

정화 처리토가 렌틸(콩과식물)의 지상부 및 뿌리 성장에 주는 영향에 대한 정량평가

박혜선 · 강수아 · 배범한*

가천대학교 토목환경공학과

Quantifying Inhibitory Effects of Reclaimed Soils on the Shoot and Root Growth of Legume plant Lentil(*Lens culinaris*)

Hyesun Park · Sua Kang · Bumhan Bae*

Department of Civil & Environmental Engineering, Gachon University

ABSTRACT

A series of pot experiments were conducted to quantitatively estimate inhibitory effects of reclaimed soil on the growth of Lentil (*Lens culinaris*) with two soils remediated by land farming (DDC) and low temperature thermal desorption(YJ), respectively. After cultivation in a growth chamber for 8 days, plants were harvested for the analysis of 8 indices including chlorophyll-a and carotenoid in leaves, shoot fresh weight, root dry weight, root length, number of later roots, specific root length (SRL) as well as germination rate in comparison to control experiment conducted on nursery soil. Root length was estimated by SmartRoot program from the digital images of the roots. The results showed germination rate on YJ and DDC soil decreased 29 and 71%, respectively. In comparison to the control, the averaged value of the 8 indices for YJ and DDC soil showed overall growth inhibition was 48 and 68%, respectively. When the same experiment was conducted with 25% (W/W) vermiculate amended soil, plant growth on each soil was comparable to that of the control. The results implies reclaimed soils requires additional processes and/or amendments to reuse for plant growth.

Key words : Chlorophyll-a, Inhibition, Lentil, Germination, Reclaimed soil, Specific root length

1. 서 론

오염토양정화는 원위치처리 및 반출처리로 구분되는데, 부지여건 및 민원 발생 등의 다양한 원인으로 반출처리가 허용되면서, 2013년 연평균 30만톤(환경부, 2013)에서 2019년에는 58만톤으로 꾸준히 증가하는 추세를 보였다(환경부, 2020). 정화방법으로 처리한 토양(이하 처리토)은 처리공정에 따라 원토양의 물리화학적/생물학적 특성이 변화하는데, 열처리한 토양은 고온에서 소성되어 유기물 및 영양물질 보유량 감소, 분해자(미생물) 사멸 및 선별과정에 의한 미세토 함량증가와 유분에 의한 토양점착성 증가

로 통기성이 감소하였다(Yi et al., 2012, 2013). 토양경작법을 적용하면 총미생물수와 urease 활성이 유의적으로 증가하지만, 이화작용으로 총유기물량과 총질소량이 50% 이상 감소하였다(Besalatpour et al., 2011; Yi et al., 2012). 토양 미생물 활성과 미생물량 증가는 오염물질 분해미생물의 유의적 증가에 기인하며, 경작법 적용횟수에 따라 원토양 미생물과는 다른 미생물군집으로 변화하였다(Picado et al., 2001; Bergsveinson et al., 2019). 그러나 생물처리법 적용 후에도 처리토에 잔류하는 TPHs와 처리과정에서 축적되는 에틸렌은 식물의 정상적 성장을 저해하였다(Choi, et al., 2010; MoE, 2007).

처리토는 토양으로서의 기존 가치가 저하되어 재활용되지 못하고 대부분 성토재 및 복토재로만 사용되고 있다(한수호 등, 2020). 처리토 재활용이 활발하지 못한 것은 오염토양이라는 선입견도 있으나(환경부, 2020), 상기한 바와 같이 선별과정에서 발생하는 미세토 함량 변화 등과 같은 물리적 특성변화, 공정에서 첨가된 화학약품과 잔류

주저자: 박혜선, 학생연구원

공저자: 강수아, 학생연구원

*교신저자: 배범한, 정교수

Email: bhbae@gachon.ac.kr

Received : 2021.08.16 Reviewed : 2021.09.15

Accepted : 2021.09.28 Discussion until : 2021.12.31

오염물질에 의한 화학적 변화 및 미생물상의 급격한 변화로 원토양 용도에 적합하지 못하기 때문일 수도 있다. TPH 열탈착토양에 볏짚 토끼풀을 재배한 결과, 지상부 생장이 500°C 처리토에서는 50%이상 감소하고, 750°C 처리토에서는 거의 자라지 못하였다(Pape et al., 2015). 토양경작 처리토에서 상추를 재배한 결과 뿌리길이에서는 변화가 없었으나, 지상부 생체량이 비오염대조구에 비해 39% 감소하였다(Lee et al., 2020), 이상의 결과에서 처리토가 식물생장을 저해할 수도 있음을 알 수 있다.

