

Review Article

아시아·태평양지역의 잡초연구 동향과 전망

이인용^{1*}, 김진원^{1*}, 김상수¹, 유홍재², 황인성², 이계환³, 조남규⁴, 이동국⁴, 황기환⁴, 원옥재⁵,
Weiqiang Jia⁵, 고영관⁶, 최정섭⁶, 염현석⁶, 박기웅^{5*}

¹국립농업과학원, ²성보화학(주), ³(주)경농, ⁴(주)목우연구소, ⁵충남대학교, ⁶한국화학연구원

Current Status and Perspectives of Weed Science in Asia-Pacific Area

In-Yong Lee^{1*}, Jin-Won Kim^{1*}, Sang-Su Kim¹, Hong-Jae Yoo², In-Seong Hwang², Kye-Hwan Lee³,
Nam-Gyu Cho⁴, Dong-Guk Lee⁴, Ki-Hwan Hwang⁴, Ok Jae Won⁵, Weiqiang Jia⁵, Young-Kwan Ko⁶,
Jung-Sup Choi⁶, Hyun-Suk Yeom⁶, and Kee Woong Park^{5*}

¹National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

²Sungbo Chemicals, Seoul 04526, Korea

³Central Research Institute, Kyung Nong Co., Gyeongju 38175, Korea

⁴Moghu Research Center, Daejeon 34115, Korea

⁵Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

⁶Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 34114, Korea



OPEN ACCESS

***Corresponding author:**

Phone. +82-63-238-3320

Fax. +82-63-238-3838

E-mail. leein Yong@korea.kr

Phone. +82-63-238-3321

Fax. +82-63-238-3838

E-mail. its001@korea.kr

Phone. +82-42-821-5726

Fax. +82-42-822-2631

E-mail. parkkw@cnu.ac.kr

Received: November 24, 2017

Revised: December 10, 2017

Accepted: December 12, 2017

© 2017 The Korean Society of Weed Science and
The Turfgrass Society of Korea.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

This paper provides the current status of weed science and prospects for the development of weed science based on the research trends presented at the 26th Asian · Pacific Weed Science Conference in 2017. Approximately 458 researchers from 25 countries, including Korea, participated in the conference and presented 325 papers in 20 research areas. Major research topics were herbicide resistance, herbicide use, herbicide development, weed ecology, allelopathy, weed management, and exotic weeds. Particularly, there were many presentations and interesting to researchers about the development and use of new herbicides, such as florpyauxifen-benzyl ester, triafamone, fenquinotrione, and tolypyralate. Development of new herbicide formulations and spray methods were suggested as a solution for the population decline in rural area and low labor quality especially in Asia and Pacific regions. In future weedy rice and exotic weeds will be a serious problem in this area so we need to cooperate to make good technical and practical solutions.

Keywords: Herbicide resistant weeds, Invasive alien species, Weedy rice

서론

한 지역의 잡초 및 제초제 연구동향은 그 지역을 대표하는 학회의 발표내용으로 확인할 수 있다. 이런 측면에서 아시아·태평양잡초학회(이하 아·태잡초학회) 발족 50주년을 맞아 일본 교토에서 개최된 제26차 아·태잡초학회에서 발표된 내용을 검토하여 아시아·태평양 지역의 잡초 및 제초제 연구 동향을 파악하고자 한다. 특히 이번 학회에서는 각국에서 해결해야 할 잡초문제를 발표하여 관심을 끌었다.

아·태잡초학회는 1957년 하와이에서 아시아·태평양지역의 잡초 및 제초제 연구를 위해 결성되었으며, 매 2년마다 개최되는데 우리나라도 1989년 서울에서 개최한 바 있다. 이번 아·태잡초학회는 ‘인간, 농업 그리고 자연을 위한 잡초과학(Weed science for people, agriculture, and nature)’이라는 주제로 Kyoto Research Park에서 한국, 중국,

Table 1. The number of papers by country presented at the 26th Asian · Pacific Weed Science of Society.

Nation	Keynote lecture	Special lecture	Oral session	Poster session	Total	Ratio (%)
Japan	3	-	20	60	83	25.5
India	1	-	30	13	44	13.5
China	-	-	17	26	43	13.2
Australia	2	-	14	6	22	6.8
Korea	1	-	1	14	16	4.9
Sri Lanka	-	-	8	6	14	4.3
U.S.A	2	2	7	3	14	4.3
Malaysia	-	-	10	3	13	4.0
Thailand	-	-	5	8	13	4.0
Turkey	-	-	4	7	11	3.4
Pakistan	-	-	6	1	7	2.2
Indonesia	-	-	5	1	6	1.8
Brazil	-	-	1	5	6	1.8
Taiwan	-	-	1	5	6	1.8
South Africa	-	-	3	1	4	1.2
Brunei	-	-	1	2	3	0.9
Singapore	-	-	2	1	3	0.9
Germany	-	-	3	-	3	0.9
Philippines	1	-	1	1	3	0.9
New Zealand	-	-	2	-	2	0.6
United Kingdom	1	-	1	-	2	0.6
Vietnam	-	-	2	-	2	0.6
Myanmar	-	-	-	1	1	0.3
Bangladesh	-	-	1	-	1	0.3
Iran	-	-	-	1	1	0.3
Israel	-	-	1	-	1	0.3
Nigeria	-	-	-	1	1	0.3
Egypt	-	-	-	1	1	0.3
Total	11	2	145	167	325	100

일본, 인도, 호주 등 25개국 458명이 참석한 가운데 개최되었다. 특히 이번 학회에서는 아시아·태평양지역의 잡초 연구자뿐 아니라 유럽(독일, 영국), 아프리카(남아공, 나이지리아 및 이집트), 남미(브라질)에서도 참석하였다.

이번 학회에서는 keynote lecture 11건, special lecture 2건, oral session 143건, poster session 167건으로 총 325건이 발표되었다(Table 1). 이는 2016년 6월 체코 프라하에서 개최된 세계잡초학회에서 발표된 652건(Lee et al., 2016)의 50% 수준이었으나, 2005년 베트남 호치민에서 개최된 제20차 아·태잡초학회에서 350여명 참석에 151편 발표(Lee et al., 2005), 2007년 스리랑카 콜롬보에서 개최된 제21차 아·태잡초학회에서 200여명 참석에 142편 발표(Lee et al., 2007), 2011년 호주 케언즈에서 개최된 제23차 아·태잡초학회에서 200여명 참석에 149편 발표(Lee et al., 2011)와 비교해보면 2배 수준의 규모였다.

Keynote lecture와 special lecture를 제외한 일반적인 발표자료(총 312건)를 보면, 구두발표 145건, 포스터발표 167건이었다. 분야별로는 제초제 저항성잡초와 관련된 발표가 53건으로 전체 발표의 17.0%를 차지하였으며, 제초제 이용 40건(12.8%), 새로운 제초제 개발 32건(10.3%), 잡초의 생리생태 30건(9.6%) 및 상호대립역제작용 27건(8.7%) 순이었다(Table 2). Oral session과 poster session에서 제초제 관련 연구를 합산하면 총 148건으로 전체 발표건의 47.4%를 차지하여 현재 아시아 지역에서 제초제 관련 분야를 가장 활발하게 연구하고 있다고 판단할 수 있다.

