



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

농학석사 학위논문

제초제 저항성 피의 발생
원인분석과 관리방안 연구

2013 년 2 월

서울대학교 대학원

식물생산과학부 작물생명과학 전공

배 도 찬

제초제 저항성 피의 발생 원인분석과 관리방안 연구

지도 교수 김도순

이 논문을 농학석사 학위논문으로 제출함
2012 년 11 월

서울대학교 대학원
식물생산과학부 작물생명과학 전공
배도찬

배도찬의 농학석사 학위논문을 인준함
2013 년 2 월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

본 연구는 최근 국내에서 문제가 되고 있는 제초제 저항성 피(*Echinochloa spp.*)의 발생 원인분석과 저항성 피의 관리방안 마련을 위해 수행되었다. 제초제 저항성 피 발생 원인은 제초제의 사용현황, 제초제의 등록 및 사용방법, 신규제초제의 개발등록 등의 측면에서 분석하였으며, 저항성 피의 관리방안 마련을 위해 대체 제초제의 선발평가를 통해 저항성 피 방제에 효과적인 대체 제초제를 제안하고 이를 중심으로 종합적인 저항성 피 관리방안을 제시하였다. ALS 저해 제초제가 처음 사용하기 시작된 1988년 이후 ALS저해 제초제가 포함된 일발처리제의 사용이 빠르게 증가하여 현재는 대부분의 논에 ALS 저해제가 포함된 일발처리제를 평균 1회 이상 사용하는 것으로 파악되었다. 초기 개발된 ALS 저해제는 피 방제효과가 낮아 주로 일년생 및 다년생 잡초의 방제를 목적으로 일발처리제에 삽입되었으며 1990년대 초에 사용이 시작된 ALS 저해제는 피 방제효과가 다소 개선되었으며, 1990년대 말 이후에 등록된 ALS 저해제는 피에 대한 탁월한 방제효과로 피 방제를 목적으로 삽입되어 사용되기 시작하였다. 결국 ALS 저해제의 사용이 피 방제효과가 낮은 것에서 높은 것으로 사용비중이 이동하면서 단계적 선택압(selection pressure)의 가중이 저항성 피 발생의 주요 원인으로 파악되었다. 특히 2000년대 이후 중후기 피 방제를 목적으로 등록 사용되기 시작한 pyriminobac-methyl, penoxsulam, flucetosulfuron 등의 ALS 저해제 사용확대가 ALS 저해제 저항성 피 발생의 주요인으로 파악되었다.

제초제 저항성 피를 방제할 수 있는 대체 제초제의 선발을 위해 다양한 작용기작을 갖는 32종의 단제 제초제를 제초제 저항성 강피와 물피 파종 후 5, 10, 15일 차에 처리하여 평가한 결과, 지질대사에 관여하는 VLCFAs 저해 제초제의 저항성 피 방제 효과가 우수하였으며, 특히 mefenacet가 탁월하였다. 또한 작용기작이 알려지지 않은 oxaziclomefone도 저항성 피 방제 효과가 우수하였다. 그러나 평가한 모든 제초제들이 피 파종 후 15일 차(피 3엽기)에 사용할 경우, 방제효과가 만족할만한 수준이 못되었다. 따라서 현재 등록된 제초제를 이용하여 저항성 피를 방제하기 위해서는 벼 이앙동시 또는 초기에 토양처리제를 처리한 후 피 2엽기 이내에 mefenacet와 같은 VLCFAs 저해제나 oxaziclomefone과 같이 다른 작용기작의 제초제를 체계적으로 처리하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 저항성 피의 효과적인 방제 관리를 위해 ALS 및 ACCase 저해 제초제가 삽입된 일발처리제의 사용비중 축소, 단제 제초제의 등록 및 사용 확대, 선발된 대체제초제의 체계처리 확대 등을 포함한 포괄적인 제초제 저항성 피 관리방안을 제시하였다.

주요어 : 강피, 물피, ALS 저해제, ACCase 저해제, 제초제 저항성, PPO, VLFAs

학 번 : 2010-21150

목 차

국문초록.....	i
목차	iii
표 목차	v
그림 목차.....	vii
1. 서론	1
2. 연구사	4
2.1 세계의 제초제 저항성 잡초	4
2.2 한국의 제초제 저항성 잡초	5
2.3 제초제 저항성 피.....	6
2.4 피의 발생과 피해.....	7
2.5 피 방제체계	9
3. 재료 및 방법	13
3.1 제초제 저항성 피 발생 원인분석.....	13
3.1.1 수도용 제초제의 개발 등록 현황 조사	13
3.1.2 ALS 및 ACCase 저해 제초제 사용 추이 조사.....	13
3.1.3 신규 개발 및 등록 예정 제초제 현황 조사	14
3.2 저항성 피 방제용 대체 제초제 선발시험	14
3.2.1 식물재료.....	14
3.2.2 제초제 처리 및 조사.....	15
3.2.3 통계분석.....	15
4. 결과 및 고찰.....	17
4.1 제초제 저항성 피 발생원인 분석.....	17
4.1.1 국내 제초제 등록현황	17
4.1.2 국내 ALS 저해 수도용 제초제 사용현황(1988~2011)	22

4.1.3 ACCase 저해 수단용 제초제 사용현황(1994~2009).....	23
4.1.4 피 방제효과별 ALS 저해 제초제 살포량분석	24
4.1.5 신규제초제 등록시험 현황(2010~2012)	26
4.1.6 제초제 저항성 피의 발생원인 예측	29
4.2 저항성 피 방제용 대체 제초제 선발	29
4.2.1 제초제 작용기작별 저항성 강피 방제효과.....	29
4.2.1.1 ALS 저해 제초제	29
4.2.1.2 ACCase 저해 제초제	31
4.2.1.3 VLCFAs & Lipid synthesis 저해 제초제.....	33
4.2.1.4 HPPD&Carotenoid biosynthesis 저해 제초제.....	35
4.2.1.5 PSII & PPO 저해 제초제	37
4.2.1.6 기타	39
4.2.2 제초제 작용기작별 저항성 물피 방제효과.....	41
4.2.2.1 ALS 저해 제초제	41
4.2.2.2 ACCase 저해 제초제	43
4.2.2.3 VLCFAs & Lipid synthesis 저해 제초제.....	45
4.2.2.4 HPPD&Carotenoid biosynthesis 저해 제초제.....	47
4.2.2.5 PSII & PPO 저해 제초제	49
4.2.2.6 기타	51
4.3 저항성 피 종합관리 대책.....	53
5. 결론	56
6. 참고문헌.....	58
부록	62
Abstract.....	70
감사의 글	73

표 목차

Table 1 Herbicide application method in machine transplanting rice cultivation in Korea	11
Table 2 Herbicide application method in water direct seeding rice cultivation in Korea	11
Table 3 List of herbicides tested in this study	16
Table 4 Number of herbicide products registered for rice cultivation in Korea in 1988, 2000 and 2012.....	19
Table 5 Number of herbicide products by application method and timing for rice cultivation in Korea	21
Table 6 Three herbicide groups classified base on their efficacies against <i>Echinochloa spp</i>	25
Table 7 ALS and ACCase inhibitor herbicides under registration trials in Korea during 2010~2012	27
Table A1 Visual efficacies of herbicides at their recommended dose applied at three different timings against resistant and susceptible biotypes of <i>Echinochloa oryzicola</i>	62
Table A2 Visual efficacies of herbicides at x 2 of their recommended dose applied at three different timings against resistant and susceptible biotypes of <i>Echinochloa oryzicola</i>	63
Table A3 Visual efficacies of herbicides at their recommended dose applied at three different timings against resistant and susceptible bio-types of <i>Echinochloa crus-galli</i>	64
Table A4 Visual efficacies of herbicides at x 2 of their recommended dose applied at three different timings against resistant and susceptible bio-types of <i>Echinochloa crus-galli</i>	65
Table A5 Fresh weights of resistant and susceptible biotypes of <i>Echinochloa oryzicola</i> applied with recommended doses herbicides	

at three different timings.....	66
Table A6 Fresh weights of resistant and susceptible biotypes of <i>Echinochloa oryzicola</i> applied with x 2 dose of recommended doses of herbicides at three different timings	67
Table A7 Fresh weights of resistant and susceptible bio-types of <i>Echinochloa crus-galli</i> applied with recommended doses herbicides at three different timings.....	68
Table A8 Fresh weights of resistant and susceptible bio-types of <i>Echinochloa crus-galli</i> applied with x 2 dose of recommended doses of herbicides at three different timings	69

그림 목차

Figure 1 Application area of ALS inhibitor herbicides from 1988 to 2011	23
Figure 2 Application area of ACCase inhibitor herbicides from 1994 to 2009	24
Figure 3 Accumulated application area of ALS inhibitor herbicides classified into 3 efficacy groups based on their efficacy against <i>E. crus-galli</i>	26
Figure 4 Number of product under registration trials in Korea during 2010~2012 (A: ALS inhibitor, B: ACCase inhibitor, C1: PSII inhibitor, E: PPO inhibitor, F2: HPPD inhibitor, F3: carotenoid biosynthesis inhibitor, K1: microtubule assembly inhibitor, K3: VLCFAs inhibitor, N: lipid synthesis inhibitor, O: synthetic auxins, Z: unknown)	28
Figure 5 Visual efficacies of ALS inhibitor herbicides against <i>Echinochloa oryzicola</i> at different dosages and application timings....	30
Figure 6 Visual efficacies of ACCase inhibitor herbicides against <i>Echinochloa oryzicola</i> at different dosages and application timings....	32
Figure 7 Visual efficacies of VLCFAs and lipid synthesis inhibitor herbicides against <i>Echinochloa oryzicola</i> at different dosages and application timings.....	34
Figure 8 Visual efficacies of HPPD and carotenoid biosynthesis inhibitor herbicides against <i>Echinochloa oryzicola</i> at different dosages and application timings	36
Figure 9 Visual efficacies of PSII and PPO inhibitor herbicides against <i>Echinochloa oryzicola</i> at different dosages and application timings....	38
Figure 10 Visual efficacies of microtubule assembly inhibitor and unknown mode of action herbicides against <i>Echinochloa oryzicola</i> at different dosages and application timings	40

Figure 11 Visual efficacies of ALS inhibitor herbicides against <i>Echinochloa crus-galli</i> var. <i>crus-galli</i> at different dosages and application timings.....	42
Figure 12 Visual efficacies of ACCase inhibitor herbicides against <i>Echinochloa crus-galli</i> var. <i>crus-galli</i> at different dosages and application timings.....	44
Figure 13 Visual efficacies of VLCFAs and lipid synthesis inhibitor herbicides against <i>Echinochloa crus-galli</i> var. <i>crus-galli</i> at different dosages and application timings.....	46
Figure 14 Visual efficacies of HPPD and carotenoid biosynthesis inhibitor herbicides against <i>Echinochloa crus-galli</i> var. <i>crus-galli</i> at different dosages and application timings	48
Figure 15 Visual efficacies of PSII and PPO inhibitor herbicides against <i>Echinochloa crus-galli</i> var. <i>crus-galli</i> at different dosages and application timings.....	50
Figure 16 Visual efficacies of microtubule assembly inhibitor and unknown mode of action herbicides against <i>Echinochloa crus-galli</i> var. <i>crus-galli</i> at different dosages and application timings.....	52

1. 서론

현재 제초제 저항성 잡초는 전 세계적으로 210 초종(396 생태형)이 약 670,000ha의 경작지에서 발생하였다고 보고되었다(Heap, 2013). 그리고, 한국에서의 저항성 잡초는 1998년 물옥잠(*Monochoria korsakowii*)가 SU(Sulfonyleurea)계 제초제에 저항성이 있다고 보고되면서 시작되었다(Park et al., 1999). 물옥잠 이후 현재까지 일년생 9초종, 다년생 2초종 등 총 11초종이 논에서 ALS (Acetolactate synthase, E.C. 2.2.1.6) 저해제 제초제 저항성 잡초로 보고되었다(박 등, 2011). 이러한 잡초들은 경합력이 높지 않고, 대체약제 등이 속속 개발되면서 저항성 잡초관리가 되어왔지만 2009년 ACCase(Acetyl CoA carboxylase, E.C. 6.4.1.2) 저해 제초제 저항성 물피(*Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli*)의 발표 이후(Im et al., 2009), 2010년 ALS 저해 제초제 저항성 강피(*Echinochloa oryzicola*)까지 보고되면서(강 등, 2010), 근본적인 제초제 저항성 피 방제 대책이 필요하게 되었다.

논에서 피는 우점도와 경합력에 있어 가장 치명적인 잡초로 인식되고 있다. 피의 발생빈도와 밀도는 건답직파에서 특히 높아 최우점 초종으로 전체 발생량의 최대 60% 이상을 차지하며(최 등, 1997), 1992년과 2000년에 전국적으로 실시한 잡초 실태 조사에서는 피가 논잡초 가운데 세 번째로 우점도가 높은 것으로 보고하였다(박 등, 2002). 피의 경합력은 단자엽 및 쌍자엽 잡초를 통틀어 가장 높은 잡초 중에 하나이며, 방제에 실패할 경우 평방미터당 4~8본만 발생되더라도 7~13%의 수량이 감소한다(문 등, 2006; Moon et al., 2011). 따라서 ACCase 및 ALS 저해

제초제 저항성 피의 출현은 향후 논 잡초방제에 있어 제초제 저항성 피 방제가 핵심요소임을 제시한다.

ALS 저해 제초제는 수도용 제초제로 1988년 bensulfuron-methyl과 1990년 pyrazosulfuron-ethyl이 사용된 이래, 2011년도 현재 연간 전체 처리면적은 142만 ha에 달하고 있어 국내 전체 논에 1회 이상 처리되었음을 시사한다. ALS 저해제는 광범위한 방제범위와 높은 방제효과로 광엽 및 다년생 잡초 방제에 집중적으로 사용되었으며, 특히 높은 다년생잡초 방제효과와 중간 정도의 피 방제효과가 있는 것으로 알려진 pyrazosulfuron-ethyl과 azimsulfuron의 비중이 높았다. 이는 1999년에 pyriminobac-methyl이 피 전문방제용으로 등록되어 사용되기 이전부터 피에 대한 방제효과가 있는 ALS 저해 제초제의 사용에 따라 보이지 않는 선택압(selection pressure)이 피에 가해졌음을 시사하며 저항성 피의 출현에도 기여했을 것으로 판단된다.

ACCase 저해 제초제는 1994년 fenoxaprop-P-ethyl이 국내에 처음 등록되어 사용이 되었고(한국작물보호협회, 1995), 이후 cyhalofop-butyl과 metamifop이 각각 1997년과 2008년에 등록되어 사용되고 있으며, 사용 면적은 2008년 기준으로 10만 ha에 달하고 있다. 대체적으로 후기 경엽처리용으로 사용되며, 피에 대한 방제효과가 매우 우수하여 논에서는 피 방제용으로 사용되고 있다. 특히 서산 현대농장과 같은 대규모 영농단지에서 연용되어 사용되었으며 이러한 강한 선택압의 가중이 ACCase 저해제 저항성 피의 출현의 원인으로 지목되고 있다.

다른 작용기작을 가진 제초제의 교호살포는 가장 일반적인 저항성 잡초관리 방안으로 인식되고 있다. 국내에서는 이미

이앙시기 전후인 이앙직전, 이앙동시 및 이앙직후에 일년생 및 피방제용으로 다양한 단제 제초제들이 사용되고 있고, 이앙후 7일 이후에는 일발처리용 합제 제초제들이 다양한 시기(초기: 이앙후 7-10일, 초중기: 이앙후 10-12일, 중기: 이앙후 12-15일, 중후기: 이앙후 15-20일)에 사용되고 있다. 특히, 이앙후 일발처리용 합제의 사용비중이 매우 높다. 하지만, 제초제 방제대책의 기본인 교호살포에 있어서 동일한 작용기작의 연용을 막는 것은 여러 작용기작의 제초제가 혼합된 합제가 아닌 서로 다른 작용기작의 제초제 단일성분의 단제를 선택적으로 사용했을 때만이 가능하다.

따라서 본 연구는 국내 논에서 발생한 ALS 및 ACCase 저해 제초제 저항성 피의 발생 원인을 수도용 제초제 등록 및 사용현황, 지난 24년간의 ALS 및 ACCase 저해 제초제의 사용측면에서 분석하고자 수행하였다. 또한 저항성 피를 방제할 수 있는 다른 작용기작의 대체 제초제를 선별하고 이를 중심으로 종합적인 저항성 피의 관리방안을 마련하기 위해 수행하였다.

2. 연구사

2.1 세계의 제초제 저항성 잡초

제초제 저항성이란 표준약량의 제초제를 처리한 후에도 식물이 살아남아 후대로 유전되는 성질을 말하며, 식물에서는 이러한 저항성이 자연적으로 발생하거나 또는 유전공학, 조직배양 및 돌연변이를 유도함으로써 발생하기도 한다(WSSA, 1998)

1945년 제초제가 사용되기 시작한 이래 1957년 2,4-D에 대해 하와이에서 최초로 보고되었고(Hilton, 1957), 1968년에 개쑥갓(*Senecio vulgaris*)에서 triazine계 제초제에 대한 제초제 저항성이 미국에서 최초로 확인되었다(Ryan, 1970). 1980년대 ALS저해제와 ACCase 저해제가 제초제로 본격적으로 사용되기 시작하면서 1990년대 저항성 잡초가 기하급수적으로 증가하였다. 특히 1996년 glyphosate 저항성 형질전환(LM)작물이 본격적으로 재배되면서 glyphosate 저항성 잡초가 LM작물 재배국가인 미국 등지에서 빠르게 증가하고 있으며, 기존의 제초제 저항성에 더해진 복합저항성(multiple resistance)의 양상으로 악화되어 새로운 국면을 맞이하고 있다(Green, 2007; Duke and Powles, 2009)..

현재까지 제초제 저항성 잡초는 전 세계적으로 210초종에 396 저항성 생태형에서 보고되었으며, 약 670,000ha의 경작지에서 발생하였다고 보고되었다(Heap, 2013). ALS 저해 제초제 저항성 잡초는 1984년 영국에서 chlorsulfuron 저항성 Blackgrass (*Alopecurus myosuroides*)가 보고된 이 후, 현재까지 총 129 초종이 보고되었다. ACCase 저해 제초제 저항성 잡초는 동일한 초종에서 같은 해에 보고된 이 후, 현재까지 42 초종이 보고되었다(Heap, 2013b).

2.2 한국의 제초제 저항성 잡초

1980년대 후반부터 한국에서 sulfonylurea (SU)계 제초제들이 본격적으로 개발 및 보급되기 시작하였고, 1990년대 초반부터 담수직파 및 어린모 기계이앙 재배면적이 급격히 증가하면서 SU계 제초제들과 피 중기 전용약제(molinate, mefenacet 등)가 혼합된 일발 처리제(one-shot herbicide)의 사용이 급격히 증가하였다. 광엽 및 방동사니과 잡초들에 탁월한 선택성과 약효지속성을 가지고 있는 SU계 제초제들이 혼합된 일발 처리제들이 광범위하게 연용되면서 이들 SU계 제초제들에 민감한 생태형들이 감소하고 상대적으로 저항성이 있는 생태형들이 선발 및 증가하면서 저항성화되기 시작하였다. 한국과 일본의 논에서 SU계 제초제들에 대한 저항성 물옥잠(*Monochoria kurosakowii*)이 처음으로 확인된 이후, 최근까지 이들 제초제들에 대한 저항성 초종과 발생면적은 급격하게 증가하고 있는 실정이다(미야하라 등, 1998; 박, 2008).

한국의 경우, 충남 서산 간척지 논에서 1998년에 물옥잠이 SU계 제초제 저항성 잡초로 처음 확인된 후(Park et al., 1999), 현재까지 물달개비, 올챙이고랭이, 물피, 및 강피 등 11 초종이 발생확인 되었으며(박 등, 2011), 특히 최근에는 국내에서 피 방제 약제로 광범위하게 사용되고 있는 ALS 저해제인 penoxsulam, flucetosulfuron과 pyriminobac-methyl 모두 저항성 지수가 3 이상으로 저항성이 있을 것으로 판단되었다(강 등, 2010). 또한 ACCase 저해제인 cyhalofop-butyl, fenoxaprop-P-ethyl 및 metamifop에 대한 저항성 강피와 물피가 발생되어 확산되고 있는 실정이다(Im et al., 2009).

