



녹비작물 토양환원과 태양열 소독에 의한 3년생 인삼의 뿌리썩음병 억제효과

서문원 · 이성우[†] · 이승호 · 장인복 · 허혜지

농촌진흥청 국립원예특작과학원 인삼특작부

Effect of Green Manure Incorporation and Solarization on Root Rot Disease of 3-year-old Ginseng in Soil of Continuous Cropping Ginseng

Mun Won Seo, Sung Woo Lee[†], Seung Ho Lee, In Bok Jang and Hye Ji Heo

Ginseng Research Division, Department of Herbal Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseong 27709, Korea.

ABSTRACT

Background: Ginseng root rot disease, caused by *Cylindrocarpon destructans* and *Fusarium solani* is a major cause of replant failure in continuous cropping ginseng.

Methods and Results: To control replant injury in soil infected with *C. destructans* and *F. solani*, biosolarization was performed by covering the plot with transparent polyethylene film after adding green manure of maize and sunflower for the summer season. Per 10 a, fresh and dry weight of maize was 10.1 and 2.5 tons, respectively, and that of sunflower was 8.1 tons and 1.2 tons, respectively. Mean maximum temperature at 20 cm depth was 33.2 °C, 41.5 °C and 41.8 °C in the control, maize-incorporated and sunflower-incorporated plots, respectively. The elapsed time over 40 °C was 36.4 h in the maize-incorporated plot and 77.3 h in the sunflower-incorporated plot. Biosolarization increased NO₃ content in soil, while content of organic matter, Ca, and Mg was decreased. Electrical conductivity, NO₃ and P₂O₅ in soil significantly increased after two years of biosolarization. The number of spores of *C. destructans* in soil was significantly decreased by biosolarization, and sunflower treatment was more effective than maize treatment in decreasing the number of spores. Root yield of 3-year-old ginseng was significantly increased by biosolarization, however, there was no significant difference between maize and sunflower treatments. Rate of root rot in 3-year-old ginseng decreased to 16.5% with the incorporation maize and 5.0% with the incorporation of sunflower, while that in control 25.6%.

Conclusions: Biosolarization was effective in inhibiting ginseng root rot by decreasing the density of root rot disease and improving soil chemical properties.

Key Words: *Panax ginseng*, Biosolarization, *Cylindrocarpon destructans*, Green Manure Crop, Root Rot Disease.

서 언

인삼 (*Panax ginseng* C. A. Meyer), 작약과 같이 뿌리를 주로 이용하는 다년생 작물은 연속하여 재배할 경우 토양전염성 병원균에 의한 뿌리썩음병 발생이 많아 연작피해가 심하다 (Kang *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2011). 인삼의 뿌리썩음병을 일으키는 병원균은 뿌리썩음병균 (*Fusarium*, *Cylindrocarpon*), 역병균 (*Phytophthora*), 질록병균 (*Pythium*, *Rhizoctonia*), 흑색썩음균핵병균 (*Sclerotium*) 등이 있으며, 세균으로는 무름병

균 (*Erwinia*)이 있다. 이들 중에서 연작장해 발생의 주원인이 되는 병원균은 *Fusarium solani*, *Cylindrocarpon destructans*이며, 이것들은 후막포자를 만들어 토양 속에서 10년 이상 생존하여 인삼을 재작할 경우 뿌리썩음병을 일으킨다 (Rahman and Punja, 2005; Kang *et al.*, 2007).

인삼의 연작장해는 주로 토양전염성 병원균에 의한 뿌리썩음병 때문에 발생하는데, 인삼뿌리에서 분비되는 페놀화합물이 축적되어 인삼의 생육이 억제되고 (autotoxicity) 뿌리썩음 병원균의 병원성도 강해져 연작장해 발생이 증가하게 된다고

[†]Corresponding author: (Phone) +82-43-871-5605 (E-mail) leesw@korea.kr

Received 2019 June 24 / 1st Revised 2019 July 22 / 2nd Revised 2019 August 1 / 3rd Revised 2019 August 13 / Accepted 2019 August 13

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.

하였다 (Sun *et al.*, 2013). 인삼뿌리에서 토양으로 분비되는 물질은 *C. destructans*의 생육에 필요한 영양공급원이 되고 병원균 포자의 발아를 유도하는 신호로 작용하는 화학적 유인 물질을 함유하고 있다고 하였다 (Xu *et al.*, 2016). 또한 인삼을 연작하게 되면 염류농도 증가 등 양분의 과잉 축적과 미량 원소의 결핍이 발생하고 토양경도 증가 등 토양물리성이 악화되며 (Lee *et al.*, 1989), 세균과 방선균의 밀도 감소와 사상균의 밀도 증가로 토양미생물상이 단순하게 되어 연작장애 발생이 늘어난다고 하였다 (Park *et al.*, 2011). 강원도 일부지역에서는 감자썩이선충과 같은 선충에 의한 피해도 연작장애 발생을 증가시킨다고 하였다 (Ohh *et al.*, 1983).

