

## 유기퇴비를 이용한 급경사 농경지 토양유실 저감

고일하<sup>1</sup> · 강희천<sup>1</sup> · 권요셉<sup>1,2</sup> · 유 찬<sup>3</sup> · 정문호<sup>4</sup> · 지원현<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>환경기술정책연구원 (NeLab)

<sup>2</sup>세종대학교 에너지자원공학과

<sup>3</sup>경상대학교 지역환경기반공학과

<sup>4</sup>한국광해관리공단 기술연구소

### Reduction of Soil Loss from Sloped Agricultural Field by using Organic Compost

Il-Ha Koh<sup>1</sup> · Hui-Cheon Kang<sup>1</sup> · Yo Seb Kwon<sup>1,2</sup> · Chan Yu<sup>3</sup> · Mun-Ho Jeong<sup>4</sup> · Won Hyun Ji<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>National Environment Lab. (NeLab), Seoul 02841, Korea

<sup>2</sup>Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University, Seoul 05006, Korea

<sup>3</sup>Department of Agricultural Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

<sup>4</sup>Institute of Mine Reclamation Technology, Mine Reclamation Corporation, Gangwon-Do 26464, Korea

#### ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the feasibility of organic compost for reducing soil loss in 25% sloped farmland. For the study, laboratory and field experiment were performed. After nine weeks monitoring in pot test, hardness of the amended soil with organic compost (1%~3%, w/w) showed two times higher than the control soil. Furthermore, soil loss of that was decreased by 95% under rainfall simulation test. From the result of laboratory experiment, organic compost with 2% (w/w) was applied for field experimental plot. After six month from April to September, the amount of soil loss became 67% of the initial, and the growth of natural vegetation was not hampered. Therefore, organic compost can be used as amendment materials to reduce soil loss in sloped farmland.

**Key words :** Soil loss, Sloped farmland, Organic compost, Rainfall simulation, Field experimental plot

#### 1. 서 론

농경지 관점에서 토양의 질을 평가하는 지표는 유기물 함량, 물리·화학적 특성, 생물학적 특성 등 다양하다. 이러한 지표들은 근본적으로 토양의 생성발달과정에 기반하여 지속적으로 변화하는 것으로 볼 수 있다(Yang et al., 2008). 토양은 공기, 수분, 광물입자, 유기물, 미생물 등의 이질체가 혼합된 것으로, 지표에 노출된 암석의 물리적·화학적 풍화산물이다(John et al., 1997; Spark, 1995).

주저자: 고일하, 책임연구원

공저자: 강희천, 주임연구원; 권요셉, 선임연구원; 유찬, 교수; 정문호, 과장

\*교신저자: 지원현, 팀장

E-mail: greenidea@mireco.or.kr

Received : 2020. 9. 17 Reviewed : 2020. 10. 12 Accepted : 2020. 12. 2

Discussion until : 2020. 2. 28

토양의 풍화과정에는 오랜 기간이 필요하며, 모재 이외에 기후, 지형 등이 토양생성의 주요 인자로 작용한다(Jo et al., 2002). 이렇게 생성된 토양은 식물을 지탱해 주면서 생장에 필요한 무기 영양분 및 수분을 공급해 주는 중요한 매개체가 된다(Kim, 2013). 따라서 농작물 생육의 기반이 되는 작토층인 농경지 표토는 인간에게 필요한 식량의 공급측면에서 가장 중요하다고 할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 토양은 단기간에 생성되지 않는다. 이러한 이유로 표토 토양을 희소자원으로 인식할 필요가 있는데, 대략 100년~300년의 시간이 소요되어야 2.5 cm 두께의 표토층이 생성되기 때문이다(KME, 2001). 즉, 자원으로써 표토 토양은 농경지의 생산성 유지를 위해서 가장 중요하게 관리되어야 한다고 할 수 있다. 그러나 중요한 관리대상임에도 불구하고 국내에서는 이에 대한 관심이 근래 들어서 시작되었다. 이러한 배경에는 과거 국내 경지면적의 반 이상이 논이었으나 산업화와 더불어 농경

지가 다른 용도로 전환되었고, 이에 대한 보충책으로 밭농사 위주의 경사지 농업이 시작되면서 토양침식 문제 역시 같이 시작되었다는 관점이 있다(Hwang et al., 1993).

경사지 토양침식 특성이나 토양침식 문제해결을 위한 여러 방안이 연구되었거나 검토되고 있다. 국내기후 특성상 경사지 토양유실의 대부분이 여름철 집중강우에 의해 발생하고 있으며, 이의 억제대책으로 고분자 응집제인 Polyacrylamide(PAM)를 통한 토양 자체의 응집력 향상방안(Choi et al., 2009), 피복방법이나 객토량 변화를 통한 유실저감방안(Heo et al., 2008; Lee et al., 2011)이 연구된 바 있다. 아울러 급변 연구의 선행연구에서는 토양 유실억제제로서 석회물질(생석회, 소석회)이나 유기퇴비와 생석회 혼합물의 적용성이 검토되기도 하였다(Hwang et al., 2016; Koh et al., 2018; Koh et al., 2019). 실내 인공강우실험으로 진행된 Koh et al.(2018)의 생석회·유기퇴비 혼합물의 적용성 연구에서는 혼합물 내 생석회(CaO) 보다는 유기물함량이 높을수록 유실억제효과가 뛰어난 것으로 나타났다. 현장규모의 시험구 모니터링으로 소석회(Ca(OH)<sub>2</sub>)의 적용성을 검토한 Koh et al.(2019)의 연구에서는 토양 pH의 증가문제로 인해 농작물 생육조건이 고려된 투여량 산정이 필요함을 확인하였다.

