Fusarium oxysporum f. sp. *raphani*에 대한 무 유전자원의 저항성 평가

전영아* · 성정숙 · 이주희 · 허온숙 · 노나영 · 백형진 · 고호철

농촌진흥청 국립농업과학원 농업유전자원센터

Evaluation of Resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani* in Radish Germplasm

Young-Ah Jeon*, Jung-Sook Sung, Juhee Rhee, On-Sook Hur,

Na-Young Ro, Hyung-Jin Baek, and Ho-Cheol Ko

National Agrobiodiversity Center, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

Abstract : Identification of *Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani* and investigation on fusarium wilt development by isolates and inoculation methods were conducted to establish a screening method for fusarium wilt-resistance in radish (*Raphanus sativus* L.) germplasm. Pathogenicity of *F. oxysporum* f. sp. *raphani* isolate, Heonggye-1 and Heonggye-2, to radish plants was confirmed by seedling test. Radish seedlings were inoculated by root-dipping and soil-drenching with or without root-wounding. For Heonggye-1 isolate, mean disease indexes were 4.13 and 3.91 by root-dipping and soil-drenching with root-wounding, respectively, but those were 1.87 and 1.88 without root-wounding. For Heonggye-2 isolate, mean disease indexes were 3.83 to 4.37 regardless of inoculation methods. Two-hundred sixty accessions of radish germplasm collected from 9 countries of Asia and Europe were evaluated for fusarium wilt-resistance by soil-drenching with root-wounding with Heonggye-2 isolate. Fifty-four resistant accessions with higher than 70% of the percentage of resistant seedlings in accession (P_R) and lower than 20% of the percentage of susceptible seedlings in accession (P_S) was found. Eighteen susceptible accessions with lower than 20% of P_R and higher than 50% of P_S were selected. These accessions could be used as breeding and research materials after re-evaluation of disease-resistance and characterization of agronomical traits.

Keywords : Disease-resistance, *Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani*, Radish germplasm, Screening method

서 언

무(*Raphanus sativus* L.)는 배추과에 속하는 채소작물로, ‘농림축산식품 주요통계’에 따르면 2015년 국내 무 생산량은 125만 톤, 1인당 연간 소비량은 양 25kg으로 전체 채소류의 약 15%에 해당하며, 생산량으로 보면 배추 다음으로 중요한 채소 작물이다. 전 세계적으로 재배되어 지역 특성에 따라 다양한 식물 부위가 식재료로 쓰이고 있으며, 바이오티셀(Chammoun et al. 2013)과 항암 성분(O'Hare et al. 2008, Kim et al. 2011)에 대한 연구가 진행되고 있다. 최근 기후변화와 연작 재배로 인한 병해 발생으로 무 재배에 어려움이 증가하고 있으며, 국내에서는 주요

병해로 시들음병(fusarium wilt), 뿌리혹병(Clubroot) 등 19종이 보고되어 있다(Korean Society of Plant Pathology 2009).

다양한 작물에 시들음병을 일으키는 *Fusarium oxysporum*은 기주식물에 대한 병원성을 기반으로 150개 이상의 분화형(formae speciales)을 가진다. 배추과 작물의 시들음병 원인균으로 *F. oxysporum* f. sp. *conglutinans*, f. sp. *matthioli* 및 f. sp. *raphani* 3가지가 작용하는데, *F. oxysporum* f. sp. *raphani*는 무에만 시들음병을 일으키는 것으로 알려져 있다(Kendrick & Snyder 1942, Bosland & Williams 1987).

무 시들음병은 토양전염성 병으로 1942년 발생이 처음 보고되었으며, 이후 미국, 일본, 영국 등에서 연작 재배지와 배수불량 토양에서 막대한 피해를 가져왔다(Pound & Fowler 1953, Kanebo & Matsuzawa 1993). 시들음병은 뿌리혹병과 함께 무에 발생하는 주요 병해 중 하나로서, 황화(chlorosis), 괴사

*Corresponding Author (E-mail: yjeon@korea.kr, Tel: +82-63-23 8-4941, Fax: +82-63-238-4859)

(Received on August 8, 2017. Accepted on November 9, 2017.)

