

농업환경과 미생물¹⁾

가 종 역²⁾

서울대학교 농생명공학부

농작물은 토양에서 여러 가지 양분을 흡수하여 자라고 과실을 맺는다. 농작물은 우리 인류의 식량을 공급하는 주요한 원천이며 토양의 비옥도는 농작물의 성장과 결실에 중요한 요소이다. 토양에는 눈으로는 보이지 않지만 아주 많은 미생물들이 서식하고 있고, 그 곳에서 분해자로서 역할을 수행하여 여러 가지 물질들을 분해, 재순환하고 있다. 이러한 토양미생물의 활동으로 어떤 특정한 물질이 토양에 과도하게 축적되지 않게 되며, 농작물은 토양미생물의 대사 작용으로 만들어진 무기질 양분을 섭취할 수 있게 된다. 토양미생물중에서 유용한 대사활성을 가지고 있는 미생물은 농작물의 성장을 촉진시키고, 품질 좋은 농산물을 생산하며, 농업환경을 정화하는 등 다양한 생명공학분야에 활용되고 있다.

질소고정미생물 (N₂-fixing microorganisms)

토양미생물중에는 질소를 고정할 수 있는 능력을 가지고 있는 미생물이 많다. 질소고정미생물은 공기의 약 78%를 차지하고 있는 질소가스를 흡수하여 이 가스를 암모니

아로 환원시켜 식물과 다른 미생물이 이용할 수 있게 해 준다. 질소가스를 산업적으로 암모니아로 환원시켜 질소비료를 만드는 과정에는 높은 열과 압력이 필요하지만, 질소고정미생물은 상온에서도 질소고정효소를 사용하여 암모니아를 만들어 낸다. 질소 화학비료를 사용하는 경우에는 한꺼번에 너무 많은 양의 질소양분이 토양에 유입되어 식물이 미처 다 흡수를 하지 못하고 결국 환경오염의 문제를 야기시키지만, 질소고정미생물은 꾸준히 지속적으로 질소를 환원하여 암모니아를 공급하므로 환경을 오염시키지 않고 식물의 성장에 지속적인 도움을 주고 있다. 다른 동물이나 식물은 질소를 고정할 수 있는 능력이 없고, 리조비움(*Rhizobium*), 아조토박터(*Azotobacter*) 등과 같은 일부 미생물만이 질소를 고정할 수 있다. 질소를 고정하는 미생물의 종류는 호기성, 통기성, 혐기성 등의 매우 다양한 미생물이 존재하여 자연생태계의 어느 환경에서도 질소를 고정할 수 있다. 질소를 고정하는 미생물은 특히 산림지역과 같이 질소비료가 인위적으로 뿌려지지 않는 생태계에서 그 중요성이 크다고 하겠다. 질소고정미생물은 혼자 독립적으로 살면서 질소를 고정하기도 하지만 일부 미

1)Agricultural Environments and Microorganisms

2)KA, Jong-Ok, Department of Agricultural Biotechnology, Seoul National University; E-mail:joka@snu.ac.kr



그림 1. 콩과식물의 뿌리에 형성된 뿌리혹.

생물은 식물과 공생하며 질소를 고정한다. 질소고정미생물이 식물과 공생하는 좋은 예로서 콩과식물을 들 수 있다. 콩 종류의 식물의 뿌리에는 뿌리혹이라는 조직이 있는데(그림 1), 이 조직에는 셀 수 없이 많은 질소고정미생물이 서식하며 질소를 고정한다. 이 질소고정미생물의 덕택으로 콩과식물은 단백질이 풍부한 농산물을 만들 수 있는 것이다. 또한 질소고정미생물은 벼를 재배하는 논에서도 양치류와 공생하면서 질소를 고정하여 벼의 생육과 수확량의 증가에 중요한 역할을 하고 있다.

