

GMO 안정성에 대한 연구 동향

김 태 진

Altria

E-mail: taejin.kim@altria.com

요약문

지난 30년간 유전자 변형 기술의 발달에 힘입어 많은 종류의 GM(genetically modified, 유전자 변이 작물) 작물의 개발이 시도되었으나, 실제로 상업화된 작물은 주로 대두(soybean), 옥수수(maize), 및 목화(cotton)를 중심으로 제초제나 해충 저항성을 도입하는데 연구의 초점이 맞춰져 왔다. 그러나 이러한 GM 작물의 재배가 주변 작물이나 환경에 미치는 영향이나, GM 작물의 소비가 인체에 직/간접적으로 가져올 수 있는 건강상의 우려가 커지면서 GM 작물의 안정성에 대한 폭넓은 연구가 진행되고 있지만, 현재까지 GM 작물과 연관된 신체에 대한 심각한 위험성에 대해서는 아직 보고된 바가 없다. 본 보고서에서는 GM 작물의 환경 영향을 평가하는 데 고려되어야 할 중요한 요소들을 소개하고, GM 작물의 상업화 과정에서 거치게 되는 안정성 평가의 기준과 안정성 관련 최근 연구들의 가장 핵심적인 주제들을 살펴보았다.

Key Words: GM 작물, 안정성, 유전자, 형질, 환경, 인체

목 차

1. 서론
2. 본론
 - 2.1. GM 작물 개발 동향
 - 2.1.1. 제초제 저항성 형질
 - 2.1.2. 해충 저항성 형질
 - 2.1.3. 바이러스 저항성 형질
 - 2.1.4. 기타 형질
 - 2.2. GM 작물의 환경 영향
 - 2.2.1. 생물 다양성
 - 2.2.2. 유전적 전이
 - 2.3. GM 작물의 인간/ 동물 영향
 - 2.3.1. GM 작물의 안정성 평가

- 2.3.2. GM 작물 소비 안정성
- 2.3.3. GM 작물의 관리
- 3. 결론
- 4. 참고문헌

1. 서론

세계 보건 기구(World Health Organization, WHO)에 의하면 genetically modified organisms (GMOs)은 자연적 교배 혹은 재조합 방법이 아닌 인위적인 방법으로 DNA가 변형된 식물, 동물 및 미생물을 포함한 모든 유기체를 의미하지만, 본 보고서 내용은 genetically modified 된 식물(이하 GM 작물) 및 이를 소비해 생산한 동물성 식품에 한하여 다루었다.

1980년대 이후로 유전자 변형 기술을 이용하여 과일의 변형 시기를 늦추거나, 질병에 강한 저항성을 가지는 등의 작물의 특성을 바꾸려는 시도들이 있어왔다. 하지만 지금까지 가장 폭넓게 상용화된 GM 작물은 해충 저항성 및 제초제 저항성 형질이 도입된 경우였다. 이러한 형질이 도입된 대략 십여 가지 종의 작물이 최근까지 전 세계 총 경작지의 12-15 % 정도에 걸쳐 재배되었고 [1], 대두(soybean), 옥수수(maize), 목화(cotton)가 가장 보편적인 GM 작물이다. (그림 1) GM 작물은 경제적 이득을 가져다주거나 영양적인 측면에서 도움이 되기도 하지만, GM 작물의 재배가 주변 환경에 미치는 영향이나, 식품으로써의 안정성에 대한 우려가 높아지면서 최근 들어 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있으며, 과학적 근거를 바탕으로 한 학계 및 민간 간의 논의와 교류가 필요한 상황이다.