건강한 토양은 생태계와 토지사용용도에 맞게 하나의 활기찬 생명계의 요소로 작용하는 수용능력을 가지고, 식물과 동물의 생산성을 지원하고 수질과 대기질을 유지하거나 향상시키고, 식물과 동물의 건강을 증진한다. 토양생성은 식물, 동물 및 미생물의 공동작용이며, 생산자인 식물의 원활한 생장을 위한 생태적 투자이기에(Doran and Zeiss, 2000), 식물생장은 건강한 토양을 판별하는 중요한 지표로 간주된다. 이에 OECD(2003)에서도 토양에 작물로 사용하는 식물종자를 파종하고 2~3주간 재배하여 발아율, 지상부 및 지하부 생체량으로 토양 유효독성농도를 산정하는 실험법을 규정하고 있다. 그러나 토양과 가장 밀접하게 접촉하고 식물생장근원인 뿌리생장을 건조중량으로만 평가함으로써 토양이 식물체에 미치는 악영향을 충분히 해석하지 못하는 단점이 있다. 최근 식물 생장분석에 고해상도 디지털 이미지로 뿌리의 물리적 제원을 관측하는 다양한 방법과 프로그램이 개발되어(Lobet et al., 2011; Schneider et al., 2012), 길이, 부피 및 측근의 수 등을 뿌리 생장의 지표로 사용할 수 있게 되었다. 처리토는 오염물질 농도가 낮아 화학물질에 의한 독성영향보다 타 요인에 의한 식물생장저해가 높을 수도 있으므로, 악영향을 보다 광범위하게 관측하기 위해서는 뿌리생장에 대한 해석도 필요할 것이다.

대상 작물은 렌틸(*Lens culinaris* Medic.)을 선정하였는데, 렌틸은 가벼운 양토에서 흑색 vertisol까지 넓은 범위의 토양에서 잘 성장하여, 아시아, 중동 및 북미 지역 등 전세계적으로 넓게 재배되는 콩과식물이다(Wani et al., 2008; Alam et al., 2019). 렌틸은 생산/소비량이 많은 식용작물이기에 중금속(As, B, Cu, Pb, Zn) 축적에 의한 독성 및 인체로의 전이 연구에 널리 사용되었다(Wani et al., 2008; Cokkizgin and Cokkizgin, 2010; Janas et al., 2010; Tepe and Aydemir, 2011; Ahmed et al., 2012; Alam et al., 2019). 이외에도 오존독성이 식물효소 발현에 미치는 영향(Maccarrone et al., 1997) 및 TiO₂ 나노입자에 의한 유전자 손상연구(Khan et al., 2019)에도 사

용되었다. 또한 렌틸은 종자획득이 쉽고, 콩과식물 특성상 배유에 있는 영양분으로 빨리 성장하며, 무엇보다 뿌리가 단단하여 뿌리 생장의 관측에 적절한 식물종이다.

본 연구에서는 처리토가 식물에 주는 악영향을 정량적으로 관측하기 위해, 2가지 종류의 처리토에 렌틸을 파종하고 식물생장상에서 재배하여 수확한 다음 렌틸 발아율, 지상부 생체량 및 주요 성분, 뿌리 길이 및 측근 등을 정량적으로 비교분석하였다.

2. 실험방법 및 분석방법

2.1. 포트 실험

2.1.1. 종자 선별 및 전처리

대상 식물로는 직근을 가진 쌍떡잎 대표식물로 렌틸을 선정하였는데, 렌틸은 발아율이 높고, 뿌리털이 거의 없고 뿌리가 굵고 단단해서 온전한 상태로 수확할 수 있었다. 냉장고(4°C)에서 보관중인 렌틸 종자(해들윈)는 모양과 색이 일정하고 손상되지 않은 것을 골라 비중선별한 다음, 발아를 일정하게 하기 위해 증류수에 24시간 불린 뒤 파종하였다.

2.1.2. 포트 준비 및 파종

실험 토양 2종은 동두천 토양경작 처리토(DDC), 여주 열탈착 처리토(YJ)로 사용 전에 7번 체로 체가름하였다. 대조군으로는 질석을 10%(W/W) 혼합한 원예상토(농우바이오)를 사용하였다. 실험토양은 배수성이 나쁘고 건조되면서 판상으로 굳는 현상이 관측되었다. 이에 각각의 실험 토양에 25%(W/W)질석(vermiculate)을 첨가하여 동일한 실험을 실시하고, 토양 물리적 특성 변화가 렌틸 발아 및 생장에 미치는 영향도 관찰하였다. 포트는 50 mL Falcon vial 하단에 2개의 직경 3 mm 배수 구멍을 뚫은 다음, 자중으로 다짐하면서 토양을 넣었는데 최종 토량은 대조군, 처리토, 처리토+25%질석이 각각 15±2, 75±5 및 60±4 g이었다. 각 포트는 8배수로 준비하고, 화분걸이에 고정된 다음, 배수 구멍으로 물이 빠질 때까지 증류수를 부어주었다. 토양에 수분이 충분히 스며들면 포트 중앙부에 1.0 cm 깊이로 종자를 심고 주변 흙으로 종자를 덮은 후, 식물생장상에서 배양하였다. 배양 조건은 온도 25°C, 습도 60%, 낮 18시간/밤 6시간이며, Apogee Quantum Flux Meter MQ-200로 토양 표면에서 측정된 PAR (Photosynthetically Active Radiation)은 130~140 μmol/m²·s 이다. 배양을 종료할 때까지 2일 간격으로 증류수를 충분히 부어주며 생장을 관찰하였다.

2.1.3. 식물체 수확 및 관측

배양 8일차에 대조군 식물이 충분히 성장하여 실험을 종료하고, 식물을 수확하였다. 뿌리를 분리할 때 뿌리의 손상을 최소화하기 위해 수조에 충분히 물을 담고 포트를 한 시간 이상 담아두어 배수 구멍을 통해 물이 스며들 수 있도록 하였다. 포트에서 흙을 분리하여 체에 올리고 살수하여 뿌리에서 작은 흙 입자까지 깨끗이 세척하였다. 뿌리가 마르지 않게 물을 담은 페트리디시(square dish 245 mm×245 mm×28 mm)에 식물체를 두고 일정 높이에 고정된 카메라(Canon G7 X Mark II)를 사용하여 수직으로 촬영하였다. 이때 이미지 해상도는 5472×3648 DPI(Dots per Inch)이었다.