인산을 용해시키는 미생물 (Phosphate-solubilizing microorganisms)

식물의 양분으로서 질소와 더불어 큰 비중을 차지하는 것이 인산이다. 인산은 토양에서 주로 유기물질이 미생물에 의해 분해되면서 방출되어 식물의 양분으로 사용되는데, 일부 토양미생물은 토양의 유기물질은 물론이고 광물질에 붙어 있는 인산을 떼어 내기도 한다. 인산은 호기적인 환경이나 혐기적인 환경에서 토양미생물의 작용에 의해 방출되는데, 특히 산소가 공급될 때 그 방출 활성이 높아진다. 토양미생물은 유기산을 분비하여 불용성 상태로 존재하는 인산 성분

을 용해시키기도 하고, 이산화탄소를 방출하여 이때 생기는 탄산의 작용으로 불용상태의 인산 성분을 용해시킨다. 인산을 용해시키는 미생물은 토양의 인산 방출을 증가시켜 식물의 성장을 촉진시킬 뿐만 아니라, 인산 화학비료를 그 만큼 덜 사용하게 되어 환경오염을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 인산 방출용 미생물비료로 사용되는 대표적인 세균으로서 바실러스(*Bacillus*) 세균을 들 수 있는데, 이 세균은 포스포박테린(phosphobacterin)이라는 상표로 러시아와 인도 등에서 널리 사용되고 있으며 이 세균의 사용으로 인해 농작물의 수확량이 크게 증가한 것으로 보고되었다(Subba Rao, 1984).

식물 성장호르몬을 분비하는 미생물 (Plant growth regulator-producing microorganisms)

식물 성장호르몬(phytohormone)은 옥신, 지베렐린, 시토키닌, 에틸렌 등을 가리키는데, 이 호르몬은 매우 낮은 농도에서 식물의 생리적 과정에 영향을 주어 식물의 성장을 촉진시키는 물질이다. 식물이 자체적으로 이러한 호르몬을 생산하지만 이들 호르몬이 토양미생물에 의해 만들어지기도 하는데, 특히 식물의 근권에 서식하는 많은 미생물들이 식물 성장호르몬을 만드는 것으로 알려져 있다(Barea *et al.* 1976). 식물에서도 자체적으로 이러한 성장호르몬이 만들어지지만 여러 가지 기후조건과 환경조건이 최적상태가 아니기 때문에 그 호르몬 양이 식물의 성장을 충분히 뒷받침하지 못하고 있는 실정이고, 이런 상태에서 토양미생물에 의해 만들어진 호르몬은 부가적으로 식물의 성장을 촉진시키는 것이다.

실제로 식물에 옥신과 같은 성장호르몬을 외부에서 처리해주면 식물의 생장이 뚜

렷하게 촉진되는 것으로 관찰되었고, 식물 성장호르몬을 분비하는 미생물을 접종하면 식물의 성장과 발달이 크게 향상되는 것으로 보고되었다. 아조토박터(*Azotobacter*) 세균은 질소를 고정할 수 있을 뿐만 아니라 지베렐린이나 옥시신과 관련된 호르몬 물질을 분비하는 것으로 알려져 있는데, 아조토박터 세균을 미생물비료로 사용하였을 때 농작물의 생산량이 크게 증가하는 것으로 관찰되었다(Hussain *et al.*, 1987). 또한, 포스포박테린이라는 이름으로 미생물비료로 사용되는 바실러스 세균도 인산 성분을 용해시키는 능력을 가지고 있을 뿐만 아니라 옥시신을 분비하는 것으로 보고되었다. 그 밖에 슈도모나스, 바실러스 등을 포함한 여러 종류의 근권 미생물들이 식물 성장호르몬을 분비하는 것으로 관찰되었다. 이러한 세균에서 분비된 식물 성장호르몬은 식물의 뿌리가 흡수해야 비로소 그 효과가 나타나는데, 식물 뿌리와 공생하고 있는 균근(mycorrhiza)의 경우에는 그 곰팡이에서 분비된 호르몬이 바로 식물에 흡수되어 효율적으로 식물의 성장을 촉진시키는 것으로 알려져 있다.

균근(Mycorrhiza)

식물은 여러 종류의 토양미생물과 상호 긴밀한 관계를 통해 성장과 환경적응에 도움을 받고 있는데, 특히 미생물과의 공생은 식물의 성장과 발달에 매우 중요한 영향을 주고 있다. 균근 형성에 관여된 곰팡이는 식물 뿌리와의 공생을 통해 식물로부터 서식처와 기질을 제공받으면서 한편으로 식물에 무기질 양분과 물을 공급해주며, 환경의 스트레스로부터의 보호, 식물 성장호르몬의 생산, 질소의 고정 등 여러 가지 혜택을 식물에 주고 있다. 균근에는 외생균근(ectomycorrhiza)과 내생균근(endomycorrhiza)이 있는데, 외