이에 본 연구에서는 경사 농경지 토양 유실억제제로서 유기퇴비의 적용성을 실내 인공강우실험과 현장규모의 시험구 모니터링을 통해 확인하였다. 선행연구(Koh et al., 2018)를 통해 유실억제제로서 유기물의 단독 처리에 대한 검토가 필요함을 확인한 바 있다. 아울러 Koh et al. (2019)은 유실억제제로 석회물질 사용 시 일부 토양조건에서는 농작물 생육에 악영향을 미치는 토양 pH의 급격한 증가가 발생하므로, pH영향이 낮은 유실억제제의 적용성 확인 역시 필요하다고 하였다. 이에 유실억제제로서 유기퇴비의 적용성을 추가적으로 현장규모 시험구에서 확인한다면 향후 토양특성에 따른 경사지 토양유실 제어대책 선정범위의 폭을 더 넓힐 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 연구내용 및 방법

본 연구는 실내실험과 현장 시험구 모니터링의 2단계로 진행하였다. 실내실험에서는 여러 종류의 유실억제제를 적

용한 후 시간경과에 따른 토양경도 변화와 강우를 모사한 조건에서 나타나는 토양유실량을 확인하였다. 실내실험을 통해 유기퇴비의 적정 적용비율을 선정된 후 현장 시험구에 적용하였다.

### 2.1. 실내실험

#### 2.1.1. 토양경도 실험

직경 10 cm, 높이 12 cm의 소형 포트에 유실억제제를 혼합 처리한 토양을 적재하였다. 검토대상 유실억제제 조건은 유기퇴비 단일처리와 소석회·유기퇴비의 복합처리이었다. 소석회·유기퇴비 혼합물은 선행연구(Koh et al., 2019)에서 향후 검토할 필요가 있는 유실억제제로 제시한 바 있으며, 유기퇴비의 단일처리 결과와 비교를 위해 선정한 것이다.

유실억제제 적용비율은 건조토양 무게(300 g) 대비 1%, 2%, 3%의 유기퇴비 3개 조건, 1%+1%, 1%+2%, 2%+1%의 혼합물(소석회 + 유기퇴비) 3개 조건으로, 재현성 확보를 위해 각 적용비율 조건별로 3개의 포트를 배치하였다. 실험에 사용된 유기퇴비로는 승진비료의 시중 유통 제품인 그린-토이며, 부식토(톱밥) 50%, 마사토 30% 등으로 구성되었다. 소석회는 CaO 함량 70% 이상으로 (주)충무화학의 시중 유통제품이다. 대상 토양은 점토함량 12%의 양질사토(Lomy sand)로 토양화학분석법(NAAS, 2010)에 따른 이화학적인 특성은 Table 1에 나타난 바와 같다.

경도는 각 포트별 토양의 포장용수량을 적용한 다음 상온에서 7일 동안 배양한 후 측정하는 것을 1회로 하여 총 9회 측정하였다. 즉, 경도측정 후 다시 포장용수량 상태를 적용하고 7일 배양 후 재측정하는 과정을 9회 반복한 것이다. 각 회차의 측정결과는 포트 내 2개 지점에서 측정한 결과의 평균값으로, 측정에 사용된 장비는 Eijkelkamp Soil & Water의 소형 경도계(Pocket penetrometer)였다. 포트 내 지표면에 장비의 심(shaft)을 밀어 넣어 일정 깊이(5 mm)로 삽입되었을 때 가해진 힘을 측정하였다.

#### 2.1.2. 인공강우 실험

실제 현장에 적용될 토양유실억제제의 투입비율을 산정

**Table 1.** Physicochemical properties of studied soil in the laboratory tests

pH [-]	OM [%]	T-N [%]	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [mg/kg]	CEC [cmol <sub>c</sub> /kg]	Soil particle distribution [%]			Soil Texture
					Sand	Silt	Clay	
6.7	0.4	0.02	7.86	12.62	85.92	1.79	12.29	Loamy sand

하기 위해 모형토조를 이용한 인공강우 실험을 수행하였다. 검토대상 유실억제제의 적용비율은 유기퇴비 1%의 단일처리 조건과 1% + 0.5%의 소석회·유기퇴비 혼합처리조건이었다. 해당 적용비율은 앞선 토양경도 실험을 통해 선정된 것으로 선정근거는 3장의 실험결과에 기술하였다.

실험에 사용된 토조는 목재 합판(두께 15 mm)으로 제작된 것이었다. 2기의 토조를 배치하였으며, 각각 L. 75 cm, W. 25 cm, H. 25 cm 크기로 바닥면에는 토양심부로 투습된 수질의 배수를 위해 일정간격으로 8개의 구멍을 뚫었다. 본 토조에 Table 1의 토양 28.3 kg을 유실억제제와 혼합하여 적재하였다. 적재 후 포장용수량 수준의 함수량을 적용했고, 인공강우 실험수행 전까지 15일간 유지하였다.

강우모사 실험 시 토조의 경사는 유실억제제가 실제 적용될 농경지(밭)와 동일한 25%로 설정하였다. 강우강도 조건역시 실제 농경지가 위치한 지역(충북 제천시 수사면)에서 과거 실측한 시간당 최대 강우수치인 84 mm/hr를 고려해 80 mm/hr의 강우를 모사하였다. 즉, 60분 동안 농용펌프와 노즐을 이용해 토조 지표면으로부터 1.5 m 상부에서 80 mm의 강우량을 가정한 수돗물을 살수하였다.

토양유실량은 강우를 모사한 60분 동안 총 8회 측정되었다. 초기 강우가 유실량 증가에 많은 영향을 주는 것으로 판단하여 강우발생 첫 20분 경과 시까지는 5분 단위로, 이후 60분이 경과되기까지는 10분 단위로 유실된 토양을 채취하였다. 채취한 토양을 건조한 후 무게를 측정

하여 토양유실량으로 하였다. 아울러 실험종료 후 토조에 잔류한 토양을 대상으로 모래·미사·점토 함량과 토양화학 분석법(NAAS, 2010)에 따른 이화학적특성을 분석하였다.

