

온도와 접종밀도가 클로버씨스트선충의 증식에 미치는 영향

정문기^{1,2} · 이동운^{1*}

¹경북대학교 생태과학과, ²농협케미컬 연구소

Effect of Inoculum Density and Temperature on Clover Cyst Nematode, *Heterodera trifolii*

Mungi Jeong^{1,2} and Dong Woon Lee^{1*}

¹Department of Ecological Science, Kyungpook National University, Sangju 37224, Korea

²Research Institute, NongHyup Chemical, Okcheon 29008, Korea

ABSTRACT: Clover cyst nematode, *Heterodera trifolii* are one of the major pests that damage Chinese cabbage in high land cultivation area and have recently been distributed in Korea. This study was conducted to investigate the effect of temperature and inoculation density on the proliferation of clover cyst nematode. The clover cyst nematode was proliferated at 15-30°C and the egg, female adult and cyst number was the highest at 20°C. As the inoculation density increased, the number of female cyst nematodes increased with the inoculation density and when 16 eggs were inoculated per gram of soil, the amount of growth, number of egg and cyst was the highest. Number of females and eggs were formed more in cabbage than in kale regardless of inoculation density. Chinese cabbage was a favorable host for clover cyst nematode growth than kale.

Key words: Chinese cabbage, Clover cyst nematode, Inoculation density, Temperature

초 록: 클로버씨스트선충(*Heterodera trifolii*)은 우리나라 고랭지에서 배추에 피해를 주는 주요 씨스트선충으로 최근에 분포가 확인되었다. 본 연구는 온도와 접종밀도에 따른 클로버씨스트선충의 증식에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수행하였다. 15~30°C 온도조건에서 클로버씨스트선충이 증식되었으며 20°C에서 암컷 성충 수, 알 수, 씨스트 수 모두 가장 많았다. 접종밀도에 따른 클로버씨스트선충의 증식은 접종밀도가 높아질 수록 암컷 씨스트선충의 수가 증가하는 경향이었는데 토양 1 g당 16개의 알 처리 시 증식량, 알 수, 씨스트 수 모두 가장 많았다. 암컷 씨스트 수와 알 수는 접종밀도에 상관없이 배추가 케일에 비하여 많이 형성되어 배추가 케일보다 클로버씨스트선충의 증식에 유리한 기주였다.

검색어: 배추, 클로버씨스트선충, 접종밀도, 온도

배추(*brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*)는 우리나라에서 재배 및 생산되고 있는 엽채류들 중 가장 넓은 재배면적과 생산량을 보이는 가장 중요한 작물의 하나로 전체 배추 재배지 면적은 2018년 기준으로 29,438 ha이다(KOSIS, 2018). 배추는 서늘한 기후를 좋아하는 호냉성 작물이기는 하지만 전국적으로 재배가 이루어지고 있고, 여러 작형을 통해 년 중 재배되고 있다(Son et al., 2015). 재배 작형은 온도조건에 따라 지역별로 차이가 있는데 재배시기에 따라 봄, 여름, 가을배추로 구분된다(Kim et al.,

2015b).

연평균 기온이 낮고 다습한 강원도의 고랭지는 생육 적온이 15~20°C인 호냉성 작물의 재배에 적합하기 때문에 여름배추는 해발 600 m 이상의 고랭지 지역에서 재배되고 있는데(Eum et al., 2013) 2017년 강원도의 고랭지 배추 재배면적은 4,986 ha로 여름배추 재배지의 87.1%를 차지하고 있다(KOSIS, 2018). 고랭지 배추는 연작과 기후 온난화로 재배 기간 중 고온 과습으로 인한 각종 토양전염성 병의 만연과 가뭄이나 생리장해의 발생과 같은 다양한 수량감소 원인 발생으로 안정 생산에 위협을 받고 있다(Kim et al., 2015a).

