

## 제초제 저항성작물에서 잡초관리기술 동향 및 전망

변종영<sup>1\*</sup> · 장규섭<sup>1</sup> · 이증주<sup>2</sup> · 박기웅<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램, <sup>2</sup>경상대학교 응용생물학과, <sup>3</sup>충남대학교 식물자원학과

## Current Status and Perspective of Weed Management in Herbicide-Resistant Crops

Jong Yeong Pyon<sup>1\*</sup>, Kyu Seob Chang<sup>1</sup>, Jeung Joo Lee<sup>2</sup>, and Kee Woong Park<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ReSEAT Program, Korea Institute of Science & Technology Information, Daejeon, 305-806, Korea

<sup>2</sup>Department of Applied Biology, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea

<sup>3</sup>Department of Crop Science, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

(Received on July 16, 2013; Revised on August 31, 2013; Accepted on September 04, 2013)

**ABSTRACT.** This paper reviews current status of weed control practices in herbicide-resistant crops to examine weed management strategies in cope with cropping herbicide-resistant crops in the near future. Herbicide-resistant crops were rapidly adopted weed management technologies due to broad-spectrum weed control without crop injury. Transgenic glyphosate-resistant cultivars in soybean, corn, canola, and cotton were adopted to manage weeds at lower cost in a simplified weed management system. Dual stack crops with glyphosate and glufosinate resistance were developed to control glyphosate resistant weeds in corn, soybean and cotton. New multiple herbicide-resistant crops with resistance to glyphosate and glufosinate, acetolactate synthase (ALS) inhibitors, synthetic auxin herbicides, 4-hydroxyphenyl pyruvate dioxygenase (HPPD) inhibitors or acetyl Coenzyme A carboxylase (ACCCase) inhibitors will expanded the utility of existing herbicide technologies to manage the evolution of resistant weeds. However, herbicide resistant crops alone cannot solve weed problems and thus studies on diverse weed managements using an array of alternating herbicides of mode of action, mechanical, and cultural practices are needed for integrated weed management systems in the future.

**Key words:** Glyphosate, Glufosinate, Herbicide-resistant crops, Herbicide-resistant weeds, Weed management system

생명공학기술은 한 생물 중에서 유용한 유전자를 다른 생물 종의 DNA에 삽입하는 형질전환작물의 개발을 가능하게 하였다. 형질전환 토마토(Flavr Sarr)가 1994년에 상업적으로 처음 도입된 이후 생물공학과 변형유전자를 포함한 작물유전학의 개량은 과거 50년 동안에 걸쳐 작물개량 및 생태에 강한 영향을 미친 가장 중요한 단일 요인으로 인용되어 왔다(Crookston, 2006). 미국에서 유전자 형질전환 옥수수, 콩, 면화는 각 작물의 생산면적의 85, 91, 88%를 점유하고 있다 (USDA, 2009). 2011년에는 전 세계 29개국, 1670만 농민이 유전자변형작물을 재배하였으며, 미국은 전세계 유전자변형작물 재배면적의 43.1%인 6,900만 ha를 재배하였고, 브라질 19%, 아르헨티나 15%, 인도 6.5%,

캐나다 6.5% 등이며, 가장 많이 재배되는 유전자변형작물은 콩으로 47%, 뒤이어 옥수수 32%, 면화 15%, 캐놀라 5% 등으로 네 가지 작물이 전체의 99%를 차지하고 있다 (James, 2011).

제초제 저항성작물은 1995년에 bromoxynil 저항성 면화가 처음으로 개발되었으나 상업적으로 성공하지 못하였고 (Green and Castle, 2010), glufosinate 저항성 캐놀라도 상업적으로 개발되었지만 시장 침투는 다소 미미하였다. 그러나 1996년에 glyphosate 저항성 콩이 개발되면서 glyphosate 저항성 형질전환작물이 급격하게 증가되어 유전자변형작물의 25%가 제초제 저항성 특성을 갖는 것으로 조사되었다 (James, 2011). 미국에서 형질전환작물로서 가장 일반적으로 채택하고 있는 것은 특정 제초제에 대한 저항성 형질로서, 전체 옥수수, 콩, 면화 재배면적의 각각 68, 91, 71%를 차지하고 있다(USDA, 2009).

제초제 저항성 형질, 특히 glyphosate에 대한 저항성에

\*Corresponding author:

Phone) +82-42-869-0682, Fax) +82-42-869-0699

E-mail) jypyon@cnu.ac.kr

의하여 잡초관리는 지속적으로 개선되는 큰 이점을 가져왔다(Gianessi, 2005). 재배 농민은 옥수수, 콩, 목화, 캐놀라, 벼, 사탕무, 알팔파에서 glyphosate 저항성작물을 빠르게 채택하였다. 제초제 저항성작물의 전 세계 사용면적은 매년 10%씩 증가되고 있었으며, 미국에서 glyphosate 저항성 콩은 상업화 후 6년 만에 콩 재배면적의 80% 이상을 차지하고, 면화는 8년 후에 80%에 달하였다(James, 2011).

따라서 이미 제초제 저항성작물을 재배하고 있는 나라에서 제초제 저항성작물 개발과 잡초방제 연구현황을 분석하여 앞으로 우리나라에서 제초제 저항성작물의 개발과 실용화 재배가 이루어질 경우에 대처하기 위하여 제초제 저항성작물의 새로운 잡초관리 방향과 향후 전망을 검토하였다.

### 제초제 저항성작물 개발

제초제 저항성작물은 Table 1에서 보는 바와 같이 bromoxynil이 1995년에 개발된 이래 ACCase 저해형 제초제, glufosinate, glyphosate, imidazolinones, sulfonylureas 및 triazine 제초제에 대한 저항성을 나타내는 작물들이 상업적으로 개발되었다(Duke, 2005).

