LMO 격리 포장에서 비타민A 강화콩 재배가 곤충 다양성에 미치는 영향

오성덕¹ · 박수윤¹ · 이성곤¹ · 윤도원¹ · 이강섭¹ · 서상재^{2*}

¹국립농업과학원 생물안전성과, ²경북대학교 농업생명과학대학 응용생명과학부

Influence of Vitamin A-enhanced Transgenic Soybean Cultivation on the Diversity of Insects in LMO Quarantine Fields

Sung-Dug Oh¹, Soo-Yun Park¹, Seong-Kon Lee¹, Doh-Won Yun¹, Gang-Seob Lee¹, and Sang Jae Suh^{2*}

¹Department of Agricultural Biotechnology, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Jeonju 54874, Republic of Korea

²School of Applied Biosciences, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Republic of Korea

Abstract In this study, conducted in living modified organism (LMO) isolation fields, we sought to develop environmental risk assessment procedures for identifying the potential effects on non-target above-ground insects and spiders within agroecosystems cultivated with vitamin A-enhanced transgenic soybean with tolerance to the herbicide glufosinate. To this end, we investigated insect/arachnid species diversities and population densities on vitamin A-enhanced transgenic soybean and non-GM soybean (Gwangan) grown in LMO quarantine areas of Kyungpook National University (Gunwi) and the National Institute of Agricultural Sciences (Jeonju). In total, 93,419 individual insects and arachnids, representing 65 families in 12 orders, were captured during the study. In Gunwi, totals of 17,110 and 17,627 individual insects and arachnids were collected from vitamin A-enhanced transgenic soybean and Gwangan, respectively, whereas in Jeonju, totals of 28,621 and 30,061 individuals were collected from vitamin A-enhanced transgenic soybean and Gwangan, respectively. Although we detected no significant differences among the population densities of insect pests, natural enemies, and other insects on vitamin A-enhanced transgenic soybean and Gwangan grown within the same field, the population densities of these insects were found to be higher in Jeonju than those in Gunwi. Throughout the study, analysis of variance indicated no significant differences ($p < 0.05$) in insect/arachnid populations, and multivariate analysis indicated that the abundance and diversity of plant-dwelling insects were similar within the same fields.

Keywords Vitamin A, Transgenic, Soybean, Biosafety, Insect, Diversity

Received on July 23, 2020. Revised on July 23, 2020. Accepted on August 24, 2020.

* Corresponding Author (E-mail: sjsuh@knu.ac.kr, Tel: +82-53-950-7767, Fax: +82-53-950-6758)

서 언

세계 3대 재배작물 중 하나인 콩(*Glycine max* L.)은 동북아시아 지역이 기원지인 작물이며, 단백질, 지질, 식이섬유 등의 주요 영양 성분에 더불어 이소플라본, 안토시아닌, 사포닌 및 올리고당 등 다양한 기능성 성분들을 포함하고 있어서, 건강한 식생활을 위한 식품 소재로서 전 세계적으로 소비와 수요가 지속적으로 증가하고 있다(Lee et al. 2011a).

다양한 기능성을 지닌 작물을 개발하기 위해서 교배가 어렵거나 장기간의 시간이 소요되는 전통 교배육종의 한계를 개선하고자, 1980년대 이후부터 생명공학기술을 활용한 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 이러한 연구 개발 결과물 중에 제초제인 glyphosate의 저항성 유전자인 mEPSPS (modified 5-enolpyruvylshikimate-

3-phosphate synthase)를 도입한 제초제 저항성 GM콩은 미국을 시작으로 브라질, 아르헨티나, 캐나다, 남아프리카공화국 등 여러 나라에서 재배되고 있다. ISAAA (International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications)의 보고에 따르면 유전자변형작물(Genetically modified crops)은 2018년 기준 전 세계 26개국에서 전년 대비 1% (190만 ha)가 증가한 1억 9,170만 헥타르의 면적에서 재배되었으며, 유전자변형(Genetically Modified, GM) 콩은 전 세계 GM작물 재배 면적의 50% 인 9,590만 헥타르의 면적에서 재배되고 있다(ISAAA 2019). 한국의 경우 2018년 식용농업용으로 수입 승인된 유전자변형생물체는 총 1,021만톤, 23.5억달러 규모이며, 이중 GM콩이 105만톤으로 전체 수입량의 10.3%를 차지하고 있는 상황이다(KBCH 2019a). 국내에서도 기능성 성분이 강화된 GM콩을 개발되었으

나 아직까지 실용화되고 있지는 않은 실정이다.

유전자변형작물의 개발과 상용화에 있어 경작지 및 주변 생태계에 미치는 영향 평가가 필수 항목으로 요구되고 있으며, GM종을 포함한 GM작물의 재배가 증가함에 따른 생태학적 문제 예방 및 해결을 위한 다양한 연구들이 시도되었다. 자연 내 교잡율이 낮더라도 교잡에 의한 야생종으로의 유전자 이동 등의 생태계 교란, 생태계 다양성 감소 등의 부정적인 결과를 초래할 수 있기 때문에 GM종의 환경위해성에 대한 연구의 필요성이 대두되었다(Lu 2004, Mizuguti et al. 2010). 2017년도에 한국에서 GM목화와 GM유채가 비의도적인 환경 방출된 사례가 보고되었으며, 핀란드에서도 자연 생태계에서 GM페튜니아가 발견되는 등의 비의도적인 환경 방출 사고들이 발생함에 따라 GM작물의 안전 관리방안 마련이 필요할 시점이다(KBCH 2018). 이러한 우려에 대해 국내에서는 GM작물의 연구개발 외에도 안전성 평가를 연구하고 있는데, 이 평가는 재배지 및 주변 생태계를 지속시키는 생물종의 정량 연구를 통한 생물다양성(Biodiversity) 조사로 시작하게 된다. 생물다양성조사는 특정 생태계에서 종의 수와 분포, 형태 등으로 종간의 상호 관계를 나타내는 종다양성(Species diversity), 서식지 내의 경쟁과 공생을 통해 먹이사슬 관계를 구성하는 생태적 기능을 보여주는 생태계 다양성(Ecosystem diversity)으로 나누어진다(Choi et al. 2015). 생물다양성 평가는 단순히 종의 목록이나 멸종률을 다루는 것이 아니라, 인구와 주변 생태계의 변화에 초점을 맞춘다(Kwon 2008). 다양한 생물 분류군들 중에 곤충은 백만종 이상이고, 다양한 생태 유형을 가지고 있으며 먹이사슬에서도 양적인 우위를 보이고 있다(Borror et al. 1989, Groombridge 1992, Price 1997). 곤충은 생태계의 먹이연쇄에서 생태계의 특성을 나타내는 중요한 지표로서 종의 구성변화는 장기적인 생태계 변화를 파악할 수 있는 중요 요소이다. 또한, 주변 환경과 밀접한 관계를 맺고 해당 생태계 환경의 질을 측정할 수 있는 기준으로 활용되고 있다(Gullan & Cranston 2005, KNPS 2006).

