

## 식물기생성선충의 방지에서 식물호르몬 자스몬산의 응용가능성

김 철 우

토양속에 살고있는 식물기생성선충은 발작물과 남새류의 뿌리부에 큰 피해를 주고있다. 이러한 선충의 대부분은 1mm이하의 크기를 가진 눈으로는 확인하기 어렵고 생활장소와 분포범위가 넓으며 또 견딜성이 강한 종은 불리한 환경에 대한 적응력이 강하여 오랜 기간 생존하며 숙주식물에 의존하기때문에 그 밀도도 높다. 식물기생성선충이 기생하는 식물은 물과 영양물질흡수가 저해되는 결과 생장이 심히 억제되며 심한 경우에는 말라죽기도 한다. 식물기생성선충에 의한 농작물피해는 세계적으로 매해 수천억t에 달한다고 추정되고있는데 그 1/4이상은 토양에서 생활하고있는 뿌리혹선충(*Meloidogyne*속)에 의하여 발생한다. 특히 700종이상의 넓은 숙주범위를 가진 고구마선충(이하 선충으로 표기)은 발뿌리남새류로부터 온실열매남새류에 이르는 많은 작물과 식물에 매우 심각한 피해를 주고있다. 이러한 선충은 식물의 뿌리에 기생하는데 선충이 기생하는 뿌리의 부위는 흑모양으로 팽창되어 새로운 결뿌리의 발달이 정지되는것과 함께 물과 영양물질의 흡수가 저해된다.

뿌리남새류는 선충의 기생에 의해 피해부가 흑모양으로 되어 상품의 가치를 떨어구며 지하부에 열매를 맺는 열매남새류에서도 선충의 기생에 의하여 지상부의 생장이 억제되어 수확량과 품질이 낮아진다.

또한 선충이 뿌리에 상처를 내면서 감염하고 기생하기때문에 그 상처부를 통해 토양병원균이 침입하면서 복합병피해를 입는 경우도 많다. 한번 포전에 선충이 발생하면 막기 어렵기때문에 선충은 가장 유해로운 병해충의 하나로 되고있다.

현재 환경에 영향을 적게 주는 효과적인 선충방지법을 개발하는것이 중요한 문제로 제기되고있는데 최근 환경보존형방지법의 유망한 재료로서 주목을 모으고있는것이 바로 병해충저항성유도물질(식물호르몬)이다.

병해충저항성유도물질은 식물이 원래 가지고있는 병해충에 대한 저항성을 높이는것으로서 내병성, 내충성을 유도하여 병해충방지효과를 나타내며 따라서 환경오염도 적다. 또한 병원체나 해충을 직접 죽이는 작용은 없다는데로부터 살충제리용때 문제로 되는 생태형의 출현이 낮은 우점이 있다.

론문에서는 선충피해억제제로서의 병해충저항성유도물질의 실용가능성에 대해 소개한다.

### 1. 선충방지의 연구실태

이전의 선충방지기술은 화학적방지, 물리적방지, 농업경영적방지로 나누어볼수 있는데 주류는 화학적방지로서 기본은 화학합성농약의 사용이다. 선충방지제로서의 화학합성농약은 알갱이제와 훈증제로 나누어볼수 있다. 알갱이제로는 유기린제, 훈증제로서는 D-D제가 널리 보급되고있다.

물리적방지기술에는 비닐집을 밀폐하고 경작지를 가온하는 태양열토양소독과 비닐집 토양에 유기물질을 혼합하고 밀폐한 다음 가온하는 환원토양소독, 가동식보이라로 토양을 직접 가열하는 열수토양소독 그리고 토양의 장기간 담수처리 등이 속한다.

농업경영적방지기술로는 재배토양중의 선충밀도를 감소시키는 선충대항식물이나 선충 저항성품종의 재배를 들 수 있다.