제초제 저항성작물을 개발하는 방법은 첫 번째로 목표 효소의 민감도를 변형하여 제초제에 대한 식물의 민감도를 저해하는 방법과 두 번째는 제초제 무독성화 경로를 식물에 도입하는 방법이다(Simoens and Van Montagu, 1995). 첫 번째 시도는 glyphosate와 acifluorfen 저항성이다. Glyphosate 제초제는 광범위한 살초스펙트럼을 갖는 비선택성 제초제로서 5-enol pyruvyl shikimate-3-phosphate (EPSP) synthase를 저해하여 살초작용을 나타내지만 작물을 고사시키기 때문에 작물의 안전성을 증대하는 방향으로 개발되었다. Glyphosate 저항성 콩은 glyphosate 저항성 클론 cp4 EPSPS를 콩에 삽입시켜 개발되었으며, 면화, 옥수수, 캐놀라, 알팔파, 벤투그라스(*Agrostis stolonifera*), 사탕무 등에서도 glyphosate 저항성 형질을 도입한 형질전환체들이 개발되었다(Pasgette et al., 1996). 그리고 엽록소 생합성을 저해하는 acifluorfen의 형질전환작물은 엽록소 생합성과 관련된 목표 효소의 과대발현을 통하여 개발되었다(Lermontova and Grimm, 2000).

두 번째 시도는 glufosinate와 bromoxynil 저항성으로, 이들의 제초활성 물질이 작물에서 무독성인 물질로 전환하는 제초제 대사를 증진하는 유전자의 도입에 의하여 이루어졌다(Haumann, 1997). 제초제 Ignite/Basta의 경우, glufosinate 저항성작물은 phosphinothricin N-acetyltransferase (PAT)에 의한 glufosinate의 불활성화 반응을 이용하여 개발되었으며, *Streptomyces hygroscopicus*로부터 얻은 bialaphos acetyltransferase 저항성 유전자(Bar)는 glufosinate를 무독성화 하는데 사용

**Table 1.** Commercial herbicide-resistant crops in North America (Duke, 2005).

| Herbicide types                               | Crop       | Year available |
|---|------------|----------------|
| Bromoxynil                                    | Cotton     | 1995           |
|   | Canola     | 2000           |
| Acetyl CoA carboxylase inhibitor - Sethoxydim | Corn       | 1996           |
|   | Sorghum    | 2011           |
| - Quizalofop                                  | Canola     | 1995           |
|   | Corn       | 1997           |
| Glufosinate                                   | Cotton     | 2004           |
|   | Soybean    | 1996           |
| Glyphosate                                    | Canola     | 1996           |
|   | Cotton     | 1997           |
|   | Corn       | 1998           |
|   | Alfalfa    | 2005           |
|   | Sugarbeets | 2005           |
| Imidazolinone                                 | Corn       | 1993           |
|   | Canola     | 1997           |
|   | Wheat      | 2002           |
|   | Rice       | 2002           |
|   | Sunflower  | 2003           |
| Specific sulfonylureas                        | Soybean    | 1994           |
|   | Sunflower  | 2006           |
|   | Sorghum    | 2011           |
| Triazines                                     | Canola     | 1984           |

되었다. Bar 저항성 유전자로 발현된 여러 형질전환작물은 사탕무, 포플러, 사시나무, 유채, 토마토, 감자, 알팔파, 감자 등이 있다(De Block, 1990; D'Halluin et al., 1990).

Glufosinate 저항성 캐놀라는 31%를 차지하여 제초제 저항성작물 시장에서 적은 이익을 얻었지만 glufosinate 저항성 면화에서 glufosinate는 glyphosate 저항성잡초의 발생으로 인하여 glyphosate보다 잡초방제 효과가 높기 때문에 미국 텍사스에서는 높은 비율로 채택되어 사용되고 있다(Sankula, 2006). Glufosinate는 잡초방제 효과가 뛰어나며, 저항성잡초의 출현빈도가 현저히 낮기 때문에 glufosinate 저항성작물의 재배면적이 증가되어 왔으며, 앞으로 그 중요성이 더욱 높아질 것으로 판단된다.

광엽잡초에 대한 방제효과가 있는 합성옥신 제초제인 dicamba는 dicamba monooxygenase(DMO)에 의해 불활성화된다. 이 효소를 암호화하는 유전자는 토양세균의 크로닝으로부터 얻었으며, dicamba 저항성 콩을 육성하는데 사용되었다(Herman et al., 2005). 2,4-D와 기타 옥신형 제초

제 저항성작물은 세균의 aryloxyalkanoate dioxygenase (AAD) 유전자에 의하여 개발되었으며, 화분과잡초에 방제효과를 나타내는 triclopyr와 fluroxypyr 저항성작물은 AAD-12 유전자에 의하여 개발되었다(Wright et al., 2010).

효소 4-hydroxyphenyl pyruvate dioxygenase (HPPD) 저해형 제조제는 triketones, isoxazoles, callistemones 등이며, Syngenta와 Bayer CropScience는 2011년에 HPPD 저항성콩을 공동 개발하였으며, 이 형질전환 콩은 곧 상업화될 것이다(Syngenta, 2012).

Protoporphyrinogen oxidase (PPO) 저해형 제조제 저항성 옥수수는 애기장대로부터 PPO 유전자와 PPO-1에서 점 돌연변이를 이용하여 얻었으며, 벼에서 *Bacillus subtilis* PPO 유전자를 과다발현하여 PPO 저항성 벼를 개발하였다(Li and Nicholl, 2005).

제조제 목표 단백질의 암호화 내생 유전자에서 돌연변이 유도물질로 유도된 돌연변이로부터 비형질전환방법으로 제조제 저항성작물을 개발할 수 있었으며, imidazolinone 저항성작물은 ALS효소에서 돌연변이 유발물질 유도변이의 선발을 통하여 개발되었다(Tan et al., 2005).