Table 2. The number of articles presented in the various sections at the 26th Asian · Pacific Weed Science of Society.

Research fields	Oral session	Poster session	Total	Ratio (%)
1. Aquatic weeds	9	2	11	3.5
2. Invasive alien species	6	16	22	7.1
3. Parasitic weeds	2	-	2	0.6
4. Weed biology & ecology	3	27	30	9.6
5. Utilization of weeds	2	1	3	1.0
6. Weedy rice	6	3	9	2.9
7. Herbicide tolerant crops	6	3	9	2.9
8. Biological control	12	2	14	4.5
9. Non-chemical control	6	9	15	4.8
10. Allelopathy	7	20	27	8.7
11. Weed management	13	10	23	7.4
12. Weed problem, constraint, and opportunity in different countries	11	5	16	5.1
13. Herbicide resistance (Status)	6	2	8	2.6
14. Herbicide resistance (Management)	6	9	15	4.8
15. Herbicide resistance (Target-site resistance)	6	9	15	4.8
16. Herbicide resistance (Non-target-site resistance)	6	6	15	4.8
17. Herbicide	19	13	32	10.3
18. Herbicide usage	19	21	40	12.8
19. New technology	-	3	3	1.0
20. Others	-	6	6	1.9
Total	145	167	312	100

아시아·태평양지역 각국의 잡초문제와 해결방안

50주년을 맞이한 이번 아·태잡초학회에서는 각국의 주요잡초와 문제점, 그리고 해결방안을 10개국에서 발표했는데, 우리나라와 영농형태가 유사한 중국과 일본의 발표내용을 소개하고자 한다.

중국 논에서는 피, 잡초성벼, 물달개비, 미국좁부처꽃 등이 문제이고, 밀밭에는 독새풀, 개밀, 냉이, 바랭이, 돌피, 왕바랭이 등이, 그리고 목화밭에는 자귀풀, 명아주, 바랭이 등이 문제초종으로 나타났다. 또한 최근 외래잡초가 농경지에 침입하여 새로운 문제를 야기하고 있으며 이들을 방제하기 위해 일부에서는 순환재배나 생물학적 방제법 사용을 시도하고 있었으나, 여전히 제초제의 사용이 중요한 잡초방제법으로 이용되고 있다. 중국에서는 제초제의 연용으로 그동안 30종의 잡초에서 47종의 제초제(11개의 제초제 작용점)에 저항성이 있는 것으로 확인되었다. 이러한 제초제 저항성 잡초를 방제하기 위한 일환으로 보존농업(conservative agriculture)과 통합적 잡초방제를 위한 제초제 저항성잡초관리(herbicide resistance weed management, HRWM)를 개발하여 사용하고 있다.

일본에서 최근 문제가 되고 있는 잡초는 sulfonylurea (SU)계 제초제 저항성 물달개비, 잡초성벼 그리고 가시박이었다. 일본의 제초제 저항성잡초는 한국보다 많은 38종으로 보고되고 있다. 일본의 최초 제초제 저항성 논잡초는 물옥잠으로, ALS (acetolactate synthase)를 저해하는 SU계 제초제에 저항성을 보여 1996년에 보고되었으며, 이후 21종의 SU계 저항성 논잡초가 보고되었다. Target-site resistance가 일반적이거나 벼풀과 피에서는 non-target site resistance의 사례가 보고되었다. 벼의 재배방식 변화로 잡초성벼가 발생하고 있지만, 그 기원은 명확히 밝혀지지 않았다. 가시박을 비롯한 100종 이상의 외래잡초가 발생하였는데, 수입 농작물에 섞여 유입되었을 것으로 추정되고 있다.

각국에서 문제되는 잡초를 해결하기 위해 도전할 분야는 ①새롭게 발생 확산되는 잡초의 기원을 밝히는 것 ②잡초의 지역별 근력과 연차별 변화를 확인하는 것 ③잡초오염과 인간활동의 상관관계를 파악하는 것 등으로 나타났으며, 고효율 저비용 및 생력화 잡초관리기술을 바탕으로 저항성잡초, 난방제잡초, 지구온난화 영향, 직파재배, 잡초성벼 등이 향후 도전할 연구과제로 방향을 제시하기도 하였다.

잡초연구 주요 분야별 연구동향

새로운 제초제 개발

신물질 제초제 연구와 관련된 구두발표는 총 16편이 발표되었으며, Dow Agro Sciences의 florypyrauxifen-benzyl ester (Rinskor™) 연구 4편, Bayer CropScience의 indaziflam과 triafamone 각각 3 및 2편이 발표되었고, Syngenta의

Table 3. The number of cited herbicides in presented articles at the 26th Asian·Pacific Weed Science Society Conference.

Company	Chemical (Trade name)	Mode of action ^z	No. of articles
Dow AgroSciences	Florpyrauxifen-benzyl ester (Rinskor TM)	Synthetic auxin	4
Bayer CropScience	Indaziflam	CBI	3
	Triafamone (Council®)	ALS	2
Syngenta	Pyriftalid+bensulfuron	ALS+ALS	1
Ishihara Sangyo Kaisha	Tolpyralate	4-HPPD	2
Kumiai Chemical	Fenquintotrione	4-HPPD	2
Mitsui Chemicals Agro.	Cyclopyrimorate	4-HPPD	1
Kyoyu Agri.	Pyraclonil	Prottox	1

^zCBI (Cellulose biosynthesis inhibitor), ALS (Acetolactate synthase), HPPD (4-Hydroxyphenylpyruvate dioxygenase), Prottox (Protoporphyrinogen oxidase).

pyriftalid와 bensulfuron 합제 1편, Ishihara Sangyo Kaisha의 tolypyralate와 Kumiai Chemical의 fenquinoatrione이 각각 2편, 그리고 Mitsui Chemical Agro.의 cyclopyrimorate와 Kyoyu Agri.의 pyraclonil이 각각 1편씩 발표되었다 (Table 3). 새롭게 개발된 제초제들의 특성을 보면 다음과 같다.

가. Florpyrauxifen-benzyl ester (Rinskor™)

Rinskor™는 Dow AgroSciences가 개발한 새로운 벼 제초제이며 유효성분은 florpyrauxifen-benzyl로 합성 옥신계 제초제이다(Fig. 1). Rinskor™는 화본과 작물에 선택성을 갖고 일년생 광엽잡초를 방제하며, 동사에서 개발한 Arylex™ (Halauxifen-methyl)의 후속으로 개발된 물질이다. 이번 학회에서 중국, 일본, 베트남, 태국, 말레이시아 및 인도네시아에서 실시한 약효/약해, 제형 및 합제 실험에 대한 연구 결과들이 발표되었다.

