

<요약>

현재 일부 생물 살충제가 화학 살충제 대신 상업적으로 이용되고 있으나, 이를 이용하는데 문제점은 생물학적 재제들의 응용 방법들이 적절하게 고려되지 않고 있다는 점이다. 따라서 현재 생물 살충제의 응용에 관한 정보를 살펴보고, 좀 더 효율적인 응용 기술들을 개발하기 위해 어떠한 연구 개발이 필요한 지를 알아보기로 한다.

<서론>

농업의 다양한 생산시스템에 있어서 병충해를 제거하기 위해 화학 살충제의 사용은 많은 부작용을 일으키므로 새롭고 효율적인 관리와 전략이 필요하다. 새로운 전략은 현재의 화학 살충제를 바탕으로 한 것보다 환경에 미치는 영향이 더 적어야 하고 농부나 사용자들의 건강에도 해를 끼치지 않아야 한다. 이러한 환경친화적인 접근은 여전히 살충제를 사용하는 것이 포함되어 있으며 다만 낮은 독성을 가진 살충제를 이용할 뿐이다. 생물 살충제의 응용은 현대적인 전략인 통합적인 해충관리(Integrated Pest Management(IPM))에 알맞다고 할 수 있는데, IPM은 모든 적합한 제어기술들을 서로 결합시키고 모든 작물생산에 통합적으로 운용을 하여 해충의 밀도를 일정한 수준까지 억제시켜 생태계를 정상적으로 보존시킨다(Phytoparasitica, 27, 253(1999)). 생물 살충제의 사용은 환경적인 측면과 생태학적인 측면에 기초하기 때문에 알맞은 때, 위치, 활성 반경, 해충의 밀도와 분포, 생활사, 계속성, 숙주에 대한 특이성등 모두가 중요하다. 따라서 좋은 효과를 얻는다는 것은 쉽지 않은 문제이다.

대부분의 전통적인 화학 살충제와는 달리 생물 살충제는 생물학적 산물 또는 생물들로 정의되는데, 이것들은 현장의 생물학적 근원으로부터 생산된다. 예를들면 바이러스, 세균, 곰팡이, 포식자, 기생충, 페르몬등이 그것들이다. 이들 재제들은 다양한 방식으로 사용되고 있으며 이들의 응용은 화학 살충제와는 다른 문제점들이 나타난다. 특히 생물 살충제는 살아 있는 생물들이며 이들의 활성을 유지하는데 많은 주의가 필요하다.

현재 많은 연구자들은 생물 살충제를 분사하기 위해 기존의 분사기술을 이용하면 된다고 생각하지만 부적절한 장치 및 비효율적인 재제화등 때문에 성공률이 낮다. 기존의 전통적인 장치를 사용하는 것은 모든 특수한 살충제를 응용하기 위해 특수 장치를 구입해야 한다는 경제적 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 한가지 방법은 모든 살충제에 응용하기 위해 생물 살충제에 가장 효율적인 장치를 개발하여 사용하는 것이다. 그럼에도 불구하고 환경적으로 안전하고 목표가 아닌 생물들에 해가 없는 생물 살충제의 효율적인 응용은 재제화와 전달시스템의 개발에 달려있다. 특히 이러한 개발에 고려해야 할 점은 적절한 운용, 계량, 분산, 그리고 해충이 위치해 있는 곳에 충분한 양의 생물 살충제를 살포해야 한다는 점이다.

화학 살충제를 대신해서 곤충을 죽일 수 있는 선충(entomopathogenic nematodes; EPNs)을 포함하여 일부 생물 살충제들이 이미 농토에서 온 해충들이나 질병들을 제어하기 위해 널리 사용되었지만, 여기에 관련한 응용기술이 크게 요구되지는 않았다. 그러나 현재 이러한 물질들과 생물들에 대한 응용기술들의 개발에 있어서 직면하는 어려운 점들에 대해

서는 거의 보고되지 않았었다. 따라서 생물 살충제에 관한 연구를 촉진하고, 효율성을 향상시키기 위해 좀 더 자세한 문제점들을 알아야 할 필요가 있다.

