S6

유전자 변형생물이 생태계에 미치는 영향

박용하

한국환경정책 • 평가연구원
서울 은평구 불광동 613-2 Email: yhpark@kei.re.kr

서론

생명공학기술을 이용한 유전자변형생물체(Living Modified Organism: LMO)[1] 의 창출은 인류과학의 역사를 유도하는 제4의 물결로 21세기에는 국가의 경제성장에 기본역할을 할 산업혁신의 핵심기술로 전망되고 있다. 이미 LMO를 이용하는 현대의 생명공학은 1980년대 중반 이후 국내 · 외에서 농 · 축 · 수산물의 생산성 증대와 생산물의 질적 향상에 관련된 농학, 임학, 식물병리학, 식품학 등의 분야와 보건 및 의료과학 부문, 환경오염처리 부문 등 다양한 분야에서 폭넓게 연구되고 있다. 생명공학기술의 연구 성과로 생산성이 증대되는 유전자변형작물, 미생물 농약, 의약품, 환경오염물질의 처리제 등은 이미 시판되고 있다.

반면에 LMO의 위해성은 해결해야 할 중요한 과제이다. LMO에 의한 인체 및 환경에 대한 잠재적인 악영향은 1980년 이후 국제적인 논점이 되어왔으며, 150개국의 300여명의 Biosafety 전문가가 모였던 1995년 스페인 마드리드 국제회의에서 LMO가 위해할 가능성이 확인된 바 있다. 이후 수십 차례에 걸친 국내 회의와 수차례에 걸친 대규모 국제회의 등 다양한 국제적인 협력 결과로 2000년 1월 '바이오안전성의정서(The Cartagena Protocol on Biosafety)' 가 채택된 것이다.

식량자원을 외국에 크게 의존하고 있는 우리나라에서는 1998년 이후 이미 많은 LMO가 유입 · 유통되고 있다. 이로 인하여 국민의 불안과 불신을 초래하였고, LMO와 이를 이용한 제품에 대하여 안전성 평가 및 인 · 허가를 충실히 수행할 것과 유전자 변형 여부를 반드시 표기하는 것 등이 주요 쟁점으로 등장된 바 있다. 이러한 사회적 쟁점이 초래된 근간에는 국내에서 LMO의 유전자분석, 환경위해성평가, 인체위해성평가 등을 체계적으로 수행할 수 있는 총체적인 기술 능력과 인력을 확보하지 못하고 있으며 평가수행을 위한 시설과 장비 또한 태부족 상태에 있다는 문제에 있었다. 이러한 문제를 단계적으로 해결하기 위해 국내에

1) LMO는 현대의 생명공학(modern biotechnology)' 에 의해 인위적으로 창출된 생물체이다. 여기에서 형대의 생명공학이란 전통적인 육종방법(교배와 선택)과는 다른 것으로, 자연상태에서 발생하는 생물의 생리적 재생산 또는 재조합 현상을 넘어선 실험실내의 유전자의 인위적인 재조합 기술 (recombinant DNA technology)과 생물의 분류학에서 과(family) 이상간의 생물간 세포융합기술이다 (CBD, 1999).

서는 과학기술부, 환경부, 산업자원부, 농림부 등 관련 정부부서의 주관으로 관련기술개발사업이 추진되고 있다.

본 고에서는 LMO의 환경 위해성에 미치는 영향에 초점을 두었다. LMO가 의도적으로 연구 또는 상업화의 과정 등에 의해 환경에 도입되었을 경우 또는 비의도적으로 환경에 도입되었을 경우 LMO가 자연생태계에 미치는 영향에 대해서 기술하고, 향후 추진해야 할 노력에 대해서 기술하고자 하였다.

LMO에 의한 환경 위해성

현대의 생명공학기술의 이용에 의하여 생성된 LMO는 지구상에서 자연적으로 거의 발생할 수 없는 새로운 생물체이다. 따라서 우리가 생존하고 있는 환경에 이러한 생물체가 도입됨에 따라 직접 또는 간접적으로 생태계에 그 영향을 나타나게 된다. 이러한 LMO가 새로운 환경에 나타내는 영향은 극히 미세하거나 장기간에 걸쳐 그 영향을 단계적으로 발현하기 때문에 대부분의 경우 그 영향을 파악할 수 어렵다. 그러나 이에 대한 연구결과가 점차 축적되고 있어 LMO가 인간 및 환경에 미치는 영향의 일부분이 다음과 같이 밝혀지고 있다.