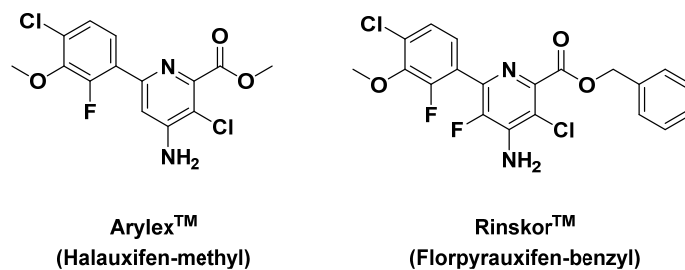


Fig. 1. Chemical structures of halauxifen-methyl and florpyrauxifen-benzyl.

베트남에서의 시험 결과, Rinskor™는 벼에 안전하며 낮은 약량에서 넓은 스펙트럼의 약효를 갖는다. 2016년 여름 대만, 베트남, 말레이시아 및 인도네시아의 56개 벼 직파포장에서 20-25 g a.i. ha⁻¹ 약량으로 파종 후 10-16일에 처리한 결과, 피, 참방동사니 및 알방동사니가 90-95% 방제되었으며, 25-30 g a.i. ha⁻¹ 약량에서 바람하늘지기가 85-90% 방제되었고, 광엽잡초들은 5-10 g a.i. ha⁻¹ 약량에서 95-98% 방제되었다. 파종 후 10-16일에 20-25 g a.i. ha⁻¹ 약량으로 처리한 일부 처리구에서는 벼 생체중이 약 10% 감소되었지만 처리 후 7-14일에는 회복되었다. 또한 Rinskor™ 처리구에서 벼 수확량은 손제초와 무처리구에 비해 각각 7-16% 및 20-60% 이상 높았다.

일본에서 0.5% 입제와 2.7% 유제를 개발하여 담수직파, 건담직파 그리고 이앙벼에 모두 경엽처리가 가능하게 되었으며, 5엽기의 피와 5-6엽기의 SU 저항성 물옥잠 그리고 30 cm가 넘는 벚풀까지 25-50 g a.i. ha⁻¹ 약량에서 원제보다 높은 방제효과를 보인 반면 약해는 없었다. 대만에서는 새로운 합제 제형인 Rinskor™ Active+penoxsulam 3.41% 액상수화제(12.5+20 g a.i. ha⁻¹)를 개발하였다. 2015년과 2016년 대만에서 이앙 후 30일에 처리하였을 때 물피, 알방동사니, 올챙이고랭이, 매자기, 좁부처꽃이 91-99% 방제되었고 벼에 대한 약해는 없었다. 중국 장수의 온실에서는 피 5종(*Echinochloa crus-galli*, *E. crus-galli* var. *zelanensis*, *E. crus-galli* var. *mitis*, *E. colona* 및 *E. glabrescens*)과 화본과잡초 3종(*Leptochloa chinensis*, *L. panacea* 및 *Eragrostis japonica*)을 대상으로 실험한 결과, 각시그령(*Eragrostis japonica*)을 제외하고 피속류와 화본과잡초에 대해 탁월한 방제효과를 보였다.

나. Indaziflam

Indaziflam의 구조는 PS II (Photosystem II) 저해제 triazine과 유사하다. 구조적 차이는 2, 6번 위치에 하나의 NH₂를 가지고 있으며 다른 질소에는 부피가 큰 치환기를 갖고 있다(Fig. 2). 이러한 점을 착안하여 구조 설계, 합성 및 활성시험을 통해 기존 물질 보다 우수한 물질을 발굴할 수 있을 거라는 기대를 할 수 있다. 이 제초제는 Bayer CropScience에서 개발된 cellulose 생합성 저해제이다. 토양처리제로써 EPSPS (5-Enolpyruvylshikimate-3-phosphate

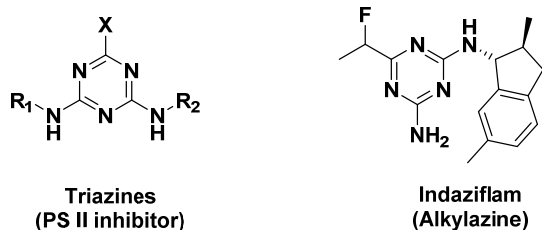


Fig. 2. Chemical structures of triazines and indaziflam.

synthase), ALS 그리고 PS II 저해제 저항성 화본과 및 광엽잡초를 방제하며, 특히 50-75 g a.i. ha⁻¹ 약량에서 열대 피, 바랭이, 유자초, 등골나물아제 등이 효과적으로 방제된다. 작물인 기름야자나무, 바나나, 고무나무, 감귤류, 커피, 차, 포도, 사과 그리고 배나무에 안전한 것으로 보고되었다.

일본에서는 잔디 제초제로 등록이 되었으며, 40-60 g a.i. ha⁻¹ 약량으로 토양처리시 화본과 및 광엽잡초가 방제된다. 그리고 Zoysiagrass 잔디에 대해 선택성이 높고, 특히 잔디 잡초인 새포아풀을 3엽기까지 방제한다. 말레이시아에서는 기름야자나무(oil palm)에 기준량의 4배(300 g a.i. ha⁻¹)까지 처리하여도 약해가 없고 생산성이 높게 나타나는 것으로 연구되었다.

다. Triafamone

Bayer CropScience가 개발한 새로운 sulfonamide 계열의 제초제이다. Sulfonamide 계열 화합물들은 대부분 sulfonyl group에 aromatic을 도입한 구조이다. 하지만, sulfonamide 계열 화합물 중 pyrimisulfan의 경우 sulfonyl group에 비교적 간단한 치환기가 있고 phenyl ring에 bulky group을 도입한 구조이다. 이러한 점으로 미루어 볼 때 triafamone는 pyrimisulfan의 구조 최적화를 통해 발굴된 화합물일 것으로 생각된다(Fig. 3 and 4).

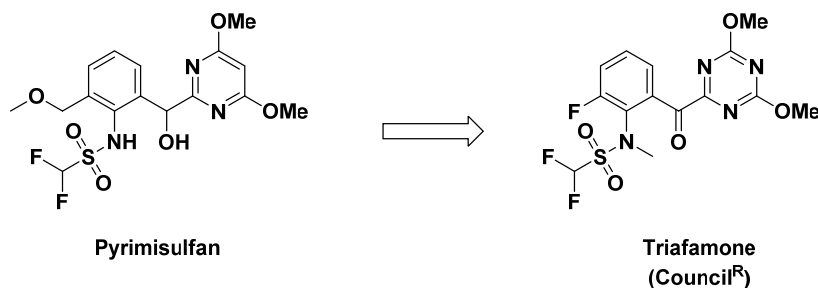


Fig. 3. Chemical structures of pyrimisulfan and triafamone.

