

처리토에 녹비 식물 청보리 경작 시 휴믹 물질이 식물생장 및 생물학적 토양 인자에 주는 긍정적 영향

강수아 · 박혜선 · 이윤노 · 배범한*

가천대학교 토목환경공학과

Positive Effects of Humic Substances on Plant Growth and Biological Soil Indicators when Spring barley is Green Manured on Reclaimed Soils

Sua Kang · Hyesun Park · Younrho Lee · Bumhan Bae*

Department of Civil & Environmental Engineering, Gachon University

ABSTRACT

A study was performed to investigate the positive impacts of humic substances (HS) on the growth of green barley, a type of green manure plant. The study was conducted in a pot culture using two different types of reclaimed soils that had been treated by land farming (DDC) and thermal desorption (YJ) methods, respectively. The experimental conditions consisted of three treatments: plant only (P), plant plus 2% HS, and no plant (control). After 89 days of culture in a controlled growth chamber, the growth of spring barley and activity of seven soil enzymes were measured. The results indicated that the addition of HS had a substantial ($p < 0.10$) positive effect on shoot biomass in both types of soil. Furthermore, the addition of HS notably ($p < 0.05$) enhanced all seven soil enzyme activities in both soils. Both the aboveground and belowground parts of barley plants were returned to soil and aged for 10 weeks in the same growth chamber, which resulted in notable enhancement in soil health indicators. These improvements included an increase in organic matter, a drop in bulk density, and an increase in the activity of seven different soil enzymes. When lentil seeds were planted in the aged soils, the development of the seedlings was more vigorous than that in the control in both soils, although allelopathy of barley suppressed lentil germination in soil with pH 7.0 but not in soil with pH 8.5.

Key words: Allelopathy, Humic substance, Reclaimed soil, Soil enzyme, Green barley, Specific root length

1. 서 론

국내 오염토양의 정화물량은 연평균 5백만 m^3 이상 발생하며, 그 중에서 약 10%의 토양이 불가피한 사유로 외부로 반출되어 처리되었고, 2016년 처리물량은 2005년 대비 10배인 575,814 m^3 으로 처리량도 매년 증가하는 추세이다(Han et al., 2020). 그러나 토양정화공정을 거친 토양(이하 처리토)는 정화공정에 따라 유기물 및 영양물질

감소, 토양미생물군 사멸 혹은 천이, 미세토양 비율증가로 인한 통기성/투수성 감소와 미량 잔류물질에 의한 식물생장 저해 등과 같은 부작용 발생으로 인해, 원토양의 특성을 잃고 토양 건강성이 전반적으로 저하된다(Bergsveinson et al., 2019; Besalatpour et al., 2011, Choi, et al., 2010; Yi et al., 2012). 귀중한 자원인 처리토는 원토양 특성 상실과 토양질의 악화 및 처리토를 기피하는 경향으로 인해 극히 일부만이 토양환경보전법상의 1 및 2지역에서 재 활용되고, 대부분(97%)은 토목현장에서 성토재 혹은 복토재로 사용되었다(Han et al., 2020).

토양건강성이란 식물, 동물 및 인간의 생활을 유지하기 위해 필수적이며, 생명이 있는 생태계로 기능할 수 있는 지속적인 수용력(capacity)으로 정의된다(Doran and Safley, 1997; Karlen et al., 2019; Lehmann et al., 2020). 수많은 논의 끝에 토양건강성은 생태서비스라는 개념으로

주저자: 강수아, 가천대학교 토목환경공학과 학부연구생
공저자: 박혜선, 가천대학교 토목환경공학과 학부연구생
이윤노, 가천대학교 토목환경공학과 학부연구생
*교신저자: 배범한, 가천대학교 토목환경공학과 교수
Email: bhbae@gachon.ac.kr

Received : 2024. 01. 26 Reviewed : 2024. 02. 08

Accepted : 2024. 02. 17 Discussion until : 2024. 04. 30

수렴되었으며(MEA, 2005), 토양건강성의 특성으로는 토양생물 및 토양미생물의 생명을 지지하는 동적인 환경조건, 물질순환 및 생명 유지에 필수적인 물질(음식, 섬유, 연료 및 피난처 등)을 공급할 수 있는 물리적 속성, 그리고 수질 및 대기질을 보전하는 역할이 포함된다(Karlen et al., 2019). 구체적인 지표로는 화학적 지표인 토양 pH, 양이온 교환능, 입자상 유기물 및 영양물질 농도 등이 있고, 물리적 지표로는 토성, 용적밀도, 공극율, 입단 안정성 및 보수력 등을 사용하며, 생물학적 지표로는 토양효소활성, 토양미생물량/군집, 생물다양성 및 토양호흡율 등이 사용되었고, 최근에는 토양 동물상도 포함되고 있다(Cardoso et al., 2013).

손상된 토양건강성을 회복하는 방법으로 첨가물을 투입하는 방법이 빠르고 효과적이지만, 입자상 유기물 혹은 질소 등과 같이 목표하는 물리화학적 혹은 생물학적 지표의 종류와 그에 대응하는 물질의 구입비용, 에너지 소모량(이송 및 혼합), 첨가물에 존재하는 중금속 혹은 미량화학물질 및 고농도 첨가물 투입에 의한 용출 가능성도 고려해야 한다(Larney and Angers, 2012). 토양의 특성변화와 같은 비정상 상태를 자연적으로 복원하는 것은 토양생물상이므로(Kibblewhite et al., 2008), 비록 시간이 소요되지만 녹비식물 혹은 피복식물을 재배하고 멀칭한다면 토양에 탄소를 고정하고 입자상 유기물을 공급하며, 뿌리 삼출물에 의한 토양미생물 및 생물상을 활성화함으로써 영양물질의 순환과 토양의 물리화학적 특성을 개선할 수도 있다(Baer and Birge, 2018). 콩과식물인 헤어리베치 재배로 후작 식물의 질소 유용도, 토양유기물 함량, 토양 구조 및 물 침투성이 증가하거나 개선되었고, 표토의 온도와 수분증발량 및 강수 유실이 감소하였다(Hartwig and Ammon, 2002). 월동 피복식물을 무경운으로 재배한 결과, 토양의 입단 안정성 증진과 용적 밀도 감소, 공극율 증가 및 토양표면의 투과저항 및 보수력 증진이 관측되었고(Villamil et al., 2006), 갈색대마 혹은 진홍토끼풀과 같은 고생체량 동계피복식물로 재배하면 탄소저장, 식물이용가능 질소를 포함한 유기물 증가 및 물리적 토양특성 개선의 효과가 있었다(Hubbard et al., 2013). 그러므로 반출 처리된 토양에서 녹비식물을 재배하면 심리적 거부감이 완화되고, 토양건강성을 회복하여 원토양 환원 혹은 토양 재활용 증진이 가능할 수 있을 것이다.

처리토양이 정상적인 식물재배에 적합하지 않은 경우, 식물생장을 촉진하기 위한 방법이 필요하다. 여러 촉진물질 중에서 휴믹물질(Humic Substance, HS)은 토양에서 자연적으로 생성되는 물질로, 토양에 살포하기 쉽고 경제

적일 뿐 아니라, 다양한 기작에 의해 식물생장을 증진한다. HS는 토양 유기물의 주성분으로 phenol-, carboxyl-, ketone-, hydroxyl- 등의 다양한 작용기를 가지고 있어, 킬레이트 결합, 완충작용, 양이온 교환, 점토-유기물 상호작용 등의 복합작용으로 식물생장과 토양건강성을 증진한다(Seyedbagheri, 2010). 또한 HS는 식물성장호르몬 및 자극제 역할(Trevisan et al., 2010), HS-Fe 결합에 의한 철 흡수 증가(Chen et al., 2004; Zanin et al., 2019), 토양미생물상 변화 혹은 유용미생물 벡터(Canellas and Olivares, 2014)와 근권의 생장과 분화 및 발달촉진(Nunes et al., 2019)등의 방법으로 식물생장을 보조하고 유용한 토양미생물군을 활성화한다. HS에 의한 식물생장 증진효과는 옥수수(Khaled and Fawy, 2011), 감자(Seyedbagheri, 2010; Ekin, 2019), 콩과식물(Nunes et al., 2019), ryegrass(Chen et al., 2004) 및 화훼류의 생장과 개화시간 증가(Nikbakht et al., 2008; Ahmad et al., 2013)에서도 확인되었다.

