

Weed & Turfgrass Science was renamed from both formerly Korean Journal of Weed Science from Volume 32 (3), 2012, and formerly Korean Journal of Turfgrass Science from Volume 25 (1), 2011 and Asian Journal of Turfgrass Science from Volume 26 (2), 2012 which were launched by The Korean Society of Weed Science and The Turfgrass Society of Korea founded in 1981 and 1987, respectively.

친환경 잡초방제를 위한 생물제초제의 상용화 현황

변종영^{1*} · 이증주² · 박기웅³

¹한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램, ²경상대학교 응용생물학과, ³충남대학교 식물자원학과

Status and Perspective of Bioherbicide Development for Organic Weed Management

Jong Yeong Pyon^{1*}, Jeung Joo Lee², and Kee Woong Park³

¹ReSEAT Program, Korea Science & Technology Information, Daejeon, Korea

²Department of Applied Biology, Geongsang National University, Jinju, Korea

³Department of Crop Science, Chungnam National University, Daejeon, Korea

ABSTRACT. Weed management under organic farming systems is very problematic since organic agriculture does not allow synthetic herbicides. Bioherbicide is needed to develop for weed management in organic agriculture systems. This review covers current status and perspectives of bioherbicide development for effective nonchemical weed management in organic farming systems. Bioherbicides are products of natural origin derived from living organisms, and more specifically bacteria, fungus and plants including natural metabolites for weed control. Bioherbicides derived from microorganisms or natural molecules are currently available on the pesticide markets. Devine, Lockdown (Collego), BioMal, Camperico, Organo-Sol and Opportune were derived from bacteria, Woad Warrior, Smolder, Mygogen, Chontrol Paste, Starritor and Phoma derived from fungus, and Katoun (pelargonic acid) and Beloukha were derived from plants. Corn gluten meal products and plant essential oils products are also available for nonselective weed control in organic agriculture. Organic weed management methods may be more feasible in small scale farming and high-value crops, and bioherbicides may be applied with other weed control practices in organic farming systems.

Key words: Bioherbicide, Biopesticide, Natural product, Organic weed management

Received on November 14, 2016; Revised on March 14, 2017; Accepted on March 14, 2017

*Corresponding author: Phone) +82-42-869-0681, Fax) +82-42-869-0699; E-mail) jypyon@cnu.ac.kr

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

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

농약은 작물의 생산성 향상을 위하여 병, 해충, 잡초의 침입으로부터 작물을 보호하기 위하여 사용되고 있다. 그러나 지금까지 농작물을 보호하기 위하여 주로 유기합성 농약을 기초로 한 화학적 방제 시스템에 의존해 왔으나 농약의 오염, 환경오염 및 자연생태계에 미치는 부정적 영향과 약제내성 및 제초제 저항성잡초의 출현으로 인한 약효의 감소 등 많은 부작용을 초래하고 있다. 또한 유기합성 제초제의 잠재적인 인체 및 환경에 미치는 영향에 대하여 관심을 갖게 됨으로써 유기농산물에 대한 인식이 높아

지고 시장이 급격하게 성장되고 있는 실정이다(Kang et al., 2014). 유기농업에서는 제초제를 포함하는 합성농약을 사용할 수 없기 때문에 잡초방제는 가장 큰 문제 중 하나이다. 대부분의 방법은 경운, 손제초, 생물방제, 멀칭에 의존하고 있는 실정이며, 외국에서는 천연물질을 이용한 생물제초제가 개발되어 유기농업에서 일부 사용되고 있다(Park et al., 2014).

따라서 본 논문은 세균, 진균 및 식물에서 유래하여 상업적으로 개발된 생물제초제 개발 현황을 분석하여 우리나라의 유기농업에서 실용화 연구를 모색하는데 필요한 기초정보를 제공하고자 하였다.

생물제초제의 개발 필요성

잡초는 식용작물의 생산성을 지속적으로 감소시킨다. 잡초관리의 전략은 다양하지만 현재는 주로 합성제초제에 의존하고 있다. 과거 50여 년 동안 합성제초제를 집중적으로 사용하여 생산성을 크게 증가시켰지만 환경과 생태계에는 부정적인 영향을 미쳤다(Woo et al., 2015).

2012년 프랑스에서는 강과 하천에서 식물보호제로부터 15종의 활성물질들을 검출하였고, 가장 많이 발견되는 물질은 제초제 혹은 제초제 대사물질인 것으로 보고하고 있다(Cordeau et al., 2016). 그 결과 프랑스와 유럽의회는 많은 제제 혹은 활성성분을 시장으로부터 퇴출한 바 있다.

활성이 뛰어난 합성제초제의 개발로 농민들은 한가지 화학계열의 제초제를 사용하여 잡초를 관리하게 되었으며, 그 부작용으로 저항성 잡초가 출현하게 되어 최근까지 중요한 세계적 이슈가 되고 있는 실정이다 (Kang et al., 2014; Park et al., 2014).

지속적 잡초관리는 유기농업과 관행농업을 위하여 주요한 도전이 되고 있다. 미래의 잡초관리는 종합적 잡초관리 이외에도 새로운 수단을 추구해야만 한다. 생물제초제는 여러 이유로 현재 과소하게 사용되고 있다. 생물적 잡초방제는 오랫동안 연구되어 왔으나 일부만 시장에 출시되고 있으며, 생물제초제는 종합잡초관리의 한 수단으로서 고려되어야 한다(Park et al., 2013).

생물제초제는 자연환경에 이미 존재하는 천연물질로부터 얻기 때문에 보다 환경친화적인 것으로 생각된다. 생물제초제의 반감기는 보통 화학물질보다 더 짧다. 그러나 식물과 미생물에 의하여 생산된 일부 천연독소는 환경에 존재하여 포유동물을 포함한 동물에 위협할 수 있으므로 천연독소의 활성스펙트럼은 주의 깊게 평가되어야 한다(Duke et al., 2003).

생물제초제는 잡초방제를 위하여 천연유래 생산물로서 살아있는 유기체 혹은 더 구체적으로 미생물 혹은 살아있는 유기체에 의하여 유래된 생산물이며, 성장과 발육과정에서 이들 유기체에 의하여 생산된 천연대사물질이 포함된다(Bailey, 2014).

생물제초제의 작용기작은 식물-병원균 상호작용이나 타감작용(allelopathy)과 비슷하다. 생물방제 제제는 세포벽을 분해하는 효소(pectinase, cellulase, ligninase 등)와 단백질 및 지질막을 분해하는 효소(protease, eptidase, amylase, phospholipidase)들이다. 이 제제는 기주식물로 흡수 및 전파되게 하며, 식물대사를 저해하는 독소로 작용하는 식물독성 2차대사물질과 펩티드이다(Steward-Wade et al., 2002). 성장과 발육과정에서 이들 독소는 식물고사를 유도하는 하나 혹은 더 많은 유전자의 발현을 직접 혹은 간접적으로 변형한다.