그동안 연작장애를 경감하기 위한 여러 방법들이 시도되고 있는데, 비를 4-5 년 재배한 다음 인삼을 재작하여 4년근 인삼을 수확하는 방법이 일반화되어 있으나 (Jo *et al.*, 1996) 5년생부터는 뿌리썩음병원균의 밀도가 증가되어 5-6년근 인삼재배는 곤란한 실정이다 (Park *et al.*, 1997). 다조메 (Dazomet)와 같은 훈증제를 이용하여 토양을 소독하는 방법이 일부 농가에서 쓰이고 있다. 다조메는 비교적 저독성이고 오존층을 파괴하지 않아 세계적으로 널리 쓰이고 있는데, 가스 확산이 잘되는 사양토에서 지온이 높고 토양수분이 적절할 때 훈증효과가 높으며 (Fritsch and Huber, 1995), 인삼 재작지에서는 훈증소독 후 토양이화학성과 미생물상을 복원하기 위해 예정지관리 등이 필요하다고 하였다 (Lee *et al.*, 2018a).

여름철 투명비닐을 피복하여 태양열을 이용, 지온을 상승시켜 토양병원균을 멸균하는 방법은 친환경적이고 경제적인 토양소독방법인데 (Kye and Kim, 1985), 벚지, 쌀겨, 또는 녹비작물 재배하여 토양에 환원하고 요소, 석회질소 등을 섞어 주면 유기물이 부속될 때 나오는 열에 의해 지온이 상승하여 살균효과가 높아지며 (Simmons *et al.*, 2013), 유기물이 분해될 때 O₂가 소모되고 CO₂가 생성되어 토양이 환원상태로 되면 대부분 호기성 곰팡이인 토양병원균이 더 빨리 사멸한다고 하였다 (Klein *et al.*, 2007).

따라서 본 연구는 6년근 인삼을 수확한 연작지에서 여름철에 녹비작물을 토양에 환원하고 투명비닐을 피복하여 태양열 소독으로 인삼의 뿌리썩음병 발생을 억제하기 위해 실시하였다.

재료 및 방법

1. 시험토양

본시험은 충북 음성군에 위치한 국립원예특작과학원 인삼특작부 시험포장에서 2016년 5월부터 2018년 10월까지 수행되었다. 시험토양은 2015년 10월 6년근 인삼 (*Panax ginseng* C. A. Meyer)을 수확한 포장이었다. 시험전 포장의 토성은 사양토 (사촌토) 이고 토양이화학성은 Table 3에서의 무처리 조건과 같이 토양산도가 적정치보다 약간 높으나 기타 성분은

적정범위 내에 있었다.

2. 녹비작물 재배

2016년 5월 상순에 인삼전용 유기질퇴비 (Samhyupnongsan, Goesan, Korea)를 10 a 당 3,000 kg 사용하고 경운한 다음 녹비작물로 옥수수, 해바라기를 파종하였다. 옥수수는 사료용 광종옥 품종을, 해바라기는 아시아종묘의 커몬 품종을 재식거리 30 cm × 45 cm로 2 립씩 점파하였다. 파종면적은 시험구당 216 m²이었으며, 난괴법 3 반복으로 배치하였다. 2016년 7월 하순에 녹비작물의 지상부 생육 및 건물 생산량을 조사하였다.

3. 태양열 소독처리

2016년 7월 하순에 트랙터 정지기 (로터리)를 이용하여 녹비작물을 토양에 환원한 다음 0.1 mm 두께의 폴리에틸렌 투명비닐을 피복하여 8 월 30 일까지 태양열소독을 실시하였다. ① 무처리는 옥수수를 재배하여 토양에 환원해주었으나 비닐 피복에 의한 태양열 소독을 실시하지 않았으며, ② 옥수수 + 태양열소독, ③ 해바라기 + 태양열소독 처리는 각각 녹비작물을 재배한 다음 토양에 환원해 주고 비닐을 피복하여 태양열 소독을 실시하였다.

지하 10 cm, 20 cm 깊이에 지온계를 설치하여 지온을 측정하였다. 태양열 소독기간 동안 지하 20 cm 깊이에서 40°C 이상 (병원균 치사온도) 올라간 시간과 40°C 이상 올라간 횟수를 매일 누적하여 조사하였다. 9 월 상순에 비닐을 제거한 다음 10 월 하순까지 5 회 경운하여 예정지관리를 하였다.

4. 토양이화학성 분석

토양시료는 태양열소독 후 2016년 10월 하순에 1 차로 채취하여 분석하였고 이듬해 3 월 하순에 묘삼을 정식하여 재배한 다음 2018년 10월 하순에 3년생 인삼을 수확하고 2 차로 채취하여 태양열 소독 직후와 2 년 경과후의 차이를 비교분석하였다. 토양시료를 풍건하여 분쇄 후 20 mesh (2 mm)체를 통과한 다음 유발에 미세하게 갈아 분석용으로 사용했다. 토양화학성분 중 pH, EC, 유기물, 유효인산 및 치환성 양이온인 K, Ca, Mg은 농촌진흥청 토양화학분석법에 준하였다 (NIAS, 2000).

시료 10 g을 100 ml 삼각플라스크에 평량하고 침출액 (0.1N HCl) 50 ml 첨가 후 항온 수조 30°C에서 1 시간 진탕 후 Toyo No. 5B로 여과하여 ICP-OES (Intergra XMP, GBC, Braeside, Australia)로 치환성 양이온을 측정했다.

5. 인삼 뿌리썩음병원균 밀도 분석

태양열 소독처리 후 2016년 10월 하순 토양시료를 채취하여 *C. destructans*의 밀도를 분석하였다. 토양시료 5 g과

radicol (Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO, USA) 50 mg/l 를 첨가한 minimal mineral broth 5 ml 을 50 ml falcon tube에 넣고, 48 시간 동안 20°C 조건에서 정치배양 하였다. 정치배양을 한 falcon tube를 1 분간, 5,000 rpm으로 원심분리하였다. 상등액을 제거하고 -70°C 초저온냉동고에 2 시간 보관하여 24 시간 동안 동결건조를 하였다.

