특성은 토성, pH, 유기물 함량, 총질소 (TN), 총인 (TP) 및 CEC를 분석 하였으며, 국립농업과학원 토양화학분석법에 준하여 분석했다 (NAIST 2011). 입단 안정성 분석은 토양이 가지는 수분에 대한 저항성을 측정하여 입단으로 유지되는 비율과 분산된 토양의 무게 비 (%)를 계산하여 평가하는 방법이다. 입단 안정성은 Eijkelkamp사 (네덜란드)의 내수성 입단 안정성 분석기를 이용하여 직경 0.25 mm 이상의 입단 안정성을 분석했다. 토양 4 g을 0.25 mm 체에 놓고, 증류수 (100 mL)가 담긴 용기에 분당 34회 3분간 상하 진탕 시킨 후 단립 중량 측정 시료를 만들었다. 0.25 mm 체에 남은 시료는 분산제 (100 mL, 5g L⁻¹, sodium hexametaphosphate)가 담긴 용기에 분당 34회 10분간 상하 진탕 시킨 후, 내수성 입단 중량 측정 시료를 만들었다. 단립과 입단 시료가 포함된 용기는 105°C로 건조시킨 후 중량을 측정했다 (Duchicela et al. 2013). 입단 안정성 (%)은 Eq. 1과 같이 계산했다.

$$\text{입단 안정성(\%)} = \frac{\text{입단 중량}(g) - \text{단립 중량}(g)}{\text{전토 중량}(g)} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

2.3 최적 개량제 처리방안 선정 방법

높은 입단 안정성은 토양의 유실을 억제할 수 있는 능력을 증가시키지만, 급경사 복원지역의 특성상 토양 유실은 대규모 지역에서 광범위하게 나타나기 때문에 처리비용에 대한 평가가 같이 이루어져야 한다. 처리된 1천원 개량제 당 개선된 입단 안정성 (%)을 기반으로 비용편익 (% 1000₩⁻¹) 을 계산했다 (Eq. 2).

$$\text{비용편익}(B/C; \%1000\text{₩}^{-1}) = \frac{\text{처리구 입단 안정성(\%)} - \text{대조구 입단 안정성(\%)}}{\text{처리비용}(1000\text{₩})} \quad (\text{Eq. 2})$$

2.4 통계분석

통계분석은 SAS package (9.4 버전)를 이용하였고, 분석결과에 대하여 분산분석 (analysis of variance, ANOVA)을 실시하였고, 처리 간의 유의성을 검증하기 위해 Duncan 다중비교를 수행하였다 ($p < 0.05$).

3. 결과 및 고찰

3.1 처리별 입단 효율

복토재 토양을 대상으로 개량제 처리가 토양 입단에 미치는 효과를 확인하기 위해 처리 수준에 따른 입단 안정성을 분석하고, 입단 형성 효율을 계산했다 (Table 3). 무처리 복토재의 입단 안정성은 8.0 (A 토양), 6.8 (B 토양), 10.0% (C 토양)로 국내 농경지의 입단 안정성 측정 결과 (30 - 60%)에 비해 매우 낮았다 (Yun 2004). 본 연구에 사용한 복토재 토양의 유기물 함량은 모두 1.5% 이하로 (Table 1), 우리나라 밭 토양 평균 유기물 함량인 2.4% (Jung et al. 2001)에 비해 매우 낮았다. 일반적으로 유기물 함량과 입단 안정성은 양의 상관관계를 가지는데, (Amezqueta 1999) 이러한 이유로 본 연구의 대조구 토양에서 측정된 입단 안정성이 매우 낮은 것으로 판단된다.

단일처리구의 경우 복토재 토양 종류 (A, B, C)와 개량제 종류와는 상관없이 처리수준 (1, 3, 5%)의 증가에 의한 입단 안정성 상승 효과는 뚜렷하게 나타났다 (Table 3). Fig. 1에서는 개량제 처리구의 유의성 분석 결과 대조구 대비 유의한 차이가 발생한 경우에는 다른

Table 3. Result of amendment cost, aggregation formation (%) and ratio of benefit to cost (B/C*) with different amendment type and application ratio.