자연계에 널리 존재하는 색소 물질인 카로티노이드(carotenoid)는 식물과 세균, 곰팡이, 미세조류 등에서도 생성되며, 식물에서는 엽록체(Chloroplast)와 유색체(Chromoplast)에서 생합성이 되며(Ha et al. 2007), 인간의 체내에서는 비타민A의 전구 물질로서 항산화 효과에 의한 면역증진과 노화방지 효과가 있는 것으로 알려져 있다(Stahl & Sies 2003). 작물에서 생명공학기술을 이용하여 카로티노이드 함량을 높이려는 GM작물 개발 연구는 벼에서 처음으로 시작되었으며, 저개발 국가들에서 빈곤층의 비타민 A 결핍 문제를 해소하기 위해서 세균(*Erwiniauredovora*) 유래인

carotene desaturase (*CrtI*) 유전자와 수산화 유래인 phytoene synthase (*Psy*) 유전자를 형질전환하여 벼 종자에서 베타카로틴 함량을 증가된 GM벼(Golden Rice)가 세계 최초로 개발되었으며(Ye et al. 2000), 한국에서도 녹광 고추(*Capsicum annuum* cv. Nockwang)의 카로티노이드대사관련 *Psy* 유전자와 *CrtI* 유전자를 낙동벼에 형질전환하여 베타카로틴 함량을 증진된 베타카로틴 생합성벼(비타민A 강화벼)가 개발되었다(Ha et al. 2010).

근래에 국내 재배콩 품종인 광안(*Glycine max* L. cv. Gwangan)콩에 카로티노이드 생합성 유전자인 *Psy*와 *CrtI* 유전자를 형질전환하였으며, 또한, 종자 특이적 β -conglycinin 프로모터로 발현 유도해 카로티노이드 함량이 광안콩 대비 약 62배 증진된 비타민 A 강화콩이 개발되었다(Kim et al. 2012). 현재 국내에서는 상업적 목적으로 GM작물이 재배되고 있지 않지만, 작물 재배 안정성 증대하고, 고부가가치의 기능성 농산물 생산으로 농산물 수요 시장의 다변화 요구 등으로 GM작물의 다양화와 연구 개발 건수가 증가하고 있는 만큼 개발된 GM작물의 실용화를 위해서는 작물 재배 환경 수준에서 환경위해성 평가에 대한 필요성이 요구된다(Dunwell 1999, Oh et al. 2017).

GM작물 재배와 관련되어 사용되는 농약과 같은 화학물질의 환경적 영향과 식물이 부패할 때 작물내에서 생성되는 독소 또는 기타 화학물질의 영향을 제외하고 GM작물의 환경위해성 평가는 다음과 같은 요소들을 포함되어야 한다. 첫째, 잡초 또는 근연종으로의 유전자 이동, 두번째는 GM작물에서 같은 종의 non-GM작물로의 유전자 이동, 세번째로는 GM작물과 야생 또는 잡초간의 교배의 결과로 인한 슈퍼 잡초의 생성 가능성, 마지막으로 특정 GM작물에서 생성된 물질이 비표적생물종에 미치는 영향을 포함되어야 한다(Raven 2010). GM작물의 표적 생물종, 잡초 또는 해충에 미치는 영향을 고려한다면 생물다양성의 감소될 수 있으며, 이는 GM작물의 재배 효과로 볼 수 있다. 해충저항성 GM작물의 재배로 인해 지역 전체의 해충 억제 효과와 제초제 내성 GM작물의 관리 시스템에서 잡초와 잡초 종자의 발생 감소가 있는 반면에 non-GM작물 재배 시에 GM작물에 비해 일반 제초제와 살충제 사용량 증가로 인해 생물다양성의 감소가 발생된다는 보고도 있다(Carpenter 2011). 해충저항성 옥수수 MON810의 Cry1Ab 단백질과 MON810 작물에 대한 나비목의 표적 해충을 제외한 물벼룩(*Daphnia magna*)과 Trichoptera 유충 등 32개의 비표적 절지동물에 영향 분석을 수행하였고, 이 결과들은 여러나라 GM작물 정책 결정에 영향을 미치고 있다. 그러나, 아직까지 GM작물 재배로 인해 생물다양성과 일반적인 환경에 위협적인 경우가 없었으며, 일반적인 농작물에 다량의 화학물질 사용하는

기존의 농업 시스템에 의한 환경 피해가 더 크다고 보고된 바 있다(Raven 2010, Romeis et al. 2013).