Imidazolinone 저항성 밀은 1992년에 돌연변이 유발에 의하여 품종(Clearfield)이 처음으로 육성되었고(Newhouse, 1992), 2007년에는 단일유전자를 가진 AGS CL7 품종이 육성되었다(Johnson, 2010). Imidazolinone 저항성 벼는 1993년에 종자돌연변이 유발에 의하여 비형질전환방법으로 개발되었으며(Croughan, 1994), imazethapyr는 벼에서 파종 전 혹은 발아 전 토양처리제와 경엽처리제로 개발되어 사용되고 있다.

Triazine 저항성 유체는 triazine 감수성 유체에 triazine 저항성잡초 생태형의 세포질을 이입하여 개발되었다(Beversdorf and Kott, 1987). Acetyl CoA carboxylase (ACCase) 저해형 제조제 저항성작물은 조직배양 선발을 이용하여 생성된 변형 ACCase로부터 sethoxydim 저항성 옥수수를 처음 개발하였으며(Somers, 1996), 두 번째로 수수는 상업화의 최종단계에 있다.

**제조제 저항성작물 경작지에서 발생하는 잡초**

Glyphosate 제조제는 높은 효능으로 다양한 잡초를 쉽고, 간단하며, 저렴하게 방제할 수 있었지만 다양한 잡초 관리체계에서도 영원히 지속되지 못하였다. Glyphosate 저항성작물의 재배 확대는 glyphosate 사용이 증가됨에 따라 잡초군락의 변화와 잡초의 저항성을 유도하여 농가 포장에서 glyphosate 저항성잡초인 망초(*Conyza canadensis*)의 출현을 초래하였다(VanGessel, 2001).

광범위한 면적에 glyphosate를 반복적으로 처리함에 따라 잡초에 전례가 없는 선발압이 부여되었고, 결국 glyphosate

저항성잡초가 광범하게 발현되게 유도하였다. Glyphosate 저항성 콩이 도입된 후 3년 만에 망초에서 저항성이 발견되었으며, 이후 *Lolium spp.*, *Echinochloa colona*, 왕바랭이 (*Eleusine indica*), 돼지풀아재비(*Parthenium hysterophorus*), 창질경이(*Plantago lanceolata*)에서도 glyphosate 저항성이 발견되었다(Owen, 2008).

최근에 *Ambrosia artemissifolia*와 *A. trifida*는 매우 왕성하고 경합력이 높아 경제적으로 피해를 주고 있으며, 미국 남부지역 면화재배 포장에서 *Amaranthus palmeri*는 가장 피해가 큰 잡초이며, *Amaranthus tuberculatus*, *A. rudis*도 강해잡초로서 널리 분포되었다(Osunsami, 2011). Glyphosate 저항성 콩이 대량으로 재배되고 있는 아르헨티나에서는 *Sorghum halepense*가 가장 심각한 저항성잡초이며, 브라질에서는 *Conyza*, *Euphorbia heterophylla*가 문제 저항성잡초이다(Vila-Aiub et al., 2008).

미국 농민의 조사결과, 잡초군락의 변화는 인지하고 있지만 잡초군락에 대한 선발압과 제조제저항성 발현에 대한 이해가 부족하였다(Owen, 2008). 그 결과로 농민들은 과거 10년간 glyphosate 저항성작물에서 glyphosate 이외의 잡초방제법을 선택을 하지 않았기 때문에 glyphosate 저항성잡초는 급격하게 증가하였다. 오늘날 23종의 잡초에서 glyphosate 저항성이 발견되었으며, 우려는 점점 높아지고 있다(Heap, 2012).

Glufosinate는 주요한 glyphosate 저항성잡초를 포함하여 많은 광엽잡초와 화분과 잡초에 제조효과를 나타내며, 아직까지 glufosinate 저항성잡초는 발견된 바 없다.

현재 작물생산체계의 지속성에서 가장 큰 위험성은 제조제 다중저항성잡초, 특히 glyphosate와 다른 작용기작 제조제에 저항성을 나타내는 잡초의 빠른 증가를 들 수 있다. 현재 50 초종 이상의 잡초가 여러 제조제 작용기작에 다중저항성을 나타내며, 적어도 8 초종의 glyphosate 저항성잡초는 4종 혹은 그 이상의 제조제에 저항성을 나타내고 있다(Tranel et al., 2012).

**제조제 저항성작물 경작지에서의 잡초방제**

미국에서 glyphosate 저항성 콩과 캐놀라가 1996년, 면화는 1997년, 그리고 옥수수는 1999년에 도입되기 시작하면서 glyphosate 사용방법은 변경되었는데, glyphosate 작물에 약해를 입히지 않으면서 발생한 잡초방제를 가능하게 하였다. Glyphosate 저항성작물의 재배로 glyphosate는 새로운 제조제 사용방법으로 사용되었고, 대부분 농민은 glyphosate 저항성 콩을 광범한 지역에 매년 사용하여 2009년에 재배된 경작면적은 91%이고, glyphosate 저항성 옥수수 경작면적은 68%이었다(Reddy and Norsworthy, 2010). Glyphosate 제조제는 현재 glyphosate 저항성 콩, 면화, 캐

놀라, 옥수수에서 선택성 경엽처리제로 잡초방제에 사용되고 있다.

Glyphosate 저항성 품종이 도입되기 전에는 농가 포장에서 다양한 잡초를 방제하기 위하여 여러 제초제를 혼합하여 사용하여왔다. 그러나 glyphosate가 대부분의 화분과잡초와 광엽잡초를 방제할 수 있고, 농민은 단지 하나의 제초제에만 의존하여 사용하는 단순성과 저렴한 제초비용 때문에 glyphosate 저항성 품종이 콩, 캐놀라, 면화 제초제 시장으로 급속하게 침투된 이후 콩밭에서의 잡초방제는 단순하게 수행되었다(Russnogle, 1998).