2. 본론

2.1 GM 작물 개발 동향

2.1.1 제초제 저항성 형질

작물 생산성 증가와 관련하여, 좀 더 효과적이거나 강력한 제초제의 개발이 늘어나자 이에 따라 해당 제초제의 사용에도 시들거나 죽지 않는 작물을 개발하기 위하여 다양한 형질들의 도입이 시도되었다. 이러한 작물을 사용하게 되면, 해당 제초제를 사용하였을 때 추가적인 제초 작업을 하지 않고도 원하는 작물을 선별하여 재배 할 수 있는 이점이 있다. 현재까지 총 9가지의 제초제에 대한 형질 개발이 옥수수(maize), 대두(soybean), 목화(cotton), 카놀라(canola), 사탕무(sugar beet) 등에 도입되었다 [2]. 가장 대표적인 예로는 glyphosate와 이에 대한 저항성을 지니는 GM 작물 조합이 있으며, glyphosate 저항성은 1996년 대두(soybean)에 처음 도입된 이후 2015년까지 옥수수(maize),

목화(cotton), 카놀라(canola), 사탕무(sugar beet)에도 차례로 도입되었다. 최근에는 glyphosate와 다른 종류의 제초제, 예를 들어 glyphosate와 2,4-D 혹은 glyphosate과 dicamba 같이 두 가지 제초제에 동시에 저항성을 가지는 작물도 개발되었다 [2].

2.1.2 해충 저항성 형질

다양한 해충으로부터의 악영향을 최소화하기 위한 노력으로, 살충 효과를 지니는 형질이 도입된 GM 작물이 개발되었다. 대표적인 예로는, 토양 미생물인 *Bacillus thuringiensis* (Bt) 로 부터 유래한 독소(toxin) 단백질의 일종인 crystalline (Cry) 을 합성하는 유전자가 도입이 되었으며, 합성되는 Cry 단백질 종류에 따라 나방(moth), 딱정벌레(beetle), 파리(fly) 등의 다양한 해충에 대해 선택적으로 저항성을 지니는 것이 가능하게 되었다 [3]. 현재까지 해충 저항성 형질은 목화(cotton), 가지(eggplant), 옥수수(maize) 및 대두(soybean)에 적용되어 상용화되었다. (그림 1)



그림1. 국가 별 상업화된 GM 작물 개발 지도.

2015년 까지 전 세계 농경지의 12 %에 해당하는 약 1억 8천만 헥타르가 GM 작물의 경작에 이용되었다(Genetically Engineered Crops-Experiences and Prospects, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016).

2.1.3 바이러스 저항성 형질

바이러스 저항성을 가지는 GM 작물은 1998년에 미국 하와이에서 파파야(papaya)를 대상으로 처음 도입되었다. 해당 바이러스의 껍질을 구성하는 단백질(coat-protein)을 합성하는 유전자를 도입하여, 작물 내에서의 바이러스 복제를 억제하는 방식이 가장 대표적이다. 이 후 바이러스 저항성을 가지는 GM 호박(squash) [4] 나 GM sweet pepper [5]가 개발되었다.

2.1.4 기타 형질

미국에서는 대두(soybean)에 포함된 기름의 산화 안정성을 증가 시켜 수소화 반응(hydrogenation) 과정에서 생성되는 트랜스 지방의 함량을 줄이거나, 오메가-3 지방산(omega-3 fatty acid) 혹은 올레산(oleic acid)의 함량이 증가한 GM 대두가 개발되었다 [6]. 옥수수(maize)의 경우에는 *Bacillus subtilis*로부터 유래한 cold-shock protein B (cspB) 유전자의 발현을 통해 가뭄에 내성을 가지는 GM 작물이 개발되었고, 2015년에는 폴리페놀 산화효소(polyphenol oxidase) 유전자의 발현을 억제하여 갈변화(browning)를 방지한 사과(apple)나 감자(potato)도 상용화 되었다. 감자(potato)의 경우에는 아스파라진 합성 효소(asparagine synthase)의 발현을 억제해 아스파라진 함량을 줄여, 감자를 고온에서 조리할 때 아스파라진이 분해되어 생성되는 대표적 발암 물질인 아크릴아마이드(acrylamide)가 형성되는 것을 억제한 연구도 진행되었다 [7].