(necrosis), 낙엽(leaf abscission) 및 식물체 도관부의 갈변 유발 등 작물의 품질 및 생산성과 직결되어 있다(Kendrick & Snyder 1942).

무 시들음병 방제용 살균제는 없으며, 현재 사용되고 있는 윤작, 석회 시용, 토양 소독 방법은 경제성 및 환경적인 문제가 있다. 또한 식물생장촉진근권미생물(Plant growth-promoting rhizobacteria)인 *Pseudomonas* spp.를 이용한 생물학적 방제 연구가 진행되고 있으나(Leeman et al. 1995, Raaijmakers et al. 1995, Leeman et al. 1996), 효과를 보기 위해서는 식물 근권에 일정 농도 이상의 개체가 유지되어야 하기 때문에 넓은 재배포장에 직접 적용하기에는 한계가 있을 것으로 생각된다. 가장 이상적인 방법은 유전적으로 병 저항성을 가지는 품종을 재배하는 것이다. 미국에서 개발한 ‘Red Prince’, 일본의 ‘Otabe’, 중국의 ‘China Rose’와 ‘Kinmon-Aka’ 등 다양한 시들음병 저항성 무 품종이 개발되어 있으며, 우리나라에서도 종자회사들이 개발한 무 시들음병 저항성 품종들이 판매되고 있다. 이와 함께 일본, 중국, 유럽 등지에서 수집한 무 품종을 대상으로 저항성 자원 선별(Soh et al. 2013) 등 시들음병 저항성 무 품종 육성을 위한 과제들이 수행되고 있다. 그러나 시들음병 저항성과 함께 우수한 농업형질을 가지는 새로운 품종의 신속하고 효율적인 개발을 위해서는 저항성 관련 유전자 탐색, 병 저항성 유전양식 규명 및 연관 분자마커 개발 연구도 함께 수행되어야 한다. 이를 위하여 유전적 다양성이 높은 다양한 유전자원을 대상으로 저항성 평가를 수행하여 저항성 자원을 선별하는 작업이 필수적이다.

무 시들음병 저항성 평가방법으로서 유묘 뿌리를 병원균 현탁액에 담그는 침지 접종법과 현탁액을 토양에 뿌리는 관주 접종법을 기본으로 조금씩 변형된 방법들이 사용되고 있다. 저항성 평가시스템 표준화, 대량 검정기술 개발 등 효율성 제고를 위한 연구도 지속되고 있다. 골든시드프로젝트 채소종자사업단은 수출용 무 품종 개발을 위한 시들음병 저항성 분석기술 개발 및 시스템 구축 프로젝트를 수행하고 있으며, Lee et al. (2016)은 간단하고 편리한 scalpel 접종 방법을 이용한 유묘 검정법을 확립하였으며, Kim et al. (2017)은 *F. oxysporum* f. sp. *raphani*를 특이적으로 검출할 수 있는 PCR 프라이머 세트를 개발하였다. 이러한 방법들은 품질이 비교적 균일한 품종을 대상으로 할 경우 평가와 결과 해석에 효과적일 것으로 예상되나, 유전적·재배적 특성이 다양한 유전자원에 대해서는 다른 방식이 적용되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 다양한 무 유전자원에 대한 효율적인 시들음병

저항성 평가시스템을 확립하고 이를 통하여 시들음병 저항성 및 감수성 자원을 선별하고자 무 시들음병 원인균 *F. oxysporum* f. sp. *raphani*를 분리·동정하고, 균주와 접종법에 따른 시들음병 발생을 조사하여 최적 접종법과 평가기준을 설정하고, 우리나라, 무 원산지 인근 국가 등 9개 국가에서 수집된 무 유전자원 260점의 *F. oxysporum* f. sp. *raphani* 저항성을 평가하였다.