2.3 제초제 저항성 피

피에 대한 제초제 저항성은 광합성 전자전달계 photosystem II 저해 제초제인 propanil 에 대하여 많이 보고되었다(Daou et al., 1999; Norsworthy et al., 2002). 콜롬비아와 중앙아메리카의 여러 나라에서는 열대피(*Echinochloa colona*)에서 propanil의 연용에 의한 저항성 피가 다발생 했으며(Garita et al., 1995; Garro et al., 1991; Kim et al., 2000), ACCase 저해 제초제인 fenoxaprop-P-ethyl에 대한 저항성 열대피는 코스타리카에서 1994년 보고되었다(Riches et al., 1996). 현재 아시아에서는 ACCase인 fenoxaprop-P-ethyl에 대한 저항성 물피(*E. crus-galli*)가 2001년 태국에서 보고되었으며(Maneechote, 2001), cyhalofop-butyl 저항성 물피가 2008년 한국에서도 보고되었다(Im et al., 2009). 이 밖에도 Valverde(1998)와 Fisher et al. (2000)은 코스타리카와 미국 캘리포니아 주에서 각각 ACCase 저해제들에 대한 저항성 피가 작용기작이 다른 제초제들에 대하여 다중저항성(multiple-resistance)을 보였다고 보고한 바 있다.

최근 한국에서는 ACCase 저해 제초제 및 ALS 저해제들에 대한 저항성 피의 출현이 보고되었다(Im et al., 2009). 한국의 경우, 저항성 강피가 우점하는 지역의 농가들은 1990년대 초반부터 직파재배로 벼를 재배하여 오던 농가들이다. 특히 이곳에서 사용한 무논골뿌림 방식은 1992년에 호남농업시험장에서 개발된 방식으로, 1993년부터 호남지방을 중심 재배면적이 지속적으로 증가하였다(강 등, 1999). 이들 농가는 담수 전 초중기 수면처리제를 살포하고 체계처리로 ACCase 저해 제초제인 cyhalofop-butyl나 ALS 저해 경엽처리제인 penoxsulam을 다시 살포하는 체계로 잡초를

방제하였다(박 등, 2010).

Im 등(2009)은 ACCase 저해 제초제인 fenoxaprop-P-ethyl를 다년간 살포한 충남 서산 간척지 논에서 수집한 물피가 cyhalofop-butyl에 대한 저항성이 있다고 보고하였다. 서산-5의 경우에는 R/S ratio가 90 이상으로 다른 ACCase 저해 제초제에 대해서도 교차저항성(cross-resistance)을 나타냈으며, 또한 화학구조적으로 유사한 AOPP계열의 fenoxaprop-P-ethyl과 metamifop에 대해서도 교차저항성이 있음을 확인하였다. 이 외에도 국내 피의 저해 제초제에 대한 저항성을 평가하려는 다양한 연구가 수행 중에 있다(강 등, 2010; 육 등, 2010). 이들 연구결과가 제초제 계열에 따른 다양한 저항성 정도 차이를 나타냄에 따라 저항성 여부의 명확한 판단과 저항성 정도 차이에 대한 원인 규명이 필요할 것으로 사료된다.

2.4 피의 발생과 피해

논에서 주요 잡초의 발생과 우점도는 벼의 재배양식, 잡초방제체계, 제초제 등의 변화와 연동하여 달라지고 있다. 논잡초 발생조사는 10년을 주기로 1971년부터 전국 규모로 실시되어 왔는데, 제초제 사용이 드물었던 1971년에는 주로 마디꽃, 쇠틸골, 물달개비 등의 일년생잡초가 우점종이었으며 피는 5번째로 높은 우점보를 보였다(최 등, 1973; 김, 1974). Butachlor를 비롯한 일년생 잡초용 제초제가 광범위하게 보급되기 시작한 1981년 조사에서는 물달개비와 올미, 벧풀 등 다년생잡초가 우점하였으며 피의 우점도는 10위 밖으로 낮아졌다(오 등, 1981). 1992년 조사에서는 올방개, 벧풀, 피, 너도방동사니, 여뀌바늘 순으로

우점하면서 피의 우점도가 상승하였다(김, 1992). 2000년부터 2001년까지 실시된 전국 논잡초 조사에서는 물달개비가 12.7%, 올방개와 피가 각각 9.5%의 우점도 순을 나타내면서 피 등 화분과잡초의 발생이 꾸준히 증가하는 경향을 보였다(박 등, 2002). 특히 최근 저항성 피의 발생이 문제가 되고 있는 호남지방의 경우, 1980년대 물달개비와 벧풀, 너도방동사니의 밀려 발생빈도가 높지 않아 기타 잡초 등으로 분류되었으나(오 등, 1981), 1992년에 전북에서는 6번째로 발생빈도가 높았고, 전남에서는 2번째로 발생빈도가 높게 나타나고 있다(박 등, 1995).

이러한 잡초의 발생양상 변화는 과거의 손제초에 의존하여 잡초방제를 했을 때부터 현재 제초제에 의존한 화학적 잡초방제 및 특정 제초제 연용에 따른 군락 연화 등에 의해 일어났다(김 등, 1992). 1970년대 이후 우리나라 논에서 일년생 잡초를 대상으로 하는 동일 연속적인 약제의 사용은 다년생잡초의 점증을 가져왔다. 1980년대 이후, 손이앙재배에서 기계이앙재배로 전환됨으로써 본답기간이 길어짐에 따라 잡초의 발생량이 많고 종류가 다양해졌다. 특히 1990년대에는 sulfonylurea계 혼합제초제, 즉 일발처리제가 많이 사용됨으로써 상대적으로 방제효과가 떨어지는 올방개나 벧풀 같은 다년생 잡초의 우점도가 더욱 높아지고 피를 비롯한 화분과 잡초의 발생비율도 높아지고 있다(이 등, 2006). 특히 벼의 재배법에 따라 잡초의 발생빈도와 피 발생 우점도가 서로 다르게 나타나고 있는데, 2001년 전국 논잡초 조사 결과 건답직파 및 담수직파에서 피는 각각 약 19%로 가장 높은 우점도를 나타냈으며, 이모작의 맥후답 재배지역에서는 발뚝외풀(19.2%), 물달개비(18.6%), 벧풀(9.0%)에 이어 피가 8.5%로

조사되면서 직파재배에서 피의 발생이 뚜렷히 높게 나타냈다(박 등, 2002). 또한 2001년 전라도 잡초 발생조사 결과에서는 잡초 발생빈도가 기계이앙의 경우 물달개비, 올방개, 피, 벧풀 순이었으며, 직파재배의 경우에는 담수직파 논에서는 사마귀풀, 피, 물달개비, 좁개구리밥, 밭뚝외풀 순으로, 건답직파 논에서는 피가 10.4%로 가장 높았으며 이후 한련초, 여뀌바늘, 사마귀풀 순으로 나타났다(임 등, 2003). 이러한 결과들은 담수된 논에 육묘 후 모내기로 이어지는 기계이앙 방식과 담수 혹은 건답 논에 직파되는 재배법의 차이에 의한 것으로, 벼와 잡초 사이의 초기 경합 및 담수유무에 따른 잡초발생의 변화로써, 피의 발생 및 피해에 무엇보다 물 관리 및 초기 경합을 피하는 것이 중요함을 의미한다.

피는 발생량 뿐만 아니라 벼와의 경합을 통한 벼의 수량감소 측면에서도 문제점이 매우 큰 잡초이다. 권 등(2006)은 담수직파 재배는 피의 발생밀도가 5 분 m^{-2} 일 경우 벼 수량은 11% 정도 감소하고, 100 분 m^{-2} 에서 벼 수량이 78%까지 감소되며, 피를 제거하는데 소요되는 경비를 물달개비와 비교한 결과 피의 경합력이 물달개비보다 약 17배 정도 높게 나타났다고 보고하였다. 이는 피가 국내 논잡초 중에서 벼에 대한 월등한 경합력을 나타내어 벼 수확량에 많은 피해를 주는 것을 의미하며(박 등, 2012), 최근의 연구결과에서 피의 경합에 따른 피해를 막기 위한 평방미터당 요방제 필요밀도는 1.2~1.4분/으로서 보고된 바 있다 (Moon et al., 2011)

2.5 피 방제체계

국내의 경우 손이앙과 기계이앙을 거쳐 직파재배로 변천되어

오는데, 이는 모든 잡초가 제초제를 통해 방제가 가능하다는 전제하에 실현 가능한 방식이었다. 그러나 경종적 방법을 제외한 제초제 처리만을 통한 잡초방제는 저항성 발현을 증대시켰으며 실제로 제초제 저항성 피가 문제가 되는 지역은 주로 직파재배를 하는 곳이 대부분이다. 저항성 피가 발생하는 전북 김제와 전남 일부 지역의 경우 저항성 강피가 우점하는 지역으로써 1993년부터 무논골뿌림이라는 직파농업을 사용한 곳이다(강 등, 1999). 이들 지역은 담수 전 초충기에 수면처리제를 살포하고 후기에 ACCase 저해 제초제나 ALS 저해제초제를 통해 경엽처리로 살아남은 피를 방제하였다(박 등, 2010). 이는 로터리 후 과중한 상태에서 입모를 위해 10~15일간 물리적 방제인 담수가 아닌 배수상태를 유지함으로써 피와 광엽잡초에 매우 좋은 조건을 제공함으로써, 높은 밀도로 발생하게 된다. 1990년대 초반부터 사용해온 기존의 체계처리는 매우 효과적이었는지 모르지만, 발생밀도가 높은 곳에 지속적으로 동일한 제초제를 살포하여 국내에서 저항성피의 발현을 위한 선택압에 더욱 큰 영향을 받았을 가능성이 있다.

국내에서 저항성피의 체계처리를 알아보기 위해서는 현재 사용되고 있는 체계처리 방법을 확인해야 한다. Table 1, 2는 국내의 대표적인 경작법으로 기계이앙법과 담수직파법에서의 잡초방제 체계를 나타낸 것이다(임, 2008).

Table 1 Herbicide application method in machine transplanting rice cultivation in Korea

Timing Type	PRE	POST			
		Early	Mid	Late	Very Late
	0 DAT	5~10 DAT	10~15 DAT	25~30 DTS	40~50 DAT
One shot		A 1st	B 1st	C st	
Type ①	D 1st	D 2nd			
Type ②	E 1st	F 1st	E 2nd		F 2nd
Type ③	G 1st		H 1st	G 2nd	H 2nd

이앙재배의 논 잡초방제는 발생잡초 및 발생량에 따른 효과적인 방제방법이 구축되어 있으며, 다년생잡초의 발생여부와 저항성잡초의 발생여부, 그리고 후기 피의 발생이 많을 경우 등의 농가 각각의 논에 알맞은 합리적인 잡초방제체계와 제초제 선택을 통해 최소의 비용으로 기대하는 방제효과를 얻을 수 있다. 이앙재배의 경우 일발처리제의 사용하여 단 한번 잡초방제를 실시하거나 이앙전처리제의 사용시에는 초중기나 중기 이후에 2차 약제살포가 이루어지는 특징이 있다.

Table 2 Herbicide application method in water direct seeding rice cultivation in Korea

Timing Type	PRE	POST				
		Early	Mid	Late	Very Late	
	pre	10~12 DAS	15 DAS	30 DAS	20 days after 1st treatment	50 DAS
One shot		A 1st	B 1st			
Type ①	C 1st	C 2nd	D 1st		D 2nd	
Type ②	E 1st	F 1st	E 2nd			F 2nd
Type ③	G 1st	I 1st	H 1st	G 2nd	I 2nd	H 2nd

담수직과의 경우는 논 조건은 이양재배와 같으나 종자를 직접 뿌리는 것으로 잡초와 벼의 초기경합이 심하고 벼의 입모가 어린 상태에서 제초제를 살포하여 약해의 우려가 있다. 벼가 완전히 착근한 후 너무 늦게 살포를 할 경우 잡초방제에 실패할 수 있다. 잡초의 종류 및 발생상태를 고려하여 제초제를 선택해야 하며 수면 토양처리형 제초제를 살포한 다음에는 10일 이상 논바닥이 노출되지 않도록 물관리를 해야 한다.

건답직과의 경우 가장 생력화된 벼 재배방법으로 미국의 대규모 조방적 농업 방식으로써 파종 후 20~30일의 건답기간과 이후의 일반적인 담수기간으로 나뉜다. 담수조건이라는 경종적 방제를 사용하지 못하기에 잡초의 발생이 많고 특히 피의 피해가 커서 초기 건답기간에 벼와 경합을 벌일 피를 비롯한 다양한 잡초를 방제하는 것이 관건이다.

3. 재료 및 방법

3.1 제초제 저항성 피 발생 원인 분석

제초제 저항성 피 발생원인을 국내 수도용 제초제의 품목변화, 사용방법의 변화, 제초제 사용 추이 등 사회경제학적 측면에서 조사 분석하였다.

3.1.1 수도용 제초제의 개발 등록 현황 조사

1988년 ALS 저해 제초제가 처음 사용된 이래로 수도용 제초제의 개발 등록 추이를 파악하기 위하여 1988년, 2000년, 2012년의 수도용 제초제의 등록현황을 분석하였다. 수도용 제초제 등록현황은 해당연도에 등록된 제초제 품목내역이 수록된 작물보호제 사용지침서(농약공업협회, 1988, 2000b; 한국작물보호협회, 2012b)를 이용하여 단제와 일발처리용 합제가 차지하는 구성비, ALS 및 ACCase 저해 제초제가 차지하는 비율 등을 조사 및 분석하였다. 또한 현재 2012년 기준 기계이앙, 담수직파, 건답직파의 재배방법에 따른 처리시기에 등록된 제초제의 구성비를 정리하였다.

3.1.2 ALS 및 ACCase 저해 제초제 사용 추이 조사

ALS 및 ACCase 저해제 저항성 피 발생의 주 원인으로 추정되는 이들 저해제의 지속적 사용에 따른 선택압 가중 여부를 판단하기 위하여 이들 저해 제초제의 사용추이를 1988년이래 2011년까지 24년 간의 자료를 조사하였다. 제초제 사용현황은 농약연보(작물보호협회)에 수록된 농약의 품목별 생산출하량,

국내합성원제의 생산출하량 및 농약원제 수입량 등을 분석하여 추정하였으며 처리면적으로 환산하였다. 각 제초제 원제별 처리면적은 국내합성원제 출하량과 해외수입원제 수입량의 합(g)을 원제별 추천사용량(g a.i./ha)으로 나누어 다음의 식과 같이 환산하였다.

$$\text{처리면적(ha)} = \left\{ \left(\text{수입원제량(g)} \times \text{합량(\%)} \right) + \left(\text{국내생산원제량(g)} \times \text{합량(\%)} \right) \right\} / \text{추천사용량(g a. i./ha)}$$

3.1.3 신규 개발 및 등록 예정 제초제 현황 조사

한국작물보호협회는 국내에서 농약등록을 위한 필요한 약효 약해 시험성적서를 시험기관에 의뢰하기 전에 매년 두 차례에 걸쳐 설계심의회를 개최하고 각 분야별 시험설계 심의위원을 통해 설계서를 검토받아 이를 바탕으로 공공시험(2년차 시험)과 자체 시험(1년차 시험)의 설계서를 책자로 발간한다. 이 시험설계서의 제초제 시험항목 중에서 예비시험을 거친 등록최종단계 시험이라고 할 수 있는 2년차 시험추진 내역만을 선별적으로 분석함으로써 익년도 출시를 목적으로 개발되는 제초제에 대해 조사하였다.

3.2 저항성 피 방제용 대체 제초제 선발시험

이 실험은 수원에 위치한 서울대학교 농업생명과학대학 부속 실험실습장의 온실 내에서 수행되었다.

3.2.1 식물재료

각 제초제에 대한 저항성 강피 및 물피의 방제효과를 평가하기 위하여 ALS 저해 제초제 저항성 강피(Gimje)와 감수성 강피(Suwon), ACCase 저해 제초제 저항성 물피(Seosan-5)와 감수성

물피(Suwon)를 사용하였다.

3.2.2 제초제 처리 및 조사

150 cm²의 사각 포트를 4등분 하여, 구획을 나누었으며, 각 구획에 평균 김제강피 10.68g, 수원강피 10.71g, 서산물피 9.40g, 및 수원물피 10.78g을 받아올이 고르게 파종하였다. 관수량은 2 cm를 유지하였다.

파종 후 5, 10, 및 15일차(days after sowing, DAS)에 총 32개의 단제 제초제(Table 3)를 기준량(recommended dose)과 기준량의 2배량으로 토양처리하였다. 본 실험에서 사용한 총 32개의 약제는 개발 중이거나 장기 미생산 등으로 구입할 수 없는 약제를 포함해 해당회사의 시제품 및 해당제품 관련사의 이화학연구실의 제조공정을 통해 약제를 수급하였다. 제초제는 총 10개의 그룹으로 나뉘어졌으며, mode of action에 따른 HRAC group으로 구분하였다.

토양처리 후 30일차에 달관조사와 생체중을 조사하였으며, 모든 실험은 3반복으로 실시되었다.

3.2.3 통계분석

모든 통계는 달관조사 및 생체중 결과를 바탕으로 ANOVA 분석을 통해 각각의 LSD를 계산하였다.

Table 3 List of herbicides tested in this study

HRAC Group	Mode of Action	Herbicide	% content	Formulation	Application method	Rate (g a.i./ha)	
						Standard dose	x2 dose
A	Inhibition of acetyl CoA carboxylase (ACCase)	Cyhalofop	1.8	GR	Soil	18	36
		Metamifop	0.3	GR	Soil	9	18
B	Inhibition of acetolactate synthase (ALS)	Azimsulfuron	0.05	GR	Soil	1.5	3
		Flucetosulfuron	50	WP	Soil	2.1	4.2
		Imazosulfuron	0.25	SC	Soil	7.5	15
		Penoxsulam	0.12	GR	Soil	3.6	7.2
		Propyrisulfuron	0.25	GR	Soil	7.5	15
		Pyrazosulfuron-ethyl	0.1	GR	Soil	3	6
		Pyriftalid	0.6	SC	Soil	18	36
		Pyriminobac-methyl	0.1	GR	Soil	3	6
C1	Inhibition of photosystem II	Pyrimisulfan	1	SC	Soil	5	10
		Dimethametryn	0.5	GR	Soil	21	42
E	Inhibition of protoporphyrinogen IX oxidase (PPO)	Oxadiazon	1.7	EC	Soil	6.8	13.6
		Pentoxazone	12	EC	Soil	48	96
F2	Inhibition of 4-hydroxyphenyl-pyruvate-dioxygenase (4-HPPD)	Pentoxazone	5	SC	Soil	20	40
		Benzobicyclon	3.5	SC	Soil	14	28
		Mesotrione	0.3	GR	Soil	9	18
F3	Inhibition of carotenoid biosynthesis	Pyrazolynate	36	SC	Soil	180	360
		Tefuryltrione	0.7	GR	Soil	21	42
		Clomazone	2.5	EC	Soil	10	20
K1	Microtubule assembly inhibition	Dithiopyr	38	SC	Soil	9	18
K3	Inhibition of very long chain fatty acid synthesis (VLCFAs)	Butachlor	33	EW	Soil	150	300
		Cafenstrole	8	SC	Soil	24	48
		Fentrazamide	3.92	SC	Soil	9.5	19
		Mefenacet	3.5	SC	Soil	105	210
N	Inhibition of lipid synthesis	Pretilachlor	37	EW	Soil	55.5	111
		Benfuresate	1	GR	Soil	45	90
		Esprocarb	5	GR	Soil	150	300
Z	Unknown	Thiobencarb	7	GR	Soil	210	420
		Bromobutide	3	SC	Soil	90	180
		Indanofan	0.43	GR	Soil	12.9	25.8
		Oxaziclomefone	2	SC	Soil	6	12

4. 결과 및 고찰

4.1 제초제 저항성 피 발생원인 분석

4.1.1 국내 제초제 등록현황

국내 수도용 제초제의 전체등록현황과 ALS 및 ACCase 저해 제초제가 포함된 구성비를 1998년, 2000년, 2012년을 기준으로 12년 간격으로 조사하였다(Table 4). 전체 품목 수는 크게 유효성분 (active ingredient; a.i.)의 조합만으로 구분한 품목(a.i. product)과 이러한 조합에 제형 및 성분비에 따라 생산된 제품(formulated product)별로 구분을 달리하였다.

또한 현재 2012년 기준 기계이앙, 담수직파, 건답직파의 재배방법에 따른 처리시기에 등록된 제초제 각각의 구성비를 정리하였다.

지난 1988년과 2000년 농약사용지침서(농약공업협회, 1988, 2000b)를 검토한 결과 1988년 제초제의 종류는 총 32종이었으며 이중 20개 품목이 단제성분이었다. ALS 저해 제초제는 bensulfuron-methyl이 유일하였으며, 2중 혼합제에 ALS 저해 제초제가 포함된 것은 1 품목(bensulfuron-methyl + butachlor)으로 유일하였다(Table 4). 이후 1995년 농약품목 고시제가 품목등록제로 바뀌어 제품개발의 자율화가 이루어지면서 제초제의 등록건수는 늘어난다. 이후 2000년도 농약사용지침서에는 119 개 조합의 총 138품목의 제초제가 등록되었다. 119 개의 제초제 조합 중에는 79%에 달하는 94개 품목이 2중 이상의 혼합제로 개발되었으며, ALS 저해 제초제 및 ACCase 저해 제초제가 포함된 비율은 각각

65.5%와 13.4%로 높은 비중을 나타낸다(Table 4).