첫째, LMO를 이용한 식품이 인간 건강에 치명적인 독성이나 알레르기를 발현시킬 가능성이다. 독성과 알레르기를 일으킬 수 있는 유전자를 갖고 있으나 발현하지 않는 생물체가 자연계에는 다수 존재한다. 대부분의 이러한 생물체는 자연계에서 독성 및 알레르기성을 발현하지 않으나 유전자 재조합으로 인하여 새로운 유전자 배열을 갖는 유기체가 생성되면 이들 독성 및 알레르기성 유전자가 활성화되어 자연계에서 발현할 수 있는 가능성을 높여준다. 특히 이러한 위험성이 단번에 발생하지 않을지라도 LMO가 자연계에 방출되고 이들 유전자에 영향을 주는 요인이 반복적으로 충격을 줌에 따라 이러한 유전자의 발현 가능성을 더욱 높아질 수 있다.

둘째, LMO의 환경방출은 심각한 자연생태계의 교란을 유발할 수 있다. LMO는 생물학적으로 近緣 關係에 있는 생물과 이종교배(異種交配)를 통하여 인간이 의도하지 않는 유전자 전이를 유발할 수 있다. 이에 따라 LMO의 인위적으로 변형된 유전형질이 인위적으로 통제할 수 있는 범위 외에서 자연계에 전파될 수 있는 가능성이 있다. 특히 현재의 생명공학은 특정한 환경조건에 LMO가 잘 견딜 수 있도록 방향으로 발전되고 있으므로 LMO의 재조합된 유전자가 近緣 關係의 생물에 있는 상응한 유전자 배열과 교체되어 생물다양성을 감소시킬 수 있다.

---

2) 유전자의 수평적 전이란 생물체와 생물체간에 유전자가 이동되는 것으로 근연관계에 있는 생물뿐만 아니라 이론적으로 遠緣生物種까지 유전자가 자가이동 플라스미드(self-transmissible plasmid) 또는 바이러스(virus) 등에 의하여 이동될 수 있다.

셋째, 벡터(vector)를 매개로 한 수평적 유전자 전이(horizontal gene transfer)[2] 의 가능성이다. 유전자재조합기술에 사용하고 있는 벡터는 다양한 생물의 숙주세포에 混入되어 자신을 복제하고 유전자를 전이시킬 수 있어야 한다. 이러한 도구로써 바이러스 또는 플라스미드(plasmid)를 많이 사용한다. 이러한 벡터의 성질은 자연계에서 유전자가 후대에 전달되는 이종교배를 통하지 않고서도 유전자 전이가 생물체간에 수평적으로 이동할 수 있음을 시사한다. 이러한 벡터는 새로운 병원성을 발현시킬 수 있을 뿐 아니라, 이들 벡터에는 유전자의 전이과정을 확인할 수 있도록 항생제 저항성을 지닌 유전자지표(DNA marker)를 사용하기 때문에 항생제 내성을 지닌 병원체가 자연계에 확산될 수 있다[3].

현재까지 알려진 바에 의하면 유전자의 수평적 이동은 미생물에서만이 확인되었을 뿐 고등생물에서는 확인된 바 없다. 그러나 현재의 생명공학 발전추세를 감안한다면 빠른 미래에 광범위한 생물에 유전자를 전이시킬 수 있는 벡터가 개발될 것이고, 이에 따른 고등생물체간의 유전자 전이의 가능성은 더욱 높아지게 된다. 이러한 경우 생태계의 교란은 심각한 상태에 놓일 수 있다 (Greenpeace, 1995).

환경에 도입된 LMO 및 그 제품이 자연생태계에 영향을 나타낼 수 있는 명백한 증거는 일부만이 확인되고 증명되었으며 대부분은 가설과 학설로써 제시되고 있다. 확인된 일부증거도 세부적인 作用技作에 대해서는 지속적인 연구가 추진되고 있다. 따라서 환경에 도입된 LMO가 자연환경에 미치는 영향은 점차 밝혀지고 있다.

LMO의 환경 위해성은 LMO의 형질변화 및 형질변화에 따른 환경영향에 따라 다음 6가지 유형으로 구분할 수 있다. 이들 6가지 유형은 i) 주요한 유전자변형의 결과로 야기될 수 있는 대사변화, ii) 물리적 영향에 대한 저항성 획득, iii) 행동변화, iv) 외견 및 구조의 변화, v) 자연서식군과의 관계변화, vi) 통계적인 거시적 변화이다 <표1> (환경부 2000).