고랭지 배추 재배지의 다양한 수량감소 원인들 중 씨스트선

*Corresponding author: whitegrub@knu.ac.kr

Received January 28 2019; Revised February 15 2019

Accepted February 18 2019

충이 근래에 발생하여 피해가 확산되고 있다. 2011년 강원도 태백의 고랭지 배추 재배지에서 씨스트선충에 의한 피해가 처음 보고되었는데(Park et al., 2011) 이후 종 특이 프라이머를 이용한 PCR 분석과 형태학적 분류를 통해 사탕무씨스트선충(*Heterodera schachtii*)과 클로버씨스트선충(*Heterodera trifolii*) 두 종이 발생되어 피해를 주는 것으로 규명되었다(Ko et al., 2017; Mwamula et al., 2018).

씨스트선충은 뿌리혹선충과 함께 다양한 경제작물에 피해를 주는 가장 중요한 식물기생성선충의 하나로 전 세계적으로 넓게 분포하고 있으며 씨스트선충들 중 경제적으로 큰 피해를 주는 주요 종으로는 *Heterodera*속에 속하는 사탕무씨스트선충, 클로버씨스트선충, 콩씨스트선충(*H. glycine*) 등이 있고, *Globodera*속에는 감자씨스트선충(*G. rostochiensis*), *G. pallida* 등이 있다(Evans and Rowe, 1998).

클로버씨스트선충은 110종 이상의 기주식물에 피해를 주고 있는데 인도, 캐나다, 호주, 미국, 유럽 등에 분포하며 사탕무씨스트선충 또한 넓은 기주범위를 가지고 있으며 유럽을 비롯하여 세네갈, 미국, 멕시코 등의 여러 지역에 분포하고 있다(Evans and Rowe, 1998).

*Heterodera*속 씨스트선충은 씨스트 내에서 보호를 받는 상태로 토양 속에서 월동을 하며 부화가 가능한 온도조건은 10~31.4°C로 범위가 매우 넓으며 클로버씨스트선충과 사탕무씨스트선충의 발육 최저온도는 25°C로 알려져 있다(Koenning and Sipes, 1998; Subbotin et al., 2010).

씨스트선충의 부화는 온도와 습도, 기주식물의 뿌리 분비물질 등 다양한 요인에 영향을 받는데 생존에 불리한 환경이 되면 토양 속에서 부화하지 않고, 씨스트 내에서 몇 년간 휴면상태로 있다가 적절한 환경이 되면 부화한다(Koenning and Sipes, 1998).

씨스트선충은 기주 식물의 뿌리 조직을 가해하여 기주 식물에 황화현상과 시들음 및 지상부의 생육 저해를 유발하며 이는 곧 수확량의 감소로 연결된다(Treonis et al., 2007; Harveson and Jackson, 2008). 배추에서도 씨스트선충의 피해를 받으면 시들음 증상과 생육 부진을 보이며 수확기 때 상품성이 없는 배추의 비율이 증가되는 피해를 주어 농가에 많은 경제적 손실을 유발시킨다(Kweon et al., 2018).

우리나라 고랭지 배추 재배지에서 피해 유발 선충으로 먼저 서식이 확인 된 사탕무씨스트선충에 대한 연구는 생태와 방제와 관련된 연구들이 수행 된 바 있으나 클로버씨스트선충에 대한 국내 연구는 상대적으로 부족한 상황이다. 아울러 현재는 우리나라의 고랭지 지역에서만 이들 씨스트선충류가 발생하고 있으나 기후 조건이 다른 지역으로 확산 될 가능성도 충분히 상존하고 있고(Kwon et al., 2018), 선충의 생태적 특성들이 지역

적으로 차이를 보이기도 하기(Fournet et al., 2018) 때문에 온도와 밀도별에 따른 클로버씨스트선충이 기주식물에 미치는 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

씨스트선충의 채취 및 분리

실험에 사용된 씨스트는 선행연구를 통해 종이 동정 된 서식지(Mwamula et al., 2018)인 강원도 지역의 씨스트선충 감염 배추 재배지에서 토양을 채취한 후 실내에서 분리하였다. 씨스트선충의 분리를 위해 채취한 토양에서 큰 돌을 골라내고, 고무 섞어준 다음 토양 300 cc를 10 L 비이커에 넣고, 5 L의 물을 넣은 후 휘저어 섞은 뒤 20 mesh와 60 mesh 체를 사용해 걸러주면 60 mesh 체에 통과하지 못한 씨스트가 걸리게 된다(Doney et al., 1970).

