

## 유전자변형 식물체 연구에서의 안전관리 고찰

이범규

### Safety management of living modified plants: A review

Bumkyu Lee

Received: 10 August 2022 / Revised: 7 September 2022 / Accepted: 13 September 2022  
© Korean Society for Plant Biotechnology

**Abstract** There is a continuous rise in the commercialization of living modified (LM) organisms worldwide. While LM plants have not yet been cultivated in South Korea, research, development, import of products, and registration of related research facilities are progressing. LM plants should be tested in greenhouses and fields during development. Furthermore, environmental risk assessment and safety management should be performed before their release into the environment. Research on LM plant development is conducted in laboratories as well as confined greenhouses and fields. Safety management regulations are provided as combination standards for the LMO Act in each research district. The accidental release of the LM petunia in Japan was a significant incident related to LM plant research. It implies that normal plants within the distance of crossing should be regarded as LM plants. In the United States, LM creeping bentgrass was released into the environment, thus necessitating the establishment of stringent measures to prevent the scattering of LM plant seeds by wind or other mediums. In South Korea, LM Zoysia and LM cotton were released through rainwater. Therefore, safety measures that prevent LM seed mixing and plant vegetative propagules escaping into the environment via rainwater must be established. Preventing the dispersal of unapproved LM plants requires significant time, expenditure, and effort. Researchers should first identify the impact of LM plants on the ecosystem, and steps to avert their environmental release must be implemented.

**Keywords** living modified organisms, GMOs, environmental release, safety management, risk management

#### 서론

LMO (Living Modified Organisms)는 유전자변형생물체를 말하며, 국내 「유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률(이하 LMO법)」에서 ‘현대생명공학기술을 이용하여 새롭게 조합된 유전물질을 포함하고 있는 생물체, -인위적으로 유전자를 재조합하거나 유전자를 구성하는 핵산을 세포 또는 세포 내 소기관으로 직접 주입하는 기술, -분류학에 의한 과(科)의 범위를 넘는 세포융합기술’로 정의하고 있다. LMO는 일반적으로 GMO (Genetically Modified Organisms)와 거의 유사한 의미로 사용되고 있으나 원칙적으로 살아있는 유전자변형생물체를 의미하며, 이는 자연환경에서 번식·확산될 수 있어 환경위해성에 대한 안전관리가 강조된 용어라 할 수 있다(Lee and Suh 2011). 유전물질 도입이 없는 전통 육종 식물이나, 방사선 및 화학물질 처리를 통한 돌연변이 유도 식물 등은 LM 식물에 포함되지 않는다. 최근 식물 형질연구에 많이 사용되는 CRISPER Cas9 등 유전자편집 기술로 개발된 식물의 LMO 포함 여부에 대해서는 현재 국내외적으로 논의 중에 있는 실정이나 유전자편집 식물 중 외래 유전자가 남아 있는 경우는 LM 식물로 간주되는 추세이다(Jung et al. 2018; Koh et al. 2021; Park et al. 2019).

LM 작물은 1994년 처음 상업화 이후 재배면적과 그 이용이 지속적으로 증가하여 2019년에는 29개 국가에서 1억 9,040만 헥타르의 면적에서 재배되었으며 누적된 경작면적은 27억 헥타르에 이른다(ISAAA 2019). 국내에서는 현재 LM 작물의 재배가 승인되지 않았으나 식용 및 농업용으로 수입되어 이용되고 있으며, 국내 수입량은 2021년 기준 총 1,114만 톤(약 34억 달러)로 2008년 이후 수입량과 수입금액

B. Lee (✉)  
전주대학교 환경생명과학과  
(Department of Environment Science & Biotechnology, Jeonju University, Jeonju 55069, Korea)  
e-mail: leebk@jj.ac.kr

이 지속적으로 증가하는 추세이다(KBCH 2022). LMO 실험 및 연구를 위한 시험연구용 LMO 승인현황은 2020년 277건, 2021년 210건, 2022년 178건(6월 기준) 등 연구개발에 대한 승인 요구가 지속적으로 발생하고 있는 상황이며, LMO 연구시설 신고 현황은 2020년 신고 864건 및 허가 3건, 2021년 217건의 경우 신고 680건, 허가 4건, 2022년(6월 기준)은 신고 280건이었다(KBCH 2022). 또한 LMO의 수출 현황은 2019년 217건, 2020년 214건, 2021년 277건 등 꾸준히 증가되는 추세를 보이며, 시험연구용 LMO 수입신고 현황은 2021년 기준 총 7,757건이었다(KBCH 2022). 이와 같은 통계자료는 비록 국내에서 LM 식물의 상업적 재배는 이뤄지고 있지 않으나 많은 대학, 국공립연구소, 기업 등에서 LMO 개발 연구가 활발히 진행되고 있음을 시사한다.

LMO는 인위적인 유전자 도입을 통해 발생하는 새로운 특성이 인체나 자연 환경에 부정적 영향을 미칠 수 있는 가능성이 제기되기 때문에 연구개발 단계부터 생산, 유통, 소비에 이르기까지 모든 단계에서 안전관리가 요구된다(Lee and Shu 2011). LMO의 위해성은 크게 인체 및 환경에 대한 위해성으로 구분될 수 있으며 안전성 확인을 위해 식품 및 환경 위해성평가가 수행된다. 식품위해성 평가는 LMO 섭취 시 인체에 해로운지 여부를 평가하는 것으로 평가 제도의 보급을 위해 국제식품규격위원회(CODEX)에서 국제적 기준을 마련했다. 식품위해성 평가 항목은 개발된 LMO가 알레르기 유발시킬 가능성은 없는지를 검사하는 알레르기 유발평가, 독성에 대한 안전성 평가, 모본과 비교하여 영양적으로 어떤 차이가 있는지를 확인하는 영양성분 분석 평가 등으로 구성된다(Lee and Shu 2011).