미생물이나 식물 기원의 생물제초제는 작용기작이 다양하여 잡초의 많은 생화학적 작용점에 관여한다. 하지만 생물제초제의 이러한 광범위한 이용 가능성에도 불구하고 생물제초제의 생물적 기원에 따라 그 효율성이 제한되며 독성과 천연물질의 특이성에 의하여 영향을 받는다(Hoerlein, 1994).

Glufosinate의 생합성 형태인 phosphinothricin, 미생물 식물독성물질인 bialaphos와 같은 천연 물질은 상업적으로 생물제초제의 설계를 가능하게 하였다(Duke et al., 2000). Glufosinate는 Bayer CropScience에 의하여 phosphinothricin의 합성 형태로 화학합성으로 생산된 제초제로서 광범한 스펙트럼 잡초를 방제하기 위하여 경엽처리제로 사용되고 있다(Won et al., 2015).

1977년에 제초활성물질로 동정된 leptospermone은 한 종류의 triketone 화학물질로서 Sulcotrione®, Mesotrione®과 같은 높은 활성화합물 유도체를 창출하는데 이용되었다(Mitchell et al., 2001). 이들 물질은 생물제초제 자체는 아니지만 천연물질에 기초하여 합성되고 제조되었다. 이들 제초제는 시판된 제초제 중의 아주 적은 부분을 차지하지만 여러 분자작용점에 작용한다.

아직까지 다른 생물농약에 비하여 잡초관리 분야에서 천연물질에 기초한 생물제초제의 발견은 가장 성공확률이 낮은 것으로 알려져 있다(Huter, 2011). 하지만 유기합성 제초제에 의한 인체 및 환경에 대한 위해성논란 및 저항성 잡초의 출현을 방지할 수 있는 새로운 작용점에 대한 분자생리학적 이해의 폭을 넓혀갈 수 있다는 측면에서 생물제초제의 개발은 여전히 매력적이며 지속적으로 연구 개발되어야 할 분야이다.

세균에서 유래한 생물제초제 개발

세계적으로 미생물 혹은 천연분자로부터 유래된 13종의 생물제초제만이 현재까지 출시되어 사용되어왔다(Bailey, 2014). 첫 번째 생물제초제는 1980년대에 개발되었으며, 1980년 이래 생물농약의 수는 전 세계적으로 증가되었으나 생물제초제의 시판비율은 생물농약의 10%이하이다. 미국(4종), 캐나다(3종), 우크라이나(1종)와 같은 몇 나라에서 시판되고 있다. 허가된 13종의 생물제초제 중에는 9종은 진균, 3종은 세균미생물이며, 1종은 천연식물 추출물인 활성물질이다(Bailey, 2014).

세균(bacteria)에 의한 생물제초제인 Devine™은 미국 Abott Laboratory에 의하여 *Phytophthora palmivora* Butler의 MVW 균주를 함유한 생물 제초제이며(Kenney, 1986), 감귤작물에서 잡초 *Morrenia odorata*를 방제하기 위하여 허가를 받았으나 2006년 이후에는 더 이상 시판되지 않고 있다(Table 1). Collego™은 미국 Upjohn회사에 의하여 생산되었으며, 생물제

Table 1. Status of commercial bioherbicides derived from bacteria.

Bioherbicide	Bacteria	Target weed	Manufacture	Reference
DeVine	<i>Phytophthora palmivora</i> strain MVW	<i>Morrentia adorata</i>	Valent Biosciences	Kenney (1986)
Collego (Lockdown)	<i>Colletotrichum gleosporides</i> f.sp. <i>aeschnomene</i> strain ACC 20358	Indian jointvetch	Upjohn Co	Bowers (1986)
BioMal	<i>Colletotrichum gleosporides</i> f.sp. <i>malvae</i>	Indian jointvetch	Philom Bios	Boyetchko et al. (2007)
	<i>Colletotrichum gleosporides</i> f.sp. <i>cuscutae</i>	dodder		
ThaxtominA (Opportune)	<i>Streptomyces acidiscables</i> strain RL	dandelion	Marrone Bio Innov	PMRA (2013)
Thaxtomin A	<i>Streptomyces scabies</i>	Cellulase inhibitor		Leep et al. (2010) King and Calhoun (2009)
Hydantocidin	<i>Streptomyces</i> strain			Lee and Anderson (1997)
Bialaphos Glufosinate	Chemical synthesis of <i>Streptomyces hygroscopis</i>			Duke et al. (2000)
Camperico	<i>Xanthomonas campestris</i> strain JTP482	Annual bluegrass	Japan Tobacco	Imaizumi et al. (1997) Tateno (2000)

초제의 활성은 *Colletotrichum gleosporioides* f. sp. *aeschnomene* 균주의 포자로부터 얻었고 자귀풀 방제에 사용되었으며, 2006년에는 Lockdown[®]으로 시판되었다(Bowers, 1986).

BioMal[®]은 *Colletotrichum gleosporioides* f.sp. *malvae*에서 활성을 얻은 생물제초제이며, 1992년 캐나다 Philom Bios Inc에 의하여 등록되었고 *Malva pusillia*을 방제하였다(Boyetchko et al., 2007).

세균 *Streptomyces acidiscables*의 RL-110 균주의 발효에 의하여 생산된 thaxtomin A는 MBI-000의 활성성분이며, MBI-005 EP는 Marrone Bio Innovations에 의하여 개발되어 2012년에 Opportune[®]으로 등록되어 잔디, 양묘장, 골프장에서 민들레 방제에 사용되고 있다(PMRA, 2013).

생물제초제 Camperico[®]는 잔디에서 새포아풀 방제를 위하여 개발되었다. Camperico[®]의 활성성분은 세균 *Xanthomonas campestris* JTP482 균주로부터 얻었으며(Imaizumi et al., 1997), 이 생물제초제는 Japan Tobacco, Inc에 의하여 개발되었으나 시판되지 않았다(Tateno, 2000).

Organo-Sol[®]은 구연산과 젖산을 생산하는 낙농산물(예, *Lactoserum*)의 발효와 관련된 여러 젖산세균(*Lactobacillus* s)의 혼합물이며, 2010년 캐나다에서 AEF Global에 의하여 Kona[™]으로 현재 시판하고 있으며, Bioprotec Herbicide[™]은 Kona[™]과 같은 제품이지만 다른 제형으로 제조되었다(Cordeau, 2016).

Bialaphos는 방선균 *Streptomyces hygroscopis*의 발효로부터 얻으며 동남아시아에서 제초제로 시판되고 있다. Bialaphos는

제초활성이 없으나 제초작용을 나타내기 전에 식물에 의하여 phosphinothricin (2-amino-4(methylphosphinato)butanoate)으로 활성화되어 제초효과를 나타낸다. Phosphinothricin의 합성 형태인 glufosinate는 화학합성에 의하여 생산된 제초제로서 다양한 잡초를 방제하기 위하여 경엽처리제로 사용되고 있다(Duke et al., 2000).