그러나 위에서 열거한 재배기술에는 각각 적지 않은 문제점들이 있다. 실례로 유기린 산계화합합성농약은 재배작물에서 그 잔해가 확인되어 사회적으로 문제로 되고있고 토양 혼중제도 인체에 미치는 영향, 토양미소생물상의 파괴와 교란, 지하수오염 등 환경오염을 일으킨다. 화학적방지나 물리적방지는 대체로 방지되어야 할 선충이 경작지토양의 깊은 층에 있기때문에 1~2번의 경작후에는 선충밀도가 급속히 회복되어 오히려 선충에 의한 피해가 조장되는 경우도 있다. 농업경영적방지대책인 길항식물의 재배는 작물재배의 중단 및 김매기의 로력과 품, 다른 병해충의 유도 등의 문제가 있다. 또한 이러한 선충방지방법들은 모두 선충을 직접 죽이거나 불활성화시키는것을 목적인것으로서 식물의 방어반응을 강화하는것과 같은 수법은 아니다. 이렇게 이전의 선충방지방법들은 모두 피동적이고 어느것이나 다 결정적인것이 못된다. 특히 화학적방지나 물리적방지는 환경에 주는 영향이 크다.

최근 통합병해충경영방지나 환경보존형농업, 지속적농업으로 불리우는 환경을 고려한 농업체계를 구축하는 방법이 제기되고있으며 환경오염의 실질적인 방지방법으로 전환될것을 요구하고있다.[1, 3] 그러므로 이전의 방지방법을 대신하는 환경보호에 유리한 방지방법의 응용가능성을 탐색하기 위하여 병해충저항성유도물질의 선충피해억제효과를 검증하는 연구들이 활발히 진행되고있다.

## 2. 선충피해억제에서 병해충저항성유도물질의 응용가능성

식물은 항상 생태환경의 변화나 병원성미생물의 감염, 곤충 등에 의한 먹음피해와 같은 여러가지 스트레스에 처해있으므로 이러한 스트레스에 대응하기 위해 식물은 자기의 독자적인 방어물질들을 발달시켜왔다. 이러한 방어물질들을 발현시키는데서 식물호르몬으로 불리우는 저분자화합물이 신호전달물질로서 중요한 역할을 담당하고있다. 실례로 환경의 변화(건조, 저온, 높은 염농도 등)에 대해서는 압씨신산(ABA)을, 병원균의 감염에는 살리칠산(SA)을, 곤충의 먹음피해 등을 받으면 자스몬산(JA)을 식물은 몸안에서 생합성하고 이러한 스트레스에 견디기 위하여 방어기능을 수행하는 여러가지 단백질을 합성한다[1, 2]는것이 밝혀지고있다. 특히 병해충에 대한 식물의 방어응답은 JA에 의하여 조절되는 JA경로, SA에 의하여 조절되는 SA경로, 에틸렌(ET)과 JA에 의하여 조절되는 ET/JA경로로 크게 나누어 볼 수 있다. 이러한 병해충저항성에 관계되는 식물호르몬을 리용하면 이전보다 환경오염을 줄이는 방지방법을 세울수 있다고 보고있다.[3, 4]

선충은 식물의 뿌리에 상처를 내고 뿌리안에 침입하여 기생한다. 지하부에서의 식물방어응답에 대해서는 아직까지 명백치 못한 점은 있지만 이때 식물체안에서는 그 어떤 방어응답이 일어난다고 예상된다. 지상부에서 상처나 해충의 먹음피해를 받는 경우 식물은 몸안에서 스트레스호르몬인 자스몬산을 생성하고 그것을 신호전달물질로 하여 신속히 방어응답을 시작한다. 더우기 외부에서 자스몬산을 산포하는 경우 식물이 미소해충인 선충에 의

한 먹음피해를 적게 받는다는 자료[3, 5]도 알려지고있다. 따라서 식물지상부에서의 해충에 대한 방어응답과 유사한 현상이 지하부의 선충에서도 생겨난다고 가정하고 자스몬산을 리용한 선충방지의 가능성이 검토되었다.[5, 6]

실험식물로는 도마도(*Lycopersicum esculentum*)를 리용하였다. 이 도마도품종은 선충저항성유전자(*Mi-gene*)를 가지고있는 품종으로 알려져있다. 그러나 주요도마도생산지에서는 이 저항성유전자산물의 영향을 받지 않는 선충계통이 이미 만연하고있으며 이로부터 이러한 선충을 방지하는것이 중요한 과제로 제기되고있다. 때문에 저항성기피계통의 선충과 선충저항성유전자를 보존한 도마도품종을 조합하여 도마도에 JA를 처리하는 경우 선충의 기생은 어떻게 변화시키는가를 해석하였다.

