

실용상의 문제점
유전공학기법으로
극복 가능

유용 미생물 자원 활용
국내에서도 개발에 박차



농업기술연구소 유전공학과
농업연구원 류진창
농학박사

나. 곤충병원성 미생물농약

자연생태계 속에서 동·식물과 함께 공존하는 미생물 중에서 細菌, 糸狀菌(곰팡이), 마이코플라스마(my-coplasma), 바이러스, 리케차(ricke-ttsias) 및 스피로테타(Spirochetes) 및 원생동물 등은 곤충에 병을 유발하는 균으로 알려져 있다.

천적성 및 독성을 방제에 이용

곤충병원미생물을 이용한 해충방제는, 미생물의 본성을 직접 이용하는 천적미생물과 미생물을 증균시켜 복잡한 제제과정을 통하여 독성을 이용하는 미생물 살충제(microbial insecticides)의 2가지로 구분할 수 있다.

저항성 발달 늦고 인축독성 없어

미생물적 방제 즉, 미생물 살충제는 식물에 피해를 주지 않고 인축이나 어류에 대한 독성의 위험성이 전혀 없고 살충하고자 하는 목적해충에 대해서만 선택적으로 방제할 수 있으므로 생태계 보전에 화학제 농약보다 유리할 뿐만 아니라, 해충의 미생물병에 대한 저항성 발달이 둔화된다는 특징을 갖고 있기 때문에 미생물 살충제에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다.

1901년 일본에서 최초발견

미생물 살충제를 처음 발견한 사람은 1901년 일본의 Ishiwatta로서 누에의 줄도병(卒倒病)에서 병원균

〈표 2〉 병해방제 생물농약 및 길항미생물

제 제 명	병 해 길 항 균	대 상 병 원 균	작 용 기 작
Bulboiformin	<i>Bacillus subtilis</i>	묘입고병 (채소, 강낭콩)	세포벽 합성저해
Bacteriocin	<i>Agrobacterium tumefaciens</i> <i>Agrobacterium radiobacter</i>	근두암중병(복숭아, 사과, 은행나무)	세포벽 및 단백질 합성저해
Pyrolnitrin	<i>Pseudomonas pyrocinia</i> <i>Pseudomonas pyrolnitrica</i>	채소묘입고병 참깨, 고추 역병	세포벽 합성 저해 및 군사용균
Polyoxin D	<i>Streptomyces cacaoi</i> <i>Sub asoensis</i>	벼문고병, 각종 작물 흰가루병	Chitin 합성저해 및 군사용균
Novobiocin	—	새군성 썩양병	DNA 복제저해
Mildomycin	—	각종 작물의 흰가루병	—
Bialaphos	<i>Streptomyces hygroscopicus</i>	제초제	—
Streptomycin	<i>Streptomyces</i> sp.	감귤 썩양병, 배추 무름병, 감자 역병	단백질 합성저해
Tetracyclines	<i>Streptomyces viridifaciens</i>		단백질 합성저해 (ribosome에 작용)
Blasticidins	<i>Streptomyces</i> <i>griseochromogenes</i>	벼도열병	단백질 합성저해
Gliotoxin	<i>Trichoderma lignorum</i>	담배 흰비단병	군사 용균 및
Viridin		허리 마름병	Chitin 합성저해
Trichodermin	<i>Trichoderma hargianum</i>	채소 묘입고병	—
—	<i>Trichoderma viride</i>	야채 묘입고병	—
—	<i>Penicillium oxalicum</i>	완두콩 입고병	—
—	<i>Chaetomium globosum</i>	옥수수 묘입고병	—
—	<i>Pythium oligandrum</i>	사탕무우 입고병	—
—	<i>Aspergillus niger</i>	커피 입고병	—
—	<i>Glioclodium</i> sp. <i>viren</i>	참깨 묘입고병	—
—	<i>Erwinia herbicola</i>	과수 부란병	—

을 분리하여 *Bacillus sotto*로 명명한 것이 최초였다. 그후 1911년 Berliner는 독일의 Thuringien지방의 제분소에서 가루출명나방에 발생한 아포세균(芽胞細菌)을 분리 동정하여 *Bacillus thuringiensis*(Bt)라 명명하

였다. 그후 1950년대에 많은 생물검정을 통하여 1960년부터 *Bacillus thuringiensis*균을 미생물 살충제로서 개발, 판매하기 시작하였다.