Council Complete (triafamone+tefuryltrione)

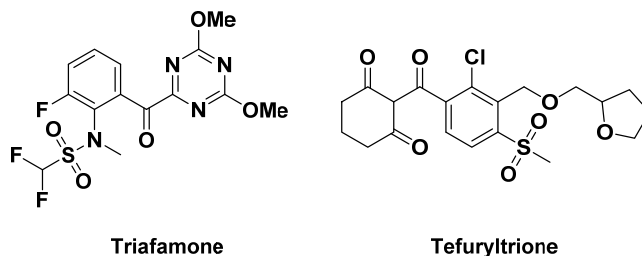


Fig. 4. Chemical structures of triafamone and tefuryltrione.

Triafamone (Council®)은 직파와 이앙벼에 적용 가능하며, 10-50 g a.i. ha⁻¹ 처리시 물피와 다년생 잡초가 방제된다. 아시아에서는 지역별로 여러 제형들이 개발되었는데 서아시아에서는 ethoxysulfuron과 합제의 입상수화제로 개발되어 물피, 물달개비, 스페노클레아속(*Sphenoclea* spp.), 바늘꽃속(*Ludwigia* spp.), 방동사니속(*Cyperus* spp.) 방제에 사용되었다. 그리고 동북아시아에서는 액상수화제와 입제로 tefuryltrion과 합제 처리되어 벼풀속(*Sagittaria* spp.), 바늘골속(*Eleocharis* spp.), 고랭이속(*Scirpus* spp.) 및 물참새피를 방제하는데 사용되고 있다. 일본에서는 triafamone과 tefuryltrion 입제(Council Complete)를 개발하여 난방제 잡초인 매자기와 수로에 발생하는 물참새피를 방제하였다.

라. Pyrifthalid+bensulfuron

Pyrifthalid+bensulfuron은 Syngenta에서 개발된 합제(Fig. 5)로써 벼 재배지에서 이앙 전 또는 이앙 후 3-5일 사이에 처리되었을 때 화분과, 사초과 및 광엽잡초에 높은 방제효과를 보였다. 또한 방제하기 어려운 드렁새에도 높은 약효를 나타냈다.

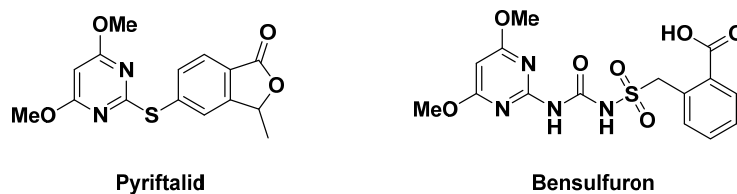


Fig. 5. Chemical structures of pyrifthalid and bensulfuron.

마. Tolpyralate

Tolpyralate는 Ishihara Sangyo Kaisha, Ltd.에서 개발된 HPPD (4-Hydroxy phenylpyruvate dioxygenase) 저해제이다(Fig. 6). 경엽처리 제초제로써 일년생잡초를 방제하며, 높은 옥수수 선택성을 보인다. 같은 작용기작을 갖는 옥수수 제초제인 mesotrione의 경우 다양한 환경조건(온도, 습도, pH, 경도)에 의해 약효가 영향을 받는 것으로 알려져 있는데, tolpyralate은 온도, 습도, pH, 경도의 약효변동에 큰 영향이 없는 것으로 보고되었다. Tolpyralate의 경우 일년생 잡초에 탁월한 방제효과가 있지만 나팔꽃, 닭의장풀 그리고 방동사니류에 대해서는 낮은 약효를 보였다. 이 단점을 해결하기 위하여 atrazin과 합제 처리로 해결하였으며, 옥수수에 대한 약해도 없는 것을 확인하였다.

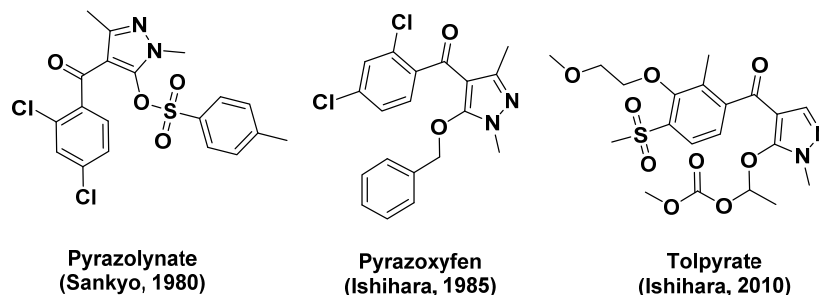
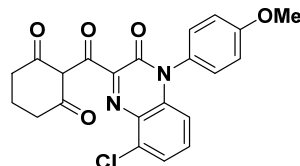


Fig. 6. Chemical structures of pyrazolynate, pyrazoxyfen and tolpyrate.

바. Fenquinoatrione

Fenquinoatrione은 Kumiai Chemical Industry Co.에서 개발된 HPPD 저해제이다. Triketone 계열 화합물은 대부분

cyclohexadione에 bicycle 구조를 도입하거나 triketone에 치환기를 도입한 phenyl이나 pyridinyl를 가지는 구조의 화합물이 대부분이었다. 하지만 fenquinotrione은 phenyl기가 치환된 quinoxaline을 갖는 새로운 구조의 화합물이다(Fig. 7). 벼 재배지에서 ALS 저항성 광엽잡초에 대해 높은 약효가 있어 300 g a.i. ha⁻¹ 약량으로 처리시 ALS 저항성 물달개비, 물옥잠, 벼풀 등의 일년생 및 다년생 저항성잡초가 방제된다. 환경안정성 평가를 위해 식물, 토양 그리고 동물대사 시험을 진행한 결과 안전한 것으로 확인되었다.



Fenquinotrione

Fig. 7. Chemical structures of fenquinotrione.

사. Cyclopyrimorate

Pyridazine 계열의 제초제는 credazine, pyridafol, pyridate가 있다(Fig. 8). 이 화합물들의 유도체를 합성 및 활성 시험을 통하여 key structure를 규명하고 이를 토대로 구조 최적화를 통해 발굴된 화합물이 cyclopyrimorate이다(Fig. 9). Cyclopyrimorate는 Mitsui Chemicals Agro.에서 개발된 새로운 벼 제초제이며, 벼 재배지에서 사초과와 ALS 저항성 광엽 잡초를 효과적으로 방제한다. 특히, HPPD 저해제인 pyrazolate와 합제 처리시 단제와 비교하여 4-5배 높은 상승효과를 보이는데, cyclopyrimorate와 pyrazolate 300+600 g a.i. ha⁻¹ 약량에서 물달개비, 발뚝외풀, 올챙이고랭이, 올미, 벼풀, 너도방동사니, 물고랭이가 탁월한 방제효과를 보이며, ALS 저항성 올챙이고랭이와 물고랭이를 효과적으로 방제하였다. 기준량의 2배량(600+1200 g a.i. ha⁻¹)에서는 이앙된 Japonica 벼에 대해서만 안전한 것으로 보고되었다.