2.2 GM 작물의 환경 영향

2.2.1 생물 다양성(Biodiversity)

GM 작물이 주변의 생물 다양성에 미치는 영향에 관한 연구는 GM 작물의 환경 영향 평가와 관련하여 매우 다양하고 광범위하게 이루어졌다. 우선적으로 많은 연구에서 표적으로 삼지 않은 생물 종(조류, 뱀, 절지 동물 및 토양 미생물)에 대한 영향은 미미하거나 부정적인 효과는 거의 없다고 밝혔다 [8-10]. 반면 제초제 저항성이나 해충 저항성 형질을 도입한 GM 작물의 경우, 표적으로 삼은 잡초나 해충들의 종 다양성이 감소한 결과가 보고되었다. 가령 Bt 작물(Cry protein을 도입한 경우)은 해당 작물을 경작한 지역 뿐 아니라 주변 다른 지역의 해충 감소 효과도 동반하는 것으로 보고되었다 [8]. 영국의 Farm Scale Evaluations (FSE) 에 의해서 진행된 연구에서도 제초제 저항성을 지닌 GM 작물을 재배한 경우, 잡초의 종류나 씨앗 생성을 억제하는 결과를 보였다 [10]. 이 밖에도 주의 깊게 연구된 것이, 지속적인 GM 작물의 재배로 인한 내성 생물 종의 등장이었다. 실제로 2012년에는 대표적 제초제인 glyphosate에 내성을 지닌 잡초나 [11], Bt Cry 단백질 내성 해충이 보고되었다 [12]. 하지만 Bt Cry 단백질의 경우 여러 종류의 단백질 조합을 통하여, 내성을 지니는 해충의 발생을 억제할 수 있는 반면 [13], glyphosate은 그 효과나 유용성을 고려했을 때 대체할 수 있는 제초제가 부족하다는 점으로 인해 내성 잡초의 발생을 억제하기 위해선 효과적이고 단계적인 사용이 필수적이다 [11].

2.2.2 유전적 전이(Gene flow)

유전적 전이(gene flow)라 함은, 유전자(gene), 생식 세포(gamete), 개체 혹은 집단이 일정 개체군을 벗어나 시간과 공간적으로 다른 곳으로 이동하는 것을 의미한다. 예를 들어, 특정 GM 작물이 씨앗의 형태로 오랫동안 존재하다가 GM 작물이 아니거나 야생 작물과 수정이 되어 새로운 개체가 형성되는 경우에 최초로 도입된 형질이 다른 개체군으로 이전, 확장되는 경우이다. 이러한 유전적 전이는 크게 3가지 경우; 1) 야생종으로의 전이, 2) 다른 작물로의 전이, 3) 토양 미생물로의 전이로 나뉘어 진다.

2.2.2.1 야생종으로의 전이(flow to wild relatives)

야생종으로의 유전적 전이를 파악하기 위해서는 우선적으로 GM 작물의 번식, GM 작물의 화분을 통한 번식 범위 내에 수정 가능한 야생종이 있는지 여부, GM 작물과 야생종과의 하이브리드(hybrid)의 적합성이나 번식과 관련된 사항을 이해하는 것이 중요하다. GM 작물과 야생종 간의 하이브리드(hybrid) 생성과 관련된 보고가 다수 있으며 [14, 15], 하이브리드(hybrid)의 적합성이 외부 유전자의 야생종으로의 항구적 이입을 결정하게 된다 [16, 17]. 실제로 다수의 제초제 저항성 유전자를 지닌 GM 카놀라(canola)의 자연적 발생이 관찰되었으며 [18], 제초제 내성을 지니는 새로운 creeping 겨이삭(bentgrass) 하이브리드 종이 보고되었다 [19]. 하지만 야생종으로의 외부 유전자 이입으로 인한 부정적 영향은 아직까지 보고된 바가 없다.