이에 본 연구에서는 식물생장에서 열탈착 처리토(YJ)와 토양경작 처리토(DDC)에 녹비식물인 청보리(*Hordeum vulgare* L.)를 2개월간 재배하면서 HS 첨가에 의한 식물생장증진을 비교분석하고, 토양건강성의 생물학적 지표인 토양효소활성 7종을 측정하여 토양미생물상 개선을 비교하였다. 또한 수확한 청보리를 토양에 녹비로 환원하고 10주간 숙성한 다음, 렌틸(*Lens culinaris*)을 파종하여 발아 및 유식물 생장을 비교하여, 향후 자연으로 환원했을 때 토양의 기본 생태서비스인 식물 생장 지지 여부를 확인하였다.

2. 실험방법 및 분석방법

2.1. 화분실험

식물생장 실험은 화분실험으로 실시하였다. 토양은 두 지역의 TPH 오염토를 각각 토양경작법으로 처리한 토양(DDC)과 저온열탈착법으로 처리한 토양(YJ)으로, 상부 직경 20 cm인 화분에 각각의 습윤 토양 1.8 kg을 넣고, 청보리 종자 10개를 파종한 다음 발아된 유식물 중에서 건강한 유식물 5개체만 유지하였다. 화분은 무처리구(Control), 청보리 식재구(P) 및 2% 중량비로 입상 HS(36 g)를 첨가한 청보리-HS 처리구(PH)로 구분하고, 각각 3배수로 준비하였다. 청보리 식재 화분은 온도 25°C, 습도 65%, 낮/밤 18/6시간으로 운영하는 식물생장실에서 재배하였다. 성장상 조도는 약 13,000 Lux이었으며, Apogee quantum flux meter(MQ-200)로 측정된 PAR(photosy-

nthetically active radiation)은 256 $\mu\text{mol}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ 이었다.

초기 1개월간은 물이 용출되지 않도록 매일 15~30 mL 씩 가변적으로 주입하였고, 청보리가 15 cm 이상 자란 2 개월부터 수확할 때 까지 75 mL/일의 비율로 주입하였다. 동시에 1주일 간격으로 액체비료(N:P:K 6%-8%-5%)를 1/500로 희석하여 물대신 주입하였다. 재배 15일차부터 1 주일 간격으로 청보리 5개체의 길이 생장을 각각 측정하고, 무작위로 3개체를 선정하여 잎의 하단, 중단 및 상단 3개 지점에서 SPAD 502+(Konica-Minolta)로 SPAD값을 측정하는 다음, 측정치 평균값을 클로로필 농도로 사용하였다.

청보리 재배는 파종 후 89일 후에 종료하고 수확하여, 지상부 생체량, 토양 pH, EC, 유기물 함량, 용적밀도 및 토양효소활성 7종을 측정하였다. 수확한 지상부는 70°C에서 3일간 건조하여 건량을 측정하는 다음, 뿌리와 함께 전정가위를 사용하여 1.0 cm 이하의 크기로 자르고 토양에 환원하였다. 식물을 환원한 토양은 빛은 차단하지만 상부가 열려있어 통기가 되는 화분용 플라스틱 백에 넣어 식물생장상에서 10주간 숙성하면서, 매주 함수량을 측정하여 30%로 유지하였다.

2.2. 렌틸 발아 및 유식물 생장

처리토 재활용을 증진하기 위해서는 원토양에 환원했을 때 토양의 가장 기본적인 기능인 식물생장이 필수적이다. 또한 식물생장은 토양유실을 방지하며 토양건강성 회복을 가속화 할 수 있다. 이에 식물생장을 신속 간편하며 정량적으로 평가 할 수 있는 기법인 렌틸 식재 및 근권 평가 기법(Park et al. 2021)을 사용하여, 처리토의 건강성 회복여부를 평가하였다.

렌틸 실험은 9배수의 50 mL Falcon vial에 10주간 숙성한 토양 70 g을 넣고 렌틸 종자 1개를 파종하고, 상기한 바와 동일한 조건의 식물생장상에서 재배하였다. 파종 8일 후, 렌틸을 수확하여 지상부 및 지하부 건량, 지상부 Chl-a, carotenoid를 측정하고, 뿌리 사진을 촬영하였다. 뿌리 사진은 Image J(Schneider et al., 2012) 프로그램으로 포맷을 변환하고, SmartRoot 프로그램(Lobet et al., 2011)으로 뿌리 길이 및 부피를 산정하였다. 이 6개 지표와 발아율 및 다음의 식(1)로 계산한 SRL(Specific Root Length)을 포함하는 총 8개 지표로 식물생장을 비교하였다.

$$SRL = \frac{L}{M} = \frac{L}{\rho_{root} \times V_{root}} \quad (\text{cm/g}) \quad (1)$$

여기서, L 뿌리길이(cm), M 중량(g), ρ_{root} 뿌리 밀도(g/

cm^3), V_{root} 뿌리부피(cm^3)

2.3. 타감작용 확인 렌틸 발아시험

청보리에 의한 타감 작용(allelopathy)을 확인하기 위해 DDC 토양의 P 및 PH 처리구 숙성토양의 추출물에 렌틸 발아실험을 실시하였다. 토양 추출액은 40 mL amber vial에 에탄올: 토양의 비를 5:1 비율로 넣고 150 rpm에서 1시간 동안 진탕하고, 침전시켜 상정액을 준비하였다. 상정액을 이분할하여 하나는 그대로 사용하고, 나머지는 1 N NaOH 용액으로 pH를 8.5로 조절한 다음, 각각의 상정액에 렌틸 종자 30개를 한 시간 동안 담아두었다. 이후 멸균된 여과지 및 DIW 5 mL을 넣은 페트리 디시에 렌틸 종자를 파종하고, 25°C에서 암배양하면서 5일간 발아율을 관측하였다. 이때 증류수에 침지한 대조군도 동시에 실험하였다.

2.4. 분석방법

토양 pH 및 EC(electrical conductivity)는 토양:증류수 (1:5) 방법으로 측정하였다. 이외에도 토성, 용적밀도, WHC(water holding capacity) 및 유기물 함량을 산림과 학원(NiFoS, 2014) 방법에 의거하여 2배수로 측정하였는데, 토성은 피펫법으로, 유기물함량은 강열감량법으로 측정하였다.

토양효소는 측정방법은 다음과 같다. DHA(dehydrogenase activity)는 습윤 토양을 Pepper and Gerba(2004) 법으로 측정하고, 함수량으로 값을 보정하였다. 효소반응 산물인 PNP(para-nitrophenol) 농도를 측정하는 β -glucosidase(BG), N-acetyl- β -D-glucosaminidase(NAG), acid 및 alkaline phosphatase(Pase_a 및 Pase_alk) 및 Aryl-sulfatase(AS)는 Stott(2019)의 방법으로, 토양 Urease는 Kandler and Gerber(1988)법을 사용하였는데, 모두 2배수로 측정하였다.

지상부 Chl-a와 carotenoid는 잎을 균질기(Polytron PT 2500E)로 분쇄 후 80% acetone으로 추출하고, Lichtenthaler(1987)의 방법과 같이 식 (2)-(5)에 의해 산정하였다.

$$Chlorophyll\ a\ (C_a)\ (\mu\text{g}/\text{mL}) = 12.25\ A_{663} - 2.79\ A_{647} \quad (2)$$

$$Chlorophyll\ b\ (C_b)\ (\mu\text{g}/\text{mL}) = 21.50\ A_{647} - 5.10\ A_{663} \quad (3)$$

$$C_{a+b}\ (\mu\text{g}/\text{mL}) = 7.15\ A_{664} + 18.71\ A_{647} \quad (4)$$

$$Carotenoids\ (\mu\text{g}/\text{mL}) = \frac{1000A_{470} - 1.82C_a - 85.02C_b}{198} \quad (5)$$

여기서, A_{xxx} : 파장 xxx nm에서의 흡광도

2.5. 종자 및 화학약품

청보리 종자는 태림글로벌(대한민국)에서 구매하였고, 사용 전까지 4°C에서 냉장보관하였다. 렌틸은 해들원에서 구매하고 상온에서 보관하였다. 육안 선별한 종자는 HOCl로 소독하고 DIW(deionized water)로 3회 이상 세척한 다음, 80% 에탄올로 최종 소독/세척하고 파종하였다. 액체비료는 상품명 바이오가든(E&G, 대한민국)이었고, 입상 HS는 humic acid 함량 70%, 직경 4~5 mm인 상용 제품(HumicDG, The Anderson, USA)을 사용하였다.