현재 미생물 살충제로 개발된 것은 세균을 비롯하여 바이러스, 곰팡이.

원생동물 등이 있으나 그 중 몇가지의 특징과 개발된 제제를 소개한다.

1) 세균성 미생물 살충제 (Bacterial insecticides)

곤충병원성 세균은 *Pseudomonadance*, *Enterobacteriaceae*, *Lactobacteriacillaceae*, *Micrococcaceae* 및 *Bacillaceae* 과(科) 등으로 알려져 있으나, 이들 중 *Bacillaceae*는 대부분 포자형성균(孢子形成菌: Sporulating)이지만 다른 균들은 비포자형성균으로 알려져 있다.

Bacillaceae 과에 속하는 *Bacillus thuringiensis* (Bt균)는 아포(芽胞) 및 단백질결정체를 갖는 호기성 간균(桿菌)으로서 포자형성시에 결정형의 δ -내독소(endotoxin)를 생성하며 영양생장기에 α , β , γ 등 5종의 외독소(exotoxin)를 분비하는데 이들 중에서 결정형 독소인 δ -내독소는 나비목, 파리목 등의 곤충에 병원성을 나타내지만 특히 농업해충에 문제가 되는 나비목 곤충에 살충력이 높은 것으로 알려져 있다.

中腸 상피조직을 파괴시켜 치사

살충기작은 곤충이 이 독소물질을 섭식함으로써 중장(中腸) 내에서 분비되는 단백질분해효소(protease)에 의해 6.8×10^4 메가달톤 정도의 polypeptide로 분해된 후 활성화되어 중

장상피(中腸上皮)에 일시적인 변화가 일어나 중장상피조직이 파괴되어 유충이 치사하게 된다.

이 활성 polypeptide는 *B. thuringiensis*의 아종(亞種)에 따라 이 곤충 치사유전자는 1~2개의 유전자가 관여하는 것으로 알려져 있고, 더욱 Bt균에 따라서 세포내에 존재하는 Plasmid DNA와 숙주DNA상에 존재한다고 보고되어 있다. *Bacillus* 속을 이용한 미생물 살충제 개발연구는 미생물 살충효율을 높이기 위한 것과 더불어 포장에서의 응용면에서 추구되었다.

최근 첨단과학기술을 이용한 분자생물학의 급속한 발전과 더불어 곤충병원성의 *Bacillus thuringiensis*에 관한 관심은 독소합성과 protoxin의 형성과 조절 및 발현기작, 그리고 독소유전자를 다른 유용미생물에 형질전환하기 위한 model system 개발 연구에 박차를 가하고 있다.

나비목 Bt제 40여종 실용 가능

Bt제제를 활용한 살충성 미생물 농약 개발은 나비목을 중심으로 200여종이 있으나 그중 40여종은 실용 가능성이 있는 것으로 알려져 있으며, 제제로서는 분제, 수화제, 농축액제 등 다양하여 식용 및 원예작물과 산림해충의 방제용으로 적용할 전망이