<화학 살충제와 생물 살충제의 응용기술 비교>

화학물질이나 살충제의 응용은 환경에 좋지 않은 영향을 미친다고 보고되었지만, 이러한 영향은 주로 응용한 실제의 살충제의 특성, 사용한 양, 그리고 응용방법에 기인한다. 이러한 살충제가 인간에 노출되는 것은 응용과정의 다양한 단계에서 일어나고, 사용자가 재제화된 제품의 양을 측정하여 물과 혼합할 때 주의를 요한다. 왜냐하면 재제화된 제품에는 높은 농도의 활성 성분이 들어있기 때문이다. 환경적인 측면에서 보면 분사할 때 주로 바람부는 방향으로 분사되어 한쪽으로 흐르는 경우가 있고, 식물의 잎에는 분사되지 않고 현장의 비목표 표면에 쌓이는 경우가 일어날 수 있다. 이러한 독성이 있는 살충제 물질들이 수원지등에 도달하여 오염시킬 수 있는 가능성이 있다. 더구나 분사기 탱크가 없어지거나 청소할 때 환경을 오염시킬 수도 있다.

이러한 유출류는 분사가 높은 곳에서 이루어질 때 증가하므로 관련 당국들은 특히 이러한 부분에 관심을 많이 갖고 있다. 현재 다양한 응용기술과 기상조건에 관련하여 유출물질에 대한 광대한 데이터베이스가 있다. 모델들을 이용하여 데이터베이스를 해석하여 다양한 살충제를 응용하는데 어떠한 환경적인 요인이 있는가를 평가할 수 있다. 일반적으로 독성이 덜하고 좀 더 선택적인 재제들은 더 좁은 완충지역에 응용할 수 있는데, 이러한 응용범위는 droplet의 크기와 바람의 속도에 관계한다. Droplet의 크기는 목표물 표면에 실제로 이용함으로써 최적화할 수 있는데, 일반적으로 작은 droplet이 일정한 공기속도에서 향상된 면을 보이지만 droplet이 작아질수록 유출류는 증가한다.

생물 살충제는 전통적인 화학 살충제와 달리 매우 선택적이고 비목표 생물에는 독성을 나타내지 않는다. 생물 살충제는 전통적인 화학 살충제보다는 환경에 덜 영향을 미치는 것 같지만 여전히 가장 알맞은 droplet을 선택함으로써 유출류를 최소화하는 것이 필요하다. 화학 살충제와 비교하여 생물 살충제의 단점은 대부분이 지속성이 부족하고 상대적으로 작용이 느리다는 점이다. 따라서 활성이 장기간 지속이 되도록 하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 일부 재제들은 농토나 숲에서 여러 달동안 지속이 되는 경우도 있지만 환경적으로 적절한지 분석이 이루어져야 한다.

<저항성 관리 및 통합 해충관리 프로그램>

숙주식물의 저항성은 IPM프로그램의 중요한 요소이었지만 최근에 유전자변형 작물을 생산하는 새로운 기술의 개발이 중요하게 떠오르고 있다. 곤충제어 면에서 Bt(*Bacillus thuringiensis*) 엔도톡신 유전자의 도입은 분사기술의 필요성을 상당히 감소시킬 수 있었다. 그러나 Bt의 또 다른 균주는 다른 곤충군에 영향을 미치고 Bt에 대한 구상 또한 다양하여 다른 작물의 선택은 특정한 해충들에 다른 수준의 독성을 나타내기도 한다. 독신의 특이성 때문에 어떤 해충들은 효율적으로 일부 Bt 유전자 도입 작물들에서 제어되는데 해충들은 직접 충분한 독신을 섭취하게 된다. 반면에 이들의 천연적인 적들은 생존하게 된다. 그러나 넓은 범위에 작용하는 살충제가 없다면 상대적으로 소수의 해충들이 더 큰 문제점이 될 수도 있다. 그래서 유전자 도입 작물뿐만 아니라 IPM도 필수적이다. 한 곤충이 새로운 해충이

된다면 선택적인 살충제를 이용하는 것이 중요한데, 비록 넓은 범위에 작용하는 화학 살충제를 선택적으로 이용할 수도 있겠지만 생물제어에 부정적인 효과를 피하기 위해 생물 살충제를 사용하는 것이 더 좋을 것으로 판단된다.