Glyphosate 저항성 콩 재배에서 농민은 콩 파종 전에 경운 혹은 glyphosate를 처리하여 잡초를 제거하며 이 후 잡초가 30 cm까지 성장하기 전에 1-2회 경엽처리에 의하여 고랑에 있는 잡초를 방제하는 것으로 토양처리용 제초제의 사용을 권장하지 않았다(Monsanto, 1999). Glyphosate 처리시기를 콩 파종 후 4-6주까지 지연하여 처리하면 작물과의 경합에 의해 잡초발생이 억제되기 때문에 glyphosate의 잔효성 부족을 보상할 수 있으며, glyphosate 저항성 콩에서 잡초방제의 30% 효과는 작물경합에 기인한다(Shaner, 2000). 그러나 glyphosate를 너무 일찍 처리하면 제초제 처리 후 추가적인 잡초의 발생으로 수량 감소가 초래된다.

제초제저항성 콩에서 일반적인 제초제 처리 추천방법은 파종 전 기준에 발생된 잡초를 제거하기 위하여 glyphosate를 경엽처리한 다음 glyphosate를 1회 혹은 2회 살포하는 방법이며(Sartorato et al., 2011), 1회 처리는 비용이 적게 들고, 선발압 경감효과가 있다. 그러나 glyphosate 저항성 콩 재배에서 방제가 잘 안 되는 잡초를 대상으로 할 경우에는 cloransulam + flumioxazin 혹은 metolachlor + fomesafen 토양처리 후 glyphosate를 체계처리(sequential application)함으로써 돼지풀을 96% 방제하였고, 명아주와 *Amaranthus rudis* 방제효과도 glyphosate 단제처리보다 토양처리제 후 glyphosate를 경엽처리하는 체계처리에서 높은 방제효과를 나타냈다(Johnson et al., 2012).

Dicamba 저항성 콩에서 glyphosate + dicamba를 토양처리한 후 glyphosate + dicamba 제초제를 1회 처리한 체계처리는 glyphosate 저항성잡초인 돼지풀류(*Ambrosia trifida*) 방제에 매우 효과적이다(Vink et al., 2012).

한편, glyphosate 저항성 콩에서 ALS 저해형 제초제는 광범위한 제초효과 때문에 가장 많이 사용되었으나 처리면적은 급격하게 감소하여 1993년에 86%에서 1998년에 43%로 줄어들었으며, dinitroanilines, acetyl CoA carboxylase 저해형 제초제 및 protoporphyrinogen oxidase 저해형 제초제의 사용량도 감소하였다(Shaner, 2000). 이런 결과로 미국 콩 재배면적의 10%에서 사용된 제초제 유효성분의 수는 1995년에 11종에서 2002년에는 glyphosate 한 종류로

감소하였다(USDA, 2004). 단기간적으로는 이와 같은 제초제 사용방식의 변화는 계속되었지만 장기적인 면에서는 glyphosate 저항성작물의 연작 혹은 윤작의 경우 잡초를 방제하기 위하여 주로 glyphosate에 의존하기 때문에 저항성잡초가 우점하는 방향으로 잡초군락이 변화될 것이다(Shaner, 2000). 따라서 이와 같은 군락변화의 결과, 다른 제초제가 이들 잡초를 방제하는데 필요하게 될 것이다.

Glyphosate 저항성 옥수수가 glyphosate 저항성 콩과 같이 광범하게 수용된다면 glyphosate는 미국의 광대한 지역에 여러 해 동안 처리될 수 있는 주된 제초제가 될 것이다. Glyphosate 저항성 옥수수 밭에 발생하는 잡초의 방제 방법은 glyphosate 경엽처리와 함께 acetochlor 혹은 acetochlor + atrazine을 체계처리하는 방법을 추천하였다(Anon, 1998). Glyphosate와 acetochlor 혹은 acetochlor + atrazine 체계처리는 glyphosate에 대한 저항성 발현을 지연시키는데 도움이 되겠지만 이 체계처리는 어저귀(*Abutilon theophrasti*), *Ipomoea* spp와 같은 일부 광엽잡초에 제한된 효과를 나타냈다. Glyphosate 저항성 옥수수에서 acetochlor + atrazine 혼합제의 토양처리는 명아주와 강아지풀에 대한 효과가 우수하였으며, glufosinate 저항성 옥수수에서는 acetochlor + atrazine 혼합제의 토양처리와 glufosinate 초기 경엽처리의 체계처리에서 높은 효과를 나타냈다(Lindsey et al., 2012). 그리고 glufosinate 저항성 옥수수 2엽기부터 8엽기까지 처리할 경우 처리시기에 따라 옥수수 수량에는 영향을 미치지 않았다(Hamill et al., 2000).

면화에서는 glyphosate 사용량은 크게 증가되었으나, 카로티노이드 생합성과 광합성 저해 제초제 사용량은 감소되었고 dinitroanilines 제초제는 약간 감소하였다. 면화 재배 농민은 잔효성이 있는 pendimethalin과 fluometuron을 선택하였다(Riar et al., 2011).

Imidazolinone 저항성 벼에서 사용되는 제초제인 imazethapyr는 토양 및 경엽처리에서 넓은 살초효과가 있는 ALS 저해형 제초제이다(Croughan, 1994). Imazethapyr 저항성 벼에서 발생하는 잡초성 벼, 피, *Althernanthera philoxeroides*는 quinclorac 혹은 penoxsulam과 imazethapyr 혼합제 처리 후, imazethapyr 혹은 imazamox 경엽처리와 같은 체계처리에 의하여 방제되었다(Webster et al., 2012). 그리고 Carlson et al. (2011)은 imazethapyr에 propanil을 첨가하여 초기 경엽처리함으로써 제초효과를 높여 벼의 수량이 증가되었다고 보고하였다.