재료 및 방법

병원균 분리 및 동정

시들음병이 발생한 강원도 횡계 지역 포장에서 채취한 병든 무 식물체로부터 병원균을 분리하기 위하여 갈변된 도관부를 포함한 줄기 절편을 잘라 내어 1% NaOCl 용액으로 1분간 표면 살균하고, 멸균수로 3회 세척한 후 물기를 제거하고 WA (water agar) 배지에서 5일간 배양한 후 단포자 분리하였다. PDA (potato dextrose agar) 배지에서 25°C, 암 조건으로 7~14일 배양하여 균사 형태와 색상, 균사 생장속도 등 배양특성을 조사하였다. CLA (carnation leaf agar) 배지에서 22°C, NUV (near ultra-violet) 광/암(12시간 주기) 조건으로 15일 배양 후 대형분생포자, 소형분생포자, 후벽포자 등 형태특성을 조사하였다. 형태적 동정의 한계를 보완하기 위하여 *F. oxysporum* f. sp. *raphani* 검출용 프라이머 세트(Kim et al. 2017)를 이용한 재확인 작업을 수행하였다. PDB (potato dextrose broth) 배지에 배양한 균사를 동결건조 후 마쇄하여 DNeasy plant mini kit (Qiagen)로 genomic DNA를 추출하였다. 프라이머 FOR2-F (5'-TGGATCAGCCAGGAGATAAGCCTCT-3')와 FOR2-R (5'-GCTATCAACCCATAGATGGCTGATCTGT-3')를 사용하여 초기 DNA 변성 94°C에서 5분, 변성 94°C에서 20초, 프라이머 결합 57°C에서 19초, DNA 신장 72°C에서 30초 과정을 35회 실시하고 최종 신장을 72°C에서 5분간 실시하고, 해당 크기의 PCR 산물 생성여부를 조사하였다.

병원성 검정

무 유묘에 대한 *F. oxysporum* f. sp. *raphani* ‘횡계-1’과 ‘횡계-2’ 균주의 병원성을 조사하였다. PDB에 5일 진탕배양한 후 균사를 3겹 거즈로 걸러내고 여액을 멸균수로 희석하여 1.0×10^7 conidia/mL의 농도로 포자현탁액을 만들었다. 무 종자는 ‘강호’(농협종묘) 등 5개 시판품종을 사용하였으며, 50공 육묘 포트에 원예용 범용상토((주)서울바이오)를 넣고 품종 당 5 포트, 포트 당 종자 1립씩 파종하여 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 유지되는 유리온실에서 육묘하였다. 균 접종은 단근침지, 침지, 단근관주, 관주 4가지 방법을

Fig. 1. Disease index of fusarium wilt on radish plants inoculated with *Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani*. 0, healthy plant; 1, plant with browning of the vascular system; 2, wilted plant with poor leaf development; 3, plant with wilting and chlorosis; 4, plant with wilting and necrosis; 5, dead plant.