Bialaphos와 glufosinate의 성공에 비추어보면 식물병원균과 토양미생물은 새로운 식물독소(phytotoxin)의 훌륭한 출처가 된다. 새로운 분자작용점에 영향을 미치는 새로운 화학골격을 위하여 그와 같은 유기체를 찾는 데는 많은 장점이 있다. 대규모 발효에 의하여 농업적 이용을 위하여 충분한 양의 식물독소를 생산하는 능력은 미생물을 유용한 시스템으로 만들 수 있다. 그러나 이들 식물독소 작용효소의 대부분은 포유동물에 대한 독성 때문에 제초제로서의 사용이 제한 될 가능성이 크다(Duke et al., 2000).

Thaxtomin A는 *Streptomyces scabies*와 기타 *Streptomyces* 종에 의하여 생산되며, 제초제로 등록되었으나 아직 상용화되지 못하고 있다(Leep et al., 2010). 구조-활성 연구결과, 이들 대사물질의 식물독성을 유지하기 위하여 4-nitroindole기의 존재가 필요하며, thaxtomin은 초기 성장, 세포부피 성장과 세포벽의 목질화를 감소시키고, 생화학적으로 셀룰로오스 합성을 저해한다(King and Calhoun, 2009).

Actinoin은 토양방선균에 의하여 생산되며, 제초제로 사용하기 위하여 특허를 받았으나 아직까지 상용화되지는 못하고 있다(Houtz et al., 2004). Hydantocidin은 *Streptomyces*

균주에 의하여 생산되며, 천연제초제로서 유력하게 고려되었으나 합성 비용이 아주 비싼 것으로 알려졌다(Lee and Anderson, 1997).

진균에서 유래한 생물제초제 개발

Smolder[®]활성은 새삼속 식물의 병인 진균 *Alternaria destruens* 균주 059에서 얻었으며, 알팔파, 당근, 고추, 토마토, 가지 등 작물에서 여러 종의 새삼을 방제하였다(Table 2). 이 생물제초제는 Massachusetts 대학교 Cranberry시험장에서 발견하여 Loveland Products Inc, Greely Co, Sylvan Bio Inc., Kittanning에 의하여 생산, 등록되었으며, 2005년에 미국 EPA의 허가를 받았다(Bailey, 2014).

Woad Warrior[®]은 미국 Sherman Tompson에 의하여 진균 *Puccinia thlaspeos*에서 개발한 생물제초제로서 잡초 *Isatis tinctoria* 방제에 효과가 있어 2002년에 허가를 획득하였으나 시판되지는 않았다(Cordeau et al., 2016).

Cinnacidin의 증상은 생장저해 및 황백화를 보이며, 식물의 줄기와 잎으로 퍼진다. Cinnacidin 작용기작은 자스몬산과 비슷한 역할에 의하여 호르몬 유사 제초제로서 작용한다(Irvine et al., 2008). Ascaulitoxin aglycone은 잡초를 관리하기 위한 미생물제초제로 식물병원균 *Ascochyta caulina*로부터 얻은 식물독소로 특허를 냈으며, 식물독소의 작용기작은 aminotransferase 활성을 억제하는 것으로 제안되었다(Duke et al., 2011). 그 외에 cinnacidin은 많은 나무에 혹은 일으키는 식물병원균 *Nectria* sp. DA060097의 진균 배양으로부터 분리하였으며, 유망한 제초활성을 나타냈다(Hoerlein, 1994).

진균에 의한 미생물제초제 Mycogen[®]과 Chontrol Pastes[®]는 진균 *Chondrostereum purpureum*으로부터 얻었다. 이들

제제는 2002년 캐나다, 2005년 미국에서 침엽수 산림에서 벚나무와 사시나무 그루터기 순 방제를 위하여 출시되었다. 균주 HQ1로부터 분리된 Mycotech[®]은 캐나다에서 2002년, 미국에서 2005년에 등록되었고, Chontrol[®] Paste는 2004년에 사과나무로부터 분리한 균주 PFC 2139에서 얻었다(Hintz, 2007). Mycotech[®]은 2008년에 등록기간이 만료되었으나 Chontrol[®] Paste는 미국과 캐나다에서 사용되고 있다(Fenical and Jenesn, 2006).

생물제초제 Starritor[®]는 진균 *Sclerotinia minor* 균주 IMI344141로 구성되었으며, 잔디밭에서 광엽잡초를 방제하기 위하여 캐나다 Quebec에서 Watson에 의하여 발견되었다(Steward-Wade et al., 2002). 이 제제는 2007년에 처음 등록되었고 2010년에 최종적으로 허가를 받았으며, 2010년에 착염철(hydroxyethylenediamine triacetic acid, FeHeDTA) 제제로 생산하여 새로운 생물제초제인 Starritor[®]로 판매되었다(Duke et al., 1996).

Macrocidin A와 Z는 엉겅퀴를 감염하는 *Phoma macrostoma*에서 분리하였으며, 감염조직은 엉겅퀴 잎의 백화 및 황백화 현상을 보였고, 제초제 사용을 위하여 특허를 출원하였다(Bailey and Derby, 2010).

Phoma는 2011년 캐나다에서 골프장에서 사용하기 위하여 등록되었으며, 미국에서는 2012년에 같은 목적으로 등록되었다. 이 제제는 *Phoma macrostoma* 균주 94-44B에서 Agriculture and Food Canada의 Karen Bailey와 Jo-Anne Derby에 의하여 발견되었고 미국 Scott회사에 의하여 개발되었다(Bailey and Falk, 2011).

많은 진균 식물병원균에서 광 영향을 받지 않고 막 파괴를 일으키는 살초작용이 있는 천연 디페닐에테르 화합물인 cyperin을 생산하였다. Cyperin은 다른 상용 디페닐에테

Table 2. Status of commercial bioherbicides derived from fungus.

Bioherbicide	Fungus	Target weed	Manufac-turer	Reference
Woad Warrior	<i>Puccinia thlaspeos</i> strain tinctoria	<i>Isatis tinctoria</i>	Sherman Tompson	EPA (2002)
Smolder	<i>Alternaria destruense</i> strain 059	Dodder	Sylvan Biosciences	Bailey (2014)
Mycogen (Opportune)	<i>Chondrostereum purpureum</i> strain HQI	Tree stump	Mycotech	Hinz (2007)
Chontrol Pastes	<i>Chondrostereum purpureum</i> strain PFC2139	Tree stump		Hinz (2007)
Cinnacidin Ascaulitoxin	<i>Ascochyta caulina</i> toxin <i>Nectria</i> sp. DA060097		Health Canada	Duke et al. (2011)
Starritor	<i>Sclerotinia minor</i> strain IMI344141	Lawn Dandelion	Sylvan Biosciences	Steward-Wade et al. (2002)
Macrocidin	<i>Phoma macrostoma</i>	Common thistle		Bailey and Derby (2010)
Phoma	<i>Phoma macrostoma</i> strain 94-44B		Scott Co	Bailey and Falk (2011)
Cyperin	<i>Maliola mangiferae</i>	Fatty acid inhibitor		Dayan et al. (2008)
	<i>Myrothecium verrucaria</i>	Kudzu		Weaver et al. (2016)

르 제초제 작용기작과 다르게 지방산 생합성효소 2형의 enoyl (acyl carrier 단백질) 환원효소를 저해한다(Dayan et al., 2008).