국내 개발된 GM벼의 환경위해성 평가는 곤충상 비교와 해충 양상, 비표적생물종 평가 등에 대한 보고들은 있으나(Kim et al. 2010, Oh et al. 2011, Oh et al. 2012, Oh et al. 2014, Choi et al. 2015), 국내 개발된 GM콩은 환경위해성 평가는 2011년 시작되어 비타민E 강화콩의 기능 검정과 토양미생물 위해성 검정에 대한 보고가 있으나(Lee et al. 2011a, Lee et al. 2011b), 아직 그 결과가 미비하며, 최근에 비타민E 강화콩과 모품종인 Willams 82의 LMO 포장에서 곤충 변화 양상을 비교 분석한 결과가 보고되었으나(Oh et al. 2017), 아직 국내 콩품종과 GM콩의 재배에 의한 곤충상 조사 분석 결과는 아직 보고 된바 없다. 이에 본 연구에서는 국내 품종인 광안콩이 모품종인 GM콩이 재배 환경에서 노린재를 포함한 해충 및 거미와 같은 천적 등에 미치는 영향을 평가하기 위해, 비타민A 강화콩과 모본인 광안콩을 재배한 LMO 격리포장에서 곤충 변화 양상을 비교 분석하였으며, 국내 연구 개발 중인 GM콩의 환경위해성 평가를 위한 기초 자료로 활용하고자 본 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

본 연구의 시험재료인 비타민A 강화콩과 모품종인 광안콩을 경북대학교 군위 LMO 격리포장(경북 군위군, RDA-가 A-2015-049)과 국립농업과학원 전주 LMO 격리포장(전북 전주 시, RDA-가AB-2013-041)에서 3반복 배치하여 재배하였다. 재배방법은 농촌진흥청의 농사시험 표준재배법을 기준으로 하였으며, 공시계통인 비타민A 강화콩과 광안콩의 종자를 500립씩 50공 트레이에 6월 15일에 파종한 후 7월 3일에 LMO 격리포장에 정식하였다.

콩 재배지의 곤충 조사는 비타민A 강화콩과 광안콩을 대상으로 국립농업과학원 전주 LMO 격리포장에서는 광안콩 품종의 성장기(2018년 8월 10일)부터 수확 직전(2018년 10월 7일)까지 2주 간격으로 총 5회에 걸쳐 실시하였으며, 군위 LMO 격리포장에서는 2018년 8월 16일부터 2018년 10월 12일까지 2주 간격으로 총 5회에 걸쳐 실시하였다. 곤충 채집은 각 품종별 3반복으로 수행하였고, 비타민A 강화콩과 광안콩간의 해충과 천적, 일반 곤충을 대상으로 기능군별 발생 양상을 분석하였다. 각 조사 구역별 채집조사는 실험구내의 황색 끈끈이 트랩(Yellow sticky trap, 350 × 250 cm, Greenagrotech, Gyeongsan, 한국)을 이용하여 각 실험구의 1반복당 1개씩을 곤충상 조사 작물인 콩보다

30 cm 높이에 설치하여 2주간 곤충을 포집한 후, 각 채집된 실험구별로 황색끈끈이 트랩을 지퍼팩에 담아 에틸 아세테이트(Ethyl Acetate)를 이용하여 살충 처리하였다.

채집된 곤충들은 해충군과 천적곤충군(거미 포함)을 제외한 곤충들은 기타 곤충군으로 분류 선정하였으며(Choi et al. 2015), 분류된 곤충들은 과(family) 수준에서 동정 계수하였다.

비타민A 강화콩과 광안콩의 각 품종별로 3반복씩 채집된 곤충 조사 분석 결과에 대한 통계적 분석은 SPSS (23.0.0 for Windows, Rel.23.0, 2015. Chicago: SPSS Inc.)를 이용하여 $p < 0.05$ 수준으로 ANOVA와 Duncan test로 평균간의 유의성 여부를 검정하였고, 실험구별 채집된 곤충에 대하여 균등도 지수(evenness index, Pielou index) (Pielou 1975), 풍부도 지수(richness index, Margalef species richness index) (Margalef 1958), 우점도 지수(dominance index, McNaughton's dominance index) (McNaughton 1967) 및 다양도 지수(diversity index, Shannon-Weaver diversity index)를 계산하였다(Pielou 1969, Choi et al. 2015). 조사 품종에 따른 조사지역별 곤충 발생의 유사성을 분석하기 위하여 SPSS version 25을 사용하여 다차원 척도분석법(multidimensional scaling, MDS)을 실시하였다. MDS 분석은 Table 1의 자료를 표준화하여 PROXSCAL을 이용하여 유클리디안 유사도로 지각도를 작성하여 분석하였다. 또한, 곤충상 분석을 다각화하기 위하여 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA)과 직교부분 최소 자승 판별분석(Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis, OPLS-DA)을 수행하고 score plot 및 VIP (Variable Importance in the Prediction) score를 분석하였다(SIMCA-P version 12.0; Umetrics, Umeå, Sweden).

결과 및 고찰

국내 개발된 GM콩의 환경위해성 평가 연구를 위해서 비타민A 강화콩(1208-3-30)과 모품종인 광안콩을 재배한 군위와 전주 LMO 격리포장에서 총 5회에 걸쳐 채집한 해충, 천적 및 기타 곤충의 기능군별 발생량을 비교 분석을 수행하였다. 조사기간 동안 12목 65과 93,419개체의 곤충류와 거미류가 채집되었으며, 기능군별로는 해충류 23과, 천적류 17과, 기타 곤충류 27과가 채집되었다. 품종별로 비타민A 강화콩 재배지에서 45,731개체, 모품종인 광안콩 재배지는 47,688개체가 채집되었다. 지역별로는 군위에서는 총 34,737개체, 전주에서는 총 58,682 개체가 채집되었다(Table 1).

Table 1. Total sum number of common plant dwelling insects and arachnids captured using yellow sticky trap at fields planted with two different genotypes of soybean at Gunwi and Jeonju, Korea in 2018.