2.2.2.2 다른 작물로의 전이(flow to other crops)

다른 작물로의 유전적 전이는 새로운 GM 작물의 번식을 유도할 뿐 아니라, 작물 생산성이나 관리와 밀접한 연관성을 가진다. 최근에는 이러한 연구가 많이 증가 되었는데, 이는 유기농과 GM 작물을 동시에 인접 지역에서 재배하는 최근의 경작 방식의 변화와 관련이 깊다. 옥수수(maize), 카놀라(canola) 혹은 밀(wheat)을 대상으로 GM 작물과 비 GM 작물(non-GM) 간의 원치 않은 유전적 전이를 방지하기 위해 농경학을 바탕으로 한 모델링이나 격리 거리(isolation distance)에 대한 연구 등의 다양한 방법이 시도되고 있는 중이다 [20-23].

2.2.2.3 토양 미생물로의 전이(horizontal gene transfer in soil)

토양 미생물의 경우 horizontal gene transfer 기작을 통해 GM 작물에 존재하는 외부 유전자를 받아들일 수 있다. 또한 GM 작물을 개발하는 과정에서 효과적인 선별을 위해 항생제 저항성 유전자를 표지 유전자(genetic marker)로 사용하기도 하는데, 이러한 항생제 내성 유전자의 사용은 해당 GM 작물의 섭취 시 건강상의 문제를 일으킬 수 있고, 항생제 내성을 지닌 슈퍼 박테리아의 출현을 높이는 위험성을 가지고 있다.

2.3 GM 작물의 인간/ 동물 영향

2.3.1 GM 작물의 안정성 평가

GM 작물이 도입된 이후 GM 작물의 안정성과 관련하여 가장 먼저 제기된 문제는, 기존 작물에 존재하던 특정 독성 성분의 함량이 외부 유전자 도입 과정 이전과 이후에 변화가 있는지 여부였다. 이후 독성 성분뿐만 아니라, 영양 성분, 유전 형질, 단백질 발현 및 2차 대사 물질 등의 변화를 종합적으로 비교, 분석하는 "substantial equivalence (실질적 동등성)"라는 개념으로 확대되어 GM 작물의 안정성 평가에 있어 뼈대를 제공하게 되었다. 이 "substantial equivalence"라는 개념은 현재

까지 상업화된 GM 작물의 안정성 평가의 기준이 되었는데, 이를 증명하기 위해서는 국제적으로 Codex, FAO, OECD, WHO 등에서 공인받은 절차를 거치게 된다. 우선적으로 정해진 목록에 따른 재배학적(agronomic), 형태학적(morphological), 화학적(chemical) 분석이 이루어지고, 특정 물질의 외부 유전자 도입 이전과 이후의 수치 변화가 일정 기준치 이상일 경우 안정성과 관련된 추가 분석이 진행되고 이하일 경우 해당 GM 작물을 안전하다고 인정받게 된다.

새로운 형질을 도입한 GM 작물(제초제 저항성 혹은 해충 저항성 부여 및 증진 등)의 경우, 해당 작물의 영양적 분석은 큰 차이를 보이지 않을 것임을 전제로 대체적으로 유전자 변화 도입 이전의 작물을 기준으로 추정하게 되지만, 영양적 변화를 동반하는 GM 작물(지방산 비율 변화 혹은 비타민 함량 증가 작물 등)의 경우 그 영향을 분석하기 위해서 90일 설치류 반복투여 검사와 같은, 빠르게 성장하는 동물 모델을 상대로 실험을 진행하고 그 결과를 해당 관계 당국에 보고하도록 되어 있다. 두 가지 이상의 형질이 동시에 도입된 GM 작물의 경우, 단일 형질에 대한 분석이 각각 독립적으로 이루어지고, 각 형질의 잠재적 연관성이나 상호 영향을 고려하여 최종 작물에 대한 분석이 이루어지게 된다.