동결건조된 토양 0.5 g을 토양 DNA 추출 kit (Nucleo-Spin® Soil, Macherey-Nagel, Düren, Germany)를 이용하여 DNA를 추출한 다음 DNA 시료와 인삼뿌리썩음병원균 동정용 primer를 포함하는 혼합액으로 real-time PCR (CFX96 real-time system, Bio-Rad Laboratories, Hercules, CA, USA)을 수행하고 그 결과를 병원균 밀도 정량곡선에 대입하여 토양 내 병원균의 밀도를 측정하였다.

6. 인삼 재배관리

태양열 소독처리 후 이듬해 2017년 3월 하순에 자경종 묘삼을 칸 당 7 행 10 열 (재식밀도 70 주/3.3 m²)로 본밭에 정식하였다. 해가림 시설은 후주연결식 A-1형의 철재해가림이었으며, 4 중직 차광망 (청색 3 겹 + 흑색 1 겹)을 해가림으로 설치하였다. 고온장해 발생을 막기 위해 여름철에는 2 중직 흑색 차광망을 이중으로 피복하였으며, 기타 재배관리는 인삼 표준경작법을 준하였다 (RDA, 2014).

7. 인삼 생육특성 조사

3년생 인삼을 대상으로 지상부 생장이 완성되는 6 월 하순에 초장, 엽장, 엽폭 등 지상부 생육특성을 조사하였으며, 10 월 중순에 시험구당 3.3 m² 면적으로 수확하여 주당근중, 근장 등 지하부 생육특성과 뿌리썩음병 발생율을 조사하였다.

인삼뿌리에 병 발생이 전혀 없는 건전주율은 무병주율/재식주수 × 100으로 계산하였다. 뿌리썩음병 발병지수 구하는 공식은 (X0 × 0) + (X1 × 1) + (X2 × 2) + (X3 × 3) + (X4 × 4) / (X0 + X1 + X2 + X3 + X4)이고, X0; 무병징, X1; 병반 면적 10% 이하, X2; 병반 면적 50% 이하, X3; 병반 면적 70% 이하, X4; 완전부패로 구분하였다. 통계분석은 통계프로그램 SAS (Version 9.2, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 5% 유의수준에서 Duncan's Multiple Range Test (DMRT)로 처리간 유의성 검정을 하였다 (p < 0.05).

결과 및 고찰

1. 녹비작물별 생육특성 및 건물 생산량

Table 1에서와 같이 6년근 인삼 (*Panax ginseng* C. A. Meyer)을 수확한 토양에서 재배한 녹비작물 (옥수수, 해바라기)의 생육특성 및 건물 생산량을 7 월 하순에 조사한 결과는 다음과 같다. 옥수수 (품종명: 광종옥)는 1 대 잡종의 사료용으로 초장이 279 cm로 크고 10 a 당 생체중 10.1 톤, 건물중 2.5 톤이 생산되었다. 해바라기 (품종명: 커몬)는 초장이 143 cm로 비교적 작은 중단간종으로 10 a 당 생체중 8.1 톤, 건물중 1.2 톤이 생산되었다. 생체 및 건물 생산량은 옥수수가 해바라기보다 많았는데, 옥수수는 해바라기보다 식물체 수분함량이 적어 건물 생산량이 2 배 정도 많았다.

일반적으로 녹비작물로는 수단그라스, 옥수수, 해바라기 등이 많이 재배되는데, 일단 재배하기 쉬워야 하며, 건물생산량이 많아야 무기양분 공급과 토양물리성 개량, 토양병해 방제 등에 효과가 크다. 수단그라스는 생체중이 8.7 톤/10a이고 당근에서 생리장해 감소와 뿌리썩음병 감소에 효과가 있다고 하였다 (Kim *et al.*, 2013).

2. 태양열 소독에 의한 지온상승 효과

Table 2에서와 같이 7 월 하순에 트랙터 정지기 (로터리)를 이용하여 녹비작물을 분쇄하여 토양에 넣어주고 투명비닐을 피복하여 8월 하순까지 태양열 소독을 실시한 결과, 녹비작물 종류별 지온 상승효과는 다음과 같다. 지하 10 cm의 평균 최고지온을 보면 무처리 (옥수수 토양환원 + 태양열소독 무처리)는 37.3°C 이나 옥수수 + 태양열 소독처리는 48.0°C, 해바라기 + 태양열 소독처리는 46.5°C로 무처리에 비해 녹비작물 투입구의 지온이 9 - 10°C 이상 높았으며, 옥수수 처리가 해바라기 처리보다 다소 높았으나 유의적인 차이는 없었다. 지하 20 cm의 평균 최고지온을 보면 무처리는 33.2°C 이나 옥수수 + 태양열 소독처리는 41.5°C, 해바라기 + 태양열 소독처리는 41.8°C로 무처리에 비해 녹비작물 + 태양열 소독처리의 지온이 8°C 이상 높았다.

일반적으로 토양병원균의 반치사온도 (sublethal heating)는 38°C 내외로 알려져 있으며 (Freeman and Katan, 1988), 40°C 이상에 일정기간 이상 노출될 때 사멸되는데 (Shlevin *et*

Table 1. Growth characteristics and biomass of green manure crop, maize and sunflower in the continuous cropping soil of ginseng.