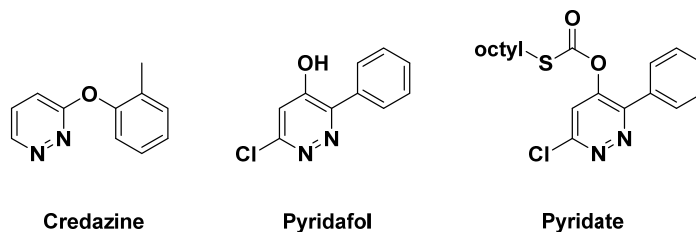


Fig. 8. Chemical structures of credazine, pyridafol, and pyridate.

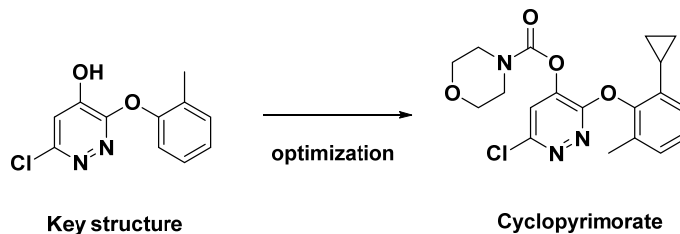


Fig. 9. Chemical structures of credazine, pyridafol, and pyridate.

아. Pyracolinil

Pyracolinil은 Kyoyu Agri Co.에서 개발된 PPO (Protoporphyrinogen Oxidase) 저해제이다. PS II 저해제로 알려져 있는 nitrile 계열 화합물은 phenyl ring에 nitrile이 있고 para 위치에 oxygen이 있으며, 3, 5번 위치에 할로젠 원소를 가지고 있는 구조이지만 pyracolinil은 보다 더 복잡한 구조로 pyrazole과 bulky group을 가지고 있는 구조적 특징이 있다(Fig. 10). 벼와 논피(강피)에 대한 선택성 실험 결과 50 g a.i. ha⁻¹ 처리시 약 32배의 높은 선택성이 있으며, 200 g a.i. ha⁻¹ 약량에서 ALS 저항성 일년생 및 다년생 광엽잡초(물달개비, 발뚝외풀, 논독외풀, 올미, 벼풀)를 효과적으로 방제한다. 또한 benzobicyclon과 합제 처리시 논피(강피)와 올챙이고랭이의 약효발현 속도가 빨라지며, 논피(강피)와 물달개비에 대한 약효가 증진된다.

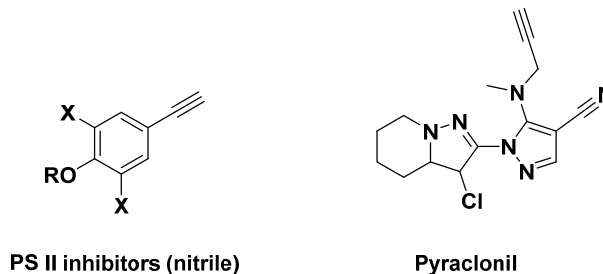


Fig. 10. Chemical structures of nitrile herbicides and pyracolinil.

일본에서의 논 제초제 발달 양상

우리나라와 논 제초제의 사용역사 및 패턴이 유사한 일본에서의 논 제초제 발달 양상 발표에 큰 인상을 받았다. 일본에서 논에 사용되는 제초제의 개발역사는 몇 가지 성분을 함유한 제품의 조합, 제형의 유용성 및 국가의 자연적, 사회적 조건 변화에 따라 변화될 수밖에 없는 생력화를 위한 처리방법으로 특징지을 수 있다. 일본의 논 면적은 전 국토의 4%를 점유하지만, 농업인구의 고령화와 좁은 경지면적 등이 문제되고 있다. 일본에서 사용되고 있는 논 제초제는 59성분 11그룹으로 나눈다. 혼합제의 경우 주로 SU계를 포함한 일발제초제로 1980년대부터 사초과, 광엽을 포함하는 일년생 및 다년생 잡초를 방제하는 주요수단으로 사용되어 왔다. 일발제초제는 최근 개발된 ALS, 4-HPPD, PPO 및 VLCFA (Very Long Chain Fatty Acids) 저해제와 같은 우수한 제초효과를 가진 물질을 사용하고, SU계 저항성 잡초에 효과적인 성분을 조합하여 개선되었다. 일발제초제의 개발로 농약사용량이 5 kg a.i. ha⁻¹ (1983)에서 2 kg a.i. ha⁻¹ (2013)으로 40% 감소하였으며, 처리시기가 4-6 엽기에서 2-3 엽기로 변화되었다. 제초제의 제제는 농민 편의를 위해 3 kg 입제, 1 kg 입제, 점보제, 액상수화제 등이 개발되었다. 처리방법도 이양동시처리, 관수시 입구처리, 무인헬기, 무인보트 등의 방법이 많이 활용화되었고, 그 결과 농민의 제초방법은 많이 개선되었다. 새로운 제초제 제형 개발은 농경지에 투입되는 제초성분을 감량시키면서 살포시간도 축소시켜 사회경제적인 효과를 얻었다. 따라서 우리나라의 논 제초제 개발과 처리방법 등은 일본과 시간적인 차이는 있겠지만 유사한 양상으로 진화될 것으로 판단되었다.

제초제 저항성잡초 현황 및 방제

제초제 저항성잡초의 발생은 제초제를 집약적으로 사용하는 국가 혹은 지역에서 나타나고 있다. 그동안 저항성 잡초가 문제가 되었던 일본이나 호주뿐만 아니라, 스리랑카, 파키스탄, 캄보디아, 라오스, 말레이시아 및 인도네시아와 같은 국가에서도 저항성잡초가 문제가 되고 있으며 이번 아·태잡초학회에서 많은 발표와 토론이 있었다.

국가나 재배방식에 상관없이 공통적으로 문제가 되는 초종으로는 피속류(*Echinochloa* spp.)와 드렁새(*Leptochloa chinensis*) 등이 있으며, 재배방식에 따라 잡초성벼(weedy rice)가 자주 언급되었다. 이들을 성공적으로 방제하기 위해 각국은 재배방식이나 현실에 적합한 각각의 해결책을 내놓고 있으나, 공통적으로 종합적 잡초관리(IWM, integrated weed management)를 제시했다. 특히 Singh 등(India)은 방법론적으로 '3R'을 주장했는데 3R이란 rotation of crop, rotation of culture, 및 rotation of herbicide을 의미한다.

