CNU Journal of Agricultural Science Vol. 41, No. 2, pp. 85-99, June 2014
DOI: http://dx.doi.org/10.7744/cnujas.2014.41.2.085

한국 논에서 제초제 저항성잡초의 발생 현황, 메카니즘 및 방제

박태선[1] · 성기영[1] · 조현숙[1] · 서명철[1] · 강항원[1] · 박기웅[2]*

[1]농촌진흥청 국립식량과학원, [2]충남대학교 식물자원학과

Current status, mechanism and control of herbicide resistant weeds in rice fields of Korea

Tae Seon Park[1], Ki Yeong Seong[1], Hyun Suk Cho[1], Myung Chul Seo[1], Hang Won Kang[1], Kee Woong Park[2]*

[1]*National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 441-707, Korea*
[2]*Department of Crop Science, Chungnam National University, Daejeon Korea*

Received on 2 June 2014, revised on 11 June 2014, accepted on 13 June 2014

Abstract : Sulfonylurea (SU)-resistant weeds of eight annual weeds, *Monochoria vaginalis*, *Scirpus juncoides* and *Cyperus difformis*, *etc.,* and four perennial weeds, *Scirpus planiculmis, Sagittaria pigmaea, Eleocharis acicularis* and *Sagittaria trifolia* as of 2013 since identification *Monochoria korsakowii* in the reclaimed rice field in 1998. And the resistant *Echinochloa oryzoides* to ACCase and ALS inhibitors has been confirmed in rice fields of the southern province, Korea in 2009. In the beginning, the *M. vaginalis*, *S. juncoides* and *C. difformis* of these SU-resistant weeds were rapidly and individually spreaded in different fields, however, these resistant weeds have been occurring simultaneously in the same filed recently. The resistant biotype by weed species demonstrated about 10- to 1,000-fold resistance, based on GR_{50} values of the SU herbicides tested. And the resistant biotype of *E. oryzoides* to cyhalofop-butyl, pyriminobac-methyl, and penoxsulam was about 14, 8, and 11 times more resistant than the susceptible biotype base on GR_{50} values. The products and applied area of SU-included herbicides have been increased rapidly, and have accounted for about 69% and 96% in Korea, respectively. In Korea, the main cause of SU-resistant weed is extensive use of these herbicides. The top ten herbicides by applied area were composed of all SU-included herbicides by 2003. The concentrated and successive treatment of ACCase and ALS inhibitors for control of barnyardgrass in rice led up to the resistance of *E. oryzoides*. Also, SU-herbicides like pyrazosulfuron-ethyl and imazosulfuron which effective to barnyardgrass can be bound up with the resistance of *E. oryzoides*. The ALS activity isolated from the resistant biotype of *M. korsakowii* to SU-herbicides tested was less sensitive than that of susceptible biotype. The concentration of herbicide required for 50% inhibition of ALS activity (I_{50}) of the SU-resistant *M. korsakowii* was 14- to 76-fold higher as compared to the susceptible biotype. No differences were observed in the rates of [^{14}C]bensulfuron uptake and translocation. Acetolactate synthase (ALS) genes from *M. vaginalis* resistant and susceptible biotypes against SU-herbicides revealed a single amino acid substitution of proline (CCT), at 197th position based on the *M. korsakowii* ALS sequence numbering, to serin (TCT) in conserved domain A of the gene. Carfentrazone-ethyl and pyrazolate were used mainly to control SU-resistant *M. vaginalis* by 2006 in Korea. However, the alternative herbicides such as benzobicyclone, to be possible to control simultaneously the several resistant weeds, have been developing and using broadly, because the several resistant weeds have been occurring simultaneously in the same fieled. The top ten herbicides by applied area in Korea have been occupied by products of 3-way mixture type including herbicides with alternative mode of action for the herbicide resistant weeds. Mefenacet, fentrazamide and cafenstrole had excellent controlling effects on the ACCase and ALS inhibitors resistant when they were applied within 2nd leaf stage.

***Key words* :** Herbicide resistance, Sulfonylurea, Resistance, Resistant weed

***Corresponding author:** Tel: +82-42-821-5726
E-mail address: parkkw@cnu.ac.kr

I. 서 론

현재 제초제 저항성잡초는 전 세계적으로 65개국에서 82종의 작물에서 235초종이(쌍자엽 138, 외떡잎 97) 보고되었다. 이들 제초제 저항성잡초들은 22계통의 제초제 중 155 종류의 제초제들에 대하여 보고되었으며, 국가별로는 미국, 호주, 케나다, 중국 순으로, 작물별로는 밀, 옥수수, 콩, 벼 순으로 보고되었다. 제초제 작용기작으로는 ALS (acetolactate synthase), 광합성 저해제들에 대한 저항성 잡초들이 가장 많이 보고되었으며, 특히 국내의 경우 논에서 피 전용 약제로 많이 사용되는 ACCase(Acetyl-CoA Carboxy lase) 저해제들에 대한 저항성잡초들이 1990년대 중반부터 빠르게 증가하고 있는 실정이다(Heap 2014). 1980년대까지는 주로 triazine계 제초제들에 대한 저항성 잡초들이 보고되었으나 최근에는 국내 논에서 많이 사용되어지고 있는 ALS 저해제들인 sulfonylurea(SU)계 제초제들 대한 저항성잡초들이 가장 빠르게 증가하고 있는 실정이다(Park et al., 1999; Park, 2004). 이들 SU계 제초제들에 대한 저항성잡초들은 초기에는 주로 미국이나 유럽의 밀, 콩, 옥수수밭 등에서 많이 사용되고 있는 chlorsulfuron에 의하여 발생되었다(Durner et al., 1991; Ohmes et al., 1999). 그러나 1980년대 후반부터는 bensulfuron-methyl, pyrazosulfuron-ethyl 등이 논에서도 광범위하게 사용됨에 따라 최근에는 논에서 훨씬 빠른 속도로 저항성잡초의 발생이 증가하고 있다. 현재까지 논에서 발생하는 제초제 저항성잡초들은 주로 ALS 저해제인 SU계 및 ACCase 저해제들인 phenoxy계 제초제에 대하여 약 50초종이 보고되었다.(Heap, 2014). 국내와 농업적환경이 매우 유사한 일본의 논에서 22초종의 저항성잡초종의 발생이 보고되었으며, 국내는 2014년 벗풀과 여뀌바늘까지 13초종이 보고되었다. 일본에서는 이미 1995년부터 논에서 ALS 저해제들에 대한 저항성잡초 21초종 ACCase 저해제들에 대한 저항성 피까지 22초종이 매우 빠른 속도로 확산되고 있다(Heap, 2014; Itoh, 2000; Koarai, 2000; Uchino and Itoh, 2000; Yoshida et al., 1999). 국내에서도 1999년도에 서해안 간척지 논에서 우점한 물옥잠이 SU계 제초제에 대한 저항성 잡초로 확인된 이후 현재까지 일년생 8초종, 다년생 4초종 총 12초종이 발생하였고, ACCase 저해제들에 대한 저항성 피가 확인되었다(Heap, 2014; Park et al., 2010). 최근에는 보고된 제초제 저항성잡초들 외에 갯드렁새, 밭뚝외풀, 등애풀 등에 대한 민원이 증가하고 있다(Lee et al., 2013). 이들 저항성잡초들 중에서 특히 피의 발생과 확산은 기존에 보고된 다른 초종들에 비하여 더욱 심각한 피해와 문제점을 야기할 것으로 생각된다. 피는 국내 논 잡초들 중에서 벼에 대한 경합력이 가장 우세할 뿐만 아니라 기존 priminobac-methyl 및 metamifop 등의 ALS 및 ACCase 저해제들은 피를 3~4.5엽기까지는 방제가 가능하였으나 저항성 피 방제를 대체할 수 있는 제초제들인 mefenacet 및 fentrazamide는 포장에서 피를 1.5엽기까지만 가능하여 가구당 논 경지면적이 빠르게 늘어나고 있는 현재의 상황을 고려하면 피의 확산은 불가피할 것이다. 국내 논에서 발생된 제초제 저항성잡초의 생체중을 50% 억제하는 SU계 제초제들의 농도는 감수성 생태형에 비해 수십에서 수백 배 높은 것으로 확인되었다. 일단 SU계 제초제 저항성잡초들이 발생하면 기존에 사용하고 있는 제초제로는 방제가 불가능한 실정이기 때문에 농업인과 전국 지도기관으로부터 민원이 급증하고 있다. 따라서 본고에서는 현재까지 국내 논에서 저항성잡초들의 발생 현황과 방제전략을 종합적으로 기술하여 제초제 저항성잡초를 관리할 수 있는 방안을 제안하고자 한다.