2012년 작물보호제 지침서(한국작물보호협회, 2012b)를 통해 조사한 국내에 등록된 수도용 제초제의 품목 수는 총 271종이다(Table 4). 단제는 37 품목이 등록되어있으며, 2중, 3중 및 4중 혼합제는 각각 119, 114 및 1 품목이 등록되어 있었다. 여기에서 품목별 제형 및 함량만이 다르고 성분조합이 동일한 경우 a.i.의 조합에 따라 분류하면 이들보다 더욱 감소하게 된다. 이는 동일한 유효성분으로 이루어진 품목일 경우라도, 제형이 다르거나 각각의 함량이 다를 경우 각각 다른 품목으로 구분되기 때문이다.

국내에 등록된 제초제의 ALS 및 ACCase 저해 제초제를 포함한 비율을 조사해 본 결과 ALS 저해 제초제가 단제 3품목, 2중 혼합제 54품목, 3중 혼합제 91품목, 4중 혼합제 1품목에 등록되어 있었다. 전체 제초제 중 71.3%에 해당하는 149품목에 ALS 저해 제초제가 포함되어 있고, 6.2%에 해당하는 13품목에 ACCase 저해 제초제가 포함되었다.

Table 4 Number of herbicide products registered for rice cultivation in Korea in 1988, 2000 and 2012

Mixture type	No. of formulated products ^a	No. of a.i. products ^b (% of total)	No. of ALS inhibitor (% of ALS)	No. of ACCase inhibitor (% of ACCase)
Paddy herbicides registered in 1988				
1 way (solo)	20	18 (66.7)	1 (3.3)	0 (0.0)
2 way mixture	12	12 (33.3)	1 (3.3)	0 (0.0)
3 way mixture	0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
4 way mixture	0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
Total (1998)	32	30 (100.0)	2 (6.6)	0 (0.0)
Paddy herbicides registered in 2000				
1 way (solo)	30	25 (21.0)	2 (1.7)	2 (1.7)
2 way mixture	76	66 (55.5)	48 (40.3)	5 (4.2)
3 way mixture	32	28 (23.5)	28 (23.5)	9 (7.6)
4 way mixture	0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
Total (2000)	138	119 (100.0)	78 (65.5)	16 (13.4)
Paddy herbicides registered in 2012				
1 way (solo)	37	24 (11.5)	3 (1.4)	3 (1.4)
2 way mixture	119	87 (41.6)	54 (25.8)	4 (1.9)
3 way mixture	114	97 (46.4)	91 (43.5)	6 (2.9)
4 way mixture	1	1 (0.5)	1 (0.5)	0 (0.0)
Total (2012)	271	209 (100.0)	149 (71.3)	13 (6.2)

^aNo. of formulated products includes different formulation products with the same a.i. product .

^bNo. of a.i. products includes only a.i. products.

현재 국내에 등록된 271종의 품목은 총 365개의 방법으로 기계이양, 담수직파, 건답직파의 재배방식에 따라 사용할 수 있게 등록이 되어있다(Table 5). 동일한 한 품목의 제조제도 등록시함을 거쳐 기계이양, 담수직파, 건답직파의 재배방법에 따라 처리시기를 같거나 혹은 다르게 하여 등록이 가능하므로 전체 품목 수는 271개이지만 재배방법에 따른 처리시기별로 구분한 숫자는 365개로 증가하게 된다. 이를 통해 기계이양에 사용할 수 있게 등록된 농약은 전체 365개 중에서 257개로 가장 많았으며, 담수직파는 100개, 건답직파는 8개가 등록되어 사용되고 있다. 등록된 제조제의 사용시기별로 구분하면 전체의 53.7%에 해당하는 196개의 품목이 중기제조제로 이양(과중) 후 15일에 사용하도록 등록되어있으며, 이양(과중)전 8.8%, 초기처리 8.8%, 초중기처리 18.9%, 중후기처리 3.6%, 후기경엽처리 6.3%로 등록되어있어 중기제조제의 비중이 높았다. 중기제조제는 대부분 일발처리제로서 그만큼 일발처리의 비중이 높다는 것을 말하며, 잡초의 효과적인 방제와 저항성관리 방안으로 제시되는 체계처리(이양전 처리 - 중기 또는 중후기 처리)에 적합한 이양전 처리제는 어느 정도 있으나 중기 또는 중후기 처리용 단제 제조제가 거의 없다는 것은 향후 제조제 저항성 관리를 위해 문제점으로 지적된다.

Table 5 Number of herbicide products by application method and timing for rice cultivation in Korea

Mixture type	PRE	POST				
		Early	Early-middle	Middle	Middle-Late	Late
Machine transplanting						
1 way (solo)	9	8	6	3	2	7
2 way mixture	13	21	14	62	2	8
3 way mixture	3	2	32	62	2	0
4 way mixture	0	0	0	1	0	0
Subtotal	25 (6.8%)	31 (8.5%)	52 (14.2%)	128 (35.1%)	6 (1.6%)	15 (4.1%)
Water direct seeding						
1 way (solo)	4	0	1	1	0	6
2 way mixture	3	0	6	24	1	2
3 way mixture	0	0	9	43	0	0
Subtotal	7 (1.9%)	0 (0%)	16 (4.4%)	68 (18.6%)	1 (0.3%)	8 (2.2%)
Dry direct seeding						
1 way (solo)	0	1	0	0	4	0
2 way mixture	0	0	1	0	2	0
Subtotal	0 (0%)	1 (0.3%)	1 (0.3%)	0 (0%)	6 (1.6%)	0 (0%)
Total	32 (8.8%)	32 (8.8%)	69 (18.9%)	196 (53.7%)	13 (3.6%)	23 (6.3%)

4.1.2 국내 ALS 저해 수도용 제초제 사용현황(1988~2011)

1988년부터 국내 ALS 저해 제초제 처리 면적을 조사한 결과, 그 사용량은 꾸준히 증가해 왔다(Figure 1). 국내 ALS 저해 제초제는 1988년 bensulfuron-methyl이 사용된 이래 90년대 초부터 급격히 증가하였다. 90년대 후반에는 사용량뿐 아니라, 품목 수도 다양해져서 살포면적이 매우 큰 폭으로 증가하였다. 초기의 bensulfuron-methyl의 경우, ALS 저해 제초제로써 피를 제외한 대부분의 논잡초에 유효하였기에 피 방제에 유효한 제초제와 혼합제를 만들어 적용 초종이 넓은 새로운 일발처리제로 사용되었다. 이후 1990년도에 pyrazosulfuron-ethyl과 1996년 imazosulfuron 등과 같이 광엽잡초는 물론 피에도 어느 정도 효과가 뛰어난 ALS 저해 제초제가 등장하면서, 대부분의 일발처리제에는 ALS 저해 제초제가 포함되게 되었다. 이후 1999년 피 방제를 전문으로 하는 pyriminobac-methyl을 비롯하여 2005년 penoxsulam, 2004년 국내 신물질 제초제인 flucetosulfuron이 개발되면서 이후 피에 효과가 우수한 ALS 저해 제초제가 지속적으로 사용되었다.

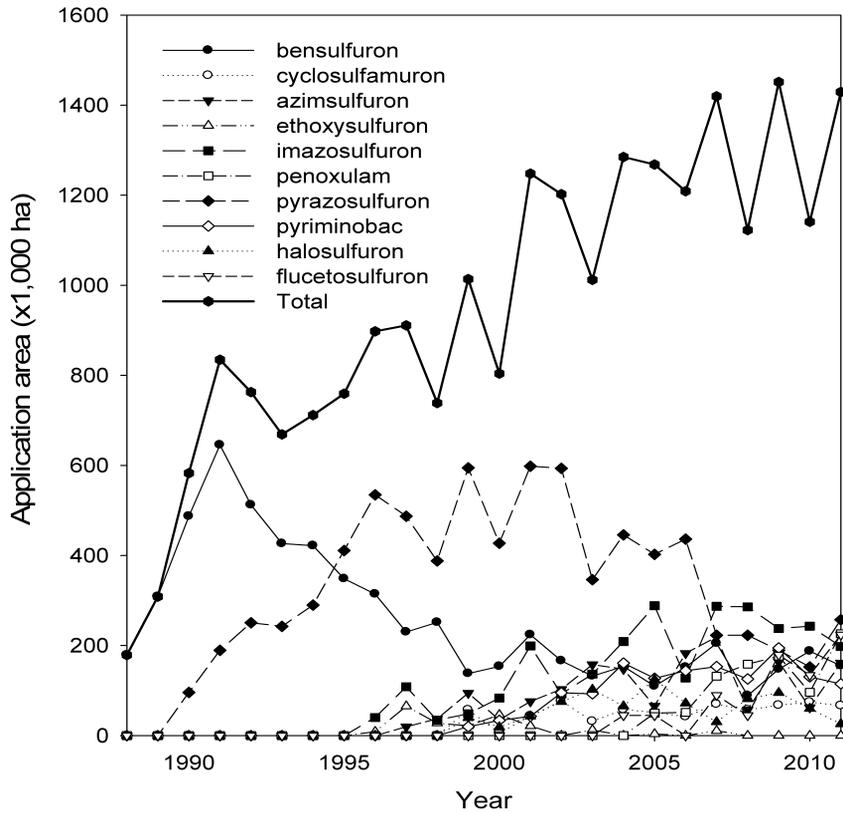


Figure 1 Application area of ALS inhibitor herbicides from 1988 to 2011.

4.1.3 국내 ACCase 저해 수도용 제초제 사용현황(1994~2009)

ACCase 저해 제초제 역시 1994년 이래 국내 제초제 처리 면적을 조사한 결과, 사용량이 꾸준히 증가해 왔다(Figure 2). 국내 ACCase 저해 제초제는 1994년 fenoxaprop-P-ethyl이 사용된 이래 최근까지 꾸준한 처리면적을 유지하고 있다. 2008년에 국내에서 metamifop 원제가 개발등록되며 총 3종의 ACCase 저해 제초제가 사용되고 있다.

1997년경 ACCase 저해 제초제의 사용량이 급격히 증가한 이유는 당시 신규제초제인 cyhalofop의 출시 초기에 일시적인

출하량 증가에 따른 통계적인 증가치로써, 출하된 물량이 유통기한인 2~3년 내에 처리되는 경향에 비추어 이는 1997년도 출하량 증가분이 2000년도까지의 출하량 감소분을 상쇄한다고 판단된다.

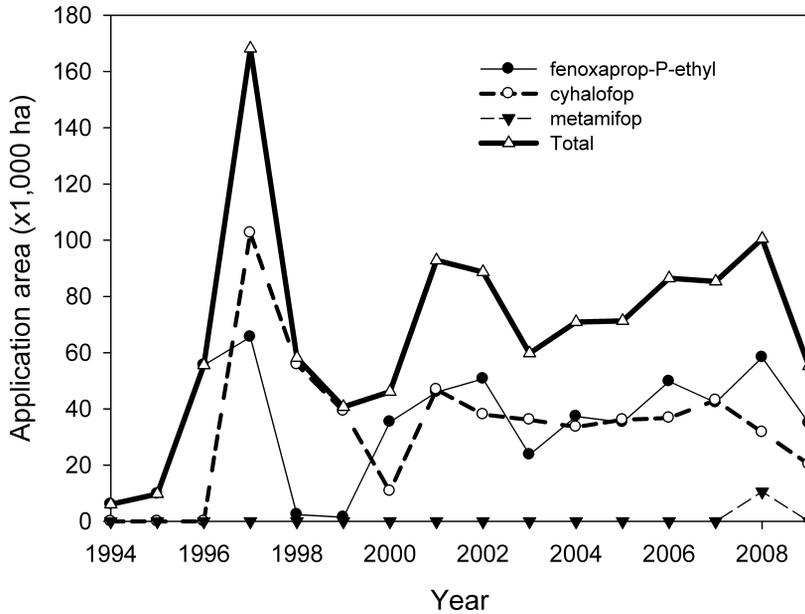


Figure 2 Application area of ACCase inhibitor herbicides from 1994 to 2009.

4.1.4 피 방제효과별 ALS 저해 제초제 살포량 분석

Table 6은 국내에서 1998년 이후로 사용된 ALS 저해 제초제를 피에 대한 효과별 그룹으로 구분한 것이다. Group A의 경우, 피에 대한 약효가 약한 편이나, 다른 광엽 잡초 및 일년생 잡초에 강한 특징을 가지고 있으며, 1988년도에 가장 먼저 등록된 ALS 저해 제초제인 bensulfuron 이외에 3종의 약제를 포함하고 있다. Group B의 경우, 광엽 잡초를 포함한 1년생 잡초에 강하고, 피를 완전하게 방제하지는 못하지만, Group A보다 우수한 방제력을

가지고 있는 특징이 있으며, 1990년에 등록된 pyrazosulfuron-ethyl 이외의 2약제로 구성하였다. 피에 대해 효과가 가장 우수한 Group C의 경우 1999년도에 등록된 pyriminobac을 비롯한 2004년에 등록된 penoxsulam 및 flucetosulfuron이 포함되었다.

Table 6 Three herbicide groups classified base on their efficacies against *Echinochloa spp*

Group	Efficacy	Herbicides (registration year)
Group A	Low efficacy	Bensulfuron-methyl (1988), Ethoxysulfuron (1996), Cyclosulfamuron (1999), Halosulfuron (1999)
Group B	Medium efficacy	Pyrazosulfuron-ethyl (1990), Imazosulfuron (1996), Azimsulfuron (1997)
Group C	High efficacy	Pyriminobac-methyl (1999), Penoxulam (2005), Flucetosulfuron (2004)

Figure 3은 Table 6에서 정리한 내용을 바탕으로, 각 Group별 처리면적의 누적그래프로 나타낸 것이다. 2000년대 초반부터 Group C의 약제가 사용되기 시작하여 피에 대해 효과가 높은 제초제 사용이 크게 증가함을 보인다. 이는 최근 들어 보다 강력한 선택압이 작용함으로써 저항성 피가 더욱 급속히 발생하는 원인 중 하나로 분석된다. 1990년대 초반 최대 60만 ha의 처리면적을 차지한 Group A는 이후 점차 감소한 반면, 이후 개발된 Group B의 경우 2000년대 초반 전체 처리면적의 절반 이상에 사용되며 큰 폭의 증가세를 나타내고 있다. 그리고 2005년 이후 Group C의 사용이 상대적으로 큰 폭으로 성장하였다.

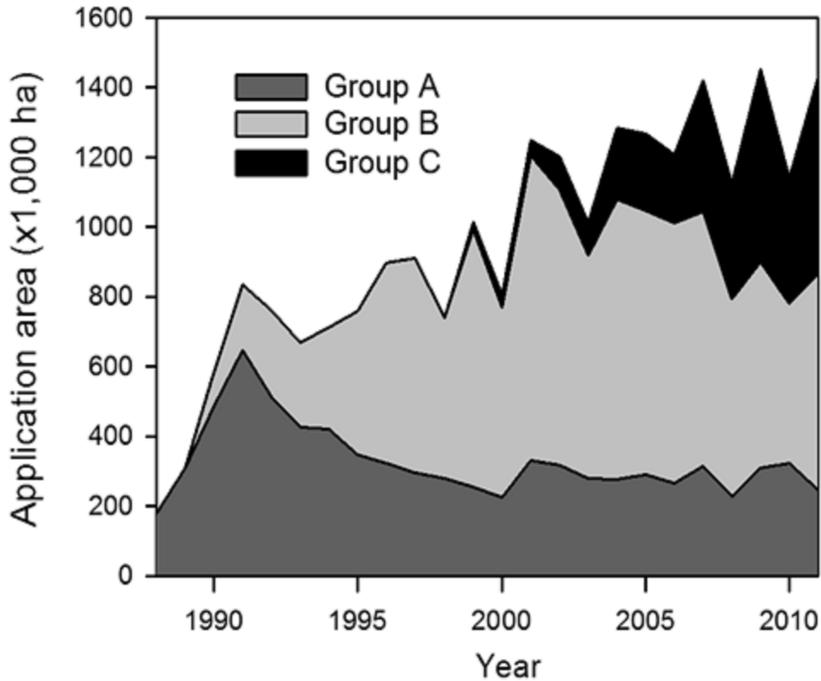


Figure 3 Accumulated application area of ALS inhibitor herbicides classified into 3 efficacy groups based on their efficacy against *E. crus-galli*

4.1.5 신규제초제 등록시험 현황(2010~2012)

국내에서 진행되는 제초제 개발의 향후 방향을 알아보기 위해 2010년부터 2012년까지 3년간 국내에서 실시된 수도용 제초제 등록시험 내역을 조사하였다(Table 7). 2010년의 경우 전체 총 43종의 품목 중에서 2종 이상의 혼합제는 단제 3품목을 제외한 39개의 품목에 달했다. 이중 ALS 저해 제초제는 86%를 차지했으며 전체의 67.4%가 3종 혼합제로 추진되었다. 2011년의 경우 ALS 저해 제초제가 포함된 3종 혼합제가 전체의 절반에 해당하는 50%를 차지했다. 또한 2012년의 경우, 유일하게 1품목만이 등록되어있던(Table 4) 4종 혼합제 3품목이 등록시험 중에 있다. ACCase 저해 제초제가 포함된 품목들도 2010년부터

매년 꾸준히 개발되고 있으며 2012년에는 전체 신규품목의 12.8%를 차지했다. 이와 같이 아직도 여전히 ALS 저해제가 포함된 제초제의 개발품목이 높은 비중을 차지하고 있으며, ACCase 저해제의 비중도 점차 증가하고 있다는 것은 향후 이들 저해제 저항성 피 방제에 있어 큰 위협이 될 것으로 판단된다.

Table 7 ALS and ACCase inhibitor herbicides under registration trials in Korea during 2010~2012

Number of a.i.	Formulated product								
	No. of products			% of ALS inhibitor included			% of ACCase inhibitor included		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
1	4	2	2	7.0	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0
2	9	15	16	11.6	32.4	17.9	0.0	2.9	5.1
3	30	17	18	67.4	50.0	41.0	7.0	2.9	2.6
4	0	0	3	0.0	0.0	7.7	0.0	0.0	5.1
Total	43	34	39	86.0	85.3	66.7	7.0	5.9	12.8

Figure 4를 통해 최근 3년간 등록 추진중인 약제를 비교해 보았을 때 가장 많은 원제 수는 ALS 저해제로서 총 15개의 원제가 국내에 수도용으로 등록시험중에 있으며, 그 다음으로 PPO저해제가 6종, VLCFAs저해제가 5종, PSII 저해제가 4종, HPPD가 4종, ACCase 저해제, 미확인 및 지질합성 저해제가 각각 2종씩 등록시험 중에 있어 새로운 ALS 저해제가 지속적으로 등록되고 있음을 시사한다.