*Cassia obtusifolia*로부터 분리한 *Myrothecium verrucaria*를 배양한 생물제초제는 침 방제에 효과가 있고 합성 제초제와 혼합제로 처리하여 침을 완전히 방제할 수 있으므로 침을 빠르게 완전히 제거하기 위하여 단독으로 혹은 혼합하여 사용될 수 있다(Weaver et al., 2016).

식물에서 유래한 생물제초제 개발

식물 추출물

Cineole 제초제는 많은 방향식물(*Laurus nobilis*, *Salvias*, *Eucalyptus*, *Artemisia*)의 정유에 있는 휘발성 대칭모노테르펜이며, 이들 식물의 대표적 구성성분의 하나는 1,8-cineole 이다(Table 3)(Romagni et al., 2000). Cinmethylin은 천연물질의 구조적 변형으로 개발된 cineole 제초제이며(Eldeek and Hess, 1986), cinmethylin의 작용기작은 tyrosine 아미노기전달효소를 저해하는 것으로 제안되었다(Grossmann et al., 2012). 이 제초제는 새롭게 실용화된 제초제 작용점으로 가장 최근에 발견된 것이다. Triketone과 cineol 이외에 식물에 의하여 생산된 여러 다른 천연물질은 새로운 제초제, 혹은 새로운 작용기구의 개발을 위한 새로운 화학의 출처로 이용될 수 있다(Hahn et al., 2009).

Benzoxazoline (BOA)의 benzoxazinoid 물질은 밀, 호밀, 옥수수과 같은 많은 화본과 식물의 뿌리에서 삼출되며, 살균, 항미생물, 살충성을 포함하는 생물활성을 나타내고, 또한 타감작용 역할을 한다(Belz, 2007). 일부 Benzoxazinoid 물질(예, BOA, DIMBOA)은 토양에서 활성을 나타내며, 또한 BOA 토양분해물질은 살초성을 나타내므로 제초제로 특

허를 받았으나 어느 시제품도 아직 상용화되지는 못하고 있다(Bayer et al., 2004).

Sarmentine은 *Piper longum* 열매 추출물로부터 분리하여 접촉형 생물제초제 특허를 얻었지만 아직 상업화는 이루어지지 않았다(Huang and Asolkar, 2011). 제초활성 지방산은 잡초방제 사용목적으로 오래 전부터 시도되었으며, 일부 물질은 생물제초제로 특허를 내어 사용되었고(Kawada and Sasaki, 1986), 이들 물질은 잡초스펙트럼이 넓고 경엽 처리 효과가 있는 것으로 나타났다.

쥐손이과(Geraniaceae)에서 주로 생성되는 지방산 제초제인 pelargonic acid는 식물 큐티클을 파괴하여 세포막 피해를 유도하여 급속한 건조와 최종적인 조직의 고사가 일어난다(Vencill, 2002). Pelargonic acid는 지방산이 세포막 안으로 삼입되어 세포막 누출을 유도하고 천연결합 복합체로부터 엽록소를 방출하는 peroxidase 활성을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 특성을 가진 지방산은 작물 수확을 위한 훌륭한 건조제로 사용되고 있으며, 특히 pelargonic acid (C₉)는 콩과작물에서 사용되는 가장 효과적인 건조제이다(Coleman and Penner, 2006).

Katoun® (pelargonic acid)은 비농경지(골프장 그린 주변, 도로, 공원 보도의 제초,)에 사용할 목적으로 Syngenta Co에 의하여 보급되었다. 이 pelargonic acid는 Thinex, Scythe (Mycogen)와 Grantico (Japan Tobacco)로 액상 농축액으로 적과제로 사용되고 있다(Copping and Menn, 2000).

Citral은 많은 식물의 정유의 디테르펜 구성분이다. Citral은 제초제로 특허 등록이 되었으며, *Cymbopogon citratus* 정유기반 생물제초제의 활성성분이며, 작용기작은 유사분열을 파괴하는 새로운 작용점을 갖는 것으로 제안되었다(Chaimovitsh et al., 2010).

Table 3. Status of commercial bioherbicides derived from plants.

Bioherbicide	Plant-derived component	Target weed	Manufacturer	Reference
Cineole, 1,8-cineole	<i>Laurus nobilis</i> <i>Salvia</i> eucalyptol	Barnyardgrass <i>Cassia obusifolia</i>		Romagni et al. (2000) Vaughn and Spencer (1991)
Benzoxazoline (BOA)	Wheat, rye, corn meal			Belz (2007)
Sarmentine	<i>Piper longum</i>	desiccator		Huang and Asolkar (2011)
Pelargonic acid Katoun	Plant fatty acid	Non-selective control	Syngenta	Coleman and Penner (2006)
Beloukha	Rape seed oil		Jade Co	Nguyen et al. (2013)
Citral	<i>Cymbopogon citratus</i>			Chaimovitsh et al. (2010)
Loline alkaloids				Petroski and Stanley (2009)
Leptospermone (sulcotrione, mesotrione)	<i>Calistemon citrinus</i>	HPPD inhibitor	Stauffer	Mitchell et al. (2001) Edmonds (2007)
isoxaflutole		HPPD inhibitor	Rhone-Poulenc	Pallett et al. (2001)

2015년에 새로운 생물체초제 Beloukha[®]는 유럽에서 식물 보호제로서 허가되었다. Beloukha[®]는 포도덩굴에서 흡지를 고사시키고 잡초를 방제하며, 감자의 줄기와 잎을 고사시키는데 사용된다. Beloukha[®]는 2016/2017년에 유럽시장에 출시되었고 미국과 일본에 허가될 것으로 전망된다. Beloukha[®]는 천연추출과정을 이용하여 유채종자 기름으로부터 얻는다(Petroski and Stanley, 2009). 추출분자는 nonanoic acid와 pelargonic acid이며, Jade Co에 의하여 보급되고 있다(Nguyen et al., 2013). Beloukha[®]는 수목재배와 조경원에 시장에 허가 받기 위하여 연구되고 있다.

타감작용 물질

타감작용(allelopathy)은 식물 간에 상호작용을 화학적으로 매개한다. 식물은 다른 식물종과 양분과 태양광에 대한 경쟁을 최소화하는 방법으로 진화하였다. 식물은 제초제로서 잠재적으로 사용될 수 있는 아주 많은 식물독소를 생산한다. 예를 들면 leptospermone은 triketone 제초제를 개발한 타감작용 화합물이다(Mitchell et al., 2001). 이 물질은 식물화학물질로부터 현재 상용되고 있는 제초제 중에서 가장 성공적인 개발이라고 할 수 있다.