직경 8 cm 유리깔대기에 직경 150 mm 여과지(Filter paper #2, ADVEANTEC, Japan)를 깔대기에 부착되도록 4등분으로 접어 삽입한 후 60 mesh 체에 걸러있는 부유물을 여과지 위로 부여준 뒤 해부현미경(Nikon SM1000, Nikon, Japan) 하에서 알이 가득 차있는 건전한 씨스트만을 선택하여 실험에 사용하였다.

씨스트선충의 알은 위에서 분리한 건전한 씨스트를 Polytron PT 1300D sonicator (Kinematica AG, Switzerland)를 8,000 rpm으로 사용하여 분리하였으며 분리된 알은 물과 함께 있는 상태의 ‘알 현탁액’을 만들어 접종에 사용하였다.

케일에서 온도별 클로버씨스트선충 생육

고압멸균기(AUTOCLAVE AC-12, JEIO TECH, Korea)에서 멸균 처리한 토양을 지름 60 mm × 높이 55 mm 플라스틱 용기에 100 g씩 담은 후 20일 묘령의 케일(건강케일)을 정식하였다. 케일 정식 1일 후 씨스트에서 분리한 클로버씨스트선충의 알 현탁액을 250 ml 비이커에 담아 교반기(CORNING PC-420D, LABORATORY STIRRER, USA)에서 75 rpm으로 교반하여 1 ml당 200개의 알 밀도가 되도록 만든 후 각 용기에 사탕무에서 사탕무씨스트선충의 경제적 피해허용 수준으로 알려진 토양 1 g당 씨스트선충 알 2개의 밀도(Griffin, 1981)가 되도록 1 ml씩 접종하였다.

접종이 끝난 케일은 각각 L:D = 16:8 광조건으로 15, 20, 25, 30 ± 3°C 온도조건의 실내 실험실에서 50일간 생육시킨 후 씨스트선충의 밀도와 케일의 생육을 조사하였다.

케일의 생육은 지상부를 분리하여 저울을 이용하여 수확량

을 측정하였고, 씨스트선충의 밀도는 플라스틱 용기 내 토양과 뿌리에서 전술한 씨스트의 분리 방법을 통해 분리 한 뒤 해부현미경(Nikon SM1000, Nikon, Japan)하에서 씨스트 수와 암컷성충 수를 조사하였으며 알의 경우 Polytron PT 1300D sonicator (Kinematica AG, Switzerland)를 8,000 rpm으로 사용하여 건전한 씨스트 내 알을 분리한 뒤 해부현미경(Nikon SM1000, Nikon, Japan)하에서 조사하였다. 실험은 하나의 플라스틱 용기를 한 반복으로 8반복 처리 하였다.

배추와 케일에서 클로버씨스트선충의 밀도 반응

고압멸균기(AUTOCLAVE AC-12, JEIO TECH, Korea) 에서 멸균처리한 토양을 지름 6 cm × 높이 5 cm 플라스틱 용기에 100 g씩 담은 후 20일 묘령의 배추(춘광)와 케일(건강케일)을 정식하였다. 정식 1일 후 씨스트에서 분리한 클로버씨스트선충의 알 들을 토양 1 g당 0, 1, 2, 4, 8, 16개 밀도로 접종 하였다. 접종이 끝난 배추와 케일은 L:D = 16:8, 20 ± 3°C 조건의 실내 실험실에서 50일간 생육시킨 후 씨스트선충의 밀도와 배추와 케일의 생육을 조사하였다.

배추와 케일의 생육은 지상부를 분리하여 저울을 이용하여 수확량을 측정하였고 씨스트선충의 밀도는 플라스틱 용기 내 토양과 뿌리에서 전술한 씨스트의 분리 방법을 통해 분리 한 뒤 해부현미경(Nikon SM1000, Nikon, Japan)하에서 씨스트 수와 암컷성충 수를 조사하였으며 알의 경우 전술한 방법으로 조사 하였다. 실험은 하나의 플라스틱 용기를 한 반복으로 8반복 처리하였다.