## 2.2. 현장 시험구 모니터링

### 2.2.1. 시험구 조성

본 연구의 모니터링 대상 시험구는 24.7%~26.5%의 경사를 가진 밭(충북 제천시 수사면 소재)에 설치한 폭 4 m, 경사장 22 m의 크기로 유실억제제로서 소석회를 검토했던 선행연구(Koh et al., 2019)의 시험구와 동일한 것이었다(Fig. 1). 시험구의 평균 경사도는 25%이며, 단순 복토만을 실시한 것과 복토제에 유실억제제를 처리한 것 등 2기로 구성되었다. 아울러 시험구와 시험구 사이에 설치된 강우량계에서 얻어지는 강우량 정보를 현장의 데이터로거(Data Taker, model DT80)에 취합하는 구조로 현장의 강우정보를 보다 정확하게 취득하였다.

유실억제제로서 유기퇴비의 효과 모니터링을 위해 우선 시험구 내 선행연구에서 검토하였던 대조구(control) 토양과 유실억제제(소석회) 혼합토양을 모두 제거하였다. 이때의 제거구간은 시험구 내 지표로부터 0.4 m 심도이었다. 이후 급회 모니터링을 위해 선행연구와 동일한 0.4 m 두께의 복토구간을 재조성하였으며, 유실억제제(유기퇴비)의 혼합은 복토층 지표면으로부터 0.2 m 심도구간에 대해서만 실시하였다. 재복토된 토양의 토성은 사양토(Sandy loam)였다. 국내 밭토양 대부분이 양토(Loam)와 사양토임



Fig. 1. Photograph of the field experimental plot (Koh et al., 2019).

**Table 2.** Physicochemical properties of upland soil in the field experimental plot

pH [-]	OM [%]	T-N [%]	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [mg/kg]	CEC [cmol./kg]	Soil particle distribution [%]			Soil Texture
					Sand	Silt	Clay	
6.9	0.6	0.03	52.25	16.69	69.37	12.75	17.88	Sandy loam

을 고려한다면(Kim et al., 2009), 이같은 실험토양 선정은 국내 농경지 현황을 반영한 것으로 판단된다. 실험토양의 유기퇴비 적용비율은 2%이며, 이는 실내실험결과 검토 후 선정된 것이다. 시험구 조성에 사용된 유기퇴비는 앞선 실내 토양경도 실험에서 사용한 것과 동일한 것이었다. 시험구 조성에 사용된 토양의 이화학적 특성은 Table 2에 나타난 바와 같다.

3월말 시험구 조성 후 대략 50여일 경과시점에 농작물로 감자와 깨를 식재하였다. 아울러 시험구 모니터링 기간 동안 복토층 내 잡풀과 같은 자연발생 식생에 대해서 별도의 제초작업을 하지 않았다. 즉, 모니터링 기간 내 시험구의 식생은 농작물과 자연발생 식물체를 구분하지 않았다.

2.2.2. 시험구 모니터링

시험구 모니터링은 시험구 조성 후 1개월 경과시점인 2019년 4월부터 9월까지 월 1회 현장을 방문하여 시험구로부터 유실된 토양의 무게를 측정하고, 시험구 내 잔류된 토양을 대상으로 토양화학분석법(NAAS, 2010)에 따른 이화학적특성을 분석하는 것으로 실시하였다. 이때 현장 계측기로부터 입수된 강수량자료도 함께 취득하였다. 강우발생에 따라 시험구 내 토양이 유실되면 시험구 하단의 수로를 통해 침사지(침사통)에 포집된다. 따라서 주기적인 방문을 통해 유실된 토양을 수거하여 무게를 측정하였고,

이를 통해 침사지로의 유실토양 이동통로 또한 확보하였다(Koh et al., 2019). 이화학적분석을 위한 잔류토양은 각 처리조건별 시험구 내 상류와 하류 2개 지점에서 채취하였다.

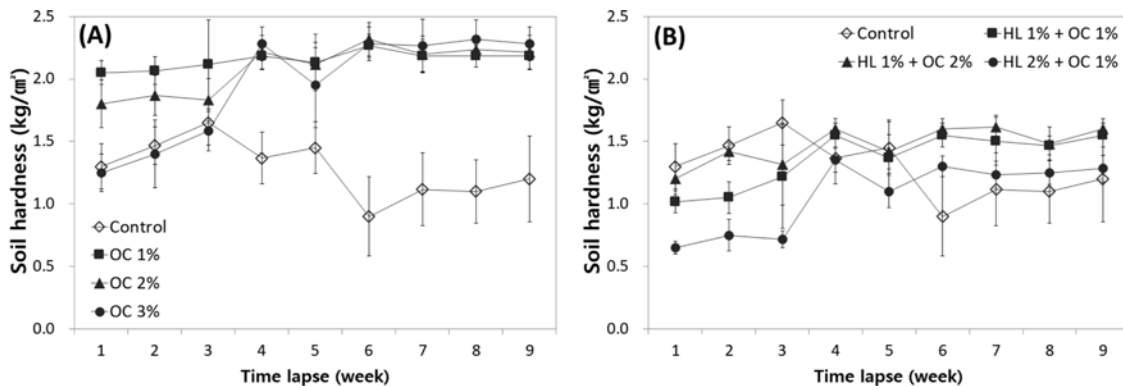
현장 시험구 운영에 따른 농작물을 포함한 자연발생 식생의 분포를 확인하기 위해 무인비행장치(unmanned aerial vehicle, UAV)를 이용한 공중촬영을 실시하였다. 사용한 장치는 DJI사의 제품(Phantom 4 pro)이며, 시간경과에 따른 식생현황의 비교를 위해 월 1회 빈도로 동일위치의 일정고도에서 촬영을 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 실내실험

3.1.1. 토양경도 변화

Fig. 2는 소형포트 내 토양을 적재한 후 9주 동안 포장용수량 수준의 함수량을 유지하면서 측정된 토양경도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2의 (A)와 (B)에서 보여지는 대조구의 측정값은 동일한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 유실억제제로 검토된 유기퇴비나 이의 혼합물(소석회·유기퇴비)은 시간경과에 따라 대조구 대비 상대적으로 높은 토양경도 수치를 나타내었다. 이러한 결과는 유실억제제 처리로 대상 토양의 입단화가 발달했고, 이로 인해 토양경도가 증가했다고 할 수 있다. 토양경도의 증가는 외



OC : Organic Compost; HL : Hydrated Lime

**Fig. 2.** The variation of soil hardness in the pot experiment ((A) amended with organic compost; (B) amended with the mixture of hydrated lime and organic compost).