Category	Order	Family	Gunwi		Jeonju	
			Vitamin A enhanced soybean ^z	Gwangan ^y	Vitamin A enhanced soybean	Gwangan
Insect pests	Orthoptera	Tettigoniidae	0	1	0	0
		Acrididae	3	3	0	0
	Thysanoptera	Thripidae	10,508	10,734	9,221	10,858
	Hemiptera	Miridae	22	21	126	113
		Berytidae	3	6	45	29
		Lygaeidae	165	190	210	200
		Coreidae	0	1	1	1
	Homoptera	Alydidae	34	27	19	28
		Rhopalidae	0	2	0	1
		Pentatomidae	9	17	6	8
		Cicadellidae	162	170	279	318
		Ricaniidae	6	5	1	3
		Flatidae	0	0	0	1
		Aleyrodidae	1,053	1,033	2,203	2,306
		Chrysomelidae	130	161	75	66
	Coleoptera	Apionidae	3	4	0	0
		Curculionidae	124	66	4	3
		Platystomatidae	1	1	0	2
	Diptera	Agromyzidae	173	163	91	106
		Tortricidae	13	8	5	4
	Lepidoptera	Crambidae	2	3	4	2
		Geometridae	0	0	1	1
		Noctuidae	26	75	5	5
	Subtotal		12,437	12,691	12,296	14,055
Natural enemies	Odonata	Coenagrionidae	2	0	1	1
	Hemiptera	Nabidae	1	0	0	0
		Anthocoridae	122	149	126	120
	Neuroptera	Chrysopidae	6	2	25	33
	Coleoptera	Coccinellidae	44	47	12	13
		Staphylinidae	23	19	3	3
	Hymenoptera	Braconidae	205	176	3	5
		Ichneumonidae	17	11	78	107
		Chalcididae	5	14	16	7
		Scelionidae	107	138	0	0
	Araneae	Eulophidae	1,138	1,278	8,208	8,314
		Tetragnathidae	44	39	30	32
		Thomisidae	0	0	12	15
		Theridiidae	17	19	3	3
		Salticidae	4	4	11	5
		Clubionidae	0	2	0	0
		Araneidae	0	0	0	2
	Subtotal		1,735	1,898	8,528	8,660

Table 1. Continued.

Category	Order	Family	Gunwi		Jeonju	
			Vitamin A enhanced soybean ^z	Gwangan ^y	Vitamin A enhanced soybean	Gwangan
Other insects	Psocoptera	Psocidae	9	5	2	0
	Hemiptera	Miridae	52	28	1	0
		Lygaeidae	1	1	1	0
		Tingidae	2	3	2	2
	Homoptera	Membracidae	0	1	0	0
		Delphacidae	88	127	11	16
		Cicadellidae	337	254	1,946	2,280
		Psyllidae	130	74	0	0
	Coleoptera	Elateridae	4	5	0	0
		Latridiidae	134	133	204	220
		Phylliidae	43	28	9	16
	Diptera	Stratiomyidae	2	1	0	0
		Empididae	3	1	38	41
		Dolichopodidae	35	51	10	2
		Syrphidae	17	30	3	3
		Tabanidae	0	0	1	1
		Sciomyzidae	8	45	33	32
		Lauxaniidae	34	34	0	0
		Chloropidae	1,170	1,050	25	47
		Ephydriidae	65	77	36	53
		Anthomyiidae	23	25	3	3
		Muscidae	91	112	22	24
		Calliphoridae	14	13	0	0
		Sarcophagidae	86	32	17	19
		Psychodidae	447	785	5,430	4,583
		Tachinidae	137	116	0	0
	Hymenoptera	Vespididae	6	7	3	4
	Subtotal		2,938	3,038	7,797	7,346
	Total		17,110	17,627	28,621	30,061

^zVitamin A enhanced soybean, Vitamin A enhanced transgenic soybean^yGwangan, parent cultivar.

총 5회의 조사 기간 동안 채집된 곤충 및 거미 개체들은 기능군 별로 해충군(Insect pests), 천적군(Natural enemies), 기타 곤충군(Other insects)으로 크게 구분하였으며, 채집된 전체 개체에서 기능군별 비중은 해충 55.3%, 천적 22.3%, 기타곤충 22.4%로, 조사기간 동안에 해충의 발생밀도가 매우 높았다. 해충으로는 꽃노랑총채벌레(*Frankliniella occidentalis*)와 대만총채벌레(*Frankliniella intonsa*)의 총채벌레류와 가루이(*Trialeurodes vaporariorum*)와 막대애매미충(*Empoasca rybiogon*) 등의 매미충류의 발생량이 매우 높게 나타났으며, 특히 총채벌레류는 조사된 전체 개체의 44.2%를 차지하는 높은 발생을 보였다. 천적으로는 쯤벌과(Eulophidae), 고치벌(Braconidae) 등의 기생성 곤충류와

애꽃노린재(*Orius sauteri*) 등의 포식성 곤충 및 거미류(Araneae)가 조사되었으며, 이 중에 벌류의 밀도가 높았다. 기타 곤충에서는 나방파리과(Psychodidae), 노랑굴파리과(Chloropidae) 등 파리류(Diptera)과 매미충과(Cicadellidae) 등의 매미류 곤충이 대부분을 차지하였다(Fig. 1).

비타민A 강화콩 재배에 의한 기능군별 곤충 발생 양상 비교를 위하여 조사기간 동안 해충, 천적, 기타 곤충군으로 구분하여 곤충 발생 양상에 미치는 영향을 분석하였다. 전주와 군위 LMO 격리포장별로 해충군, 천적군 및 기타 곤충의 개체군 밀도는 비타민A 강화콩과 광안콩의 재배지에서는 비슷한 수준으로 발생하였으나, 전주와 군위 LMO 격리포장간의 지역 발생량에

Fig. 1. Occurrences of common plant dwelling non-target insects and arachnids captured using vacuum suction on two different genotypes of soybeans at Gunwi and Jeonju, Korea in 2018.

Fig. 2. Average population densities of non-target insects and arachnids in common plant dwelling non-target insect and arachnid groups captured using yellow sticky trap at fields planted with two different genotypes of soybeans at Gunwi (filling) and Jeonju (oblique line), Korea in 2018. Vitamin A enhanced soybean, Vitamin A enhanced transgenic soybean; Gwangan, parent cultivar. Duncan's Multiple Range Test at $p < 0.05$.

Fig. 3. Average population densities of non-target insect pests in common plant dwelling non-target insect groups captured using yellow sticky trap at fields planted with two different genotypes of soybeans at Gunwi (filling) and Jeonju (oblique line), Korea in 2018. Vitamin A enhanced soybean, Vitamin A enhanced transgenic soybean; Gwangan, parent cultivar. Duncan's Multiple Range Test at $p < 0.05$.