수확한 식물체는 생체량 측정을 위해 총중량 측정 후, 절단하여 뿌리와 지상부를 나누어 뿌리 무게를 측정하였다. 이때 뿌리의 기준을 렌틸 종자의 아래 부분으로 하였고, 지상부는 생체량 측정 후 클로로필 a를 측정하는 데에 사용하고, 뿌리는 70°C에서 48시간 동안 건조한 후 건조 중량을 측정하였다.

2.1.4. 클로로필 a 및 Carotenoid 측정

지상부는 갈색 유리바이알에 담고, 80% 아세톤 20 mL를 넣은 다음, PTFE 라이너가 있는 캡으로 밀봉하여 1일간 냉장(4°C) 보관하였다. 그 다음 갈색 유리바이알에 담긴 렌틸 지상부와 아세톤을 50 mL conical tube(Falcon)에 옮기고, 80% 아세톤 10 mL로 갈색바이알을 세척하여 남김없이 conical tube로 옮긴 다음, 균질기(Polytron PT 2500E)로 분쇄하였다. 분쇄기에 남은 잔여물을 80% 아세톤과 핀셋을 이용하여 50 mL conical Falcon vial에 넣고, 80% 아세톤을 첨가하여 최종부피를 50 mL로 하였다. 분쇄 시 용액의 온도가 상승하지 않도록, 얼음욕조에 conical tube를 넣어 분쇄하였다.

지상부 클로로필 a(Chl.-a)와 carotenoid는 Lichtenthaler (1987)의 방법에 의해 측정하였다. 아세톤으로 추출한 시료는 0.2 µm PTFE 필터(Whatman)로 여과하여 석영 큐벳에 넣고, 분광광도계(Optizen, POP, Mechasy)로 470, 647 및 663 nm에서 흡광도를 측정하여, 다음 계산식에 의해 각각의 농도를 산정하였다.

$$\text{Chlorophyll } a \text{ (} C_a \text{)} \text{ (} \mu\text{g/mL)} = 12.25A_{663} - 2.79A_{647} \quad (1)$$

$$\text{Chlorophyll } b \text{ (} C_b \text{)} \text{ (} \mu\text{g/mL)} = 21.50A_{647} - 5.10A_{663} \quad (2)$$

$$C_{a+b} \text{ (} \mu\text{g/mL)} = 7.15A_{664} + 18.71A_{647} \quad (3)$$

$$\text{Carotenoids (} \mu\text{g/mL)} = \frac{1000A_{470} - 1.82C_a - 85.02C_b}{198} \quad (4)$$

2.1.5. 뿌리 길이 및 부피 측정

뿌리 길이와 부피는 다음과 같이 산정하였다. 사진을 Image J(Schneider et al., 2012) 프로그램으로 8 비트 RGB로 포맷을 전환하고, SmartRoot 프로그램(Lobet et al., 2011)으로 변환된 이미지를 읽었다. 축척에 해당하는 픽셀수와 주근(main root) 및 측근(lateral root) 뿌리의 시작점을 지정하면, 프로그램이 음영을 기준으로 픽셀단위로 식물 뿌리를 인식하고, 뿌리 길이, 두께 및 부피를 계산하였다.

2.2. 토양의 물리화학적 특성

토양 pH 및 EC는 토양:중류수(1:5) 방법으로 측정하였다. 이외에도 토성, 용적밀도, 토양수분함량(보수력), 유기물함량을 국립산림과학원(2014) 방법에 의거하여 측정하였는데, 토성은 피펫법으로, 유기물함량은 강열감량법으로 측정하였다. 이상과 같은 토양의 물리화학적 특성은 모두 2배수로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 처리토의 물리화학적 특성

실험에 사용한 처리토는 모두 1지역 기준으로 정화한 토양이며, 물리화학적 특성은 Table 1과 같이, DDC 토양 토성은 양토(loam)이었고, YJ 토양은 식양토(clay loam)로 점토 함량이 DDC에 비해 1% 높은 15.3%이었다. 토양 pH는 DDC와 YJ가 각각 7.0 및 8.2이었고, EC는 YJ 토양이 555 µS/cm로 DDC 토양에 비해 15배 이상 높았다. 열처리 토양은 일반적으로 처리온도가 높을수록 토양 pH가 상승하고, 250~500°C 구간에서는 전기전도도가 증가한다. Pape et al.(2015)에 의하면 500°C에서 처리한 토양 pH와 EC는 각각 9.0 및 948 µS/cm으로 YJ 토양처리온도는 이보다 낮을 것으로 추정된다.