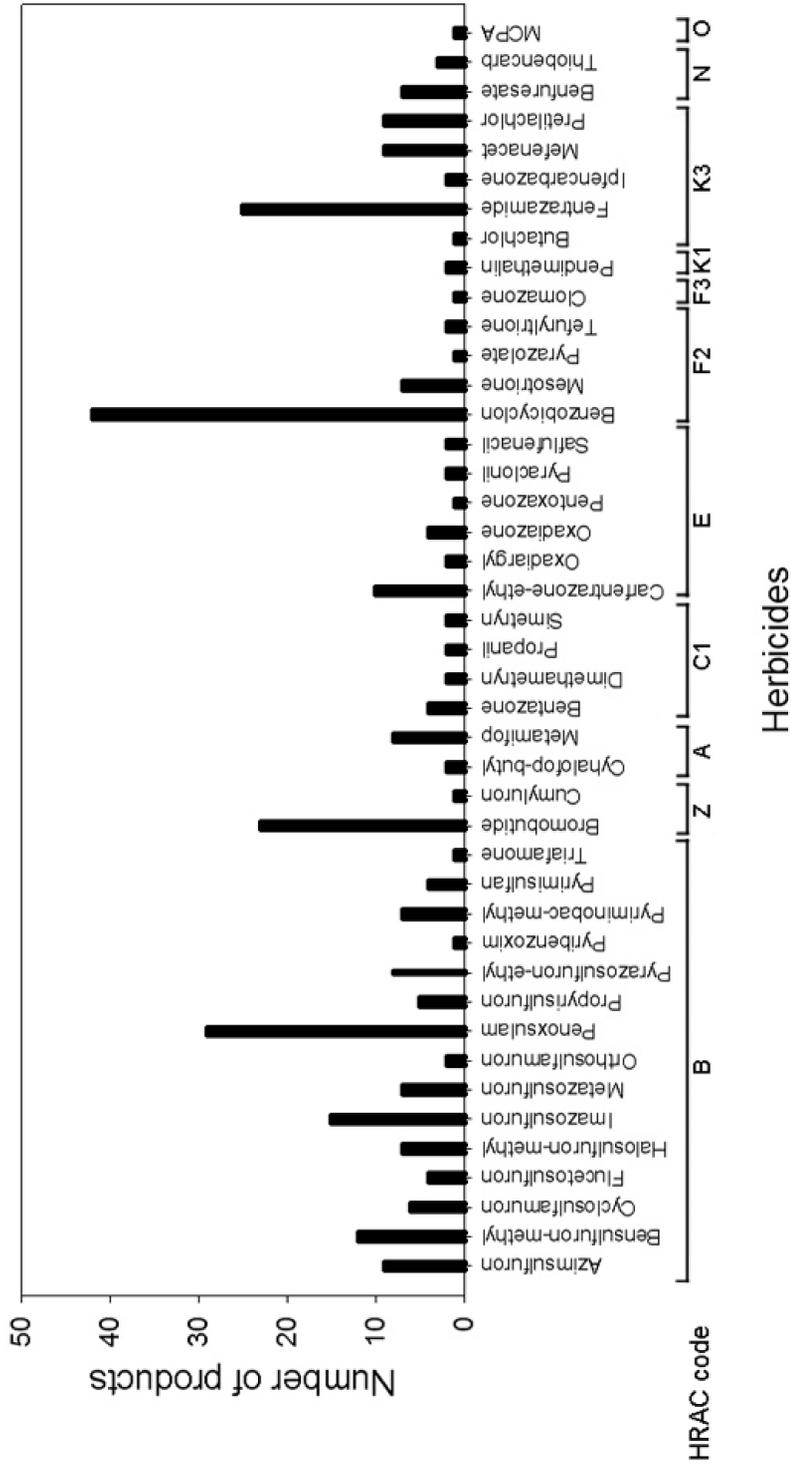


Figure 4 Number of product under registration trials in Korea during 2010~2012 (A: ALS inhibitor, B : ACCase inhibitor, C1: PSII inhibitor, E: PPO inhibitor, F2: HPPD inhibitor, F3: carotenoid biosynthesis inhibitor, K1: microtubule assembly inhibitor, K3: VLCFAs inhibitor, N: lipid synthesis inhibitor, O: synthetic auxins, Z: unknown).

4.1.6 제초제 저항성 피의 발생원인 예측

한국의 논에서 발생하는 제초제 저항성 피는 그 동안 지속적으로 선택압을 통해 저항성 빈도가 높아진 것으로 보인다. 특히 최근 들어 피에 활성이 좋은 제초제들이 높은 빈도로 사용량이 증대되면서 이러한 경향은 더욱 커진 것으로 보이며, 기존의 저항성 잡초 방제대책 이후의 새로운 관리방안이 요구되는 시점이다.

4.2 저항성 피 방제용 대체 제초제 선발

4.2.1 제초제 작용기작별 저항성 강피 방제효과

4.2.1.1 ALS 저해 제초제

저항성 및 감수성 강피의 ALS 저해 제초제에 대한 제초효과를 확인하기 위하여, 약제 처리 후 30일차에 달관약효를 조사하였다 (Figure 5). ALS 저항성 강피인 김제 강피는 ALS 제초제의 Active ingredient에는 관계 없이 낮은 달관약효를 보였으며, 감수성 강피인 수원 강피는 모든 ALS 저해 제초제에서 높은 달관약효를 보였다. 표준약량에서 저항성 강피의 달관약효가 2배량에서의 달관약효보다 낮았으며, 파종 후 5일차 처리군이 가장 낮은 달관약효를, 15 DAS 처리군이 가장 높은 달관약효를 보였다. 특히 Azimsulfuron 및 propyrisulfon의 경우 5 DAS에서 저항성 강피에 대한 달관약효가 각각 23.3과 26.7로 가장 낮았으며, 상대적으로 pyrifthalid는 저항성 강피에 대한 달관약효가 10 DAS에서 100으로 가장 높았다.

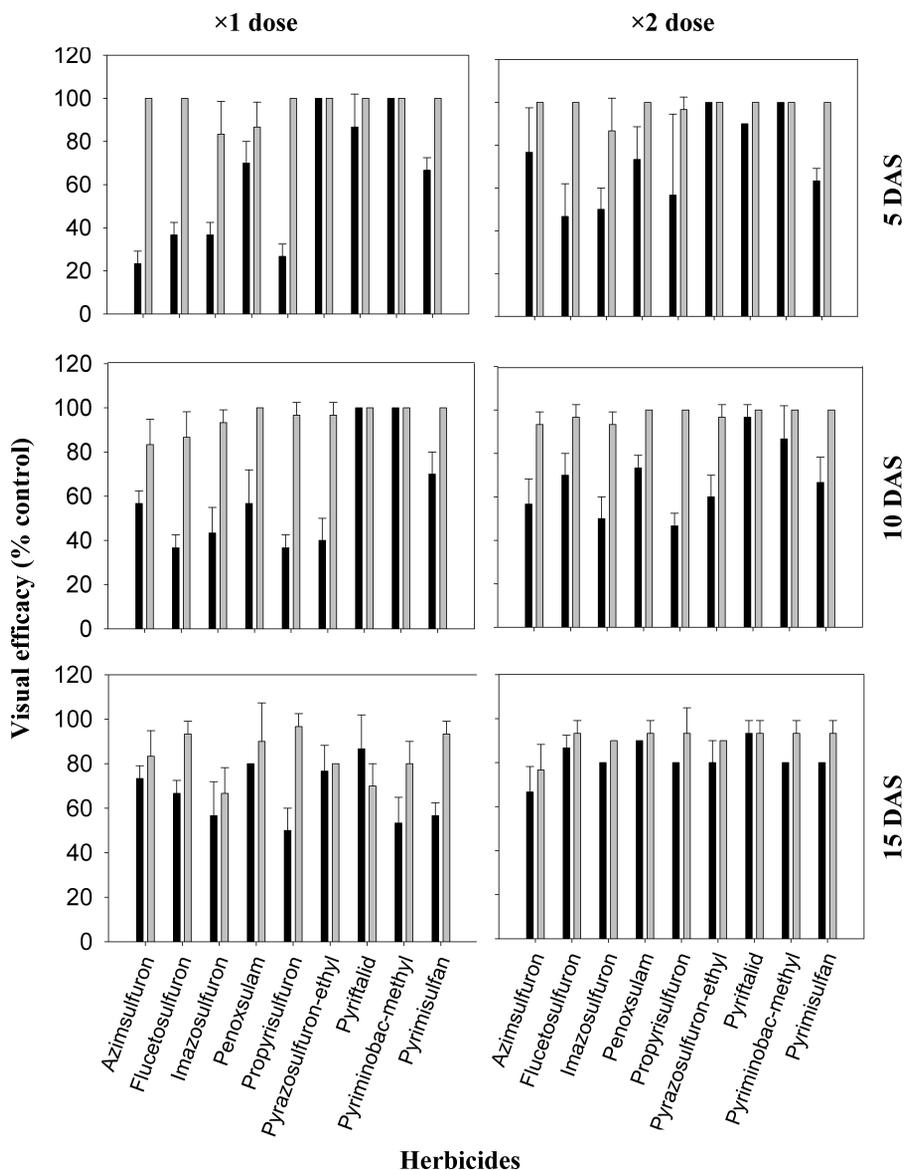
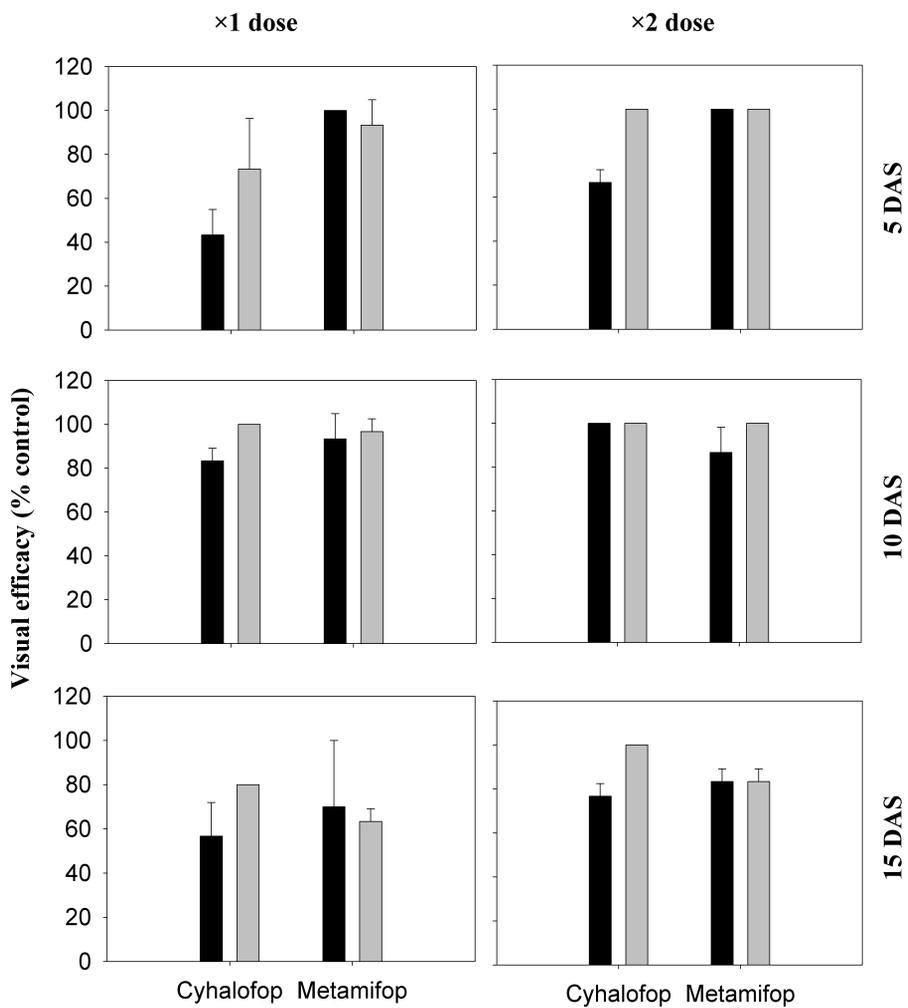


Figure 5 Visual efficacies of ALS inhibitor herbicides against *Echinochloa oryzicola* at different dosages and application timings

4.2.1.2 ACCase 저해 제초제

저항성 및 감수성 강피의 ACCase저해 제초제에 대한 제초효과를 확인하기 위하여, 약제 처리 후 30일 차에 달관약효를 조사하였다(Figure 6). ALS 저항성 강피인 김제 강피는 ACCase 저해 제초제인 cyhalofop에서도 낮은 달관약효를 보였으며, 감수성 강피인 수원강피는 모든 ACCase 저해 제초제에서 높은 달관약효를 보였다. 표준약량에서 저항성 강피의 달관약효가 2배량에서의 달관약효보다 낮았으며, 15 DAS 처리군이 가장 낮은 달관약효를, 10 DAS 처리군이 가장 높은 달관약효를 보였다. 특히 cyhalofop의 경우 5 DAS에서 저항성 강피에 대한 달관약효가 43.3으로써 가장 낮았으며, 상대적으로 metamifop는 저항성 강피에 대한 달관약효가 5 DAS에서 100으로 가장 높았다.

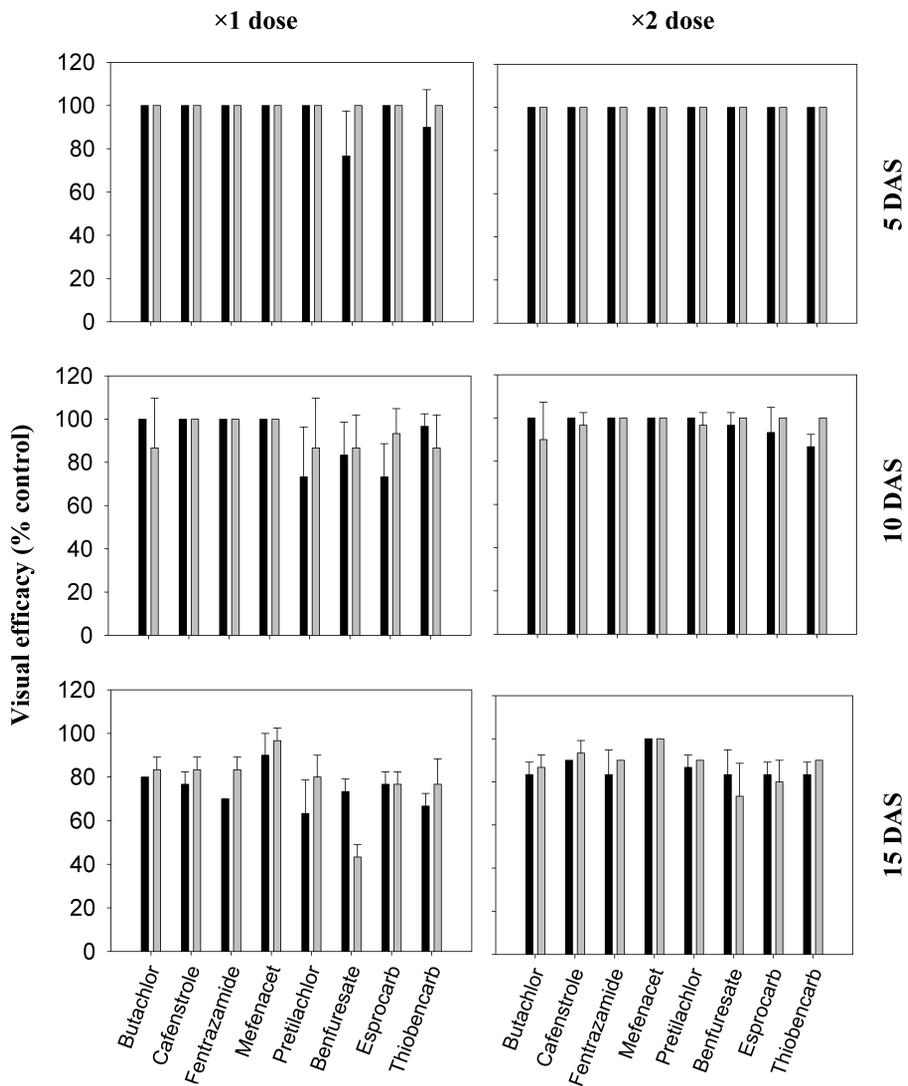


Herbicides

Figure 6 Visual efficacies of ACCase inhibitor herbicides against *Echinochloa oryzicola* at different dosages and application timings

4.2.1.3 VLCFAs & Lipid synthesis 저해 제초제

저항성 및 감수성 강피의 VLCFA 및 lipid 생합성 저해 제초제에 대한 제초효과를 확인하기 위하여, 약제 처리 후 30일 차에 달관약효를 조사하였다(Figure 7). ALS 저항성 강피인 김제 강피는 VLCFA 및 lipid 생합성 저해 제초제의 chemical group에 관계 없이 높은 달관약효를 보였으며, 감수성 강피인 수원 강피는 모든 VLCFA 및 lipid 생합성 저해 제초제에서 높은 달관약효를 보였다. 표준약량에서 저항성 강피의 달관약효가 2배량에서의 달관약효보다 낮았고 15 DAS 처리군이 가장 낮은 달관약효를 보였으며, 5 DAS 처리군이 가장 높은 달관약효를 보였다. 특히 pretilachlor 및 thiobencarb의 경우 15 DAS에서 저항성 강피에 대한 달관약효가 각각 63.3과 67.7로써 가장 낮았으며, 상대적으로 mefenacet는 저항성 강피에 대한 달관약효가 15 DAS에서 90으로 가장 높았다.

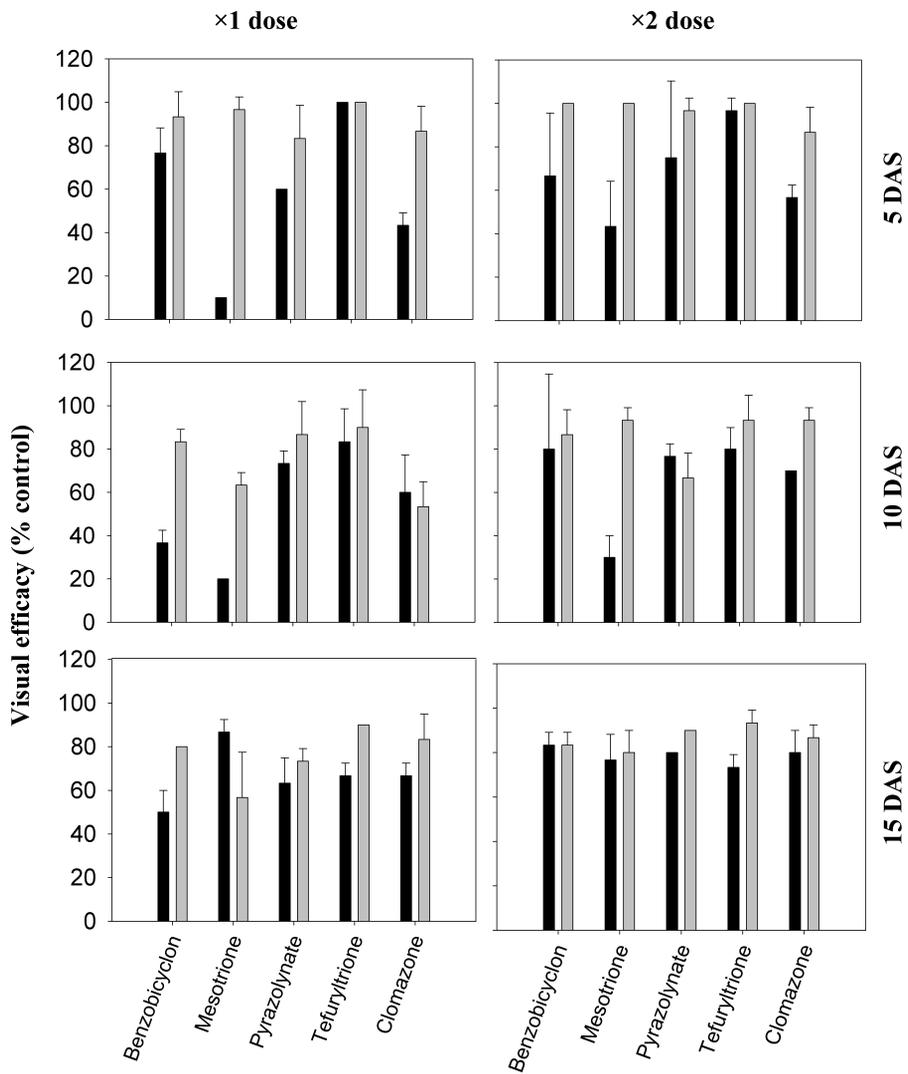


Herbicides

Figure 7 Visual efficacies of VLCFAs and lipid synthesis inhibitor herbicides against *Echinochloa oryzicola* at different dosages and application timings

4.2.1.4 HPPD & carotenoid biosynthesis 저해 제초제

저항성 및 감수성 강피의 HPPD 및 Carotenoid biosynthesis 저해 제초제에 대한 제초효과를 확인하기 위하여, 약제 처리 후 30 일 차에 달관약효를 조사하였다(Figure 8). ALS 저항성 강피인 김제 강피는 HPPD 및 carotenoid biosynthesis 저해 제초제의 a.i.에 따라 각기 다른 방제효과를 보였으며, 감수성 강피인 수원 강피도 대부분의 HPPD 및 Carotenoid biosynthesis 저해 제초제에서 낮은 달관약효를 보였다. 표준약량에서 저항성 강피의 달관약효가 2배량에서의 달관약효보다 약간 낮았다. 특히 mesotrione의 경우 5 DAS, 10 DAS에서 저항성 강피에 대한 달관약효가 각각 10.0과 20.0으로써 가장 낮았으며, 상대적으로 tefuryltrione는 저항성 강피에 대한 달관약효가 5 DAS에서 100으로 가장 높았다.