천적류의 발생은 총 6목 17과였으며, 벌목(Hymenoptera) 95.23%으로 우점하였고, 노린재목(Hemiptera) 2.49%, 거미류(Arachnida) 1.16%, 딱정벌레목(Coleoptera) 0.79%, 풀잠자리목(Neuroptera) 0.32%, 잠자리목(Odonata) 0.02%의 비율로 조사되었다. 비타민A 강화콩과 광안콩의 재배 품종과 지역 간의 잠자리목, 노린재목, 거미류에서는 통계적 유의성은 없었다. 딱정벌레목, 벌목에서는 비타민A 강화콩과 광안콩 간의 품종간의 차이는 없었으나, 전주와 군위의 재배 지역간의 통계적으로 유의차가 있었다. 또한, 풀잠자리목에서는 지역과 품종간의 통계적인 유의차를 보였다(Fig. 4).

해충과 천적류를 제외한 기타 곤충류의 발생 조사 결과, 총 6목 27과의 곤충이 채집되었으며, 파리목(Diptera)이 70.69%, 매미목(Homoptera) 24.93%로 대다수를 차지하였고, 딱정벌레목(Coleoptera) 3.77%, 노린재목(Hemiptera) 0.44%, 벌목

(Hymenoptera) 0.09%, 다듬이벌레목(Pscoptera) 0.08%로 조사되었다. 비타민A 강화콩과 광안콩의 재배 품종과 지역 간의 다듬이벌레목, 딱정벌레목, 벌목에서는 통계적 유의성은 없었다. 파리목과 매미목에서는 비타민A 강화콩과 광안콩 간의 품종간의 차이는 없었으나, 전주와 군위의 재배 지역간의 통계적으로 유의차를 보였다. 또한, 벌목에서는 군위 지역에서 품종간의 통계적인 유의차를 보였으나, 전주지역에서는 품종간의 통계적인 유의차가 없었다(Fig. 5). 전체적으로, 비타민A 강화콩과 모품종인 광안콩간의 해충군, 천적군, 기타 곤충군의 발생 밀도에서 지역간의 차이를 보였으나, 품종간의 통계적인 유의차를 보이지 않았다. 이는 비타민A 강화콩이 모품종과 비교하여 포집된 곤충의 기능군별 발생에 특이적인 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

황색 끈끈이 트랩에 포집된 곤충상의 군집 분석을 전체 채집된 곤충의 과 수준에서 우점도 지수를 분석한 결과는 최소

Fig. 4. Average population densities of natural enemies in common plant dwelling non-target insect and arachnid groups captured using yellow sticky trap at fields planted with two different genotypes of soybeans at Gunwi (filling) and Jeonju (oblique line), Korea in 2018. Vitamin A enhanced soybean, Vitamin A enhanced transgenic soybean; Gwangan, parent cultivar. Duncan's Multiple Range Test at $p < 0.05$.

Fig. 5. Average population densities of the other insects in common plant dwelling non-target insect groups captured using yellow sticky trap at fields planted with two different genotypes of soybeans at Gunwi (filling) and Jeonju (oblique line), Korea in 2018. Vitamin A enhanced soybean, Vitamin A enhanced transgenic soybean; Gwangan, parent cultivar. Duncan's Multiple Range Test at $p < 0.05$.

0.524에서 최대 0.741로 매우 높았는데 이는 꽃노랑총채벌레 (*Frankliniella occidentalis*)와 대만총채벌레(*Frankliniella intonsa*)이 포함된 총채벌레목(Thripidae)의 개체수가 다른 과에 비해 많이 채집되었기 때문이었다. 다양도 지수는 각 콩 재배 포장에서 1.71~1.75의 값으로 품종과 지역간 유의성은 없었으며, 이 결과는 군집의 다양도가 다소 떨어지는 결과로 우점도 지수와 비교해보면 대체적으로 일부 종의 포집된 개체수가 매우 높았음을 알 수 있다. 습지 지역처럼 종 다양도가 풍부한 지역에서 곤충 군집의 다양도가 약 2.7~4.0 정도로 나오는 것에 비하면 낮은 값이 나왔는데, 이는 콩 재배 지역인 밭에서 단일 작물 재배에 따른 특징임을 알 수 있었다. 풍부도 지수는 콩 비타민A 강화콩과 광안콩의 군위 포장에서 각각 5.71, 5.76를 보여 전주 포장의 비타민A 강화콩 포장(4.41), 광안콩 포장 4.46보다 조금 높게 나타났으나, 지역간의 통계적인 유의성을 보였으나, 품종간의 유의차는 보이지 않았다. 또한, 콩 재배포장의 높은 우점도 지수에 비해 다양도 지수와 균등도 지수(0.45 - 0.46)가 낮은 것을 통해 전체적으로 일부 종의 포집 개체수가 매우 높았음을 알 수 있었다. 이는 재배한 콩의 품종과는 상관없이 전주와 군위 LMO 격리 포장의 지리생태적 특성과 상관 관계가 있을 것으로 추정되며, 포집된 곤충 중 개체의 다양도가 다소 낮고, 일부 특정 곤충종이 많이 채집되는 등의 단일 작물의 경작지에서 나타나는 재배지 중 다양도 특성을 본 연구에서도 확인되었다 (Fig. 6). 이는 Choi et al. (2015)에 의해 보고된 GM벼 재배 포장에서 발생하는 곤충 다양성의 결과와 유사하였다(Choi et al. 2015). Paik et al. (2007)이 보고한 호남지역 콩 재배지의 주요 해충 및 천적류에 대해 조사 결과에서, 비록 LM 작물평가 연구 및 실험 방법상의 차이가 있지만, 주요 해충의 발생 밀도에 서 본 연구와 비슷한 결과를 보였다. 또한, Back et al. (2010)이

보고한 제초제 저항성 콩 재배지의 주요 해충에 대한 연구에서도 유사한 결과를 보였다(Paik et al. 2007, Back et al. 2010).