II. 제초제 저항성잡초 발생현황

1. 세계적 발생현황

제초제 저항성잡초의 세계적 발생 현황은 Fig. 1과 같이 광합성 저해제인 triazine계 제초제에 대한 저항성잡초들이 1970년대 초부터 발생하였으며 1990년대 중반부터는 ALS 저해제에 대한 저항성잡초가 매우 빠르게 증가하고 있다. 특히 이들 ALS 저해제 중에서 SU계 제초제에 대한 저항성잡초는 1990년대 후반부터 급격히 증가하고 있는데, 이것은 국내와 일본의 논에서 저항성잡초의 빠른 증가와 무관하지 않다. 미국과 유럽에서 SU계 제초제들에 대한 저항성잡초는 콩, 옥수수, 밀밭에서 chlorsulfuron에 의해서 주로 발생되었다. 그러나 국내와 일본의 논에서 SU계 제초제들에 대한 저항성잡초들은 1990년부터 사용되기 시작한 bensulfuron-methyl, pyrazosulfuron-ethyl 등을 10여년 이상 연용하여 저항성잡초종이 발생하고 있다. 또한 최근에는 지방산 촉매 효소인 acetyl-CoA carboxylase(ACCase) 저해 제초제인 cyhalofop-butyl 및 fenoxaprop-P-ethyl 등에 대한 화본과 잡초에 대한 저항성잡초가 완만하게 증

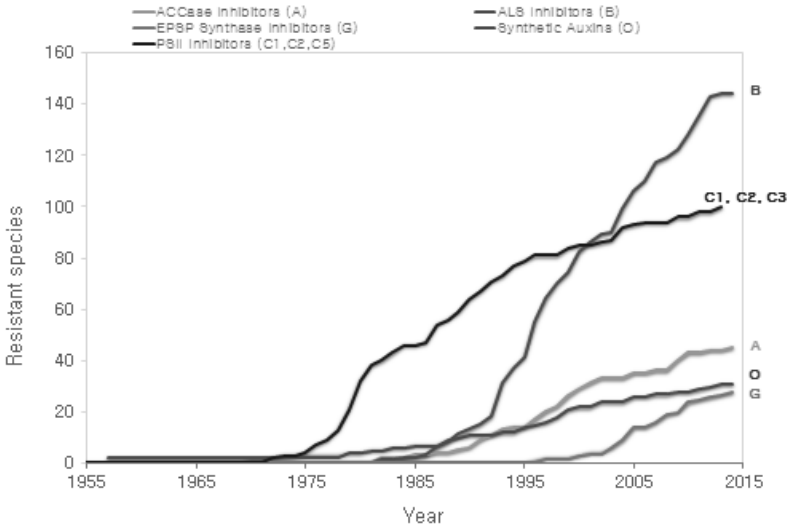

Fig. 1. International survey of resistant weeds to herbicide sites of action as of 2014, (http://www.weedscience.org/in.asp).

Table 1. Development of resistance to weed among different herbicides (LeBaron 1991).

Herbicide	Year of introduction	Year resistance first report	Years of continuous use
2,4-D	1945	1963	18
Dalapon	1953	1962	9
Atrazine	1958	1968	10
Picloram	1963	1988	25
Diclofop	1977	1983	6
Triallate	1962	1982	20
Chlorosulfuron	1982	1987	5

가하고 있다(Caroline, 1991; Gressel et al., 1990). 국내에서도 역시 이들 제초제에 대한 저항성 피가 발생하여 확산하고 있다(Im et al., 2009; Park et al., 2010). 일반적으로 Table 1과 같이 LeBaron(1991)은 제초제 계통별 연용에 따른 저항성잡초 발생 시기를 보면 SU계 제초제인 chlorosulfuron은 5년 연속적으로 사용하였을 때 저항성잡초가 발생하였으며, ACCase 저해 제초제인 diclofop는 6년간 연속적으로 사용할 경우 저항성잡초가 발생하였다고 보고하였다.

2. 우리나라 논에서 제초제 저항성잡초 발생 현황

(1) 발생 초종 및 분포

우리나라 논에서는 1970년대 초반부터 제초제들이 일반농가에서 사용되었으며, SU계 제초제가 등록되어 사용되기 시작한 1990년 초까지는 주로 뷰타클로르, CNP, 티오벤카브 등 일년생잡초 방제용 제초제들이 사용되었다. 이들 일년생잡초 방제용 제초제들은 약효지속기간이 짧을 뿐만 아니라 제초제들이 잡초에 흡수된 후 뿌리, 잎, 줄기 등 잡초의 여러 부위를 가해하여 살초하기 때문에 잡초가 저항성으로 변할 가능성이 매우 낮다. 그러나 ALS 저해제인 SU계 제초제들은 약효지속성이 매우 길고 잡초의 생장점에서 효소만 억제하여 살초하기 때문에 잡초와 작물 사이에 선택성이 매우 높아 잡초가 저항성으로 변할 가능성이 매우 높다(Saari 등 1990). 현재까지 우리나라 논에서 확인된 저항성잡초들은 Table 2에서와 같이 일년생 9초종과 다년생 4초종이 확인되어 13초종이 보고되었다(Heap, 2014; Park et al., 2014). 국내 논에서 제초제 저항성 잡초는 1999년 충남 서산 간척지논 에서 SU계 혼합 제초제를 9년간 연속적으로 사용한 담수직파 논에서 물옥잠(*M. korsakowii*)이 처음으로 저항성잡초로 확인되었다(Park et al., 1999). 이후 물달개비(*M. vaginalis*), 미국외풀(*L. dubia*), 올챙이

Table 2. Occurrence status of herbicide resistant weeds in rice field of Korea.

Identified year	Weed	Distributing province
1998	*Monochoria korsakowii*	Chungnam
1999	*Monochoria vaginalis*	All provinces
2000	*Lindernia dubia*	Cheonnam
2000	*Scirpus juncoides*	All provinces
2001	*Rotala indica*	Cheonnam
2001	*Cyperus difformis*	Cheonnam, Cheonbuk, Chungnam
2004	*Scirpus planiculmis*	Chungnam
2004	*Sagittaria pigmaea*	Cheonnam, Chungnam
2006	*Blyxa aubertii*	Cheonnam
2006	*Eleocharis acicularis*	Cheonnam, Chungnam
2008	*Echinochloa oryzoides*	Cheonnam, Chungnam, Cheonbuk
2013	*Sagittaria trifolia*	Kyungbuk, Cheonnam
2013	*Ludwigia prostrata*	Cheonnam

Table 3. Occurrence area of resistant weeds by year in rice of Korea.

Weed	Area by year (ha)					
	2003	2004	2005	2006	2008	2012
M. korsakowii	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	-
M. vaginalis	24,248	34,327	39,348	42,102	62,560	57,018
L. dubia	30	32	33	33	33	11,301
S. juncoides	452	494	832	906	12,060	33,803
R. indica	5	5	5	5	5	2,047
C. difformis	12,435	12,800	13,280	13,171	14,230	13,085
S. planiculmis	-	4,000	4,000	6,000	8,000	-
S. pigmaea	-	-	17	17	17	701
E. acicularis	-	-	-	5	27	589
B. aubertii	-	-	-	2	2	-
E. oryzicola	-	-	-	-	17	13,581
Other weeds						44745
Total	47,170	61,658	67,515	72,241	106,951	176,870

고랭이(*S. juncoides*) 등이 발생하였다(Park et al., 2003). Table 2에서 보는바와 같이 지역별 발생 상황을 보면, 물옥잠, 미국외풀, 마디꽃(*R. indica*), 새섬매자기(*S. planiculmis*), 올챙이자리(*B. aubertii*)는 전남과 충남에서 국부적으로 발생하고 있다. 그러나 물달개비와 올챙이고랭이는 이미 전국적으로 발생하고 있으며, 알방동사니(*C. difformis*)도 전남, 전북과 충남 등에서 광범위하게 확산하고 있다(Kuk, 2002). 또한 일본에서와 같이 다년생 잡초이면서 종자생산량이 매우 많은 벗풀(*S. trifolia*)이 경북에서 저항성 잡초로 확인되어 전남 등에서 확산되고 있다. 특히 2008년부터 cyhalofop-butyl 및 fenoxaprop-P-ethyl 등과 같은 ACCase 저해제 및 penoxsulam 및 priminobac-methyl 등과 같은 ALS 저해제에 대한 저항성 피가 발생하여 전남, 전북과 충남에서 확산하고 있다(Im et al., 2009, Parket al., 2010). Table 3과 같이 2012년까지 국내 저항성잡초의 발생면적은 약 177,000ha이고 그 중에서 물달개비가 약 57,000ha로 전체의 32.2%를 차지하여 매우 광범위하게 발생하고 있는 것으로 확인되었다(Lee et al., 2013). 다음으로 올챙이고랭이와 강피도 각각 약 33,800ha와 13,600ha 발생한 것으로 조사되었다. 국내의 경우 저항성 물달개비가 가장 빠르게 확산하고 있으나, 농업적 환경이 비슷한 일본은 저항성 올챙이고랭이가 빠르게 확산되고 있다(Yoshida et al.,

Table 4. GR_{50} ratio in growth reduction of SU-susceptible and resistant biotypes.