---

3) 벡터를 이용한 유전공학기술은 유전자의 수평적 이동과정을 거쳐 생물체의 진화과정을 파괴하고 있으며 다음과 같은 7가지 요인에 의하여 새로운 병원체의 출현에 결정적인 요인으로 추정하고 있다 (산업자원부, 1998). 첫째, 벡터는 인간 및 동물의 면역체계를 파괴할 수 있다. 둘째, 벡터는 항생제 저항성 유전자의 수평적 이동을 조절한다. 셋째, 벡터는 새로운 병원체가 발생할 수 있는 유전자재조합을 조절한다. 넷째, 미생물에 전이된 재조합된 유전자는 유전자 수평적 이동의 자원 창고이다. 다섯째, 바이러스를 이용한 유전자 재조합기술은 새로운 병원성바이러스를 창출할 수 있다. 여섯째, 벡터는 동물의 소화기관에서 분해되지 않을 수 있으며, 분해되지 않은 유전자는 포유동물에 전이, 감염될 수 있다. 일곱째, 벡터에 의하여 수입된 항생제 저항성 유전자는 환경에 영구히 존재할 수 있으며, 적합한 환경여건이 주어질 경우 생물체에 전이, 감염원이 될 수 있다.

〈표1〉 LMO의 형질변화 및 이로 인해 예측되는 환경영향

구분	형질변화의 실례	생태계에 대한 영향
대사 변화	• Individual growth rates • Energy metabolism, pathways and rates • Photosynthetic and chemosynthetic pathways structures and rates • Rates of nutrient uptake and cycling • Amounts and types of nutrients used • Use of polluents as nutrients, pollution degradation • Nitrogen fixation pathways and rates • Carbon dioxide(CO_2) consumption • Tolerance of elevated CO_2 • Expression of novel proteins or metabolites, increased metabolic wastes • Production of antibiotics, or biological toxins such as that from Bacillus thuringiensis (Bt toxin) • Antibiotic or pesticide resistance	• Altered feeding rates and efficiencies • Altered rates of nutrient cycling and biological energy transfers • Altered rates of photosynthesis and carbon fixation and plant productivity • Modified rates and patterns of nitrogen fixation • Shifts in competitive abilities among species • Changes in degree of pesticide and antibiotic resistance among target and naturally occurring species, and spread of antibiotic resistance genes by lateral transfer • Release of antibiotics, toxins, or increased concentration of novel metabolites • Decrease or increase of biological diversity
물리적 영향에 대한 저항성 획득	• Temperature • Humidity/moisture • Soil chemical and physical properties, including nutrients and water potential • Light intensity • Salinity • pH (acid/base) • Water chemistry • Pressure • Oxygen, CO_2, and other gases such as those of anaerobic environment • Toxic chemicals/pesticide/antibiotics • Heavy metals (e.g., mercury)	• Geographical relocation, expansion or contraction of preferred habitats for species and ecological communities • Change species/population phenology (seasonal timing of life cycles), including patterens of growth, development, and breeding • Altered geographical ranges of species • Altered patterns of dispersal and migration • Increase and change in routes and extent of biomagnification (concentration) of toxic substances, including heavy metals • Changed composition and diversity of ecological communities
행동 변화	• Reproduction • Territoriality • Migration, navigation, orientation • Chemosensory abilities, including pheromones and allochemicals • Motility/locomotion • Animal communication • New kinds and levels of plant secondary compounds • Colonization • Pathgenicity of bacteria, virus, and fungi • Mutualisms/coevolution • Pollination • Photoperiodism • Foraging patterens and feeding specializations and rates • Social behavior, commual and cooperative living. "altruism"	• Altered breeding patterens and cycles, and mate-recognition systems • Change in population abundance and species assemblages • Altered population dynamics and phenology • Changes in self-compatility and incompatilbility of plants • Changes in rates, plant species spectrum, and effectiveness of pollination • Increases and decreases in pathogenicities and patterens of disease transmission