통계분석

씨스트선충의 밀도는 씨스트와 암컷 수 및 알 수를 조사하였는데 각각의 조사 항목들은 처리 평균간 차이와 동일 처리 내 배추와 케일간의 차이를 Tukey's Studentized Range (HSD) Test 를 이용하여 분산분석 하였다(PROC ANOVA, SAS 9.3 user's guide, 2011). 모든 자료는 평균 ± 표준편차로 표기하였다.

Table 1. Effect of temperature on the reproduction of *Heterodera trifolii* on kale

| Temperature | Mean number of cyst | Mean number of female | Mean number of egg |
|-------------|---------------------|-----------------------|--------------------|
| 15°C | 0 ± 0B | 0.5 ± 0.8B | 43.0 ± 84.9B |
| 20°C | 1.8 ± 1.2A | 20.3 ± 14.2A | 2128.5 ± 1392.4A |
| 25°C | 1.0 ± 1.3AB | 6.0 ± 5.3B | 786.9 ± 1010.7B |
| 30°C | 0.3 ± 0.5B | 6.5 ± 6.0B | 495.2 ± 390.4B |

*Means followed by same uppercase letters within the column are not significantly different (Tukey's Test, $P < 0.05$).

결과 및 고찰

온도조건에 따른 클로버씨스트선충의 생육

온도조건에 따른 클로버씨스트선충의 밀도와 케일의 생육을 조사한 결과 씨스트의 수($df = 3, 28, F = 6.09, P = 0.002$)는 20°C 에서 1.75개로 가장 많은 씨스트가 형성되었으며 15°C 에서는 씨스트가 형성되지 않았다(Table 1).

암컷성충 수($df = 3, 28, F = 8.57, P = 0.0003$)는 20°C 에서 20마리로 나머지 온도조건에 비해 현저히 높게 나타났다(Table 1).

전체 알 수($df = 3, 28, F = 8.26, P = 0.0004$) 또한 암컷성충과 같이 20°C 에서 2128.45개로 현저히 높게 나타났으며 씨스트, 암컷성충, 알 수 모두 20°C 조건과 나머지 온도조건들간에 통계적인 차이를 보였다(Table 1).

케일의 수확량은 접종여부에 관계없이 20°C 에서 가장 높았고, 15°C 에서는 수확량이 가장 낮았다(접종; $df = 3, 28, F = 21.67, P < 0.0001$, 비접종; $df = 3, 28, F = 21.11, P < 0.001$). 또한 모든 온도조건에서 대조구의 수확량이 접종처리구보다 높았다(Fig. 1).

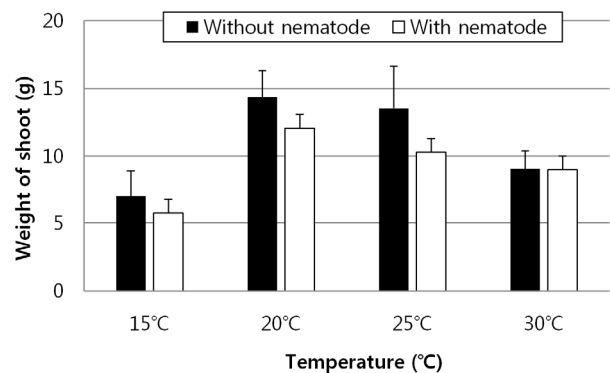


Fig. 1. Mean weight of shoot depending on temperature between with or without *H. trifolii* in pot.

*Same uppercase letters on the bar among temperature are not significantly different (Tukey's Test, $P < 0.05$).