밀 재배에서 이탈리아안라이그라스(*Lolium perenne*)는 가장 심한 잡초이며, 주로 diclofop으로 방제되었으나 저항성잡초가 발현되면서 문제가 심각해졌다. 밀 재배에서 이탈리아안라이그라스는 chlorsulfuron, flufenacet + metribuzin 토양처리에 의하여 방제되고, 경엽처리제인 pinoxaden,

mesosulfuron, flufenacet + metribuzin, chlorsulfuron + flucarbazone에 의해 높은 방제효과를 나타냈다(Ellis et al., 2010). 단일유전자 imidazolinone 저항성 밀에서 diclofop는 이탈리아라이그라스를 방제할 수 있지만 밀 자엽기에 diclofop 처리 후, imazamox, metsulfuron 혹은 diclofop을 체계처리하면 잡초방제 효과는 증가되었다(Grey et al., 2012).

또한 glyphosate 저항성작물 재배는 glyphosate를 선택성 제초제로 사용할 수 있게 함으로써 조기 파종, 무경운과 같은 재배적 장점과 함께 잡초방제를 쉽고, 경제적이며, 효과적으로 만들었다.

Glufosinate 저항성작물은 상업적으로 개발되었지만 glufosinate의 높은 가격과 처리시기의 제한 때문에 성공적으로 재배되지는 못하였다. 그러나 *Amaranthus palmeri*와 *A. tuberculatus*와 같은 glyphosate 저항성 문제잡초를 방제할 수 없는 지역에서는 glufosinate 저항성작물과 glufosinate의 사용은 급격하게 증가될 것이다(Green and Owen, 2011). Glufosinate와 glyphosate 저항성이 포함된 이중저항성 품종은 면화, 콩, 옥수수에서 상업적으로 사용되고 있으며, 잡초관리의 다양화를 위하여 농민에게 원천적 선택성 제초제 이외에 광범한 살초효과를 나타내는 두 제초제 중 선택 기회를 제공하게 한다.

한편, 제초제의 다양성이 적고, glyphosate 선발압이 매우 강한 지역에서는 glyphosate 저항성잡초 군락이 형성되므로 glyphosate 저항성작물이 재배된 지역에서 glyphosate 저항성잡초는 중대한 위협이 되고 있다. 이런 지역에서 현행 방제법이 지속된다면 glyphosate 저항성잡초는 가장 큰 문제가 될 것이다. Gardner et al. (1998)은 제초제 저항성 잡초의 발현을 지연시키는 전략으로 제초제 처리수준의 고농도와 저농도의 교호처리, 다른 작용기작을 가진 제초제의 교호사용 혹은 제초제 혼합사용을 제시하였다.

따라서 glyphosate를 지속적으로 사용하려면 이들 농업 생태계에서 다양성의 재도입 혹은 유지가 중요하다. 제초제의 교호사용, 체계처리, 여러 작용기작 제초제와 비선택성 제초제와 같은 잡초방제 수단은 다양성과 관련이 있다(Neve et al., 2004). Sammons et al.(2007) 보고에 의하면 glyphosate와 여러 다른 제초제의 이상적인 처리농도와 혼합처리는 매우 효과적이며, 추가적으로 제초제저항성 유전자들을 가진 복합형질 변형작물의 개발은 glyphosate 저항성잡초의 방제에 매우 중요한 역할을 할 것이다(Green, 2007).

잡초관리 전략은 제초제, 경운, 유전자변형 형질 등을 종합적으로 활용할 수 있고, 작용기작이 다른 대체 제초제 사용과 경운은 glyphosate 저항성 옥수수와 면화에서 대규모 사용되고 있다. Glyphosate 저항성 콩에서는 작용기작이 다른 제초제 사용 또는 무경운 재배가 포함되며, 대

부분의 면적은 옥수수와 윤작하면 잡초관리 다양성이 확보될 것이다.

현재 개발전략 추세는 glyphosate 저항성 콩, 옥수수와 면화에서 작용기작이 다른 제초제 사용을 포함시키고 있다. 왜냐하면 잡초관리체계에서 다른 작용기작 제초제는 잡초군락 변화와 잡초의 저항성에 가장 효과적인 수단이며, 또한 옥수수에서 발아 전 처리 제초제는 glyphosate와 함께 사용될 때 많은 농민은 glyphosate 저항성작물에 대한 만족도가 높기 때문이다(Dill et al., 2008).

한편, glyphosate 저항성잡초는 방제하기 매우 어렵고, 방제할 제초제가 매우 제한적이기 때문에 농민은 경운작업을 강화하고, 일부 지역에서는 비싼 손 제초를 하고 있는 실정이다(CAST, 2012). 따라서 저항성 잡초를 관리하고 다른 잡초에서 저항성 발현을 지연시킬 전략은 윤작과 다양한 재배방법이 포함되며, Table 2에 제시한 여러 다른 작용기작 제초제를 사용하는 방법도 매우 효과가 높을 것이므로 적극 검토되어야 할 것이다(Dill et al, 2008; Green and Owen, 2011).

**제초제 저항성작물 경작지에서의 향후 잡초방제 전략**

잡초군락 변화와 저항성잡초와 같은 잡초관리 문제를 해결하기 위하여 미국 몬산토 회사에서 콩과 면화에서 제초제 저항성 형질들을 복합하는 연구가 진행되고 있다. 그리고 저항성을 다른 제초제 저항성과 결합하는 방법으로 콩에 glyphosate 저항성과 sulfonylurea 저항성(STS)을 복합한 이중저항성 콩을 개발하였으며(Green et al., 2008), 여러 해 동안 판매되었다. Sulfonylurea 저항성 콩은 생명공학에서 유래한 형질이 아니고 전통적 육종에 의하여 개발되었다. 이와 같은 복합저항성작물은 콩을 밀과 이모작 재배하는 지역에서 제초제 잔류 피해를 막기 위하여 밀 생산에서 sulfonylurea 제초제를 사용할 수 있게 되었다.