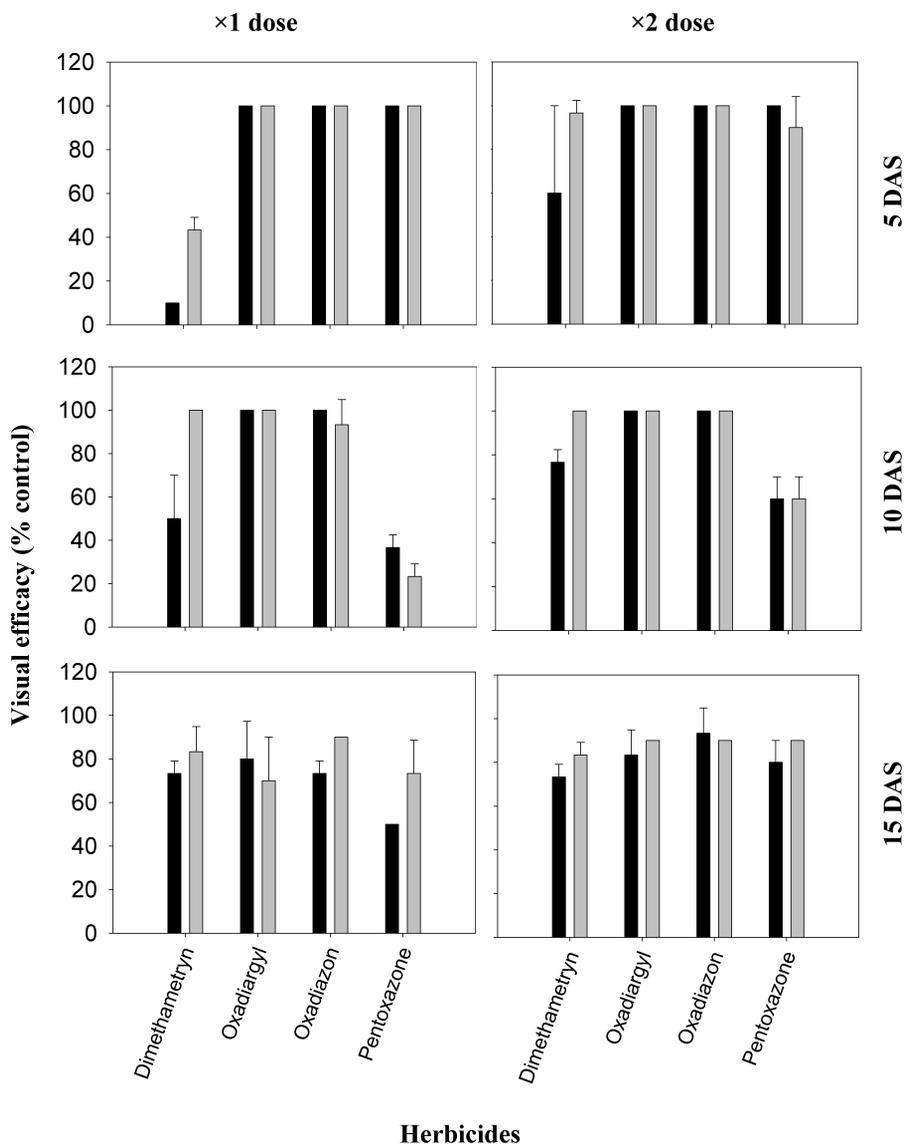


Herbicides

Figure 8 Visual efficacies of HPPD and carotenoid biosynthesis inhibitor herbicides against *Echinochloa oryzicola* at different dosages and application timings

4.2.1.5 PSII & PPO 저해 제초제

저항성 및 감수성 강피의 PSII & PPO 저해 제초제에 대한 제초효과를 확인하기 위하여, 약제 처리 후 30일 차에 달관약효를 조사하였다(Figure 9). ALS 저항성 강피인 김제 강피는 PSII & PPO 제초제의 Active ingredient별로 높은 달관약효를 보였으며, 감수성 강피인 수원 강피는 모든 PSII & PPO 저해 제초제에서 대체로 높은 달관약효를 보였다. 표준약량에서 저항성 강피의 달관약효가 2배량에서의 달관약효보다 낮았고, 5 DAS 처리군이 가장 낮은 달관약효를 보였으며, 15 DAS 처리군이 가장 높은 달관약효를 보였다. 특히 oxadiargyl 및 oxadiazon의 경우 5 DAS, 10 DAS에서 저항성 강피에 대한 달관약효가 각각 100으로 가장 높았으며, 상대적으로 dimethametryn는 저항성 강피에 대한 달관약효가 5 DAS에서 10으로 가장 낮았다.



Herbicides
Figure 9 Visual efficacies of PSII and PPO inhibitor herbicides against *Echinochloa oryzicola* at different dosages and application timings

4.2.1.6 기타

저항성 및 감수성 강피에 대한 microtubule 및 아직 작용기작이 밝혀지지 않은(unknown) 제초제의 제초효과를 확인하기 위하여, 약제 처리 후 30일 차에 달관약효를 조사하였다(Figure 10). ALS 저항성 강피인 김제 강피는 제초제의 a.i.에 따라 다양한 달관약효를 보였으며, 감수성 강피인 수원 강피는 모든 제초제에서 대체로 높은 달관약효를 보였다. 표준약량에서 저항성 강피의 달관약효가 2배량에서의 달관약효보다 낮았으며, 15 DAS 처리군이 가장 낮은 달관약효를 보였고, 5 DAS 처리군이 가장 높은 달관약효를 보였다. 특히 indanofan 및 oxaziclomefone의 경우 5 DAS에서 저항성 강피에 대한 달관약효가 각각 100으로 가장 높았으며, 상대적으로 bromobutide는 세 처리시기에서 대체적으로 가장 낮았다.

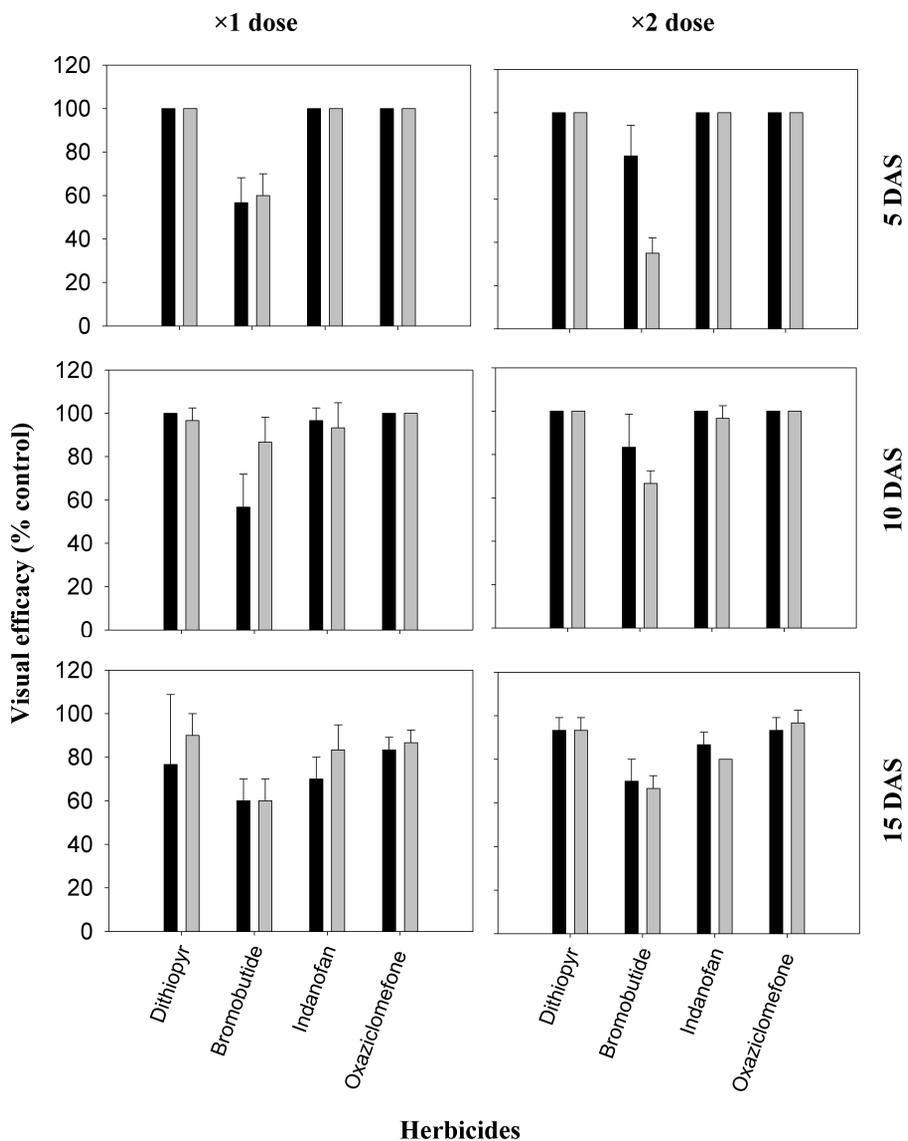


Figure 10 Visual efficacies of microtubule assembly inhibitor and unknown mode of action herbicides against *Echinochloa oryzicola* at different dosages and application timings

4.2.2 제초제 작용기작별 저항성 물피 방제효과

4.2.2.1 ALS 저해 제초제

저항성 및 감수성 물피의 ALS 저해 제초제에 대한 제초효과를 확인하기 위하여, 약제 처리 후 30일 차에 달관약효를 조사하였다 (Figure 11). ACCase 저항성 물피인 서산 물피는 ALS 제초제의 Active ingredient에는 관계 없이 낮은 달관약효를 보였으며, 감수성 물피인 수원 물피는 모든 ALS 저해 제초제에서 대체로 높은 달관약효를 보였다. 표준약량에서 저항성 물피의 달관약효가 2배량에서의 달관약효보다 낮았고, 15 DAS 처리군이 가장 낮은 달관약효를 보였으며, 5 DAS 처리군이 가장 높은 달관약효를 보였다. 특히 azimsulfuron 및 propyrisulfon의 경우 5 DAS에서 저항성 물피에 대한 달관약효가 각각 43.3과 23.3으로써 가장 낮았으며, 상대적으로 pyriminobac-methyl는 저항성 물피에 대한 달관약효가 5 DAS에서 100으로 가장 높았다.

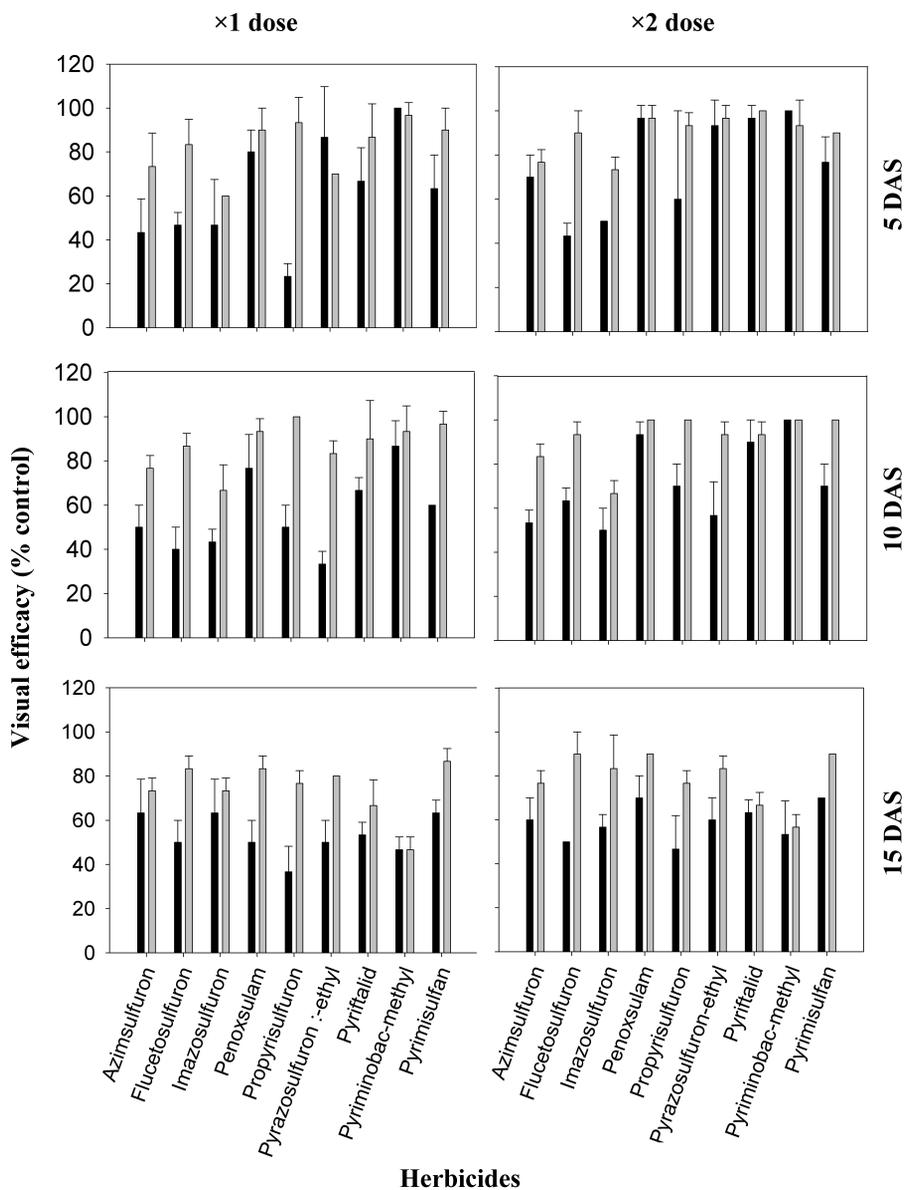
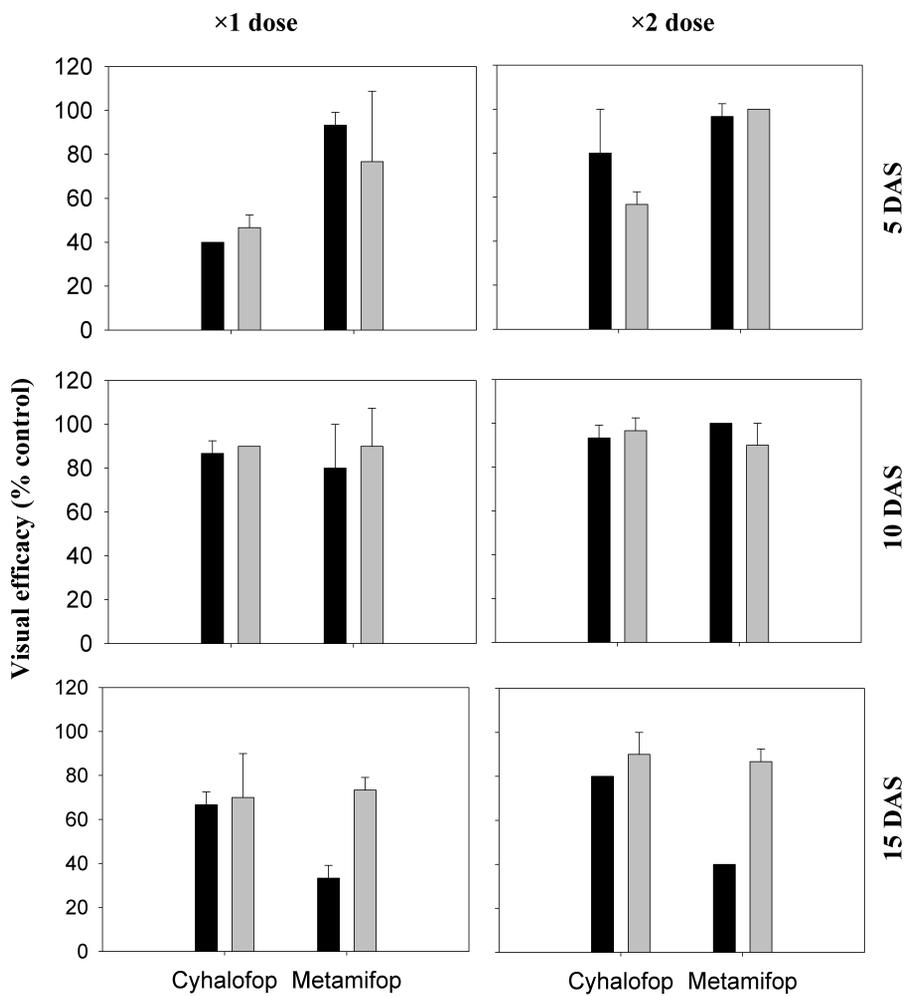


Figure 11 Visual efficacies of ALS inhibitor herbicides against *Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli* at different dosages and application timings

4.2.2.2 ACCase 저해 제초제

저항성 및 감수성 물피의 ACCase 저해 제초제에 대한 제초효과를 확인하기 위하여, 약제 처리 후 30일 차에 달관약효를 조사하였다(Figure 12). ACCase 저항성 물피인 서산 물피는 ACCase 제초제의 active ingredient에는 관계 없이 낮은 달관약효를 보였으며, 감수성 물피인 수원 물피는 모든 ALS 저해 제초제에서 대체로 낮은 달관약효를 보였다. 표준 약량에서 저항성 물피의 달관약효가 2배량에서의 달관약효보다 낮았으며, 15 DAS 처리군이 가장 낮은 달관약효를 보였고, 10 DAS 처리군이 가장 높은 달관약효를 보였다. 특히 metamifop의 경우 15 DAS에서 저항성 물피에 대한 달관약효가 33.3으로 가장 낮았으나, 상대적으로 5 DAS에서 93.3으로 가장 높았다.



Herbicides

Figure 12 Visual efficacies of ACCase inhibitor herbicides against *Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli* at different dosages and application timings

4.2.2.3 VLCFAs & Lipid synthesis 저해 제초제

저항성 및 감수성 물피의 VLCFA & lipid 저해 제초제에 대한 제초효과를 확인하기 위하여, 약제 처리 후 30일 차에 달관약효를 조사하였다(Figure 13). ACCase 저항성 물피인 서산 물피는 VLCFA & lipid 제초제의 a.i.에는 관계 없이 높은 달관약효를 보였으며, 감수성 물피인 수원 물피는 모든 VLCFA & lipid 저해 제초제에서 대체로 높은 달관약효를 보였다. 표준약량에서 저항성 물피의 달관약효가 2배량에서의 달관약효보다 낮았으며, 15 DAS 처리군이 가장 낮은 달관약효를 보였고, 5 DAS 처리군이 가장 높은 달관약효를 보였다. 특히 cafenstrol, fentrazamide 및 mefenacet의 경우 10 DAS에서 저항성 물피에 대한 달관약효가 각각 100으로써 가장 높았으며, 상대적으로 benfuresate는 저항성 물피에 대한 달관약효가 10 DAS에서 36.7으로 가장 낮았다.