● 생물 살충제의 개발

생물 살충제 개발에 관한 많은 연구들이 법령으로부터 시작되었고 정부 정책도 화학 살충제를 적게 사용하는 IPM프로그램을 도입하였다. 미국에서는 2000년까지 전 농토의 70%에 IPM프로그램을 도입하는 것을 목표로 하였다. 유럽에서 일부 나라들은 화학 살충제의 사용을 50% 감소시키는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 배경을 기초로 하여 적기에 응용함으로써 살충제의 양을 줄이면서 더 효율적인 결과를 얻을 수 있었고 덜 위험하고 더 활성이 좋은 물질로 대체함으로써 응용의 수를 줄일 수 있었다.

● 전달시스템에 필요한 특성들

생물 살충제를 응용하기 위한 시스템의 설계는 물질의 종류와 작용 방식, 그리고 작물의 특정한 모양과 밀도에 상당히 의존한다. 그래서 경제적으로 합리적인 특정 전달시스템을 개발하려면 생물학자, 재제화 전문가, 장치 기술자등의 밀접한 공동연구가 필요하다.

해충이 살충제가 분사된 잎을 먹을 때 살충제의 효과는 주로 질, 살포된 양, 독성, 그리고 해충의 움직임과 해충이 살충제를 먹는 양식등에 의해 결정된다(J. Agric. Eng. Res., 77, 289(2000)). 전형적으로 해충이 있는 모든 표면을 처리하기 위하여 살충제의 고른 분사는 필수적이다. 그러나 이러한 노력은 많은 양의 분사가 필요하고 충분히 젖어야 하지만 일부는 잎에서 떨어져 표류하게 된다. 한 실험실 연구는 고른 분배가 Bt를 응용하는데 있어서 가장 효율적인 것은 아니라는 것을 보여주고 있다. 화학 살충제와 같이 생물 살충제를 응용할 때 특히 해충이 존재하는 곳에 제대로 분사되어야 하며 모든 droplet에 존재하는 활성물질의 양은 droplet의 크기와 비례하고 응용의 효율성은 droplet이 95%이하의 치사량(LD95)까지 droplet의 크기에 간접적으로 비례한다. 어떤 연구는 비목표 생물에 덜 해를 주는 것으로 생각되는 합리적인 생물 재제에 관해 언급하고 있다. 예를들면 곤충성장제어제인 diflubenzuron과 tebufenozide, 식물의 azadirachtin, 그리고 Bt 등 4개의 합리적인 생물 살충제를 분사제로 사용하는 것에 대한 연구고찰이 있었는데, 이는 숲에서 수행할 때 재제화와 전달기술의 역할을 평가하기 위한 연구고찰이다. 농토에의 퇴적에 영향을 주는 요인들, 예를들면 분배, 살포, 응용부피, droplet의 범위, 단위면적당 droplet의 수 등과 잎의 종류, 쌓여 있는 기간, 제재의 성분들도 주요한 평가 요인들이다.

<상업적으로 특수하게 설계된 분사기를 사용한 실험들>

● Bt

Bt의 분사는 세균에 의해 생산된 독신이 제어를 하기 때문에 합리적인 생물제제이라고 볼 수 있다. 그러나 이 곤충 살충제는 특히 IPM프로그램 및 유기작물 생산에 있어서 대체 분사제라는 의미를 갖기 때문에 매우 중요하다.

한 연구 팀은 응용기술, 식물의 나이, 여러 Bt균주들이 감염되기 쉬운 한 군과 저항성이 있는 한 군의 다이아몬드백 나방에 미치는 영향을 결정하기 위해 실험실과 현장에서 실험을 수행하였다. 정전 분사기(electrostatic sprayer)를 이용하여 분사를 했을 때 배낭 분사기(knapsack sprayer)나 원추형 모양의 노즐을 갖고 있는 수력 분사기(hydraulic sprayer)보다 다른 지역의 식물들 간에 별 차이가 없는 것으로 나타났다.

약 70 μ m의 직경을 가진 Bt를 포함한 그레놀 입자를 목화나무에 응용했을 때 상당히 높은 비율의 물질이 정전기에 의해 나무에 퇴적됨을 알 수 있었다(Phytoparasitica, 25(suppl), 101S (1997); Alon Hanotea, 12, 484 (1999)). 실험실 테스트에서 적어도 cm²당 1500개의 입자가 있어야 좋은 제어를 할 수 있다. 그러나 정전기를 사용하더라도 현장에서 그러한 높은 밀도를 유지한다는 것은 매우 어렵다. 이를 달성하기 위해 좀 더 많은 연구가 필요하다.