모노테르펜인 cineole은 *Laurus nobilis*, *Salvia*, *Eucalyptus* spp, *Artemisia*와 같은 방향족 식물로부터 얻은 정유(essential oils)로부터 흔히 볼 수 있는 천연물질이다(Romagni et al., 2000). 일부 휘발성 모노테르펜은 식물에 독성을 나타낸다. 이들 화합물 중에서 1,8-cineole로 알려진 eucalyptol은 잡초와 곤충에 활성을 보이며, eucalyptol 10 µg g⁻¹에서 피와 *Cassia obtusifolia* 발아를 각각 34%, 49% 감소시키는 것으로 나타났다(Romagni et al., 2000). Eucalyptus 오일은 eucalyptol을 85-95% 함유하고 있으며, 감자 괴경의 출아를 억제하는데 사용될 수 있다(Vaughn and Spencer, 1991). Loline alkaloids는 가정의 온실이나 정원에서 해충 혹은 잡초 방제를 위하여 이용될 가능성이 높은 것으로 알려져 있다(Petroski and Stanley, 2009).

Triketone 제초제인 천연물질 leptospermone은 꽃솔나무로 불리는 타감식물인 *Calistemon*의 활성성분이다. Leptospermone 분자는 식물조직을 백화시키는 작용을 하며, triketone 골격을 최적화하여 상용 제초제 sulcotrione으로 개발되었다(Dayan et al., 2007). Triketone 제초제는 p-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase (HPPD) 효소를 저해하는 것으로 나타났다(Beaudegnies et al., 2009).

Leptospermone은 호주의 습지에서 자라는 광엽관목인 *Callistemon citrinus*에서 분비된 타감작용 화합물이며, 인접한 잡초의 생장을 억제하여 토양의 양분경합을 줄인다. 이 물질은 1,000 g ha⁻¹ 농도에서 단자엽 잡초와 쌍자엽 잡초에 약한 살초작용을 나타낸다(Gray et al., 1980). 이 물질은

Stauffer회사(현 Syngenta)에 의하여 화학구조를 변형하여 제초활성을 높였으며, 제초제 sulcotrione과 mesotrione을 개발하여 토양처리와 경엽처리 제초제로 사용되고 있다(Lee et al., 1998; Mitchell et al., 2001; Edmunds, 2007). Isoxaflutole도 비슷한 시도로 Rhone-Poulenc회사(현 Bayer Crop Science)에 의하여 제초제로 개발되었다(Pallet et al., 2001).

Cantharidin은 땅가뽕 곤충과 가뽕 곤충으로부터 천연방어물질인 테르펜 화합물로 생성된 독소이다. Endothall은 1950년에 처음 개발된 제초제이며, cantharidin의 구조적 유사화합물이다. Cantharidin과 endothall은 serine/threonine 단백질 인산가수분해 효소를 저해하는 기작을 갖고 있다(Bajas et al., 2011).

유기농업에 시판되는 식물제초활성물질

유기농업을 위하여 시판된 식물생산 천연물질은 옥수수 및 감귤 부산물, 콩기름, 지방산염, 레몬유 등 천연제초활성물질들이다. 옥수수 글루텐 가루는 옥수수 도정의 부산물로서 잔디와 높은 소득작물에서 비료와 토양처리 제초제로 상용화되고 있으며(Table 4), 옥수수 글루텐 가루의 50-100%를 포함한 제품이 판매되고 있다(Christians, 1990; McDade and Christians, 2000).

정향유(Clove oil)는 구슬눈(*Eugenia caryophyllus* Spreng) 잎의 증기 증류에 의하여 생산된다. 정향유는 주로 여러 테르펜 화합물의 혼합물로 구성되었으며, 제초 및 살충 활성을 갖고 있다(Tworkoski, 2002). 정향유의 주된 주성분은 eugenol로서 식물에 독성을 나타낸다. Eugenol은 50% 정향유(EC)로서 EcoSmart에 의하여 제조 판매되거나 혹은 빙초산 12% 정향유와 혼합하여 St Gabriel Laboratories에 의하여 생산된 Burnout II로 판매되고 있다(Table 4).

최종 살포액은 정향유 2.5-4%로 희석하여 살포하는 것을 추천하고 있다. 정향유는 접촉형 비선택성 경엽처리 제초제로서 지상부의 녹색 식생을 방제하며 세포막을 빠르게 파괴한다.

송근유(pine oil)는 테르펜 알코올과 지방산으로 구성되며, 9.7-11.7% 액상유제 제형으로 비선택성 접촉형 제초제로서 뉴질랜드 Certified Organics Ltd에 의하여 Interceptor로 판매되고 있다(Young, 2004).

제초제로서 지방산의 사용 잠재성은 오랫동안 알려졌다(Poignant, 1954). 식물과 동물에서 발견된 지방산염은 여러 혼합물로서 비선택성 제초제로 판매되고 있다. 예를 들면 Naturell WK 제초제는 잔효성이 없는 제초제로서 효과가 있고 DeMoss와 Naturell WK Mosskiller는 잔디에서 이끼, 울타리, 지붕, 온실에서 이끼 및 우산이끼 방제에 사용되고 있다.

Table 4. Status of commercial bioherbicides derived from plants for use of organic farming.

Bioherbicide	Component	Reference
WeedBank (Corn Weed Blocker)	corn gluten meal	Christians (1990)
Bioscape Bioweed	corn gluten meal, soybean oil	MaDade (2000)
Scythe	pelargonic acid (57%), short chained fatty acid (3%) paraffin petroleum (30%)	Copping and Menn (2000)
Burnout, Poison Ivy Defoliant	clove oil (5%), sodium lauryl sulfate (8-10%), acetic acid, lecithin, citric acid (30%), mineral oil (80%)	
Bioorganic	clove oil (5%), 2-phenethylproionate (8-10%), sesame oil (4%), sodium lauryl sulfate (8-10%)	
AllDown	citric acid (5%), acetic acid, yucca extract, garlic oil (0.2%)	
Interceptor	10% pine oil	Young (2004)
Weed Zap	clove oil or cinnamon oil (30%), vinegar (70%)	Tworowski (2002)
Weed-A-Tak Repellent	citric acid (32%), clove oil (8%), cinnamon oil (8%), 2-phenethyl propionate, lecithin	
Moss & Algae Killer, Naturell WK DeMoss, Mosskiller,	fatty acid K salt (40%)	
Organic Weed & Grass, Killer	citrus oil (70%)	
GreeMatch O Nature's Avenger	D-limonene (70%), castor oil (1-4%), emulsifier (18-23%)	
Matran II	clove oil (46%), wintergreen oil, butyl lactate, leccithin	Tworowski (2002)
Eco-Exept, Eco-Smart	2-phenyl propionate (21.4%), clove oil (21.4%)	Bessette (2000)

2-phenethyl propionate는 mentol과 menthone이 많은 박하유의 성분으로 제초제로 특허를 냈으며, 주로 생물제초제 제형의 구성분으로 많이 사용되어왔다(Bessette, 2000).