Herbicide	GR_{50} Ratio(Resistant/Susceptible)				
	M. k[1)]	*M. v*	*L. d*	*S. j*	*S. p*
Azimsulfuron	12	217	560	275	720
Bensulfuron	40	123	987	318	558
Cinosulfuron	42	215	620	234	549
Ethoxysulfuron	60	177	600	340	500
Imazosulfuron	36	159	545	237	412
Pyrazosulfuron	64	138	482	412	872

[1)]*M. k* : *Monochoria korsakowii*; *M. v* : *Monochoria vaginalis*; *L. d* : *Lindernia dubia*; *S. j* : *Scirpus juncoides*; *S. p* : *Scirpus planiculmis*.

Table 5. Survival rates of resistant and susceptible biotypes of *Echinochloa oryzicola* to different dosages of cyhalofop-butyl and penoxsulam used in greenhouse study at 4~5th leaf stage.

Herbicide	Dosage (g a.i./ha^{-1})	Resistant			Susceptible
		Iksan	Kimje	Buan	Gokseong
		------ % of control ------			
Cyhalofop-butyl	0	100	100	100	100
	50	100	100	100	100
	1001)	100	100	100	30
	250	100	100	60	0
	500	92	95	32	0
	1,000	77	83	20	0
Penoxsulam	0	100	100	100	100
	6	100	100	100	100
	12	100	100	100	10
	30	100	100	62	0
	60	75	68	45	0
	120	30	15	7	0

[1)]Recommended use rates are shown in boldface.

1999). 이것은 국내의 경우 SU계 제초제들과 molinate가 혼합된 "일발처리제"들이 선호되어 SU계 제초제에 매우 민감하면서도 종자 생산량이 상대적으로 월등한 물달개비가 압도적으로 넓은 면적에서 확인되었다. 그러나 일본은 SU계들과 물달개비의 1~2엽기까지 방제가 가능한 mefenacet이 혼합된 "일발처리제"가 광범위하게 사용되어 SU계 제초들네 민감한 올챙이고랭이가 상대적으로 우점하였다. 그러나 잡초 생태적 특성으로 보아 국내와 일본에서 저항성 물달개비와 올챙이고랭이가 논의 동일 필지에 동시에 우점할 것으로 생각된다.

(2) 저항성잡초의 저항성 정도

Table 4는 국내에서 발생하고 있는 몇몇 주요 SU계 제초제들에 대한 저항성잡초들의 생체중을 50% 억제하는 제초제 농도(GR_{50})를 감수성 계통에 대한 비율로 나타낸 것이다. 조사된 잡초의 저항성 계통의 GR_{50}은 제초제의 종류 및 잡초 초종에 따라 차이가 있으나 일반적으로 감수성 계통보다 수 십배부터 수 백배 높게 나타났다. Table 5는 최근 문제가 되고 있는 저항성 강피로 추정되는 지역인 익산, 김제 및 부안에서 채집한 강피를 ACCase 및 ALS 저해제인 cyhalofop-butyl과 penoxsulam을 농도별로 처리한 다음 감수성 계통과 비교한 결과 익산, 김제 수집종은 제초제 무처리구와 같이 100% 생존을 보였을 뿐만 아니라 cyhalofop-butyl 4배량에서도 약 80% 생존하였다(Park et al., 2010). Iim 등(2009)은 충남 서산간척지에서 수집한 물피(*E. crus-galli* var. *crus-galli*)가 ACCase 저해제인 cyhalofop-

Table 6. The GR_{50} of *Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli* to several ACCase inhibitors.

Herbicides	GR_{50} (ga.i./ha)		
	Resistant (R)	Susceptible (S)	R/S
Cyhalofop-butyl	179.5	23.1	7.8
Fenoxaprop-P-ethyl	453.9	31.5	14.4
Metamifop	41.9	14	3.0

butyl, fenoxaprop-P-ethyl, metamifop에 교차저항성(cross-resistance)이 있는 것으로 보고하였다(Table 6).

III. 국내 논에서 제초제 저항성잡초 발생 및 확산 원인

제초제 저항성잡초의 발생 및 확산 원인은 크게 제초제, 잡초 그리고 국내 농업적 여건변화로 구분할 수가 있다. 제초제의 경우는 모든 제초제들에 대하여 잡초들이 저항성화 되는 것이 아니라 약효 효과가 탁월하고, 지속성과 선택성이 우수한 제초제들에 대하여 잡초가 저항성으로 변화한다. 잡초 역시 종자생산량이 매우 많고, 발아력과 초기 생장력이 탁월한 잡초들이 저항성잡초로 변화한다. 또한 국내 쌀 전업농가의 고령화 및 개방화에 따른 가구당 경지면적의 급격한 증가와 제초제의 생력제형의 증가도 잡초의 저항성화 원인이 되고 있다.

1. 제초제 측면

Fig. 2는 국내 논에서 시기별 제초제 등록과정, 즉 등록 역사를 나타낸 것이다. 국내 논에서 제초제는 1970년대 초부터 농가에서 본격적으로 사용되기 시작하였다. 이때부터 1980년대 후반까지 등록된 제초제들은 세포분열 및 엽록소 형성 저해제들로 작용점이 다양하여 저항성잡초 발생과는 거리가 있었다. 그러나 1990년 초반부터 bensulfuron-methyl(BSM), pyrazosulfuron-ethyl(PSE), imazosulfuron(IMZ) 등 SU계 제초제들이 등록되어 광범위하게 사용되기 시작하였다. Valine, leucine, isoleucine 등 식물체 내에서 필수 아미노산 생성을 촉매하는 ALS를 저해하는 SU계 제초제들은 선택성이 탁월할 뿐만 아니라 지속성과 약효가 우수하여 저항성잡초 발생과 증가의 직접적인 원인이 되고 있다. 또한 국내 논에서 광범위하게 사용 중인 화본과 잡초의 전용 약제인 molinate가 생산 중단됨에 따라서 대체 약제들인 ALS 및 ACCase 저해제들인 pyriminobac-methyl(PMB), penoxsulam(PXL), cyhalofop-butyl 그리고 metamifop 혼합제들의 등록 품목수가 매우 빠르게 증가하고 있다. 이들 ALS 및 ACCase 저해 제초제들 역시 SU계 제초제들과 같이 약효 선택성과 지속성 그리고 효과가 탁월하기 때문에 저항성 피의 발생과 증가의 직접적인 원인이 되고 있다. 국내 논에서 저항성잡초 초종 수 및 발생면적의 증가 원인

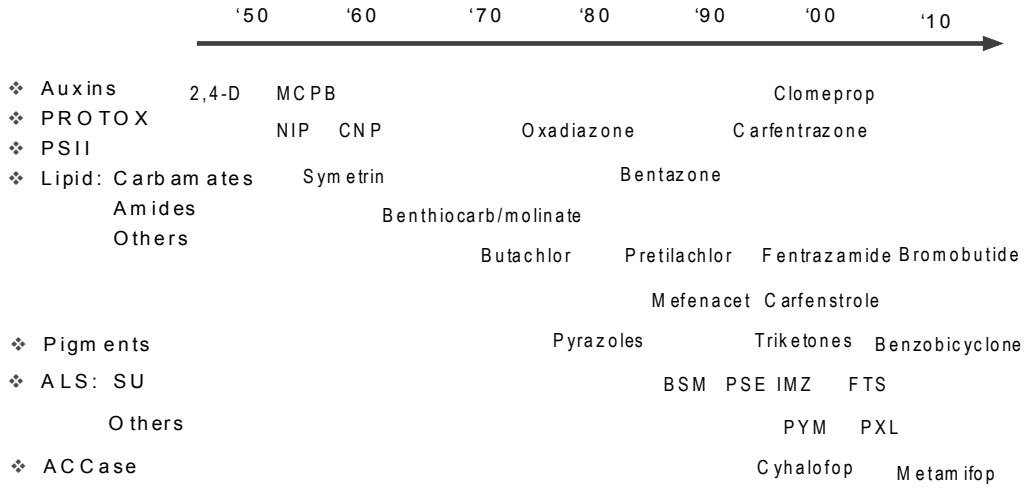

Fig. 2. History of paddy herbicides used in Korea (BSM: bensulfuron-methyl, PSE: pyrazosulfuron-ethyl, IMZ: imazosulfuron, PYM: pyriminobac-methyl, PXL: penoxsulam).