● 선충

선충은 분사 droplet의 직경에 비해 상대적으로 크기가 큰 생물이고 한 연구자는 최적의 droplet 크기가 없다고 주장하였다. 확실히 선충을 유지할 수 있는 최소의 droplet 부피가 있다. 분사할 때 많은 숫자의 작은 droplet들은 단순히 선충을 운반하는 것이 아니다. 농지에 처리하는 동안 높은 부피가 농지 표면에 걸쳐 선충이 골고루 처리될 수 있고 생존을 위한 습기를 제공하는데, 나무 잎에 높은 부피를 응용하는 것은 낭비이다. 최근에 스피닝 디스크를 이용하여 선충을 나뭇잎에 응용하는 기술을 개발하려는 연구가 있었다(Crop Protection, 17, 453(1998); J. Invertebr. Pathol., 73, 282). 2가지 형태의 스피닝 디스크가 이용되었는데 분사할 때 선충 유충을 포함하여 많은 보조물을 첨가하여 실험하였다. 2가지 형태의 스피닝 디스크는 비슷한 분사 범위를 만들었으며 다양한 보조물이 분사용액에 첨가되었을 때 어떤 영향도 미치지 않음을 볼 수 있었다. 감염시킬 수 있는 선충의 평균 숫자는 부분적으로 보조물을 이용함으로써 상당히 향상될 수 있었다. 목표 해충들 중 치사율은 일반적으로 유속이 증가함에 따라 증가하였다. 연결된 연구로 흙이 파인 디스크를 이용하면 분사용액에서 선충이 분리되어서 매끈한 디스크가 필요하다는 보고가 있었다(Piggott, PhD Thesis, Univ. of London(2000)). 또한 분사용액에 고분자 물질(polyacrylamide)를 첨가했을 때 나뭇잎에서 선충의 생존도를 높이는 장점이 있다고 보고하였다(The BCPC Conf. on Pests and Diseases, Brighton, UK, Vol. 3, 1063(2000)).

또 다른 실험에서는 고압 수력분사기를 이용할 때 펌핑기간이 증가함에 따라 선충의 생존도가 상당히 감소한다는 보고도 있었다(Crop Protection, 18, 53(1999)).

사과 과수원에서 사과 벌의 애벌레인 *Hoplocampa testudinea*와 플럼(plum) 코끼리벌레인 *Conotrachelus nenuphar*에 대해서 선충 *Steinemema carpocapsae*을 잎에 분사하여 효율성을 평가하였는데, 상업적인 권총형의 분사기를 이용하여 선충을 분사했을 때 수확에 있어서 상당히 덜 해를 입는 것을 발견하였다. 그러나 상업적인 공기분사식의 과수원 분사기를 사용하였을 때는 별다른 차이점이 없는 것으로 나타났다. 이러한 차이점은 권총형의 분사기가 훨씬 더 높은 부피가 분사되며 공기분사식 분사기는 너무 작은 droplet을 만들어 충분한 농도의 선충을 전달하는 것이 어려운 점에서 온다(J. Nematol., 30(4, suppl), 599(1998)).

● 바큇로바이러스(Baculoviruses)

바큇로바이러스를 응용하는데 가장 어려운 점들중의 하나는 햇빛에 의해 비활성화될 수 있다는 점이다. 따라서 햇빛을 차단하는 재제화가 많이 연구되었다(J. Economic Entomol., 90, 416(1997)). 적절한 재제화에도 불구하고 중요한 것은 목표 해충이 섭취할 수 있는 곳에 주로 퇴적이 되어야 한다는 점이다. 목화나무의 면화씨벌레를 제어하기 위해 모터가 달린 배낭분사기를 이용하여 보통의 부피(MV)로 응용한 경우와 스피닝디스크를 이용하여 낮은 부피(VLV)로 응용했을 때 바큇로바이러스의 분배를 비교한 연구가 있었다(Crop Protection, 18, 259(1999)). 현장실험에서 스피닝디스크 VLV를 응용했을 때 일반적으로 사용하는 배낭분사기 MV를 응용한 경우보다 더 제어를 잘할 수 있었는데, 이는 아마 더 고른 droplet들이 애벌레들이 섭취하기 좋은 적당한 지역에 골고루 분사되었기 때문인 것으로 생각되었다. 이집트에서 *Spodoptera littoralis*에 대한 비슷한 실험에서 분사기의 노즐을 해충 알들이 위치한 잎면에 가깝게 위치하여 작동시켰을 때 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