사용하였으며, 각 방법 당 25개체(5 품종 × 5 개체)를 사용하였다. 단근침지는 본엽 2개가 전개된 유묘를 육묘포트에서 뿌리 부분의 흙을 물로 씻어내고 멸균된 가위로 뿌리 끝부분을 약 2 cm 정도 잘라 상처를 낸 후 포자현탁액에 20분간 침지 하였다. 단근관주는 Lee et al. (2016)이 보고한 방법을 참고하여 식물을 뽑지 않고 지제부로부터 0.5 cm 떨어진 곳에 90도 각도로 깊이 3 cm 부위까지 scalpel로 찔러 뿌리에 상처를 낸 후 포자현탁액 10 mL을 토양에 관주하였다. 침지와 관주는 위 방법 중 뿌리에 상처를 내는 단계만 생략하였다. 단근침지와 침지 접종된 유묘는 새 토양이 담긴 육묘포트에 옮겨 심고, 단근관주와 관주 접종된 유묘는 기존 육묘포트에서 계속 배양하였다. 대조구는 포자현탁액 대신 멸균수를 접종하였다. 접종된 유묘는 25±5℃, 광/암(12 시간 주기), 상대습도 60~70% 조건에서 14일 배양 후 발병 증상에 따라 발병도(disease index)를 부여하였는데, 병징 없이 건강한 식물체에 0, 지상부는 비교적 건강하나 도관부가 갈변된 식물체에 1, 지상부가 약간 시들고 본엽의 전개가 느린 식물체에 2, 지상부가 시들고 황화된 식물체에 3, 지상부가 많이 시들고 조직괴사가 일어난 식물체에 4, 고사한 식물체에 5를 부여하였다 (Fig. 1). 통계처리를 위하여 R 3.4.0 (R Core Team 2017) 프로그램으로 95% 신뢰수준에서 ANOVA와 Duncan's multiple range test를 수행하였다.

무 유전자원 시들음병 저항성 평가

국립농업과학원 농업유전자원센터에서 분양 받은 무 유전자원 260점을 이용하여 *F. oxysporum* f. sp. *raphani* ‘황계-2’ 균주에 대한 저항성 평가를 실시하였다. 본엽 2개가 전개된 유묘를 단근관주 접종하여 25±2℃, 광/암(12시간 주기), 상대습도 60~70% 조건에서 14일 배양한 후, 발병 증상에 따라 발병도 값을 각 개체에 부여하고, 발병주율(%)은 증상의 정도에 상관없이

이 조사 개체 수에 대한 발병 개체(발병도 1~5 값이 부여된 개체) 수의 비율로 계산하였다. 저항성 또는 감수성 판단을 위하여, 한 자원 내에서 조사한 총 개체 수에 대한 발병도 0 또는 1인 개체의 백분율로 계산되는 저항성 개체 비율(P_R)과 총 개체 수에 대한 발병도 4 또는 5인 개체의 백분율을 나타내는 감수성 개체 비율(P_S)을 이용하였다. P_R 이 70% 이상이면 P_S 가 20% 이하일 경우 ‘저항성’, P_R 이 20% 이하이고 P_S 가 50% 이상일 경우 ‘감수성’으로 판단하였다. 시들음병 저항성 대조품종으로 ‘명산무’(신젠타코리아), 감수성 대조품종으로 ‘아시아백춘’(아시아종묘)을 사용하였다(Lee et al. 2016).

결과 및 고찰

병원균 동정

포장에서 *F. oxysporum* f. sp. *raphani*에 감염된 무의 주요 병징은 잎의 황화, 시들음, 뿌리 도관부의 갈변 및 고사로 나타났다(Fig. 2A~B). ‘황계-1’과 ‘황계-2’ 균주의 형태적 특성을 조사한 결과, PDA 배지에서 평균 생장속도는 6.8mm/day이었으며 보라색 균총을 형성하였다. CLA 배지에서 생성된 소형분생포자는 원형 또는 타원형으로 격막이 없었으며, 대형분생포자는 직선 또는 약간 굽은 모양이고 3개의 격막을 가졌다. 분생자경은 단경자를 형성하였고 후막포자는 군사 말단 또는 중간에 형성되었다. 이러한 형태적 특성은 Leslie & Summerell (2006)의 *F. oxysporum*의 특성과 유사하였으며, 기주식물이 무인 점을 고려하여 *F. oxysporum* f. sp. *raphani*로 판단하였다. *F. oxysporum* f. sp. *raphani* 검출용 프라이머 세트를 이용한 PCR 분석 결과 450bp 크기의 산물이 확인되었으며(data not shown) 두 균주 모두 *F. oxysporum* f. sp. *raphani*로 동정하였다. 두 균주를 국립농업과학원 미생물은행(Korean Agricultural Culture Collection)

Fig. 2. Disease symptoms of fusarium wilt in the field and resistant/susceptible plants in seedling test. A and B, wilting and chlorosis of leaves and browning of root vascular tissues in diseased plants; C and D, resistant and susceptible plants after inoculation with *Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani* Heonggye-2 isolate.