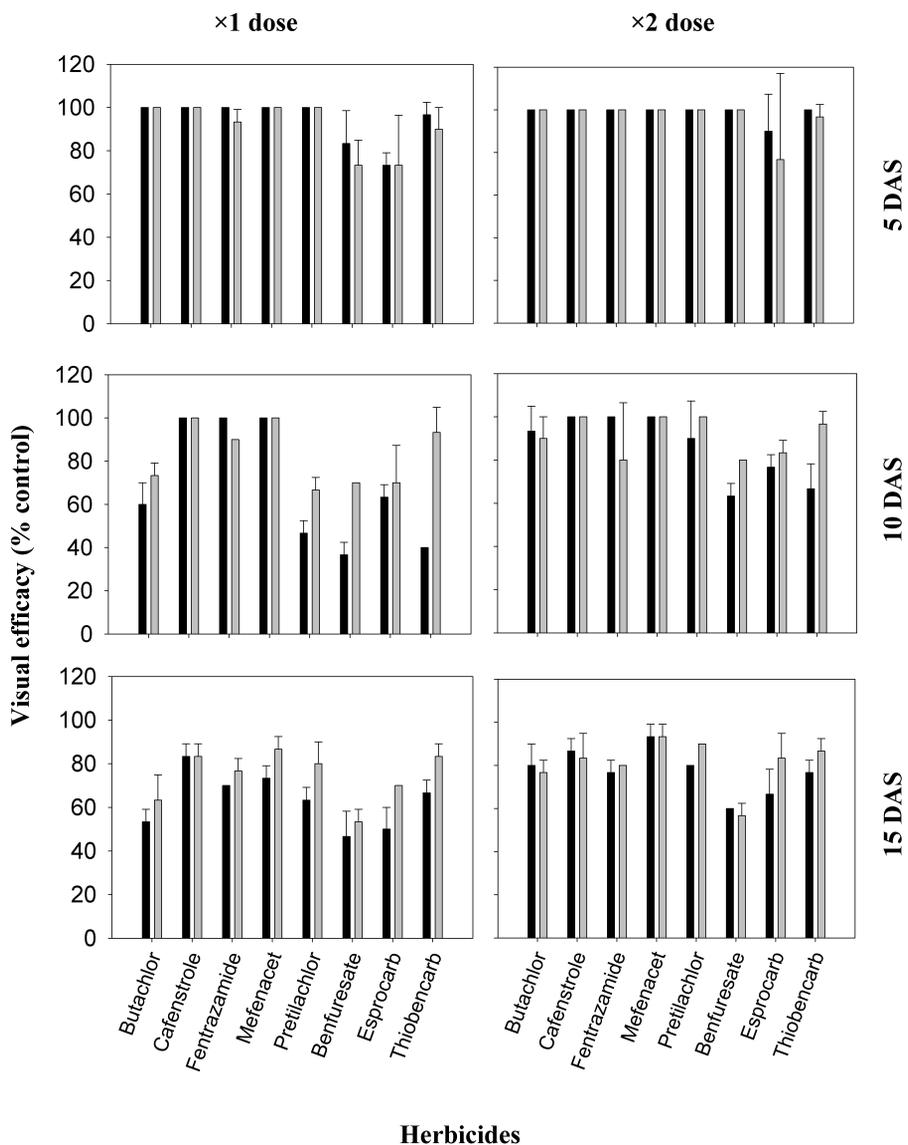
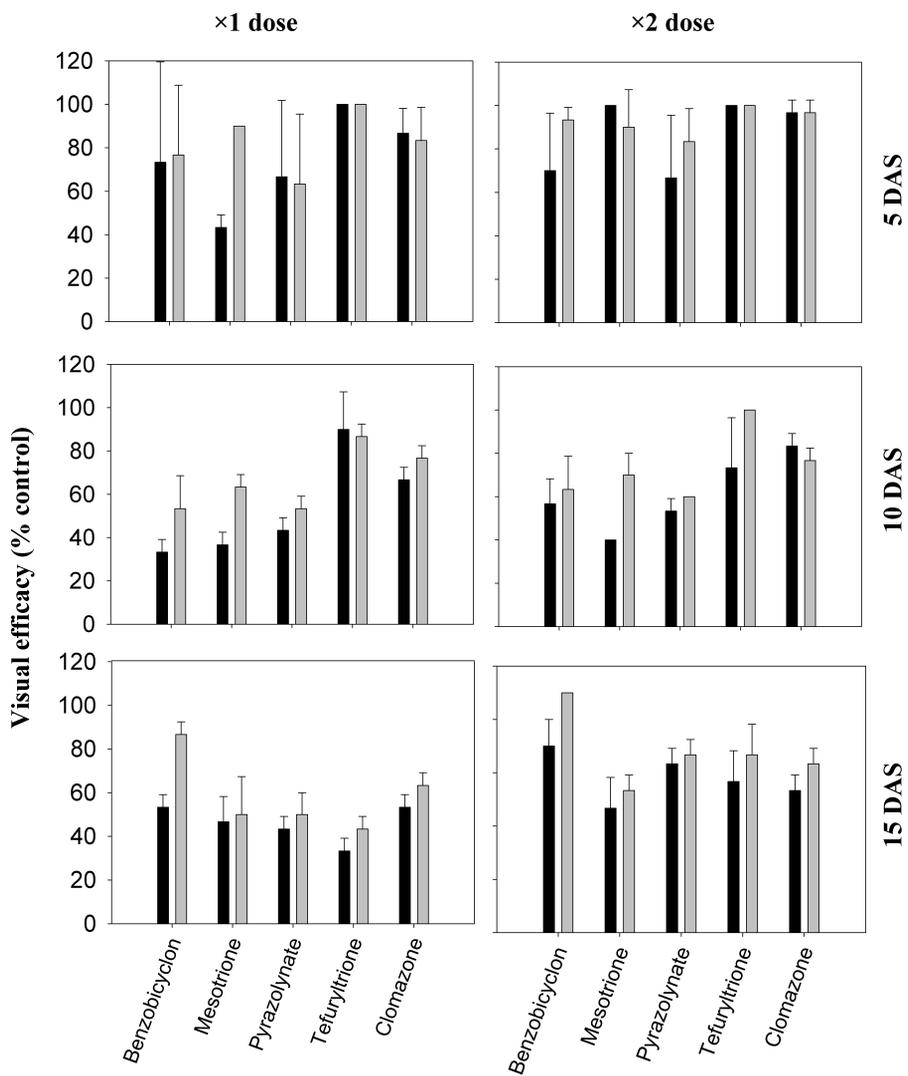


Figure 13 Visual efficacies of VLCFAs and lipid synthesis inhibitor herbicides against *Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli* at different dosages and application timings

4.2.2.4 HPPD & carotenoid biosynthesis 저해 제초제

저항성 및 감수성 물피의 HPPD & carotenoid biosynthesis 저해 제초제에 대한 제초효과를 확인하기 위하여, 약제 처리 후 30일 차에 달관약효를 조사하였다(Figure 14). ACCase 저항성 물피인 서산 물피는 HPPD 및 carotenoid biosynthesis 저해 제초제의 a.i.에 관계 없이 낮은 달관약효를 보였으며, 감수성 물피인 수원 물피는 모든 HPPD 및 carotenoid biosynthesis 저해 제초제에서 대체로 높은 달관약효를 보였다. 표준약량에서 저항성 물피의 달관약효가 2배량에서의 달관약효보다 낮았다. 특히 tefurytrione의 경우 5 DAS에서 저항성 물피에 대한 달관약효가 100으로써 가장 높았다.



Herbicides

Figure 14 Visual efficacies of HPPD and carotenoid biosynthesis inhibitor herbicides against *Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli* at different dosages and application timings

4.2.2.5 PSII & PPO 저해 제초제

저항성 및 감수성 물피의 PSII 및 PPO 저해 제초제에 대한 제초효과를 확인하기 위하여, 약제 처리 후 30일 차에 달관약효를 조사하였다(Figure 15). ACCase 저항성 물피인 서산 물피는 PSII 및 PPO 제초제의 a.i.에는 따라 높은 달관약효를 보였으며, 감수성 물피인 수원 물피는 모든 PSII & PPO 저해 제초제에서 대체로 높은 달관약효를 보였다. 표준약량에서 저항성 물피의 달관약효가 2배량에서의 달관약효보다 낮았고, 15 DAS 처리군이 가장 낮은 달관약효를 보였으며, 5 DAS 처리군이 가장 높은 달관약효를 보였다. 특히 oxadiargyl과 oxadiazon의 경우 5 DAS에서 저항성 물피에 대한 달관약효가 각각 100으로써 가장 높았으며, 상대적으로 dimethametryn는 저항성 물피에 대한 달관약효가 10 DAS에서 36.7으로 가장 낮았다.

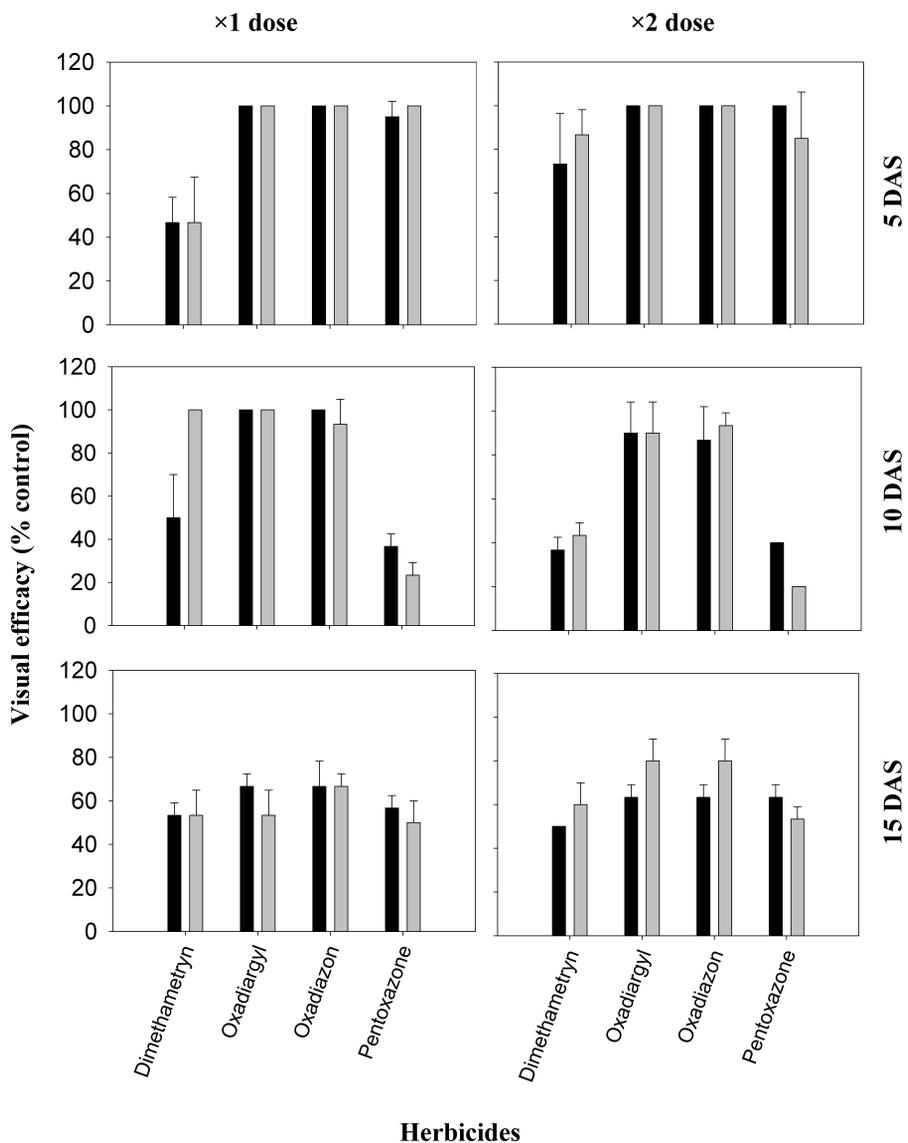


Figure 15 Visual efficacies of PSII and PPO inhibitor herbicides against *Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli* at different dosages and application timings

4.2.2.6 기타

저항성 및 감수성 물피에 대한 microtubule 및 아직 작용기작이 밝혀지지 않은(unknown) 제초제의 제초효과를 확인하기 위하여, 약제 처리 후 30일 차에 달관약효를 조사하였다(Figure 16). ACCase 저항성 물피인 서산 물피는 제초제의 a.i.에는 따라 높은 달관약효를 보였으며, 감수성 물피인 수원 물피는 모든 제초제에서 대체로 높은 달관약효를 보였다. 표준약량에서 저항성 물피의 달관약효가 2배량에서의 달관약효보다 낮았으며, 15 DAS 처리군이 가장 낮은 달관약효를 보였고, 5 DAS 처리군이 가장 높은 달관약효를 보였다. 특히 indanofan과 oxaziclomefone의 경우 5 DAS에서 저항성 물피에 대한 달관약효가 각각 100으로써 가장 높았으며, 상대적으로 bromobutide는 저항성 물피에 대한 달관약효가 10 DAS에서 33.3으로 가장 낮았다.

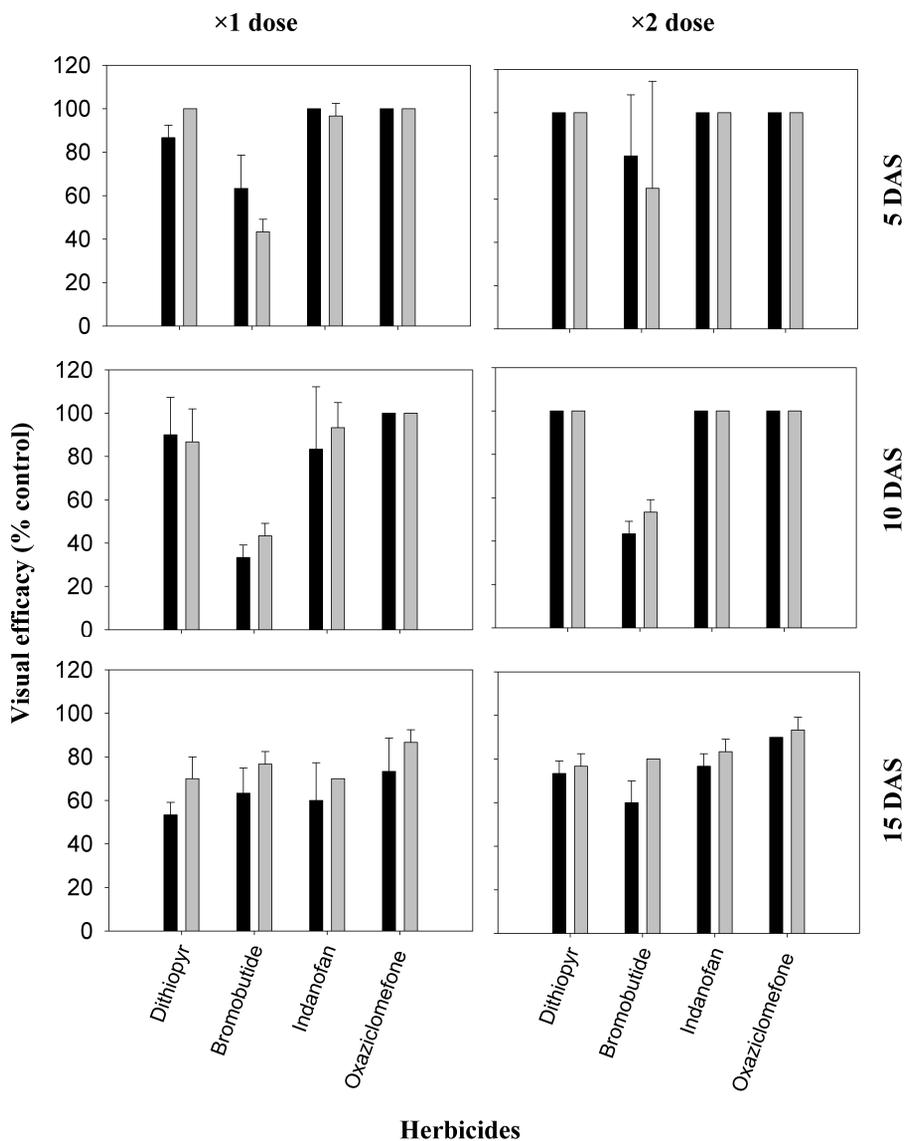


Figure 16 Visual efficacies of microtubule assembly inhibitor and unknown mode of action herbicides against *Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli* at different dosages and application timings

4.3 저항성 피 종합관리 대책

국내 수도용 제초제의 등록현황을 살펴보면(Table 4), 국내에 등록된 품목 수는 총 271종에 달한다. 단제 37품목, 2중 혼합제 119품목, 3중 혼합제 114품목, 4중 혼합제 1품목으로 대부분의 약제 중 2중 이상의 혼합제가 총 제초제 품목의 86% 이상을 차지하였다. 이는 수도용 제초제의 처리방법이 농촌인구의 고령화와 기계화에 따라 일발처리제를 통해 잡초방제에 투입하는 시간을 최소화하려는 경제적 영농을 추구하기 때문이다.

ALS 저해 제초제 저항성 잡초의 출현은 ALS 저해 제초제의 사용량 증가와 밀접한 관련이 있다. 문헌 조사에서 밝힌 바와 같이, 1988년 조사시점 이래 ALS 저해 제초제의 종류와 처리면적은 매년 증가하였다(Figure 1). 이러한 증가는 약제 개발과정에 더 많은 선택권을 부여하면서 결과적으로 피에 대해 상대적으로 효과가 좋은 약제의 사용증가를 초래하였다(Figure 3). 이는 피의 잠재적 저항성 혹은 내성을 더욱 증가시키는 원인 중 하나로 볼 수 있다.

ACCase 저해 제초제 저항성 잡초 역시 1994년 이후 꾸준히 약제살포 면적이 유지되었다(Figure 2). 더욱이 후기 경엽살포를 위한 약제로 소수 원제가 지속적으로 연용되면서, 대규모 농장을 중심으로 저항성 피가 출현하였다.

2010년부터 2012년까지 최근 3년간 실시된 수도용 제초제의 최종연차 시험 내역을 통해 현재 국내에서 개발중인 제초제 현황을 살펴보면(Figure 4), 2010년에는 ALS 저해 제초제를 포함한 약제가 신규 제초제 등록시험 전체 약제의 86%를 차지하였다. 또한 ALS 저해 제초제가 단독으로 사용되는 경우는 7%에 그친 반면, 2

중 혼합제에 사용된 비율은 11.6%, 3중 혼합제에 사용된 비율은 67.4%에 달하였다. 이처럼 현재 ALS 저해 제초제는 일발처리제 형태로 무분별하게 혼합되어 사용됨을 확인할 수 있었다. ACCase 저해 제초제 역시 2종이상의 혼합제에서 꾸준히 사용되었으며, 2012년에는 등록시험용 4중합제 3품목 중 2품목에 포함되었다.

이처럼 저항성의 원인은 점차 증가하고 있으며, 그 결과 김제지방에서 강력한 ALS 저해 제초제 저항성 강피의 출현이 보고되었고 서산지방에서는 ACCase 저해 제초제 저항성 물피가 보고되었다 (Im et al., 2009; 박 등, 2010).

이에 제초제 저항성 피의 원인분석과 실험을 통해 도출해낸 본 연구 결과를 산업계, 학계, 국가기관 및 사용자인 농민의 4가지 측면에서 정리하면 다음과 같다.

첫째로, 산업계는 새로운 제초제 및 사용체계를 개발해야 한다. 타회사와 차별화된 조합, 제형 및 처리방법으로 시장을 이끌어야 한다. 현재와 같이 각 회사별로 상표명만 다르고 비슷하거나 동일한 약제의 조합으로 함량과 제형만을 단순 변형시킨 제품들은 사용자에게 실질적인 선택의 폭을 넓혀주지 못함을 인지해야 한다. 전체 처리면적 측면에서, 비슷한 약제의 개발은 동일유사품목의 살포면적 중복을 가져와 저항성 출현의 선택압을 높이는 결과를 초래한다. 기존의 일발처리제 중심에서 벗어나 지역별 발생초종에 알맞은 체계 처리 및 교호살포를 유도함으로써 맞춤형 저항성 관리를 수행해야 한다. 또한 산업계가 주도적으로 HRAC과 같은 자발적인 활동위원회를 통해 교호살포를 위한 표준화된 레이블 사용 등의 공동 대응을 마련할 필요가 있다. 이를 위해서는 원제사, 제조사 및 협회의 공동의 선을 위한 개선노력이 요구된다.

둘째로, 학계는 저항성 진단 및 모니터링을 위한 연구개발을 지속해야 한다. 저항성 피의 진단키트로써 growth pouch법과 같은 간단한 진단법을 보급함과 동시에, 전국적인 모니터링을 통해 저항성 피의 발생현황을 추적 관리해야 한다. 또한, 제초제 저항성에 대한 중요성에 인식을 같이 함으로써 이를 연구할 후학이 지속적으로 양성될 수 있도록 노력하여야 한다.

셋째로, 국가연구기관은 제초제 등록 시스템에 저항성 관리를 추가해야 한다. 신규 제초제 등록시 기존의 공공시험, 자체시험 및 지역 특성에 따른 약해 유무를 파악하기 위한 지역적응성 시험에 저항성 관리를 추가하여 핵심 잡초에 대한 baseline test를 의무화해야 할 것이다. 또한, 획일화된 제초제 등록규정에 의거하여 다수의 초종에서 균등한 방제가 상회하는 경우에만 등록여부를 결정하는 것이 아니라, 피를 비롯한 저항성 잡초 중 한가지 초종에서라도 뛰어난 방제가 가능할 경우 저항성 관리를 위해 등록을 지원할 필요가 있다. 이에 반해 품목간 차별성 없이 기존 제품을 답습하는 경우는 장기적으로 등록 제한 등의 관리체계를 마련해야 할 것이다.

마지막으로, 농민은 잡초발생 현황에 따른 제초제와 재배방법에 맞는 체계처리 방법을 숙지하여야 한다. 기계이앙, 건답직파 및 답수직파에 따라 다른 잡초발생 종의 알맞은 체계처리 방법을 따름으로써 가장 경제적이고 효과적으로 저항성 피를 방제할 수 있다. 장기적으로는 작용기작별 교호사용도 필수적이다. 이번 해에 사용한 약제가 잡초를 우수하게 방제했다고 해서 내년에도 같은 약제만을 선택하는 것은 저항성 발현의 지름길이다. 동일 작용기작의 연용에 따른 저항성 발현의 심각성을 인지하고 이전 처리제와는 다른 작용기작의 제초제의 교호살포를 실시해야 한다.