환경위해성 평가는 LMO가 환경에 방출될 경우 자연생태계의 생물 다양성 보전 및 지속적인 이용에 영향을 미칠 수 있는 모든 부정적인 영향에 대한 평가이다. 환경위해성 평가는 식품위해성 평가와 같이 지금까지 경험적으로 안전하다고 판단해 온 기존 생물체와의 차이점을 비교하는 ‘실질적 동등성’에 근거한 평가 방법을 사용한다. 환경위해성 평가는 다른 생물체에 대한 영향평가와 LMO가 자연생태계에 방출되었을 경우 잡초로 변할 가능성을 평가하는 잡초화 가능성 평가, 새로 도입된 유전자가 꽃가루에 의해 다른 작물에 수정되어 나타날 수 있는 영향에 대해 평가인 유전자이동성 평가 등으로 구성된다(Parker and Kareiva 1996; Snow et al. 2005; Wolfenbarger and Phifer 2000). 이러한 위해성평가 항목은 LMO법 통합고시 별표 10-1의 ‘유전자변형생물체의 위해성평가자료’를 참고할 수 있다.

LM 식물은 개발 및 환경위해성 평가 단계에서 온실과 야외 포장에서의 실험이 요구되나 개발 중인 단계에서는 아직 환경에 대한 안전성이 입증되지 않아 자연생태계로의 방출을 방지하는 안전관리가 반드시 필요하다. 본 연구에서는 환경위해성 측면에서의 LM 식물의 위해등급에 따른 안전관리, 실험실, 격리온실, 격리포장 등 연구 시설별 안전관

리, 사고사례를 통한 안전관리 시사점에 대해 고찰하였다.

## LM 식물의 안전성과 안전등급

LMO법 시행령 별표1에서는 LMO의 안전관리 등급 기준을 제시하여 그에 해당하는 안전관리를 요구하고 있다. 1등급 연구시설은 ‘인체에 질병을 일으키지 않으며 환경에 대한 위해를 일으키지 아니하는 LMO를 개발하거나 이를 이용하는 시설’로 규정하고 있으며, 2등급은 ‘치료가 용이한 질병 유도 및 환경에 위해가 경미하고 치유가 용이한 LMO를 개발하거나 이를 이용하는 시설’로 규정하고 있다. 3, 4등급은 인체에 심각한 질병을 유발하며 환경에 위해가 큰 LMO를 대상으로 하며 과학기술정보통신부 및 보건복지부의 허가가 요구된다.

LM 식물의 안전관리 등급 기준에 영향을 미치는 요인은 크게 숙주 식물체와 도입 형질(유전자)로 구분될 수 있다. 숙주 식물체의 경우 국가연구안전관리본에서 발간된 ‘시험·연구용 유전자변형식물 연구시설 안전관리 가이드라인’에서 애기장대, 벼, 콩, 토마토, 잔디를 국내 LM 식물 개발 주요 식물체로 하여 이들 식물체의 연구분야 및 특성, 안전관리 사항에 대한 정보를 제공하고 있다(NRSH 2022). 최근에는 이들 주요 식물 이외에도 화훼류, 약용작물, 야생식물 등 숙주 식물체가 다양화되는 추세로 LM 식물 개발자(연구자)는 숙주 식물에 대한 인체 및 환경 위해성 등급에 대한 고려가 요구된다(Koh et al. 2021; Lee et al. 2018). 숙주 식물의 환경위해성은 자연 환경에서의 확산(화분 비산, 종자 산포 등) 및 잡초화 가능성, 침입성 등에 대한 위해성의 검토가 필요하며, 환경 위해성이 높은 식물은 환경부고시 제2019-185호의 ‘생태계 교란생물 지정고시’ 등을 참고할 수 있다(Table 1).

LM식물에 도입되는 형질은 매우 다양하며 도입 형질에 따라 안전등급에 큰 영향을 나타낼 수 있다. 주요 도입 형질에 따른 고려사항은 Table 2와 같다. 도입유전자 중 인체에 위해성을 나타낼 수 있는 독소 단백질을 생산하는 경우 3등급 또는 4등급의 위해등급으로 규정하여 실험을 수행하여야 한다. 이러한 단백질 독소는 LMO법 통합고시 별표 2-1의 ‘유전자변형생물체 수입 승인 대상 단백질 독소’에서 (1)보툴리눔 독소(A, B, C, D, E, F형), (2)파상풍 독소, (3)이질 신경독소, (4)디프테리아 독소, (5)기타 척추동물에 대하여 몸무게 1 kg당 50% 치사 독소량이 100 ng 미만의 수치를 갖는 것으로 알려진 독소로 규정하고 있다.