우리나라에서 천연제초활성물질의 개발 현황

우리나라에서 제초활성물질 탐색은 일부 타감작용물질을 함유한 자생식물을 대상으로 연구가 진행되었으며, 삼주(*Atracylodes japonica* Koidz.)로부터 isolantolactonoid butenolide A (Kim and Baek, 2003b), 애기수영(*Rumex acetosella* L.)으로부터 chrysophanic acid, 그리고 할미꽃으로부터 anemonin을 각각 분리, 동정하였다(Kim and Baek, 2003a).

자생식물 유래 살초활성물질을 활용한 친환경 발 잡초방제용 생화학 작물보호제 개발사업의 일환으로 국내의 자생식물 73과 200종, 55과 98종(Kim et al., 2004), 38과 81종(Kim et al., 2005), 36과 55종(Kim, 2006)에 대한 살초활성물질을 검정하여 새로운 제초제 개발을 위한 선도화합물로 활용하고자 활발한 연구가 진행되어 왔으며, 또한 삼주의 근경으로부터 식물생장 억제물질을 분리, 동정하였다(Kim et al., 2002).

에피코코소라스(*Epicoccosorus*) YCSJ-112 균주를 이용하여 논잡초인 올방개를 방제할 수 있는 미생물제초제가 특허 출

원되었으며(Lee et al., 1994), *E. monoceras* 균주를 분리하여 피를 방제하는 연구를 수행하였다(Chung et al., 1990). 역병 증상을 나타내는 칙 병반으로부터 *Phytophthora erythroseptica* 를 분리하여 칙 방제효과를 검정하였다(Kim and Kim, 1993). 한국생명과학연구원에서는 *Penicillium oxalicum* F40497 균주를 선발하여 크로버 등 밭 잡초를 방제하기 위한 미생물 제초제 개발에 관한 연구를 수행하였다(Kim et al., 1996; Kim et al., 1997).

미생물제초제 개발을 위한 연구는 활발히 이루어지고 있지만 국내에서 제품화되거나 산업화된 예는 아직 없는 실정이다. 선진국에서 유일하게 개발된 미생물제초인 펠라르곤산(pelargonic acid) 유제는 사과의 일년생 및 다년생 잡초방제에 사용되고 있는 실정이다.

생물제초제 개발 및 활용 전망

천연물질로부터 개발되어 실용화된 제초제, 즉 phosphinothricin, triketone 제초제, cantharidin, cineole은 독특한 작용기작을 가진 새로운 화학계열의 화합물로 널리 알려졌다. 많은 천연물질은 현재 사용되고 있는 제초제와 다른 작용기작을 나타내는 우수한 식물독소를 가지고 있다. 따라서 천연물질도 제초제 개발이 성공할 수 있도록 비교적 단순한 구조를 제공할 수 있다.

생물제초제는 잡초의 생장을 억제하여 잡초와 작물의 결합에서 작물에 유리하게 작용하는 부수적 수단으로서 고려될 수 있다. 생물제초제는 특히 제초제가 저항성 때문에 효과적이지 못한 경우에 잡초에 대한 선발압력을 다양화하는 수단으로서 효과적일 수 있다. 생물제초제는 각 잡초 방제기술의 효능과 잡초를 관리하기 위한 종합잡초관리체계의 전체적 효능을 증가시키는데 도움을 줄 수 있다.

따라서 잔디 및 골프장에서 세균제제인 Opportune, Camperico, Organo-Sol, 진균제제인 Starrier, Phoma 그리고 고추, 당근, 토마토에서 새삼 방제를 위한 진균제제인 Smolder, 산림에서 관목의 그루터기 방제를 위한 Mycogen, Chontrol Paste와 같은 제품에 대한 약효 및 약해 검정을 통한 실용성을 파악하여 실용화 방법을 시도할 필요가 있다.

또한 상업용으로 시판되는 비선택성 식물제초활성물질을 선발하여 유기농법 과수농가에서 실용화 가능성을 검토할 필요가 있다. 따라서 유기영농 과수원에서 비선택적으로 잡초를 방제하기 위하여 옥수수 글루텐 가루 제제인 WeedBan, Corn Weed Blocker, 식물정유(essential oil) 제제인 Burnout, Bioorganic, AllDown, Interceptor, WeedZap, Organic Weed, Matran II, Eco-Except, Eco-Smart 등 제품의 실용화도 검토할 필요가 있을 것이다.

요 약

생물제초제의 이용은 농업에서 지속성을 향한 중요한 단계로 활용 될 수 있을 것이다. 유기농업 및 종합잡초관리는 보존농업에서 합성제초제와는 다르게 한 종류의 잡초관리기술에 의존하지 않아야 하며, 생물제초제는 다른 잡초관리기술과 동시에 평가되는 것이 바람직할 것이다.

우리나라 실정에 적합한 세균 및 진균으로부터 유래한 상업용 생물제초제를 선발하여 유기농업 농가에서 영농부가 가치가 높은 고소득 작물을 대상으로 생물제초제 실용화 가능성을 검토할 가치가 있을 것이다. 또한 유기영농 과수원에서 비선택적으로 잡초를 방제하기 위하여 상업용으로 시판되는 옥수수 글루텐 가루 제제와 각종 식물정유 제제 등 제품에 대한 실용화 연구가 필요할 것이다.