Treatment	Cost (1000₩)	A soil		B soil		C soil	
		aggregation formation (%)	B/C	aggregation formation (%)	B/C	aggregation formation (%)	B/C
Control	-	8.0	-	6.8	-	10.0	-
OM 1%	4.2	10.1	0.50	7.5	0.17	20.5	2.49
OM 3%	12.6	18.6	0.84	11.3	0.35	32.4	1.78
OM 5%	21.0	32.2	1.15	17.2	0.49	35.3	1.20
Lime 1%	1.8	13.0	2.88	12.4	3.17	20.2	5.84
Lime 3%	5.3	20.7	2.43	18.9	2.29	35.9	4.93
Lime 5%	8.8	28.3	2.32	27.2	2.32	37.9	3.19
Steel slag 1%	2.7	17.9	3.74	9.3	0.93	18.2	3.10
Steel slag 3%	8.0	22.4	1.82	16.4	1.20	22.0	1.50
Steel slag 5%	13.3	25.1	1.29	22.5	1.18	28.1	1.36
Bentonite 1%	3.2	18.5	3.30	8.2	0.44	21.5	3.59
Bentonite 3%	9.6	21.2	1.38	10.3	0.36	24.4	1.50
Bentonite 5%	16.0	28.7	1.30	12.7	0.37	25.6	0.97
OM 1% + Lime 3%	9.5	28.8	2.21	25.0	1.92	36.5	2.80
OM 3% + Lime 1%	14.4	30.4	1.56	12.6	0.40	33.5	1.64
OM 2% + Lime 2%	11.9	28.7	1.74	15.8	0.75	31.3	1.79
OM 1% + Steel slag 3%	12.2	24.1	1.33	20.1	1.09	30.7	1.70
OM 3% + Steel slag 1%	15.3	26.8	1.24	21.0	0.93	30.9	1.37
OM 2% + Steel slag 2%	13.7	25.1	1.25	22.1	1.12	30.4	1.49
OM 1% + Bentonite 3%	13.8	23.5	1.13	15.3	0.62	27.9	1.30
OM 3% + Bentonite 1%	15.8	26.6	1.18	14.2	0.46	32.1	1.40
OM 2% + Bentonite 2%	14.8	22.9	1.01	13.8	0.47	27.9	1.21

*B/C: ratio of benefit to cost (% 1000₩⁻¹)

영문 소문자로 표기했으며 a > b > c 순으로 높은 효율을 의미한다. 개량제 종류별 5% 처리 수준에서 입단 안정성 비교 결과를 보면, A 토양은 유기물(32.2%) > 석회(28.3%) > 벤토나이트(28.7%) > 제강슬래그(25.1%) 순으로 입단 안정성이 높았다. 유기물은 토양 입자 사이에서 결합제 역할을 수행하며, 입단 형성에 주된 역할을 한다고 알려져 있다(Liu et al. 2012). 이처럼 A 토양은 유기물 처리에 의한 입단 안정성이 가장 높았다. 하지만 개량제 종류별 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(Fig. 1a). B 토양은 석회 처리구에서 입단 안정성이 27.2%로 가장 높았으며, 제강슬래그 > 유기물 > 벤토나이트 순으로 유의한 차이가 있었다. 석회 처리는 점토의 표면 확산층에 영향을 주어 입단 안정성을 증가시킨다고 알려져 있는데(Roth and Pavan 1991), B 토양은 이러한 효과가 가장 뚜렷하게 나타났다. C 토양은 유기물과 석회 처리구의 입단 안정성이 각각 35.3, 37.9%로 대조구 대비 유의한 증가를 보였으며, 3가지 토양 중 입단 안정성이 가장 높았다.