LM식물 개발 연구에서 유전자 도입을 위한 벡터와 선발을 위한 항생제 마커 유전자들이 자주 사용된다. 일반적으로 사용되는 항생제 내성유전자와 숙주, 벡터 등은 안전성이 높다고 인정되어 승인에서 제외될 수 있으며, 이는 LMO법 통합고시 별표 2-2의 ‘유전자변형생물체 수입 승인 제외 대상 약제내성 유전자’를 참고할 수 있다.

**Table 1** Ecosystem-disrupting organisms (Ministry of Environment Notification, 2019-185, <https://www.law.go.kr>)

Plant	Scientific name	Designated date
Great ragweed	<i>Ambrosia trifida</i> L.	01.07.1999
Ragweed	<i>Ambrosia artemisiifolia</i> var. <i>elator</i>	01.07.1999
White snakeroot	<i>Eupatorium rugosum</i>	03.07.2002
Knotgrass	<i>Paspalum distichum</i> var. <i>indutum</i> Shinnors	03.07.2002
Sheep sorrel	<i>Rumex acetosella</i>	06.01.2009
Bur cucumber	<i>Sicyos angulatus</i> L.	06.01.2009
Cat's ear	<i>Hypochaeris radicata</i>	06.01.2009
White heath aster	<i>Aster pilosus</i> Willd.	06.01.2009
Tall goldenrod	<i>Solidago altissima</i> L.	06.01.2009
Distichum	<i>Paspalum distichum</i> L.	03.07.2002
Carolina horsenettle	<i>Solanum carolinense</i> L.	03.07.2002
Prickly lettuce	<i>Lactuca scariola</i>	12.31.2012
Smooth cordgrass	<i>Spartina alterniflora</i> Loisel.	12.15.2016
Common cordgrass	<i>Spartina anglica</i>	12.15.2016
Japanese hop	<i>Humulus japonicus</i> Siebold & Zucc.	07.26.2019

**Table 2** Major harming factors according to implemented genotype of living modified plants

Implemented genotype	Harming factor
Stress resistance	Increased possibility of weediness
Pest resistance	Impact on insects other than target pests
Herbicide resistance	Acquisition of herbicide resistance of crossable, closely related species
Antibiotic resistance	Acquisition of antibiotic-resistant gene by microorganisms
Production of useful substances	Possibility of triggering toxic or allergic reactions in humans
Production of medical substances	Impact on other organisms, such as humans and mammals
Others	Impact on humans and natural environment

**LM 식물 연구절차와 안전관리 규정**

LM 식물의 연구 및 개발은 일반적으로 실험실, 격리온실, 격리포장에서 수행되며 각 연구 구역마다 별도의 안전관리 규정이 마련되어 있다.

**LM 식물 실험실**

LM식물 이용을 위한 실험실은 LM 동물, 미생물 등을 이용하는 실험실과 큰 차이가 없으며, LMO법 통합고시 별표 9-1의 ‘연구시설의 설치·운영기준’에 따른다. LM 식물 실험실 설치·운영 기준에 대한 고려사항으로는 안전등급이 낮은 1, 2등급의 경우 대부분의 안전설비가 요구되지 않거나 권장 사항이나, ‘고압증기멸균기 설치’, ‘폐기물 처리’, ‘실험폐수의 처리’ 항목은 필수 사항이며 폐기물 처리는 운영기준에서도 필수 사항이다. 따라서 살아있는 LM 식물이 실험실 외부의 야외 환경으로 방출되어 생육·확산되는 것을 방지하기 위해 실험 재료 및 폐기물에 대한 생물학적 활성 제거에 주

의를 기울여야 한다.

**LM 식물 격리온실**

LM식물의 온실 재배는 일반 온실에서 수행될 수 없으며 반드시 지정된 LMO 격리온실에서 수행되어야 한다. LMO 격리온실 설치 및 운영에 대한 규정은 LMO법 통합고시 별표 9-4 ‘식물 이용 연구시설의 설치·운영기준’에 제시되어 있다.

LM식물 격리온실 설치·운영 기준에 대한 주요 고려사항은 다음과 같다.

LM 식물 격리온실은 LM 식물체가 생육·성장하여 화분 및 종자가 생성되고 일부 식물의 경우 영양번식체 등으로 격리온실 외부로 LM 식물이 유출될 가능성이 있어 이에 대한 철저한 안전관리가 요구된다. 또한 격리온실 설치기준에서 ‘콘크리트 등 불투성 온실바닥 설치’는 토양 등 투과성 바닥을 통한 LM 식물의 화분 및 종자, 영양번식체의 유출을 방지하기 위함으로, 시설 설치 시 규정 준수가 요구된다.

시설기준에서 ‘주 출입구 잠금장치 설치’와 운영기준의

**Table 3** Isolation distance for some crops according to seed management guidelines of South Korea (<https://www.law.go.kr>)

Plant	Foundation	Registered	Certified
Rice	3 m	3 m	1 m
Wheat	3 m	3 m	1 m
Soybean	3 m	3 m	1 m
Corn	300 m	300 m	200 m
Rapeseed	Only in mesh greenhouse	1000 m	1000 m
Chinese cabbage	1000 m	1000 m	1000 m
Red pepper	500 m	500 m	500 m
Tomato	300 m	300 m	300 m

‘승인받은 자만 출입 허용’은 1등급의 경우 권장사항이나 2등급은 필수 사항이며, 이는 사람에 의한 LM 식물체의 유출을 방지하기 위함이다. 운영규정에서 출입대상 비치 및 기록은 2등급 시설부터 권장사항이나 LM 식물 유출 사고 발생 시 추적 조사를 위해 명확한 작성이 필요하다.