부에서 미치는 힘에 대해 물리적인 저항력이 증가함을 의미한다. 따라서 토양유실의 억제측면에서는 긍정적인 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

그러나 유실억제제의 처리조건별 비교에서는 다소 큰 차이를 보였다. 유기퇴비를 단독으로 처리했을 경우 석회석과 혼합하여 처리했을 때와 비교해서 대조구와의 정도 차이가 상대적으로 크게 나타났다. 실험 종료시점에서 확인한 정도값은 유기퇴비를 단독 처리한 경우 2.2 kg/cm<sup>2</sup> 전후로 대조구의 1.2 kg/cm<sup>2</sup>에 비해 2배 가까이 차이가 났다. 이는 유기퇴비와 소석회의 혼합물 처리조건의 1.5 kg/cm<sup>2</sup>와 비교해서도 1.5배 가까이 높은 수준이다. 토양입단의 생성과 발달에는 양이온, 토양생물, 유기물질 작용 등이 있는 것으로 알려졌다(Brady and Weil, 2014; Cho et al., 2002). 토양생물 및 유기물질 작용은 식물뿌리나 균사, 토양 미생물이 생산한 유기접착제에 의한 토양 입자간 물리적·화학적 결합과 이를 위한 토양생물의 활성 유지를 의미하는 것으로 본 연구의 유기퇴비와 관련이 있는 것이다. 양이온 작용은 2가와 3가 양이온(Ca<sup>2+</sup>, F<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup>)이 토양점토입자 표면의 음전하를 중화시키고, 점토 입자를 서로 묶을 수 있도록 다리를 형성하는 것으로 본 연구에서는 칼슘(Ca) 함량이 높은 소석회가 이의 작용을 유도했을 것이다.

소석회·유기퇴비의 혼합물 처리조건에서 나타난 유기퇴비 단독 처리조건 대비 낮은 정도수치는 칼슘-인(P)의 불용화 침전이 영향을 미친 것으로 판단된다. 토양 내 칼슘이 고부하될 경우 인의 유효도가 저하된다(Brady and Weil, 2014; Kim, 2013). 따라서 두 유실억제제의 혼합 처리가 일부 칼슘이온의 가교역할과 인의 미생물 활성도를 저감시켰을 것이다. 혼합물 구성비율을 봤을 때 소석회의 비율을 낮게, 유기퇴비의 비율을 높게 했을 때 정도

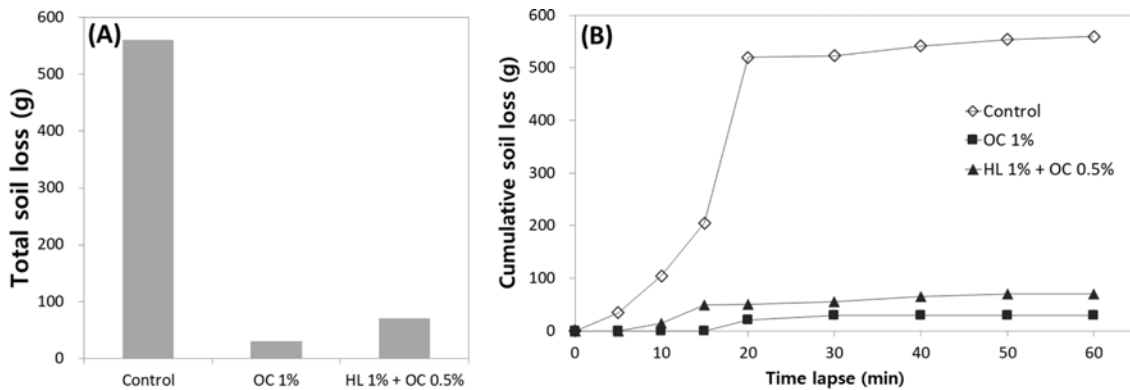
가 증가하는 경향을 보였다. 이는 유기퇴비와 생석회를 혼합한 유실억제제를 검토했던 선행연구(Koh et al., 2018)의 결과와도 일치하는 것이다.

이상의 결과를 통해 다음 단계의 실내 인공강우 실험대상 유실억제제 처리조건으로 유기퇴비 1% 단독 처리조건을 선정하였다. 경도시험에서는 유기퇴비의 함량이 3%일 때 정도가 크게 증가하는 것으로 확인되었다. 그러나 1%와 2% 처리조건에서도 3% 대비 큰 값의 차이가 없어 실제 현장에서의 경제성을 고려해 소량 처리조건인 1%를 적용비율로 선정하였다.

3.1.2. 인공강우에 따른 토양 유실량 및 이화학특성 변화

Fig. 3은 앞선 토양경도 실험에서 선정된 유기퇴비 1% 처리조건에 대해 인공강우(84 mm/hr) 모사를 통해 나타난 유실량의 총량(A)과 시간경과별 유실량 변화(B)를 나타낸 것이다. 본 인공강우 실험에서는 유기퇴비 1% 처리조건의 소석회와 유기퇴비의 혼합물 처리조건(1% + 0.5%)을 추가하였다. 소석회와 유기퇴비 혼합물의 혼합비율 1% + 0.5%는 앞선 경도시험에서 검토되지는 않았다. 다만, 소석회 1% 수준에서 소량의 유기퇴비 적용으로 나타날 수 있는 변화를 유기퇴비 단독 처리조건과 비교하고자 한 것이다.