〈표 3〉 세균성 미생물 살충제 개발현황

곤충병원성세균	상 표 명	개 발 회 사	제 조 국 명
<i>Bacillus popilliae</i>	Doom	Fairfax Biolog. Lab.	미 국
	Japidemic		
	Milky Spore disease		미 국
<i>Bacillus thuringiensis</i> (δ -endotoxin + spore)	Dipel	Abbott Lab.	미 국
	Thuricide® HP	Sandoz-wander, Inc.	미 국
	Thuricide® SC		
	Certan	Sandoz, Inc.	미 국
	Bactur	Thompson Nayward Chem.	미 국
	Biotrol	Nutrilite Prod., Inc.	미 국
	Leptox	Biochem Prod. S. A	프 랑 스
	Bug Time	Biochem Prod. S. A	프 랑 스
	Bactospeine	Roger Bellon	프 랑 스
	Plantibac	Procida	프 랑 스
	Sporeine	L. I. B. E. C.	프 랑 스
	Biospor	Farbwerke Hoechst	서 독
	Bathurin	Chemapol-Biokrma	체코슬로바키아
	Baktukal	Serum zavod kalinovica	유고슬라비아
	Dendrobacillin	Glavmikrobioprom	소 련
	Entobacterin	Glavmikrobioprom	소 련
	Insectine	Glavmikrobioprom	소 련
BIP	—	소 련	
Gomeline	—	소 련	
<i>Bacillus thuringiensis</i> (β -exotoxin)	Biotoxibacillin	All-Union institute of agri. Microbiol.	소 련
	Eksotoksin	Glavmikrobioprom	소 련
	Toxobacterin	Glavmikrobioprom	소 련
	Turingin	—	루마니아
	Tumitox	—	루마니아
	Dipel	Under Abbott license	불가리아
<i>Bacillus moritati</i>	Lavillus M	Sumitomo Chem. Co.	일 본
<i>Bacillus sphaericus</i>	—	—	일 본

있다. 현재까지 제제로 개발된 미생물 살충제의 현황은 표 3과 같다.

국내 여러 기관서도 개발에 박차

국내에서 개발된 미생물 살충제는 아직 없는 실정이나 그 이용현황을 보면 1973년에 Bt수화제를 도입하여 생물검정을 실시한 바 있고, Thuricide 약제에 대하여 솔나방, 흰불나방 및 배추흰나비 방제용으로 허가되어 그 소비량은 1980년 10,802kg에 비하여 1982년에는 약 15,000kg으로 매년 사용량이 증가 추세이다.

미생물 살충제의 농약개발을 위한 기초연구기관은 한국과학기술원, 농촌진흥청을 비롯하여 몇몇 대학이나 민간기업체에서는 *Bacillus thuringiensis*의 곤충병원성 미생물을 이용하여 미생물 살충제 농약개발연구에 많은 투자를 하고 있다. 특히 농업기술연구소는 유전자 재조합기법에 의한 살충성 미생물 개발연구의 하나로 Bt균의 곤충치사독소 유전자의 구조를 해석하고 지도를 작성한 바 있다. 특히 독소유전자를 대장균 내에 형질전환시켜 독소단백질을 간이 정량할 수 있는 효소면역방법을 개발하였다. 또한 복합살충성 미생물 개발 및 곤충치사독소 유전자를 식물세포 속에 형질전환시켜 내충성 작물개발을 위한 기초연구를 계속 수행하고 있다.

2) 바이러스성 살충제

(Viral insecticides)

곤충에 살충력을 발현하는 바이러스는 *Baculoviridae*, *Poxviridae*, *Reoviridae*, *Iridoviridae*, *Parvoviridae*, *Picornoviridae* 및 *Rhabdoviridae* 등이 알려져 있으나, 이들 바이러스중 살충제 농약으로 개발된 것은 해충군락 내에서 곤충유행병(epizootic)을 일으키는 것들이 대부분이다.

곤충 바이러스는 1907년 Von Pro-vazeck가 누에병(핵 다각체병 바이러스: Nuclear-polyhedrosis Virus)이 여과성 인자의 바이러스에 기인됨을 보고한 이래 현재까지 1,000여종의 곤충 질병 중 450여종이 바이러스에 의한 병으로 나비목의 곤충에서 많이 발견되었다.

핵다각체병 바이러스는 곤충의 혈구(血球), 기관피막(氣管被膜), 지방조직, 진피(眞皮) 등의 곤충세포핵에서 증식하여 핵내에 다각체를 형성함으로써 몸 색깔이 황색으로 변하면서 장구(腸口)로부터 체액이 나오고 피부가 파괴되어 해충은 수목의 선단으로 이동하여 복각(腹角)을 고착하여 거꾸로 매달려 죽는다.