Green manure crop	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	Moisture content (%)	Fresh weight (kg/10a)	Dry weight (kg/10a)
Maize	278.8 ^a	20.7 ^a	73.6 ^b	10,083 ^a	2,548 ^a
Sunflower	142.6 ^b	21.4 ^a	84.4 ^a	8,100 ^b	1,242 ^b

Date of investigation; July 21, 2016. *Mean with same letters are not significantly different in Duncan's Multiple Range Test (DMRT, p < 0.05).

al., 2003; Nam et al, 2011), 녹비작물 종류별 40°C 이상 경과시간을 보면 지하 10 cm 깊이에서 옥수수 + 태양열 소독처리는 199 시간, 해바라기 + 태양열 소독처리는 192 시간으로 녹비작물별 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 지하 20 cm 깊이에서 40°C 이상 경과시간을 보면 옥수수 + 태양열 소독처리는 36.4 시간, 해바라기 + 태양열 소독처리는 77.3 시간으로 해바라기 처리가 지온상승에 더 효과적이었다.

자연조건에 태양열소독을 하면 한낮에 지온이 가장 높고 새벽에 지온이 가장 낮아 하루를 주기로 일변화를 보이는데, 지하 20 cm에서 40°C 이상 누적경과일수를 보면 옥수수+태양열 소독처리는 8 일, 해바라기 + 태양열 소독처리는 12 일로 녹비작물에 따라 차이를 보였다.

Lee 등 (2016)에 의하면 인삼뿌리썩음병원균 (*C. destructans*)의 균사체는 35°C 항온조건에서 15 시간 경과하여도 생존하였으나 40°C에서 15 시간 경과하면 사멸하였고 45°C에서 5 시간 경과하면 사멸된다고 하였으며, 자연조건에서 태양열소독에 따른 일변화를 고려하여 매일 2 시간씩 38°C 처리는 9 일이 경과되어도 병원균이 사멸되지 않았으나 40°C 처리는 9 일 만에 사멸되었고 45°C 처리는 8 일 만에 사멸되었다고 하였다. 또한, 녹비작물 토양환원 후 비닐피복하여 태양열소독을 하면 지온상승 효과 이외에 급격한 O₂ 소비와 CO₂ 방출로 인한 토양의 환원상태 유도, 녹비에 의한 토양미생물상 개선 등의 효과가 생기므로 (Klein et al., 2007) 금후 이에 관한 자세한 조사가 필요할 것으로 생각된다.

3. 태양열 소독에 의한 토양이화학성의 변화

Table 3에서와 같이 녹비작물 토양환원 + 태양열 소독처리에 따른 토양 이화학성의 변화는 다음과 같다. 처리당년 (2016년 10월)의 토양 이화학성을 보면 옥수수 + 태양열 소독 처리의 경우 무처리 보다 NO₃ 함량은 높고 유기물 (OM), P₂O₅, Ca, Mg 함량은 낮았으며, pH, 염류농도 (EC), K, Na 함량은 차이가 없었다. 해바라기 + 태양열 소독처리의 경우 무처리 보다 NO₃, EC는 높고 OM, Ca, Mg 함량은 낮았으며, pH, P₂O₅, K, Na 함량은 차이가 없었다.

이와 같이 옥수수, 해바라기 토양환원 + 태양열 소독처리로 NO₃ 함량은 증가되었고 OM, Ca, Mg 함량은 감소되었으며, 나머지 성분은 큰 변화를 보이지 않았다. 태양열 소독으로 지온이 상승하여 녹비작물의 분해가 빨라 유기물 함량이 감소하고 질산태질소 함량이 증가되었으며, 이로 인해 염류농도가 증가된 것으로 보인다.

Stapleton 등 (1985)에 의하면 태양열 소독에 의해 질소 함량은 뚜렷이 증가되었으나 다른 성분들은 규칙적인 변화를 보이지 않았다고 하였으며, Um 등 (2019)은 헤어리베치와 호밀을 7 : 3으로 혼파하여 토양에 환원해 주면 pH가 감소하고 NO₃가 증가하나 P₂O₅, K, Ca, Mg 등은 큰 변화가 없다고 하였다. Hyun 등 (2009)에 의하면 질산태질소는 염류농도와 정의상관 관계가 있다고 하였는데, 질산태질소의 함량증가에 의해 염류농도가 증가된 것으로 보인다.

태양열 소독처리 시 녹비작물 종류별 토양이화학성 차이를 비교해 보면 해바라기 처리 시 EC, NO₃, P₂O₅, Ca, Mg 함

Table 2. Increase of soil temperature by solarization using poly ethylene film mulching for summer season after soil incorporation of green manure.

Green manure crop	Maximum (°C)		Elapsed time over 40°C (hour)		Elapsed days over 40°C (time)	
	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm
Maize + C ¹⁾	37.30±0.21	33.20±0.07	0	0	0	0
Maize + S ²⁾	48.00±1.48	41.50±0.30	199.20±30.47	36.40±17.77	27.50±1.91	8.00±3.46
Sunflower + S ²⁾	46.50±1.54	41.80±1.15	192.10±58.85	77.30±64.08	26.00±3.16	12.00±7.62

Duration of solarization; July 22 - August 30, 2016. ¹⁾C; no solarization, ²⁾S; solarization by PE film mulching after soil incorporation of green manure.

Table 3. Soil chemical properties of two months later after soil incorporation of green manure and solarization using vinyl mulching for summer season.