생균근에서는 곰팡이가 식물뿌리세포의 외부에 정착, 서식하며 공생관계를 가지고 있고, 내생균근은 곰팡이가 뿌리세포의 안쪽까지 침투해 들어가 공생하고 있다. 균근 곰팡이는 식물뿌리로부터 균사체(mycelium)를 바깥쪽 토양으로 멀리 뻗어나가 식물의 뿌리가 닿지 못하는 곳에서도 양분과 물을 흡수하여 식물에게 공급해준다. 특히, 가뭄이 들거나 비옥하지 않은 척박한 토양에서는 식물이 혼자서는 양분과 물을 충분히 흡수하지 못하지만, 균근 곰팡이와 공생체를 형성하고 있으면 곰팡이가 효과적으로 양분과 물을 흡수하여 공급해준다. 이로 인해 균근 곰팡이와 공생체를 형성하고 있는 식물은 자연환경에서 경쟁력을 갖고 잘 살아갈 수 있게 된다. 자연환경에 존재하는 거의 모든 식물종이 이러한 균근 공생체를 형성하고 있는데, 외생균근의 경우에 약 6000종의 식물종이 곰팡이와 공생연합체를 형성하고 있고, 가장 많은 종류의 식물이 관여하고 있는 것으로 밝혀진 내생균근의 경우 모든 식물종의 약 90% 이상이 곰팡이와 균근 공생체를 형성하고 있다(Peterson *et al.*, 2004). 균근 곰팡이의 역할은 단순히 식물에 양분을 공급하는 것으로 끝나지 않고 토양의 구조를 안정화시켜 통기성과 보습효과를 증진시키며, 곰팡이가 식물뿌리에 정착하여 살기 때문에 다른 병원성미생물의 감염과 서식을 억제하여 식물 병 발생을 감소시키기도 한다. 또한, 식물 뿌리주변의 토양에 들어 있는 오염물질을 분해하고, 독성 중금속을 격리시켜 식물을 보호하기도 한다. 이러한 균근 곰팡이의 활동으로 인해 자연생태계에서 식물은 번식능력이 향상되고, 왕성하게 살아갈 수 있어서 식물의 환경적응력이 크게 개선되는 결과를 주며, 균근 곰팡이가 많은 지역에는 식물의 종 다양성이 매우 높은 것으로 보고되고 있다.

식물 병 발생을 억제하는 미생물 (Microbial pesticides)

식물의 근권에 서식하는 미생물중에서 식물의 병 발생을 억제하고 식물의 생산성을 증가시키는 미생물이 많다. 이러한 근권의 유용미생물은 항생물질을 분비하거나, 근권에서 정착하여 왕성하게 성장하는 특성을 가지고 있기 때문에, 다른 식물병원성 미생물의 근권 정착과 성장을 억제하고, 식물 성장 호르몬을 분비하거나 식물의 양분공급을 도와주어 식물의 성장과 생산성을 증가시킨다.

식물에 병을 일으키는 곰팡이의 성장을 억제하는 길항미생물(antagonistic microorganisms)(그림 2)에 대한 여러 가지 연구 결과가 보고되었다. Weller *et al.*(1985)은 슈도모나스라는 세균이 페나진(phenazine)이라는 항생물질을 분비하여 입고병(take-all disease)을 일으키는 곰팡이를 억제하는 것으로 보고하였고, Howie와 Suslow(1991)는 다른 종류의 슈도모나스 세균이 우마이신(oomycin)이라는 항생물질을 분비하여 식물병원성 곰팡이를 억제하는 것을 보고하였다. 곰팡이 병원균의 성장을 억제하는 길항미생물중에는 곰팡이의 세포벽을 분해하는 효소를 분비하는 미생물도 있다. 곰팡이의 세포

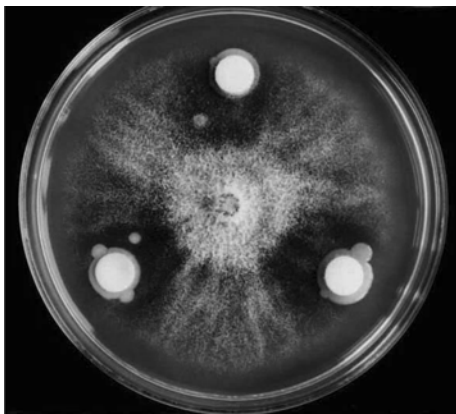


그림 2. 길항미생물에 의한 곰팡이 병원균의 성장 억제.