Acknowledgements

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

References

- Bailey, K.L. 2014. The Bioherbicides approach to weed control using plant pathogens. pp. 245-266. USA. In: Abrol and Dharma (Eds). Integrated Pest Management: Current Concepts and Ecological Perspective, Elsevier (Academic Press).
- Bailey, K.L. and Derby, J. 2010. Fungal isolates of *Phoma macrostoma* or extracts and biological control compositions for control of weeds. US Patent 772155.
- Bailey, K.L. and Falk, S. 2011. Turning research on microbial bioherbicides into commercial products-a Phoma story. Pest Technology. 5:73-79.
- Bajas, J., Pan, Z. and Duke, O. 2011. Transcriptional responses to cantharidin, protein phosphatase inhibitors, in *Arabidopsis thaliana* reveals the involvement of multiple signal transduction pathways. Physiol Plant. 143:188-205.
- Bayer, E., Gugel, K., Hagele, K., Hagenmaier, H., Jessipow, S., et al. 2004. Mitteilung. Phosphinotricin and phosphinotrithricyl-alanyl-alanin. Helv Chim.Acta. 55:224-239
- Beaudegnies, R., Edmunds, A.J., Fraser, T.E.M., Hall, R.G., Hawkes, T.R., et al. (2009). Herbicidal 4-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase inhibitors-A review of triketone chemistry story from a Syngenta perspective. Bioorg. Med. Chem. 17:4134-4152.
- Bowers, R.C. 1986. Commercialization of Collego—an industrial view. Weed Sci. 34:24-25.
- Boyetchko, S., Bailey, K., Hynes, R. and Peng, C. 2007. Development of the mycoherbicide, BioMal. pp. 274-283. In: Vincent, C., Goettel, M.S. and Lazarovits, G. (Eds.). Biological Control, a Global Perspective. CAB Intern.
- Chaimovitch, D., Abu-Abied, M., Belasov, E., Rubin, B., Dudai, N., et al. 2010. Microtubules are an intracellular target of the plant terpene citral. Plant J. 61:399-408.
- Christians, N.E. 1990. Pre-emergence weed control using corn gluten meal. US Patent 030268.
- Chung, Y.R., Kim, B.S., Kim, H.T. and Cho, K.Y. 1990. Identification of *Exserohilum* species, a fungal pathogen causing leaf blight of barnyardgrass. Kor J. Plant Pathol. 6:429-433. (In Korean)
- Coleman, R.D. and Penner, D. 2006. Desiccant activity of short chain fatty acids. Weed Technol. 20:410-415.
- Copping, L.G. and Menn, J.J. 2000. Biopesticides: a review of their action, applications and efficacy. Pest Manag. Sci. 56:651-676.
- Cordeau, S., Triolet, M., Wayman, S., Steinberg, C. and Guillemin, J.P. 2016. Bioherbicides: Dead in the water? A review of the existing products for integrated weed management. J. Crop Prot. 87(20):44-49.
- Dayan, F.E., Duke, S.O., Sauldubois, A., Singh, N., McCurdy, C., et al. 2007. p-hydroxyphenyl- pyruvate dioxygenase is an herbicidal target

- for β -triketones from *Leptospermum scoparium*. *Phytochemistry*. 68:2004-2014.
- Dayan, F.E., Ferreira, D., Wang, Y.H., Khan, I.A., McInroy, J.A., et al. 2008. A pathogenic fungi diphenyl ether phytotoxin targets plant enoyl (acyl carrier protein) reductase. *Plant Physiol*. 147:1062-1071.
- Duke, S., Abbas, H., Amagasa, T. and Tanaka, T. 1996. Phytotoxins of microbial origin with potential for use as herbicides. *Crit. Rev. Anal. Chem.* 35:82-112.
- Duke, S.O., Dayan, F.E., Romando, I. and Rimando, A. 2000. Natural products as sources of herbicides: Current status and future trends. *Weed Res.* 40:99-111.
- Duke, S.O., Baerson, S.R. and Dayan, F.E. 2003. United States department of agriculture-agricultural research service research on natural products for pest management. *Pest Manag. Sci.* 59:708-717.
- Duke, S.O., Evidente, A., Fiore, M., Rimando, A.M., Dayan, F.E., et al. 2011. Effects of the aglycone of ascaulitoxin on amino acid metabolism in *Lemna paucicostata*. *Pestic Biochem. Physiol.* 100:41-50.
- Edmunds, A.J.F. 2007. 4-Hydroxyphenylpyruvate dioxygenase (HPPD) inhibitors: triketones. pp. 221-243. In: Kramer, W. and Schirmer, U. (Eds.). *Modern crop protections*. Vol. 1. Wiley, Weinheim, Germany.
- Eldeek, M.H. and Hess, F.D. 1986. Inhibited mitotic entry is the cause of growth inhibition by cinmethylin. *Weed Sci.* 34:684-688.
- EPA (Environmental Protection Agency). 2002. Pesticide Registration and Classification Procedures. Title 40, Code of Federal Regulations. Section 152.25 (f).
- Fenical, W. and Jenesn, P.R. 2006. Developing a new resource for drug discovery: marine actinomycete bacteria. *Nat. Chem. Biol.* 2, 666-673.
- Gray, R.A., Rusay, R.J. and Tseng, C.K. 1980. 1-Hydroxy-2-(alkylketo)-4,4,6-tetramethyl cyclohexen-5-diones. US Patent 202840.
- Grossmann, K., Hutzler, J., Tresch, S., Christiansen, N. and Ehrhardt, T. 2012. On the mode of action of the herbicides cinmethylin and 5-benzyloxymethyl-1,2-isoxazolines: putative inhibitors of plant tyrosine aminotransferase. *Pest Manag. Sci.* 68:482-492.
- Hahn, D.R., Graupner, P.R., Chapin, E., Gray, J., Heim, D., et al. 2009. Albugidin: a novel bleaching herbicide from *Streptomyces albus* subsp. *chlorinus* NRRL B-24108. *J. Antibiot.* 62: 191-194.
- Hintz, W. 2007. Development of *Chondrostereum purpureum* as a mycoherbicide for deciduous brush control. In: Vincent, C., Goettel, M.S. and Lazarovits, G. (Eds.). *Biological Control, a Global Perspective*. CAB Intern Ed. pp. 284-290.
- Hoerlein, G. 1994. Glufosinate (phosphinothricin), a natural amino acid with unexpected herbicidal properties. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 138:73-146.
- Houtz, R.L., Dirk, L.M.A. and Williams, M.A. 2004. Inhibitors of plant peptide deformylase for use as broad-spectrum herbicides and methods for identifying the same. US Patent 730634.
- Huang, H. and Asolkar, R. 2011. Use of sarmentine and its analogs for controlling plant pests. US Patent 8957000.
- Huter, O.F. 2011. Use of natural products in the crop protection industry. *Phytochem. Rev.* 10:185-194.
- Imaizumi, S., Nishino, T., Miyabe, K., Fujimori, T. and Yamada, M. 1997. Biological control of annual bluegrass (*Poa annua* L.) with a Japanese isolate of *Xanthomonas campestris* pv. *Poae* (JT-P482), *Biological Control* 14:7-14.
- Irvine, N.M., Yerkes, C.N., Graupner, P.R., Robert, R.E., Hahn, D.R., et al. 2008. Synthesis and characterization of synthetic analogs of cinnacidin, a novel phytotoxin from *Nectria* sp. *Pest Manag. Sci.* 64:891-899.
- Kang, K.S., Won, O.J., Park, S.H., Eom, M.Y., Hwang, K.S., et al. 2014. Herbicidal efficacy of various formulations and application timings of imazosulfuron+fentrazamide mixtures in rice. *Kor. J. Agri. Sci.* 41(1): 17-22. (In Korean)
- Kawada, H. and Sasaki, M. 1986. Pelargonic acid containing liquid agents for weed control. JP Patent 2011-001337.
- Kenney, D.S. 1986. Devine-The way it was developed-an industrial view. *Weed Sci.* 34:15-16.
- Kim, K.W. and Baek, J.K. 2003a. Isolation and identification of herbicidal active substances from *Zanthoxylum schinifolium* Siebold & Zucc. *Kor. J. Plant Resources.* 2:58-58. (In Korean)
- Kim, K.W. and Baek, J.K. 2003b. Screening of herbicidal active substances from Korean native plant resources. *Kor. J. Plant Resources* 16:59(Abstr.) (In Korean)
- Kim, K.W., Shin, J.G. and Kim, J.S. 2002. Isolation and identification of plant growth retardants from *Atractylodes japonica* rhizome. *Kor. J. Weed Sci.* 22(4):199-122. (In Korean)
- Kim, B.S. and Kim, J.S. 1993. Identification of *Phytophthora* species infected to kudzu. *Kor. J. Plant Pathol.* 9:319(Abstr.). (In Korean)
- Kim, M.S., Lee, Y.S., Khoa, D.B., Kim, H.Y., Choi, H.J., et al. 2004. Herbicidal activity of Korean native plants(II). *Kor. J. Pesticide Sci.* 8(3):220-230. (In Korean)
- Kim, S.M., Lee, Y.S., Kim, H.Y., Choi, H.J., Heo, S.J., et al. 2005. Herbicidal activity of Korean native plants(III), *Kor. J. Pesticide Sci.* 9(2):173-180. (In Korean)
- Kim, S.M. 2006. Herbicidal activity of Korean native plants(IV). *Kor. J. Pesticide Sci.* 10(3):225-229. (In Korean)
- Kim, P.K., Park, D.J. and Kim, C.J. 1996. Screening of *Penicillium* species showing herbicidal activity on *Trifolium repens* L. *Kor. J.*