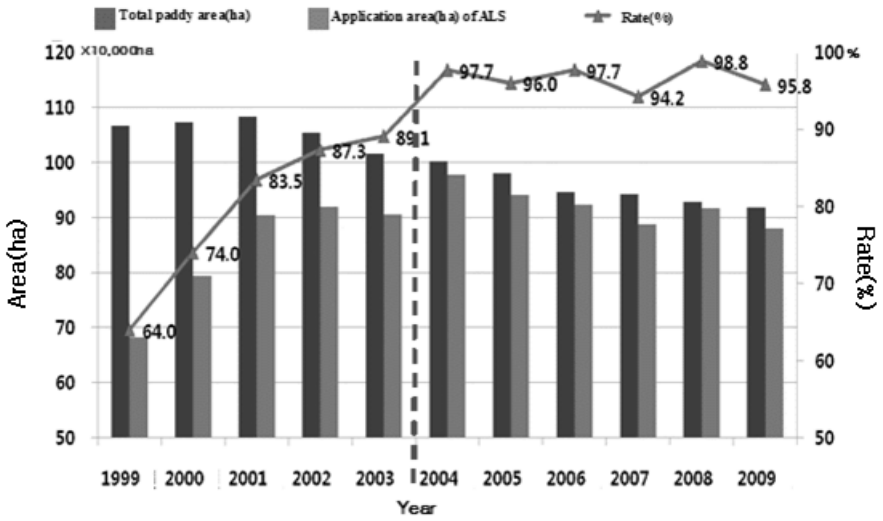

Fig. 3. Application area and rate of SU-included herbicides in paddy herbicides of Korea (KCPA 2009).

Table 7. Rank of preferred herbicides on farmer's level.

Herbicides	Area (×1,000ha)
Pyazosulfuron-ethyl·molinate GR	143.0
Bensulfuron-methyl·molinate GR	63.7
Bensulfuron-methyl·butachlor GR	51.5
Pyrazosulfuron-ethyl·mefenacet GR	49.8
Azimsulfuron·molinate GR	43.9
Pyrazosulfuron-ethtl·esprocarb GR	37.5
Imazosulfuron·mefenacet GR	37.0
Pyrazosulfuron-ethtl+pyriminobac-methyl GR	24.9
Imazosulfuron+fentrazamide GR	22.7
Imazosulfuron+fentrazamide SC	20.0

은 무엇보다도 SU계 제초제들이 혼합된 "일발처리제(one-shot treatment)" 사용 증가에 있다. 1989년에 국내 논에서 SU계 제초제인 bensulfuron-methyl이 처음 등록된 이후 azimsulfuron, cinosulfuron, cyclosulfamuron, ethoxysulfuron, imazosulfuron, pyrazosulfuron, halo-sulfuron, flucetosulfuron 등 8종류가 보급되어 사용 중이다. 이들 SU계 제초제들은 모두 다년생 및 일년생 광엽잡초 뿐만 아니라 방동사니과 잡초에도 방제효과가 우수하기 때문에 이들 제초제들이 혼합된 제초제들이 농가에서 선호되어 품목수가 매우 빠르게 증가하고 있다. 또한 1990년대 이후부터 국내 농촌의 노동력 부족에 따라 정부 정책이 벼 어린모기계이앙이나 직파재배면적 확대로 보급되어짐에 따라 이들 재배법에 SU계 제초제들을 대체할 수 있는 제초제들이 없는 실정이다. 또한 가구당 논 재배면적이 확대됨에 따라 약효선택성과 지속성이 우수한 SU계 혼합 일발처리제가 제초제 저항성잡초 발생에도 불구하고 선호되어 사용량이 계속 증가하고 있는 실정이다. Table 7에서 보는 바와 같이 2004년 국내 논에서 사용되는 제초제 판매량 10위까지 조사한 결과 모든 제초제들이 SU계 제초제들과 화본과 전용 제초제들이 혼합된 '일발처리제"들이었다. 또한 Fig. 3에서와 같이 1999년부터 2009년까지 ALS 저해제인 SU계 제초제들의 사용면적이 빠르게 증가하여 2004년도에는 논 전체면적 중 약 89%까지 사용되었고 이후 약 95%이상까지 사용되어 지고 있다(Korea Crop Protection Association, 2009).

2. 잡초측면

농경지에서 발생하는 모든 잡초들이 제초제에 대하여 저항성으로 변형되어지는 것이 아니다. 종자 생산량이 매우 많고, 발아율이 높고, 발아 후 초기생장이 빠른 잡초들만이 저항성잡초로 변한다(Lovell et al., 1996). 현재 논에서 발

Table 8. Segregations by phenotype in back-crossed and F_1B_1 progenies of cross between each survived plants of sulfonylurea-resistant(R) and sulfonylurea-susceptible(S) *Monochria korsakowii* (Park *et al.* 2003).

Parental biotype (♀×♂)	Segregated no. of phenotype1)		Expected ratio (R : S)	χ^2	P
	Resistant	Susceptible			
	--- no. of individuals ---				
(1) S×F1(R)	116	71	1 : 1	10.82	0.00
(2) S×F1(R)	102	54	1 : 1	14.77	0.00
(3) S×F1(R)	66	43	1 : 1	4.85	0.02
(4) S×F1(R)	99	51	1 : 1	15.36	0.00
(5) S×F1(R)	98	48	1 : 1	17.12	0.00
(6) S×F1(R)	86	52	1 : 1	8.38	0.00
(7) S×F1(R)	95	61	1 : 1	7.41	0.00
(8) S×F1(R)	111	70	1 : 1	9.29	0.00
(9) S×F1(R)	93	56	1 : 1	9.19	0.00
(10) S×F1(R)	112	54	1 : 1	20.27	0.00
(11) F1(R)×F1(R)	114	36	3 : 1	0.08	0.77
(12) F1(R)×F1(R)	110	26	3 : 1	2.51	0.11
(13) F1(R)×F1(R)	101	52	3 : 1	6.59	0.01
(14) F1(R)×F1(R)	72	23	3 : 1	0.03	0.86
(15) F1(R)×F1(R)	150	25	3 : 1	5.36	0.00

[1)]Phenotype of each plant was assessed at 20 days after treatment of bensulfuron 51g a.i. ha-1. Susceptible phenotype; killed, Resistant phenotype; survived.

생하고 있는 대부분의 우점 잡초들을 보면 저항성잡초 발생 원인에 충족될 요인을 갖추고 있다. 제초제 저항성잡초가 논에서 일단 발생하면 인근지역으로 매우 빠르게 확산하게 된다. 국내 논에서 발생된 피, 물옥잠, 물달개비, 올챙이고랭이, 미국외풀, 알방동사니 등의 제초제 저항성잡초들은 모두 한 개의 식물체에서 수천에서 수만 개까지 종자가 생산된다. 이들 저항성잡초들은 종자가 가벼워 바람이나 물에 의하여 쉽게 이동될 뿐만 아니라 농기구에 의해서도 쉽게 확산된다. 특히 물옥잠은 Table 8과 같이 저항성 계통의 꽃가루가 감수성 계통과 수분될 경우 저항성 계통이 초우성으로 나타나기 때문에 이들 잡초가 저항성잡초로 변하면 불과 1~2년 후에 전 포장으로 확산되었다(Park et al., 2003).