벽에는 키틴성분이 많이 함유되어 있는데, 근권에 서식하는 일부 유용미생물은 키틴성분을 분해하는 효소를 분비하여 식물병원성 곰팡이의 성장을 억제한다.

식물의 근권에는 여러 종류의 미생물들이 섞여 살고 있기 때문에 미생물의 양분에 대해 경쟁이 치열한 곳인데, 특히 철분과 같이 부족하기 쉬운 무기질 원소에 의해 근권 미생물의 성장과 생존이 크게 영향을 받기도 한다. 토양에서 철분은 주로 불용성 상태로 존재하므로 미생물이 이를 흡수하기 위해서는 특별한 방법을 사용해야 하는데, 일부 길항미생물은 토양의 철분을 용해시키는 능력을 가지고 있어서 이 방법에 의해 주위의 철분을 독점함으로써 곰팡이와 같은 다른 식물병원성 미생물의 철분흡수를 차단하고 성장을 억제하게 된다. 슈도모나스 세균 중에서 일부 유용미생물은 항생물질을 분비하지 않고 식물뿌리의 서식처를 독점하여 다른 식물병원성 미생물이 자라지 못하게 작용한다. 이러한 부류의 길항미생물은 매우 빠르게 성장하는 특성을 가지고 있어서 식물병원성 미생물이 침투해 들어가는 부위를 선점하여 병원성 미생물의 접근을 차단할 뿐만 아니라, 그 주위에 있는 양분을 독점함으로써 다른 식물병원성 미생물의 활성을 억제한다.

일부 근권의 미생물은 청산(시안화수소)을 분비하여 식물병원성 미생물을 억제하는 것으로 보고되고 있는데, 담배와 같이 청산에 저항성 있는 식물의 근권에서 이러한 현상이 관찰되었다(Voisard *et al.*, 1989). 식물 근권의 유용미생물에서 분비된 청산은 식물병원성 미생물에 직접 작용하여 성장을 억제하기도 하고, 식물에 작용하여 식물의 병원균에 대한 면역력을 증대시킴으로써 식물의 성장에 도움을 준다. 한편, 일부 유용미생물은 암모니아와 같은 반응력이 높은 가스를 분비하여 식물병원성 미생물의 성장을 억제

하는 것으로 보고되고 있다.

비티독소(*Bacillus thuringiensis* toxin)

식물은 종종 해충의 해를 입는데, 이로 인해 농산물의 생산량이 크게 감소하고 있다. 이러한 해충의 피해를 줄이기 위해 독성이 강한 농약을 사용하면서 환경오염문제가 발생하고 농산물에 농약이 잔류하여 소비자 등이 농약의 독성질환에 노출될 수 있다. 따라서 농약의 사용을 줄이고 농작물의 해충을 방제하는 방안이 강구되어 왔는데, 바실러스 세균의 비티독소가 이 분야에서 가장 널리 알려진 미생물농약이다. 이 바실러스 세균은 특정한 독소단백질을 만드는데(그림 3), 이 단백질은 대부분의 곤충에는 해를 주지 않지만 나방과 같은 특정 해충의 애벌레가 섭취하게 되면 그 유충의 장내에서 효소에 의해 잘라져서 독성을 갖는 비티독소로 전환된다. 이 비티독소에 민감한 해충은 섭취 후 곧 죽게 된다. 따라서 이 바실러스 세균을 대량으로 배양하여 경작지의 농작물에 살포함으로써 농작물의 잎을 갉아 먹는 해충을 화학농약을 사용하지 않고 방제할 수 있게

된다. 이 방제 방법의 단점은 비티독소에 저항성 있는 해충이 발생할 수 있다는 것인데, 이 단점이외에는 비티독소가 다른 동물이나 곤충에 전혀 해를 주지 않는다는 점과 환경에 노출된 비티독소는 쉽게 분해되어 없어진다는 등의 장점을 가지고 있어서 현재 미생물농약으로서 활발하게 연구되고 있다.