5. 결론

1988년 이후 ALS 저해 제초제의 처리면적을 비교한 결과, 단계적으로 피 방제효과가 우수한 ALS 저해 제초제의 지속적인 사용이 저항성 피 발생의 주요 원인으로 파악되었다. ACCase 저해 제초제 역시 피에 대한 우수한 효과로 인해 1994년 이후 매년 10만 ha 이상의 처리면적에 살포되면서 저항성 피 발생의 주요 원인으로 나타났다. 2012년 기준, 전체 제초제 271 품목의 86%에 달하는 234 품목이 2종 이상의 혼합제로 등록되어 대부분의 제초제가 혼합제 형태로 사용되고 있으며, 단제를 통한 발생 초종 맞춤형 방제법이 마련되지 못한 실정이다. 또한 현재 개발 중인 약제 대부분이 ALS 및 ACCase 저해 제초제를 포함한 2종 이상의 혼합제로 나타났다. 이는 저항성 잡초의 발생원인 중 하나인 제초제 연용을 피할 수 없는 현실적 한계를 초래함으로써 저항성 문제를 해결하기 위한 선택의 폭을 좁히게 된다.

이를 해결하기 위해서는, 우선적으로 본 실험에서 선발된 저항성 피 방제용 제초제의 비중을 높여야 한다. ALS 저해 제초제 저항성 강피와 ACCase 저해 제초제 저항성 물피의 경우, 모두 VLCFAs 저해 제초제 및 PPO 저해 제초제, 그리고 작용기작이 밝혀지지 않은 oxaziclomefone에서 매우 우수한 방제효과를 나타냈다. 파종 후 5, 10일차에 약제처리를 한 경우에 매우 우수한 반면, 파종 후 15일차에 약제처리를 한 경우 방제효과가 현격히 감소한 실험 결과를 통해 초중기 약제 처리에서 VLCFAs, PPO 저해 제초제 및 oxaziclomefone의 비중을 확대하는 것이 한가지 해결책이 될 것이다. 이에 더하여 재배법(기계이앙, 담수직파 및 건답직파)에 따라

대체 제초제의 적기 사용과 체계처리를 통해 잡초를 방제하는 것도 효과적인 것으로 판단된다.

또한, 제초제 저항성 피의 체계적 관리를 위해 다양한 관련 기관들의 공동의 변화가 요구된다. 산업계는 단기적으로 저항성 피를 방제하기 위해 선발된 대체약제의 다양한 제품군을 개발해야 하고, 장기적으로 새로운 작용기작의 제초제 개발에 대한 투자를 늘려야 한다. 학계는 저항성의 작용기작에 대한 정확한 원인을 파악하고, 그에 따른 다양한 방제 대책을 연구해야 하며, 포장에서 간단하게 저항성 피를 진단할 수 있는 방법 등을 연구 및 공유하여야 한다. 국가연구기관은 핵심 잡초별 baseline test를 통해 전국적 발생현황을 모니터링하고, 미래 상황에 대한 시뮬레이션을 지속해 나아가야 한다. 국가정책기관은 저항성 피의 방제가 가능한 약제의 등록을 적극 권장하거나 생태독성이나 잔류 등의 문제로 인해 phase-out된 약제라도 취급제한기준 강화 등을 통해 약제사용을 제한적으로 허용하는 등 저항성 발현을 낮추거나 억제시키기 위한 제도를 보다 적극적으로 도입할 필요가 있다. 그리고 실제 사용자인 농민들이 제초제 및 저항성 피에 대해 정확히 이해하여야 하며, 교호살포, 체계처리, 정량살포 등은 단기적으로 처리횟수 및 경제적 비용을 증가시키더라도 궁극적으로 저항성 출현을 억제할 수 있을 것이다.

6. 참고 문헌

- 강승원, 유철현, 한상수. 1999. 토양물리성개선 및 진단시비가 무논골뿌림직파 벼의 질소이용효과와 수량에 미치는 영향. 한국토양비료학회지 32(3): 254-260
- 강신옥, 육민정, 김진원, 임수현, 김도순. 2010. 강피의 토양 처리형 ALS 저해 제초제 대한 약량 반응. 한국잡초학회 학술대회 초록집 30(2): 55-56
- 권오도, 문병철, 국용인, 김종국, 김한용. 2006. 벼 재배양식별 피와 물달개비 발생밀도에 따른 쌀 수량, 품위 및 경제적 허용 한계밀도 설정. 한국잡초학회지 26(2): 155-167
- 김동균. 1974. 잡초방제의 현황과 문제점. 한국작물학회지 16: 21-23
- 김순철. 1992. 벼 직파재배의 잡초발생 생태와 효과적인 방제법. 한국잡초학회지 12(3): 230-260
- 김희동, 김영호, 주영철, 성문석, 최영진, 이동석. 1992. 최근의 경기지역 논잡초분포 조사. 한국잡초학회지 12(1): 46-51
- 농약공업협회. 1988. 1988 농약사용지침서
- 농약공업협회. 1990. 1990 농약연보. pp. 209-259
- 농약공업협회. 1995. 1995 농약연보. pp. 281-342
- 농약공업협회. 2000a. 2000 농약연보. pp. 203-286
- 농약공업협회. 2000b. 2000 농약사용지침서
- 농약공업협회. 2005. 2005 농약연보. pp. 241-332
- 문병철, 조정래, 박태선, 박재읍. 2006. 경기지역 기계이앙논 주요잡초 요방제 수준설정. 농업과학기술원 시험연구보고서. pp. 1128-1148
- 미야하라 마스지, 구자욱, 이도진. 1998. 일본에서 Sulfonylurea계 제초제 저항성 잡초의 출현. 한국잡초학회지 18(3): 268-279
- 박광호, 오윤진, 구연충, 김희동, 사종구, 박재성, 김현호, 최석주,

- 신해룡, 김세중, 이병정, 고무수. 1995. 한국의 논 잡초분포 현황. 한국잡초학회지 15(4): 254-261
- 박재읍, 이인용, 문병철, 김창석, 박태선, 임순택, 조정래, 오세문, 임일빈, 황재복, 구연충. 2002. 최근 논잡초 발생특성 및 군락변동. 한국잡초학회지 22(3): 272-280
- 박태선. 2008. 논 제초제 저항성 잡초 발생에 따른 제초제 개발 현황과 방향. 농약과학회지 12(1): 1-8
- 박태선, 구본일, 강신구, 최민규, 박홍규, 이경보, 고재권. 2010. ACCase 및 ALS 저해 제초제들에 대한 저항성 강피의 반응과 대체약제들의 효과. 한국잡초학회지 30(3): 291-299
- 박태선, 박홍규, 홍승우, 김정곤, 정남진, 조현숙, 성기영, 양운호, 서명철, 강항원. 2012. 답리작 적응 조사료용 피의 생육 특성 및 제초제 반응. 한국잡초학회지 32(3): 256-262
- 박태선, 이인용, 성기영, 조현숙, 박홍규, 고재권, 강위금. 2011. 한국 논에서 제초제 저항성잡초 발생 현황과 전망. 한국잡초학회지 31(2): 119-133
- 오운진, 구연충, 이종훈, 함영수. 1981. 최근 한국의 논 잡초분포에 관하여. 한국잡초학회지 1(1): 21-29
- 육민정, 강신욱, 박민원, 김진원, 임수현, 김도순. 2010. 물피의 토양 처리형 ALS 저해 제초제에 대한 약량 반응. 한국잡초학회 학술대회 초록집 30(2): 114-115
- 이순계, 임일빈, 김도순, 변종영. 2006. 벼의 생육과 수량에 미치는 피와 물달개비의 경합효과. 한국잡초학회지 26(3): 262-269
- 임일빈. 2008. 한국 논 잡초방제 기술. 한국잡초과학연구소. pp. 157-200
- 임일빈, 강종국, 김선, 나승용, 경은선. 2003. 벼 재배유형별 잡초발생 빈도. 한국잡초학회지 23(2): 112-122
- 최충돈, 원종건, 이외현, 최부선. 1997. 벼 직파재배 유형별 잡초발생의 변화. 한국잡초학회지 17(2): 139-146.

- 최현욱, 안수봉, 김소연. 1973. 중부지방에 분포하는 논잡초의 종류와 발생량에 관하여. 농시연보 15: 69-75
- 한국작물보호협회. 2010. 2010 농약연보. pp. 281-347
- 한국작물보호협회. 2012a. 2012 농약연보. pp. 303-376
- 한국작물보호협회. 2012b. 2012 작물보호제 지침서.
- Daou, H. and R. E. Talbert. 1999. Control of propanil-resistant barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) in rice (*Oryza sativa*) with carbaryl/propanil mixtures. Weed Tech. 13:65-67
- Duke. S. O. and S. B. Powles. 2009. Glyphosate-resistant crops and weeds: now and in the future. AgBioForum. 12(3&4): 346-357
- Fischer, A. J., C. M. Ateh, D. E. Bayer, and J. E. Hill. 2000. Herbicide-resistant *Echinochloa oryzoides* and *E. phyllopogon* in California *Oryza sativa* fields. Weed Sci. 48: 225-230
- Fisher, A. J., E. Granados, and D. Trujillo. 1993. Propanil resistance in populations of junglerice (*Echinochloa colona*) in Colombian rice fields. Weed Sci. 41:201-206
- Garita, I., B. E. Valverde, I. A. Chacon, R. de la Cruz, C. R. Riches, and J. C. Caseley. 1995. Occurrence of propanil resistance in *Echinochloa colona* in Central America. pp. 557-566. In Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference-Weeds. Farnham, Great Britain. British Crop Protection Council.
- Garro, J. E., R. de la Cruz, and P. J. Shannon. 1991. Propanil resistance in *Echinochloa colona* populations with different herbicide use histories. pp. 1079-1083. In Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference-Weeds. Farnham, Great Britain. British Crop Protection Council.
- Green. J. M. 2007. Review of glyphosate and ALS-inhibiting herbicide crop resistance and resistant weed management. Weed tech. 21(2): 547-558
- Heap, I. 2013a. International Survey of Herbicide Resistant Weeds. Available at: <http://www.weedscience.org/In.asp>
- Heap, I. 2013b. HERBICIDE RESISTANT WEEDS SUMMARY TABLE. Available at: <http://www.weedscience.org/summary/MOASummary.asp>
- Hilton, H. W. 1957. Herbicide tolerant strain of weeds. Hawaii Sugar Planters

- Association Annual Reports. pp. 69
- Im, S. H., M. W. Park, M. J. Yook, and D. S. Kim. 2009. Resistance to ACCase inhibitor cyhalofop-butyl in *Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli* collected in Seosan, Korea. *Kor. J. Weed Sci.* 29(2): 178-184.
- Kim, D. S., J. C. Caseley, P. Brain, C. R. Riches, and B. E. Valverde. 2000. Rapid detection of propanil and fenoxaprop resistance in *Echinochloa colona*. *Weed Sci.* 48: 695-700
- Maneechote, C. 2001. Group A/1 resistant barnyardgrass(*Echinochloa crus-galli*) in Thailand. <http://www.weedscience.org/Case/Case.asp?ResistID=5113>.
- Moon, B. C., J. G. Won, Y. L. Kim, S. W. Kim, I. Y. Lee, J. E. Park, and D. S. Kim. 2011. Prediction of rice yield and economic thresholds by some weeds-rice competition in transplanted rice cultivation. *Kor. J. Weed Sci.* 31(3): 289-293
- Norsworthy, J. K., J. S. Rutledge, R. E. Talbert, and R. E. Hoagland. 2002. Agrichemical interactions with propanil on propanil-resistant barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*). *Weed Tech.* 13: 296-3025
- Park, T. S., C. S. Kim, J. E. Park, Y. K. Oh, and K. U. Kim. 1999. Sulfonylurea-resistant biotype of *Monochroa korsakowii* in reclaimed paddy fields in Seosan, Korea. *Kor. J. Weed Sci.* 19(4): 340-344
- Riches C. R., J. C. Caseley, B. E. Valverde and V. M. Down. 1996. Resistance of *Echinochloa colona* to ACCase inhibiting herbicides. *Proc. International Symposium on Weed and Crop Resistance to Herbicides.* EWRS, Cordoba, Spain. pp. 14-16
- Ryan, G. F. 1970. Resistance of common groundsel to simazine and atrazine. *Weed Sci.* 18(5): 614-616
- Valverde, B. B. 1998. Multiple resistant junglerice (*Echinochloa colona*) resistance to herbicides in groups A/1, B/2, and C2/7 in Costa Rica. Available at: <http://www.weedscience.org/Case/Case.asp?ResistID=5147>
- WSSA. 1998. "Herbicide resistance" and "Herbicide tolerance" defined. *Weed Tech.* 12(4): 789-790

부 록

Table A1 Visual efficacies of herbicides at their recommended dose applied at three different timings against resistant and susceptible biotypes of *Echinochloa oryzicola*

HRAC Group	Herbicide	Gimje (R-type)			Suwon (S-type)		
		5 DAS	10 DAS	15 DAS	5 DAS	10 DAS	15 DAS
A	Cyhalofop	43.3	83.3	56.7	73.3	100.0	80.0
	Metamifop	100.0	93.3	70.0	93.3	96.7	63.3
	Azimsulfuron	23.3	56.7	73.3	100.0	83.3	83.3
	Flucetosulfuron	36.7	36.7	66.7	100.0	86.7	93.3
	Imazosulfuron	36.7	43.3	56.7	83.3	93.3	66.7
	Penoxsulam	70.0	56.7	80.0	86.7	100.0	90.0
	Propyrisulfuron	26.7	36.7	50.0	100.0	96.7	96.7
B	Pyrazosulfuron-ethyl	100.0	40.0	76.7	100.0	96.7	80.0
	Pyrifthalid	86.7	100.0	86.7	100.0	100.0	70.0
	Pyriminobac-methyl	100.0	100.0	53.3	100.0	100.0	80.0
	Pyrimisulfan	66.7	70.0	56.7	100.0	100.0	93.3
C1	Dimethametryn	10.0	50.0	73.3	43.3	100.0	83.3
	Oxadiargyl	100.0	100.0	80.0	100.0	100.0	70.0
E	Oxadiazon	100.0	100.0	73.3	100.0	93.3	90.0
	Pentoxazone	100.0	36.7	50.0	100.0	23.3	73.3
F2	Benzobicyclon	76.7	36.7	50.0	93.3	83.3	80.0
	Mesotrione	10.0	20.0	86.7	96.7	63.3	56.7
	Pyrazolynate	60.0	73.3	63.3	83.3	86.7	73.3
F3	Tefuryltrione	100.0	83.3	66.7	100.0	90.0	90.0
	Clomazone	43.3	60.0	66.7	86.7	53.3	83.3
K1	Dithiopyr	100.0	100.0	76.7	100.0	96.7	90.0
	Butachlor	100.0	100.0	80.0	100.0	86.7	83.3
	Cafenstrole	100.0	100.0	76.7	100.0	100.0	83.3
K3	Fentrazamide	100.0	100.0	70.0	100.0	100.0	83.3
	Mefenacet	100.0	100.0	90.0	100.0	100.0	96.7
	Pretilachlor	100.0	73.3	63.3	100.0	86.7	80.0
N	Benfuresate	76.7	83.3	73.3	100.0	86.7	43.3
	Esprocarb	100.0	73.3	76.7	100.0	93.3	76.7
	Thiobencarb	90.0	96.7	66.7	100.0	86.7	76.7
Z	Bromobutide	56.7	56.7	60.0	60.0	86.7	60.0
	Indanofan	100.0	96.7	70.0	100.0	93.3	83.3
	Oxaziclomefone	100.0	100.0	83.3	100.0	100.0	86.7
	LSD	12.05	16.29	18.72	12.18	16.59	15.93

Table A2 Visual efficacies of herbicides at x 2 of their recommended dose applied at three different timings against resistant and susceptible biotypes of *Echinochloa oryzicola*

HRAC Group	Herbicide	Gimje (R-type)			Suwon (S-type)		
		5 DAS	10 DAS	15 DAS	5 DAS	10 DAS	15 DAS
A	Cyhalofop	66.7	100.0	76.7	100.0	100.0	100.0
	Metamifop	100.0	86.7	83.3	100.0	100.0	83.3
B	Azimsulfuron	76.7	56.7	66.7	100.0	93.3	76.7
	Flucetosulfuron	46.7	70.0	86.7	100.0	96.7	93.3
	Imazosulfuron	50.0	50.0	80.0	86.7	93.3	90.0
	Penoxsulam	73.3	73.3	90.0	100.0	100.0	93.3
	Propyrisulfuron	56.7	46.7	80.0	96.7	100.0	93.3
	Pyrazosulfuron-ethyl	100.0	60.0	80.0	100.0	96.7	90.0
	Pyriftalid	90.0	96.7	93.3	100.0	100.0	93.3
	Pyriminobac-methyl	100.0	86.7	80.0	100.0	100.0	93.3
	Pyrimisulfan	63.3	66.7	80.0	100.0	100.0	93.3
	C1	Dimethametryn	60.0	76.7	73.3	96.7	100.0
E	Oxadiazon	100.0	100.0	93.3	100.0	100.0	90.0
	Pentoxazone	100.0	60.0	80.0	90.0	60.0	90.0
	Benzobicyclon	66.7	80.0	83.3	100.0	86.7	83.3
F2	Mesotrione	43.3	30.0	76.7	100.0	93.3	80.0
	Pyrazolynate	75.0	76.7	80.0	96.7	66.7	90.0
	Tefuryltrione	96.7	80.0	73.3	100.0	93.3	93.3
F3	Clomazone	56.7	70.0	80.0	86.7	93.3	86.7
K1	Dithiopyr	100.0	100.0	93.3	100.0	100.0	93.3
	Butachlor	100.0	100.0	83.3	100.0	90.0	86.7
	Cafenstrole	100.0	100.0	90.0	100.0	96.7	93.3
K3	Fentrazamide	100.0	100.0	83.3	100.0	100.0	90.0
	Mefenacet	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	Pretilachlor	100.0	100.0	86.7	100.0	96.7	90.0
N	Benfuresate	100.0	96.7	83.3	100.0	100.0	73.3
	Esprocarb	100.0	93.3	83.3	100.0	100.0	80.0
	Thiobencarb	100.0	86.7	83.3	100.0	100.0	90.0
Z	Bromobutide	80.0	83.3	70.0	35.0	66.7	66.7
	Indanofan	100.0	100.0	86.7	100.0	96.7	80.0
	Oxaziclomefone	100.0	100.0	93.3	100.0	100.0	96.7
	LSD	23.46	16.04	11.62	7.1	9.61	9.75

Table A3 Visual efficacies of herbicides at their recommended dose applied at three different timings against resistant and susceptible bio-types of *Echinochloa crus-galli*

HRAC Group	Herbicide	Seosan-5 (R-type)			Suwon (S-type)		
		5 DAS	10 DAS	15 DAS	5 DAS	10 DAS	15 DAS
A	Cyhalofop	40.0	86.7	66.7	46.7	90.0	70.0
	Metamifop	93.3	80.0	33.3	76.7	90.0	73.3
	Azimsulfuron	43.3	50.0	63.3	73.3	76.7	73.3
	Flucetosulfuron	46.7	40.0	50.0	83.3	86.7	83.3
	Imazosulfuron	46.7	43.3	63.3	60.0	66.7	73.3
	Penoxsulam	80.0	76.7	50.0	90.0	93.3	83.3
B	Propyrisulfuron	23.3	50.0	36.7	93.3	100.0	76.7
	Pyrazosulfuron-ethyl	86.7	33.3	50.0	70.0	83.3	80.0
	Pyriftalid	66.7	66.7	53.3	86.7	90.0	66.7
	Pyriminobac-methyl	100.0	86.7	46.7	96.7	93.3	46.7
	Pyrimisulfan	63.3	60.0	63.3	90.0	96.7	86.7
C1	Dimethametryn	46.7	36.7	53.3	46.7	43.3	53.3
	Oxadiazon	100.0	90.0	66.7	100.0	90.0	53.3
E	Oxadiazon	100.0	86.7	66.7	100.0	93.3	66.7
	Pentoxazone	95.0	40.0	56.7	100.0	20.0	50.0
F2	Benzobicyclon	73.3	33.3	53.3	76.7	53.3	86.7
	Mesotrione	43.3	36.7	46.7	90.0	63.3	50.0
	Pyrazolynate	66.7	43.3	43.3	63.3	53.3	50.0
	Tefuryltrione	100.0	90.0	33.3	100.0	86.7	43.3
F3	Clomazone	86.7	66.7	53.3	83.3	76.7	63.3
K1	Dithiopyr	86.7	90.0	53.3	100.0	86.7	70.0
	Butachlor	100.0	60.0	53.3	100.0	73.3	63.3
	Cafenstrole	100.0	100.0	83.3	100.0	100.0	83.3
K3	Fentrazamide	100.0	100.0	70.0	93.3	90.0	76.7
	Mefenacet	100.0	100.0	73.3	100.0	100.0	86.7
	Pretilachlor	100.0	46.7	63.3	100.0	66.7	80.0
N	Benfuresate	83.3	36.7	46.7	73.3	70.0	53.3
	Esprocarb	73.3	63.3	50.0	73.3	70.0	70.0
	Thiobencarb	96.7	40.0	66.7	90.0	93.3	83.3
Z	Bromobutide	63.3	33.3	63.3	43.3	43.3	76.7
	Indanofan	100.0	83.3	60.0	96.7	93.3	70.0
	Oxaziclomefone	100.0	100.0	73.3	100.0	100.0	86.7
	LSD	22.82	17.05	14.91	20.87	14.33	13.34