물옥잠의 저항성 생태형은 처음에 서산 간척지 논의 극히 일부 지역에서 발생하였으나 바람에 의한 저항성 생태형 꽃가루의 이동으로 이듬해에 전 지역으로 확산 우점되었다. 또한 영산강 간척지에서 대면적으로 발생된 알방동사니는 종자 생산량이 매우 많을 뿐만 아니라 종자가 매우 가볍기 때문에 처음 일부지역에서 발생하였으나 바닷바람에 의하여 인근지역으로 조기 확산되어진 것으로 생각된다. Fig. 4는 농경지에서 저항성잡초가 발생하여 조기 확산되어지는 과정으로 나타낸 것이다. 처음 논에서 저항성잡초가 농업인들의 눈에 나타나지 않을 정도로 몇몇 개체가 발생하나 2~3년 이내 논 전체에 우점하게 된다. 이는 저항성잡초들이 가지고 있는 종자 생산량, 발아율 등 생태적 특성 때문이다.

3. 농업환경적 측면

논에 등록된 제초제들 중에서 이앙 전·후 제초제들은 모두 수면 토양처리제들이다. 이들 제초제들은 제형에 따라 다소 차이는 있지만 처리 후 1~2일 후 제초제 성분이 용출되어 토양표면에 처리 층이 형성된 후 발아된 잡초들이 유아나 유근을 통해 흡수한 다음 고사되어 진다. 즉 잡초의 효과를 극대화하기 위해서는 잡초가 발아되어 제초제를 흡수할 때까지 제초제 처리 층이 토양표면에 유지되어야 되는데 이러한 기간이 최소 3~5일은 되어야한다. 그렇지 않고 잡초가 발아하여 제초제를 흡수하기 전에 물이 빠지면 토양표토에 있던 제초제 처리 층이 토양 속으로 이동하기 때문에 표토에서 발아한 종자는 결국 재생하고 이런 한 반

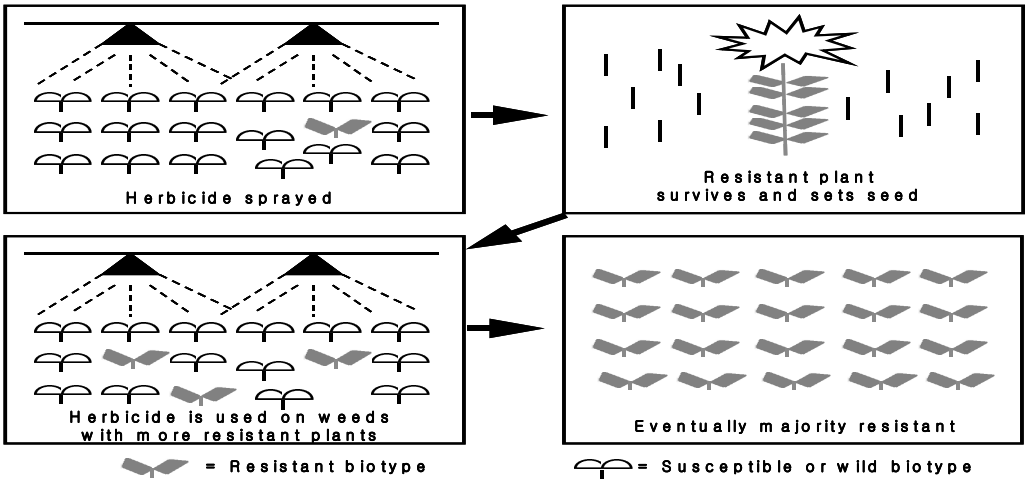

Fig. 4. Occurrence procedure of herbicide resistant weed in farm land.

Table 9. Numbers by age-based farmer in farmhouse for rice production.

Division	2000	2005	2009	2013	Growth rate by year(%)
under 45 age	95,756 (12.2%)	48,214 (7.4)	34,685 (5.7)	25,432 (4.5)	-13.7
45~54 age	146,409 (18.6)	113,013 (17.4)	103,193 (16.9)	90,232 (15.8)	-5.2
54~65 age	268,198 (34.1)	180,110 (27.8)	160,235 (26.3)	142,917 (25.0)	-6.8
over 65 age	277,088 (35.2)	306,962 (47.3)	312,145 (51.1)	312,906 (54.8)	1.5
Total	787,451 (100.0)	648,299 (100.0)	610,258 (100.0)	571,487 (100.0)	-3.5

복들이 수년간 반복되어지면 잡초는 저항성으로 변화한다. 최근에 농가당 벼 재배면적이 증가에 따른 Table 9는 우리나라 쌀 재배 농업인들에 대한 연령별 수를 비율로 나타낸 것이다. 전체적으로는 쌀 재배 농업인들의 수가 매년 평균 3.5%씩 감소하고 있다. 45세 이하 농업인들은 매년 평균 약 14% 감소하고 있으나 65세 이상 인구는 매년 1.5%씩 증가하여 쌀 재배 전체 농업인들 중에서 약 55%나 차지하고 있다. 65세 이상의 농업인들이 증가하는 것은 고령화로 인한 농가당 벼 재배면적 증가를 의미한다. 가구당 벼 재배면적이 증가하면 물관리가 부실하여 제초제 처리 후 잡초들이 재생되어 이들 잡초는 결국 저항성화 되거나 이미 저항성 잡초들이 발생하고 있는 논들은 더욱 높은 밀도로 발생하여 농수로 등을 통하여 이동한다.

Table 10은 우리나라 쌀 재배면적별 농가 수를 나타낸 것이다. 5ha 이하 농가들은 매년 감소하고 있으나 5 ha 이상 농가들은 지속적으로 증가하고 있다. 특히 10 ha 이상 벼 재배를 하는 농가는 매년 평균 약 13%씩 증가하고 있다. 이러한 경향은 농촌의 초 고령화로 더욱 빠르게 증가할 것이다. 그리고 또 다른 문제는 농촌 노동력 부족에 따른 제초제 제형의 개발 방향은 노동력 절감 즉 생력형으로 빠르게 변화하고 있다. 과거에는 대부분 수면 처리형인 입제를 사용하였으나 최근에는 점보제나 액상수화제로 변화하고 있다. 이들 생력제형들은 논 전체 제초제들 중에서 약 61%나 차지하고 있다(Korea Crop Protection Association, 2014). 생력제형들은 벼 필지 당 면적이 약 0.1~0.2ha 정도 사용하는 것이 적합하다. 우리나라와 같이 필지 당 규모가 큰 면적에는 처리 후 제초제들이 한 방향으로 몰리기 때문에 다른 방향의 잡초들은 약효가 낮아 잡초들이 저항성화 하가나 저항성잡초들이 우점하고 있는 논은 인근 논으로 확산하게 된다.

Table 10. Numbers by rice cultivation area-based farmhouse for rice production.

Division	2000	2005	2009	2013	Growth rate by year (%)
Average area per farmhouse (ha)	1.34	1.52	1.48	1.61	2.2
under 0.5	201,233(25.6)	195,101(29.6)	212,952(33.3)	184,436(32.3)	-1.5
0.5-1.0	235,300(29.9)	190,032(28.8)	185,299(29.0)	161,782(28.3)	-4.1
1.0-1.5	139,681(17.7)	106,789(16.2)	90,706(14.2)	83,076(14.5)	-5.0
1.5-2.0	80,730(10.3)	58,308(8.8)	49,406(7.7)	43,320(7.6)	-5.6
2.0-3.0	73,253(9.3)	55,366(8.4)	45,527(7.1)	43,348(7.6)	-4.2
3.0-5.0	40,612(5.2)	35,924(5.4)	33,679(5.3)	31,281(5.5)	-1.4
5-10	14,587(1.9)	6,233(2.5)	17,510(2.7)	20,046(3.5)	5.7
5.0-7.0	10,428(1.3)	11,028(1.7)	11,333(1.8)	12,761(2.2)	2.3
7.0-10.0	4,159(0.5)	5,195(0.8)	6,177(1.0)	7,285(1.3)	6.4
over 10	2,055(0.3)	2,406(0.4)	4,06(0.6)	4,198(0.7)	12.9
Total	787,451(100.)	660,149(100.)	639,141(100.)	571,487(100.)	-3.2