실험실 운영 기준과 동일하게 LM 식물과 종자의 폐기물 처리 시 반드시 생물학적 활성을 제거해야 하며 실험폐기물 처리에 대한 규정 마련도 필수 사항이다. 격리온실의 경우 실험실에 비해 폐기물이 다량 발생할 수 있으므로 이에 대한 적절한 계획수립이 요구된다. 고압증기멸균기 등으로 폐기물 처리가 어려운 경우 ‘유전자변형생물체 취급관리기준’에 따라 운반 및 소각할 수 있는 폐기물위탁처리업체를 이용할 수 있으며, 이 경우 증빙서류(계약서 등)를 보관해야 한다. LM 식물 폐기물의 격리포장 외부 보관은 야외환경으로 방출 가능성이 있으므로 유의해야 한다.

격리온실은 30 mesh 크기 이상의 방충망 사용을 통해 곤충 등의 입출입을 방지하여 곤충 등 미세동물에 의한 LM 식물의 화분 유출 등을 예방하여야 한다. 또한 LMO 격리온실은 식물 생육을 위해 물이 사용되며, 배수 시 종자 및 영양변식체가 외부 환경으로 방출될 가능성이 있기 때문에 실험 폐수에 대해 고압증기멸균 또는 화학약품처리 등 생물학적 활성을 제거할 수 있는 설비 설치가 모든 안전등급에서 필수 사항으로 이에 대한 주의가 요구된다.

많은 연구자들이 간과하는 사항은 LMO 격리온실 및 격리포장에서 LM 식물 재배 시 주변에 교잡 가능한 일반 식물로 LM 식물의 유전자가 도입될 가능성이 있다는 것이다. 따라서 교잡 가능 거리에 있는 일반 식물은 LM 식물로 간주하여 취급하여야 한다.

### LM 식물 격리포장

LM 식물의 야외포장 재배는 온실 재배와 마찬가지로 일반 포장에서 수행될 수 없으며 반드시 지정된 LMO 격리포장에서 수행되어야 한다. LMO 격리포장은 LMO 실험실 및 격리온실에 비해 자연환경과 더 연결해 있어 LM 식물의 화분, 종

자, 영양변식체의 확산 방지와 설치류 등 동물 및 참새 등 조류의 침입 방지 등 다양한 안전관리가 요구된다. LMO 격리포장 설치에 대한 규정은 ‘LMO법 통합고시 별표9-7 유전자변형생물체 격리포장시설 구비요건’에 제시되어 있다. LM 식물에 대한 격리포장 실험에서 안전관리를 위한 주요 고려사항은 다음과 같다.

울타리 설치를 통한 사람 및 대동물의 출입을 방지해야 하며 울타리의 높이에 대한 설치기준(지시물 포함 2 m 이상 등)을 준수해야 한다. 울타리 밑으로 설치류 출입 방지를 위한 설비가 필요하다. LM 식물의 종류에 따라 결실기에 조류를 통한 종자 유출 가능성이 있는 경우에는 방조망 설치를 통해 종자 유출을 방지하여야 한다. 또한 빗물 등 배수를 통한 LM 식물 종자 및 영양변식체의 유출 방지를 위해 격리포장시설 구역 내에 집수로 및 집수장을 설치하고 배수구를 망 등으로 막아 LM 식물체 및 부산물 등이 배수 중에 배출되지 않도록 조치하여야 한다.

LM 식물 격리포장에서는 화분을 통한 교잡 가능한 종으로의 LM 식물 도입 유전자의 이동 방지가 필요하며, 그외에도 격리포장 주변 교잡 가능 야생 식물체의 제거가 요구된다. 화분 비산거리는 식물체 별로 다양하며 일반적으로 벼, 콩 등 자가수분 식물에 비해 옥수수 등 타가수분 식물의 비산거리가 더 멀다. 화분 비산은 바람에 의한 풍매 뿐 아니라 벌 등 충매에 의한 확산도 고려해야 한다. LM 식물체에 대해 미국, 중국, 일본 등 국가는 격리거리를 규정하고 있지만 국내에는 규정이 마련되어 있지 않은 실정이다(Lee 2017). LM 식물의 격리거리 설정을 위해 종자관리요강(농림축산식품부 고시 제2021-23호 별표6의 ‘포장검사 및 종자검사의 검사기준’)을 참고할 수 있으며 종자관리요강에 따른 주요 식물체의 격리거리는 Table 3과 같다. 격리포장 주변에 농가에서 교잡 가능 식물 재배 등으로 인해 충분한 격리거리를 확보할 수 없는 경우 개화기 등 적절한 시기에 생식기관을 제거하거나, 봉지 씌우기, 망사피복 설치, 망실재배 등의 방법을 통한 화분 비산 방지 대책이 필요하다.

LM 식물 격리포장에서는 화분 비산 방지 뿐 아니라 종자 비산과 영양변식체 유출에 의한 LM 식물 확산 방지도 요구

된다. 유채, 벨트그라스 등 종자가 작고 가벼운 경우 돌풍 등 바람에 의해 종자가 격리포장 밖으로 비산될 수 있다. 또한 잔디 등 영양변식체로 번식이 가능한 식물의 경우 빗물 등을 통해 격리포장 외부로 이동하여 성장할 수 있기 때문에 이에 대한 안전관리가 요구된다.