구분	형질변화의 실례	생태계에 대한 영향
외견 및 구조의 변화	• Animal shape, size, color • Internal and surface geometry of unicellular algae and protozoa • Antigrnicity of disease organisms and parasites • Skeletons and appendages • Leaf shape, pattern of plant nodal expansion and branching, flower structure, branching, and frond geometry of macrophytic algae • Spines, hairs, trichomes and other protective devices • Bacterial cell-wall characteristics • Mosaic segments of virus • Cell structure, organs, organ systems • Unicellularity, multicellularity	• Altered species interaction: predator/prey, herbivory, competition • Mate recognition • Changes in baterial cell walls and some antibiotic resistances • Altered virus/host interaction • Changed crop plant architecture
자연서식군과의 관계 변화	• Novel disease resistance • Reduced predation/parasitism • Habitat preferences, extensiveness of preferred and secondary habitats • Antibiotic or biocide sensitivity and resistance • Extinction, local and global • Increases and decrease in fitness (see next class below)	• Altered population and community dynamics • Release from preexisting ecological limits or establishment of new limits • Changed disease transmission • Lateral transfer of antibiotic and toxin resistances among bateria • Changed trophic interactions
통계적인 거시적 변화	• Population fitness (in the technical sense of *population and evolutionary biology* as a summary of ultimate population performance, based on the interaction of many of the life history, and population genetic features below) • Average life cycle pattern, simple, or complex • Mode of reproduction: sexual, asexual, or alternating between these • Frequency of reproduction • Average rates and patterens of embryonic and larval development • Patteren of metamorphosis • Age of reproductive maturity and age of last reproduction • Fertility and fecundity • Survival rates with age (survivorship), average longevity • Net and intrinsic rates of change in population size and density • Age-structure of population • Population distribution in space, time, and over habitat variations • Social organization, kin selection, inclusive fitness • Substratum affinities • Patterns of dormancy, diapause, aestivation, hibernation, and spore and seed bands • Sex, sex ratios, mating types • Population genetic structure, genetic recombination within populations • Genotype-environment interactions and correlations • Pathogen host ranges • Vector host range and competence • Geographical arrays of conspecific populations (metapopulations) • Specialized genetic exchange(sexual) mechanisms of bacteria (transduction, transformation, conjugation, retrotransposons, conjugative transposons, other mobile elements) • Gene flow among conspecific populations • Hybrid zones and geographical clines • Genetic exchange between species and phylogenetic lineages	• Altered population and community dynamics • Shifts in the composition of ecological communities and local biological diversity • Increase or decreased fitness of populations • Increase or decreased population sizes and densities • Increase or decreased population fluctuations, population stability • Altered age-structure in populations • Microevolutionary changes set in motion in the GEO population or surronding natural populations • Changes in spatial and temporal distribution of population and species • Altered genetic structure of the GEO population and their parental populations, if the two are sympatric (conspecific introgression) • Increased interspecies hybridization • GEO evolution due to mutation, genetic exchange, and natural selection

결론

LMO에 의한 환경 위해성을 저감하기 위해서는 LMO에 의해 발생하는 과학적인 확고한 결과가 제시되어야 한다. 이를 토대로 위해성을 저감할 수 있는 mechanism과 기술이 연구될 때, LMO에 의한 환경 위해성을 과학적이고 경제적으로 저감할 수 있을 것이다. 그럼에도 불구하고 LMO가 자연생태계에 미치는 영향이 증명된 자료가 있는가에 대해서는 반문하지 않을 수 없다.

우리나라에서는 LMO의 위해성을 저감하기 위한 기술 개발에 박차를 가하고 있다. 생물자원의 빈국과 생명공학기술의 중상위권인 우리나라의 위치를 고려할 때, 이러한 초기단계의 접근은 타당성이 있다. 그러나 생명공학의 기술개발이라 함은 과학적인 기초지식이 미흡한 상태에서는 그 한계가 있다. 향후 LMO에 의한 위해성을 저감하고 환경친화적인 생명공학기술을 개발하기 위해서는 LMO에 의한 위해성과 위해성 mechnism 등, 기초과학기술 분야에 정부의 투자를 유도할 때이다.

인용문헌

과학기술부. 2001. 생명공학안전성평가기술개발기획연구.

농림부. 2001년 9월. 내부자료.

산업자원부. 1998. 생명공학안전성의정서에 관련한 생명공학제품 및 변형생물체의 수출입 현황 등에 관한 연구.

환경부. 200. LMO의 환경위해성평가.

CBD (Convention on Biodiversity). 1999. Report of Sixth Meeting of the Open-ended Ad hoc working group on Biosafety. UNEP/CBD/ ExCop/1/2.

James, C., and Krattiger, A. F. 1997. Global Status of Transgenic Crops in 1997. ISAAA Brief No 5. ISAAA: Ithaca, NY. 30p.

Greenpeace. 1995. Undermining the case for a biosafety protocol: Some comments on the Cairo panel report on biosafety. Greenpeace International 10p.

OECD. 1994. Analysis of data elements used in the assessment of certain products of modern biotechnology. Environment Monograph No. 110. OECD, Paris.

OECD, 2001. 4. Biotrack On Line

SEI (Stockholm Environment Institute). 1994. The Importance of Ag-biotech to Global Prosperity.

USDA 2001. Biotechnology Risk Assessment Research Grant Program.

USDA/APHIS. 1999. USDA Homepage.