비타민A 강화콩과 광안콩의 재배 포장에서 총 5회에 걸쳐 채집한 곤충들이 재배된 GM/non-GM콩의 형질에 따라 곤충상 변이를 보이는지 확인을 위한, 조사 품종에 따른 조사 지역별 비표적 곤충 발생의 유사성을 분석하기 위하여 SPSS version 25을 사용하여 다차원척도분석법(multidimensional scaling: MDS)을 실시하였다. MDS분석은 Table 1에서 해충은 종 수준에서 동정한 자료를 표준화하여 PROXSCAL을 이용하여 유클리디안 유사도로 지각도를 작성하여 분석하였다. PROXSCAL MDS를 분석한 결과 Kruskal의 스트레스 값은 0.02597로 기준치에 비교해볼 때 적합도는 좋은 수준이었으며, Turcker의 적합계수는 0.99966으로서 모형의 설명력이 매우 높았다. 지각도에 나타난 지역별의 비타민A 강화콩과 광안콩에서의 비표적 곤충류의 발생은 각 지역내에서 가까운 것으로 나타났으나, 동일 품종에서의 지역별에서는 유사도가 먼 것으로 나타났다. 따라서 조사 지역별로 비타민A 강화콩과 광안콩에서 곤충 발생양상의 차이는 있었으나, 동일지역에서는 차이가 없는 것으로 분석되었다(Fig. 7).

또한, 재배 지역에 따라 발생 양상에 비교적 변화를 크게 보인 곤충이 무엇인지 알아보기 위하여, 다변량분석법 중 OPLS-DA 분석을 수행하였다. 이 분석법은 변수별로 그룹을 지정하여 실험군간 차이를 가장 많이 보이는 변수를 찾도록 하는 회귀분석법 중에 하나로 데이터의 시각화를 극대화하여 실험군간 판별에 기여하는 변수를 탐색하는 연구에 활용되고 있다(Leem 2016, Lee et al. 2017). 다변량분석을 위해 모든 변수는 단위 분산 방식으로 표준화하였으며, 변수에 그룹을 지정하기 전에 곤충상 데이터의 변이성을 1차적으로 확인하기 위하여 총 65과의 곤충상 데이터에 대해 주성분 분석을 수행하여

Fig. 6. Analysis of insect diversity in common plant dwelling non-target insects and arachnids captured using yellow sticky trap at fields planted with two different genotypes of soybeans at Gunwi (filling) and Jeonju (oblique line), Korea in 2018. Vitamin A enhanced soybean, Vitamin A enhanced transgenic soybean; Gwangan, parent cultivar. Duncan's Multiple Range Test at $p < 0.05$.

Fig. 7. Proxscal multidimensional scaling ordination with common plant dwelling non-target insects and arachnids captured using yellow sticky trap at fields planted with two different genotypes of soybeans at Gunwi and Jeonju, Korea in 2018. Vitamin A enhanced soybean, Vitamin A enhanced transgenic soybean; Gwangan, parent cultivar. Stress-1=0.02597, Turcker's coefficient of congruence=0.99966.

얻은 score plot을 PCA 분석을 먼저 수행하였다. 예상대로, PCA 분석결과는 MDS 분석결과와 일치되게 유전자재조합에 의한 곤충상의 변화는 없었으며, 재배 지역에 따른 곤충상 차이가 확연하게 나타났다(Fig. 8A). 이러한 재배지의 자연 환경에 의해 영향을 크게 받은 곤충이 무엇인지 알아보기 위해 곤충상의 변수를 지역별로 그룹을 지정하고 OPLS-DA를 수행한 후 VIP score를 분석한 결과(Fig. 8B), 1.0 이상의 유의성을 갖는 변수 38개를 확인할 수 있었고 그 중 상위 10개의 변수를 Fig. 8C에 나타내었다. 재배 지역에 따라 발생에 차이를 가장 크게 보인 10개의 곤충들 중에 기타 곤충군에서는 Lauxaniidae (큰날개파리과), Psychodidae (나방파리과), Chloropidae (노랑굴파리과), Empididae (참파리과), Cicadellidae (매미충과)가 포함된 5개로 가장 많았으며 천적곤충군에서는 Scelionidae (검정알벌과), Braconidae (고치벌과), Coccinellidae (무당벌레과)의 3개, 해충군은 Aleyrodidae (가루이과)의 *Trialeurodes vaporariorum* (가루이), Apionidae (창주둥이바구미)의 *Pseudopiezotrachelus collare* (목창주둥이바구미)가 포함되어 2개로 나타났다. 즉, 재배 지역별로 다양한 곤충군이 발생의 차이를 보였으며, 특히 기타 곤충군인 Lauxaniidae (큰날개파리과)와 Psychodidae (나방파리과)의 차이가 가장 큼을 확인할 수 있었다. 결과적으로, 재배한 콩의 품종보다는 지역에 따라 곤충 개체 밀도의 차이가 발생하며, 이것은 특이적인 곤충상의 변화에 따른 결과가 아니고

Fig. 8. Score plots of principal components 1 and 2 of the PCA (A) and OPLS-DA (B) results obtained from data on 84 insects collected at fields planted with two different genotypes (Vitamin A enhanced transgenic soybean, filled-symbol and Gwangan, empty-symbol) of soybean at two different regions (Gunwi, circle and Jeonju, diamond). (C) The top 10 insects and arachnids ranked by VIP value obtained from the OPLS-DA analysis.

재배 지역간의 지리생태적인 결과임을 확인하였다. 주성분 분석 결과, 카로티노이드 생합성 유전자인 *Psy*와 *CrtI* 유전자가 도입된 비타민A 강화콩이 모품종인 광안콩과 비교해 재배 포장 내의 곤충상에 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