IV. SU계 제초제 저항성잡초의 발생 메카니즘

제초제 저항성은 제초제 연용에 의하여 제초제에 대한 반응이 변화된 상태라고 할 수가 있다. SU계 제초제들은 작용점인 ALS에 이들 제초제 활성이 나타내지 못하도록 변형됨으로써 저항성을 발현하는 것으로 보고되고 있다(Caroline, 1991; Gressel et al., 1990). 일본에서 확인된 대부분의 SU계 제초제들에 대한 잡초의 저항성 생태형은 감수성 생태형 보다 ALS 활성을 50% 억제하는 제초제 농도(I_{50})가 감수성 생태형보다도 100~1,000배정도 높았다고 보고되었다(Itoh, 2000; Heap, 1997; Koarai, 2000; Kohara et al., 1999; Yoshida et al., 1999). 미국과 유럽에서 발생된 SU계 제초제들에 대한 저항성 생태형 역시 감수성 생태형 보다 I_{50}이 훨씬 높게 나타난 것으로 보고되었다(Heap, 1997; Hensley, 1981). Table 11에서 보는 바와 같이 Park 등(2004)은 SU계 제초제들에 대한 저항성 물옥잠의 ALS 활성을 50% 억제하는 I_{50}를 감수성 계통과 비교한 결과 저항성 계통은 감수성 계통 보다 14~76배 높게 나타났다. 그러나 잡초 생태형간 ALS 활성반응 차이의 원인에 대해서는 확실하게 구명되지는 않았으나 작용점인 ALS 유전자 변형 즉 돌연변이에 의한 원인이 가장 설득력 있게 보고되고 있다(Park, 2004). 국내에서 Park 등(2003) 서산 간척지에서 발생한 SU계 제초제 저항성 및 감수성 생태형에 대한 방사선 화합물이 부착된 ^{14}C-bensulfuron-methyl의 이행 차이를 auto-radiograph로 본 결과, Fig. 5와 같이 생태형 간에 차이는 없었다. 그러나 ALS 유전자의 ANA 염기서열을 분석한 결과(Fig. 6), 저항성 생태형에서 점 돌연변이(point mutation)가 발생하였던 것을 확인할 수가 있었다(Park et al., 2003). 물옥잠의 식물체내에는 여러 가지 형태의 ALS 유전자가 존재할 수 있으며, 물옥잠 저항성 계통의 ALS 유전자는 Domain A 부분에 있는

Table 11. I_{50} ratio in growth reduction of sulfonylurea-susceptible and resistant *Monochoria korsakowii*.

Herbicide	I_{50} (nM)		Ratio (R/S)
	Resistant (R)	Susceptible (S)	
Azimsulfuron	1,021	72	14
Bensulfuron-methyl	529	7	76
Cinosulfuron	152	4	38
Ethoxysulfuron	882	39	27
Imazosulfuron	528	8	66
Pyrazosulfuron-ehtyl	372	6	62

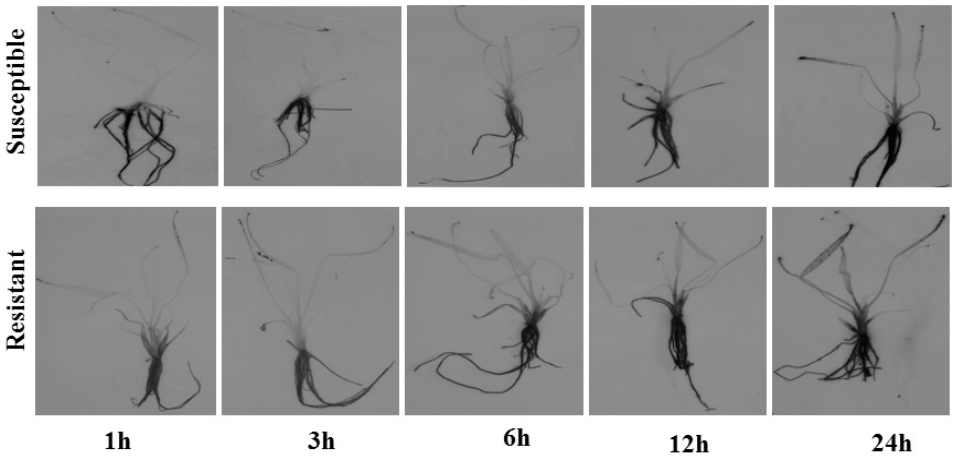

Fig. 5. Autoradiograph [^{14}C]bensulfuron-mrthyl to sulfonylurea-resistant *Monochoria korsakowii*.

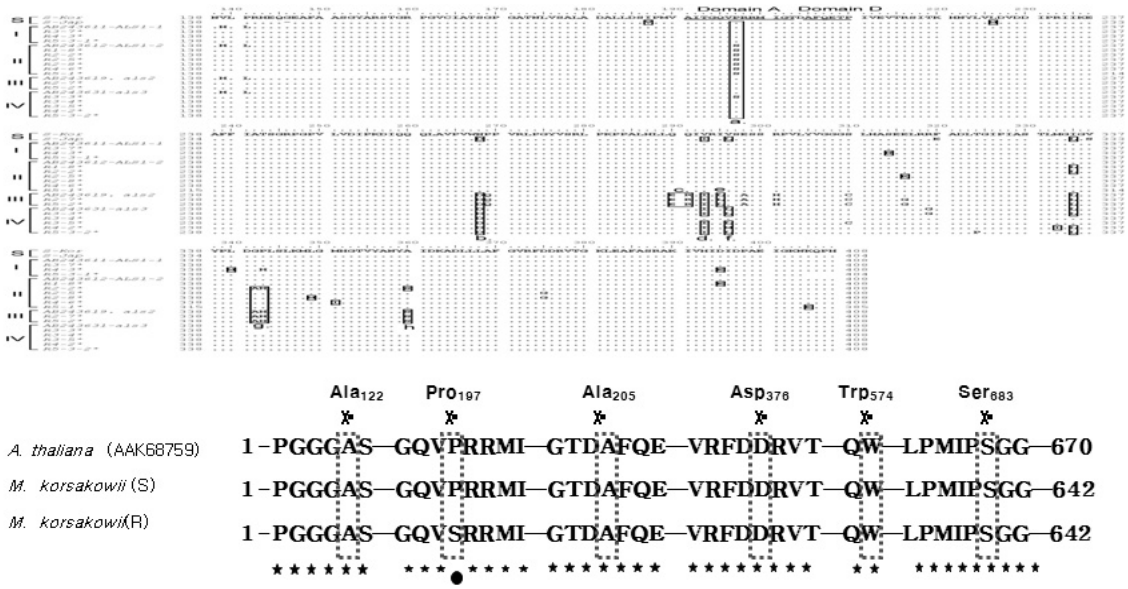

Fig. 6. Mutation points of ALS in sulfonylurea-resistant *Monochoria korsakowii*. S: S-type, R: R-type.

아미노산 197번째 proline이 하나의 염기서열이 치환된 점돌연변이(point mutation)에 의해 serine으로 변화되었기 때문이라고 하였다.

V. 제초제 저항성잡초 방제기술

경작지에서 제초제 저항성잡초가 발생되면 방제에 따른 생산비와 수량 감소가 필연적이고 제초제 저항성잡초가 일단 발생된 논은 토양 속에 많은 저항성잡초 종자가 포함되어 있기 때문에 기존에 사용되고 있는 제초제로는 방제가 불가능하기 때문에 저항성잡초 발생 예방이 무엇보다 중요하다. 논에서 제초제 저항성잡초 발생을 예방하기 위해서는 벼 재배방법을 바꿔가면서 지금까지 사용해 오던 다른 계통의 제초제를 교호적으로 사용하는 것이 가장 좋은 방법이다. 그러나 국내의 경우 벼 재배 및 제초제를 교호적으로 사용하는 것은 현실적으로 많은 홍보가 필요하다. 제초제는 제초제 저항성잡초가 빠르게 확산하고 있음에도 불구하고 대부분의 제초제들이 ALS 및 ACCase 저해제들로 합성되어 있다. 따라서 지금까지 사용되고 있던 SU계 제초제와 화본과잡초 방제약제의 2가지 성분이 혼합된 “일발처리제”로는 방제할 수 없으며 저항성잡초 방제 전문약제가 혼합된 3가지 이상 성분이 혼합된 약제를 선택적으로 사용하여야 한다. 그리고 저항성잡초 방제는 크게 제초제 저항성 피 발생 논과 저항성 피 이외 다른 잡초 발생 논으로 구분되

어야 한다.