모래를 채운 포트에 도마도를 과종하고 싹튼 후 본잎이 2매이상 되었을 때에 JA류사체인 메틸자스몬산(MeJA)을 잎면에 낮은 농도(0.1mmol/L)와 높은 농도(1.0mmol/L)로 각각 처리하였다. 각 농도의 MeJA를 잎면산포한 2일후에 200마리의 선충을 그루에 접종하고 선충접종후 1~2주일후에 도마도지하부를 채취하고 뿌리내부의 선충을 염색하는 방법으로 선충의 침입개체수를 측정하였다. 그 결과 낮은 농도의 MeJA처리구에서는 선충의 감염이 억제되지 않았는데 높은 농도의 처리구에서는 1주일후에 선충의 감염이 유의하게 억제되었다. 그러나 선충접종후 2주일 지나면 높은 농도 MeJA처리구에서 나타난 선충감염억제효과도 떨어지며 무처리와 비교하여도 선충감염수에서 차이가 없었다.

선충접종 1주일후의 선충감염수관정결과로부터 MeJA처리농도에 따라 선충억제효과에서 차이가 있다는것이 판명되었다. 이로부터 JA의 생성이나 작용에 참가하는 식물유전자 무리의 발현이 JA처리농도에 의하여 변화되지 않는가를 해석하였다.[4, 5] 그 결과 높은 농도 MeJA처리구에서는 JA경로가 활성화되었지만 낮은 농도 MeJA처리구에서는 JA경로가 거의 활성화되지 않았다는것이 밝혀졌다. 이 결과는 JA경로의 활성화가 선충의 침입억제효과와 정의상관을 나타낸다는것을 보여주는것으로 된다. 더우기 MeJA처리후 1주일정도에서 높은 농도 MeJA처리구에서도 JA경로의 활성화는 낮아졌으며 그것과 동시에 선충감염억제효과도 나타나지 않았다. 이것으로부터도 JA경로의 활성화가 선충억제효과를 나타낸다는것이 명백하다고 볼수 있다. 이미 병충해억제에 관계한다는것이 알려져있는 단백질분해효소억제제나 말티시스타틴(multicystatin) 등의 유전자가 발현될 때 선충의 침입은 억제되며 이외의 JA관련유전자보다도 현저한 상관을 나타낸다고 할수 있다. 이렇게 밀접한 상관을 가지는 유전자는 어느것이나 식물체안에서 호소반응저해를 담당한 유전자이며 선충이 뿌리에 감염한 후에 정착, 기생할수 없도록 억제하는데서 중요한 유전자라고 지금까지 생각하여왔다. 이러한 유전자가 식물체안에서 발현되고있는 사이에 선충을 접종하면 감염자체가 억제된다는데로부터 초기의 침입을 막기 위해서도 이러한 유전자발현이 중요하다는것이 판명되었다. 그러나 유전자발현 그자체가 식물체로의 선충의 침입을 억제하였는가는 명백하지 않으며 유전자발현에 따르는 선충기피물질이 방출되었거나 혹은 선충유인물질의 방출이 정지되었을 가능성이 있기때문에 앞으로 보다 연구가 심화되어야 한다고 보고있다.[2, 5] 이상의 결과로부터 낮은 농도의 MeJA처리로는 선충의 감염을 억제할수 없지만 높은 농도의 MeJA의 처리는 감염을 억제한다는것이 판명되었다. 그러나 이 억제효과가 약 1주일밖에 지속되지 않는다는것도 밝혀졌다. 그러면 1주일사이에 높은 농도의 MeJA를 계속 처리하면 선충감염의 억제가 계속되는가 하는 문제를 검토하기 위하여 1주일사이에 1.0mmol/L의