3가지 토양 모두에서 단일처리구에서 가장 효과가

좋았던 유기물과 석회를 동시에 처리할 경우 복합처리구의 입단 안정성이 높았다(Table 3). A 토양은 유기물 3% + 석회 1% 처리구의 입단 안정성이 30.4%로 복합처리구 중 가장 높았다. 하지만 유기물 5% 단일처리구의 입단 안정성(32.2%) 보다 낮아 복합처리의 효과가 미비한 것으로 나타났다. B와 C 토양은 단일처리구에서 효과가 가장 좋았던 석회를 기반으로 유기물이 1% 추가된 복합처리구에서 입단 안정성이 각각 25.0, 36.5%로 가장 효과적이었다. 하지만 이러한 결과는 석회 5%를 단일처리한 결과(B 토양: 27.2%; C 토양: 37.9%)보다 낮았다.

3.2 비용편익 분석

입단 안정성 분석 결과를 토대로 최적의 개량제 처리 방안을 선정하기 위해서 입단 안정성과 연구에 사용한 개량제의 가격을 기반으로 처리구별 처리비용을 산출하고, 비용편익(B/C, % 1000₩⁻¹)을 계산했다(Table 3). 단일처리구의 처리비용은 복토재 1톤당 1,800원(석회

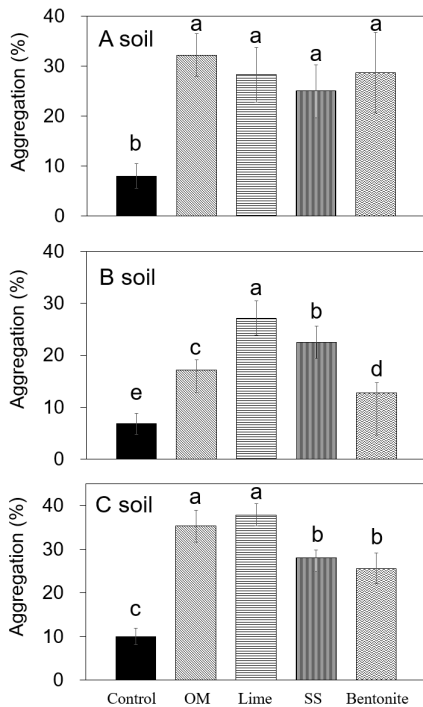


Fig. 1. Aggregation formation (%) of three cover soils (A, B, C soils) after 5% application of four amending materials (OM: organic matter, SS: steel slag). Treatments with the same alphabet letter on a given bar are not statistically different based on a Duncan test ($p < 0.05$)

1%)에서 21,000원(유기물 5%)으로 범위가 매우 컸다. 복합처리구는 9,500원(유기물 1% + 석회 3%)에서 15,800원(유기물 3% + 벤토나이트 1%)으로 가격 범위가 크지 않았지만 전체적인 가격이 단일처리구에 비해 높았다. A 토양은 유기물을 제외한 낮은 수준(1%)의 단일처리구에서 비용편익이 3.74(제강슬래그 1%) > 3.30(벤토나이트 1%) > 2.88% $1000W^{-1}$ (석회 1%) 순으로 높았다. 하지만 각 처리구의 입단 안정성은 17.9(제강슬래그 1%), 18.5(벤토나이트 1%), 13.0%(석회 1%)로 대조구 대비 약 2배 전후의 효과에 불과했다. 입단 안정성 상승 효과가 가장 뛰어났던 유기물 5% 처리구는 비용편익이 1.15로 낮았는데, 그 이유는 처리비용이 21,000원으로 가장 높았기 때문이다. B 토양은 석회 단일처리구의 비용편익이 석회 1, 3, 5% 처리구에서 각각 3.17, 2.29, 2.32% $1000W^{-1}$ 로 높게 나타났다. 특히 석회 5% 처리구는 입단 안정성이 27.2%로 전체 처리구 중 가장 높았기 때문에 효율과 가격 측면에서 모두 우수한 것을 알 수 있었다. C 토양의 경우 석회 1, 3% 처리구에서 비용편익이 5.84, 4.93% $1000W^{-1}$ 로 모든

처리구 중 가장 우수했으며, 입단 안정성 효과도 좋게 나타났다.