격리포장에서 사용된 트랙터 등 농기계 및 농기구, 작업복 등은 LM 식물의 종자 등이 부착되어 이동될 가능성이 있기 때문에 격리포장시설 구역 내에서만 사용하고 외부 반출을 금지해야 한다. 격리포장 내에서 발생한 LM 식물체 및 종자 등 대량은 폐기물은 고압멸균기 등으로 불활성화 처리가 불가능하므로 ‘유전자변형생물체 취급관리기준’에 준수하여 운반 및 소각할 수 있는 폐기물위탁처리업체를 이용할 필요가 있다.

## LM 식물 연구 사고사례

LM 식물의 격리온실 및 격리포장 실험에서 발생한 몇몇 국내의 사고사례에 대해 알아보고 이들에 대한 시사점을 고찰하고자 한다.

### 일본 LM 페튜니아 유출 사고

2016년 3월 일본 농업생물자원 연구소에서 개발된 LM 페튜니아가 일본 화훼 연구소에서 발견되었다(NARO 2022). 해당 LM 페튜니아는 농업생물자원 연구소에서 식물의 유전자 기능을 해석하기 위해 개발되었으며, 1993년부터 2008년까지 격리온실에서 재배된 후 2011년에 연구 및 실험을 종료하고 모든 종자 및 식물체를 불활성화하여 폐기된 품종이다. 일본 농업생물자원 연구소는 화훼 연구소와 대학 등 외부기관에 야생종 페튜니아 종자를 분양하였는데, 일본 화훼 연구소가 분양 받은 야생종 페튜니아가 LM 식물인 것으로 확인되었다. 농업생물자원 연구소는 LM 페튜니아와 야생종 페튜니아를 동일 온실에서 재배하여 채종·보관하는 과정에서 혼입되었을 것으로 추정하고 있다.

LM 페튜니아 유출 사고 이후 농업생물자원연구소와 화훼연구소에서 각각 종자를 교부받은 타 대학 및 농업연구기관 내 연구소, 외부 기관에 대한 추적조사를 실시한 결과 LM 페튜니아가 이동된 것으로 추정되는 기관에서 모두 실험이 실내 온실에서만 이뤄졌으며, 이동 시 낙곡 및 방출이 없어 외부 자연환경에 유출되진 않은 것으로 파악하고 있다.

본 사고사례에서의 시사점은 LMO 격리온실 및 격리포장 내에서 LM 식물 재배 시 주변에 교잡 가능한 일반 식물로 LM 식물의 유전자가 도입될 가능성이 있다는 것이다. 따라서 LM 식물 연구 도중 교잡 가능 거리에 있는 일반 식물은 LM 식물로 간주하여 취급하여야 한다. 또한 LM 식물을 연구하는 기관에서는 대조군 등 일반 식물의 분양 시 LM 식물

체의 혼입 및 유전자도입 여부의 파악이 요구된다.

### 미국 LM creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera* L.) 유출 사고

미국에서 연구개발 중인 제초제 저항성 LM creeping bentgrass가 자연 환경으로 유출된 후 자생 및 확산된 사고가 발생하였다(Zapiola et al. 2008). 미국 오레곤주의 종자생산관리구역(seed production control area)에서 glyphosate-resistant creeping bentgrass (GRCB)가 2002년 162 ha, 2003년 2.4 ha 면적에서 재배되었다. 종자생산관리구역은 우리나라 격리포장과 유사하게 creeping bentgrass 재배지로부터 400 m 이상 격리, 재배지 50 m 이내 도로 등에 교잡가능한 *Agrostis* spp. 제거, 배수로 유출 방지, 전용 농기계 사용, 밀폐 용기 운송 등 재배 관행을 엄격하게 규제하고 모니터링하였다.

이러한 규제 관리에도 불구하고 오레곤주립대학 연구팀은 GRCB에 대한 환경방출 모니터링을 수행하여 GRCB의 유출을 발견하고 학술논문으로 보고하였다(Zapiola et al. 2008). 해당 연구보고에 따르면 종자생산관리구역 5 km 주변 모니터링을 수행한 결과 2004년 138개체, 2005년 522개체, 2006년 365개체의 GRCB가 발견되었고, 최대 발견 거리는 재배지로부터 4.6 km이었으며, 이러한 장거리의 확산은 creeping bentgrass의 작고 가벼운 종자 특성(13,500 seed/g)에 기인한 것으로 판단하였다. Creeping bentgrass는 품매에 의한 유성생식뿐 아니라 영양변식체에 의한 번식이 가능한 다년생 식물로 종자가 쉽게 산포되고 발아도 빨라 자연환경에서 지속성과 확산성이 높으며, *A. gigantea* Roth, *A. capillaris* L., *A. castellana* Boiss & Reuter, *A. canina* L. 등과 교잡을 통해 중간잡종을 형성할 수 있고 *Polypogon monspeliensis* (L.) Desfontaines 및 *P. viridis* (Gouan) Breistr와 이종간 잡종을 형성하는 것으로 보고되어 자연환경에서의 확산에 대한 우려가 높은 실정이다. 이러한 사항들을 통해 GRBC는 2003년 이후 2016년까지 미농무부 동식물 검역청(USDA-APHIS)의 규제를 통과하지 못하다가 2017년 ‘상업화하지 않을 것임’을 전제로 승인되었다(USDA-APHIS 2017).