1994년 미국에서 최초의 GM토마토가 시장에 출시된 이래, GMO 제품의 수와 범위가 꾸준히 증가되고 있으나, 아직까지

GMO에 대한 심각한 우려 또한 존재하며, 이러한 GMO의 잠재적 위해성 및 혜택 또는 이익을 중심으로 대립적인 논쟁이 제기되고 있다. 2000년에 채택된 GMO의 안전한 이동, 취급 및 이용을 규정한 국제협약인 카르타헤나의정서(Cartagena protocol on biosafety)에 따라 대한민국을 포함한 171개국에서 GMO 안전관리를 수행하고 있다(KBCBb 2019). 그러나, GMO 재배면적의 70% 이상을 점유하고 있는 미국, 캐나다, 아르헨티나, 호주 등은 카르타헤나의정서에 가입하고 있지 않다. 미국은 1986년에 발표된 생명공학기술 규제를 위한 협력체계(Coordinated framework for regulation of biotechnology)가 GMO 관리 기준의 바탕이며, 농부부(USDA), 식품의약청(FDA), 환경청(EPA)의 각 기관의 관리 감독 역할, 책임을 명확히 하고 있다. 유럽연합(EU)은 GMO에 대해 유럽의회, 각료이사회, 집행위원회, 회원국들이 지침과 규정에 따라 범 유럽차원에서 통합적으로 관리를 실시하고 있다. ‘유전자변형생물체의 의도적 환경방출에 대한 유럽 의회와 이사회의 지시 문서(지침 2001/18/EC)는 유럽 연합의 회원국 정부에 GMO를 방출하는 행위(시험재배 등)와 GMO를 포함하고 있는 제품의 시장출시 행위(재배, 수입, 변환)와 관련한 규정을 지시하고 있다. 대한민국도 카르타헤나의정서의 국내 이행을 위해 2000년 9월에 카르타헤나의정서에 서명을 하고, 2001년 3월 유전자변형생물체로 인한 국민들의 건강과 생물다양성의 보전 등을 위해 GMO의 수입, 수출, 연구개발 등을 관리 조정하는 법률인 ‘유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률(LMO법)’을 제정·공포하였으며, 2008년 1월 부터 카르타헤나의정서와 LMO법이 시행하고 있다(Lee 2017).

GM작물의 환경위해성 평가시에 생물종 다양성에 대한 평가가 필수적으로 수행되어야 한다. 이에 본 연구에서는 비타민A 강화콩의 재배에 따른 재배 포장 내의 곤충상 비교 분석을 수행하였지만, 향후 GM작물에 의한 장기적인 환경 영향 평가를 위해서는 다양한 재배품종들과 GM작물의 지역간·연차간 비교 분석할 필요성이 있다고 사료된다. 또한, GM작물이 수로, 하천, 노지 등의 환경에 비의도적인 환경 방출시에 물벼룩, 지렁이 등의 비표적 생물종에 대한 위해성 평가와 표준 가이드라인을 구축해야 할 것이다.

적 요

본 연구는 카로티노이드 생합성 유전자인 *Psy*와 *CrtI* 유전자를 종자에서 발현시켜 카로티노이드 함량을 증가시킨 비타민A 강화콩의 환경위해성 평가에 대한 방법과 표준지침서를 개발하

고자 수행하였다. 국립농업과학원 전주 LMO 격리포장과 경북대학교 군위 LMO 격리포장에서 비타민A 강화콩과 모품종인 광안콩을 재배하고, 성장기와 수확 직전까지의 기간 동안 황색 끈끈이 트랩으로 이용하여 거미류를 포함한 곤충류의 다양성을 조사하였다. 총 5회의 조사기간 동안 포집된 개체들은 기능별로 해충군, 천적군, 기타 곤충군으로 크게 구분하였으며, 총 12목 65과 93,419개체가 채집되었다. 조사된 개체군의 해충군, 천적군, 기타 곤충의 밀도는 비타민A 강화콩과 광안콩의 품종간에는 유사한 발생을 보였으나, 군위와 전주 LMO 격리포장에서 지역간의 통계적인 유의차가 나타났다. 군집분석결과에는 우점도, 다양도, 균등도 지수에서는 품종과 지역간 차이는 없었으나, 풍부도지수는 지역간의 통계적인 유의차를 보였다. 채집된 총 65과의 곤충상 데이터를 다차원척도분석과 주성분 분석을 한 결과, 비타민A 강화콩과 광안콩에서 곤충발생 양상의 차이는 있었으나, 동일지역에서는 차이가 없었으며, 이는 특이적인 곤충상의 변화에 따른 결과가 아니고 재배 지역의 차이에 의한 결과임을 확인하였다. 결과적으로, 카로티노이드 생합성 유전자인 *Psy*와 *CrtI* 유전자가 도입된 비타민A 강화콩의 재배 시에 해충 및 천적의 개체군 밀도와 발생양상은 모품종인 광안콩과의 차이가 없는 것으로 조사되었다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 차세대 바이오그린21사업(과제번호: PJ01368001, PJ01368003)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

REFERENCES

1. Back HJ, Shon SI, Cho MR, Lee GS, Oh YJ, Park JS, Lee KJ, Oh SD, Suh SC, Ryu TH. 2010. Development of protocol for analyzing pollinator insect-mediated gene transfer from GM crop. Korean J Intl Agric 22: 293-297.
2. Borror DJ, Triplehorn CA, Johnson NF. 1989. An introduction to the study of insects. Saunders College Publishing, Florida.
3. Carpenter JE. 2011. Impact of GM crops on biodiversity. GM Crops 2: 7-23.
4. Choi WS, Ahn SJ, Yoon JH, Kim HH, Jang JW, Park JJ. 2015. Comparing of insect fauna between transgenic rice and common rice cultivar based on light tap and sweeping methods. J Agric Life Sci 49: 1-17.