곤충을 숙주로 하는 과립형바이러스(*granulosis virus*)는 곤충의 중장피막의 단통세포(丹筒細胞)에 감염하고, 거기서 증식하여 Capsule을 갖

지 않은 입자가 체강측(體腔側)에 방출됨으로써 지방조직에 변화를 일으켜 곤충을 치사시키는 특징이 있다.

이외에도 곤충바이러스는 곤충포스바이러스(Insect pox virus), 홍색바이러스(Iridescent virus)와 세포질핵다각체병 바이러스(Cytoplasmic polyhedrosis virus) 등이 있는 것으로 알려져 있다.

핵다각체·과립형이 가장 유효

이들 바이러스중 핵다각체병 바이러스와 과립형 바이러스군이 가장 유효한 바이러스성 살충제로 알려졌다.

그 원인으로 *Baculoviridae*과 내에 있는 바이러스는 무척추동물에 치명적인 감염을 일으키기 때문에 식물 바이러스, 척추동물의 바이러스와 관련하여 다른 곤충바이러스보다는 안전성이 높은 것으로 알려져 있다. 또한 *Baculoviridae*는 숙주범위가 좁고 곤충에 대한 병원성 정도가 높으며 살충제의 제조과정이 편리하고, 자연 환경에 대한 안정성이 높기 때문에 미생물 살충제로서 각광을 받았다.

숙주곤충 다량 사육방법이 문제

이들 제제는 다른 미생물 살충제보다 살충력의 기간이 긴 것이 특징으로 알려져 있다. 그러나 곤충병원성 바이러스를 이용한 미생물 살충제는 목적하는 해충만을 선택적으로

방제할 수 있는 장점을 갖고 있으나 숙주곤충을 다량 사육할 수 있는 방법의 개발이 시급한 실정이다.

지금까지 곤충바이러스를 이용한 살충제농약 개발현황은 표4와 같다.

우리나라에서 곤충바이러스를 이용한 살충제 개발제제는 아직 없으나 일본에서 분양받은 핵다각체병 바이러스를 흰굴나방에 생물검정을 실시한 바 있고, 최근에는 흰굴나방에서 핵다각체병 바이러스와 과립형 바이러스의 성상과 병원성을 조사한 바 있다.

한편 농업기술연구소의 곤충과에서는 담배거세미나방, 바이러스병 이용을 위하여 곤충바이러스의 특성과 해충방제용 미생물 살충제 개발연구가 현재 진행 중에 있다.

3) 곰팡이성 미생물 살충제 (Fungal insecticides)

진균류, 즉 곰팡이(Fungus)를 이용한 살충제 농약개발은 경제적인 측면에서 해충의 생물학적 방제를 위해서 그 중요성이 널리 인정되고 있다. 곤충병원성을 갖는 곰팡이는 해충군락의 약화(弱화)현상을 초래하는 곤충유행병(epizootic)을 일으켜 해충의 밀도를 저하시킴으로써 목적을 달성할 수 있다. 이들 곰팡이를 최초로 발견한 것은 1834년 누에 병을 유발하는 *Beauveria*를 분리하여