LM creeping bentgrass 유출 사례는 바람 등에 의해 종자의 산포가 용이한 LM 식물의 경우 종자 비산에 대한 강력한 방지 대책 수립이 요구되며, 격리포장 외부 방출 후 자연환경에서의 월동성, 잡초화 가능성, 발아성, 교잡가능성 등에 대해 검토하고 확산 위해성이 높을 경우 유출 방지에 더 주의가 필요하다는 것을 시사한다.

### 국내 LM 들잔디 격리포장 유출

2012년 6월 국내 LMO 환경방출 모니터링 조사에서 모대학 LMO 격리포장 주변에서 자생종인 Basta 제초제 저항성 LM 들잔디 1개체가 발견되었다(Lee et al. 2014). 연구팀은 LM 들잔디가 발견된 지점은 격리포장으로부터 경사면 하부에 위

치하여 빗물 등에 의해 종자나 영양변식체가 이동되었을 것으로 판단하였다. 특히 LM 개체 발견 1년 전 격리포장 내 토지 공사가 진행된 적이 있어 영양변식체인 잔디의 러너가 잘려 이동되었을 가능성이 제기되었다. 유출된 LM 잔디는 감수성 제초제인 glyphosate 처리를 통해 완전히 제거되었으며 이후 2년간 발견 지역에 대해 집중적 사후 모니터링을 수행한 결과 LM 잔디의 추가 유출은 발견되지 않았다.

본 LM 들잔디 유출 사고사례의 시사점은 다음과 같다. LM 식물은 종자 뿐 아니라 잔디와 같이 영양변식체로 생육이 가능한 식물체에 대해서는 영양변식체 유출에 대한 방지 대책 마련이 요구된다. 빗물 등에 의해 격리포장 외부로의 LM 식물 종자 및 영양변식체의 유출 가능성에 대해 주의가 필요하며, 특히 격리포장이 경사면에 위치한 경우 경사면 하부로의 유출 가능성에 대한 방지대책이 요구된다.

### 국내 LM 면화 종자 혼입

2017년 환경부 소속 국립생태원의 국내 모니터링 과정 중 목포 목화 축제지에서 미승인 LM 면화가 발견되었다(Kim 2020). 발견지의 목화 시료에 대한 PCR 정밀조사 결과 발견된 LM 면화는 미국 몬산토에서 개발된 해충저항성 이벤트 MON531로 확인되었으며, MON531 LM 면화는 국내에서는 식용(2003년)과 사료용(2004년)으로 승인됐었으나, 재배용으로는 미승인된 면화였다(KBCH 2022). 환경에 방출된 LM 면화는 목포 고하도에서 진행하는 지역 축제를 위해 3 ha 면적에 파종되었으며, 파종한 LM 면화 종자 35 kg 중 20 kg은 농촌진흥청에서 공급된 것으로 나타났다. 추적 조사 결과 농촌진흥청에서 공급한 LM 면화 종자는 2014년 외부 민간인에서 기탁 받은 종자에서 기인한 것으로 확인되었으며, 이때 LM 면화가 포함된 것으로 확인되었다.

LM 면화 유출 이후 면화 보급 및 분양 기관에 보관된 면화 종자를 전수 조사하여 LM 종자 오염 여부 판별 및 폐기 조치를 수행하고 전국단위 일제 조사를 통해 LM 면화 재배지 62 개소에 대한 체초, 경운, 소각, 매몰 등의 폐기 조치 및 지속적인 주변 환경모니터링을 통해 동종·근연종 발생 조사 및 유전자 이동성 조사 등 사후 안전관리가 수행되었다.

LM 면화 유출 사고사례를 통해 국외 수입 종자, 국내 판매 및 유통되는 종자에서 국내 미승인 LM 종자가 혼입될 가능성이 확인됨에 따라 관련 연구를 위한 종자 분양 시 LMO 혼입에 대한 사전 검사의 필요성이 제기되었다.

### 결론

LM 식물은 연구개발 및 상업화를 위한 환경위해성평가를 위해 격리온실과 격리포장에서의 연구가 필수적으로 수행된다. 격리온실 및 격리포장은 자연환경과 인접해 있어 LM

식물의 환경 유출 가능성이 있기 때문에 각 연구단계마다 적절한 안전관리가 요구된다. 개발 중인 LM 식물체의 안전관리의 핵심은 자연환경으로의 유출 방지이며, 이는 개발 중인 식물체에 새로 도입된 형질의 환경에 대한 안전성이 아직 입증되지 않았기 때문이다. 연구개발 중인 LM 식물의 환경방출은 사람, 대동물, 조류, 곤충 등 생물에 의한 요인과 바람, 물 등 비생물적 요인으로 구분될 수 있다. 본문에서 서술한 것과 같이 LMO법 통합고시에서 제시하는 LM 식물 연구시설의 설치·운영 기준은 생물적/비생물적 환경방출 요인에 대한 예방법을 잘 제시하고 있기 때문에 충실한 규정준수가 필요하다.