5. Dunwell JM. 1999. Transgenic crops: the next generation, or an example of 2020 vision. *Annals Botany* 84: 269-277.
6. Groombridge B. 1992. Global biodiversity. Status of the earth's living resources. Chapman and Hall, London.
7. Gullan PK, Cranston PS. 2005. The insect an outline of entomology. 519 pp. Blackwell Publishing Ltd. Oxford, UK.
8. Ha SH, Kim JB, Park JS, Lee SW, Cho KJ. 2007. A comparison of the carotenoid accumulation in *Capsicum* varieties that show different ripening colours: Deletion of the capsanthin-capsorubin synthase gene is not a prerequisite for the formation of a yellow pepper. *J Exp Bot* 58: 3135-3144.
9. Ha SH, Liang YS, Jung H, Ahn MJ, Suh SC, Kweon SJ, Kim DH, Kim YM, Kim JK. 2010. Application of two bicistronic systems involving 2A and IRES sequences to the biosynthesis of carotenoids in rice endosperm. *Plant Biotech J* 8: 928-938.
10. ISAAA (International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications). 2019. Global status of commercialized biotech/GM crops in 2018: Biotech crops continue to help meet the challenges of increased population and climate change. ISAAA Brief No. 54. ISAAA, Ithaca, NY, USA.
11. KBCH (Korea Biosafety Clearing House). 2018. Major statistics on genetically modified organisms in 2017. KBCH, Daejeon, Korea.
12. KBCH (Korea Biosafety Clearing House). 2019a. Major statistics on genetically modified organisms in 2018. KBCH, Daejeon, Korea.
13. KBCH (Korea Biosafety Clearing House). 2019b. Biosafety white paper 2019. KBCH, Daejeon, Korea.
14. Kim MJ, Kim JK, Kim HJ, Pak JH, Lee JH, Kim DH, Choi HK, Jung HW, Lee JD, Chung YS, Ha SH. 2012. Genetic modification of the soybean to enhance the β -carotene through seed-sepcific expression. *PLOS One* 7: e48287.
15. Kim KM, Ryu TH, Suh SJ. 2010. Studies on insect diversity related to genetically engineered vitamin A rice under large scale production. *Korean J Breed Sci* 42: 157-162.
16. KNPS (Korea National Park Service). 2006. The research of natural resources in Hallyeohaesang National Park, Korea National Park Service.
17. Kwon YH. 2008. An approach to introduce biodiversity components for the EIA system in Korea. *J Environ Policy* 7: 91-104.
18. Lee BK. 2017. A study on the establishment of isolation distances for environmental release of biotech crops. *Korean J Agric Sci* 44: 188-195.
19. Lee KJ, Yi BY, Kim KH, Kim JB, Suh SC, Woo HJ, Shin KS, Kweon SJ. 2011a. Development of efficient transformation protocol for soybean (*Glycine max* L.) and characterization of transgene expression after *Agrobacterium*-mediated gene transfer. *J Korean Soc Appl Biol Chem* 54: 37-45.
20. Lee KJ, Shon SI, Lee JY, Yi BY, Oh SD, Kweon SJ, Suh SC, Ryu TH, Kim KH, Park JS. 2011b. Effects of transgenic soybean cultivation on soil microbial community in the rhizosphere. *Korean J Environ Agric* 30: 466-472.
21. Lee W, Yeo Y, Oh S, Cho KS, Park YE, Park SK, Lee SM, Cho HS, Park SY. 2017. Compositional analyses of diverse phytochemicals and polar metabolites from different-colored potato (*Solanum tubersum* L.) tubers. *Food Sci Biotechnol* 26: 1379-1389.
22. Leem JY. 2016. Discrimination model of cultivation area of *Alismatis Rhizoma* using a GC-MS-based metabolomics approach. *J Pharm Soc Korea* 60: 29-35.
23. Lu BR. 2004. Conserving biodiversity of soybean gene pool in the biotechnology era. *Plant Species Biol* 19: 115-125.
24. Margalef DR. 1958. Information theory in ecology. *Gen Syst* 3: 36-71.
25. McNaughton SJ. 1967. Relationship among functional properties of California grassland. *Nature* 216: 168-169.
26. Mizuguti A, Ohigashi K, Yoshimura Y, Kaga A, Kuroda Y. 2010. Hybridization between GM soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) and wild soybean (*Glycine soja* Sieb. And Zucc.) under field conditions in Japan. *Environ Biosafety Res* 9: 13-23.
27. Oh SD, Lee KJ, Sohn SI, Kweon YJ, Kim JS, Lee JY, Park BS, Kweon SJ, Suh SC, Ryu TH, Park JS, Ahn BO, Cho HS, Suh SJ. 2012. Effect on insecticide susceptibility of *Lissorhoptrus oryzophilus* fed on *Bacillus thuringiensis* (Bt)-transgenic rice variety. *Korean J Intl Agric* 24: 247-253.
28. Oh SD, Kim JS, Lee KJ, Ryu TH, Suh SJ. 2014. Studies on insect diversity related to drought-tolerant transgenic (Agb0103) rice under large scale GMO field. *Korean J Breed Sci* 46: 136-142.
29. Oh SD, Shin HC, Sohn SI, Lee KJ, Kim HJ, Ryu TH, Lee JY, Park BS, Kweon SJ, Suh SC, Park JS. 2011. Evaluation and assessment of biosafety for *bacillus thuringiensis* (Bt)-transgenic rice: Responses of *Daphnia magna* fed on Bt-transgenic rice variety. *J Appl Biol Chem*

- 54: 296-302.
30. Oh SD, Suh SJ, Park SY, Lee KJ, Sohn SI, Yun DW, Chang AC. 2017. Effects of vitamin E enhanced transgenic soybean cultivation on insect diversity. *Korean J Breed Sci* 49: 129-140.
 31. Paik CH, Lee GH, Choi MY, Seo HY, Kim DH, Hwang CY, Kim SS. 2007. Status of the occurrence of insect pests and their natural enemies in soybean fields in Honam province. *Korean J Appl Entmol* 46: 275-280.
 32. Pielou CE. 1969. Shannon's formula as a measure of specific diversity, its use and misuse. *Amer Nat* 100: 463-465.
 33. Pielou CE. 1975. *Ecology diversity*. 165 pp. Wiley Publ. NY.
 34. Price PW. 1997. *Insect Ecology*, 3rd ed., John Wiley and Sons, New York.
 35. Raven PH. 2010. Does the use of transgenic plants diminish or promote biodiversity? *New Biotechnol* 27: 528-533.
 36. Romeis J, McLean MA, Shelton AM. 2013. When bad science makes good headlines: Bt maize and regulatory bans. *Nat Biotechnol* 31: 386-387.
 37. Stahl W, Sies H. 2003. Antioxidant activity of carotenoids. *Mol Aspects Med* 24: 345-351.
 38. Ye X, Al-Babili S, Kloti A, Zhang J, Lucca P, Beyer P, Potrykus I. 2000. Engineering the provitamin A (β -carotene) biosynthetic pathway. *Science* 287: 303-305.