Table 1. Fusarium wilt development according to isolates of *Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani* and inoculation methods.

Isolates	Mean disease index			
	Soil-drenching + root-wounding	Soil-drenching	Root-dipping + root-wounding	Root-dipping
Heonggye-1	1.87 c [†] z [‡]	1.88 bz	4.13 ay	3.91 ay
Heonggye-2	4.12 ay	3.83 ay	4.37 ay	4.12 ay

Each value represents the mean disease index with 5 replicates of 5 radish cultivars.

[†]Means followed by the same letters in a column did not differ significantly by Duncan's new multiple range test at $p=0.05$.

[‡]Means followed by the same letters in a row did not differ significantly by Duncan's new multiple range test at $p=0.05$.

에 기탁하여 ‘형계-1’ 균주에 KACC 48265, ‘형계-2’ 균주에 KACC 48266 번호가 부여되었다.

무에 대한 병원성과 접종법

F. oxysporum f. sp. *raphani* ‘형계-1’과 ‘형계-2’ 균주로 단근 침지와 침지 접종된 유묘는 접종 후 7일, 단근관주와 관주 접종된 유묘는 8일부터 병징이 나타나기 시작하였으며, 14일 후 모든 접종구에서 유묘의 황화, 시들음, 고사 증상이 관찰되었다. 접종 방법에 따른 평균 발병도는 ‘형계-1’ 균주의 경우 단근관주 1.87, 관주 1.88, 단근침지 4.13, 침지 3.91이었으며, ‘형계-2’ 균주의 경우 단근관주 4.12, 관주 3.83, 단근침지 4.37, 침지 4.12로 조사되었다(Table 1). 접종방법에 따른 병원성은 두 균주 간 차이가 있었는데, ‘형계-2’ 균주가 접종방법의 영향을 크게 받지 않고 높은 발병도를 나타낸 반면, ‘형계-1’ 균주는 단근침지와 침지 접종에서만 높은 값을 나타내었다. Baik et al. (2010)은 무 시들음병 저항성 검정법 연구에서 무 유묘에 뿌리에 상처를 내지 않고 포자현탁액을 관주 접종할 경우 시들음병이 전혀 발생하지 않았다고 보고하였다. 그런데 본 연구에서 ‘형계-2’ 균주의 경우 관주 접종 또한 시들음병 발생에 효과가 있는 것으로

나타났으며, 이는 균주의 병원성 정도에 따른 차이 때문인 것으로 생각된다. 양배추에서 시들음병 발생이 관주접종보다 침지접종에서 다소 높았다는 보고가 있으며(Song et al. 1996), 본 연구결과에서도 균주들의 병원성 차이를 고려하지 않는다면 침지접종이 관주접종보다 병 발생에 효과적인 것으로 예상된다. 하지만 침지접종은 유묘 뿌리 세척 및 절단, 병원균 현탁액에 뿌리 침지, 접종한 유묘의 토양 이식 등 처리과정이 복잡하고 노동력과 시간 소요가 많은 단점이 있다. Lee et al. (2016)은 비록 본 연구와 다른 균주를 사용하기는 하였으나 무 품종들의 시들음병 발생 및 저항성 반응에 있어 단근침지와 단근관주(scalpel 접종) 모두 효과적이었다고 보고하였다. 따라서 접종법에 따른 발병도의 차이가 없었던 ‘형계-2’ 균주를 이용한다면 비교적 간단한 단근관주 접종법으로 많은 유전자원을 빠르게 평가할 수 있을 것으로 예상된다.