Table A4 Visual efficacies of herbicides at x 2 of their recommended dose applied at three different timings against resistant and susceptible bio-types of *Echinochloa crus-galli*

HRAC Group	Herbicide	Seosan-5 (R-type)			Suwon (S-type)			
		5 DAS	10 DAS	15 DAS	5 DAS	10 DAS	15 DAS	
A	Cyhalofop	80.0	93.3	80.0	56.7	96.7	90.0	
	Metamifop	96.7	100.0	40.0	100.0	90.0	86.7	
	Azimsulfuron	70.0	53.3	60.0	76.7	83.3	76.7	
	Flucetosulfuron	43.3	63.3	50.0	90.0	93.3	90.0	
	Imazosulfuron	50.0	50.0	56.7	73.3	66.7	83.3	
	Penoxsulam	96.7	93.3	70.0	96.7	100.0	90.0	
	B	Propyrisulfuron	60.0	70.0	46.7	93.3	100.0	76.7
		Pyrazosulfuron-ethyl	93.3	56.7	60.0	96.7	93.3	83.3
Pyrifthalid		96.7	90.0	63.3	100.0	93.3	66.7	
Pyriminobac-methyl		100.0	100.0	53.3	93.3	100.0	56.7	
Pyrimisulfan		76.7	70.0	70.0	90.0	100.0	90.0	
C1	Dimethametryn	73.3	53.3	50.0	86.7	60.0	60.0	
	Oxadiazon	100.0	86.7	63.3	100.0	100.0	80.0	
E	Oxadiazon	100.0	90.0	63.3	100.0	93.3	80.0	
	Pentoxazone	100.0	43.3	63.3	85.0	40.0	53.3	
F2	Benzobicyclon	70.0	56.7	70.0	93.3	63.3	90.0	
	Mesotrione	100.0	40.0	46.7	90.0	70.0	53.3	
	Pyrazolynate	66.7	53.3	63.3	83.3	60.0	66.7	
F3	Tefuryltrione	100.0	73.3	56.7	100.0	100.0	66.7	
	Clomazone	96.7	83.3	53.3	96.7	76.7	63.3	
K1	Dithiopyr	100.0	100.0	73.3	100.0	100.0	76.7	
	Butachlor	100.0	93.3	80.0	100.0	90.0	76.7	
	Cafenstrole	100.0	100.0	86.7	100.0	100.0	83.3	
K3	Fentrazamide	100.0	100.0	76.7	100.0	80.0	80.0	
	Mefenacet	100.0	100.0	93.3	100.0	100.0	93.3	
	Pretilachlor	100.0	90.0	80.0	100.0	100.0	90.0	
	Benfuresate	100.0	63.3	60.0	100.0	80.0	56.7	
N	Esprocarb	90.0	76.7	66.7	76.7	83.3	83.3	
	Thiobencarb	100.0	66.7	76.7	96.7	96.7	86.7	
Z	Bromobutide	80.0	43.3	60.0	65.0	53.3	80.0	
	Indanofan	100.0	100.0	76.7	100.0	100.0	83.3	
	Oxaziclomefone	100.0	100.0	90.0	100.0	100.0	93.3	
LSD		21.53	16.01	12.12	19.46	12.43	11.62	

Table A5 Fresh weights of resistant and susceptible biotypes of *Echinochloa oryzicola* applied with recommended doses herbicides at three different timings

HRAC Group	Herbicide	Gimje (R-type)			Suwon (S-type)		
		5 DAS	10 DAS	15 DAS	5 DAS	10 DAS	15 DAS
A	Cyhalofop	75.0	89.3	80.1	100.0	47.6	77.0
	Metamifop	100.0	99.0	79.9	95.8	69.2	63.4
B	Azimsulfuron	34.3	100.0	57.2	95.4	62.0	79.2
	Flucetosulfuron	29.4	100.0	53.8	95.1	72.9	86.0
	Imazosulfuron	20.6	97.8	60.8	100.0	54.7	57.4
	Penoxsulam	86.2	100.0	61.0	100.0	75.4	94.8
	Propyrisulfuron	61.2	100.0	65.3	100.0	76.0	100.0
	Pyrazosulfuron-ethyl	100.0	100.0	37.8	100.0	61.2	75.9
	Pyrifthalid	97.1	100.0	100.0	100.0	88.0	87.3
C1	Pyriminobac-methyl	100.0	100.0	100.0	100.0	67.8	48.2
	Pyrimisulfan	96.2	100.0	83.7	100.0	43.7	90.3
E	Dimethametryn	51.6	83.6	79.9	96.9	80.9	66.9
	Oxadiazon	100.0	100.0	100.0	100.0	61.2	68.5
F2	Oxadiazon	100.0	100.0	100.0	69.0	68.8	81.9
	Pentoxazone	100.0	100.0	60.7	54.9	75.7	62.5
F3	Benzobicyclon	92.4	98.7	44.8	94.5	55.4	74.3
	Mesotrione	8.0	100.0	42.1	85.1	80.8	48.6
	Pyrazolynate	83.0	95.7	74.4	85.9	60.4	70.0
K1	Tefuryltrione	100.0	100.0	90.9	92.8	68.3	69.9
	Clomazone	74.5	98.4	77.3	80.3	72.7	67.0
K3	Dithiopyr	100.0	100.0	100.0	93.6	87.5	81.6
	Butachlor	100.0	100.0	100.0	96.0	78.1	78.7
	Cafenstrole	100.0	100.0	100.0	100.0	71.6	77.4
	Fentrazamide	100.0	100.0	100.0	100.0	48.3	89.1
	Mefenacet	100.0	100.0	100.0	100.0	94.2	89.4
N	Pretilachlor	100.0	100.0	76.3	83.9	70.0	91.6
	Benfuresate	90.4	100.0	92.1	77.9	77.9	77.9
	Esprocarb	100.0	100.0	87.1	93.7	91.3	81.9
Z	Thiobencarb	98.8	100.0	98.6	94.1	73.5	89.8
	Bromobutide	72.2	80.2	83.0	89.2	68.6	62.7
	Indanofan	100.0	100.0	100.0	98.2	76.3	81.6
LSD	Oxaziclomefone	100.0	100.0	100.0	100.0	71.0	72.3
	LSD	17.95	24.13	32.71	5.91	21.29	21.91

Table A6 Fresh weights of resistant and susceptible biotypes of *Echinochloa oryzicola* applied with x 2 dose of recommended doses of herbicides at three different timings

HRAC Group	Herbicide	Gimje (R-type)			Suwon (S-type)			
		5 DAS	10 DAS	15 DAS	5 DAS	10 DAS	15 DAS	
A	Cyhalofop	92.1	100.0	100.0	100.0	68.9	100.0	
	Metamifop	100.0	100.0	61.3	100.0	72.7	84.1	
	Azimsulfuron	78.9	94.6	52.3	97.8	50.5	78.6	
	Flucetosulfuron	26.7	100.0	62.7	97.2	65.1	96.7	
	Imazosulfuron	52.2	82.4	65.3	100.0	51.6	78.6	
	Penoxsulam	86.0	100.0	83.3	100.0	81.4	97.8	
	B	Propyrisulfuron	78.6	98.2	58.1	100.0	72.4	94.8
		Pyrazosulfuron-ethyl	100.0	100.0	71.0	100.0	63.2	82.6
Pyriftalid		98.5	100.0	100.0	100.0	86.0	77.7	
Pyriminobac-methyl		100.0	100.0	81.2	100.0	85.6	85.8	
	Pyrimisulfan	92.6	100.0	64.6	100.0	65.9	94.8	
C1	Dimethametryn	81.3	98.5	83.2	92.8	46.1	56.3	
	Oxadiazon	100.0	100.0	100.0	100.0	65.5	80.9	
E	Oxadiazon	100.0	100.0	100.0	100.0	90.7	81.9	
	Pentoxazone	100.0	78.6	69.9	70.2	69.2	56.1	
F2	Benzobicyclon	51.9	100.0	98.2	94.9	59.8	72.1	
	Mesotrione	84.3	100.0	25.3	93.3	70.2	48.1	
	Pyrazolynate	79.1	97.5	64.8	70.6	64.4	59.7	
	Tefuryltrione	98.9	100.0	80.9	90.6	65.5	98.1	
F3	Clomazone	88.5	95.5	82.0	98.1	77.9	69.1	
K1	Dithiopyr	100.0	100.0	100.0	100.0	76.3	88.4	
	Butachlor	100.0	100.0	100.0	91.3	77.0	76.6	
K3	Cafenstrole	100.0	100.0	100.0	100.0	93.8	96.6	
	Fentrazamide	100.0	100.0	100.0	100.0	88.8	91.1	
	Mefenacet	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	Pretilachlor	100.0	100.0	100.0	100.0	74.0	75.7	
	Benfuresate	100.0	100.0	98.5	96.7	92.0	79.6	
N	Esprocarb	100.0	100.0	87.8	91.8	98.6	89.5	
	Thiobencarb	100.0	100.0	93.8	100.0	80.9	93.3	
	Bromobutide	98.4	35.3	77.8	57.7	75.9	57.6	
Z	Indanofan	100.0	100.0	100.0	100.0	84.2	85.3	
	Oxaziolomefone	100.0	100.0	100.0	100.0	84.7	100.0	
	LSD	23.68	20.73	23.60	10.8	10.41	21.58	

Table A7 Fresh weights of resistant and susceptible bio-types of *Echinochloa crus-galli* applied with recommended doses herbicides at three different timings

HRAC Group	Herbicide	Seosan-5 (R-type)			Suwon (S-type)		
		5 DAS	10 DAS	15 DAS	5 DAS	10 DAS	15 DAS
A	Cyhalofop	69.1	72.0	74.3	96.2	44.6	68.2
	Metamifop	100.0	89.5	74.0	83.9	39.6	51.4
B	Azimsulfuron	44.0	88.8	55.8	82.0	37.6	33.2
	Flucetosulfuron	27.7	97.6	21.2	89.2	41.8	76.2
	Imazosulfuron	58.8	81.4	63.5	81.5	35.8	43.1
	Penoxsulam	95.7	98.4	91.7	99.5	47.5	75.7
	Propyrisulfuron	44.7	90.8	80.0	100.0	57.5	88.2
	Pyrazosulfuron-ethyl	86.3	100.0	42.4	97.1	25.2	55.7
	Pyrifthalid	88.1	96.2	66.6	87.8	54.5	46.3
C1	Pyriminobac-methyl	100.0	100.0	91.9	75.4	49.1	18.0
	Pyrimisulfan	80.7	92.7	57.0	100.0	50.2	87.2
E	Dimethametryn	71.7	43.3	63.7	43.3	33.9	23.0
	Oxadiazon	100.0	100.0	72.9	77.3	30.3	38.1
F2	Oxadiazon	100.0	100.0	74.0	58.2	27.7	27.9
	Pentoxazone	100.0	100.0	50.2	1.6	36.0	39.2
F3	Benzobicyclon	96.5	90.2	63.9	68.9	30.9	46.3
	Mesotrione	61.9	89.4	41.4	63.1	23.8	40.8
	Pyrazolynate	59.7	62.9	22.5	9.8	37.0	34.9
K1	Tefuryltrione	100.0	100.0	91.8	81.8	30.6	40.4
	Clomazone	98.6	93.0	77.4	81.5	38.7	45.4
K3	Dithiopyr	94.7	100.0	86.5	86.8	22.3	60.9
	Butachlor	100.0	100.0	56.8	75.3	54.0	37.0
	Cafenstrole	100.0	100.0	100.0	100.0	89.1	85.8
	Fentrazamide	100.0	100.0	99.3	92.0	47.6	70.4
	Mefenacet	100.0	100.0	100.0	100.0	75.0	89.2
N	Pretilachlor	100.0	100.0	59.5	66.2	54.7	65.2
	Benfuresate	92.1	88.3	44.6	51.8	34.8	21.9
Z	Esprocarb	91.1	67.4	44.0	57.5	75.5	79.6
	Thiobencarb	95.3	91.5	26.6	92.8	49.6	61.3
Z	Bromobutide	67.6	54.5	32.8	39.5	33.9	53.7
	Indanofan	100.0	100.0	80.6	94.1	62.3	65.5
	Oxaziolomefone	100.0	100.0	100.0	100.0	56.0	86.3
LSD		26.13	36.1	26.72	19.82	30.64	20.84

Table A8 Fresh weights of resistant and susceptible bio-types of *Echinochloa crus-galli* applied with x 2 dose of recommended doses of herbicides at three different timings

HRAC Group	Herbicide	Seosan-5 (R-type)			Suwon (S-type)		
		5 DAS	10 DAS	15 DAS	5 DAS	10 DAS	15 DAS
A	Cyhalofop	85.9	75.2	98.8	95.5	46.9	86.8
	Metamifop	99.5	100.0	100.0	61.3	54.3	62.8
B	Azimsulfuron	55.2	76.4	62.8	88.3	40.8	41.1
	Flucetosulfuron	28.3	96.0	59.1	99.0	27.0	92.2
	Imazosulfuron	57.8	86.6	61.6	73.2	35.3	74.7
	Penoxsulam	100.0	100.0	100.0	100.0	73.1	95.0
	Propyrisulfuron	93.0	96.7	70.0	100.0	45.1	89.4
	Pyrazosulfuron-ethyl	100.0	86.3	49.2	97.2	32.0	53.0
	Pyrifthalid	100.0	100.0	93.1	100.0	49.9	40.3
C1	Pyriminobac-methyl	95.0	97.3	100.0	100.0	40.4	52.2
	Pyrimisulfan	90.8	99.1	62.9	100.0	31.1	96.5
E	Dimethametryn	88.0	96.1	70.2	45.9	15.9	18.9
	Oxadiazon	100.0	100.0	100.0	97.9	28.8	52.3
F2	Oxadiazon	100.0	100.0	100.0	97.9	28.8	52.3
	Pentoxazone	100.0	64.7	25.4	52.3	25.0	25.8
	Benzobicyclon	84.4	100.0	44.0	31.2	37.0	61.1
F3	Mesotrione	98.7	84.6	35.9	70.8	33.7	17.0
	Pyrazolynate	100.0	79.9	39.4	50.6	39.4	47.7
	Tefuryltrione	100.0	100.0	66.0	93.8	60.7	52.7
K1	Clomazone	99.7	100.0	92.8	76.9	42.2	46.9
	Dithiopyr	100.0	100.0	100.0	100.0	42.9	38.9
K3	Butachlor	100.0	100.0	92.1	88.9	49.7	52.5
	Cafenstrole	100.0	100.0	100.0	100.0	86.0	85.3
	Fentrazamide	100.0	100.0	100.0	94.6	75.3	72.1
	Mefenacet	100.0	100.0	100.0	100.0	90.2	99.7
	Pretilachlor	100.0	100.0	73.0	100.0	61.2	70.9
N	Benfuresate	100.0	100.0	75.4	80.4	39.9	43.3
	Esprocarb	97.0	100.0	69.3	88.2	81.2	83.8
	Thiobencarb	100.0	100.0	65.4	96.2	67.3	86.5
Z	Bromobutide	87.0	61.9	32.8	46.5	51.3	49.9
	Indanofan	100.0	100.0	100.0	100.0	80.5	81.9
	Oxaziclomefone	100.0	100.0	100.0	100.0	88.2	93.6
LSD		15.95	28.41	30.95	20.36	18.73	23.86

ABSTRACT

Cause and Management of Herbicide Resistant *Echinochloa* species in Paddy Fields

DO CHAN BAE

Department of Plant Science

The Graduate School

Seoul National University

This study was conducted to investigate socio-economical cause of herbicide resistance in *Echinochloa* spp. recently evolved in Korean paddy fields and to provide methods to manage this resistance based on alternative herbicides tested and selected based on pot experiments. Data analysis of herbicide registration and use in Korea suggests that chronological change in new herbicide introduction and herbicide use, particularly ALS inhibitors, is closely related with resistance development in *Echinochloa* spp. In the early stage of ALS herbicide use since 1988 when the first ALS inhibitor, bensulfuron-methyl, was introduced in Korea, ALS inhibitors had low efficacy against *Echinochloa* spp.. In 1990s, ALS inhibitors with relatively strong efficacy were introduced stepwise; pyrazosulfuron-ethyl followed by azimsulfuron and imazosulfuron. It was 1999 that pyriminobac-methyl was introduced as a grass killer, particularly to control *Echinochloa* spp.. Another introduction of two other ALS inhibitors registered for *Echinochloa* control such as flucetosulfuron and penoxsulam increased selection pressure to

Echinochloa spp., resulting in herbicide resistant *Echinochloa* spp. in 2008. This stepwise selection pressure from low with ALS inhibitors with low efficacy against *Echinochloa* spp. to high with those with strong efficacy was attributed to herbicide resistance evolution in *Echinochloa* spp. in Korean paddy field. Heavy use of ACCase inhibitor, particularly for late POST control in large rice farm, may have attributed to ACCase inhibitor resistant *Echinochloa crus-galli*. It is also revealed that heavy reliance on one-shot herbicides mostly containing ALS inhibitor and ACCase inhibitor is responsible for herbicide resistant *Echinochloa* spp..

Herbicides with different modes of action were tested against herbicide resistant (HR) *Echinochloa crus-galli* and *E. oryzicola* for herbicide resistant *Echinochloa* management. Herbicide formulations containing each single a.i. at x 1 and x 2 of their recommended dose rate were directly applied to the flooded soil at 5, 10, and 15 days after sowing, equivalent to 1, 2, and 3 leaf stages of *Echinochloa* spp., respectively. PPO and VLCFA inhibitors showed high efficacy against both HR *E. crus-galli* and *E. oryzicola* when they were applied at 10 days after sowing, i.e. the early-mid time application. However, in the mid time application, i.e. 15 days after sowing, all the herbicides showed inefficient control of HR *Echinochloa* spp.. Therefore, our results suggest that herbicides belonging to PPO and VLCFA inhibitors can control HR *Echinochloa* spp. until the 2 leaf stage but a new mode of action herbicide is required for the effective control of HR *Echinochloa* spp. at later growth stages than the 2 leaf stage. In conclusion, this study suggests that sequential application or rotational use of herbicides with different modes of action including those herbicides selected in this study may delay wide spread of herbicide resistance in *Echinochloa* spp. Therefore, integrated herbicide resistance management should be implemented by incorporating all possible practices, reducing the dependency of one-shot herbicides and ALS and ACCase inhibitors for *Echinochloa* control, and encouraging development of

solo products containing a single herbicide a.i., and sequential and rotational use of herbicides with different modes of action.

Keywords: ACCase inhibitor, ALS inhibitor, *Echinochloa crus-galli*,
Echinochloa oryzicola, herbicide resistance, PPO, VLCFA

Student Number: 2010-21150

감사의 글

논문을 쓰는 기간은 대학원 공부를 위해 노력하던 초심을 가슴 속에서 다시 꺼내보는 시간이었습니다. 학교에 처음 인사 왔던 날, 설레는 합격의 기쁨, 실험실과 농장에서의 수많은 날들.. 이곳에서 소중한 추억을 함께 하였음에 감사할 따름입니다.

이렇게 논문이 나오기까지 저에게 많은 가르침을 주신 소중한 분들께 감사의 말을 전합니다. 먼저, 부족한 저를 넓은 이해와 배려로 끝까지 이끌어주신 김도순 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 그 동안 배웠던 수많은 가르침과 지식들을 잊지 않겠습니다. 그리고 농업에 대한 배움의 기쁨과 노력하는 자세를 가르쳐주신 이변우 교수님, 이석하 교수님, 고희종 교수님, 백남천 교수님, 서학수 교수님, 양태진 교수님, 김광수 교수님께도 감사의 말을 전합니다.

그리고 저와 함께 동고동락해주었던 우리 실험실 식구들, 정지훈 박사님, 정은숙 선생님, 김진원, 임수현, 박민원, 강신욱, 육민정, 송종석, 임지수, 이은정, 장전걸, 자스틴 모두 고맙습니다.

또한, 석사과정을 무사히 마칠 수 있도록 배려해주신 한국작물보호협회 안광욱 부회장님, 조상학 상무님, 조성필 이사님, 박학순 이사님, 이재학 부장님 및 직원 여러분, 격려와 도움주신 회원사 임직원 분들께도 깊이 감사드립니다.

끝으로, 늘 곁에서 격려해주셨던 사랑하는 가족들에게 감사의 마음을 전합니다. 항상 옆에서 힘이 되어주는 저의 아내 기란씨에게 고맙고 사랑한다고 말하고 싶습니다. 우리의 꿈을 향해 열심히 살아가겠습니다.