물의 보수성을 나타내는 WHC(water holding capacity-1/3 bar)도 각각 19.5 및 20.8%로 큰 차이가 없었다. 유기물 함량은 DDC 토양이 3.7%로 YJ 토양에 비해 0.4% 높았다. 반면 용적밀도는 YJ 토양이 1.31 g/cm³으로 DDC 토양의 1.20 g/cm³보다 높았다. DDC 토양은 회갈색으로 뭉침 현상이 있었고, YJ 토양은 수분이 많으면 걸쭉한 액체로 변화하였고, 두 종류의 토양은 건조되면 딱딱하게 굳는 특성을 보였다. 질석 25%를 첨가한 경우, 토양이 경량화되고 보수력이 증가하였는데, WHC(1/3 bar)는 DDC 및 YJ 토양에서 각각 30.5 및 30.4%로 크게 향상되었고, 용적밀도는 각각 0.952 및 1.042 g/cm³로

Table 1. Physicochemical properties of treated soils

	DDC	YJ
soil texture	S:S:C=56.4:29.4:14.3	S:S:C=60.7:24.0:15.3
soil pH	7.0(±0.0)	8.2(±0.1)
soil EC (μS/cm)	36.9(±0.1)	555(±7.0)
initial water content (%)	14.3(±0.1)	5.6(±0.7)
WHC (%)	24.8(±0.1)	26.0(±0.1)
WHC (%)·1/3 bar	19.5(±0.7)	20.8(±2.5)
organic contents (%)	3.7±0.8	3.3±0.1
soil bulk density (g/cm ³)	1.193(±0.005)	1.314(±0.019)
	DDC+25% Vermiculite	YJ+25% Vermiculite
WHC (%)	34.9(±0.4)	34.1(±0.7)
WHC (%)·1/3 bar	30.5(±0.6)	30.4(±0.6)
soil bulk density (g/cm ³)	0.952(±0.001)	1.042(±0.017)

감소하였다.

각 처리토의 오염 전 원토양의 물리화학적 특성은 Lee et al.(2020)에 보고되었는데, 이 연구에서 DDC토양은 LF 토양으로, YJ토양은 HTTD 토양으로 기술되었다. DDC토양의 pH는 8.53으로 높고, 유기물 함량이 처리토에 비해 50% 정도로 낮았으며, YJ토양은 유기물함량이 처리토에 비해 약 30% 높았다. 그 이외에 크게 차이가 나는 항목은 없다.

3.2. 식물체 수확 및 측정

3.2.1. 처리토에서의 식물성장

각 처리구별 8배수로 파종한 결과, 대조군에서는 7개, YJ와 DDC 토양은 각각 5개 및 2개 포트에서 발아하여, 대조군에 비해 YJ 및 DDC 토양에서 발아율이 낮았다(Table 2). 다양한 식물종에 대한 TPH 식물발아/성장저해 연구결과에 의하면, 일반적으로 작물과 콩과식물은 TPH에 의한 발아저해가 크지 않으며(Besalatpour et al., 2008), 옥수수과 밀의 TPH에 대한 발아저해 EC₅₀은 각각 3.04 및 2.86%(약 30,000 mg/kg)로(Tang et al., 2011)

매우 높다. DDC 토양은 TPH를 1지역 기준 이하로 정화하였고, 물리화학적 특성이 특별히 다르지 않음에도 발아저해(>70%)가 높았다. 그 원인을 찾기 위해서는 식물 이외의 생태독성에 대한 연구도 필요할 것이라 판단된다. 수확한 지상부 생체량은 대조군이 0.1896 g으로 가장 높고, YJ 토양에서 0.1194 g, DDC 토양이 0.1040 g이었다(Table 2). 뿌리 건량(mg)은 YJ > 대조군 > DDC 토양으로, 대조군에서도 뿌리가 완전히 자라지 않은 2개체가 있어 대조군보다 YJ 토양에서의 뿌리 건량이 높았다.

수확한 식물체를 촬영하고, 변환하여 SmartRoot로 산정하는 과정의 이미지는 Fig. 1과 같다. SmartRoot는 뿌리를 직경이 일정하지 않은 원기둥으로 인식하여 길이 및 부피를 계산하는데, 주근은 빨간색, 측근은 노란색으로 표시되어 있다(Fig. 1, 3번째 칼럼). 주근을 포함한 뿌리 개수는 대조군, YJ 및 DDC에서 각각 16.1, 8.2 및 2.5개이었고, 평균뿌리 길이도 대조군, YJ 및 DDC가 각각 38.4, 21.7 및 5.6 cm로 처리토에서 뿌리 발달 및 생장이 원활하지 않았다. 이에 각 식물체의 SRL(Specific Root Length)로 비교하였다. SRL은 단위 중량당 뿌리 길이로(식 5), 식물

Table 2. Biometrics of Lentil harvested from pot experiments. Initial number of replicates were eight. (mean±s.d.)

Soil	Control	YJ	YJ+25% vermiculate	DDC	DDC+25% vermiculate
No. of seed germinated	7	5	6	2	3
Germination (%)	87.5	62.5	75.0	25.0	37.5
Shoot FW (g)	0.1896 (±0.0597)	0.1194 (±0.0474)	0.1312 (±0.0476)	0.1040 (±0.041)	0.1017 (±0.0281)
Root DW (mg)	7.00 (±4.48)	7.36 (±1.99)	5.33 (±3.30)	6.60 (±2.97)	4.53 (±4.74)
Lateral root no.	16.1 (±8.0)	8.2 (±5.0)	11.3 (±5.6)	2.5 (±3.5)	15.0 (±7.8)
Root length (cm)	38.4 (±22.0)	21.7 (±18.6)	51.7 (±18.8)	5.6 (±5.1)	38.1 (±33.8)
SRL (cm/mg-DW)	5.5 (±1.6)	2.8 (±2.3)	12.3 (±5.5)	0.8 (±0.4)	9.5 (±1.6)
Chlorophyll a (ug/g-FW)	525.5 (±233.5)	238.6 (±177.3)	635.1 (±221.3)	74.7 (±105.7)	750.7 (±319.3)
Carotenoid (ug/g-FW)	34.1 (±27.8)	10.8 (±6.7)	30.5 (±28.1)	9.3 (±1.1)	31.1 (±36.7)