무 유전자원 시들음병 저항성

우리나라, 중국, 일본, 인도, 이집트, 터키, 아프가니스탄, 이란, 미국 등 9개 나라에서 도입된 자원 260점에 대하여 단근관주 접종으로 *F. oxysporum* f. sp. *raphani* ‘형계-2’ 균주를 접종한

Fig. 3. Distribution of the incidence rates of fusarium wilt (A) and mean disease indexes (B) in radish germplasm after inoculation with *Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani* Honggye-2 isolate by soil-drenching with root-wounding. Resistant check cultivar is 'Myeonsanmoo' and susceptible one is 'Asia baekchun'.

결과, 시들음병 증상은 접종 8일 경부터 나타났으며 12일 전후로 저항성과 감수성이 육안으로 구분되었다(Fig. 2C~D). 접종 14일 후 발병주율(%)은 저항성 품종 '명산무' 36%, 감수성 품종 '아시아백춘' 84%로 조사되었으며, 무 유전자원은 5~100% 범위 내에서 다양하게 분포하였다(Fig. 3A). 전체 자원 중 68점은 '명산무'보다 낮은 발병주율을 보였는데, 그 중 8점은 10% 이하 값을 나타내었다. 57점은 '아시아백춘'보다 발병주율이 높았는데, 발병주율 100%를 나타내는 자원으로 12점이 관찰되었다. 평균 발병도는 '명산무' 0.8, '아시아백춘' 3.2로 Lee et al. (2016)에서 단근관주 접종으로 조사한 값과 유사하였으며, 무 유전자원은 0.2~4.4 범위에서 다양한 분포를 나타내었다(Fig. 3B). 전체 자원 중 16점은 '명산무'보다 낮은 값을 나타내었고, 23점은 '아시아백춘'보다 높은 값을 나타내었다. 그런데 한 자원 내에서 개체별 발병도는 0에서 5까지 다양한 값으로 나타났다. '명산무'의 경우 25 개체 중 발병도 0, 1, 2, 3, 4로 조사된 개체 수가 각 16, 2, 4, 1, 2로 평균 발병도는 0.8이지만 표준편차가 1.3이었다. '아시아백춘'은 발병도 0, 1, 2, 3, 4, 5로 조사된 개체 수가 각 4, 1, 4, 4, 2, 10으로 평균 발병도 3.2, 표준편차는 1.9이었다. 무 유전자원들도 0~2.6 범위의 다양한 표준편차를 나타내었다. 이러한 이유로 평균 발병도를 저항성/감수성 판정 기준으로 사용하기는 어려울 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 '저항성 개체 비율(P_R)'과 '감수성 개체 비율(P_S)'을 기준으로 사용하였는데, '명산무'는 P_R 72%와 P_S 8%, '아시아백춘'은 P_R 20%와 P_S 48%이었다. 두 대조품종의 결과에 따라, '저항성' 기준을 P_R 70% 이상이면서 P_S 20% 이하로, '감수성' 기준을 P_R 20%

이하이면서 P_S 50% 이상으로 설정하였다. 무 유전자원에 이 기준을 적용하였을 때, 저항성 54점과 감수성 18점이 선발되었다(Table 2). 저항성 자원 비율이 높은 터키를 비롯하여 이집트, 이란, 아프가니스탄은 무 원산지 중 하나로 알려져 있는 지중해와 카스피해 인근 국가이며, 무 야생종의 근원지로 생각되는 중국과 함께 우리나라와 일본은 식품재료로서 무가 중요한 나라이다. 작물의 원산지는 유전적 다양성의 중심지이며 야생근연종 및 우성유전자가 많이 분포하므로 이들 국가에 저항성 자원이 많을 것으로 추정되기 때문에 저항성 자원이 가지는 의미가 크다 하겠다. 특히 터키 원산 23점이 저항성으로 관찰되었는데, 미국 국가식물유전자원시스템(National Plant Germplasm System)에 의하면 이 자원들은 1930~40년대 미국 농업연구청(Agricultural Research Service)이 터키 11개 지역에서 수집한 것으로 다양한 뿌리 형태특성을 가지고 있어 육종소재로 활용 가능성이 클 것으로 보인다. 한국, 중국, 일본 원산 자원 중 저항성 자원이 있었으나 조사자원 수에 비하면 비율이 낮았다. 한국 자원은 14점이 감수성으로 평가되었는데, 그 중 2점은 P_R 0, P_S 80% 이상으로 매우 높은 감수성을 보였다.