종합적 잡초관리는 큰 틀에서 제초제 저항성잡초를 관리하는 방안으로 각각의 초종과 재배방식에 맞게 다양한 방법이 제시되었다. 제초제 저항성잡초 문제가 점점 심각해지고 그 범위가 확대될 것으로 예상되기 때문에, 종합적 잡초관리방법에 대한 연구는 지속되어야 한다고 많은 잡초학자들은 주장했다. 그러나 이번 학회기간에 호주의 Scholz 등은 종합적 잡초관리법을 사용하게 되면 제초제 저항성잡초를 방제할 수 있거나 발생을 늦출 수 있을 것이지만 실제 농민들은 사용을 기피한다고 주장했다. 가장 큰 이유로는 비용이 많이 든다는 것이고, 그 다음으로는 노동력이 많이 들고, 투입된 자원 대비 방제력이 뛰어나지 않다는 것이다. 즉, 아무리 과학적으로 효과가 입증되었다고 하더라도 경제적 이득이 있지 않다면 그 의미가 없다는 것이다. 따라서 국내에서도 제초제 저항성잡초의 종합적 방제체계를 연구할 때, 그 방법의 경제성이나 실 사용자인 농업인의 사용 편의성 등도 고려해야 할 것이다.

제초제 저항성 기작

제초제 저항성 기작 중 작용점 저항성(target site resistance, TSR)에 관한 구두 발표는 총 6편이었으며, 연구방법이나 새로운 변이를 보고하는 등 그 주제는 다양했다. 그 중에서도 교배를 통한 저항성의 stacking effect와 malachite green을 이용한 ACCase (acetyl-coenzymeA carboxylase) assay에 관한 발표들을 소개하고자 한다.

변이 유형이 다른 두 올챙이고랭이(*Schoenplectiella juncooides*; Syn. *Scirpus juncooides*)를 교배하여, 저항성의 유전양상을 확인하여 저항성 정도를 비교한 결과, 두 변이유형은 각각 독립적으로 유전하며, 두 변이유형이 동시에 존재하는 경우가 각각 독립적으로 존재할 때보다 저항성이 강한 것으로 나타났다. 교배가 매우 어려울 것이라고 여겨졌던 올챙이고랭이를 대상으로 위와 같은 실험을 진행하여 의미 있는 결과를 도출하였다.

기존의 ACCase assay법은 방사성 동위원소를 사용하거나 HPLC를 사용하는 복잡한 전처리과정을 거치는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 인산을 염색하여 간접적으로 ACCase의 활성을 측정하는 Malachite Green Phosphate Assay Kit를 이용한 새로운 Bio-Assay법이 개발되었다. 저항성과 감수성 쥐꼬리뚝새풀에 새로운 Bio-Assay법을 적용한 결과 육안으로 색의 변화를 명확히 확인할 수 있었으며, 저항성과 감수성의 IC₅₀ 값을 측정 한 결과 각각 38.5 uM과 0.5 uM으로 나타나 생물검정결과와 유사한 경향을 보였다. 이 방법을 벼와 옥수수, 밀 등 9종의 화본과 식물에 적용한 결과 위와 비슷한 결과를 얻었으며, 이를 바탕으로 대량의 샘플을 이용한 ACCase 저항성기작 연구에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

제26차 아·태잡초에서 비작용점 저항성(non-target site resistance, NTSR)에 관한 구두 발표는 총 6편이었다. 주로 중국과 일본에서 이 연구를 주도하고 있었으며, RNA sequencing 및 transformation 등 기존 저항성 연구 기법에 비해 비교적 새로운 실험적 기법을 동원하여 NTSR을 증명하였다. TSR과 달리 논의가 적었는데, 이는 NTSR을 증명하는 연구 기법 자체를 이해하는 사람이 적었으며, 그 실험 결과 또한 저항성의 일부를 설명할 수는 있으나 전체를 설명하기엔 부족하기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 NTSR로 인한 제초제 저항성 잡초가 전 세계적으로 문제가 되고 있으며 국내 저항성 피속류 또한 NTSR로 추정되는 바, 이에 대한 연구를 다양한 방법으로 시도해야 할 것으로 생각된다.

종합적으로 볼 때, 제초제 저항성잡초 연구는 크게 저항성잡초 발생 면적 및 관리기술과 저항성 기작연구로 나뉘었는데, 한국은 연구의 질적으로나 양적으로 모두 뒤쳐져 있다는 사실이다. 저항성잡초 문제는 특정 지역의 문

제나 특정 잡초의 문제가 아니라 세계 공통의 문제이며, 이를 해결하기 위해 국제적인 논의와 협력이 필요하다. 최신기술을 이용한 저항성 기작연구가 거의 보편화 되어 있으며, 국내에서도 이와 같은 접근이 매우 절실한 실정이다. 저항성 잡초방제를 위해 경종적 및 종합적 잡초방제법을 이용해야 한다는 국제적 흐름을 관찰할 수 있었으며, 이에 대한 중장기 계획이 필요하다.

Glyphosate 저항성

비선택성 제초제인 glyphosate의 경우 1996년 처음으로 저항성 rigid ryegrass가 호주에서 발견된 이후 현재 전 세계적으로 38개 초종에서 저항성 개체가 보고되고 있다(Heap, 2017). 우리나라의 경우 2015년 제주도의 감귤밭에서 발생한 망초가 glyphosate에 저항성인 첫번째 사례로 보고되고 있다(Bo et al., 2017). Glyphosate 저항성기작은 glyphosate의 작용점인 EPSPS의 점 돌연변이(target point mutation, TSM), glyphosate의 흡수·이행 및 대사, EPSPS 나 ABC transporter의 유전자 과다발현 등 다른 어떤 제초제 저항성 보다 다양하게 나타나고 있다(Bo et al., 2017). 알려진 EPSPS에서의 TSM은 Thr-102-Ile이나 Pro-106-Ser이 일반적이거나, 이번에 호주에서 발견된 glyphosate 저항성 *Tridax procumbens*에서는 102번째 아미노산이 serine으로 변이된 경우로 3-4배의 낮은 저항성 수준을 보여주고 있다.

벼나 밀 재배지에서 독 주변의 잡초를 방제하기 위해 glyphosate를 사용하는 경우가 많이 있다. 일본에서는 20년 이상의 지속적인 glyphosate 사용으로 저항성 *Lolium multiflorum* 개체가 문제되고 있으며 약량반응을 통한 실험에서 약 5배 정도의 저항성을 확인할 수 있었다. 위에서 보여준 EPSPS에서의 TSM은 관찰되지 않았으나 LC-MS/MS를 이용한 glyphosate의 흡수·이행 및 대사실험 결과 glyphosate의 흡수나 대사에서는 저항성과 감수성 간에 유의한 차이가 없었으며, glyphosate의 이행이 감수성보다 저항성 개체에서 제한되는 것으로 나타났다.