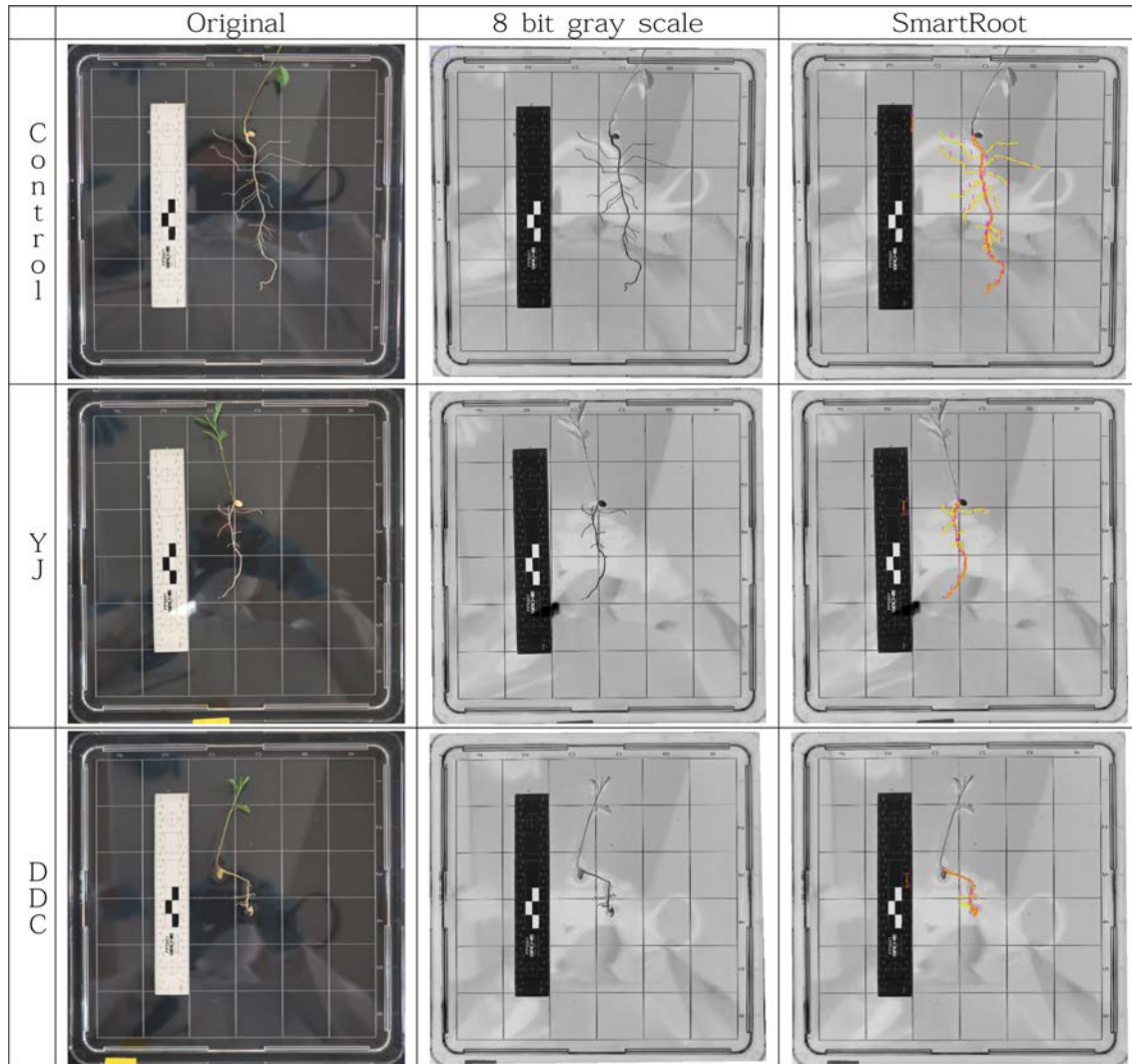


Fig. 1. Steps of image processing. Original digital image (left), conversion to 8-bit gray scale image by ImageJ (middle), and root identification and estimation of length/volume by SmartRoot program (right).

건강 및 토양과의 관계를 나타낼 때 사용하는 지표이며 토양비옥도 및 식물 스트레스를 간접적으로 측정할 수 있다(Eissenstat, 1991; Kramer-Walter et al. 2016; Ostenen et al., 2007).

$$SRL = \frac{L(\text{root length})}{M(\text{root dry weight})} \quad (5)$$

SRL로 비교하면 대조군이 5.5 cm/mg-DW로 가장 크고, YJ 토양과 DDC 토양은 각각 대조군 대비 51% 및 15%인 2.3 및 0.8 cm/mg-DW에 불과하여, 식물이 성장에 저해를 받는 것이 재확인되었다. 근권 생장이 낮은 것은 지상부 성장에도 영향을 주었다. 지상부 생체량 이외에도 Chl.-a와 carotenoid 함량을 비교하면, YJ 토양 Chl.-a

와 carotenoid는 각각 대조군의 46 및 32%이고, DDC 토양에서는 대조군 대비 각각 14 및 27%에 불과하였다.