2.3.2 GM 작물 소비 안정성

2.3.2.1 외래 DNA 안정성

GM 작물의 직접적 소비, 혹은 GM 작물을 먹인 가축의 소비를 통하여 인체에 유입된 외래 DNA가 가질 수 있는 위험성에 대해서 최근 15년간 다방면으로 활발히 연구가 진행되었다. 하지만 아직 까지 GM 작물로부터 유래한 외래 DNA가 기존에 인류가 소비하던 다양한 형태의 DNA와 비교했을 때, 그 위험성 측면에서는 크게 다르지 않다는 것이 일반적인 결론이다 [24]. 근거로는 우선 인체에 유입되는 외래 DNA의 양이 인간이 일반적으로 하루에 소비하는 전체 DNA의 양인 0.1-1.0 g/day의 0.00006 - 0.00009% 밖에 되지 않는다는 점이다 [25]. 또한 요리 과정을 통해 대부분의 외래 DNA가 분해되는 것으로 밝혀졌다 [26]. GM 작물을 먹인 가축으로부터 유래한 제품에서는, 2006년, 우유로부터 외래 DNA가 검출된 것을 [27] 제외하고는 보고된 바가 없다 [28]. 다음으로 항생제 저항성 유전자의 장내 미생물로의 전이(horizontal gene transfer)에 대한 우려는, 그러한 일이 실제 일어날 확률은 매우 낮은 것으로 실험을 통하여 증명되었다 [29]. 또한 현대 의학에 있어서 장내 미생물의 항생제 내성 문제는 더이상 큰 위험 요소가 아니게 되었다 [30]. 또 다른 우려는 소화 기관을 통한 외래 DNA의 인체 내 축적 문제인데, 동물 실험을 통해 high-copy-number 유전자가 소화 기관을 통해 흡수되어 검출된 적이 있으나 [31], 인체 위험성에 대한 연구는 진행되지 않았다.

2.3.2.2 외래 RNA 안정성

일반적으로 GM 작물의 소비를 통하여 인체에 유입되는 외래 RNA의 함량이 외래 DNA의 함량과 크게 다르지 않기 때문에, 외래 RNA의 안정성에 대한 연구도 활발히 진행되었다 [25]. 하지만 2012년, 일부 GM 작물의 바이러스 저항성이나 오일 성분 변화를 위해 도입되었던 double

strand RNA (dsRNA)가 RNA interference (RNAi) 기작을 통해 일으킬 수 있는 잠재적 위험성이 제기되면서 [32] 이에 대한 추가적인 연구와 논의가 필요한 상황이다. 이 연구는, 쌀 품종에 많이 포함된 외래 miRNA인 MIR168a가 쥐의 소화 기관을 통해 흡수된다는 최초의 보고였으며, 이 MIR168a가 RNAi 기작을 통하여 low-density lipoprotein (LDL)의 분해에 관여하는 단백질을 조절한다고 밝혔다 [32]. 하지만 RNA 전달과 관련한 실험의 어려움, 결과의 재연성 [33] 혹은 기존 임상 실험 데이터와의 불일치 [34] 등의 문제점이 제기되며 명확한 결론 도출을 위한 후속 연구가 필요한 상황이다.

2.3.2.3 합성된 단백질의 안정성

인체로 유입된 외래 유전자는 단백질 합성으로 이어지고, 이렇게 합성된 단백질의 독성 혹은 알레르기 유발 가능성은 GM 작물의 안정성 평가에서 매우 중요하게 다뤄지고 있다. 개발자들은 해당 GM 작물의 상업화 허가 과정에서 다음과 같은 항목에 걸쳐 합성된 단백질의 안정성에 대한 분석을 실시하여 그 결과를 관계 당국에 제출하고 근거 자료로 활용하게 된다. 해당 항목은, i) 바이오인포메틱스 분석을 통해 기존에 알려진 독성 단백질(toxic protein) 혹은 알레르기 항원(allergen)과의 유사성 검사, ii) pH와 온도에 따른 안정성 검사, iii) 동물성 위산 용액이나 장내 용액을 이용한 체내 소화율(*in vivo* digestibility) 검사, iv) 단백질 발현양과 흡수율 검사, v) 정제된 단백질을 이용하여 설치류(rodents)를 대상으로 일회성(single dose, acute) 혹은 반복적(repeated dose, sub-chronic) 투여 시 독성 검사이다. 이러한 분석 결과에 따르면, 상업화된 것은 아니지만 브라질 산 대두(soybean)에서 합성된 단백질의 잠재적 알레르기 유발 가능성이 보고되었고 [35], 대표적 GM 작물인 옥수수(maize) Starlink에서도 비슷한 결과가 도출되었다 [36]. 하지만 아직까지 GM 작물에 포함된 외래 단백질의 소비 이후, 해당 단백질의 체내 검출이나 독성 및 알레르기 유발에 관한 연구 및 보고는 없으며 [37], 외래 단백질은 인체의 소화 기관 내에서 분해되어 활성을 잃는 것으로 알려졌다 [38].