그림에서 볼 수 있듯이 각 처리조건의 총 유실량은 대조구 대비 급격하게 감소하였다(Fig. 3 (A)). 대조구와 유기퇴비 단독처리, 소석회·유기퇴비의 혼합물 처리 시 나타난 유실량은 각각 560 g, 30 g, 70 g이었다. 유기퇴비 단독처리 시 나타난 저감효율은 95%로 소석회·유기퇴비 혼합물 처리의 저감효율 88%에 비해 7% 포인트 높은 것으로 나타났다. 이러한 높은 토양유실 저감효과는 유기퇴비의 적용성이 높음을 나타낸 것으로 볼 수 있다. 소석



OC : Organic Compost; HL : Hydrated Lime

Fig. 3. Soil loss from amended soils in the rainfall simulation test ((A) total soil loss; (B) variation of cumulative soil loss as time lapse).

**Table 3.** Physicochemical properties of residual soils in rainfall simulation test

	pH [-]	OM [%]	Exchangeable Ca [cmol <sub>c</sub> /kg]	Soil particle distribution [%]		
				Sand	Silt	Clay
Control	7.24	0.2	4.19	87.83	1.70	10.47
OC 1%	8.06	0.6	4.08	86.16	1.80	12.03
HL 1% + OC 0.5%	9.57	0.5	14.09	86.76	1.58	11.66

OC : Organic Compost; HL : Hydrated Lime

회-유기퇴비 혼합물 처리조건에서 나타난 높은 유실저감 효율(88%) 역시 현장 적용성이 있음을 나타낸 결과이다. 다만, 유기퇴비 단독처리와 비교했을 때 나타난 상대적으로 낮은 유실저감 효과는 칼슘-인의 불용화 침전이 토양 입자의 입단화를 일부 저해했던 것으로 판단된다.

시간경과에 따른 유실량 변화에서는 각 처리조건 모두 인공강우 모사 후 20분 이내에 대부분의 유실이 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 3 (B)). 이러한 결과는 토양유실의 대부분이 초기강우로부터 발생한다는 Dong et al.(2012) 과 Eu et al.(2015)의 연구내용과 일치하는 것이다. 대조구에서는 인공강우 발생시점부터 토양유실 발생 후 20분 경과시점에서 총 유실량의 93%에 해당하는 520 g의 토양 유실이 발생하였다. 소석회-유기퇴비 혼합물 처리조건에서는 강우 발생 5분 이후 토양유실이 발생하였으며, 15분 경과시점에서 총 유실량의 70%(49 g)를 차지하였다. 유기 퇴비 단독처리시에는 다른 조건에 비해 토양유실이 뒤늦게 발생하였다. 강우발생 15분 이후 유실이 일어났으며, 20분 경과시점에서 나타난 누적유실량은 70%(21 g)이었다. 이러한 결과는 기존 선행연구에서 검토한 소석회나 생석회 못지않게 경사지에서의 토양유실을 억제하기 위한 유기퇴비의 적용성이 높음을 의미한다.

강우실험 종료 후 토조 내 잔류토양을 대상으로 분석한 이화학특성 및 토양입자의 분포특성을 Table 3에 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 유실억제제 처리유무에 따른 모래와 점토함량의 변화가 확인되었다. 유기퇴비 단독처리, 소석회-유기퇴비의 혼합물 처리조건에서 나타난 점토의 함량은 대조구 대비 각각 1.56% 포인트, 1.19% 포인트 증가하였다. 이에 비해 모래는 각각 1.67% 포인트, 1.07% 포인트 감소하였다. 즉, 유실억제제 처리를 통해 미세입자인 점토의 강우유실에 효과적으로 대응했음을 나타낸 것이다. 다만, 소석회-유기퇴비의 혼합물 처리조건에서 나타난 토양 pH는 9.6의 높은 알칼리 특성을 보이므로 농경지 토양으로는 적절하지 못한 것으로 나타났다. 강산성(pH 5이하)이나 강알칼리성(pH 9 이상)에 알맞은 작물이 거의 없음을 고려하면(Chae et al., 2013), 소석회보다는 유기물을 유실억제제로 활용하는 것이 더 효과적일

수 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과를 통해 유기퇴비 1% 처리조건인 토양유실 억제효과를 현장 시험구 운영을 통해 검토해 볼 필요가 있는 것으로 판단하였다. 다만 실제 시험구에서는 유기퇴비의 적용비율을 2%로 상향 적용하였다. 이는 실제 현장에서 발생할 수 있는 토양과 유실억제제의 균질 혼합과정 부주의 등 안전율을 고려한 조치였다.