토양효소 활성측정에 사용한 기질 및 화학물질은 triphenyltetrazolium chloride($\geq 98.0\%$, Sigma), *p*-nitrophenyl- β -D-glucopyranoside($\geq 98\%$, Sigma), *p*-nitrophenyl-N-acetyl- β -D-glucosaminide($\geq 99\%$, Sigma), *p*-nitrophenyl phosphate disodium salt hexahydrate(Calbiochem), potassium 4-nitrophenyl sulfate(Sigma), *p*-nitrophenol($\geq 99\%$, Junsei)이었다. 기타 실험에 사용된 화학물질은 모두 최소한 ACS grade이었으며, 용액제조 및 식물 급수에는 탈이온수(18.3 M Ω -cm)를 사용하였다.

3. 결과 및 분석

3.1. 처리토에서의 청보리 생장

실험에 사용한 DDC 및 YJ 토양의 모래 : 실트 : 점토비가 각각 56.4 : 29.4 : 14.3 및 60.7 : 24.0 : 15.3로 모두 사양토이었고, WHC는 각각 24.8 및 26.0으로 YJ 토양이 조금 높았다. DDC 토양의 pH와 EC는 7.0 및 36.9 μ S/cm에 반해, YJ 토양의 pH와 EC는 각각 8.5 및

555 μ S/cm로 높는데, 열처리 토양은 온도가 높을수록 pH와 EC가 증가하기 때문이다(Pape et al., 2015). 이는 열탈착 처리과정에서 토양에 존재하는 유기산이 분해되고, 토양유기물 분해과정에서 생성되는 알칼리 양이온이 토양의 수소이온을 치환하게 되어 pH가 상승하며, 이온물질의 농도 증가로 EC도 상승하기 때문이다(O'Brien et al., 2018). 토양 유기물 함량은 DDC 토양이 3.7%로 YJ 토양에 비해 0.4% 높았고, 용적밀도는 YJ 토양 1.31 g/cm³으로 DDC 토양보다 약 10% 더 높았다.

청보리 재배 36일차부터 수확 5일 전인 재배 84일차까지 1주일 간격으로 측정된 청보리의 길이 생장은 Fig. 1과 같다. 모든 토양에서 HS 첨가구의 초기 길이생장이 우세하였다. DDC 토양에서는 수확 전까지 HS 처리구의 키가 약 3 cm 컸으나(Fig. 1a) YJ 토양에서는 45일차부터 처리구 사이에서 길이생장 차이는 없었다(Fig. 1b). 최종 수확에서의 청보리 초장은 모든 재배구에서 32~35 cm이며, 오차를 생각하면 처리구 및 토양에 의한 유의적인 차이가 관측되지 않았다. 농도와 비교해 광량, 토양질 및 살충제 등에서 많은 차이가 있어 직접적인 비교는 어렵지만, 청보리 5 품종을 농토에 재배했을 때 품종별 평균초장 42~54 cm(Boussora et al., 2019)인 것에 비하면 약 25% 작았다.

청보리 잎의 클로로필 함량을 측정된 SPAD 값은 초기에는 PH 처리구(식물+HS)에서 상대적으로 높은 값을 보였으나, 52일부터는 두 토양 모두에서 식물만 식재한 P처리구에서의 SPAD 값과 유의적으로 차이가 나지 않았다(Fig. 2). 재배 52일까지는 SPAD 값이 증가추세였으나, 청보리 낱알이 열리기 시작한 다음부터 SPAD 값이 감소하기 시작했는데, 잎이 노랗게 되며 말라버리는 황숙기에

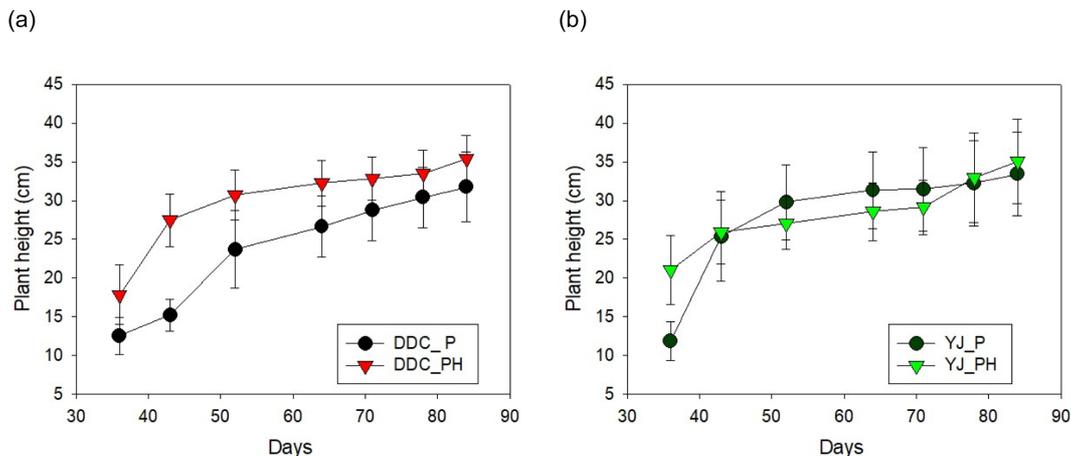


Fig. 1. The effects of humic substance (HS) treatment on longitudinal plant growth in the reclaimed soil. (a) growth in soil DDC; (b) growth in soil YJ.

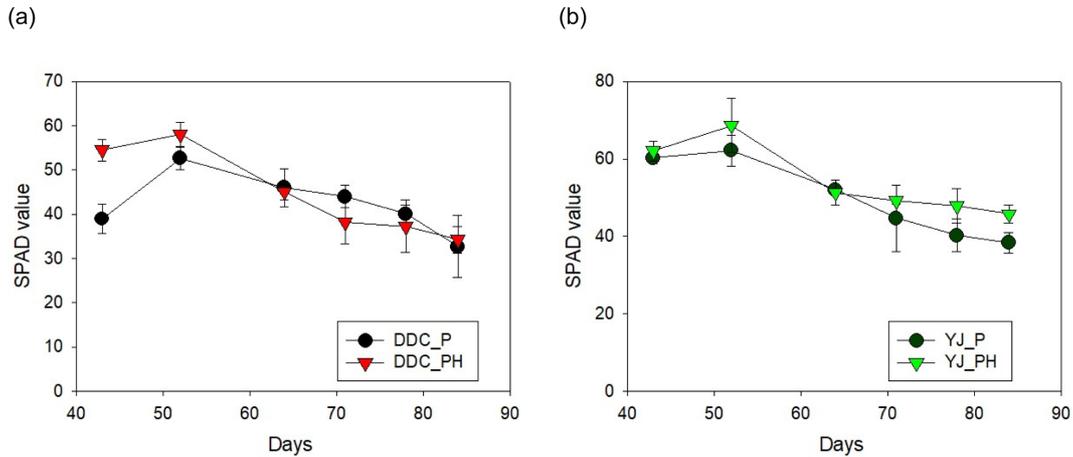


Fig. 2. The effect of humic substance (HS) treatment on chlorophyll content was measured by SPAD in the reclaimed soil. (a) green barley planted in soil DDC; (b) green barley planted in soil YJ.