2.3.3 GM 작물의 관리

GM 작물의 안정성에 대한 관심이 높아짐에 따라, GM 작물의 관리와 도입된 외래 유전자를 측정 및 검출하는 방법/절차에 대한 표준화 및 단일화의 필요성이 높아졌다. 한가지 예는, "traceability (트래서빌리티)"라는 개념의 도입인데, GM 작물 혹은 이를 이용하여 키운 동물로부터 유래한 제품의 생산, 공정 및 판매에 걸친 모든 절차를 관리하여 안정성을 확보하려는 시도로 이미 기존의 작물 및 식료품 시장에서는 폭넓게 적용되어 있는 개념이다. 유럽 연합(EU)의 경우 GM 작물에 대하여 가장 엄격한 규제 시스템을 적용하고 있는데, 다른 국가들보다 가장 낮은 기준치(반수체(haploid) 기준 0.9%)를 적용해 이보다 많은 양의 유전 물질이 도입된 경우, 이를 표기하는 것을 의무화하도록 되어있다 [39]. 실제 외래 유전자를 측정하는 방법에 있어서는 qPCR (real-time quantitative PCR)이 가장 보편화 되어 사용되고 있으며, 최근엔 microarray나 Luminex XMAP를 이용한 분석도 사용되고 있다. 하지만 표본 추출에 대한 절차의 표준화나 [40], 외래 유전 물질의 농도 단위에 있어서 기준이 되는 물질(certified reference material)에 대한 단일화 [41] 등은 아직 이루어지지 않은 상황이다.

3. 결론

1980년대 처음 GM 작물이 도입된 이후로, 지난 30여 년 동안 GM 작물의 환경 영향과 식품으로써의 안정성에 대한 방대한 연구가 이루어 졌다. 아직까지 GM 작물의 소비가 인체에 심각한 위험을 직접적으로 일으킨다는 학계의 보고는 없다. 하지만 많은 연구 결과가 정치적으로 이용되거나 미디어에 의해 과장되기도 하고, GM 작물의 재배에 반대하는 측에 의해 조작 및 왜곡 되기도 하였다. 실제적으로 각각의 GM 작물은 서로 다른 외래 유전자가 도입되었으므로 GM 작물의 안정성을 일괄적으로 결정하기는 어렵다. 그러므로 환경적, 상호적 요소가 함께 고려된 개별적인 안정성 평가가 필수적이다. 또한, 과학적으로 검증되고 보편화된 절차나, 외래 유전자의 분석 및 검출 방법에 대한 표준화도 필요하다. GM 작물이 미래의 중요한 전략적 자원으로써 가치를 지니기 위해서는 이와 같이 과학적 분석을 바탕으로 한 정책적, 사회적 노력이 선행되어야 한다.