Green manure crop	pH (1:5)	EC (dS/m)	OM (g/kg)	NO ₃ (mg/kg)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex. Cation (cmol ⁺ /kg)			
						K	Ca	Mg	Na
Maize + C ¹⁾	6.94 ^a	0.17 ^b	16.30 ^a	1.57 ^b	152.40 ^a	0.32 ^a	4.55 ^a	0.97 ^a	0.06 ^a
Maize + S ²⁾	6.90 ^a	0.18 ^b	14.00 ^b	7.08 ^a	135.10 ^b	0.27 ^a	3.80 ^b	0.70 ^c	0.05 ^a
Sunflower + S ²⁾	6.76 ^a	0.22 ^a	14.90 ^b	9.85 ^a	150.70 ^a	0.28 ^a	4.16 ^b	0.83 ^b	0.05 ^a

Date of investigation; October 20, 2016. ^aMean with same letters are not significantly different in Duncan's Multiple Range Test (DMRT, *p* < 0.05). ¹⁾C; no solarization, ²⁾S; solarization by PE film mulching after soil incorporation of green manure.

Table 4. Soil chemical properties of two years later after soil incorporation of green manure and solarization using vinyl mulching for summer season.

Green manure crop	pH (1:5)	EC (dS/m)	OM (g/kg)	NO ₃ (mg/kg)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex. Cation (cmol ⁺ /kg)			
						K	Ca	Mg	Na
Maize + C ¹⁾	6.43 ^a	0.82 ^a	11.40 ^a	65.20 ^a	212.70 ^a	0.39 ^a	3.94 ^a	0.97 ^a	0.11 ^a
Maize + S ²⁾	6.55 ^a	0.46 ^b	8.10 ^b	38.60 ^b	172.00 ^b	0.20 ^b	2.96 ^b	0.65 ^b	0.10 ^a
Sunflower + S ²⁾	6.51 ^a	0.70 ^a	11.08 ^a	61.90 ^a	239.10 ^a	0.32 ^a	3.60 ^a	0.86 ^a	0.10 ^a

Date of investigation; October 20, 2018 in 3-years-old ginseng field. ^aMean with same letters are not significantly different in Duncan's Multiple Range Test (DMRT, $p < 0.05$). ¹⁾C; no solarization, ²⁾S; solarization by PE film mulching after soil incorporation of green manure.

량이 옥수수 처리보다 다소 높아 해바라기를 녹비작물로 이용했을 때 토양에 무기양분을 더 많이 공급해 줄 수 있을 것으로 보인다.

Table 4에서와 같이 태양열 소독처리 후 2 년이 경과된 (2018년 10월) 3 년생 인삼포장에서 토양 이화학적 성을 조사한 결과는 다음과 같다. 옥수수 + 태양열 소독처리는 무처리와 비교하여 EC, OM, NO₃, P₂O₅, K, Ca, Mg 함량은 감소하였으나 pH, Na 함량은 차이가 없었다. 해바라기 + 태양열 소독처리는 무처리와 비교하여 모든 항목에서 유의적인 차이를 보이지 않았다.

그리고 태양열소독 후 2 년이 경과한 다음에도 해바라기 처리구가 옥수수 처리구보다 EC, OM, NO₃, P₂O₅, K, Ca, Mg 함량이 다소 높은 특징을 보여 해바라기를 녹비작물로 이용했을 때 토양으로 무기양분을 더 많이 공급해 줄 수 있을 것으로 보인다.

한편, 태양열 소독처리 당년과 2 년 경과 후 토양 이화학적 변화정도를 보면 무처리의 경우 EC는 처리당년 0.17에서 2 년 경과 후 0.82 dS/m로, NO₃ 함량은 1.57에서 65.2 mg/kg으로, P₂O₅는 152.4에서 212.7 mg/kg으로 뚜렷이 증가하였으며, pH는 6.94에서 6.43으로, OM 함량은 16.3에서 11.4 mg/kg으로 뚜렷이 감소하였다. 옥수수, 해바라기 + 태양열소독 처리구도 모두 무처리의 경우와 비슷하게 EC, NO₃, P₂O₅ 함량이 크게 증가하고 pH, OM 함량이 뚜렷이 감소되는 특징을 보였다.

Ortiz Escobar와 Hue (2008)는 녹비작물이 토양미생물에 의해 분해되어 양분의 무기화가 진행되는데, 녹비작물의 유기태 질소가 NH₄로 변환되고 질산화작용을 거쳐 NO₃로 되면서 H⁺을 방출하여 pH가 감소되고, NO₃의 축적으로 인해 EC가 증가된다고 하였다.

4. 태양열 소독에 의한 뿌리썩음병원균의 밀도 변화

Table 5에서와 같이 녹비작물 토양환원 + 태양열소독 처리에 따른 토양의 인삼뿌리썩음병원균 (*C. destructans*) 밀도 변

Table 5. Change of spore number of *Cylindrocarpon destructans* in two months old field after soil incorporation of green manure and solarization.

Green manure crop	<i>C. destructans</i> (spore/soil g)
Maize + C ¹⁾	1,062 ± 42 ^a
Maize + S ²⁾	816 ± 21 ^b
Sunflower + S ²⁾	635 ± 17 ^c

Duration of solarization; July 22 - August 30, 2016. ^aMean with same letters are not significantly different in Duncan's Multiple Range Test (DMRT, $p < 0.05$). ¹⁾C; no solarization, ²⁾S; solarization by PE film mulching after soil incorporation of green manure.