호주에서는 장기간의 glyphosate 사용으로 인한 저항성잡초의 발생과 잡초종의 변화에 대한 흥미로운 실험을 수행하였다. Glyphosate 저항성 *Lolium rigidum*과 더불어 예측하지 못한 초종들이 장기간의 glyphosate 사용으로 발생했으며 glyphosate를 낮은 농도와 높은 농도로 사용했을 때 다른 경향을 보이는 것으로 나타났다. 낮은 농도의 glyphosate 처리에서는 barley grass, wild oat, windmill grass의 밀도를 증가시켰으나, 높은 농도의 glyphosate 처리에서는 ryegrass의 밀도를 감소시켰고 *Cleretum papulosum*과 medic (*Medicago* spp.)의 밀도는 증가시키는 결과를 초래하였다. Glyphosate의 농도뿐만 아니라 처리시기도 잡초종 구성의 변화에 영향을 미치며, glyphosate에 민감한 초종으로부터 내성(tolerance)인 초종으로의 변이(shift)는 저항성(resistance)개체의 발생보다 더 빠르게 나타나고 있다. 특정 제초제에 대한 저항성개체의 발생뿐만 아니라 다른 내성 잡초들의 발생 변화를 관찰하여 잡초방제에 이용하는 것 또한 중요한 것으로 판단된다.

ALS 및 ACCase 저해 제초제 저항성

일본의 벼 재배지에서는 SU 저항성 물달개비와 올챙이고랭이가 많은 문제가 되고 있다. 저항성 물달개비에서 ALS 유전자를 분석한 결과, Pro197에서 점 돌연변이가 나타났다. 이 저항성 물달개비는 imazosulfuron과 bensulfuron-methyl에 높은 저항성을 나타냈으며, ALS 효소실험 결과에서도 비슷한 수준의 높은 저항성을 보였다.

중국의 겨울철 밀재배에서 ALS 저해 제초제 저항성 쇠별꽃과 쇠돌피는 작물과의 경합으로 인해 큰 피해가 발생하고 있다. ALS 저항성 쇠별꽃은 tribenuron를 270.9배 처리에서도 생존을 하며, flucarbazone-Na와 pyroxsulam에 대한 교차저항성을 보이는 것으로 나타났다. 저항성 쇠별꽃에 대한 DNA sequence를 분석한 결과 pro197에서 Ala로의 아미노산의 변화를 확인하였다. 또한 ALS 효소실험 결과에서도 감수성에 비해 58배 높은 저항성을 보였다. ALS 저항성 쇠돌피의 경우 metsulfuron-methyl, ethametsulfuron-methyl, pyroxsulam에 각각 3.4배, 4.0배, 4.0배의

저항성이 확인되었다. 그리고 저항성 쇠돌피에서 ALS 유전자를 분석한 결과, 감수성에 비해 변화가 없는 것으로 나타났다. 제초제의 대사과정에 관여하는 cytochrome P450 실험결과 *CYP72A32*의 유전자 발현에서 감수성과 비교하여 9배 높은 결과를 보여 NTSR에 의한 저항성기작으로 판단된다.

ACCase 저해 제초제 저항성 쇠돌피의 경우 clodinafop-propargyl, fluazifop-p-butyl, haloxyfop-R-methyl, quizalofop-p-ethyl에 100배 이상의 저항성을 보였으며, fenoxaprop-p-ethyl에는 8배의 저항성 보였다. ACCase의 유전자 분석결과, 2041번째 아미노산(isoleucine)에서 alanine으로의 돌연변이가 관찰되었으며 이러한 TSR이 높은 저항성 정도를 발현하는 것으로 판단된다.

외래잡초 연구동향

우리나라 농경지에 발생하는 외래잡초 166종 중 생태계교란 잡초로 지정된 14종이 농경지 내에 분포하고 있었다. 단풍잎돼지풀은 경기 연천, 파주, 의정부 등 경기 북부에만 발생한 반면에 돼지풀은 경기, 강원, 충청남북, 경상남북으로 넓게 분포하였다. 애기수영은 경기 일부, 제주, 대관령 극소지방에서 발생하고 있었다. 생태계교란잡초는 생태적 특성에 따라 물리적 및 화학적 방제 등 다양한 접근이 필요하다. 인도네시아에는 다양한 외래잡초가 발생하며 각 초종별로 risk category를 설정하여 심각단계에 있는 식물들은 방제를 우선적으로 실시하는 제도가 시행중으로 중국에서 침입한 대나무가 인도네시아 자바 국립공원에 확산되고 있어 시급히 방제가 진행되고 있다고 하였다. 우리나라의 식물검역검사본부에서는 위험도평가를 실시하여 농경지 이외에서 발생된 경기 웅진군 연평도의 백령풀, 제주도의 왕도깨비가지를 2014-2016년에 집중적으로 방제하여 박멸한 적이 있다(세부성적 생략).

스리랑카에서는 검역단계에 외래잡초 종자를 DNA barcoding으로 분리하여 효율적인 검역에 이용하는데 유해잡초의 경우는 무엇보다 사전에 차단하는 국경검역이 중요할 것으로 판단된다. 호주 연구자는 기후변화에 따라 외래잡초인 *Parthenium hysterophorus*는 CO₂ 증가에 따라 초장이 길어지는 경향을 보였다면서 기후변화에 따라 각국의 외래잡초가 문제화될 수 있음을 역설적으로 설명하였다.

생태계 교란잡초를 포함한 외래잡초는 그 종류를 떠나 아태지역에서 큰 문제가 되고 있고, *Parthenium*, 가시박 및 칩 등은 국가에 상관없이 공통적으로 가지고 있는 문제이다. 특히 일본은 가시박이 최근 큰 문제가 되고 있어, 이에 대한 생리 및 생태나 방제에 대한 국제적 교류를 원하고 있으며, 국내의 연구진과도 협의하고 싶다는 의사를 전달한 바 있다. 방제법으로는 물리적 방제를 통해 완전 제거하는 것이 가장 이상적이나 현실에서는 매우 어려운 편이기 때문에, 지속적인 모니터링과 각 초종의 생리생태에 따른 적절한 방제법을 활용하는 것이 타당하다.

상호대립억제작용

식물체내에서 합성되는 이차대사산물들 중에는 잡초의 생육이나 종자의 발아를 억제하는 경우가 많으며, 이러한 상호대립억제작용을 이용하여 친환경 제초제를 개발하려는 연구들이 꾸준히 증가하고 있다. 특히 이번 학회에서는 일본, 인도, 방글라데시, 태국 등 많은 국가에서 다양한 식물체로부터 추출한 물질들의 상호대립억제작용을 소개하고 있다.