4. 참고문헌

- [1] C. James, "Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2015," International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications, 2015.
- [2] E. a. M. (. National Academies of Sciences, "Genetically Engineered Crops : Experiences and Prospects," 2016.
- [3] H. a. H. W. Höfte, "Insecticidal crystal proteins of *Bacillus thuringiensis*," Microbiological Reviews, p. 53:242–255, 1989.
- [4] D. M. K. J. C. P. F. R. J. R. M. D. W. G. K. C. H. P. T. H. J. P. H. M. L. B. a. H. D. Q. Tricoll, "Field evaluation of transgenic squash containing single or multiple virus coat protein gene constructs for resistance to cucumber mosaic virus, watermelon mosaic virus 2, and zucchini yellow mosaic virus.," Bio/technology , pp. 1458-1465, 1995.
- [5] Z.-L. H. G. Y. L. Y. S. P. W. Z. J. X. M. J. T. N. P. a. L.-J. Q. Chen, "Safety assessment for genetically modified sweet pepper and tomato.," Toxicology, pp. 297-307, 2003.
- [6] T. S. S. F. E. A. X. Y. Z. M. M. B. S. A. K. P. S. a. T. C. Buhr, "Ribozyme termination of RNA transcripts downregulate seed fatty acid genes in transgenic soybean.," Plant Journal, p. 30:155–163, 2002.
- [7] D. R. S. M. S. D. T. B. E. D. E. D. G. T. M. M. S. G. R. a. M. V. Zyzak, "Acrylamide formation mechanism in heated foods.," Journal of Agricultural and Food Chemistry, p. 51:4782–4787, 2003.
- [8] C. JE., "Impact of GM crops on biodiversity," GM Crops, pp. 2,7-23, 2011.
- [9] R. PH., "Does the use of transgenic plants diminish or promote biodiversity?," New Biotechnol, pp. 27, 528–33, 2010.
- [10] M. M. S. A. Romeis J, "When bad science makes good headlines: Bt maize and regulatory bans.," Nat Biotechnol, pp. 31,386–7, 2013.
- [11] L. R. O. M. Shaner DL, "What have the mechanisms of resistance to glyphosate taught us?," Pest Manag Sci, pp. 68, 3-9, 2012.
- [12] B.-P. F. M. A. e. a. Baxter SW, "Parallel evolution of *Bacillus thuringiensis* toxin resistance in Lepidoptera.," Genetics, pp. 189, 675-9, 2011.

- [13] B. R. T. R. e. a. Sanahuja G, "Bacillus thuringiensis: a century of research, development and commercial applications," *Plant Biotechnol J*, pp. 9, 283–300, 2011.
- [14] B. N. S. C. e. a. Londo JP, "Glyphosate drift promotes changes in fitness and transgene gene flow in canola (*Brassica napus*) and hybrids," *Ann Bot*, pp. 106, 957–65, 2010.
- [15] O. K. Y. Y. e. a. Mizuguti A, "Hybridization between GM soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) and wild soybean (*Glycine soja* Sieb. et Zucc.) under field conditions in Japan," *Environ Biosafety Res*, pp. 9, 13–23., 2010.
- [16] W. L. L. E. e. a. Reichman JR, "Establishment of transgenic herbicide-resistant creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera* L.) in nonagronomic habitats," *Mol Ecol*, pp. 15, 4243–55, 2006.
- [17] G. R. S.-B. D. e. a. Schoenenberger N, "Molecular analysis, cytogenetics and fertility of introgression lines from transgenic wheat to *Aegilops cylindrica* host," *Genetics*, pp. 174, 2061–70., 2006.
- [18] R. A. L. J. e. a. Schafer MG, "The establishment of genetically engineered canola populations in the U.S.," *PLoS ONE*, pp. 6, e25736(1-4), 2011.
- [19] M.-S. C. Zapiola ML, "Crossing the divide: gene flow produces intergeneric hybrid in feral transgenic creeping bentgrass population," *Mol Ecol*, pp. 21, 4672–80., 2012.
- [20] C. N., "How to model and simulate the effects of cropping systems on population dynamics and gene flow at the landscape level: example of oilseed rape volunteers and their role for co-existence of GM and non-GM crops," *Environ Sci Pollut Res Int*, pp. 16, 348–60, 2008.
- [21] C. M. T. O. R. D. Devos Y, "A method to search for optimal field allocations of transgenic maize in the context of co-existence," *Environ Biosafety Res*, pp. 7, 97–104., 2008.
- [22] H. B. H. A. e. a. Langhof M, "Coexistence in maize: isolation distance in dependence on conventional maize field depth and separate edge harvest," *Crop Science*, pp. 50, 1496–508., 2010.
- [23] Q. C. M. O. e. a. Foetzki A, "Surveying of pollen-mediated crop-to-crop gene flow from a wheat field trial as a biosafety measure," *GM Crops & Food*, pp. 3, 115–22., 2012.
- [24] E. Commission, "A decade of EU-funded GMO research," European Commission, 2010.
- [25] C. B. L. J. e. a. Parrott W, "Application of food and feed safety assessment principles to evaluate transgenic approaches to gene modulation in crops," *Food Chem Toxicol*, pp. 48, 1773–90, 2010.
- [26] G. N., "Effect of food processing on plant DNA degradation and PCR-based GMO analysis: a review," *Anal Bioanal Chem*, pp. 396, 2003–22., 2010.
- [27] B. M. G. A. S. S. Agodi A, "Detection of genetically modified DNA sequences in milk from the Italian market," *Int J Hyg Environ Health*, pp. 209, 81–8., 2006.
- [28] ILSI, "Nutritional and safety assessments of foods and feeds nutritionally improved through biotechnology: case studies," 2008.
- [29] R. N. S. C. e. a. Rizzi A, "The stability and degradation of dietary DNA in the gastrointestinal tract of mammals: implications for horizontal gene transfer and the biosafety of GMOs," *Crit Rev Food Sci Nutr*, pp. 52, 142–61, 2012.
- [30] P. A. G.-G. S. e. a. Ramessar K, "Biosafety and risk assessment framework for selectable marker genes in transgenic crop plants: a case of the science not supporting the politics," *Transgenic Res*, pp. 16, 261–80, 2007.
- [31] A. H. B. H. e. a. van den Eede G, "The relevance of gene transfer to the safety of food and feed derived from genetically modified (GM) plants," *Food Chem Toxicol*, pp. 42, 1127–56., 2004.
- [32] H. D. C. X. e. a. Zhang L, "Exogenous plant MIR168a specifically targets mammalian LDLRAP1: evidence of