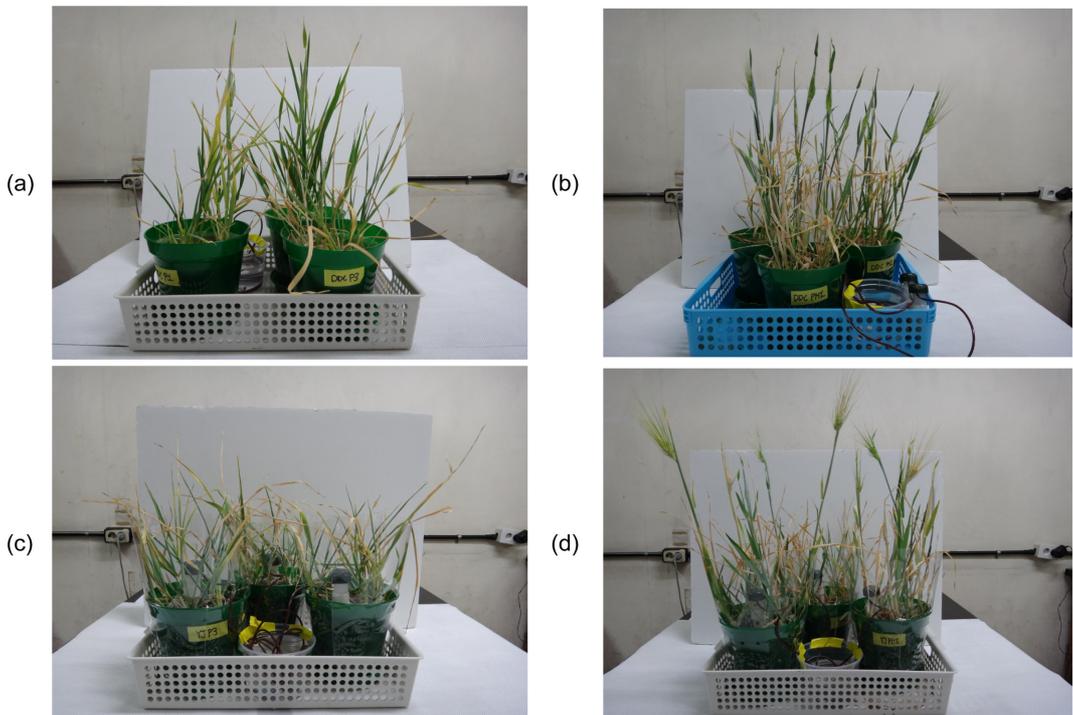


Fig. 3. The growth of green barley in the reclaimed soil. Pictures were taken on day 89 after sowing. (a) Plant only in soil DDC; (b) Plant+HS in soil DDC; (c) Plant only in soil YJ; (d) Plant+HS in soil YJ.

들어갔기 때문이라 사료된다. 이 황숙기가 시작되는 시간은 처리구별로 약간의 차이는 있었으나, 최종적으로는 모든 처리구의 청보리에서 관측되었다(Fig. 3).

청보리 뿌리는 수염뿌리로 수확과정에서 2차 뿌리가 모두 부스러지고, 뿌리와 토양을 정확하게 분리할 수 없어 지상부 생체만 수확하였다. 각 실험구에서 최종 수확한 청보리 생체량 및 건량은 Table 1과 같다. DDC 토양에

Table 1. Fresh and dry weight of green barley in the above-ground parts at day 89 after sowing

	Fresh Weight (g)	Dry Weight (g)
DDC_P	12.41 ± 5.26	1.45 ± 0.50
DDC_PH	18.50 ± 1.32	1.72 ± 0.44
YJ_P	12.61 ± 0.42	0.90 ± 0.22
YJ_PH	22.68 ± 8.78	2.33 ± 1.15

식물 및 식물+HS 처리구에 식재한 청보리 건량은 각각 1.45 및 1.72 g으로, HS를 투입한 처리구에서 16% 높았다. YJ 처리구에서는 HS 투입구에서 2.33 g이었고, 청보리만 식재한 곳에서는 0.90 g에 불과하여, HS 투입으로 건량이 1.6배 증가하였다. 식물체 지상부 건량에 대해 T-test한 결과, 90% 수준에서 통계적으로 유의하였다($p < 0.10$). 그러나 염분 스트레스가 있는 농토에 식재한 청보리의 지상부 수확량은 5(ton/ha)으로(Boussora et al., 2019), 20 cm 화분면적으로 환산하면 15.7 g-D.W./0.0314 m²이 수확되어야 하며, 본 연구의 건량의 약 10배 수준이다. 그러므로 현장 적용에서는 더 많은 생체량이 산출되어 토양으로 환원될 수 있으므로, 토양건강성을 회복할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2. 토양효소 활성변화

토양효소활성은 영양물질순환에 직접적인 영향을 주는 토양생물상(식물-토양계)을 간편하고 신속하게 측정할 수 있는 지표로, 토양미생물 및 물리화학적 상태 및 변화에 대한 정보를 제공한다(Aon et al., 2001). DHA 및 BG는 각각 탄소 순환 및 탄소 산화에, NAG 및 Urease는 질소순환에, Pase_a 및 Pase_alk와 AS는 각각 유기물 인과 유기물 황의 순환에 관계되는 효소이다(Cardoso et al., 2013). 이에 실험이 종료된 89일차에 각 처리구별 화분 토양을 채취하여 측정된 7종 토양효소활성은 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다.

DDC토양 대조구에서의 BG, NAG, Pase_a, Pase_alk 및 AS의 활성($\mu\text{gPNP/g-soil-hr}$)은 각각 7.3, 9.6, 46.2, 38.9 및 11.0이었고, 식물을 식재한 P처리구에서 각각 22.0, 12.6, 73.1, 48.7 및 14.2로 모두 증가하였으며, PH처리구에서는 각각 46.5, 41.1, 114.3, 115.2 및 28.2로 크게 증가하였다(Fig. 4a). NAG를 제외하고 YJ토양에

서의 토양효소활성은 DDC토양에 비해 전반적으로 낮았다. 또한 BG 활성은 토양 pH에 비례하는 것으로 보고되었으나(Acosta-Martinez and Tabatabai, 2000), 토양 pH가 8.5로 높은 YJ토양에서의 BG는 DDC토양의 70%에 불과하였다. 이는 YJ토양이 열처리과정에서 미생물이 사멸한 것이 원인이라 판단된다.

YJ토양 대조구에서의 BG, NAG, Pase_a, Pase_alk 및 AS의 활성($\mu\text{gPNP/g-soil-hr}$)은 각각 3.9, 25.5, 14.1, 17.3 및 13.8이었는데, P처리구에서 각각 7.6, 37.2, 23.2, 26.2 및 8.8로 소폭 증가하는 경향을 보였고, PH처리구에서는 각각 38.7, 46.9, 75.1, 147.5 및 21.9로 유의하게 증가하였다(Fig. 4b). PH처리구의 DHA는 DDC토양 및 YJ토양에서 각각 98.0 및 32.3 $\mu\text{gTPF/g-soil}$ 로 대조군 대비 3~9배 이상 증가하였고, urease는 DDC토양 및 YJ토양에서 각각 20.0 및 16.2 $\mu\text{gNH}_4^+/\text{g-soil-hr}$ 로 대조군 대비 4배 이상 증가하였다(Fig. 5). 청보리와 HS를 첨가한 토양의 PH처리구에서는 모든 토양효소활성이 대조군에 비해 유의하게($p < 0.05$) 증가하였다. 그러나 식물만을 식재한 경우에는 일부 효소활성증가가 유의적이지 않았다.