<표 4> 곤충 바이러스의 살충제 개발현황

바이러스 종류	기 주 명	제 품 명	제조사 및 국명	
해다각체병 바이러스(NPS)	<i>Audographa californica</i> (밤나방 일종)	—	(USDA)	
	<i>Choristoneura fumiferana</i> (잎말이나방)	—	임야청 (캐나다)	
	<i>Heliothis zea</i> (목화다래나방)	Biotrol VHZ Elcar Vitrex	NPI (미국) Sandoz-wander Inc. (미국) Hays-sammons (미국)	
	<i>Mamestra brassicae</i> (도둑나방)	Virin-ensh	GMB (소련)	
	<i>Neodiprion sertifer</i> (유럽소나무일벌)	Poly viroicide	Indiana Farm Bur Co-op Assoc (미국)	
	<i>Porthetria dispar</i> (짚시나방)	— Virin-ex	Kemiya Oy (프랑스) GMB (소련)	
	<i>Prodenia ornithogalli</i> (독나방 일종)	Biotrol VPO Viron/P	NPI (미국) IMC (미국)	
	<i>Spodoptera exaqua</i> (담배밤나방)	Biotrol VSE Viron/S	NPI (미국) IMC (미국)	
	<i>Trichoplusia ni</i> (양배추은무늬나방)	Biotrol VTN Viron/T	NPI (미국) IMC (미국)	
		—	Rudd Assoc (미국)	
		—	Bio, Control Supplies (미국)	
		TM	NPI (미국)	
	<i>Orgyria pseudotsugata</i>	Biocontrol-1		
	과립형바이러스 (GV)	<i>Pieris rapae</i> (배추흰나비)	Virin GKB	Latvian Agri Academy (소련)
	세포질다각체병 바이러스(CPV)	<i>Dendrolimus spectabilis</i> (솔 나 방)	Matsukemin	중의제약 (일본)

해충의 곰팡이병을 경제적으로 방제하기 위해서 시도하였으나 실패하였다고 보고되고 있다.

그러나 1900년 초기에 *Aschersonia* 종이 감귤의 흰굴나방을 죽일 수 있는 미생물로 선발되어 오늘날까지 유

효한 곰팡이성 살충미생물로 남아있다.

유아관이나 부착기 파괴효과

곰팡이성 곤충병원성(fungal entomopathogen) 미생물의 해충치사기 작은 곰팡이가 해충에 감염되어 해충표피에 분생자(分生子: conidium) 또는 유주자(zospore)가 유아관(幼芽管: germ tube)이나 부착기(appressorium)에 침입하여 독소를 생성하거나 기계적 파괴를 유기시킴으로써 곤충을 치사시키는 것으로 알려졌다.

현재 곤충병원성을 갖는 곰팡이성 살충제의 개발은 모기유충이나 잡자리에 독소성을 갖는 *Beaveria bassiana*를 이용한 미생물 살충제도 있으나 농작물에 재해를 주는 해충방제를 위한 미생물 살충제의 개발현황을 보면 표 5와 같다.

국내에서 곰팡이의 균사나 분생포자를 이용한 살충제의 개발제품은 아직 없는 실정이며 특히 선충의 생물적 방제를 위하여 살선충 미생물을 선발하는 기초연구단계에 있는 실정으로 이 분야의 연구가 집중적으로 수행되어야 할 것으로 생각된다.

미생물 농약의 전망

생물농약 및 미생물농약은 앞에서

언급한 바와 같이 자연환경의 오염, 자연생태계 파괴 및 동·식물의 잔류 독소등 여러가지 문제점을 해결하기 위해서 무공해농약으로서 그 중요성이 인식되고 있다.

국민의 생활수준향상과 더불어 정화된 환경과 건강식품을 요구하는 생활양식으로 변천되기 때문에 더욱 전망이 높은 농약이라 하겠다. 대부분 미생물을 이용한 살균 및 살충제농약은 작물의 생산성을 높이기 위한 병해충의 방제용으로 사용될 것이다. 이들 농약이 화학농약제의 대용으로 확대사용될 경우에는 화학농약제 보다 높은 생산가격등이 문제가 될 것이다. 그러나 산이 많은 우리나라에서는 산림의 생태적 보존이 요구되는 국유림에는 저렴한 화학살충제의 살포로 말미암아 생태계가 불가역적으로 파괴되는 것을 막기 위해서 비싸더라도 미생물 농약의 살충제가 절실히 필요할지도 모른다.