- crosskingdom regulation by microRNA," *Cell Res*, pp. 22, 107–26, 2012.
- [33] D. Y. X. X. e. a. Zhou XH, "A 90-day toxicology study of high-amylose transgenic rice grain in Sprague-Dawley rats.," *Food Chem Toxicol*, pp. 49, 3112–18., 2011.
- [34] B.-T. B. J. A. K. L. Petrick JS, "Safety assessment of food and feed from biotechnology-derived crops employing RNA-mediated gene regulation to achieve desired traits: a scientific review," *Regul Toxicol Pharmacol*, pp. 66, 167-76., 2013.
- [35] T. S. T. J. e. a. Nordlee JA, "Identification of a Brazil-nut allergen in transgenic soybeans.," *N Engl J Med*, pp. 334, 688-92., 1996.
- [36] S. B. B. R. Siruguri V, "Starlink genetically modified corn and allergenicity in an individual," *J Allergy Clin Immunol.*, pp. 113, 1003-5, 2004.
- [37] P. J. Kier LD, "Safety assessment considerations for food and feed derived from plants with genetic modifications that modulate endogenous gene expression and pathways.," *Food Chem Toxicol*, pp. 46, 2591-605, 2008.
- [38] A. J. C. H. e. a. Delaney B, "Evaluation of protein safety in the context of agricultural biotechnology.," *Food Chem Toxicol*, pp. 46, S71-97., 2008.
- [39] C. T. T. R. e. a. Ramessar K, "Trace and traceability - call for regulatory harmony.," *Nat Biotechnol*, pp. 26, 975-8, 2008.
- [40] B. Y. Davison J, "EU regulations on the traceability and detection of GMOs: difficulties in interpretation, implementation and compliance," *CAB Rev*, pp. 2, 1-14, 2007.
- [41] C. P. S. H. E. H. Trapmann S, "Towards future reference systems for GM analysis," *Anal Bioanal Chem*, pp. 396, 1969-75, 2009.

The views and opinions expressed by its writers do not necessarily reflect those of the Biological Research Information Center.

김태진(2020). GMO 안정성에 대한 연구 동향. BRIC View 2020-T12

Available from <https://www.ibric.org/myboard/read.php?Board=report&id=3464> (Mar. 19, 2020)

Email: member@ibric.org