● 균류 살충제(Mycoinsecticide)

가장 큰 연구 프로그램들중의 하나가 메뚜기의 생물학적 제어로 생각되고 있다. 보통 매우 낮은 부피로 분사하는 것이 좋다고 생각되는데, *Metarhizium anisopliae* var *acridum*의 포자들에 오일 재제화를 응용하는 것이 좋은지에 관한 연구가 있었다. 다행히도 포자들은 친유성이기 때문에 재제화를 성공적으로 하여 70-100 μm 크기의 droplet을 최적화함으로써 회전 분무기를 이용하여 효율적으로 응용할 수 있었다(Memoirs of the Entomol. Soc. of Canada, 171, 69(1997)). 다른 곰팡이 균주들은 물에 희석하여 재제를 분사하면 효율적이었지만, 오일 보조물이 역시 첨가되어 분사되었다(Aspects of Appl. Biol., 57, 163(2000)). 콜로라도 감자 딱정벌레에 대한 곰팡이의 등에 매는 분사기에의 응용은 처리하지 않은 군과 비교할 때 전통적인 살충 처리보다 훨씬 더 효율적이었다(Biol. Control, 10, 48). 비록 자세한 메카니즘이 밝혀져 있지 않더라도 애벌레 밀도가 상당히 감소함에 따라 잎을 보호할 수 있었다.

● 살균제(Fungicides)

길항 곰팡이의 현장 응용에 대한 보고는 거의 전무한 상태이다. 초기에 *Trichoderma viride*의 사용은 특별히 가위로 자른 부분에 한정된 것이어서 현탁액을 잘려진 표면에 응용하였다. 생물 살균제를 개발하는데 어려운 점들이 보고된 바가 있으며, 예로서 기생 길항균인 *Ampelomyces quisqualis*의 개발을 설명하고 있다. 이의 응용과 관련하여 여기에 사용된 장치는 최종 수요자의 것과 맞아야만 한다는 점을 지적하고 있다. 왜냐하면 분사탱크에서 입자들의 크기분포는 펌프를 통해 통과한 후 상당히 다르기 때문이다. 입자들이 멎치면 응용의 효율성이 감소하게 될 것이다. 또한 포자들을 잘 섞이게 하기 위해 포자들에게는 영향이 없는 계면활성제 시스템을 선택하는데 어려운 점이 있다고 보고하였다(Biopesticides Use and Delivery(Hall FR; Menn JJ eds), pp 77, Humana Press, Totowa, NJ(1999)).

<기생충와 포식자의 개발>

한 연구팀은 현탁액에 들어 있는 유익한 곤충 알들을 분사하기 위해 전기적으로 제어되는 전달 시스템을 개발하였다(Transaction of the ASAE, 41(3), 839(1998)). 커다란 droplet (약 2 mm 직경)들은 응용속도와 방출된 알들 사이의 공간을 모니터하는 파동폭 조정밸브를 통해 분사된다. 액체안에 골고루 현탁된 알들은 활성도에 별 영향없이 잘 전달되었다(Biol. Control, 14, 159(1998)). 특히 딸기의 생물 해충을 제어하기 위한 진드기의 분사를 위해 전달시스템을 개발하였다(Transaction of the ASAE, 38(5), 1289(1995)). 진드기들은 혼합액의 교반에 의해 쉽게 해를 입을 수 있어서, 운용시스템은 혼합액이 냉각상태를 유지하고 회전측정판을 갖고 있는 절연된 저장용기로 구성되어 있다.

<페르몬 분사>

때때로 재제화나 재제를 운반하는 현탁액은 매우 중요한 역할을 갖고 있으며, 응용기술에 영향을 미친다. 그러한 경우가 보고된 적이 있으며 운반체와 응용기술은 제어제제를 형성하는 곤충 성 호르몬의 방출 및 분해속도에 영향을 미친다고 보고하였다(J. Control Release, 57(3), 233(1994)).

페르몬의 응용을 위한 고성능 현장분사기와 분사방법의 개발에 대한 보고가 있었다(Southwest Entomol., 22, 167(1997)). 페르몬을 물의 부피 19 l/ha와 37 l/ha를 이용하여 옥수수밭에 응용을 하였다. 분사기 노즐의 구조에 따른 해충밀도의 감소를 비교했을 때 별 차이가 없음을 보여 주고 있다.