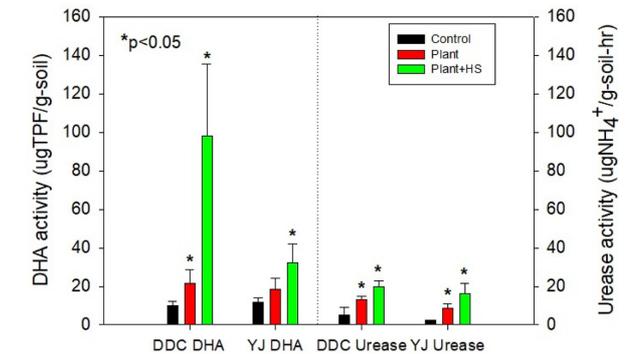
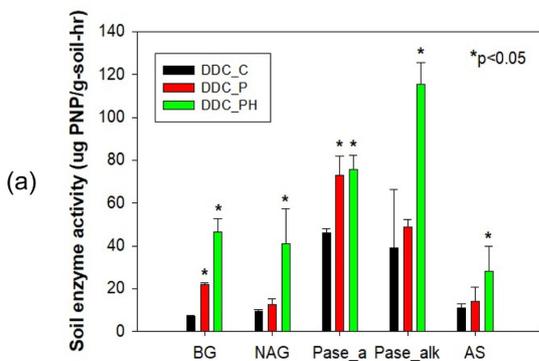


Fig. 4. Soil enzyme activities of the pot soil on day 89 post-sowing, which quantify PNP released from the substrate. (a) Soil DDC; (b) Soil YJ.

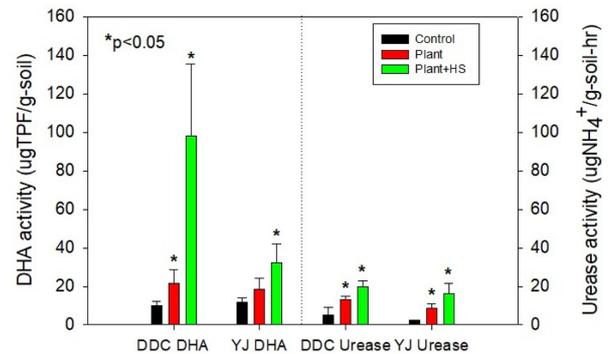


Fig. 5. Dehydrogenase and urease activities of the pot soil on day 89 post-sowing.

HS는 토양효소활성에 직간접적으로 영향을 줄 수 있다. HS는 식물생장호르몬 역할을 함으로써 식물생장을 촉진하고(Trevisan et al., 2010), 발달된 근권에 의해서 식물체에서 토양으로 배출되는 탄소 증가는 토양미생물군 활성화와 토양효소활성 증가를 유도한다(Dorodnikov et al., 2009). 또한 urease는 토양에서 빠르게 분해되지만 HS와 결합하여 유기물-효소 착물을 형성하여 열이나 단백질 분해에 의한 변성을 지연시킨다(Makoi and Ndakidemi, 2008). 그리고 HS는 토양에서 전자서플 역할을 함으로써 질소 순환을 증진하고, 유기산 혹은 HS-금속 착물형성으로 인의 순환도 증진한다(Lumactud et al., 2022). 이상과 같이 다양한 작용에 의해 토양효소활성이 증가하지만, 아직 명확한 기작이 규명되지 않아 더 많은 연구가 필요할 것이다.

3.3. 후숙에 의한 토양 특성 변화

수확한 청보리를 토양환원하고 10주간 후숙한 다음, 토양의 물리화학적 변화를 측정된 결과는 Table 2와 같다. 유기물 함량은 식물체 뿌리와 지상부의 영향으로 증가하였는데, DDC 토양에서는 3.7에서 5.1~5.9%로, YJ토양에서는 3.3에서 4.1~6.1%로 증가하였다. 토양 pH는 식물체의 분해과정에서 발생하는 유기산에 의해 두 토양 모두 감소하였는데, PH처리구에서 더 많이 감소하였다. 동시에 분해 산물에 의한 효과로 EC가 증가하였고, PH처리구에서 더욱 현저하게 증가하였다. 용적밀도 역시 감소하는 추이를 보였다. DDC토양의 용적밀도는 초기 1.19 g/cm³이었으나 P 및 PH처리구에서 각각 1.17 및 1.10 g/cm³으로 감소하였고, YJ토양에서도 초기 1.31 g/cm³이었으나 P 및 PH처리구에서 각각 1.19 및 1.13 g/cm³으로 감소하였다. 자연토양에서 토양유기물 함량이 증가하면 거대공극이 발생함으로써 인간이 간접한 토양보다 용적밀도가 낮은 경향을 보이며, 거대공극은 통기성 및 투수성을 증가시켜 입

단성과 토양구조를 개선한다(Bini et al., 2013). 청보리 지상부는 건량으로 1~2 g에 불과하지만, 추수하지 못한 뿌리까지 포함하면 상당량의 유기물이 유입되어 유기물함량과 용적밀도가 증가한 것이라 사료된다.

토양효소활성도 크게 증가하였다(Table 3 and 4). 후숙한 다음 측정된 토양효소활성은 전반적으로 증가하였는데, 대조구와 P처리구에서만 NAG와 AS가 감소하였다. NAG활성은 토양의 용해성 질소농도에 정비례하는데(Yang et al., 2012), 후숙 과정에서 유기물 분해에 소모된 산소보다 정치상태에서 확산된 산소량이 작아 토양 환경이 무산소 조건이 되고 순차적으로 탈질에 의한 용해성 질소 제거, NAG 및 AS 활성 감소가 발생한 것으로 사료된다. 반면, PH처리구에서는 HS가 질소 공급원이 되어 NAG가 약 10% 증가하였다. AS는 유기황산에스테르와 무기황산염의 가수분해효소이고(Alef and Nannipieri, 1995), HS의 황함량은 fulvic acids에서는 0.1~3.6%, humic acid에서는 0.1~8.3%이고 humin인 경우 0.1~0.9% 존재하므로, 토양에서 S 공급원 역할을 할 수 있다(Rice and MacCarthy, 1991). 대조구 및 P처리구는 숙성과정에서 황산염이 소모되어 활성이 감소한 반면, PH처리구에서는 HS로부터 S가 공급되어 AS활성이 유지 및 증가하였다.

국내 밭 토양 50개 시료의 토양효소활성 평균값은 DHA 12.5 µgTPF/g-soil-24h, BG 403.1 µgPNP/g-soil-hr, Pase 1,844.5 µgPNP/g-soil-hr 및 urease 83.2 µgNH₄⁺/g-soil-hr이며(Kim et al., 2023), 산토양 100개 시료의 평균값은 DHA 36 µgTPF/g-soil-24h, BG 483.5 µgPNP/g-soil-hr, AS 1965.6 µgPNP/g-soil-hr, Pase_a 2,607.1 µg PNP/g-soil-hr 및 urease 138.2 µgNH₄⁺/g-soil-hr이었다(Hong et al., 2021). 본 연구에서 후숙이 종료되었을 때 측정된 토양효소활성은 DDC토양 PH처리구에서 DHA 607.5 µgTPF/g-soil-24h, BG 100.6 µgPNP/g-soil-hr, Pase 206.3

Table 2. Changes in phyco-chemical soil characteristics after mulching barley and aging for 10 weeks

	before planting	DDC			YJ			
		after aging			before planting	after aging		
		Control	P	PH		Control	P	PH
soil pH	7.0 (±0.0)	7.2 (±0.0)	7.2 (±0.0)	6.7 (±0.0)	8.5 (±0.1)	8.5 (±0.1)	8.3 (±0.1)	8.2 (±0.0)
soil EC (µS/cm)	36.9 (±0.1)	137.4 (±4.0)	231.7 (±0.3)	366.9 (±48.1)	555.0 (±7.0)	498.4 (±15.8)	523.6 (±20.2)	663.4 (±45.7)
organic contents (%)	3.7 (±0.8)	3.0 (±0.8)	5.1 (±0.0)	5.9 (±0.0)	3.3 (±0.1)	3.0 (±0.0)	4.1 (±0.0)	6.1 (±0.0)
soil bulk density (g/cm ³)	1.19 (±0.01)	1.08 (±0.01)	1.17 (±0.09)	1.10 (±0.04)	1.31 (±0.02)	1.23 (±0.08)	1.19 (±0.03)	1.13 (±0.04)

EC, electrical conductivity; DDC, land farming treated soil; YJ, thermal desorption treated soil

Table 3. The soil enzyme activities of soil DDC were measured in three different states: raw, after green barley cultivation, and after mulching and aging for 10 weeks