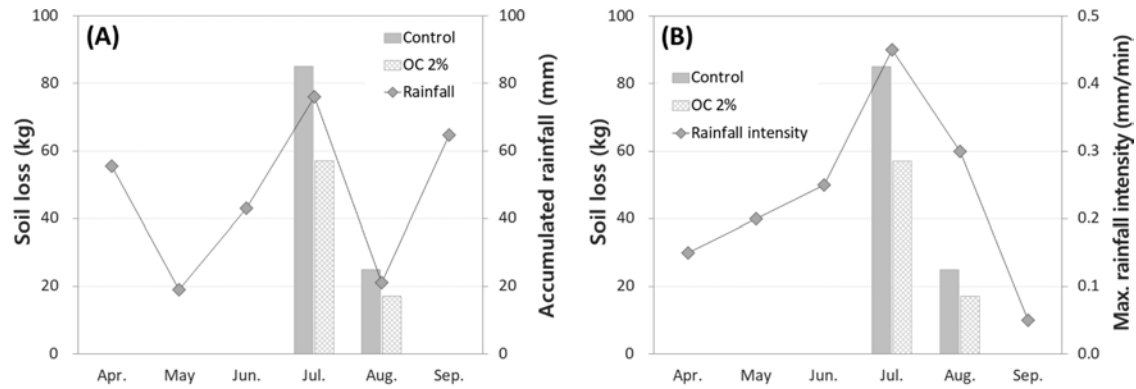
### 3.2. 현장 시험구 모니터링

#### 3.2.1. 토양 유실량 및 이화학특성 변화

Fig. 4는 토양 중량 대비 2% 수준의 유기퇴비가 적용된 현장 시험구(경사도 25% 전후)에서 6개월간 취득한 강우정보(월간 누적 강우량(A); 월간 최대 강우강도(B))와 토양유실량을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 실험기간 동안의 토양유실은 7월과 8월에만 발생하였다.

7월과 8월에 나타난 토양유실 총량은 대조구 110 kg, 유기퇴비 처리조건 74 kg이었다. 즉, 유기퇴비 처리를 통해 토양유실을 33% 저감할 수 있었으며, 이는 곧 유실억제제로서 적용성을 가지고 있음을 나타낸 것으로 볼 수 있다. 즉, 유기퇴비 투입을 통해 토양에서 입상 입단이 형성되고 안정화되는 것인데, 앞선 실내실험 결과에서 언급한 바와 같이 토양미생물이 생산한 유기점착제 등에 의한 영향으로 볼 수 있다(Brady and Weil, 2014; Cho et al., 2002). 다만, 모니터링 결과 나타난 33%의 저감효율은 앞선 실내 인공강우 실험에서 확인한 저감효율(95%)과 비교하면 62% 포인트 낮은 것이다. 실내와 현장에서의 차이를 감안하더라도 저감효율의 차이가 크다고 할 수 있다. 이러한 차이는 각 실험단계에서의 식생 존재유무에 따른 차이로 설명할 수 있다. 일반적으로 지표에 존재하는 식생은 발생한 강우를 차단시켜 토양 표면의 타격력을 감소시키고, 토립의 분산과 비산을 저감하는 효과를 가진다(Osborn, 1954; Wainwright et al., 2000). 따라서 토조 내 식생이 없었던 인공강우실험에서의 유실량 차이가 농작물과 자연식생의 성장을 유도했던 현장 시험구 결과 값에 비해 극단적으로 높았던 것으로 판단된다.

강우인자에 따른 토양유실량과의 비교에서는 강우량보



OC : Organic Compost

Fig. 4. The variation of soil loss in the field experimental plot ((A) with accumulated rainfall; (B) with maximum rainfall intensity).

Table 4. Physicochemical properties of residual soils in the field experimental plot (Mean  $\pm$  SD)

		Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.
pH	Control	6.90 $\pm$ 0.30	6.50 $\pm$ 0.40	5.83 $\pm$ 0.07	6.59 $\pm$ 0.12	5.45 $\pm$ 0.30	6.90 $\pm$ 0.58
	OC 2%	6.45 $\pm$ 0.15	6.20 $\pm$ 0.00	6.12 $\pm$ 0.02	6.13 $\pm$ 0.03	5.24 $\pm$ 0.19	6.00 $\pm$ 0.42
OM [%]	Control	1.06 $\pm$ 0.13	0.96 $\pm$ 0.34	0.11 $\pm$ 0.11	0.23 $\pm$ 0.13	0.21 $\pm$ 0.11	0.39 $\pm$ 0.13
	OC 2%	0.50 $\pm$ 0.29	1.63 $\pm$ 0.08	0.67 $\pm$ 0.05	0.47 $\pm$ 0.06	0.57 $\pm$ 0.21	0.78 $\pm$ 0.19
Exchangeable Ca [cmol <sub>e</sub> /kg]	Control	8.85 $\pm$ 0.20	7.29 $\pm$ 0.20	10.24 $\pm$ 0.47	10.58 $\pm$ 1.27	10.95 $\pm$ 0.27	9.12 $\pm$ 2.25
	OC 2%	11.35 $\pm$ 0.01	7.17 $\pm$ 0.40	8.38 $\pm$ 0.06	8.58 $\pm$ 0.10	8.39 $\pm$ 0.00	13.16 $\pm$ 0.20

OC : Organic Compost

다는 최대 강우강도가 토양유실에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. Fig. 4의 (A)에서 볼 수 있듯이 4월과 9월은 8월에 비해 높은 누적강우량을 기록했으나, 실제 토양유실은 관측되지 않았다. 그러나 최대 강우강도는 오히려 8월에 높게 나타나며, 이 시기 토양유실이 발생하였다(Fig. 4 (B)). 아울러 모니터링을 수행했던 전 기간을 통틀어 7월과 8월에 최대 강우강도 수치 1, 2순위를 기록했으며, 본 시기의 토양유실량 순위도 동일하였다. 즉 강우강도가 높을수록 토양유실량도 증가하는 결과를 나타낸 것이다. 이는 강우강도와 여름철 집중호우가 토양유실에 미치는 영향이 크다는 Lee et al.(2012)과 Oh et al.(2012)의 연구결과와 동일한 것이다. 따라서 경사지에서의 토양유실에 대한 기상인자 검토 시 우선적으로 강수량보다는 강우강도를 확인할 필요가 있을 것이다. 경사도 25% 전후, 사양토의 특성을 가진 본 연구의 시험구 운영결과 토양유실이 시작될 개연성이 높은 강우강도는 토양유실의 유무로 확인할 수 있는 6월과 8월의 결과를 볼 때 0.25 mm/min에서 0.30 mm/min 사이일 것으로 판단된다.