LM 식물의 자연환경 방출은 생물다양성과 생태계 기능, 토양 미생물에 대한 LM 식물 및 도입유전자의 영향(Bellon and Bertaud 2004; Giovannetti et al. 2005; Kowalchuk et al. 2003), 해충저항성 Bt (*Bacillus thuringiensis*) 유전자 도입 식물의 곤충에 대한 직접적/간접적 영향(O'Callaghan et al. 2005; Oliveira et al. 2007; Poppy 2000), 도입유전자의 작물 또는 야생 근연종으로의 이동을 통한 생태학적 영향(Lu and Snow 2005; Mercer et al. 2007; Rong et al. 2007; Wang et al. 2006; Wu 2007), 항생제저항성 도입 유전자에 의한 표적생물체의 저항성 증가(Bates et al. 2005; Li et al. 2007) 등 다양한 우려가 제기되는 실정이다. Engels 등(2006)은 원산지 또는 다양성의 중심에 있는 식물의 경우 이들 유전자 보존을 위해 LM 식물의 환경방출과 재배에 대해 특별한 예방 조치가 필요하다고 주장하였다. 따라서 국내 LM 식물 개발 연구에서 한국 및 중국이 지리적 기원지인 콩, 팥, 배추 등 식물을 숙주로 사용하는 경우 환경방출 방지에 더 많은 주의가 요구될 수 있다.

미승인된 LM 식물의 환경방출에 따른 확산은 미국의 LM creeping bentgrass 및 국내 LM 면화 유출 사례에서 볼 수 있듯이 LM 식물 제거와 복구에 많은 시간과 비용, 노력이 소요된다(Kim 2020; Zapiola et al. 2008). 국내에서 2017년 발생한 수입 LM 유채(GT73)의 환경유출은 전국 70개 시군구, 총 98개 소로 방출되어 사회적 논란이 되었으며 사후 모니터링 및 방제에 큰 노력이 소요되기도 하였다(Choi and Kim 2022). 따라서 국내 LM 식물 개발 연구에서 갖 등 야생성 작물과의 교잡이 가능하고 화분 비산거리가 넓은 유채, 배추 등의 작물에 대해서는 환경방출 방지에 더 많은 주의가 요구된다(Lee 2020). 최근 생명공학기술을 적용하는 LM 식물들이 다양화됨에 따라 개발자 및 연구자는 환경생태계에 미치는 영향을 사전에 파악하고, 환경방출 방지 등 철저한 안전관리가 요구되는 바이다.

### 적요

전 세계적으로 LMO (Living Modified Organisms)의 이용과 상업화는 지속적으로 증가하는 추세이다. 국내에서 LM 식물

의 상업적 재배는 아직 이뤄지고 있지 않으나 연구개발 및 수입, 연구시설의 신고 등은 활발히 진행되고 있는 실정이다. LM 식물은 개발 및 환경위해성 평가 단계에서 온실과 야외 포장에서의 실험이 요구되나 개발 중인 단계에서는 아직 환경에 대한 안전성이 입증되지 않아 환경방출에 대한 안전 관리가 요구된다. LM 식물의 개발 연구는 일반적으로 실험실, 격리온실, 격리포장에서 수행되며 각 연구 구역마다 LMO법 통합고시 등에서 안전관리 규정이 마련되어 있다. LM 식물 연구 사고사례 중 일본의 LM 페튜니아 유출 사고는 LM 식물 연구 도중 교잡 가능 거리에 있는 일반 식물은 LM 식물로 간주하여 취급되어야 함을 시사하고 있으며, 미국의 LM creeping bentgrass 유출 사례는 바람 등에 의해 종자의 산포가 용이한 LM 식물의 경우 종자 비산에 대한 강력한 방지 대책 수립의 필요성을 시사한다. 또한 국내 LM 들잔디 유출과 LM 면화 유출 사례는 빗물 등에 의한 식물 영양변식체 유출 및 LM 종자 혼입에 대한 안전 대책 수립의 필요성을 제시한다. 미승인된 LM 식물의 환경방출에 따른 확산은 제거와 복구에 많은 시간과 비용, 노력이 요구된다. 따라서 최근 생명공학기술을 적용하는 LM 식물들이 다양화됨에 따라 개발자 및 연구자는 환경생태계에 미치는 영향을 사전에 파악하고 환경방출 방지 등 철저한 안전관리가 요구되는 바이다.

## 사 사

This work was supported by the Technology Innovation Program (20014752, Development of industrial LMO monitoring technology in production and utilization facilities) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