이상의 결과를 바탕으로 총 8가지 지표값에 대하여 대조군을 1.0으로 하고, YJ 및 DDC 토양의 지표값을 레이더 그래프로 비교한 결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 하단 부분은 뿌리 관련 지표를 배치하였고, 상반부에는 발아율, 지상부 생체량 및 Chl.-a 등과 같이 지상부 관련 지표를 배치하였다. 처리토를 대상으로 실험한 결과, 지하부 건강(R.-DW)을 제외한 모든 지표에서 대조군에 비해 작은 값을 보였다(Fig. 2a). 지표를 모두 평균하면, YJ 토양은 대조군 대비 58%이고, DDC 토양은 32%에 불과하였다.

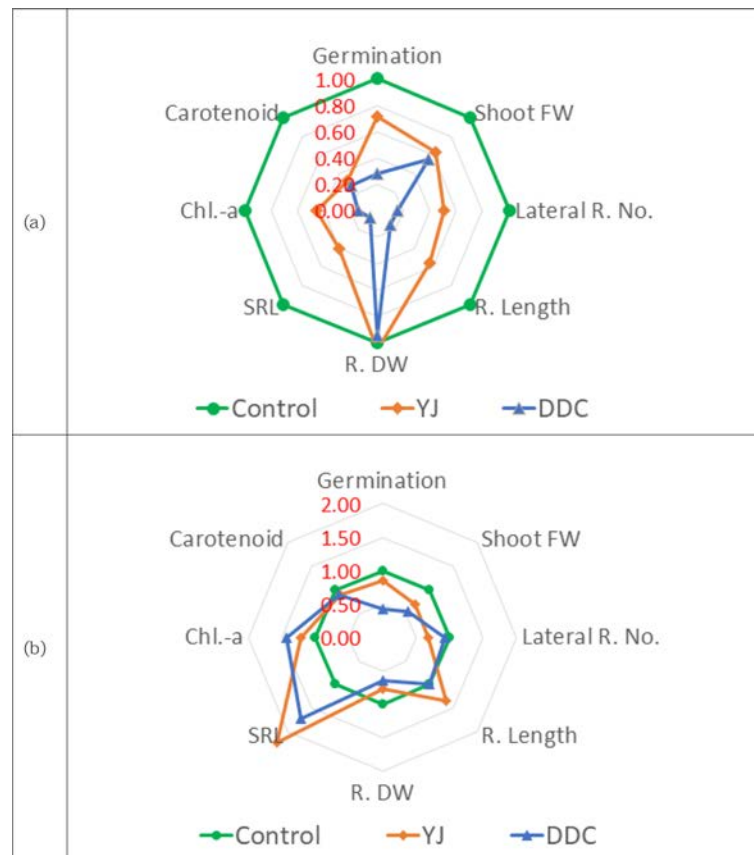


Fig. 2. Radar graph showing comparison of eight indices of lentil germination and growth on reclaimed soils relative to nursery soil. Each value of plant growth index on nursery soil was set to 1.0. (a) Reclaimed soils, (b) Reclaimed soils amended with 25% (W/W) vermiculate.

3.2.2. 처리토+25% 질석 첨가토양에서의 식물성장

처리토에 질석 25%(W/W)를 첨가한 경우, 렌틸 발아는 1개체씩만 증가하여, YJ 토양에서 6개체, DDC 토양에서는 3개체가 발아하였다. 그러나 지상부 생체량과 지하부 건량은 크지 않았는데, YJ 토양에서는 대조군 대비 약 70%, DDC 토양에서는 약 60%에 불과하였다. 반면, Chl.-a 함량은 각각 1.22 및 1.44배 증가하였고, 뿌리 성장도 활발하여 대조군 대비 SRL값이 YJ 토양과 DDC 토양에서 각각 2.22 및 1.72배 증가하였다(Table 2). 뿌리 건량이 작음에도 SRL 값이 큰 것은 가는 뿌리발달을 의미한다. 또한 토양경작도는 미생물 활성화를 위한 충분한 영양물질을 공급하고(Lukic et al., 2017), 열탈착에서도 온도가 낮을수록 영양소인 질소 및 인 손실이 작다(Pape et al., 2015). 그러므로 질석 첨가로 통기성/보수성이 회복되어 뿌리 발달이 증가한 것이라 판단된다. 다만, 그 뿌리가 대조군에 비해 굵지 못하고 가늘게 발달하였다.

질석 첨가토양에서 성장한 렌틸과 대조군에 대해 8개

지표를 비교하여 작성한 레이더 그래프는 Fig. 2b와 같다. 질석을 첨가한 처리토양에서 뿌리 길이, SRL, Chl.-a, 및 carotenoid는 대조군과 대등하거나 큰 값을 보이고 있으나, 지상부 생체량 및 지하부 건량과 발아율은 여전히 작은 값을 보였다. Lim et al.(2013)은 농작물 중자를 TPH로 오염된 물에 침지하여 발아 및 유식물 생장을 조사하였다. 대부분의 작물이 500~2500 mg-TPH/L에 침지했을 때 발아 및 생장저해를 보이지 않았으나, 양파, 파, 들깨는 발아율이 최고 38.6% 이상 감소하였고, 유식물 생장도 현저히 저하되었다. 그러므로 DDC 토양에는 렌틸 발아를 저하시키는 특정 성분이 있는 것이라 판단되며, 다른 식물종에 대한 연구가 필요할 것이다. 상기한 모든 지표를 평균하면 YJ 토양은 대조군 대비 108%이고 DDC 토양은 95%에 달하여 대조군과 대등한 값을 보였다. 이상의 결과와 같이 처리 공정에서 발생하는 토양의 특성변화를 확인하고, 그에 해당하는 적절한 처리를 할 수 있다면, 처리토의 식물성장저해를 방지할 수 있을 것이다.