B와 C 토양은 비용편익이 우수한 처리구에서 입단 안정성 효과가 잘 나타났기 때문에 최적 개량제 선정에 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다. 하지만 A 토양에서는 비용편익이 우수한 처리구에서 입단 안정성 상승 효과가 높지 않았다. 이러한 이유로 비용편익만을 고려한다면, 급경사지에서 개량제 처리에 의한 기본적인 토양 유실 방지 기능이 원활히 나타나지 않을 수 있다. 따라서 개량제 처리로 입단이 형성되는 최소 목표를 설정하고, 목표 이상으로 토양을 개량하면서 비용편익이 우수한 처리구를 선정하는 것이 급경사 농경지의 토양 유실 저감을 위한 최적 방안일 것으로 판단되었다.

3.3 최적 개량제 처리 방안 선정

급경사지에서 토양 유실 억제를 위한 입단 형성 목표를 선정하기 위해 연구에서 사용한 복토재 토양의 토양 침식인자(K-factor, soil erodibility, $Mg\ hr\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)를 계산했다. 토양침식인자는 토양이 강우에 의한 침식에 저항하는 능력을 나타내는 인자로서 일반적으로 토성, 유기물 함량, 구조등급, 투수등급을 이용하여 계산한다(Wischmeier et al. 1971). 본 연구는 입단 안정성이 토양침식인자 미치는 영향을 기초로 하기 때문에 입단 안정성과 토성을 기반으로 이루어진 토양침식인자를 계산했으며, 자세한 계산식은 Angima et al. (2003)에 기술되어 있다. 복토재 토양 대조구의 토양침식인자를 계산한 결과 0.045(A 토양), 0.051(B 토양), 0.054(C 토양)로 큰 차이를 보이지 않았으며 평균 0.050이었다. ‘표토의 침식 현황 조사에 관한 고사’의 표토의 침식량 산정 방법에서는 전국 토양 통(soil series)을 대상으로 Wischmeier et al. (1971)의 식을 이용한 토양침식인자를 제공하고 있다(MOE 2017). 전국에 분포한 383개 토양 통의 평균값은 0.032이었으며, 이 값을 농경지 평균으로 가정했다. 입단 형성 목표값은 3가지 복토재 토양의 평균 토양침식인자와 전국 농경지 평균 토양침식인자의 차이를 Angima et al. (2003)의 식에 역으로 대입하여 입단 안정성 값을 계산했다. 계산 결과 입단 형성 목표값은 21.9%이었으며, 기준 이상의 처리구 중에서 비용편익이 가장 높은 것은 A와 B 토양의 경우 석회 5% 처리구였으며, 복토재 1톤을 개량처리 하는데 8,800원이 소요되었다. C 토양은 석회 3% 처리구가 가

장 효과적이었으며, 처리비용은 복토재 1톤당 5,300원이 소요됐다.