이들 제초제 복합저항성작물은 glyphosate 한가지 제초제에 대한 의존성을 줄일 수 있는 차세대기술로서 glyphosate 이외 많은 종류의 제초제 선택을 가능하게 할 수 있다. 또한 제초제 저항성작물을 개발하기 위하여 제초제를 최상의 종합적 형질을 갖게 하는 연구가 많이 이루어 지고 있다. 예를 들면 glufosinate는 저항성잡초가 적고 살초 범위가 넓은 제초제이므로 glyphosate와 glufosinate 저항성을 갖는 이중저항성 품종은 옥수수, 콩, 면화에서 개발되어 glyphosate 저항성잡초를 방제하는데 사용되고 있으며, 제초제 다중저항성잡초의 종류가 증가함에 따라 glyphosate와 glufosinate 이중저항성작물의 가치는 높아질 것이다(Legleiter and Bradley, 2008).

또한, Table 3에서 제시한 바와 같이 앞으로 glyphosate 혹은 glufosinate와 ALS 저해제, 합성옥신 제초제(2,4-D,

**Table 2.** Weed efficacy and resistance status for key herbicide modes of action to be used with existing and future herbicide-resistant crops (Green and Owen, 2011).

| Weed genus              | Glyphosate   | Glufosinate | ALS inhibitors | Synthetic auxins | HPPD inhibitors | ACCase inhibitors |
|-------------------------|--|-------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|
|                         | Control rating (0-10) and resistance status <sup>a,b</sup> |             |                |                  |                 |                   |
| <b>Dicotyledons</b>     |  |             |                |                  |                 |                   |
| <i>Chenopodium</i>      | 8R   | 8           | 7R             | 9R               | 9               | 0                 |
| <i>Amaranthus</i>       | 9R   | 8           | 9R             | 9R               | 9R              | 0                 |
| <i>Abutilon</i>         | 8  | 8           | 8-9            | 8                | 9               | 0                 |
| <i>Xanthium</i>         | 9  | 9           | 9R             | 9                | 8               | 0                 |
| <i>Ambrosia</i>         | 7-8R   | 8-9         | 7-8R           | 9                | 7-8             | 0                 |
| <i>Conyza</i>           | 7-8R   | 8           | 7R             | 8                | 8               | 0                 |
| <i>Ipomoea</i>          | 7  | 8           | 7              | 9                | 7               | 0                 |
| <i>Kochia</i>           | 9R   | 8           | 9R             | 9R               | 7               | 0                 |
| <b>Monocotyledons</b>   |  |             |                |                  |                 |                   |
| <i>Setaria</i>          | 9-10   | 8-9         | 8-9R           | 0                | 4-8             | 9R                |
| <i>Sorghum</i>          | 9-10R  | 6-9         | 8-10R          | 0                | 0-8             | 9R                |
| <i>Digitaria</i>        | 9  | 8           | 9R             | 0                | 7               | 9R                |
| <i>Echinochloa</i>      | 9  | 9           | 9R             | 0                | 7               | 9R                |
| <i>Panicum</i>          | 9  | 8           | 8              | 0                | 5               | 9R                |
| <i>Lolium</i>           | 9R   | 8R          | 8R             | 0                | 3               | 9R                |
| <i>Zea</i> (feral crop) | 9R   | 7R          | 8R             | 0                | 0               | 9R                |

<sup>a</sup> Weed control ratings are summarized from US extension guides, with 0 being the lowest and 10 being the highest level of control and represent the highest observed for any herbicide in that class.

<sup>b</sup> An R next to the herbicide efficacy rating indicates that the genus has evolved resistance to that herbicide class (Heap, 2012).

**Table 3.** Transgenic multiple herbicide-resistant crops (Green, 2012).

| Herbicide types                                      | Crops                    |
|--|--------------------------|
| Glyphosate and glufosinate                           | Soybean, corn and cotton |
| Glyphosate and ALS inhibitors                        | Soybean and corn         |
| Glyphosate, glufosinate and 2,4-D analogs            | Soybean and cotton       |
| Glyphosate, glufosinate and dicamba                  | Soybean and cotton       |
| Glyphosate, glufosinate and HPPD inhibitors          | Soybean and cotton       |
| Glyphosate, glufosinate, 2,4-D and ACCase inhibitors | Corn                     |

dicamba), HPPD 저해제, ACCase 저해제의 제초제 복합저항성작물은 개발될 수 있을 것으로 기대된다(Green, 2012). 기타 다른 제초제 저항성 형질과의 복합저항성작물 개발은 주요 작물에서 잡초관리 선택에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

그리고 새로운 제초제 복합저항성 형질 이용과 함께 작용기작이 다른 제초제의 사용과 윤작, 경운과 같은 재배적 방법은 잡초관리체계에 유효한 추가수단이 되고, 제초제 저항성작물의 장점을 더 오래 지속되도록 도움을 줄 것이며, 아울러 기존 제초제 기술의 새로운 이용을 가능

하게 할 것이므로 향후 종합잡초관리 방안의 중요한 요인이 될 것이다.

## 요 약

우리나라에서 제초제 저항성작물의 개발과 저항성작물의 실용화 재배가 이루어질 경우를 대비하기 위하여 제초제 저항성작물 개발 및 잡초방제 연구현황을 분석하고 앞으로의 잡초방제 방향과 전망에 관하여 기술하였다. 제초제 저항성작물 개발은 작물에 대한 약해 없이 한 가지 제

초제만을 사용해서 선택적으로 광범한 잡초방제 효과를 나타낼 수 있는 획기적인 잡초관리 기술의 하나이다. Glyphosate 저항성 형질전환 콩, 옥수수, 캐놀라, 면화에서 glyphosate 사용은 단순한 잡초방제법으로 저비용으로 편리하게 잡초를 관리할 수 있다. 한 작물에 glyphosate와 glufosinate에 모두 저항성인 이중저항성작물은 옥수수, 콩, 면화에서 개발되어 glyphosate 저항성잡초를 방제할 수 있었으며, 기존 제초제 기술의 영역을 확장할 수 있을 것이다. 그리고 glyphosate를 ALS 저해형 제초제, 합성옥신 제초제, HPPD 저해형 제초제 혹은 ACCase 저해형 제초제를 포함한 새로운 제초제 저항성작물 개발은 제초제 저항성잡초를 효과적으로 방제하기 위하여 가까운 장래에 개발되기를 기대한다. 또한 제초제 저항성작물만으로는 잡초문제를 해결할 수 없기 때문에 앞으로 다른 작용기작 제초제의 교호사용, 기계적, 경종적 방법을 통합한 종합적잡초관리 체계에 관한 연구가 요망된다.