배추와 케일에서 클로버씨스트선충의 밀도 반응

클로버씨스트선충의 접종 밀도에 따른 배추와 케일의 생육 (Fig. 2)과 씨스트 밀도(Table 2)를 조사한 결과 씨스트 밀도는 토양 1 g당 16개의 알 처리구($df=1, 14, F=0, P=1$)를 제외하고, 나머지 접종밀도에서는 배추보다 케일에서 더 많이 형성 되었으나(1/g; $df=1, 14, F=2.03, P=0.1759$, 2/g; $df=1, 15, F=2.33, P=0.1489$, 4/g; $df=1, 15, F=1, P=0.3343$, 8/g; $df=1, 14, F=0.37, P=0.55361$) 통계적인 차이는 없었다(Table 2).

암컷성충은 배추와 케일 모두 16개 알 접종 처리구에서 가장 많이 형성되었다(배추; $df=4, 35, F=15.12, P=0.5647$, 케일; $df=4, 35, F=8.15, P<0.0001$). 작물간 비교 결과 케일 보다 배추에서 암컷성충이 많이 형성되었으며 특히 16개 알 접종 처리에서 8배 이상 차이를 보였다($df=1, 14, F=18.6, P=0.0007$) (Table 2).

전체 알 수는 배추와 케일 모두 16개 알 접종 처리에서 가장 높게 나타났으며(배추; $df=4, 35, F=14.25, P<0.0001$, 케일; $df=4, 35, F=0.14, P=0.9662$) 나머지 접종밀도에서는 접종 밀도간 유의성을 보이지 않았다(Table 2). 수확량은 케일과 배추 모두 접종구와 비접종구 간 통계적으로 유의한 차이를 보였으며(배추; $df=5, 42, F=17.12, P<0.0001$, 케일; $df=5, 42, F=8.07, P<0.0001$), 배추는 1 g당 1개 알 밀도로 접종한 경우 다른 접종밀도에 비해 높은 수확량을 보였고, 나머지 접종밀도에 따른 수확량은 차이를 보이지 않았으며 케일의 경우 접종밀도에 따른 차이를 보이지 않았다(Fig. 2).

온도는 씨스트선충의 발육에 영향을 미치는 중요한 인자의 하나로 적온조건에서는 선충의 부화나 발육, 생활사의 촉진을 가져오고, 밀도의 빠른 증가는 기주 식물에 대한 피해를 촉진시키거나 증진시킨다(Melton et al., 1986; Trudgill, 1995; Kakaire et al., 2012; Vandebossche et al., 2015). 온도에 따른 선충의 발육과 생활사 반응 차이는 대상 선충의 기주가 되는 작물의 재

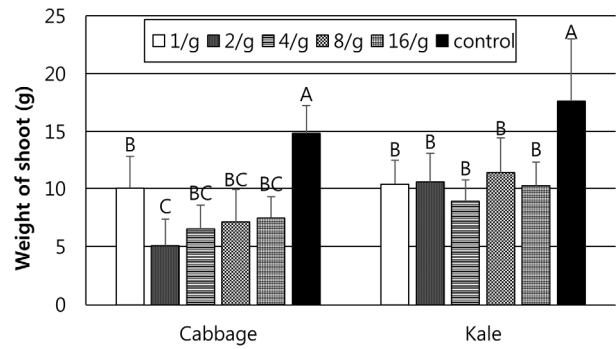


Fig. 2. Mean weight of shoot of Chinese cabbage and kale depending on different *H. trifolii* inoculation density in pot.

*Same uppercase letters on the bar among temperature are not significantly different (Tukey's Test, $P<0.05$). Weight was check after 50 days of inoculation.