미생물을 이용한 오염된 토양의 복원 (Microbial remediation of contaminated soil)

인구의 증가와 이에 따른 산업, 농업활동의 증가로 인해 여러 가지 화학물질이 자연 환경으로 흘러들어가 생태계를 오염시키고 공공의 환경위생에 큰 위협이 되고 있다. 특히, 토양은 모든 산업, 농업활동의 근거지로 사용되면서 다양한 종류의 화학물질이 유입되고 있다. 오염된 토양을 복원하기 위해 종래에는 매립(landfill), 토양세척(soil washing), 화학침전(chemical precipitation) 등의 여러 가지 물리화학적 방법이 사용되어 왔는데, 이러한 방법들은 오염물질을 실제로 제거하지는 못하고, 묻어버리거나 다른 장소로 옮겨 놓는 등의 임시방편적인 처리방식이다. 이러한 방법들은 지형에 따라서는 처리하기 힘든 경우도 있고 비용도 많이 들기 때문에 오염된 토양을 복원하는 새로운 방법이 모색되어 왔다.

최근에 오염물질을 분해하는 다양한 미생물이 분리되었고, 이들 분해미생물에 대한 연구가 활발해지면서 분해미생물을 이용하여 오염물질을 독성이 없는 형태로 분해함으로써 오염된 토양을 복원하는 방법이 널리 사용되기 시작하였다. 미생물을 활용한 생물학적 복원(bioremediation) 방법의 장점은 이 방법이 자연친화적이고 오염물질을 완전히 분해할 수도 있으며, 오염토양을 파내

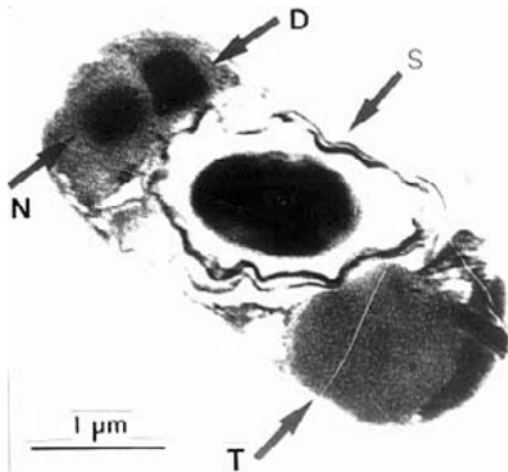


그림 3. 바실러스 세균의 비티독소(T).

거나 이동할 필요도 없고 물리화학적 방법이 접근하기 힘든 오염현장에 바로 처리할 수 있다는 것이다. 한편, 생물학적 복원 방법을 사용하기 위해서는 우선 대상이 되는 오염물질을 잘 분해할 수 있는 미생물을 분리하여야 하고, 이 분해미생물이 현장에서 지속적으로 생존하면서 오염물질을 잘 분해할 수 있도록 현장의 환경조건을 맞추어주어야 한다. 경우에 따라서는 오염된 물질이 여러 가지 섞여 있으면 다른 물질에 의해 분해미생물이 억제를 받을 수 있으므로 오염된 물질의 종류를 정확하게 파악하고 각각의 오염물질을 분해하는 미생물을 분리 활용하는 방법을 강구해야 한다.

특히 토양오염 문제가 중요시되는 분야가 농업분야이다. 지난 40년간에 걸쳐서 수백종의 농약을 사용하여 해충 및 잡초를 효율적으로 제거함으로써 농업 생산성이 괄목할 만큼 크게 향상되었다. 그러나, 한편으로 일부 농약 성분이 분해되지 않고 토양에 지속적으로 잔류함으로써 토양, 하천, 지하수 등 주위환경을 오염시켜 생태계를 파괴할 뿐만 아니라, 오염된 지하수나 곡물을 통해 인체에 유입, 축적되어 농약 독성 질환을 야기시킬 수 있기 때문에 이러한 잔류성 농약 성분은 인류 환경위생상 커다란 위협이 되고 있다. 또한, 토양에 잔류하는 농약 성분은 후작물에 약해를 줄 뿐만 아니라, 식물의 저항성을 약화시켜 농업 생산성에 나쁜 영향을 줄 수 있다.