1. 저항성 피 발생 논에서 방제

최근에 국내 논에서 저항성잡초 발생으로 인하여 제초제 사용량 및 사용횟수가 급격하게 증가하고 있다. 1999년부터 2009년까지 15년간 국내 논 면적은 약 17% 감소하였으나 제초제 사용량은 76%나 증가하였다(Korea Crop Protection Association, 2009). 그러나 저항성 피의 발생으로 인하여 더욱 빈번한 제초제 사용과 방제 효과 저조에 따른 수량감수가 나타날 수가 있다. 특히 지금까지 제초제 저항성 피 전용약제는 피 3~5엽기까지 방제가 가능하였으나 저항성 피를 대체할 수 있는 성분인 mefenacet, fentrazamide, carfenstrole는 피 2엽기까지만 방제가 가능하다(Iim, 2009). 따라서 이앙 후 10일 이내 특히 남부지역 및 2모작 지대에서는 이앙 후 7일 정도에 살포하여야한다. 그리고 일반적으로 저항성 피가 발생하고 있는 논은 피가 매우 높은 밀도로 우점하기 때문에 파종 및 이앙 전 초기 피 방제약제인 butachlor, oxadiazone, oxadiargyl, pretilachlor, thiobencarb를 처리하여야 한다(Table 12). 그리고 저항성 피가 발생하고 있는 논은 이미 저항성 물달개비, 올챙이고랭이 등의 잡초들이 복합적으로 발생하고 있기 때문에 저항성 피 전용약제에 benzobicyclone, bromobutide 등 전문약제들이 혼합된 약제를 혼용하여야 한다. 무엇보다도 중요한 점은 현재 벼 직파재배 논에서 발생하고 있는 제초제 저항성 피를 방제할 수 있는 중후기 제초제는 현재까지 없기 때문에 저항성 피가 발생하고 있는 논은 이듬해는 반드시 이앙 논으로 전환해야 한다. 또한 벼 직파재배를 2년 이상하고 있는 논은 반드시 기계이앙 논으로 전환한 다음, 피와 저항성잡초를 동시에 방제할 수 있는 약제를 처리하는 순환재배를 하여야만 한다.

2. 저항성 피를 제외한 저항성잡초 발생 논에서 방제

국내 논에서 SU계 제초제 저항성잡초인 물달개비, 올챙이고랭이 등이 확산되어지고 있었던 2000년대 초반은 하나의 논 필지에 하나의 저항성잡초 초종이 발생하고 있었다. 따라서 특정 저항성잡초를 방제하기 위해서는 방제 가능한 특정 제초제들이 혼합된 제초제 품목을 선택하여 처리하면 되었다. 그러나 최근에는 동일 필지에 물달개비와 올챙이고랭이 등의 저항성잡초들이 동시에 발생하고 있기 때문에 이들 잡초들을 동시에 방제할 수 있는 제초제를 선택 살포하여야 한다. 예를 들면 SU계 저항성 물달개비의 단일 초종이 확산되고 있었던 2000년대 초반에는 저항성 물달개비에 효과적인 cafentrazone-ethyl 혼합제가 대체약제로 많이 사용되었다. 그러나 최근에는 광엽잡초인 물달개비 뿐만아니라 방동사니과인 올챙이고랭이 등이 동시적으로 발생하기 때문에 Table 13과 같이 이들 저항성잡초들을 동시적으로 방제할 수 있는 제초제 성분이 포함된 제초제 품목을 선택하여 살포하여야 한다.

Table 12. Herbicides to control the resistant *Echinochloa oryzicola* by leaf stage to ALS- and ACCase inhibitors in paddy rice.

Leaf stage	Herbicide
0~0.5	butachlor, oxadiazone, oxadiargyl, pretilachlor, thiobencarb
1~2	mefenacet, fentrazamide, carfenstrole

Table 13. Effect of herbicides having different mode of action from the sulfonylurea to the sulfonylurea-resistant weeds confirmed in paddy rice fields, Korea.

Weed	Herbicide
Monochoria korsakowii	oxadiazone, butachlor, pretilachlor, benzobicyclone, carfentrazone[1)], pyrazolate
Monochoria vaginalis	oxadiazone, buromobutide, butachlor, fentrazamide, mefenacet, pretilachlor, thiobencarb, benzobicyclone, carfentrazone, mesotrione, pyrazolate
Scirpus juncoides	butachlor, pretilachlor, pyrazolate, thiobencarb, benzobicyclone, buromobutide, mesotrione
Scirpus pigmaea	benzobicyclone, carfentrazone, pyrazolate
Scirpus paniculmis	benzobicyclone

[1)]Boldfaces are herbicides for control of early and middle leaf stage(2~3 leaf stage).

VI. 향후 개선 방안

국내 논에서 제초제 저항성잡초 초종별 대체약제 개발과 사용에도 불구하고 앞으로 많은 문제점과 해결하여야할 난관들이 매우 많다. 제초제 저항성잡초에 의해서 국내 논 제초제 사용량은 1995년부터 2009년까지 15년간 국내의 논 면적은 약 17% 감소하였으나 제초제 사용량은 약 76%나 증가하였다. 앞으로 이러한 현상은 가속될 뿐만 아니라 ACCase 및 ALS 저해제들에 대한 저항성 피의 발생으로 제초제 사용량 및 사용횟수는 훨씬 증가할 것으로 생각된다. 따라서 논 제초제 저항성잡초 발생에 따른 문제점들은 첫째, 저항성잡초들은 매년 매우 빠르게 확산될 것으로 생각된다. Table 14와 15에서 보는 바와 같이 SU계 제초제들에 대한 저항성잡초들과 ALS 및 ACCase 저해제들에 대한 저항성 피가 확산하고 있음에도 불구하고 SU계 제초제들의 혼합 제초제들과 ACCase 및 ALS 저해제들이 혼합된 제초제 품목들이 여전히 매우 높은 선호도로 판매되고 있는 실정이다. 뿐만 아니라 SU계 혼합 제초제들은 논 전체 등록 제초제 중 약 70%를 차지하고 있고, 피 방제를 위한 ALS 및 ACCase 저해 제초제들은 국내 전체 논 제초제들 40% 이상이나 차지하고 있다. 둘째, 최근 제초제 전문 약제로 많은 물량이 판매되고 있는 엽록소 저해제인 benzobicyclone과 mesotrione은 다수확 품종인 통일형 품종과 찰벼, 흑미 품종에 약해가 발생하여 많은 민원이 발생하고 있다. 셋째, 국내 논에서 저항성잡초 발생에 의한 제초제 사용량이 급격히 증가하고 있음에도 불구하고 미국과 유럽(HRAC, Herbicide Resistance Action Committee), 호주(WAHRI, Western Australian Herbicide Resistance Initiative) 등 선진국들과 같은 저항성잡초 연구를 위한 연구하는 전문기관이 없을 뿐만 아니라 연구 인력이 많이 부족한 실정이다. 그러나 이러한 어려운 상황일수록 국립연구기관, 대학교 연구소, 농약회사 그리고 농업인들의 긴

Table 14. Top ten of herbicides by applied area in paddy field of Korea (KCPA 2010).

No.	Herbicide
1	benzobicyclon·imazosulfuron·penoxsulam SC
2	pyrazosulfuron·mefenacet
3	benzobicyclon·penoxsulam SC
4	benzobicyclon·bensulfuron·mefenacet SC
5	carfentrazone·cyclosulfamuron·pyriminobac SC
6	carfentrazone·azimsulfuron·metamifop GR
7	benzobicyclon·flucetosulfuron JB
8	imazosulfuron·mefenacet SC
9	benzobicyclon·imazosulfuron·pyriminobac SC
10	carfetrazone·imazosulfuron·flucetosulfuron GR

Table 15. Number of ALS- and ACCase-inhibitors reserved to control the barnyardgrass in paddy field of Korea (KCPA 2010).

Herbicide	Number of item	Application time	
		3rd leaf stage	5th leaf stage
Azimsulfuron	1	1	0
Cyhalofop-butyl	5	2	3
Fenoxaprofop-P-ethyl	2	0	2
Flucetosulfuron	15	14	1
Halosulfamuron	1	1	0
Metamifop	7	4	3
Penoxsulam	21	19	2
Pyribenzoxim	2	0	2
Pyriminobac-methyl	34	34	0
Pyrazosulfuron-ethyl	1	1	0

밀한 유기적인 상호협력이 요구되고 있는 시점이다.