배시기 조절이나 작부체계 변경 등과 같은 선충 피해 경감방안으로 활용되기도 한다. 따라서 본 연구는 우리나라 고랭지 채소 재배지에서 최근에 발생과 피해가 확인된 클로버씨스트선충의 온도반응을 알아보기 위하여 케일을 이용하여 조사하였는데 씨스트 수나 암컷성충, 알 수 모두 20°C 조건에서 가장 많아 발육의 최적 온도로 나타났다. 고랭지 채소재배지에서 발생하고 있는 사탕무씨스트선충의 경우 배추 뿌리 삼출액에서 처리 16일째까지 20°C 에서 발육 속도가 25°C 에 비하여 빨랐으나 전체적인 부화율은 25°C 가 20°C 에 비하여 통계적 유의성은 없었으나 다소 높았었는데(Kabir et al., 2015) 클로버씨스트선충의 경우 20°C 가 다른 온도에 비하여 빠른 생활사와 높은 증식 밀도를 보였다. 그러나 클로버씨스트선충에 대한 국외 연구에서는 발육 최적온도가 25°C 였던 것(Koenning and Sipes, 1998; Subbotin et al., 2010)과는 차이를 보였는데 이는 분포 지역에 따른 생태형의 차이이거나 기주 식물의 종류 차이에 의한 것으로 생각된다. 사탕무씨스트선충의 경우도 유럽 내 원 서식지에 따라 온도별에 따라 부화와 증식에 상이한 경향을 나타내어 모로코나 스페인과 같은 남부 유럽 원산지 선충 계통들과 독일,

Table 2. Effect of inoculation density on the reproduction of *Heterodera trifolii* on cabbage and kale

| Inoculate density (eggs/g soil) | Mean number of cyst | | Mean number of female | | Mean number of total eggs | |
|------------------------------------|---------------------|---------------|-----------------------|---------------|---------------------------|--------------------|
| | Cabbage | Kale | Cabbage | Kale | Cabbage | Kale |
| 1/g | 0 ± 0Aa | 0.38 ± 0.74Aa | 1.88 ± 1.46Ba | 0 ± 0Bb | 267.13 ± 241.82Ba | 75.13 ± 140.54Aa |
| 2/g | 0 ± 0Aa | 0.25 ± 0.46Aa | 1.75 ± 1.28Ba | 0.25 ± 0.46Bb | 335.88 ± 297.19Ba | 106.75 ± 155.04Aa |
| 4/g | 0 ± 0Aa | 0.13 ± 0.35Aa | 2.0 ± 1.85Ba | 0.38 ± 0.52Bb | 287.25 ± 315.90Ba | 90.5 ± 102.81Aa |
| 8/g | 0.13 ± 0.35Aa | 0.25 ± 0.46Aa | 2.5 ± 0.93Ba | 0.5 ± 0.53Bb | 236.88 ± 141.39Ba | 107.75 ± 100.04Aa |
| 16/g | 0.13 ± 0.35Aa | 0.13 ± 0.35Aa | 13.13 ± 7.57Aa | 1.5 ± 0.93Ab | 1071.75 ± 295.51Aa | 117.625 ± 126.44Ab |

*Means followed by same uppercase letters within the column and lowercase letters between cabbage and kale in same row are not significantly different (Tukey's Test, $P<0.05$).

오스트리아, 폴란드, 우크라이나와 같은 중·북부 유럽 계통들과 온도반응에 차이를 보였다(Fournet et al., 2018). 온도별 부화의 경우 남부유럽 계통 사탕무씨스트선충은 17°C와 23°C에서 차이를 보이지 않았으나 프랑스와 독일, 폴란드 계통들은 23°C에서 높은 부화를 보였고, 11°C 저온 조건에서는 남부 유럽 계통의 사탕무씨스트선충은 다른 온도대와 부화에 차이를 보이지 않았으나 중·북부 유럽 계통들은 현저히 낮은 부화율을 보였다(Fournet et al., 2018). 또한 Trudgill (1995)의 연구에서도 다양한 선충들의 최대 배 발생 온도조건이 지역 계통간에 차이가 있었다. 아울러 Kakaire et al.(2012)은 유채(*Brassica napus*) 품종별에 따라서도 사탕무씨스트선충의 기주침입에 온도반응의 차이를 보인다고 하였다. 한편 배추는 호냉성 작물로 생육 초기 적정기온은 18~20°C 이고, 생육후기에는 15~18°C 이기 때문에(Wi et al., 2018) 전체적인 배추 생육조건이 25°C 보다 20°C 가 더 적합하여 이 온도조건에서 배추 생장량이 많은 것도(Fig. 1) 배추를 기주로 하는 클로버씨스트선충의 생육 적합도에 영향을 미친 요인의 하나로 생각된다.