농업분야에서는 살충제나 살균제보다도 제초제가 훨씬 더 많이 사용되고 있는데, 제초제는 주로 토양에 살포되어 토양생태계에 직접적으로 영향을 준다. 토양에 유입된 농약 성분은 토양미생물에 의해 분해되거나 기타 환경적인 요소의 작용으로 일부 분해되기도 한다. 그러나, 토양미생물이나 환경적 작용에 의해 분해되지 않는 난분해성 농약성분

은 주위 생태계로 흘러들어 가거나 토양에 잔류하게 되어 농업생태계에 심각한 오염문제를 초래하게 된다. 제초제중에서는 주로 선택성제초제인 페녹시계의 농약성분에 대해 분해미생물의 분포, 활성, 분해유전자 등에 관해 연구가 많이 이루어져 왔다. 페녹시계 농약성분을 분해하는 미생물은 이 농약이 많이 사용된 경작토양에 서식하고 있는 것으로 보고되었는데, 국내에서도 일부 논토양과 밭토양에서 페녹시계 제초제 농약분해 미생물이 분리되어 그 미생물의 생리유전학적 특성과 분해활성 등이 연구되었다(Chung and Ka, 1998; Lim *et al.*, 2004). 한편, 농약성분을 분해하는 미생물이 존재하지 않는 토양에서는 이 페녹시계 농약성분이 비교적 오래 동안 토양에 잔류하는 것으로 나타나(그림 4)(Chung and Ka, 1998), 이들 농약성분의 농작물로의 흡수, 주변 생태계로의 유출 등의 환경생태학적 오염문제가 발생할 수 있다는 우려가 제기되고 있다. 한 예로서 페녹시계 제초제에 속하는 2,4,5-T는 자연생태계에서 분해가 잘 안되는 것으로 밝혀졌는데, 이 농약이 반복적으로 사용된 경작토양에는 잔류성분이 축적되면서 상추와 같은 후작물의 생육을 저해하는 것으로 나타났다. Daubaras *et al.*(1996)이 오랜 연구기간을 걸쳐 2,4,5-T를 분해하는 미생물을 분리하였고, 이 미생

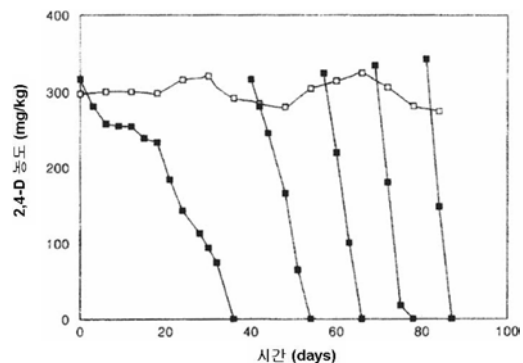


그림 4. 경작토양에서의 2,4-D 분해와 잔류.

물을 오염된 토양에 처리하였을 때 대부분의 잔류농약이 분해되어 없어져 다시 상추를 재배할 수 있게 된 것으로 보고되었다.

골프장에서도 여러 가지 농약이 사용되고 있는데, 잔디관리를 위해서 제초제인 메코프로프(mecoprop), 펜디메타린(pendimethalin) 등을 살포하고 있고, 살균제로서 펜시쿠론(pencycuron), 메타락실(metalaxyl) 등이, 살충제로서 페니트로치온(fenitrothion), 클로르필리포스(chlorpyrifos-methyl) 등이 많이 살포되고 있다. 이들 농약성분 중에서 메코프로프, 페니트로치온, 클로르피리포스 등은 분해미생물이 다수 분리되었으나, 나머지 농약성분들은 미생물에 의해 분해가 잘 되지 않는 것으로 나타나 골프장토양과 주변생태계의 오염문제가 우려되고 있다. 그 밖에 파라치온(parathion), 카보푸란(carbofuran), 글리포세이트(glyphosate) 등의 농약성분을 분해하는 미생물들이 여러 연구자들에 의해 분리되어 연구되었고, 일부 제초제 분해유전자는 식물에 주입되어 제초제에 저항성 있는 형질전환식물(genetically-modified plant)을 만드는데 활용되기도 하였다. 그러나, 현재 국내에서 사용되고 있는 농약 원제의 종류가 약 400여종에 이르고 있고, 대부분의 농약성분이 잘 분해되지 않는 난분해성 물질인 점을 고려할 때, 농약에 의한 토양과 주변 생태계의 오염문제는 쉽게 해결되기 어렵다고 생각된다. 따라서, 자연생태계의 오염을 방지하기 위해서는 농약과 같은 환경오염물질을 분해, 중화시킬 수 있는 미생물에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이며, 분해미생물을 활용한 효과적인 생태계복원 기술이 개발되어야 할 것이다.