Enzyme activity	DDC						
	before planting	Control		P		PH	
		at harvest	aged	at harvest	aged	at harvest	aged
DHA ($\mu\text{gTPF/g-soil}$)	0.8 (± 0.0)	10.2 (± 2.1)	129.1 (± 24.7)	21.5 (± 7.2)	450.9 (± 61.9)	98.0 (± 37.3)	607.5 (± 47.9)
β -Glucosidase (BG)	4.3 (± 2.8)	7.3 (± 0.2)	8.9 (± 0.1)	22.0 (± 0.7)	24.2 (± 2.8)	46.5 (± 6.0)	100.6 (± 2.6)
<i>N</i> -acetyl- β - glucosaminidase (NAG)	9.8 (± 1.4)	9.6 (± 0.5)	1.1 (± 0.3)	12.6 (± 2.5)	23.5 (± 9.9)	41.1 (± 16.4)	47.7 (± 5.7)
Acid phosphatase (Pase_a)	14.1 (± 0.6)	46.2 (± 1.7)	55.7 (± 0.7)	73.1 (± 8.8)	89.5 (± 0.3)	114.3 (± 6.4)	206.3 (± 1.9)
Alkaline phosphatase (Pase_alk)	70.3 (± 2.3)	38.9 (± 27.3)	45.0 (± 9.4)	48.7 (± 3.6)	84.9 (± 24.9)	115.2 (± 10.4)	269.0 (± 27.6)
Arlylsulfatase (AS)	1.9 (± 0.3)	11.0 (± 2.2)	3.1 (± 0.6)	14.2 (± 6.5)	4.8 (± 0.3)	28.2 (± 11.8)	37.7 (± 4.1)
Urease ($\mu\text{gNH}_4^+/\text{g-soil-hr}$)	3.5 (± 3.1)	5.2 (± 3.8)	8.1 (± 2.0)	13.1 (± 1.8)	26.7 (± 3.6)	20.0 (± 2.7)	29.5 (± 0.7)

Table 4. The soil enzyme activities of soil YJ were measured in three different states: raw, after green barley cultivation, and after mulching and aging for 10 weeks

Enzyme activity	YJ						
	before planting	Control		P		PH	
		at harvest	aged	at harvest	aged	at harvest	aged
DHA ($\mu\text{gTPF/g-soil}$)	3.5 (± 0.6)	12.0 (± 2.1)	19.1 (± 3.7)	18.5 (± 5.8)	34.1 (± 4.7)	32.3 (± 9.5)	127.8 (± 28.1)
β -Glucosidase (BG)	17.3 (± 0.9)	3.9 (± 1.1)	11.7 (± 7.0)	7.6 (± 2.5)	28.3 (± 5.2)	38.7 (± 6.7)	69.0 (± 12.8)
<i>N</i> -acetyl- β - glucosaminidase (NAG)	13.4 (± 0.4)	25.5 (± 9.8)	1.0 (± 0.3)	37.2 (± 3.1)	10.0 (± 1.7)	46.9 (± 0.8)	53.5 (± 6.9)
Acid phosphatase (Pase_a)	71.7 (± 3.5)	14.1 (± 0.6)	19.2 (± 3.1)	23.2 (± 1.1)	51.0 (± 0.4)	75.1 (± 5.1)	151.6 (± 2.7)
Alkaline phosphatase (Pase_alk)	30.8 (± 18.9)	17.3 (± 1.1)	20.4 (± 4.2)	26.2 (± 3.6)	90.8 (± 0.3)	147.5 (± 7.0)	223.3 (± 20.1)
Arlylsulfatase (AS)	1.1 (± 0.4)	13.8 (± 0.8)	0.7 (± 0.0)	8.8 (± 0.8)	1.5 (± 0.2)	21.9 (± 0.1)	36.4 (± 1.9)
Urease ($\mu\text{gNH}_4^+/\text{g-soil-hr}$)	4.1 (± 2.9)	2.4 (± 0.1)	2.2 (± 1.1)	8.5 (± 2.3)	20.6 (± 1.9)	16.2 (± 5.5)	35.1 (± 4.0)

$\mu\text{gPNP/g-soil-hr}$ 및 urease $29.5 \mu\text{gNH}_4^+/\text{g-soil-hr}$ 이었고, YJ토양 PH처리구에서 DHA $127.8 \mu\text{gTPF/g-soil-24h}$, BG $69.0 \mu\text{gPNP/g-soil-hr}$, Pase $151.6 \mu\text{gPNP/g-soil-hr}$ 및 urease $35.1 \mu\text{gNH}_4^+/\text{g-soil-hr}$ 로, DHA를 제외하고는 모두 밭토양 혹은 산토양보다 낮은 효소활성을 보였다. 특히 urease, Pase_a 및 AS가 5~10배 이상 낮은 점은 탄소보다 질소, 인 및 황 등의 물질 부족이 원인으로, 멀칭하고 후숙하는 과정에 별도의 첨가물을 투입하는 것도 고려해야 할 것이다.

3.4. 렌틸 발아 및 유식물 생장

후숙한 토양에 9배수로 렌틸을 파종하고 8일간 식물생장상에서 재배하면서 발아율 및 유식물 생장을 모니터링 하였다. 뿌리가 상하지 않게 수확한 유식물은 Fig. 6에서와 같이 사진을 촬영하고 Image J로 변환한 다음, SmartRoot로 측근의 수, 뿌리총길이 및 부피를 측정하고, SRL을 산정하였다. SRL은 단위 중량당 뿌리 길이(식 1)이며, 토양비옥도 혹은 식물 상태를 나타내는 지표이다

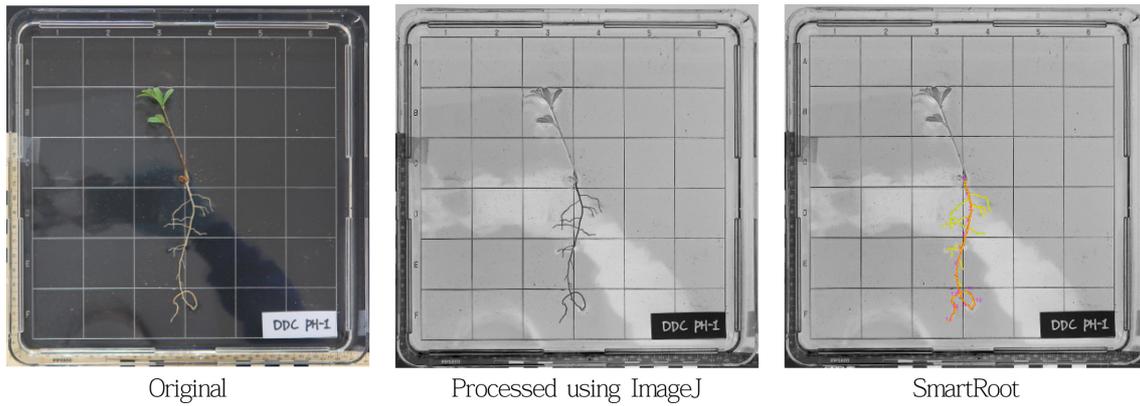


Fig. 6. Procedure for root length and volume estimation by SmartRoot.

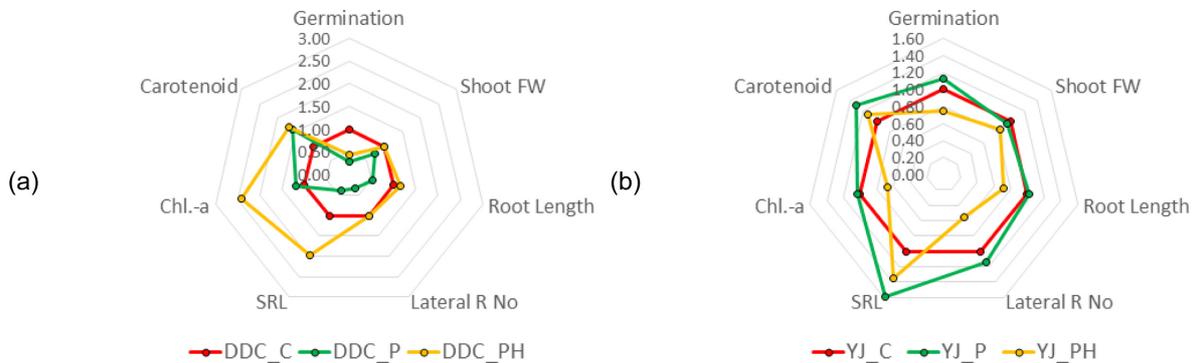


Fig. 7. Comparison of lentil germination, growth, and root elongation in mulched and aged soils (a) Soil DDC; (b) Soil YJ.