클로버씨스트선충의 밀도에 따른 기주식물의 생육과 선충의 증식을 확인하여 작물간 비교한 결과 케일에 비해 배추에서 클로버씨스트선충의 증식이 현저히 높게 나타나 클로버씨스트선충은 케일에 비해서 배추에 대한 기주 적합도가 높았다. 종은 다르지만 우리나라 고랭지 배추 재배지에서 채집한 사탕무씨스트선충을 이용하여 기주 범위 검증 실험 결과 ‘춘광’ 품종 배추에서는 뿌리 당 씨스트 수가 244.1개로 ‘건강케일’ 품종 케일의 141.0개에 비하여 높게 나타나 본 실험의 결과와 유사한 경향을 보였으나 저항성 지수는 2등급으로 차이를 보이지 않았다(Kim et al., 2016). 즉 두 기주 모두 씨스트선충의 생육과 증식에 유용한 기주이지만 상대적인 증식은 케일에 비하여 배추에서 높은 것으로 두 기주 모두 고랭지에서 여름 작기에 재배가 가능한 작물이기 때문에 클로버씨스트선충 발생지역에서 이들 작물 재배는 지양되어야 할 것으로 생각된다. 특히 두 작물 모두 비록 실내실험의 결과이기는 하지만 클로버씨스트선충 미접종 식물체와 접종 식물체의 수량은 통계적으로 유의한 감소를 보여 선충 발생지역에서는 휴경이나 비기주 작물의 재배가 바람직 할 것으로 사료된다. 아울러 기주작물이라도 상대적으로 클로버씨스트선충의 증식이 적게 되는 작물을 이용하는 것도 필요할 것으로 생각된다. 클로버씨스트선충의 생육은 고랭지 재배지의 여름 작기 배추 생육시기의 온도대에서 왕성하게 이루어져 향후 안정적 여름 배추 생산을 위해서는 철저한 관리가 필요할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구사업 “기후변화에 따른 고랭지 배추 사탕무씨스트선충 확산방지 기술개발(과제번호: PJ010774)”의 지원에 의해 수행되었음. 실험에 도움을 준 김현국, 안현정, 차윤석, 나희빈, Mwamula Abraham Okki, Md. Faisal Kabir에 감사를 표합니다.

Literature Cited

- Doney, D.L., Fife, J.M., Whitney, E.D., 1970. The effect of the sugarbeet nematode *Heterodera schachtii* on the free amino acids in resistant and susceptible *Beta* species. *Phytopathology* 60(12), 1727-1729.
- Eum, H.L., Bae, S.J., Kim, B.S., Yoon, J.R., Kim, J.K., Hong, S.J., 2013. Postharvest quality changes of kimchi cabbage ‘Choongwang’ cultivar as influenced by postharvest treatments. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 31, 429-436.
- Evans, K., Rowe, J.A., 1998. Distribution and economic importance, in: Sharma, S.B. (Ed.), *The cyst nematodes*. Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 1-30.
- Fournet, S., Pellan, L., Porte, C., Piriou, C., Grenier, E., Montarry, J., 2018. Populations of the beet cyst nematode *Heterodera schachtii* exhibit strong differences in their life-history traits across changing thermal conditions. *Front. Microbiol.* 9, 1-9.
- Harveson, R.M., Jackson, T.A., 2008. Sugar beet cyst nematode, University of Nebraska. USA.
- Kabir, F.M., Shin, J.H., Kwon, O.G., Lee, D.W., 2015. Temperature and root extract effect on egg hatching and development of sugar beet cyst nematode, *Heterodera schachtii*. *Korean J. Soil. Zool.* 19(1-2), 22-27.
- Kakaire, S., Grove, I.G., Haydock, P.P.J., 2012. Effect of temperature on the life cycle of *Heterodera schachtii* infecting oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Nematology* 14(7), 855-867.
- Kim, D.H., Cho, M.R., Yang, C.Y., Kim, H.H., Kang, T.J., Yoon, J.B., 2016. Host range screening of the sugar beet nematode, *Heterodera schachtii* Schmidt. *Korean J. Appl. Entomol.* 55(4), 389-403.
- Kim, K.D., Suh, J.T., Lee, J.N., Yoo, D.L., Min, K., Hong, S.C., 2015a. Evaluation of factors related to productivity and yield estimation based on growth characteristics and growing degree days in highland kimchi cabbage. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 33(6), 911-922.
- Kim, Y.S., Shim, K.M., Jung, M.P., Choi, I.T., 2015b. Study on meteorological factors affecting estimation of Chinese cabbage yield. *J. Climate Change Res.* 6(4), 277-281.
- Ko, H.R., Kim, E.H., Kim, W.H., Lee, J.K., Lee, W.H., 2017. Rapid methods to distinguish *Heterodera schachtii* from *Heterodera*