MeJA를 계속 산포하고 선충감염의 억제정도를 조사하였다. 그 결과 1주일 사이에 MeJA를 산포하면 선충감염억제효과가 회복되었다. 또한 선충의 1세대가 완료될 때까지 약 1개월간 매주 MeJA를 계속 산포한 경우 뿌리에 부착하는 알의 수도 유의하게 낮아졌다. 선충접종전에 한번만 MeJA를 처리하여도 알의 수는 유의하게 낮아졌으며 더우기 유전자발현이 억제되는 적당한 시기를 맞추어 1주일마다 여러번 MeJA를 처리하면 알의 수가 보다 적어졌다. 이것은 MeJA처리에 의하여 JA경로가 활성화되어 단백질분해효소억제제나 말티시스타틴 등의 유전자가 계속 발현되는 상태를 의도적으로 조성하는것으로 초기의 감염을 막는것과 함께 감염한 선충에 대해서도 뿌리에 정착, 기생하는것을 저지시키는것과 관련된다고 보고있다. 이렇게 MeJA를 적절한 농도로 적절한 시기에 식물에 계속 처리하면 선충의 감염이나 기생을 유의하게 감소시키는것이 가능하였다. 더우기 우에서 본것처럼 JA경로의 활성화는 지상부해충의 방지도도 유효하다고 보고있으며 JA(MeJA)를 능숙하게 활용하면 지상부, 지하부 량쪽의 해충방지에 동시에 리용할수도 있다.

그러나 MeJA를 식물에 처리하면 선충감염을 억제하는 등의 우점만이 아니라 결함도 있다. JA는 식물호르몬이기때문에 그 리용에 의하여 다른 식물호르몬의 기능이나 내재량이 변화되는 결과 재배작물의 생장과 분화에서 이상현상이 나타나는 등 농업경영상 좋지 못한 형질을 나타낼 가능성이 있다. 특히 JA경로는 해충저항성유도만이 아니라 생장을 담당한 경로에도 있다고 보고있다. 사실 높은 농도로 처리하는 경우 생장억제가 나타난다. 또한 정도이상 높은 농도의 MeJA를 처리한 식물은 잎이 뜨거운 물에 덴것 같은 증상을 나타내는 등의 약해문제도 밝혀지고있다.[6, 7]

### 3. JA경로에 의한 식물방어를 리용한 선충피해억제의 응용가능성

MeJA를 처리하여 JA경로가 활성화된 도마도에서 선충의 감염이 억제된다는것이 밝혀졌다. 도마도에서는 유전자변이체를 얻기 힘들기때문에 대신에 애기장대를 실험식물로 리용하였다. 애기장대(*Arabidopsis thaliana*)는 모형실험식물로서 여러 분야에 쓰이고있으며 2000년에 전 게놈배열이 해석되었기때문에 유전자파괴계통이나 유전자과잉발현계통이 구비되어 있다.[8, 9]

리용한 계통은 야생그루와 JA에 대한 감수성을 잃은 *coil-1*변이체, JA에 대한 감수성이 높고 JA무처리때에도 JA경로가 활성화되어있는 *sa*변이체이다.[10]

모래를 채운 포트에 애기장대를 파종하고 싹튼 후 잎이 충분히 퍼졌을 때 MeJA를 처리하였다. 애기장대는 도마도에 비하여 JA에 대한 감수성이 높기때문에 0.1mmol/L의 MeJA를 처리하였다. MeJA를 처리한 2일후에 200마리의 선충을 그루주변에 접종하였다. 선충접종후 1주일후에 지하부를 채취하고 뿌리안의 선충을 염색하는 방법으로 선충의 침입개체수를 측정하였다.

그 결과 애기장대에서도 MeJA처리에 의하여 JA경로가 활성화되면 선충의 침입이 억제된다는것이 밝혀졌다. MeJA를 처리하지 않아도 JA경로가 활성화되어있는 *sa*변이체에서도 선충의 침입은 MeJA를 처리하지 않은 야생그루에 비하여 유의하게 억제되었다. 그러나 *sa*변이체에서 MeJA를 처리한 구와 처리하지 않은 구의 선충침입수에서는 그 차이가 나타나지 않았다. 유전자발현량이 어느 정도의 수준을 넘으면 선충감염억제효과에서 차이가 나

타나지 않게 된다는것이 밝혀졌는데 이때 야생그루, *sa*변이체와 함께 도마도와 마찬가지로 시스타틴유전자발현과 선충침입수저하사이에 상관성이 나타났다. 이로부터 선충의 감염억제에는 식물종에 관계없이 JA관련유전자 특히 시스타틴효소반응에 관계되는 유전자의 발현이 관여하고있다는것을 예측할수 있다.

