유기농 재배에서 잡초방제기술의 동향 및 전망

옥환석¹, 변종영^{2*}

Trend and Perspective of Weed Control Techniques in Organic Farming

Hwan-suck Ock¹ and Jong Yeong Pyon^{2*}

ABSTRACT Weeds are one of the major constraints to crop production in organic farming systems. This paper reviews major results and techniques achieved with physical, cultural, and biological weed control and their perspectives in organic agriculture. Physical methods includes mechanical, thermal, lighting, electrocution, pneumatic, autonomous robot weeding control techniques. Cultural weed control methods includes mulching, tillage, crop rotation, cover crops and crop competition. Physical and cultural weed control techniques are especially important in organic farming crops where other weed control options are limited or not available without use of herbicides. Biological weed control includes mycoherbicides, inundative biological control, broad-spectrum biological control and allelopathy. Successful weed management in organic farming requires well managed integrated systems of mechanical control using newly developed machines, cultural control and biological control methods. Weed management decision-aid models may also needed to develop to provide greater assurance of achieving profitability and appropriate long-term weed management in organic farming in the future.

Key words: biological control; cultural control; integrated weed management; mechanical control; organic weed management.

서 언

잡초는 농경지에서 작물과 경합에 의하여 작물의

수량을 크게 감소시키므로 농작물 재배에서 잡초방제의 비중은 매우 크므로 농민은 작물을 재배하기 위하여 잡초방제에 많은 노력을 기울이고 있는 실

¹ 한국과학기술정보연구원 ReSeat 프로그램, 305-806 대전광역시 유성구 어은동 52-11(ReSeat Program, Korea Institute of Science and Technology Information, Daejeon 305-806, Korea).

² 충남대학교 농업생명과학대학 응용식물학과, 305-764 대전광역시 유성구 공동 220(Department of Agronomy, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea).

* 연락저자(Corresponding author) : Phone) +82-42-821-5726, Fax) +82-42-822-2631, E-mail) jypyon@cnu.ac.kr

(Received March 3, 2011; Examined March 21, 2011; Accepted March 24, 2011)

정이다.

최근에는 생활수준의 향상과 건강에 대한 관심이 높아지면서 안전한 농산물이 요구되고 있고, 환경을 오염시키지 않고 적절한 소득을 얻을 수 있으면서 농산물을 지속적으로 생산할 수 있는 친환경 유기농업이 성행하고 있다. 유기농업은 친환경육성법에 의하여 제초제를 사용할 수 없기 때문에 손제초 등 물리적 방법 위주로 잡초를 방제해야 하기 때문에 노력이 많이 들고 제초비용이 많이 소요되는 문제점을 야기하고 있다.

친환경 유기농 재배에서는 제초제를 사용하지 않고 잡초를 방제하여야 하기 때문에 손제초, 중경, 예취, 멀칭이 기본적 수단이고, 윤작, 재식밀도 그리고 재배방식을 변경하여 작물의 경합능력을 키우고, 피복작물, 제초용 농기구 이용, 열을 이용한 소각, 소토하는 방법을 이용하거나 새로운 잡초종의 침입과 오염을 막는 등의 수단들을 이용하여야 할 것이다.

따라서 현재 유기농재배에서 이용되고 있는 잡초 방제 기술 및 연구 동향을 검토하고, 앞으로 방향을 제시하기 위하여 화학적 방제를 배제하고 기계적 방제, 경종적 방제, 생물적 방제를 포함한 종합방제 기술에 대한 문헌을 정리하고 분석하여 유기농재배에서의 새로운 잡초관리방향을 전망하고자 한다.

물리적 방제법

기계적 잡초방제

물리적 방제는 흔히 기계적 방제법(mechanical control method)이라고도 한다. 이 방법은 잡초를 손 또는 농기구로 잡초를 제거하거나 휴면중인 잡초의 종자와 영양번식체에 물리적인 힘을 가하여 억제 또는 사멸시키는 수단이다. 이러한 방법에는 손 도구(hand tools), 쇄토기(harrows), 경운기(tractor hoes), 솔형 제초기(brush weeders), 예취기(mowers), 소형 예취기(cutters) 등이 개발되어 있다(Bond 등 2003).

손제초(hand pulling)는 직접 손을 이용하거나 손 도구(hand tools)를 이용하여 지형과 기후가 기계화에 부적절한 곳이나 또는 뿌리 채 뽑아야 할 필요가 있거나 소규모 원예작물에 사용되는 가장 오래된 방법이다. 그러나 호미에 의한 손제초는 허리에 상처를 입힐 우려가 많기 때문에 손잡이가 짧은 호미작업처럼 서서 긴 호미로 잡초를 회전시켜 뿌리째 뽑아 올려 제거할 수 있는 섬세하고 편리한 도구의 출현이 요구된다(OSHSB 1998). 경운하여 쪼개질하는 쇄토작업은 일년생초를 방제하기 위한 기계적 잡초방제법이지만 다년생잡초나 이미 발생된 잡초에는 효과가 적다. 쇄토작업에 관한 연구는 황 등(1999)이 벼 쪼개질 작업과 동시 골 직파재배의 안정성 및 경제성

Fig. 1. Diagram of blind harrowing.

Fig. 2. Types of drag harrows (Rasmussen 1994).

연구와 황 등(2000)은 벼 직파재배에서 로터리 경운 정지작업 후 3일간 논 굳힘 작업을 하고 파종 시 입모가 가장 양호하며 쌀 수량도 가장 높았다는 보고가 있다.