4. 결 론

토양경작법(DDC)과 저온열탈착법(YJ)으로 TPH 오염을 정화처리한 토양에 렌틸을 8배수로 식재하고, 발아율과 유식물 생장에 미치는 영향을 원예상토에 식재한 대조군과 비교하였다. 기존 식물에 의한 토양 독성조사방법인 발아율, 지상부 생체량, Chl.-a, carotenoid, 및 뿌리 건강이외에 뿌리길이, 측근의 수 및 SRL을 새로운 지표로 추가하였고, 뿌리를 수확하여 간편하게 측정할 수 있는 방법을 개발하였다. 그 결과, 전체 지표를 평균하면 YJ 토양은 대조군 대비 58%이고, DDC 토양은 32%이었다. 처리토에 질석을 25% 첨가하여 물리적 특성을 개선한 다음 동일한 실험을 반복한 결과, 전체 지표를 평균하면 YJ 토양은 대조군 대비 108%이고 DDC 토양은 95%로 개선되었다.

이상의 실험결과에 의하면, 처리토에서의 식물생장 및 보다 세분화된 뿌리 생장 분석으로 토양의 상태를 평가할 수 있는 가능성이 있으며, 상기한 8개의 지표이외에 적절한 지표를 선정하고 다양한 토양에 대하여 적용하여 자료를 축적한다면 처리토의 생태 독성 평가 혹은 토양 건강성 평가에 적용할 수 있다고 사료된다.

그러나 렌틸 발아율이 DDC 토양에만 민감하게 반응하는 것과 같이 (i) 단일 식물종을 사용하여 측정하였기에 식물종 전체에 대한 대표성이 부족하고, (ii) 작은 포트로 인해 재배기간이 8일로 제한되어 뿌리 발달 후 시작되는 지상부 생장을 관측할 수 없으며, (iii) 반복수가 8회로 제한되어 측정값의 상대표준편차가 큰 점은 개선되어야 할 것이다. 이상과 같은 문제를 해결하기 위해서는 수염뿌리를 포함하는 다수의 식물종에 대한 실험을 실시하여 반복수, 생장기간 및 식물종별 재배방법에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다. 또한 rhizotron과 같이 식물 근권을 관찰하고 측정할 수 있는 방법도 개발이 필요하며, 식물의 물리적 특성이외에 식물생리를 대표할 수 있는 지표 등에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgment

본 연구는 한국환경산업기술원의 연구비지원(RE 202002009)으로 수행되었습니다.

References

국립산림과학원, 2014, 토양및 식물체 분석법: 토양물리성, 등

록번호 11-1400377-000748-01.

Han, S.H., Jung, M.C., Kim, J.W., Jeon, S.W., Nguyen, Q.T., Yoon, K.W., and Min, S.K., 2020, The occurrence and treatment status of off-site contaminated soils in Korea, *J. Soil Groundw. Environ.*, **25**(4), 1-6.

환경부, 2013, 토양정화실적 통계자료.

환경부, 2020, 제2차 토양보전 기본계획.

Ahmed, F.R.S., Alexander, I.J., Mwinyikione Mwinyihija, M., and Killham, K., 2012, Effect of arsenic contaminated irrigation water on *Lens culinaris* L. and toxicity assessment using lux marked biosensor, *J. Environ. Sci.*, **24**(6), 1106-1116.

Alam, M.Z., Hoque, Md. A., Ahammed, G.J., McGee, R., and Carpenter-Boggs, L., 2019, Arsenic accumulation in lentil (*Lens culinaris*) genotypes and risk associated with the consumption of grains, *Sci. Am.*, **9**, 9431.

Besalatpour, A., Hajabbasi, M.A., Khoshgoftarmanesh, A.H., and Dorostkar, 2011, Landfarming process effects on biochemical properties of petroleum-contaminated soils, *Soil Sediment Contam.*, **20**(2), 234-248.

Besalatpour, A., Khoshgoftarmanesh, A.H., Hajabbasi, M.A., and Afyuni, M., 2008, Germination and growth of selected plants in a petroleum contaminated calcareous soil, *Soil Sediment Contam.*, **17**(6), 665-676.

Bergsveinson, J., Perry, B.J., Simpson, G.L., Yost, C.K., Schutzman, R.J., Hall, B.D., and Cameron, A.D.S., 2019, Spatial analysis of a hydrocarbon waste-remediating landfarm demonstrates influence of management practices on bacterial and fungal community structure, *Microb. Biotechnol.*, **12**(6), 1199-1209.

Choi, M.-Z., Kim, J.-Y., Kim, J.-H., and Choi, S.-I., 2010, A study on effects of oil contaminated soil on the growth of plant, *J. Soil Groundw. Environ.*, **15**(1), 50-56.