작물재배 중 발생하는 병의 가장 효과적인 방제방법은 저항성 품종의 재배로서, 무 품종 개발에서 관련업체가 가장 공을 들이고 있는 것 중 하나가 시들음병 저항성 품종이다. 연작장해 등으로 인하여 시들음병이 급격히 번지고 있으나 약제로는 방제가 어렵고 감염된 무는 상품성이 떨어지므로 농가들이 저항성 품종을 원하고 있기 때문이다. 일본 등 외국에서 개발된 품종을 수입하여 재배하더라도 소비자 입맛에 맞지 않아 시장성이 없는 경우가

Table 2. Number of accession of radish germplasm resistant or susceptible to *Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani* by the country of origin.

Country of origin	No. of accession investigated	No. of accession	
		Resistant ^a	Susceptible ^b
South Korea	75	7	14
Chinese	5	1	-
Japan	6	3	-
India	33	3	3
Egypt	1	1	-
Afghanistan	17	6	-
Turkey	51	23	1
Iran	42	6	-
United States	9	2	-
Unknown	20	2	-
Total	260	54	18

^aAccessions with more than 70% of the percentage of resistant seedlings (with disease index 0 or 1) in accession (P_R) and lower than 20% of the percentage of susceptible seedlings (with disease index 4 or 5) in accession (P_S).

^bAccessions with lower than 20% of P_R and more than 50% of P_S.

있어, 병 저항성을 가지면서도 국내시장에서 선호하는 농업적 형질을 가진 고유 품종을 개발이 중요해지고 있다. 본 연구에서 시들음병 저항성으로 평가된 자원들은 선발강도를 높여 병 저항성을 재평가하고 포장 재배를 통하여 농업적 형질 조사를 거친다면 가치있는 육종재료로 활용될 수 있을 것이다. 시들음병 감수성으로 평가된 자원들은 저항성 관련 유전자 탐색이나 저항성 작용 기작 연구재료로 활용가치가 있을 것으로 기대된다.

적 요

무(*Raphanus sativus* L.) 유전자원에 대한 효율적인 시들음병 저항성 평가시스템을 확립하기 위하여 병원균을 분리·동정하고 접종법과 균주에 따른 시들음병 발생도를 조사하였다. 시들음병 발생 식물체로부터 확보한 *Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani* ‘형계-1’과 ‘형계-2’ 균주의 무에 대한 병원성을 유묘검정으로 확인하였다. 접종법(침지, 단근침지, 관주, 단근관주)과 균주에 따른 시들음병 발생도를 조사한 결과, ‘형계-1’ 균주를 접종한 경우 평균 발병도(disease index)가 단근침지 4.13, 단근관주 3.91로 높았으나, 단근처리 없이는 1.87과 1.88로 낮았다. 반면 ‘형계-2’ 균주를 접종한 경우, 접종법에 상관없이 평균 발병도 3.83~4.37로 높았다. 아시아와 유럽 9개 국가에서 수집된 무 유전자원 260점의 시들음병 저항성을 평가하기 위하여 *F.*

oxysporum f. sp. *raphani* ‘형계-2’ 균주를 단근관주 접종하여 저항성을 평가한 결과, 저항성 개체 비율(P_R)이 70% 이상이면서 감수성 개체 비율(P_S) 20% 이하로서 ‘저항성’으로 판단되는 자원 54점, P_R 20% 이하이면서 P_S 50% 이상으로서 ‘감수성’으로 판단되는 자원 18점이 선발되었다. 이 자원들은 포장 재배를 통한 농업적 형질 조사를 거친 후 시들음병 저항성 무 품종 육성재료 및 저항성 관련 연구재료로서 활용가치가 높을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구개발사업(과제번호 PJ011922)의 지원에 의하여 이루어진 것임.