VII. 요 약

2014년까지 국내 논에서 sulfonylurea(SU)계 제초제들에 대한 저항성잡초로 확인된 잡초들 1998년도에 충남서산 간척지 논에서 물옥잠이 확인된 이후 일년생 물달개비, 올챙이고랭이, 알방동사니 등 9초종, 다년생 올미, 새섬매자기 등 다년생 잡초 4초종이 발생하여 총 13초종이다. 그리고 2009년 ACCase 및 ALS 저해제들에 대한 저항성 피가 담수직파 논의 서·남부지역에서 처음 확인되었다. 초기에는 SU계 제초제들에 대한 저항성잡초들인 물달개비, 올챙이고랭이, 알방동사니 등은 하나의 논 필지에 하나의 초종들이 발생을 하였으나 최근에는 하나의 필지에 다수의 초종들이 동시적으로 발생하고 있다. 저항성잡초들의 생체중 50%를 억제하는 제초제 농도(GR_{50})는 저항성 계통이 감수성 계통에 비해 수 십배에서 수 천배 높게 나타났다. ACCase 및 ALS 저해 제초제들인 *cy*halofop-butyl, pyriminobac-methyl, penoxsulam 저항성 강피에 대한 저항성 계통의 GR_{50}은 감수성 계통에 비해 각각 14, 8, 11배나 높게 나타났다. 국내의 논에서 제초제 저항성의 다발생과 확산의 원인은 크게 잡초측면과 제초제 측면으로 구분할 수 있다. 잡초측면에서는 종자생산량과 발아율이 높은 잡초들 즉 물달개비, 올챙이고랭이 등이 저항성잡초로 변화한다. 그리고 제초제 측면은 저항성잡초 유발의 원인인 선택성이 탁월하고 약효지속성이 매우 긴 SU계 제초제들의 광범위한 사용이다. SU계 제초제들의 생산 품목들과 처리 논 면적의 비율은 각각 69%와 96%이다. 그리고 2003년까지 처리면적으로 본 선호도 10위까지 제초제들은 대부분 SU계 제초제들이 혼합된 "일발처리제"들이다. 직파재배 논에서 ACCase 및 ALS들이 혼합된 제초제들의 연용은 제초제 저항성 피를 유발하였고, 이는 피에 효과적인 SU계 제초제들인 pyrazosulfuron-ethyl 및 imazosulfuron과 무관하지 않다. SU계 제초제들에 대한 물옥잠의 저항성 계통의 I_{50}은 감수성 계통에 비해서 14배에서 76배 높았는데, 이는 제초제의 흡수 및 이행에 의한 차이보다는 ALS 유전자의 점 돌연변이(point mutation)에 의한 것으로 나타났다. 즉 ALS 유전자 아미노산 197번째 proline이 serine로 변화되었기 때문이다. 제초제 저항성잡초 방제로 benzobicyclone, bromobutide 등은 광엽 및 방동사니과 잡초들을 동시에 방제가 가능하다. 그리고 ACCase 및 ALS 저항성 피의 방제는 mefenacet, fentrazamide, cafenstrole로 2엽기까지 방제가 가능하다. 그러나 앞으로 국내 논에서 제초제 저항성잡초의 관리에 대해서는 많은 문제점들을 내포하고 있다. 첫째, 현재까지 제초제 저항성 유발 약제들인 ALS 및 ACCase 저해제들의 사용량이 증가하기 때문에 제초제 저항성 잡초들은 계속 발생할 뿐만 아니라 더욱 빠른 속도로 확산할 것이다. 둘째, 미국, 유럽, 호주 등 선진국들과 같은 제초제 저항성 잡초를 연구할 수 있는 전문 연구기관과 인력이 부족하다.

감사의 글

본 성과물은(논문, 산업재산권, 품종보호권 등)은 농촌진흥청 연구사업(세부과제명: 주요 논 잡초 발생 및 군락변화 예측 연구, 세부과제번호: PJ01052603)의 지원에 의해 이루어진 것임.

참 고 문 헌

Caroline S. 1991. Sulfonylurea herbicides. PJB publications. pp. 51-60.

Durner J, Gailus V, Boger P. 1991. New aspects on inhibition of plant acetolactate synthase by chlorsulfuron and imazaquin. Plant Physiology 95:1144-1150.

Gressel J, Segel LA. 1990. Modelling for the effectiveness of herbicide rotations and mixtures as strategies to delay or preclude resistance. Weed Technology 4:186-198.

Heap I. 1997. The occurrence of herbicide-resistant weeds worldwide. Pesticide Science 51:235-243.

Heap I. 2014. International survey of herbicide resistant weeds. http://www.weedscience.org/in.asp

Hensley JR. 1981. A method for identification of triazine resistant and susceptible biotypes of several weeds. Weed Science 29:70-73.

Iim IB. 2009. Control and emergence of herbicide resistant *Echinochloa oryzicola* in paddy field of Korea. Korean Journal of weed Science 29(Supp.2):103-104.

Itoh K. 2000. Relationship between breeding system and gene dispersal of sulfonylurea resistant paddy weeds. *In.* 3rd International Weed Science Congress held at Foz Do Iguassu, Brazil. pp. 144-145.

Koarai A. 2000. Dianosis of susceptibility of sulfonylurea herbicides on *Monochoria vaginalis*, an annual paddy weed in Japan. Journal of Weed Science and Technology 45(1): 40-41.

Korea Crop Protection Association. 2009. http://www.koreacpa.org/

Korea Crop Protection Association. 2014. http://www.koreacpa.org/

Kuk YI. 2002. Control of sulfonylurea herbicide-resistant *lindernia dubia* in Korea rice culture. Korean Journal of Crop Science 47(4):328-334.

LeBaron HM. 1991. Distribution and seriousness of herbicide-resistant weed infestations worldwide. pp. 27-55. *In*. J. C. Caseley, G. W. Cussans, and R. K. Atkin, Herbicide resistance in Weeds and Crops. Butterworth Heinemann, Oxford.

Lee IY, Won TJ, Seo YH, Kim EJ, Yun YT, Park JE. 2013. Occurrence trends of SU-herbicide resistant weeds in paddy fields in Korea. Weed&Turfgrass science 2(3):318-321.

Lim SH, Park MW, Yook MJ, Kim DS. 2009. Resistance ACCase inhibitor cyhalofop-butyl in *Echnochloa crus-galli* collected in Seosan, Korea. Korean Journal of Weed Science 29(2):178-184.

Lovell ST, Wax LM, Simpson DM, McGlamery M. 1996. Using the *in vivo* acetolactate synthase (ALS) assay for identifying herbicide-resistant weeds. Weed Technology 10:936-942.

Ohmes GA, Kendig A. 1999. Inheritance of an ALS -cross-resistant common cocklebur (*Xanthium strumarium*) biotype. Weed Technology 13:100-103.

Park TS, Kim CS, Park JP, Oh YK, Kim KU. 1999. Resistant biotype of *Monochoria korsakowii* against sulfonylurea herbicides in the reclaimed paddy fields in Korea. Proc. 17th APWSS Conf. 251-254, Bangkok

Park TS, Lee SH, Park JE, Kim TW, Kim KU. 2003. Mechanism of sulfonylurea herbicide resistance in broadleaf weed, *Monochoria korsakowii*. Korean Journal of Pesticide Science 7(4):239-247.

Park TS. 2004. Identification of sulfonylurea-resistant biotype of *Scirpus planiculmis*. Pesticide Science (Korean) 8(4): 332-337.

Park TS, Koo BI, Kang SK, Choi MK, Ko JK. 2010. Response of the resistant biotype of *Echinochloa oryzicola* to ACCase and ALS inhibitors, and effect of alternative herbicides. Korean journal of Crop Science 30(3):291-299.

Park TS, Seong KY, Cho HS, Kim MH, Seo MC, Kang HW. 2014. The alternative herbicides and problems of herbicide resistant *Echinochloa oryzicola*, *Sagittaria trifolia* and *Ludwigia prostrata* under direct seeding flooded paddy surface. Korean Journal of Crop Science 34 suppl.(1):63

Saari LL, Cotterman JC, Primiani MM. 1990. Mechanism of sulfonylurea herbicide resistance in the broadleaf weed, *Kochia scoparia*. Plant Physiology 93:55-61.

Uchino G, Itoh K. 2000. Sulfonylurea resistant biotypes of *Lindernia* species in the Tohoku region and their response to several herbicides. Weed Research(Japan) 45(1):13-20.

Yoshida SK, Onodera T, Soeda Y, Takeda S, Watanabe H. 1999. Occurrence of *Scirpus juncodies* subsp. *ohwianus*, resistant to sulfonylurea herbicides in Miyagi prefecture. Journal of Weed Science & Technology 44:70-71.