미생물 농약은 병해충에 대한 숙주범위가 좁고 생산가격이 높기 때문에 산업적으로 개발하여 실용화하기에는 어려운 문제점이 내포되어 있다. 그러나 생물을 이용한 식물병원성(phytopathogen) 및 곤충병원성(entomopathogen)에 대한 미생물 농약의 개발은 우리 주변에 무수히 존재하는 유용미생물의 생물자원 활용면에서 유효할 것이다.

〈표 5〉 곰팡이성 미생물 살충제 개발현황

제 품 명	대 상 해 충	곤충병원성균	제조국명
1. Boverin®	Colorado pota. beetle (감자딱정벌레) : <i>Leptinotarsa</i> <i>dececlineata</i> coding moth	<i>Beauveria bassiana</i> <i>Beauveria brongniartii</i>	소 련
2. Metaquino	Spittle bug (딱정벌레) : <i>Mabanarva posticata</i> : Sugarcane Homopterans	<i>Metarhizium anisopliae</i>	브 라 질
3. Mycar®	Citrus rust mite (감귤응애)	<i>Hirsutella thompsonii</i>	미 국 (상업화)
4. —	Cabbage looper (양배추자벌레) Velvet beam caterpillar (복숭아껍질뽕기벌레)	<i>Nomurea rileyi</i>	미 국
5. Vertalec®	Aphids (진딧물) glasshouse crops mites (응애류) spiders (거미)	<i>Verticillium lecanii</i>	영 국
6. —	Aphides, mites	<i>Entomophthora</i> sp.	미 국
7. —	Citrus scale insects	<i>Aschersonia aleyrodis</i>	소 련

*미국 환경보호청 등록중

발병억제 관한 기초연구 필요

또한 미생물 농약의 개발을 확대하거나 이용을 적극적으로 추진하기 위해서는 미생물과 병해충간에 발현되는 병원성에 관하여 생화학 및 분자생물학 분야에 많은 지식이 요구되며 특히 이들 미생물이 병을 억제하는 기작이나, 곤충에 병을 유발하

는 기작을 이해하고 미생물이 생성하는 대사산물과 그 작용에 대해서 기본적인 연구가 요청되고 있다.

최근 급진적으로 발전되고 있는 유전공학기법을 미생물 농약개발 분야에 이용한다면 미생물의 변이주 개발은 물론 자연생태계에서 일어나는 물리 화학적 억제를 극복하여 적용 대상 숙주범위를 확대함으로써 유기

합성제 농약에 대체할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 곤충병원성을 갖는 미생물의 분자생물학적 연구는 미생물농약의 개발이용 면에서 나타나는 문제점을 해결하는데 중요한 분야가 될 것이다.

미생물농약은 식물병해를 방제하는 살균제보다 살충제의 농약제제가 많은 실정이며 이들 살충제 농약은 인축에 해독작용이 없도록 상업적으로 생산·판매되고 있으나, 앞에서 언급한 바와 같이 보완해야 할 문제점도 많이 갖고 있다.

앞으로 미생물 농약제를 개발함에 있어 관심을 가져야 할 부분은 생산공정이 편리하고 경제적이어야 하며 병해충에 대한 독성이 선택적으로 강

하여야 할 것이다. 또한 응용면에서 미생물농약 개발의 초기단계는 화학농약제와 혼합사용이 가능하고 포장조건에서 농약의 안정성과 유효성이 유지되도록 피복제 및 증량제의 개발 등 제제화 개발에도 관심을 두어야 할 것이다. 그러므로써 미생물농약의 사용량이 증가될 줄 믿는다.

이러한 목적을 달성하기 위해서 미생물에 관한 연구나 제제개발을 추진하고 있는 국영 및 민간기업체를 비롯하여 각 연구소간에 상호협력체제를 갖고 미생물 농약 개발면에 주력한다면 우리나라에서도 미생물 농약의 토착화가 가능할 것으로 생각된다.

참

국내합성원제 등록 현황

(’88.2.29 현재)

고

자

료

약 종 별	품 목 수	등록건수
살 균 제	23	50
살 충 제	30	80
제 초 제	9	17
기 타	5	13
계	67	160