화를 real-time PCR을 이용하여 분석한 결과는 다음과 같다. 무처리의 경우 병원균 포자수는 토양 1 g 당 1,062 개이었으나 옥수수 + 태양열 소독처리는 816 개로 23% 감소되었으며, 해바라기 + 태양열 소독처리는 635 개로 40% 감소되었다. 해바라기 + 태양열 소독처리는 표 2에서와 같이 옥수수 + 태양열 소독 처리보다 지하 20 cm 깊이에서 40°C 이상의 지속 시간이 더 길어 뿌리썩음병원균 밀도가 더 많이 감소되었던 것으로 생각된다.

이와 같이 녹비작물 + 태양열 소독처리는 무처리에 비해 토양전염성 병원균 감소에 효과가 있었으나 병원균을 완전히 사멸시키지는 못했는데, 이는 자연조건에서 기온과 광량의 일변화로 인해 40°C의 고온 지속시간이 하루 2-3 시간으로 짧았기 때문으로 생각된다. Shlevin 등 (2003)은 태양열소독 시 변온조건에서 *Fusarium oxysporium*은 25 일 후 사멸되고 *Sclerotium rolfsii*는 20 일 후 사멸되었는데, 44.0°C 항온조건에서 *F. oxysporium*은 8 일 경과 후 사멸되었고 *S. rolfsii*는 5 일 경과 후 사멸되어 변온조건에서 병원균 사멸은 항온조건보다 더 오랜 시간이 필요하다고 하였다. 병원균 밀도에 따라 병 발생율이 달라지므로 앞으로 뿌리썩음병의 발생을 유발하는 최소밀도수준을 조사하여 뿌리썩음병원균 밀도와 발병율과의 관계를 구명할 필요가 있다.

5. 태양열 소독에 의한 인삼의 지상부 생육특성

Table 6에서와 같이 녹비작물 토양환원 + 태양열 소독처리에 따른 3년생 인삼의 지상부 생육특성은 다음과 같다. 초장, 경장, 엽장, 엽폭 등 지상부 생육은 태양열 소독처리로 뚜렷이 증가되었으며, 해바라기 처리가 옥수수 처리보다 약간 더 양호하였으나 유의적인 차이는 없었다. 생육초기 (5 월)와 생육중기 (7 월)의 지상부 생존율은 태양열소독 처리로 뚜렷이 증가되었으며, 해바라기 처리가 옥수수 처리보다 약간 더 양호하였으나 유의적인 차이는 없었다.

태양열 소독처리에 의해 지상부 생육이 증가된 원인은 태양열 소독처리로 뿌리썩음병원균의 밀도가 감소하여 병 발생이 상대적으로 적었기 때문으로 보인다. 뿌리썩음병원균은 세균(뿌리털)처럼 상대적으로 약한 부위에 쉽게 침투하여 세균이 탈락되면 양분 흡수율이 떨어져 지상부 생육이 불량하게 되며 (Uhm *et al.*, 2001; Rahman and Punja, 2005), 뿌리썩음병 이병토양에 관수처리를 하면 염류농도와 병원균 밀도가 낮아져 인삼의 지상부 생육이 촉진되었다 (Lee *et al.*, 2018b). 녹비작물 토양환원 시 해바라기 처리가 옥수수 처리보다 다소 생육이 양호했던 원인은 뿌리썩음병원균 발생율이 더 낮고 무기양분 함량이 더 많았기 때문으로 보인다.

6. 태양열소독에 의한 인삼 뿌리썩음병 억제효과

Table 7에서와 같이 녹비작물 토양환원 + 태양열 소독처리에 따른 3년생 인삼의 지하부 생육 및 뿌리썩음병 발생정도는 다음과 같다. 태양열 소독처리로 지하부 생존율은 증가되었으

나 녹비작물 종류별 유의적인 차이는 없었다.

주당근중과 생근중은 태양열 소독처리로 뚜렷이 증가되었는데, 해바라기 처리보다 옥수수 처리가 더 양호하였으나 유의적인 차이는 없었다. 태양열 소독처리로 주당근중과 생근중이 증가된 주된 원인은 염류농도 감소와 뿌리썩음병원균 밀도감소 때문으로 보이는데, 염류농도 증가는 근권의 삼투압 증가로 세균의 탈락과 수분·양분 흡수의 불균형을 초래하며 (Yu *et al.*, 2018), 뿌리썩음병원균의 밀도가 높아지면 가장 약한 부위의 뿌리털이 먼저 탈락되어 양분 흡수가 억제되기 때문으로 보인다 (Uhm *et al.*, 2001; Rahman and Punja, 2005).

3 년생 인삼의 뿌리썩음병 발생률과 발병정도는 태양열 소독처리로 뚜렷이 감소되었는데, 발병률은 무처리 25.6%에 비해 옥수수 + 태양열 소독처리 16.5%, 해바라기 + 태양열 소독처리 5.0%로 해바라기 처리가 뿌리썩음병 발생 억제에 더 효과적이었다. Nam 등 (2011), Tamietti와 Valentino (2006)은 태양열 소독처리로 *Fusarium*에 의한 딸기 등의 뿌리썩음병 방제에 효과가 있음을 보고하였다.