(Eissenstat, 1991).

이상의 지표와 발아율, 지상부 생체량, Chl-a 및 carotenoid 함량을 대조구 토양에서의 렌틸 생장을 기준 (1.0)으로 하여 비교한 결과는 Fig. 7과 같다. DDC 대조구 토양에서의 렌틸 발아율은 78%이었으나, 청보리 재배구(P 및 PH)에서는 각각 11~33%로 발아율이 매우 낮았다. 그 이외에는 DDC_PH 토양에 식재한 렌틸의 뿌리 길이, 측근의 수 및 SRL은 모두 1.0을 상회하였으며, 모든 값을 평균한 성장지표는 1.38로 대조군 대비 렌틸 생장이 활발하였다(Fig. 7a). YJ 대조구 토양에서의 발아율은 89%이었고, 이에 반해 P처리구는 발아율 100%로 뿌리생장도 활발하여, SRL이 대조구 대비 1.6배 높았다(Fig. 7b). 이 결과는 발아율이 낮기는 하지만, 발아가 되면 훨씬 건강한 유식물로 성장한다는 것을 의미한다. 반면 YJ토양의 PH 처리군에서의 렌틸 생장은 SRL과 carotenoid가 1.0을 상회할 뿐, 발아율, 지상부 생체량, 뿌리 길이 및 Chl-a 함량은 대조구 대비 0.6~0.8의 비율로 낮았다. 이에 성장지표 값으로 비교하면, YJ_P처리구는 1.2이고, YJ_PH처리구는 0.86에 불과하여 YJ토양인 경우

HS를 투입하지 않은 토양에서의 식물생장이 우수한 것으로 나타났다.

3.5. 타감작용 규명을 위한 렌틸 발아실험

청보리는 대표적인 타감작용(Allelopathy) 식물로 44종 이상의 타감작용 화학물질을 뿌리에서 배출하거나 지상부에 축적한다(Kremer and Ben-Hammouda, 2009). 토양 효소활성으로는 토양건강성이 회복되었음에도 불구하고 DDC토양에서만 렌틸 발아율이 낮은 것은 타감작용에 의한 것이며, YJ토양은 토양 pH가 8.5에서 약간 하강한 pH 8.2~8.3이란 점이다. 이에 DDC 토양 추출액을 pH 8.5 및 원래의 pH인 7.0으로 각각 조절한 다음, 렌틸 종자를 1시간 침지시키고 페트리디시로 옮겨 식물생장상에서 임배양하여 발아율을 비교하였다(Fig. 8). 토양 추출액의 pH를 조절하지 않은 추출액에 침지한 렌틸 발아율은 0~13.3%이었으나, pH를 8.5로 조절하여 침지한 종자의 P처리구 및 PH처리구 발아율이 각각 30 및 20%로 증가하였다. 따라서 YJ토양의 염기성 조건(pH 8.5)에 의하여 청보리 타감작용을 유발하는 화학물질의 활성이 감소하는

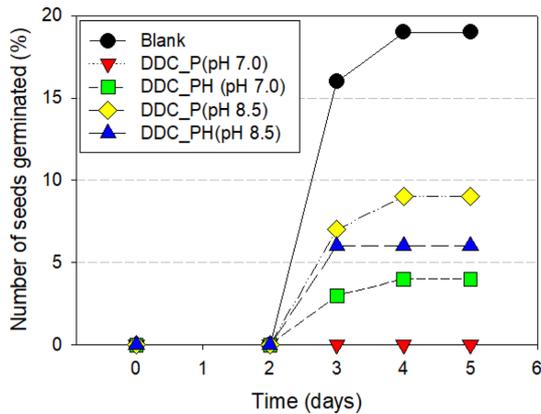


Fig. 8. Number of germinated lentil seeds that have been soaked in extractant of DDC soil that has been planted and mulched with green barley.

것을 확인하였다. 토양추출물과 1시간 동안의 침지만으로도 유의적인 발아율 차이가 발생하였는데, 실제 토양에서는 종자와 지속적으로 접촉하고 있으므로, 타감작용은 더욱 현저했을 것이라 판단된다.

4. 결 론

처리토를 원토양부지로 환원하거나 자원으로 재활용하기 위해, 처리토에 청보리를 재배하고 토양건강성 향상을 실험으로 확인하였다. 이 때, 식물생장을 증진하기 위해 휴믹물질(HS)을 처리토에 식물과 함께 투입하여 식물생장 지표 및 토양효소활성 변화를 관측하였다. 청보리 단독으로도 DDC 및 YJ토양에서 정상적으로 성장하였으나, 청보리 단독식재에 비해 HS첨가구에서의 지상부 건량이 유의적($p < 0.10$)으로 증가하였고, 7종 토양효소활성이 무처리구에 비해 유의적($p < 0.05$)으로 증가하였다. 그러나 식물재배에 충분한 광량을 공급하지 못해, 식물생체량이 농토에 재배한 것에 비해 현저히 낮아, 실험실 규모가 아닌 파일럿 규모의 후속실험으로, 그 효과를 재확인하는 과정이 필요하다.

지상부 및 뿌리를 멀칭하여 식물 성장상에서 10주간 후속한 경우, 토양의 pH 감소, EC 증가, 유기물 함량 증가 및 용적밀도 증가가 관측되었다. 토양효소활성도 크게 증진되었는데, HS처리구에서는 7종 모두 증가하였으나, 청보리만 식재한 처리구에서는 질소 및 황의 부족으로 *N*-acetyl- β -glucosaminidase와 *Ar*lylsulfatase가 감소하였다. 그러나 HS가 개개의 토양효소활성에 미치는 영향에 대한 연구가 부족하여 활성증진기작에 대한 광범위한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

또한 렌틸을 식재하여 발아 및 유식물 성장을 확인한 결과, 토양경작토에서 타감작용에 의해 발아가 저해되었으나 발아한 유식물 생장은 대조구에 비해 생장지표값으로 1.5배 우수하였고, 토양경작토에서는 높은 pH로 타감작용이 관측되지 않았고 대조구에 비해 생장지표값으로 1.2배 우수한 성장을 보였다.

Acknowledgment

본 연구는 한국환경산업기술원의 연구비지원(2020002480002)으로 수행되었습니다.

References

- Acosta-Martinez, V. and Tabatabai, M.A., 2000, Enzyme activities in a limed agricultural soil, *Biol. Fert. Soils*, **31**(4), 85-91.
- Ahmad, I., Saquib, R.U., Qasim, M., Saleem, M., Khan, A.S., and Yaseen, M., 2013, Humic acid and cultivar effects on growth, yield, vase life, and corm characteristics of gladiolus, *Chil. J. Agric. Res.*, **73**(4), 339-344.
- Alef, K. and Nannipieri, P., 1995, *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*, Academic Press.
- Aon, M.A., Cabello, M.N., Sarena, D.E., Colaneri, A.C., Franco, M.G., Burgos, J.L., and Cortassa, S., 2001, Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in agricultural soils, *Appl. Soil Ecol.*, **18**(3), 239-254.
- Baer, S.G. and Birge, H.E., 2018, Soil Ecosystem Service: An Overview, in Reicosky, D. (ed.), *Managing Soil Health for Sustainable Agriculture Volume 1: Fundamentals*, Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK.
- 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.
- Besalatpour, A., Hajabbasi, M.A., Khoshgofarmanesh, A.H., and Dorostkar, V., 2011, Landfarming process effects on biochemical properties of petroleum-contaminated soils, *Soil Sediment Contam.*, **20**(2), 234-248.
- Bini, D., Santos, C.A., Carmo, K.B., Kishino, N., Andrade, G., Zangaro, W., and Nogueira, M.A., 2013, Effects of land use on soil organic carbon and microbial processes associated with soil health in southern Brazil, *Eur. J. Soil Biol.*, **55**, 117-123.
- Boussora, F., Allam, M., Guasmi, F., Ferchichi, F., Rutten, T., Hansson, M., Youssef, H.M., and Borner, A., 2019, Spike developmental stages and ABA role in spikelet primordia abortion