- Pesticide Sci. 39(6):455-459. (In Korean)
- Kim, P.K., Park, D.J., Choi, J.S., Hwang, I.T., Hong, K.S., et al. 1997. Biological control by *Penicillium* species. Agri. Chem & Biotech. 40(11):65-70. (In Korean)
- King, R.R. and Calhoun, L.A. 2009. The thaxtomin phytotoxins: Sources, synthesis, biotransformation and biological activity. Phytochemistry. 70:833-841.
- Lee, D.L., Knudsen, C.G. and Michaely, W.J. 1998. The structure-activity relationships of the triketone class of HPPD herbicides. Pestic. Sci. 54:377-384.
- Lee, S.F. and Anderson, R.J. 1997. Preparation of herbicidal ribofuranose derivatives. US Patent 683963.
- Lee, S.G., Kim, J.C. and Hong, Y.G. 1994. Mass production method of *Epicoccosorus* strain YCSJ-112 for control of *Eleocharis kuroguwai*. KR Patent 9-424055.
- Leep, D., Doricchi, L., Perez Baz, M.J., Milan, F.R. and Fernandez Chimenno, R.I. 2010. Use of thaxtomin for selective control of rice and aquatic based weeds. US Patent 031317.
- McDade, M.C. and Christians, N.E. 2000. Corn gluten meal: A natural pre-emergence herbicide: Effect on vegetable seedling survival and weed cover. Amer. J. Altern. Agr. 15:189-191.
- Mitchell, G., Bartlett, D.W., Fraser, T.E.M., Hawkes, T.R., Holt, D.C., et al. 2001. Mesotrione: a new selective herbicide for use in maize. Pest Manag. Sci. 57:120-128.
- Nguyen, C., Chemin, A. and Vincent, C. 2013. VVH 86 086, nouveau defanant desiccant naturel affet herbicide. 22nd Conference du Columa. Journees Internationale sur la lutte les Mauvaises Herbes, Dijon, France. pp. 953-962.
- Pallett, K.E., Cramp, S.M. and Little, J.P. 2001. Isoxaflutole: the background to its discovery and the basis of its herbicidal properties. Pest Manag. Sci. 57:29-47.
- Park, S.H., Won, O.J., Eom, M.Y., Han, S.M., Seo, S.J., et al. 2014. Application of remote-controlled aerial application to control weeds on the Paddy Field using benzobicyclon mixtures. Kor. J. Agri. Sci. 41(2): 113-117. (In Korean)
- Park, S.H., Heo, Y.R., Won, O.J., Eom, M.Y., Hwang, K.S., et al. 2013. Herbicidal efficacy of benzobicyclon-mixtures and carfentrazone-ethyl-mixtures in direct seeding flooded rice. Kor. J. Agri. Sci. 40(3): 183-189. (In Korean)
- PMRA (Pest Management Regulatory Agency). 2013. Registration decision for *Streptomyces acidiscables* strain RL-110 T and thaxatomin a. RD2014-14, p.7.
- Petroski, J.P. and Stanley, D.W. 2009. Natural compounds for pest and weed control. J. Agric. Food Chem. 57:8171-8179.
- Poignant, P. 1954. Chemical structure and herbicidal activity of a group of organic acids. C. R. Chim. 239:822-824.
- Romagni, J.G., Allen, S.N. and Dayan, F.E. 2000. Allelopathic effects of volatile cineoles on two weedy plant species. J. Chem. Ecol. 26:303-313.
- Steward-Wade, S., Green, M.S., Boland, G.J., Teshler, M.P., Watson, I.B., et al. 2002. *Taraxacum officinale* (Weber), Dandelion. pp. 44-49. In: Mason, P. G. and Huber, J.T. (Eds.). Biological Control Programms in Canada, 1981-2000, CAB International. Wallingford, UK.
- Tateno, A. 2000. Herbicidal composition for the control of annual bluegrass. U.S. Patent 162763.
- Tworkoski, T. 2002. Herbicide effects of essential oils. Weed Sci. 50:425-431.
- Vaughn, S.F. and Spencer, G.F. 1991. Volatile monoterpenes inhibit potato tuber sprouting. Am. Potato. J. 68:821-831.
- Vencill, W.K. 2002. Herbicide Handbook, 8th Ed., pp. 493. Weed Sci., Lawrence, KS, USA.
- Weaver, M.A., Boyette, C.D. and Hoagland, R.E. 2016. Rapid kudzu eradication and switchgrass establishment through herbicide, bioherbicide and integrated programmes, Biocontrol Sci. Technol. 26:640-650.
- Won, O.J., Kang, K.S., Park, S.H., Eom, M.Y., Hwang, K.S., et al. 2015. Phytotoxicity of imazosulfuron+fentrazamide in different cultivation type of rice. Kor. J. Agri. Sci. 42(1): 15-22. (In Korean)
- Woo, J.S., Sa, S.J., Cui, J.A., Lee, S.I., Kim, Y.H., et al. 2015. Effect of microorganisms collected from uterus of Hanwoo cattle with low conception rate on the development of IVF-derived embryos. Kor. J. Agri. Sci. 41(4):355-359. (In Korean)
- Young, S.L. 2004. Natural product herbicides for control of annual vegetation along roadsides. Weed Technol. 18:580-587.