일반적으로 뿌리의 적변은 토양의 미숙유기물 사용, 염류농도 증가, 토양수분 과잉 등 토양환경이 불량할 때 많이 발생하며, 근권의 토양미생물과 인삼과의 상호작용에 의해 나타난다 (Choi *et al.*, 2005). 뿌리에 발생하는 적변율은 무처리보다 태양열 소독처리로 증가되었는데, 옥수수 + 태양열 소독처리보다 해바라기 + 태양열 소독처리가 적변 발생이 더 많아 뿌리썩음병 발생이 증가하면 적변 발생은 감소되는 특징을 보였다. Farh 등 (2018)에 의하면 인삼 뿌리썩음병원균의 병원성

Table 6. Effect of soil incorporation of green manure and solarization on aerial growth characteristics of 3-years-old ginseng.

Green manure crop	Plant height (cm)	Stem length (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Survival rate ³⁾ (%)	
					Early May	Late July
Maize + C ¹⁾	44.27 ^b	23.84 ^b	12.08 ^b	4.97 ^b	79.10 ^b	39.10 ^b
Maize + S ²⁾	50.10 ^a	25.90 ^a	13.93 ^a	5.68 ^a	87.30 ^a	47.90 ^a
Sunflower + S ²⁾	51.03 ^a	27.15 ^a	14.17 ^a	5.86 ^a	88.80 ^a	48.40 ^a

^aMean with same letters are not significantly different in Duncan's Multiple Range Test (DMRT, $p < 0.05$). ¹⁾C; no solarization, ²⁾S; solarization by PE film mulching after soil incorporation of green manure, ³⁾Survival rate of aerial part of ginseng.

Table 7. Effect of soil incorporation of green manure and solarization on root growth and root rot disease of 3-years-old ginseng.

Green manure crop	Ratio of Survived root (%)	Root weight (g/plant)	Root yield (g/3.3 m ²)	Root rot rate (%)	Root rot index ³⁾ (0 - 4)	Rusty root rate (%)
Maize + C ¹⁾	70.60 ^b	11.74 ^b	508.20 ^b	25.60 ^a	2.22 ^a	20.00 ^b
Maize + S ²⁾	85.70 ^a	15.67 ^a	845.80 ^a	16.50 ^b	1.56 ^b	40.40 ^a
Sunflower + S ²⁾	87.80 ^a	14.42 ^a	813.20 ^a	5.00 ^c	1.04 ^c	57.90 ^a

^aMean with same letters are not significantly different in Duncan's Multiple Range Test (DMRT, $p < 0.05$). ¹⁾C; no solarization, ²⁾S; solarization by PE film mulching after soil incorporation of green manure, ³⁾Root rot index; (X0 × 0) + (X1 × 1) + (X2 × 2) + (X3 × 3) + (X4 × 4) / (X0 + X1 + X2 + X3 + X4), X0; on lesion, X1; rotted-area below 10%, X2; rotted-area below 50%, X3; rotted-area below 70%, X4: completely rotted root.

과 적변 발생율과는 관계가 깊어 병원성이 약한 균주는 뿌리 썩음 증상이 심하지 않은 대신 적변 발생이 많다고 보고하였다. Table 5에서처럼 해바라기 + 태양열 소독처리로 인삼 뿌리썩음병원균은 무처리 대비 40% 감소되어 100% 살균은 어려워나 병원균수의 감소와 더불어 병원균의 병원성도 약화되어 발병율이 낮아진 것으로 생각되며, 금후 태양열 소독에 따른 토양미생물상의 변화에 대한 조사가 필요할 것으로 생각된다.