- contribute to the final yield in barley (*Hordeum vulgare* L.), *Bot Stud.*, **60**, 13.
- Canellas, L.P. and Olivares, F.L., 2014, Physiological responses to humic substances as plant growth promoter, *Chem. Biol. Technol. Agric.*, **1**, 3.
- Cardoso, E.J.B.N., Vasconcellos, R.L.F., Bini, D., Miyauchi, M.Y.H., Santos, C.A. dos, Alves, P.R.L., Paula, A.M. de, Nakatani, A.S., Pereira J. de M., and Nogueira, M.A., 2013, Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health?, *Sci. Agric.*, **70**(4), 274-289.
- Chen, Y., Clapp, C.E., and Magen, H., 2004, Mechanisms of plant growth stimulation by humic substances: The role of organo-iron complexes, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **50**(7), 1089-1095.
- 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.
- Kremer, R.J. and Ben-Hammouda, M., 2009, Allelopathic plants. 19. Barley (*Hordeum vulgare* L), *Allelopathy Journal*, **24**(2), 225-242.
- Dorodnikov M., Blagodatskaya E., Blagodatsky S., Marhan S., Fangmeier A., and Kuzyakov, Y, 2009, Stimulation of microbial extracellular enzyme activities by elevated CO₂ depends on soil aggregate size. *Glob. Change Biol.*, **15**(6), 1603-1614.
- Doran, J.W. and Safley, M., 1997, Defining and assessing soil health and sustainable productivity, In: Pankhurst, C.E., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R., (eds.) *Biological Indicators of Soil Health*, CAB International, Wallingford, UK.
- 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.
- Garcia-Ruiz R., Ochoa V., Vinegla B., Hinojosa M.B., Pena-Santiago R., Liebanas G., Linares J.C., and Carreira, J.A, 2009 Soil enzymes, nematode community and selected physico-chemical properties as soil quality indicators in organic and conventional olive-oil farming: influence of seasonality and site features. *Appl. Soil. Ecol.*, **41**(3), 305-314.
- Han, S., Jung, M.C., Kim, J.W., Jeon, S.W., Tuan, N.Q., 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.
- Hartwig, N. and Ammon, H.U., 2002, Cover crops and living mulches, *Weed Sci.*, **50**(6), 688-699.
- Hong, Y.K., Kim, J.W., Kim, H.S., Park, Y.H., and Kim, S.C., 2021 Comparing soil chemical and biological properties in varied land use, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **54**(1), 20-32.
- Hubbard, R.K., Strickland, T.C., and Phatak, S., 2013, Effects of cover crop systems on soil physical properties and carbon/nitrogen relationships in the coastal plain of southeastern USA, *Soil Tillage Res.*, **126**, 276-283.
- Kandeler, E. and Gerber, H., 1988, Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium, *Biol. Fertil. Soils*, **6**(1), 68-72.
- Karlen, D.L., Veum, K.S., Sudduth, K.A., Obrycki, J.F., and Nunes, M.R., 2019, Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities, *Soil Tillage Res.*, **195**, 104365.
- Khaled, H. and Fawy, H.A., 2011, Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity, *Soil Water Res.*, **6**(1), 21-29.
- Kibblewhite, M.G., Ritz, K., and Swift, M.J., 2008, Soil health in agricultural systems, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B*, **363**(1492), 685-701.
- Kim, J.W., Hong, Y.K., Lee, C.R., and Kim, S.C., 2023, Comparison of physicochemical and biological soil properties in organic and conventional upland fields, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **56**(1), 77-89.
- Larney, F.J. and Angers, D.A., 2012, The role of organic amendments in soil reclamation: A review, *Can. J. Soil Sci.*, **92**(1), 19-38.
- Lehmann, J., Bossio, D.A., Kögel-Knabner, I., and Rillig, M.C., 2020, The concept and future prospects of soil health, *Nat. Rev. Earth Environ.*, **1**(10), 544-553.
- Lichtenthaler, H.K., 1987, Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes, *Methods Enzymol.*, **148**, 350-382.
- 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.
- Lumactud R.A., Gorim L.Y., and Thilakarathna, M.S., 2022, Impacts of humic-based products on the microbial community structure and functions toward sustainable agriculture, *Front. Sustain. Food Syst.*, **6**, 977121.
- Makoi, J. and Ndakidemi, P., 2008, Selected Soil Enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem, *Afr. J. Biochem.*, **7**(3), 181-191.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005, *Ecosystems and Human Well-Being*, Washington, DC, Island Press.
- National Institute of Forest Science, 2014, Soil and Plant Analytical Method, 11-1400377-000748-01.(in Korean)
- Nikbakht, A., Kafi, M., Babalar, M., Xia, Y.P., Luo, A., and Etemadi, N., 2008, Effect of humic acid on plant growth, nutrient uptake, and postharvest life of gerbera, *J. Plant Nutr.*, **31**(12), 2155-2167.
- Nunes, R.O., Domiciano, G.A., Alves, W.S., Melo, A.C.A.,

- Nogueira, F.C.S., Canellas, L.P., Olivares, F.L., Zingali, R.B., and Soares, M.R., 2019, Evaluation of the effects of humic acids on maize root architecture by label-free proteomics analysis, *Sci. Rep.*, **9**, 12019.
- O'Brien, P.L., DeSutter, T.M., Casey, F.X.M., Khan, E., and Wick, A.F., 2018, Thermal remediation alters soil properties - a review, *J. Environ. Manage.*, **206**, 826-835.
- Pape, A., Switzer, C., Mccosh, N., and Knapp, C., 2015, Impacts of thermal and smouldering remediation on plant growth and soil ecology, *Geoderma*, **243-244**, 1-9.
- Park, H.S., Kang, S., and Bae, B., 2021, Quantifying inhibitory effects of reclaimed soils on the shoot and root growth of legume plant lentil (*Lens culinaris*), *J. Soil Groundw. Environ.*, **26(5)**, 1-8.
- Pepper, I.L. and Gerba, C.P., 2004, Environmental Microbiology: A Laboratory Manual, 2nd Ed., Elsevier Academic Press, MA, USA.
- Rice, J.A. and MacCarthy, P., 1991, Statistical evaluation of the elemental composition of humic substances, *Org. Geochem.*, **17(5)**, 635-648.
- Schneider, C.A., Rasband, W.S., and Eliceiri, K.W., 2012, NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, *Nat. Methods*, **9**, 671-675.
- Seyedbagheri, M.M., 2010, Influence of humic products on soil health and potato production, *Potato Res.*, **53(4)**, 341-349.
- Stott, D.E., 2019, Recommended Soil Health Indicators and Associated Laboratory Procedures. Soil Health Technical Note No. 450-03. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Trevisan, S., Francioso, O., Quaggiotti, S., and Nardi, S., 2010, Humic substances biological activity at the plant-soil interface, *Plant Signaling Behav.*, **5(6)**, 635-643.
- Villamil, M.B., Bollero, G.A., Darmody, R.G., Simmons, F.W., and Bullock D.G., 2006, No-till corn/soybean systems including winter cover crops: effects on soil properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **70(6)**, 1936-1944.
- Yang, K., Zhu, J., Yan, Q., and Zhang, J., 2012, Soil enzyme activities as potential indicators of soluble organic nitrogen pools in forest ecosystems of Northeast China, *Ann. For. Sci.*, **69(7)**, 795-803.
- 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.
- Zanin, L., Tomas, N., Cesco, S., Varanini, Z., and Pinton, R., 2019, Humic substances contribute to plant iron nutrition acting as chelators and biostimulants, *Front. Plant Sci.*, **10**, 675.