- glycines* using PCR technique. Res. Plant Dis. 23(3), 241-248.
- Koenning, S.R., Sipes, B.S., 1998. Biology, in: Sharma, S.B. (Ed.), The cyst nematodes, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, pp. 158-190.
- Korea Statistical Information Service (KOSIS), 2018. Agricultural area survey: Area of cultivated vegetables 2018. http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ET0013&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=F1G&seqNo=&lang_mode=ko&lang_uage=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE. (accessed on 25 January, 2019).
- Kwon, S.B., Park, D.K., Won, H.S., Moon, Y.G., Lee, J.H., Kim, Y.B., Choi, B.G., Seo, H.T., Ko, H.R., Lee, J.K., Lee, D.W., 2018. Spread of cyst nematodes in highland Chinese cabbage field in Gangwon-do. Korean J. Appl. Entomol. 57(4), 339-343.
- Melton, T.A., Jacobsen, B.J., Noel, G.R., 1986. Effects of temperature on development of *Heterodera glycines* on *Glycine max* and *Phaseolus vulgaris*. J. Nematol. 18(4), 468-474.
- Mwamula, A.O., Kim, Y., Kim, Y.H., Lee, J.K., Ko, H.R., Lee, D.W., 2018. Morphological and molecular characterization of *Heterodera schachtii* and the newly recorded cyst nematode, *H. trifolii* associated with Chinese cabbage in Korea. Plant Pathol. J. 34(4), 297-307.
- Park, B.Y., Lee, J.K., Cho, M.L., Jeon, J.Y., Kim, D.W., 2011. Detection of *Heterodera trifolii*. Proceedings of the Korean Society of Applied Entomology, pp. 104-104. (Abst.)
- SAS Institute, 2011. SAS/STAT 9.3 user's guide. Cary, NC.
- Son, I.C., Moon, K.H., Song, E.Y., Oh, S.J., Seo, H.H., Moon, Y.E., Koh, S.C., 2015. Effects of differentiated temperature based on growing season temperature on growth and physiological response in Chinese cabbage 'Chunkwang'. Korean J. Agric. For. Meteorol. 17, 254-260.
- Subbotin, S.A., Mundo-Ocampo, M., Baldwin, J.G. 2010. Systematics of cyst nematodes (Nematoda: Heteroderinae). Nematology Monographs and Perspectives 8A. Brill, Leiden.
- Treonis, A.M., Cook, R., Dawson, L., Grayston, S.J., Mizen, T., 2007. Effects of a plant parasitic nematode (*Heterodera trifolii*) on clover roots and soil microbial communities. Biol. Fertil. Soils 43(5), 541-548.
- Trudgill, D., 1995. An assessment of the relevance of thermal time relationship to nematology. Fundam. Appl. Nematol. 18(5), 407-417.
- Vandenbossche, B.A., Niere, B., Vidal, S., 2015. Effect of temperature on the hatch of two German populations of the beet cyst nematodes, *Heterodera schachtii* and *Heterodera betae*. J. Plant Dis. Prot. 122(5/6), 250-254.
- Wi, S.H., Song, E.Y., Oh, S.J., Son, I.C., Lee, S.G., Lee, H.J., Mun, B., Cho, Y.Y., 2018. Estimation of optimum period for spring cultivation of 'Chunkwang' Chinese cabbage based on growing degree days in Korea. Korean J. Agric. For. Meteorol. 20(2), 175-182.