본시험의 결과를 요약해 보면 생체량이 많고 비교적 재배관리가 쉬운 옥수수나 해바라기 등을 재배하여 토양에 환원하고 8월에 투명비닐을 피복하여 태양열 소독처리를 하면 지온상승, 혐기상태 유지 등으로 뿌리썩음병원균의 밀도와 병원성이 감소되고 토양이화학적성도 개선되어 인삼수량이 증가되고 뿌리썩음병 발생도 억제되었다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청에서 주관하는 윤작물을 이용한 인삼 연작장해 경감 작부체계 개발 과제(과제번호: PJ01271102)의 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Choi JE, Ryuk JA, Kim JH, Choi CH, Chun JS, Kim YJ and Lee HB.** (2005). Identification of endophytic bacteria isolated from rusty-colored root of Korean ginseng(*Panax ginseng*) and its induction. Korean Journal of Medicinal Crop Science. 13:1-5.
- Farh MEA, Kim YJ, Kim YJ and Yang DC.** (2018). *Cylindrocarpon destructans*/*Ilyonectria radicolica*-species complex: Causative agent of ginseng root-rot disease and rusty symptoms. Journal of Ginseng Research. 42:9-15.
- Freeman S and Katan J.** (1988). Weakening effect on propagules of *Fusarium* by sublethal heating. Phytopathology. 78:1656-1661.
- Fritsch HJ and Huber R.** (1995). Basamid granular-a halogen free soil disinfestant. Acta Horticulturae. 382:76-85.
- Grunzweig JM, Katan J, Bental Y and Rabinowitch HD.** (1999). The role of mineral nutrients in the increased growth response of tomato plants in solarized soil. Plant and Soil. 206:21-27.
- Hyun DY, Yeon BY, Lee SW, Kang SW, Hyun GS, Kim YC, Lee KW and Kim SM.** (2009). Analysis of occurrence type of physiological disorder to soil chemical components in ginseng cultivated field. Korean Journal of Crop Science. 17:439-444.
- Jo JS, Kim CS and Won JY.** (1996). Crop rotation of the Korean ginseng(*Panax ginseng* C. A. Meyer) and the rice in paddy field. Korean Journal of Medicinal Crop Science. 4:19-26.
- Kang SW, Yeon BY, Hyeon GS, Bae YS, Lee SW and Seong NS.** (2007). Changes of soil chemical properties and root injury ratio by progress years of post-harvest in continuous cropping soils of ginseng. Korean Journal of Medicinal Crop Science. 15:157-161.
- Kim SH, Seo DC, Park JH, Lee ST, Lee SW, Kim HC, Cho JS and Heo JS.** (2013). Effects of green manure crops on growth and yield of carrot for reduction of continuous cropping injury of carrot through crop rotation. Korean Journal of Environmental Agriculture. 32:279-286.
- Klein E, Katan J, Austerweil M and Gamliel A.** (2007). Controlled laboratory system to study soil solarization and organic amendment effects on plant pathogens. Phytopathology 97:1476-1483.
- Kye KU and Kim KC.** (1985). Possibility of soil solarization in Korea. Korean Journal of Plant Protection 24:107-114.
- Lee IH, Yuk CS and Park H.** (1989). Yield and missing plant rate of ginseng affected by the annual changes in physico-chemical properties of ginseng cultivated soil. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer. 22:18-24.
- Lee SW, Lee SH, ML Jin, Park KH, Jang IB and Kim KH.** (2016). Control of soil-borne pathogens in ginseng cultivation through the use of cultured green manure crop and solarization in greenhouse facilities. Korean Journal of Medicinal Crop Science. 24:136-142.
- Lee SW, Lee SH, Seo MW, Jang IB, Jang IB, Yu J, Moon JW and Seo SJ.** (2018a). Effect of soil fumigation and maize cultivation on reduction of replant failure in ginseng. Korean Journal of Medicinal Crop Science. 26:248-253.
- Lee SW, Lee SH, Seo MW, Park KH and Jang IB.** (2018b). Effects of irrigation and ginseng root residue on root rot disease of 2-year-old ginseng and soil microbial community in the continuous cropping soil of ginseng. Korean Journal of Medicinal Crop Science. 26:345-353.
- Nam MH, Kim HS and Kim HG.** (2011). Control of *Fusarium wilt* of the strawberry caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. fragariae of solarization with compost and calcium cyanamide application. Research in Plant Disease. 17:32-37.
- National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAS).** (2000). Methods of soil chemical analysis. Rural Development Administration. Suwon, Korea. p.89-93.
- Ohh SH, Lee SK, Lee JH and Han SC.** (1983). New root disease of *Panax ginseng* due to *Ditylenchus destructor* Thorne. Korean Journal of Plant Protection. 22:181-185.
- Ortiz Escobar ME and Hue NV.** (2008). Temporal changes of selected chemical properties in three manure-amended soils of Hawaii. Bioresource Technology. 99:8649-8654.
- Park JH, Seo YJ, Choi SY, Zhang YS, Ha SK and Kim JE.** (2011). Soil physico-chemical properties and characteristics of microbial distribution in the continuous cropped field with *Paeonia lactiflora*. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer. 44:841-846.
- Park KJ, Yu YH and Oh SH.** (1997). Population variations of *Cylindrocarpon destructans* causing root rot of ginseng and soil microbes in the soil with various moisture contents. Korean Journal of Plant Pathology. 13:100-104.
- Rahman M and Punja ZK.** (2005). Factors influencing development of root rot on ginseng caused by *Cylindrocarpon destructans*. Phytopathology. 95:1381-1390.
- Rural Development Administration(RDA).** (2014). Standard

- cultural practice of ginseng. Rural Development Administration. Jeonju, Korea. p.140-165.
- Shlevin E, Saguy IS, Mahrer Y and Katan J.** (2003). Modeling the survival of two soilborne pathogens under dry structural solarization. *Phytopathology* 93:1247-1257.
- Simmons CW, Guo H, Claypool JT, Marshall MN, Perano KM, Stapleton JJ and VanderGheynst JS.** (2013). Managing compost stability and amendment to soil to enhance soil heating during soil solarization. *Waste Management*. 33:1090-1096.
- Stapleton JJ, Quick J and Devay JE.** (1985). Soil Solarization: Effects on soil properties, crop fertilization and plant growth. *Soil Biology and Chemistry*. 17:369-373.
- Sun J, Fu J, Zhou R and Yan X.** (2013). Antibiotic effects of four exogenous phenolic acids on soilborne pathogen, *Cylindrocarpon destructans*. *Applied Mechanics and Materials*. 295-298:2294-2299.
- Tamietti G and Valentino D.** (2006). Soil solarization as an ecological method for the control of Fusarium wilt of melon in Italy. *Crop Protection* 25:389-397.
- Uhm MJ, Han SG, Kim KC, Moon YH and Choi JS.** (2001). Properties of plastic film house soils and physiological disorder of eggplant. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 34:192-198.
- Um IS, Lee MJ, Nam JH and Rho IR.** (2019). Effects of additional fertilization after cultivating green manure crops on the growth and saponin content of *Codonopsis lanceolata* Trautv. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 27:1-8.
- Xu Y, Chi K, Zhang A, Lei F, Yang H, Zhao Y, Li K, Wang E, Li Q, Kim JS, Lee SH and Kim YC.** (2016). Chemotactic response study of *Cylindrocarpon destructans* towards ginseng root exudates. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 24:360-369.
- Yu J, Suh SJ, Jang IB, Moon JW, Kwon KB and Lee SW.** (2018). Influence of sodium concentrations on growth, physiological disorder symptoms, and bed soil chemical properties of 2-year-old ginseng. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*. 26:240-247.