4. 결론

급경사 농경지에서 유실 저감을 위해 점토함량이 다른 3가지 복토재 토양을 대상으로 벤토나이트, 석회, 제강슬래그, 유기물 개량제를 수준별로 단일, 복합처리하고 입단 안정성 변화에 미치는 영향을 평가했다. 개량제를 단일처리 할 경우 유기물 (A 토양)과 석회 (B, C 토양) 처리에 의한 입단 안정성 증가가 대조구에 비해 유의한 차이를 보였다. 복합처리구의 경우 A 토양은 유기물 3%에 석회가 1% 추가된 처리구에서, B, C 토양은 석회 3%에 유기물이 1% 추가된 처리구에서 입단 안정성이 높았지만 5% 단일처리구에 비해 낮았다. 최적 개량제 처리 방안 선정을 위해서 복토재 토양의 토양침식 인자를 계산하고 전국 평균 값과의 차이를 이용하여 입단 형성 목표를 설정했다. 그 결과 유실 방지를 위한 복토재 토양의 최소 입단 형성값은 29.1% 이었으며, 비용편익을 고려했을 때 A와 B 복토재는 석회 5%가 C 복토재는 석회 3%가 최적의 개량방법이었다. 본 연구에서 도출한 결과는 토양침식인자만을 고려한 최적 개량제 처리방안으로 강우, 경사, 피복 등 토양 침식과 관련된 인자를 배제한 결과이다. 향후 다양한 인자를 고려한 최적 개량제 처리방안에 대한 연구가 수반되어야 할 것이다. 또한 석회 처리에 의한 토양 알칼리도 상승은 본 연구에서 고려되지 않았다. 따라서 석회 처리 후 강우에 의한 토양 알칼리도 변화, 내염성 작물의 도입 여부 등에 대한 후속 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2016 - 2017년도 한국광해관리공단 광해방지기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Amezketta, E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *Journal of sustainable agriculture* 14: 83-151.
 Angima, S.D., Stott, D.E., O'Neill, M.K., Ong, C.K., and Weesies, G.A. 2003. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agriculture, ecosystems and environment* 97: 295-308.

Baek, S.H., Kim, J.Y., Lee, S.U., and Kim, S.J. 2010. Influence of Continuous Application of Gypsum, Popped Rice Hull, and Zeolite on Soil Aggregation of Reclaimed Sandy Loam Soils. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 43: 642-647. (in Korean)
 Bronick, C.J. and Lal, R. 2005. Soil structure and management: A review. *Geoderma* 124: 3-22.
 Cantón, Y., Solé-Benet, A., Asensio, C., Chamizo, S., and Puigdefábregas, J. 2009. Aggregate stability in range sandy loam soils relationships with runoff and erosion. *Catena* 77: 192-199.
 Doan, T.T., Henry-des-Tureaux, T., Rumpel, C., Janeau, J.L., and Jouquet, P. 2015. Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: a three year mesocosm experiment. *Science of the Total Environment* 514: 147-154.
 Duchicela, J., Sullivan, T.S., Bontti, E., and Bever, J.D. 2013. Soil aggregate stability increase is strongly related to fungal community succession along an abandoned agricultural field chronosequence in the Bolivian Altiplano. *Journal of Applied Ecology* 50: 1266-1273.
 Jung, B.G., Choi, J.W., Yun, E.S., Yoon, J.H., and Kim, Y.H. 2001. Monitoring on Chemical Properties of Bench Marked Upland Soils in Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 34: 326-332. (in Korean)
 MOE. 2017. Enforcement Decree of the Soil Environment Conservation Act No. 14476, Ministry of Environment.
 Liu, X.H., Han, F.P., and Zhang, X.C. 2012. Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: results from incubation experiments. *International Journal of Agriculture and Biology* 14: 975-979.
 MIRECO. 2013. Yearbook of MIRECO Statistics. Mine Reclamation Corporation, Seoul, Korea. (in Korean)
 NIAST. 2011. Methods of analysis of soil and plant. National institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea. (in Korean)
 Roth, C.H., Pavan, M.A. 1991. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. *Geoderma* 48: 351-361.
 Tisdall, J.M., and Oades, J. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *European Journal of Soil Science* 33: 141-163.
 Yun, J.H. 2004. Review and discussion on development of soil quality indicators. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 37:3 191-198. (in Korean)
 Wischmeier, W.H., Johnson, C.B., and Cross, B.V. 1971. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation* 26: 189-193.
 Wuddivira, M.N., and Camps-Roach, G. 2007. Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. *European Journal of Soil Science* 58: 722-727.