Table 4는 토양유실 모니터링 기간 중 시험구 내 잔류 토양의 이화학 항목(pH, 유기물함량, 교환성 칼슘) 분석결과를 나타낸 것이다. 유기물 함량은 대조구 0.11%~

1.06%, 유기퇴비 처리조건 0.50%~1.63%의 범위로 모니터링 초기인 4월을 제외하면 유기퇴비 처리조건에서 지속적으로 높게 나타났다. 즉, 유기퇴비가 처리된 시험구의 토양에서는 모니터링 기간 동안 입단 발달의 지속성이 대조구에 비해 높았다고 할 수 있다. 다만, pH나 교환성 칼슘이온 함량은 유기퇴비 처리조건에서 다소 떨어지는 수치를 보였다. 이러한 결과는 토양 내 칼슘과 유기퇴비로부터 기인한 인의 불용화 침전과 유기산의 발생에 따른 영향으로 판단된다. 따라서 알칼리도가 높은 경사지 토양인 경우 유실억제제로서 유기퇴비를 우선적으로 고려하는 것이 타당하다고 볼 수 있다.

### 3.2.2. 식생분포 변화

Fig. 5는 모니터링 기간 중 촬영된 시험구 내 식생 분포를 나타낸 것이다. 본 그림의 식생은 인위적으로 식재한 농작물(감자, 깨)과 자연발생 식생이다.

그림에서 나타난 바와 같이 유실억제제 처리유무에 따른 식생 피복의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 앞선 시험구 모니터링 결과에서 나타난 인공강우 실험결과 대비 상대적으로 낮은 유실저감 효율의 원인을 대조구 내 존재하는 식생의 영향으로 풀이한 바 있다. 본 그림의 대



Fig. 5. Photograph of crop growth and natural vegetation occurrence in field experimental plot.

조구를 보면 그 근거가 명확해 진다. 대조구의 식물체 피복 수준은 유실억제제 처리구와 유사한 수준을 보이는데, 이는 인공강우 실험과 달리 현장시험구 내 식물체로 인해 강우의 토양표면 타격 감소효과가 대조구에서도 있었음을 의미한다.

아울러 처리구에서 확인된 식생의 피복수준을 볼 때 토양무게비 대비 2% 전후의 유기퇴비를 유실억제제로 사용하더라도 식물체 성장에 대한 부정적인 영향은 없을 것으로 판단된다. 일반적으로 밭토양의 적정 유기물 함량은 2%~3% 범위이다(Yang et al., 2008). 따라서 경사 농경지를 대상으로 유기퇴비를 적용하면 토양비옥도의 증가로 이어져 오히려 농작물 생육에 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 농경지 비옥도 유지측면에서 유기물함량이 관리된다면 경사지에서의 토양유실 억제가 부수적으로 이루어 질 수 있다. 국내의 폐금속광산 주변 농경지의 광해방지사업(토양개량·복원)에서는 오염토를 안정화처리하고 상부에 농작물 경작을 위한 복토층을 추가적으로 구성하고 있다(Yun et al., 2010). 특히 복토층의 비오염도에 대해서 비옥도 개선공정을 추가적으로 실시함을 고려할 때, 광해방지사업 현장 내 경사 농경지에서 유실억제제로 유기퇴비를 사용하는 것 역시 토양 비옥도 향상과 유실억제의 두 가지 목표를 동시달성이 가능할 것이다.

동일한 농경지에서 유실억제제로서 소석회 적용성을 검토한 선행연구(Koh et al., 2018)에서는 76%의 높은

유실저감 효율을 확인한 바 있다. 다만, 알칼리 토양을 대상으로 한 소석회 처리로 인해 식생성장에 부적합한 수준까지 토양 pH가 증가해 농경지 활용측면에서는 적절하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 석회암을 모암으로 하는 지역 내 경사 농경지나 농경지 토양개량·복원사업 시 알칼리 토양을 복토재로 사용하는 경우 유실억제제로서 유기퇴비의 적용을 우선적으로 검토해 볼 필요가 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유기퇴비의 토양유실억제제 적용성을 실내실험과 현장 시험구 모니터링을 통해 검토하였다. 실내 실험에서는 포트를 이용한 토양경도와 인공강우 모사를 통한 토양유실량 변화를, 현장 시험구 모니터링에서는 6개월간 토양유실량과 식생현황을 월간 단위로 확인하였다. 시험구는 평균 25%의 경사도를 가진 농경지(밭)에 각 조건별 경사장 22 m, 폭 4 m의 규격으로 조성한 것이었다.

다수의 유기퇴비 처리조건(토양무게비 대비 1%~3%)을 적용하여 토양경도 변화를 9주 동안 확인한 결과 혼합비율에 상관없이 토양경도가 일정 수준으로 증가/수렴하는 결과를 나타내었다. 모니터링 종료시점에 나타난 경도는 유기퇴비 처리 시 대조구 대비 2배 가까이 증가하였다.

토양경도 실험결과를 근거로 25%의 경사도에 유기퇴비 1% 처리조건을 적용한 후 시간당 80 mm의 인공강우 모



사실험을 수행한 결과 대조구에 비해 95% 유실저감 효율을 나타내었다. 이러한 결과는 유기퇴비의 유실억제제 적용성이 높음을 나타낸 것으로 볼 수 있다. 아울러 유실억제제 처리여부에 상관없이 인공강우 모사 후 20분 이내에 총 토양 유실량의 70%가 유실되어 초기강우로 인한 유실 효과가 큰 것으로 나타났다.