한편 MeJA에 의한 JA관련유전자의 발현이 유도되지 않는 *col-1*변이체에서 선충의 침입수는 야생그루에서보다도 유의하게 적었다. *col-1*변이체는 JA경로자체가 활성화되지 않는 변이체이기때문에 MeJA를 처리하여도 JA경로가 활성화되지 않는다. 그럼에도 불구하고 선충의 침입수는 야생그루의 MeJA처리때와 비슷하였다. 선충의 침입이 야생그루보다도 억제되었다는데로부터 선충이 뿌리에 침입할 때 JA경로를 리용하며 JA경로가 존재하지 않으면 감염이 성립되지 않을 가능성이 있다. 이 결과로부터 선충의 뿌리에로의 침입과 그 억제는 JA경로가 깊이 관여하고있다는것과 함께 JA경로의 존재와 그 활성화에 의하여 선충의 침입이 억제된다는것을 알수 있다.

## 맺 는 말

JA경로의 유전자무리의 활성화와 후선충침입억제사이에 관련이 있다는것이 명백해졌다. 또 JA경로자체가 결여되어도 침입이 억제된다는것도 판명되었다. 그러나 자스몬산의 제조원가가 높기때문에 현 시점에서는 실전에 도입하기는 힘들다고 보고있다. JA경로가 결여된 품종의 육종도 현 시점에서는 현실적인것으로는 되지 못한다. 따라서 선충에 대한 유효한 저항성유도제를 개발하기 위하여서는 자스몬산경로를 활성화시키는 자스몬산 및 그 유사체이외의 화합물을 탐색하는것이 중요하다고 본다.

실험을 통하여 선충의 감염억제효과와 유효한 상관성을 가진 유전자를 몇가지 얻을수 있었다. 이러한 유전자의 발현이 직접 선충의 감염억제효과를 가져온다고 보기는 힘드나 유전자발현에 따르는 식물체안의 물질방출량과 축적량의 변화에 의하여 선충의 감염이 억제될 가능성이 높다. 이러한 물질의 변화를 선충이 민감하게 인식하고 침입하지 않는다고 볼수 있기때문에 앞으로는 자스몬산처리에 따라 식물체에서 방출되는 물질의 변화에 초점을 두고 선충감염억제효과를 가지는 물질이 존재하지 않는가가 검증되어야 한다. 이러한 연구는 앞으로 보다 실질적인 선충방지효과와 함께 응용가능성도 높은 물질의 탐색으로 되어야 한다는것이 연구자들의 공통된 견해이다.

## 참 고 문 헌

- [1] T. Uehara et al.; Plant Mol. Biol., 71, 185, 2015.
- [2] C. Girard et al.; New. Phytol., 181, 841, 2015.
- [3] M. Goulet et al.; Plant Physiol., 148, 1010, 2010.
- [4] E. Bouchard et al.; Mol. Ecol., 22, 2439, 2013.
- [5] S. Annadana et al.; Transgenic Res., 21, 437, 2012.
- [6] J. Wu et al.; Comp. Biochem. Physiol., C 127, 209, 2000.
- [7] Y. Kouzuma et al.; J. Biochem., 128, 161, 2000.

- [8] M. E. Gendron et al.; Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol., **298**, 2026, 2010.
- [9] M. Sulaiman et al.; Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol., **298**, 833, 2010.
- [10] D. K. Das et al.; Heart Fail. Rev., **15**, 467, 2010.

주체108(2019)년 7월 5일 원고접수

## **An Application Possibilities of Jasmonic Acid in Prevention of Plant Parasitic Nematode**

*Kim Chol U*

Jasmonic acid, the plant hormone, is an inducer of the resistance to damage by nematode. It is considered as the prospective material in conservation of the environment and control of the nematode.

Key words: plant parasitic nematode, plant hormone, jasmonic acid