**주요어:** 글라이포세이트, 글리포시네이트, 제초제 저항성작물, 제초제 저항성잡초, 종합잡초관리

## Acknowledgement

This study was supported by the ReSEAT Program, Korea Institute of Science & Technology Information funded by the Korean Ministry of Science, ICT & Future Planning through the National Research Foundation of Korea and the Korea Lottery Commission grants.

## References

- Anon. 1998. Crop Protection Reference. pp. 1381-1391. 14th ed. C&P Press, NY, USA.
- Beversdorf, W.D. and Kott, L.S. 1987. Development of triazine resistance in crops by classical plant breeding. *Weed Sci.* 35(Suppl. 1):9-11.
- Carlson, T.P., Webster, E.P., Salassi, M.E., Hensley, J.B., Blouin, D.C. et al. 2011. Imazethapyr plus propanil programs in imidazolinone-resistant rice. *Weed Tech.* 25:204-211.
- Council for Agricultural Science and Technology (CAST). 2012. Herbicide-resistant weeds threaten soil conservation gains: finding a balance for soil and farm sustainability. Paper No. 49. CAST, Ames, IA, USA.
- Crookston, R.K. 2006. A top 10 list of developments and issues impacting crop management and ecology during the past 50 years. *Crop Sci.* 46:2253-2262.
- Croughan, T.P. 1994. Application of tissue culture techniques to development of herbicide-resistant rice. *Louisiana Ag.* 37:25-26.
- De Block, M. 1990. Factors influencing the tissue culture and the *Agrobacterium tumefaciens*-mediated transformation of hybrid aspen and poplar clones. *Plant Physiol.* 93:1110-1106.
- D'halluin, W., Botterman, J. and De Greef, W. 1990. Engineering of herbicide resistant alfalfa and evaluation under field conditions. *Crop Sci.* 30:866-871.
- Dill, G.M., CaJacob, C.A. and Padgett, S.R. 2008. Glyphosate-resistant crops: adoption, use and future considerations. *Pest Manag. Sci.* 64:326-331.
- Ellis, A.T., Steckel, L.E., Main, C.L., de Melo, M.S.C., West, D.R. et al. 2010. A survey for diclofop-methyl resistance in Italian ryegrass from Tennessee and how to manage resistance in wheat. *Weed Tech.* 24:303-309
- Gardner, S.N., Gressel, J. and Mangel, M. 1998. A revolving dose strategy to delay the evolution of both quantitative vs major monogene resistance to pesticides and drugs. *Int. J. Pest Manag.* 44:161-180.
- Green, J.M. 2007. Review of glyphosate and ALS-inhibiting herbicide crop resistance and resistant weed management. *Weed Tech.* 21:547-558.
- Green, J.M. and Castle, L.A. 2010. Transitioning from single to multiple herbicide resistant crops. pp. 67-91. In: Nandula, V.K. (Ed.). *Glyphosate resistant crops and weeds: History, development and management*, Willey, Hoboken, N.J., USA.
- Green, J.M. 2012. The benefits of herbicide-resistant crops. *Pest Manag. Sci.* 68:1323-1331.
- Green, J.M., Hazel, C.B., Forney, D.R. and Pugh, L.M. 2008. New multiple-herbicide crop resistance and formulation technology to augment the utility of glyphosate. *Pest Manag. Sci.* 64:332-339.
- Green, J.M. and Owen, M.D.K. 2011. Herbicide-resistant crops: utilities and limitations for herbicide-resistant weed management. *J. Agric. Food Chem.* 59:5819-5829.
- Grey, T.L., Cutts III, G.S. and Johnson, J. 2012. Imidazolinone-resistant soft red winter wheat weed control and crop response to ALS-inhibiting herbicides. *Weed Tech.* 26:405-409.
- Gianessi, L.P. 2005. Economics and herbicide use impacts of glyphosate-resistant crops. *Pest Manag. Sci.* 61:241-245.
- Hamill, A.S., Knezvic, S.Z., Chandler, K., Sikkema, P.H., Tardif, F.J. et al. 2000. Weed control in glufosinate-resistant corn. *Weed Tech.* 14:578-585.
- Haumann, B.E. 1997. Bioengineered oilseed acreage escalating. *Infor.* 8:804-811.
- HM. International Survey of Herbicide Resistant Weeds. 2012. (Online). Weed Science Society of America. <http://>