현장의 안전율을 고려해 유기퇴비 2%로 처리한 현장 시험구 모니터링 결과 유기퇴비 처리를 통해 토양유실을 33% 저감할 수 있었다. 아울러 토양유실에 영향을 미치는 강우인자는 강우량보다는 강우강도가 더 밀접한 것으로 나타났다. 시험구 내 농작물 및 자연발생 식생의 피복 수준 확인결과 2% 수준의 유기퇴비 적용으로 인한 식물체 성장저해 효과는 확인되지 않았다. 유기물은 토양비옥도 개선에 긍정적인 영향을 미치는 만큼 경사농경지에 적용 시 발작물 영양물질 공급과 함께 토양유실 저감을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과를 통해 유기퇴비의 경자시 토양유실 억제제로서의 적용성을 확인하였다. 소석회의 적용성을 검토한 선행연구에서 토양 pH 증가에 따른 농경지 식생의 부정적 영향이 확인된 바 있다. 따라서 알칼리 토양을 대상으로 유실억제방안 검토가 필요한 경우 유실억제제로 석회물질보다는 유기퇴비의 우선적 적용이 가능할 것이다.

## 사 사

본 연구는 한국광해관리공단으로부터 기술개발사업비를 지원받아 수행된 것이다.

## References

- Brady, N.C. and Weil, R.R., 2014, *Elements of the Nature and Properties of Soils*, Pearson Education Limited.
- Chae, J.C., Park, S.J., Kang, B.H., and Kim, S.H., 2013, *Principles of Crop Cultivation*, Hyangmunsa.
- Choi, B.S. Lim, J.E., Choi, Y.B., Lim, K.J., Choi, J.D., Joo, J.H., Yang, J.E., and Ok, Y.S., 2009, Applicability of PAM(polyacrylamide) in soil erosion prevention: rainfall simulation experiments, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, **28**(3), 249-257.
- Cho, S.J., Park, C.S., Um, D.I., 2002, *Soil Science*, Hyangmunsa.
- Dong, J., Zhang, K., and Guo, Z., 2012, Runoff and soil erosion from highway construction spoil deposits: a rainfall simulation study, *TRANSPORT RES D*, **17**(1), 8-14.
- Eu, S., Li, Q., Lee, E.J., and Im, S.J., 2015, Predicting surface runoff and soil erosion from an unpaved forest road using rainfall simulation, *J. Korean Env. Res. Tech.*, **18**(3), 13-22.
- Heo, S.G., Jun, M.S., Park, S.H., Kim, K.S., Kang, S.K., Ok, Y.S., and Lim, K.J., 2008, Analysis of soil erosion reduction ratio with changes in soil reconditioning amount for highland agricultural crops, *Journal of Korean Society on Water Environment*, **24**(2), 185-194.
- Hwang, E., Jo, B.J., Seo, S.D., Park, S.W., Do, D.H., Lee, K.C., Um, B.H., and Kim, C.K., 1993, *Agricultural Land Engineering*, Hyangmunsa.
- Hwang, W.J., Bang, H.W., Hyun, S.H., Ji, W.H., and Lee, S.H., 2016, Assessment of several amendments for soil erosion reduction in sloping land, *Proceedings of KoSSGE 2016 fall conference*, Daejeon, Korea, p.232.
- John, Y.W., 1997, *Earth Resource and Environment*, SNU press.
- Jo, S.J., Park, C.S., and Um, D.I., 2002, *Soil Science*, Hyangmunsa.
- Kim, G.H., Kim, K.Y., Kim, J.G., Sa, D.M., Seo, J.S., Son, B.G., Yang, J.E., Eom, K.C., Lee, S.E., Jeong, G.Y., Jeong, D.Y., Jeong, Y.T., Jeong, J.B., and Hyun, H.N., 2009, *Soil Science*, Hyangmunsa.
- Kim, K.N., 2013, *Plant, Soil and Fertilizer*, Moaadcom
- KME (Korea Ministry of Environment), 2001, *A Study on the Conservation of Surface Soil and Erosion Control*.
- Koh, I.H., Roh, H., Hwang, W.J., Seo, H.G., and Ji, W.H., 2018, Reducing soil loss of sloped land using lime-organic compost mixtures under rainfall simulation, *J. Soil Groundwater Environ.*, **23**(3), 43-50.
- Koh, I.H., Yu, C., Park, M.J., and Ji, W.H., 2019, Reduction of soil loss from sloped agricultural field by using hydrated lime, *J. Soil Groundwater Environ.*, **24**(2), 1-7.
- Lee, G.J., Lee, J.T., Ryu, J.S., Oh, D.S., and Kim, J.S., 2012, Effects of slope gradient and rainfall intensity on soil losses with rainfall simulator experiment, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **45**(6), 877-881.
- Lee, J.T., Lee, G.J., Ryu, J.S., Park, S.H., Han, K.H., and Zhang, Y.S., 2011, Evaluation of surface covering methods for reducing soil loss of highland slope in radish cultivation, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **44**(5), 667-673.
- NAAS (National Academy of Agricultural Science), 2010, *Methods of soil chemical analysis*.
- Osborn, B., 1954, Effectiveness of cover in reducing soil splash by raindrop impact, *J SOIL WATER CONSERV*, **9**, 70-76.
- Oh, Y.J., Kim, M.H., Na, Y.E., Hong, S.H., Paik, W.K., and Yoon, S.T., 2012, Vulnerability assessment of soil loss in farm area to climate change adaption, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **45**(5),

711-716.

Sparks, D.L., 1995, Environmental Soil Chemistry, Academic Press, San Diego, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto.

Wainwright, J., Parsons, A.J., and Abrahams, A.D., 2000, Plot-scale studies of vegetation, overland flow and erosion interactions: case studies from Arizona and New Mexico, *Hydrol. Pro-*

*cess*, **14**(16-17), 2921-2943.

Yang, J.E., Jung, J.B., Kim, J.E., and Lee, G.S., 2008, Ag-Environmental Science, CIR.

Yun, S.W., Jin, H.G., Kang, S.I., Choi, S.J., Lim, Y.C., and Yu, C., 2010, A comparison on the effect of soil improvement methods for the remediation of heavy metal contamination farm land soil, *J. Korean Geotechnical Society*, **26**(7), 59-70.