## References

- Bates SL, Zhao JZ, Roush RT, Shelton AM (2005) Insect resistance management in GM crops: Past, present and future. *Nature Biotech* 23:57-62
- Bellon MR, Berthaud J (2004) Transgenic maize and the evolution of landrace diversity in Mexico: The importance of farmers' behavior. *Plant Physiol* 134:883-888
- Choi Y, Kim BS (2022) Domestic environmental release of genetically modified crops: Focusing on the government-NGOs joint environmental assessment. *Civil Society and NGO* 20:409-443
- Giovannetti M, Sbrana C, Turrini A (2005) The impact of genetically modified crops on soil microbial communities. *Riv Biol-Biol Forum* 98:393-417
- ISAAA (2019) Global status of commercialized biotech/GM crops in 2019: Biotech crops drive socioeconomic development and sustainable environment in the new frontier. ISAAA Brief No. 55, ISAAA: Ithaca, NY
- Jung YJ, Kim JM, Park S-C, Cho Y-G, Kang KK (2018) Current status of new plant breeding technology and its efforts toward social acceptance. *J Plant Biotechnol* 45:299-305
- KBCH (2022) LMO status: Approval report status. Assessed in [https://www.biosafety.or.kr/portal/page/f\\_03](https://www.biosafety.or.kr/portal/page/f_03) 2 August 2022
- Kim BS (2020) A study on the improvement of environmental assessment for unauthorized LMO safety management. Research Report, Rural Development Administration, Korea, Jeonju
- Koh S, Choi Y, Lee JY, Jang J, Choi K (2021) Global patent trends in new breeding technology for crop improvement. *Korean J Breed Sci* 53:337-349
- Kowalchuk GA, Bruinsma M, Van Veen JA (2003) Assessing responses of soil microorganisms to GM plants. *Trends Eco Evol* 18:403-410
- Lee B (2017) A study on the establishment of isolation distances for environmental release of biotech crops. *Korean J Agr Sci* 44:188-195
- Lee B (2020) A study on the environmental monitoring and safety management of genetically modified canola (*Brassica napus* L.). *Weed Turf Sci* 9:209-218
- Lee B, Oh S-D, Chang A (2018) Influence of gene flow from GM to non-GM soybeans by the size of the pollen donor. *Korean J Agr Sci* 45:591-600
- Lee B, Park KW, Kim C-G, Kang H-G, Sun H-J, Kwon Y-I, Song I-J, Ryu T-H, Lee H-Y (2014) Environmental monitoring of herbicide tolerant genetically modified zoysiagrass (*Zoysia japonica*) around confined field trials. *Weed Turf Sci* 3:305-311
- Lee B, Suh S (2011) A study on the trends and biosafety assessment of genetically modified crops. *Res Environ Law* 7:1-25
- Li GP, Wu KM, Gould F, Wang JK, Miaoi J, Gao XW, Guo YY (2007) Increasing tolerance to Cry1Ac cotton from cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*, was confirmed in Bt cotton farming area of China. *Ecol Entomol* 32:366-375
- Lu B-R, Snow AA (2005) Gene flow from genetically modified rice and its environmental consequences. *BioScience* 55: 669-678
- Mercer KL, Andow DA, Wyse DL, Shaw RG (2007) Stress and domestication traits increase the relative fitness of crop-wild hybrids in sunflower. *Ecol Lett* 10: 383-393
- NARO (National Agriculture and Food Research Organization) (2022) Assessed in <https://www.naro.affrc.go.jp/archive/nias/press/2016/20160325/another.pdf> 1 August 2022
- NRSH (National Research Safety Headquarters) (2022) Publication materials. Assessed in <https://www.lmosafety.or.kr/mps/ebook?menuId=MENU00326> 27 July 2022
- O'Callaghan M, Glare TR, Burgess EPJ, Malone LA (2005) Effects of plants genetically modified for insect resistance on non-target organisms. *Annu Review Entomol* 50:271-292
- Oliveira AR, Castro TR, Capalbo DMF, Delalibera I (2007) Toxicological evaluation of genetically modified cotton (Bollgard®) and Dipel® WP on the non-target soil mite

- Scheloribates praeincisus* (Acari: Oribatida). Exp Appl Acarol 41:191-201
- Park S-C, Joung Y-H, Kim K-M, Kim J-K, Koh H-J (2019) Gene-edited crops: Present status and their future. Korean J Breed Sci 51:175-183
- Parker IM, Kareiva P (1996) Assessing the risks of invasion for genetically engineered plants: acceptable evidence and reasonable doubt. Biol Conserv 78:193-203
- Poppy G (2000) GM crops: Environmental risks and non-target effects. Trends Plant Sci 5:4-6
- Rong J, Lu B-R, Song ZP, Su J, Snow AA, Zhang XS, Sun SG, Chen R, Wang F (2007) Dramatic reduction of crop-to-crop gene flow within a short distance from transgenic rice fields. New Phytol 173:346-353
- Snow AA, Andow DA, Gepts P, Hallerman EM, Power A, Tiedje JM, Wolfenbarger LL (2005) Genetically engineered organisms and the environment: current status and recommendations. Ecol Appl 15:377-404
- USDA-APHIS (2017) Determination of nonregulated status for the Scotts Company and Monsanto Company ASR368 creeping bentgrass. Assessed in [https://www.aphis.usda.gov/brs/aphisdocs/15\\_30001p\\_det.pdf](https://www.aphis.usda.gov/brs/aphisdocs/15_30001p_det.pdf) 7 September 2022
- Wang F, Yuan QH, Shi L, Qian Q, Liu WG, Kuang BG, Zeng DL, Liao YL, Cao B, Jia SR (2006) A large-scale field study of transgene flow from cultivated rice (*Oryza sativa*) to common wild rice (*O. rufipogon*) and barnyard grass (*Echinochloa crusgalli*). Plant Biotech J 4:667-676
- Wolfenbarger LL, Phifer PR (2000) The ecological risks and benefits of genetically engineered plants. Science 290:2088-2093
- Wu KM (2007) Monitoring and management strategy for *Helicoverpa armigera* resistance to Bt cotton in China. J Invertebr Pathol 95:220-223
- Zapiola ML, Campbell CK, Butler MD, Mallory-Smith CA (2008) Escape and establishment of transgenic glyphosate-resistant creeping bentgrass *Agrostis stolonifera* in Oregon, USA: a 4-year study. J Appl Ecol 45:486-494