Cokkizgin, A. and Cokkizgin, H., 2010, Effects of lead (PbCl₂) stress on germination of lentil (*Lens culinaris* Medic.) lines, *Afr. J. Biotechnol.*, **9**(50), 8608-8612.

Doran, J.W. and Zeiss, M.R., 2000, Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality, *Appl. Soil Ecol.*, **15**(1), 3-11.

Eissenstat, D.M., 1991, On the relationship between specific root length and the rate of root proliferation : A field study using citrus rootstocks, *New Phytol.*, **118**(1), 63-68.

Janas, K.M., Zielinska-Tomaszewska, J., Rybaczek, D., Maszewski, J., Posmyk, M.M., Amarowicz, R., and Kosinska, A., 2010, The impact of copper ions on growth lipid peroxidation and phenolic compound accumulation and localization in lentil (*Lens culinaris* Medic.) seedlings, *J. Plant Physiol.*, **167**(4), 270-276.

Khan, Z., Shahwar, D., Ansari, M.K.A., and Chandel, R., 2019,

- Toxicity assessment of anatase (TiO₂) nanoparticles: A pilot study on stress response alterations and DNA damage studies in *Lens culinaris* Medik, *Heliyon*, **5**(7), e02069.
- Kramer-Walter, K.R., Bellingham, P.J., Millar, T.R., Smissen, R.D., Richardson, S.J., and Laughlin, D.C., 2016, Root traits are multidimensional: specific root length is independent from root tissue density and the plant economic spectrum, *J. Ecol.*, **104**(5), 1299-1310.
- Lee, S.H., Lee, J.H., Jung, W.C., Park, M., Kim, M.S., Lee, S.J., and Park, H., 2020, Changes in soil health with remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soils using two different remediation technologies, *Sustainability*, **12**(23), 10078.
- Lichtenthaler, H.K., 1987, [34] Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes, *Methods Enzymol.*, **148**, 350-382.
- Lim, S.J., Kim, J.H., Choi, G.H., Kwon, Y.B., Kim, D.H., and Park, B.J., 2013, Germination rate and radicle growth inhibition in crops by total petroleum hydrocarbons (TPH), *Korean J. Environ. Agric.*, **32**(4), 273-278.
- Lukic, B., Panicoc, A., Huguenotd, D., Fabbicino M., van Hullebusch, E.D., and Esposito, G., 2017, A review on the efficiency of landfarming integrated with composting as a soil remediation treatment, *Environ. Technol. Rev.*, **6**(1), 94-116.
- Lobet, G., Pages, L., and Draye, X., 2011, A novel image-analysis toolbox enabling quantitative analysis of root system architecture, *Plant Physiol.*, **157**(1), 29-39.
- Maccarrone, M., Veldink, G.A., Vliegthart, J.F.G., and Agro, A.F., 1997, Ozone stress modulates amine oxidase and lipoxygenase expression in lentil (*Lens culinaris*) seedlings, *FEBS Lett.*, **408**(2), 241-244.
- OECD, 2003, OECD Guideline for the Testing of Chemicals, Terrestrial Plant Test, 208: Seedling Emergence and Seedling Growth Test.
- Ostonen, I., Puttsepp, U., Biel, C., Alberton, O., Bakker, M.R., Lohmus, K., Majdi, H., Metcalfe, D., Olsthoorn, A.F.M., Pronk, A., Vanguelova, E., Weih, M., and Brunner, I., 2007, Specific root length as an indicator of environmental change, *Plant Biosyst.*, **141**(3), 426-442.
- Pape, A., Switzer, C., Mccosh, N., and Knapp, C.W., 2015, Impacts of thermal and smouldering remediation on plant growth and soil ecology, *Geoderma*, **243-244**, 1-9.
- Picado, A., Nogueira, A., Baeta-Hall, L., Mendonça, E., de Fátima Rodrigues, M., do Céu Sáágua, M., Martins, A., and Anselmo, A.M., 2001, Landfarming in a PAH-contaminated soil, *J. Environ. Sci. Health*, **A36**(9), 1579-1588.
- Schneider, C.A., Rasband, W.S., and Eliceiri, K.W., 2012, NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, *Nat. Methods*, **9**(7), 671-675.
- Tang, J., Wang, M., Wang, F., Sun, Q., and Zhou, Q., 2011, Ecotoxicity of petroleum hydrocarbon contaminated soil, *J. Environ. Sci.*, **23**(5) 845-851.
- Tepe, M. and Aydemir, T., 2011, Antioxidant responses of lentil and barley plants to boron toxicity under different nitrogen sources, *Afr. J. Biotechnol.*, **10**(53), 10882-10891.
- Wani, P.A., Khan, Md.S., and Zaidi, A. 2008, Impact of zinc-tolerant plant growth promoting rhizobacteria on lentil grown in zinc-amended soil, *Agron. Sustainable Dev.*, **28**(3), 449-455.
- Yi, Y.M., Oh, C., Kim, G., Lee, C., and Sung, K., 2012, Changes in the physicochemical properties of soil according to soil remediation methods, *J. Soil Groundw. Environ.*, **17**(4), 36-43.
- Yi, Y.M., Kim, G., and Sung, K., 2013, Effects of soil remediation methods on the biological properties of soils, *J. Soil Groundw. Environ.*, **18**(8), 73-81.