맺음말

토양에는 수많은 종류의 미생물들이 서식

하고 있다. 이들 토양미생물은 물질순환기능을 수행하여 자연생태계가 항상 건강하게 유지되도록 도와주고 있다. 탄소순환과정을 살펴봐도 식물의 광합성작용에 의해 공기 중에 있는 이산화탄소가 유기물질로 전환되는데, 이 유기물질이 분해되지 않고 계속 지구에 축적된다면 큰 재앙이 될 것이다. 다행히 이러한 유기물질은 미생물에 의해 분해되어 이산화탄소로 재순환되며, 탄소뿐만 아니라 질소, 인, 황 등의 주요 영양물질을 포함하여 여러 가지 많은 원소들이 미생물에 의해 재순환되고 있다. 이러한 토양미생물의 물질순환기능이 활용되어 여러 가지 유용미생물이 농업분야에서 미생물비료로서 사용되고 있고, 그 이외에도 토양미생물의 생리학적 특성을 이용하여 식물의 성장을 촉진시키는 식물성장촉진제, 식물병원균을 억제하는 미생물농약 등으로 활용되고 있다. 식물의 근권에 서식하는 유용미생물의 식물성장촉진 효과는 단순히 어떤 한 가지 작용에 의해서만 이루어지는 것이 아니고, 일반적으로 물질순환기능, 질소고정, 식물 성장호르몬의 분비, 식물병원성 미생물에 대한 길항작용 등 몇 가지가 함께 작용하여 식물의 성장을 촉진하는 것으로 알려지고 있다. 토양미생물의 물질순환기능은 농업활동과 산업활동에서 사용되고 있는 여러 가지 화학물질에 의한 환경오염문제를 해결하는데도 유용하게 활용되고 있다. 환경오염물질은 주로 유기질 화학성분으로서 미생물의 기질로 사용될 수 있기 때문에 이를 분해하는 미생물은 오염된 생태계를 복원하는데 효과적으로 활용될 수 있다.

참고문헌

- Barea, J. M., Navarro, E. and Montoya, E. 1976. Production of plant growth regulators by

- rhizosphere phosphate-solubilizing bacteria. J. Appl. Bacteriol. 40: 129-134.
- Chung, M. J. and Ka, J. O. 1998. Isolation and characterization of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid-degrading bacteria from paddy soils. Journal of Microbiology. 36(4): 256-261.
- Daubaras, D. L., Danganan, C. E., Hubner, A., Ye, R. W., Hendrickson, W. and Chakrabarty, A. M. 1996. Biodegradation of 2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid by *Burkholderia cepacia* strain AC1100: evolutionary insight. Gene. 179(1): 1-8.
- Howie, W. J. and Suslow, T. V. 1991. Role of antibiotic biosynthesis in the inhibition of *Pythium ultimum* in the cotton spermosphere and rhizosphere by *Pseudomonas fluorescens*. Mol. Plant-Microbe Interact. 4: 393-399.
- Hussain, A., Arshad, M., Hussain, A. and Hussain, F. 1987. Response of maize (*Zea mays*) to *Azotobacter* inoculation under fertilized and unfertilized conditions. Biol. Fertil. Soils. 4: 73-77.
- Lim, J. S., Jung, M. K., Kim, M. S., Ahn, J. H. and Ka, J. O. 2004. Genetic and phenotypic diversity of (R/S)-mecoprop [2-(2-methyl-4-chlorophenoxy)propionic acid]-degrading bacteria isolated from soils. Journal of Microbiology. 42(2): 87-93.
- Peterson, R. L., Massicotte, H. B. and Melville, L. H. 2004. Mycorrhizas: Anatomy and Cell Biology. Natl. Rsch. Council, Ottawa.
- Subba Rao, N. S. 1984. Biofertilizers in Agriculture. A.A. Balkema, Rotterdam, p. 186.
- Voisard, C., Keel, C., Haas, D. and Defago, G. 1989. Cyanide production by *Pseudomonas fluorescens* helps suppress black root rot of tobacco under gnotobiotic conditions. EMBO J. 8: 351-358.
- Weller, D. M., Zhang, V.-X. and Cook, R. J. 1985. Application of a rapid screening test for selection of bacteria suppressive to take-all of wheat. Plant Dis. 69: 710-713.