- weedsience.org/Inasp . (Accessed February 2, 2012)
- Herman, P.L., Behrens, M., Chakraborty, S., Chrastil, B.M., Barycki, J. et al. 2005. A-three component dicamba O-demethylase from *Pseudomonas maltophilia*, Strain D1-6: Gene isolation, characterization, and heterologous expression. *J. Biol. Chem.* 280:24759-24767.
- James, C. 2011. Global status of commercialized transgenic crops. Brief 43:ISSA, Ithaca, NY, USA.
- Johnson, G., Breitenbach, F., Behnken, L., Miller, R., Hoverstad, T. et al. 2012. Comparison of herbicide tactics to minimize species shifts and selection pressure in glyphosate-resistant soybean. *Weed Tech.* 26:189-194.
- John, J.J. Plant variety protection certificates: 'AGS CL7' wheat (PI 657987, PVP 200900285). FY10 Issued Interlectual Property. 2010. [http://www.ovpr.uga.edu/communications/reports/2010/docs\\_](http://www.ovpr.uga.edu/communications/reports/2010/docs_). (Accessed March 1, 2010)
- Legleiter, T.R. and Bradley, K.W. 2008. Glyphosate and multiple herbicide resistance in *Amaranthus rudis* population from Missouri. *Weed Sci.* 56:582-587.
- Lermontova, I. and Grimm, B. 2000. Overexpression of plastidic protoporphyrinogen IX oxidase lead to resistance to the diphenyl-ether herbicide acifluorfen. *Plant Physiol.* 122:75-84.
- Li, L. and Nicholl, D. 2005. Development of PPO inhibitor-resistant cultures and crops. *Pest Manag. Sci.* 61:277-285.
- Lindsey, L.E., Everman, W.J., Chomas, A.J., and Kells, J.J. 2012. Evaluation of application program and timing in herbicide-resistant corn. *Weed Tech.* 26:617-621.
- Monsanto. 1999. (Online) Internet Available: [www.monsanto.com/ag/articles/SourceBook98/RRSoybeans.htm](http://www.monsanto.com/ag/articles/SourceBook98/RRSoybeans.htm)
- Neve, P., Sadler, J., and Powles, S.B. 2004. Multiple herbicide resistance in a glyphosate-resistant rigid grass population. *Weed Sci.* 52:920-928.
- Newhouse, K.E., Smith, W.A., Starrett, M.A., Schaefer, T.J., and Singh, B.K. 1992. Tolerance to imidazolinone herbicides in wheat. *Plant Physiol.* 100:882-886.
- Osunsami, S. 2011. Killer pigweeds threaten crops in the South – the tenacious weed has adapted and is no longer susceptible to pesticides. (Online). ABS News (299). Available: <http://absnews.go.com/WN/pig-weed-threatens-agriculture-industry-overtaking-fields-crops/story>. (Accessed October 27, 2011).
- Owen, M.D.K. 2008. Weed species shifts in glyphosate-resistant crops. *Pest Manag. Sci.* 64:377-387.
- Pasgette, S.R., Taylor, N.B., Nida, D.L., Baily, M.R., MacDonald, J., Holden, R. et al. 1996. The composition of glyphosate-tolerant soybean seeds is equivalent to that of conventional soybeans. *J. Nutr.* 126:702-716.
- Reddy, K.N. and Norsworthy, J.K. 2010. Glyphosate-resistant crop production systems: Impact on weed species shifts. pp. 165-184. In: Nandula, V.K. (Ed.) *Glyphosate resistance in crops and weeds: History, development, and management*. Hoboken, Wiley, NJ, USA.
- Riar, D.S., Norsworthy, J.K. and Griffith, G.M. 2011. Herbicide programs for enhanced glyphosate-resistant and glufosinate-resistant cotton. *Weed Tech.* 25:526-534.
- Russnogle, J. 1998. Roundup ready soybean system simply works. *Soybean Digest* pp. 30-31
- Sammons, D.R., Heering, D.C., Dinicola, N., Glick, H., Elmore, G.A. et al. 2007. Sustainability and stewardship of glyphosate and glyphosate-resistant crops. *Weed Tech.* 21: 346-354.
- Sankula, S. 2006. International service for the acquisition of agri-biotech applications. <http://www.issa.org/resources/publications>. (Accessed October 27, 2012).
- Sartorato, I., Berti, A., Zanin, G. and Dunan, C.M. 2011. Modeling of glyphosate application timing in glyphosate-resistant soybean. *Weed Sci.* 59:390-397.
- Shaner, D.L. 2000. The impact of glyphosate-tolerant crops on the use of other herbicides and on resistance management in glyphosate-resistant maize. *Weed Tech.* 14:57-65.
- Simoens, C. and Van Montagu, M. 1995. Genetic engineering in plants. *Hum. Reprod. Update.* 1:523-542.
- Somers, D.A. 1996. Agricultural, environmental, economic, regulatory, and technical aspects. pp. 175-188. In: Duke, S.O. (Ed.) *Herbicide-resistant crops*, CRC Press and Lewis, Boca Raton, FL, USA.
- Syngenta. 2012. <http://www.syngenta.com/global/corporate/en/news-center/news-release/Pages/en-110407>. (Accessed Nov. 10, 2012).
- Tan, S., Evans, R.R., Dahamer, M.L., Singh, B.K., Shaner, D.L. et al. 2005. Imidazolinone-tolerant crops: history, current status and future. *Pest Manag. Sci.* 61:246-257.
- Tranel, P.J., Riggins, C. and Hager, A. 2012. The evolution of multiple-resistant weeds. *Abstr. Weed Sci. Soc. Am.* 52:311.
- U.S. Department of Agriculture. 2004. *Agricultural Chemical Use Data Base*. (Online). USDA-National Agricultural Statistics Service. (Accessed Nov. 10, 2012).
- U.S. Department of Agriculture. 2009. *United States Department of Agriculture National Agricultural Statistics Acreage Report*. (Accessed Nov. 10, 2012).
- VanGessel, M.J. 2001. Glyphosate-resistant horseweed from Delaware. *Weed Sci.* 49:703-705.
- Webster, E.P., Carlson, T.P., Salassi, M.E., Hensley, J.B., Blouin, D.C. et al. 2012. Imazethapyr plus residual herbicide programs for imidazolinone-resistant rice. *Weed Tech.* 26:410-416.
- Vila-Aiub, M.M., Vidal, R.A., Balbi, M.C., Gundel, P.E., Trucco,



- F. et al. 2008. Glyphosate-resistant weeds of South American cropping systems: an overview. *Pest Manag. Sci.* 64:366-371.
- Vink, J.P., Soltani, N., Robinson, D.E., Tardif, F.J., Lawton, M. et al. 2012. Glyphosate-resistant giant ragweed (*Ambrosia trifida*) control in dicamba-tolerant soybean. *Weed Tech.* 26:422-428.
- Wright, T.R., Shan, G., Wlasek, T.A., Lira, J.M., Cui, C. et al. 2010. Robust crop resistance to broadleaf and grass herbicides provided by aryloxyalkanoate dioxygenase transgenes. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 107: 20240-20245.