REFERENCES

1. Baik SY, Kim JC, Jang KS, Choi YH, Choi GJ. 2010. Development of effective screening method and evaluation of radish cultivars for resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani*. Res Plant Dis 16: 148-152.
2. Bosland PW, Williams PH. 1987. An evaluation of *Fusarium oxysporum* from crucifers based on pathogenicity, isozyme

- polymorphism, vegetative compatibility, and geographic origin. *Can J Bot* 65: 2067-2073.
3. Chammoun N, Geller DP, Das KC. 2013. Fuel properties, performance and economic feasibility of *Raphanus sativus* (oilseed radish) biodisel. *Ind. Crop Product* 45: 155-159.
 4. Kendrick JB, Snyder WC. 1942. Fusarium wilt of radish. *Phytopathol* 42: 1031-1033.
 5. Kim H, Hwang SM, Lee JH, Oh M, Han JW, Choi GJ. 2017. Specific PCR detection of *Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani*: a causal agent of Fusarium wilt on radish plants. *Lett Appl Microbiol* 65: 133-140.
 6. Kim WK, Kim JH, Jeong DH, Chun YH, Kim SH, Cho KJ, Chang MJ. 2011. Radish (*Raphanus sativus* L. leaf) ethanol extract inhibits protein and mRNA expression of ErbB2 and ErbB3 in MDA-MB-231 human breast cancer cells. *Nutr Res Pract* 5: 288-293.
 7. Korean Society of Plant Pathology. 2009. List of Plant Disease in Korea. Korean Society of Plant Pathology. Seoul. pp. 99-103.
 8. Lee JH, Jang KS, Choi YH, Kim H, Choi GJ. 2016. Development of an efficient mass-screening method for testing the resistance of radish to fusarium wilt. *Res Plant Dis* 22: 152-157.
 9. Leeman M, Pelt JA, Ouden FMD, Heinsbroek M, Bakker PAHM, Schippers B. 1995. Induction of systemic resistance against fusarium wilt of radish by lipopolisaccharides of *Pseudomonas fluorescens*. *Phytopathol* 85: 1021-1027.
 10. Leeman M, Ouden FMD, Pelt JA, Dirkx FPM, Steiji H, Bakker PAHM, Schippers B. 1996. Iron availability affects induction of systemic resistance to fusarium wilt of radish by *Pseudomonas fluorescens*. *Phytopathol* 86: 149-155.
 11. Leslie JF, Summerell BA. 2006. The *Fusarium* laboratory manual. Blackwell Publ. Iowa. pp. 212-218.
 12. O'Hare TJ, Wong LS, Force LE, Gurung CB, Irving DE, Williams DJ. 2008. Glucosinolate composition and anti-cancer potential of daikon and radish sprouts. *Acta Hort* 765: 237-244.
 13. Raaijmakers JM, Leeman M, Oorschot MMP, Sluis I, Schippers Bob, Bakker PAHM. 1995. Dose-response relationship in biological control of fusarium wilt of radish by *Pseudomonas* spp. *Phytopathol* 85: 1075-1081.
 14. R Core Team. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
 15. Soh JW, Han KS, Lee SC, Lee JS. 2013. Evaluation of resistance of fusarium wilt in radish genetic resources. *Kor J Hort Sci Tech* 31(S2): 92.
 16. Song JH, Kim YW, Cho JH. 1996. Varietal difference and inheritance of cabbage yellows (*Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinas* Snyder et Hansen) resistance in cabbage. *Kor J Breed* 28: 171-177.