일본에서 수행한 실험내용을 보면 로즈마리(*Rosmarinus officinalis*)잎을 메탄올로 추출한 물질을 상추에 처리할 경우 뿌리와 지상부의 생육이 억제되었다. 추출물분석결과, ferulic acid의 활성이 가장 높고 chlorogenic acid가 가장 낮았으며 rosmarinic acid는 중간 정도의 활성을 보였다. 하지만 로즈마리에서 rosmarinic acid가 가장 많이 함유되어 있어 상추에서 나타난 주된 살초효과의 원인물질로 여겨진다. Itchgrass (*Rottboellia cochinchinensis*)는 경합력이 매우 강한 식물로서 태국에서는 자연멸칭재료로서도 사용하고 있다. Itchgrass 건조분말을 토양과 혼합처리할 경우 피를 비롯한 여러 잡초들의 생육이 억제되었으며, 여러 성분 중 trans-p-coumaric acid가 주요 제초활성

성분으로 분석되었다. 망고(*Mangifera indica*) 또한 제초활성이 알려진 식물이며 잎의 메탄올 추출물이 상추나 유채, 바랭이의 생육을 억제하며, methyl gallate가 주요 활성물질일것으로 분석하고있다. 열대나 아열대지방에서 널리 분포하고 있는 잡초인 *Heliotropium indicum*의 제초활성물질인 methyl caffeate은 1 mM이상의 농도에서 상추의 생육을 억제하며, 상추의 지상부와 뿌리의 생육을 50% 억제하는 농도가 각각 0.7과 1.0 mM인 것으로 나타났다.

차나무(*Camellia sinensis*)에 함유되어 있는 caffeine이 제초활성을 갖고있으며, *Piper betle*과 같은 약용식물에서도 제초활성이 잘 알려져 있다. 작물을 활용한 제초활성연구에서 방글라데시에서 수행한 연구 중 벼 품종인 'Boterswar'의 메탄올 추출물이 피와 야생벼의 생육을 억제한다는 것이 알려졌다. Boterswar 벼에서 추출한 4가지 물질들의 제초활성이 가장 높았으며, 각각의 제초활성보다는 이들이 함께 작용을 할 때 제초활성이 상승되는 결과를 발표하였다.

그밖에 *Cyperus rotundus*, *Crocus sativus*, *Ludwigia sedioides*, *Coccinia grandis*, *Cantharellus cinnabarinus*, 다양한 *Eucalyptus* 종, *Mechalia champaca* 종자, *Acacia mangium* 등 최근에 상호대립억제작용에 관한 많은 연구들이 소개되고 있다. 이들은 잡초의 뿌리와 줄기의 생육을 억제하는 효과가 있으며 체내의 어떠한 물질들이 제초활성이 있는지 밝히려는 노력이 꾸준히 진행되고 있다. 또한 *Thymus serpyllum*을 비롯한 여러 피복작물들의 상호대립억제작용을 활용하여 잡초를 방제하려는 노력이 활발히 이루어지고 있다.

기타사항

최근 국제학회에서 잡초연구 동향은 크게 제초제 저항성잡초, 외래잡초 및 신규 제초제이다. 새로운 제초제 연구는 다국적기업(Bayer 및 Syngenta 등)이 주도하고 있었으며, 국내에서는 외래잡초 연구가 두드러졌으나 반면에 저항성잡초 연구는 일본 및 인도 등에 비해 매우 뒤쳐져 있었다. 따라서 외래잡초와 저항성잡초 연구에 대한 균형 잡힌 접근이 필요하다. 차세대 염기서열분석 및 transcriptom 분석 등과 같은 최신 분석방법을 통한 저항성잡초 연구결과가 많이 주목받았다. 국내 잡초학계에서도 위와 같은 방법을 이용한 제초제 저항성 연구를 시도하고 있으나 국가적 지원을 받지 못해 그 속도나 완성도면에서는 많이 떨어지고 있어 제초제 저항성잡초의 차세대 염기서열 분석법과 같은 기초적인 연구 과제화가 필요하다.

아·태잡초학회 발족 50주년을 기념하여 '아시아·태평양지역의 벼 잡초관리'(Rice Weed Management in the Asian-Pacific Region)에 관한 책이 발간되었다. 이 책은 아태·잡초학회 사무총장인 Rao박사가 주축이 되어 한국, 일본, 중국, 인도, 미국, 필리핀, 인도네시아 등 15개국이 참여하였다. 우리나라는 농촌진흥청 국립농업과학원 잡초연구실에서 'Weeds and Weed Management in Temperate Rice of Korea'라는 주제로 작성하였다. 주요 내용은 우리나라의 논잡초 발생현황, 잡초방제법의 변화, 친환경 잡초방제법 소개, 제초제 저항성잡초의 발생 등이 포함되어 있다.

요약

아시아태평양지역의 잡초연구자들이 모여 각국의 문제 잡초를 파악하고 토론하여 향후 잡초연구 발전방향과 전망에 대한 논의가 있었다. 제26차 아시아·태평양잡초학회는 일본 교토에서 개최되었으며 우리나라를 포함한 25개국 458명이 참석하여 20개 분야에서 325편의 학술발표가 진행되었다. 주요 연구분야로는 제초제저항성잡초, 제초제 이용, 제초제 개발, 잡초의 생태, 상호대립억제작용, 잡초관리, 외래잡초 등이었다. 이 중 제초제저항성잡초 분야는 전체 17.0%를 차지하여 가장 비중 있는 연구분야로 나타났다. Florryauxifen-benzyl ester, triafamone,

fenquino-trione, tolypyralate 등과 같은 새로운 제초제의 개발과 이용에 관한 연구들도 발표되었다. 향후 특정국가뿐만 아니라 아태지역에서는 농촌인구 감소 및 노동의 질 저하를 해결하기 위한 방안으로 제초제의 새로운 제형 및 살포방법 개발 등이 병행되어야 하며, 각 국에서는 다소 차이는 있지만 잡초성벼와 외래잡초가 미래에 심각한 문제로 대두될 것이고 해결책을 공동으로 마련해야 할 것이다.

주요어: 제초제 저항성잡초, 잡초성벼, 외래잡초, 제초제

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by joint research project from Rural Development Administration, Republic of Korea (Project number: PJ 012533).

REFERENCES

- Bo, A.B., Won, O.J., Sin, H.T., Lee, J.J. and Park, K.W. 2017. Mechanisms of herbicide resistance in weeds. *Kor. J. Agri. Sci.* 44:1-15.
- Heap, I. The International Survey of Herbicide Resistant weeds. 2017. [http:// www.weedscience.org](http://www.weedscience.org) (Accessed Nov. 20, 2017)
- Lee, I.Y., Park, T.S., Choi, J.S., Ko, Y.K., Park, K.W., et al. 2016. Current status and perspective of weed science in the world. *Weed Turf. Sci.* 5(3):105-110. (In Korean)
- Lee, I.Y., Park, T.S., Moon, B.C. and Kim, T.J. 2005. Report on 20th conference of the Asian · Pacific Weed Science Society. *Kor. J. Weed Sci.* 25(4):370-373. (In Korean)
- Lee, I.Y., Moon, B.C., So, J.S., Park, J.E. and Ob, S.M. 2007. Report on 21st conference of the Asian · Pacific Weed Science Society. *Kor. J. Weed Sci.* 27(4):374-381. (In Korean)
- Lee, I.Y., Lee, J., Moon, B.C., Kim, T.J., Park, C.S., et al. 2011. Report on 23rd conference of the Asian · Pacific Weed Science Society. *Kor. J. Weed Sci.* 31(4):410-415. (In Korean)