그림 1에서 보는 바와 같이 화곡류 작물을 재배할 때 작물의 종자가 파종 후 출아하기 전에 쏘토 날이 닿는 곳 아래에 있는 잡초를 쇠사슬형 부착기로 토양 표면을 아주 얇게 긁는 차폐 쏘토(blind harrow)작업으로 작물 출아 전 출현하는 어린 잡초를 제거할 수 있다.

쏘토작업은 그림 2에서 보는 바와 같이 작물이 잡초보다 먼저 경합능력을 높이도록 고리로 연결된 쇠사슬(chain)을 끌고 다니거나 또는 유연성 있는 스프링 날(spring-tine)과 같은 여러 부착형 날로 끌기 쏘토(drag harrow) 작업을 한다. 출아 후 쏘토작업은 작물에 상해를 입힐 수도 있고 둥글거나 북 모양으로 된 쇠사슬(chain)을 연결한 쏘토작업기는 잡초를 파묻고 끌려 올라오지 않도록 한다(Rasmussen 1994).

딱딱하거나 용수철이 달린 날(tine) 부착형 제초기(tine weeders)는 쇠사슬형 부착 제초기보다는 작물의 손상이 적다(그림 3). 따라서 날의 선택은 토양 유

형과 구조에 따라 다르고 특히 날 쏘토작업은 날의 각도가 중요하다(Rasmussen 등 1989). 잡초와 작물 모두에 대한 쏘토작업의 효과는 쏘토의 유형보다는 시기 선택과 빈도수가 중요하고 쏘토작업의 방향에 상관없이 시간당 5km 속도가 효과적이다(Rydberg 1994). 그 외에 토양표면이나 잡초에 유연하게 대처하는 유연한날 부착형(flexi-tine) 제초기, 솔형 부착 제초기(brush weeder), 비꼬는 식의 토션형 제초기(torsion weeder), 회전 날 부착형 제초기(rotary-tine weeder), 손가락모양 날 부착형 제초기(finger weeder) 등이 용도에 따라 개발되어 있다(Bond 등 2003).

열이용 잡초방제

열을 이용한 잡초방제(thermal weed control)는 연기와 다른 위험때문에 금지되고 있지만 곡물 추수 후에 토양에 낙하된 잡초종자의 수를 감소시키기 위하여 이용되었다. 표면온도를 10~30초 동안 200℃를 초과하여 도달된 화염은 야생귀리 및 뚝새풀 종자의 생존력을 각각 30%, 80%까지 감소시킨다(Chancellor 등 1984). 일반적으로 잡초 잎은 55~94℃ 범위에서 고사되는 것으로 알려져 있다. 열처리를 이용한 방제법은 엽록소를 가진 식물에 94~100℃의 열을 0.1초

Fig. 3. Types of weeders (Bond 등 2003).

Table 1. Weed extinction rate and weight decrease rate by fuel consumption 13 days after treatment (Kang and Moon 2001).

Fuel consumption (kg/ha)	Extinction rate (%)	% decrease of weed weight
116.87	75.85 ± 5.96	84.65 ± 4.41
57.04	71.34 ± 6.12	65.61 ± 5.83
32.36	72.79 ± 4.86	77.80 ± 6.59
15.79	63.10 ± 17.05	48.08 ± 1.94

이상 가열하여 단계적으로 고사시키는 방법으로 50~70℃에서 단백질 응고가 시작되다가 갑자기 온도가 올라가면 세포의 강한 팽창으로 세포벽이 파괴된다.

표 1은 열처리 후 13일이 경과되었을 때의 잡초방제효과를 나타낸 것으로 연료소모량의 증가에 따라 개체사멸율과 잡초중량 감소율이 높아지는 것은 불꽃이 잡초에 작용하는 시간이 더 길어지기 때문이다(강과 문 2001).

다양한 잡초 종자와 유묘를 살초하기 위한 열이용 잡초방제법은 에너지원에 따라 화염제초(flame weeding), 증기열(steaming), 직접가열(direct heat), 태양열 소독법(solarization) 등이 있다.

화염제초의 경우 잡초에 직접 화염이나 열을 가함으로써 제거하는 방법으로 화염방사제초, 가열증기제초가 이에 속하며 기계장치가 고도로 발전되면서 기계적인 제초 다음으로 일반화된 방법이다. 여기에는 디젤엔진에서 발사한 68~70℃의 열을 이용하여 토양의 10~25cm까지 소독이 가능한 것으로 노지 토양에서는 증기보다는 더 빠르게 사용할 수 있다. 증기열과 태양열 소독법은 2005년 브롬화메틸 소독법이 철폐되면서 메틸브로마이드의 사용에 대한 우려 때문에 비교적 새로운 토양살균 및 잡초방제 방법으로 각광받는 방법들이다(Katan 등 1976).

광선이용 잡초방제

광선이용 잡초방제(lighting weed control)는 적외선(infra red), 마이크로파(microwave), 방사선(irradiation), 그리고 레이저(laser)광선 등을 사용하는 제초방법이다.

잡초에 직접 쬔여진 레이저 광선은 식물에 고밀도

Fig. 4. Targeting the apical meristem with a hand-held laser tool.

에너지를 전달하거나 식물세포의 온도를 높게 하여 생장을 정지 또는 지연시킬 수 있어 제초제의 대안으로 사용될 수 있는 잡초방제법이다(그림 4). 따라서 상업적인 사용을 하기 위해서는 에너지 밀도와 잡초 종류의 차이, 생장 단계 등에 대한 생물적 효과를 체계적으로 연구할 필요가 있다(Mathiassen 등 2006).

가열된 세라믹 원판이 백열일 때 생성하는 적외선을 열원으로 사용하는 제초방법은 조사시간에 따라 큰 영향을 받는다. 함수율 15% 토양에서 조사시간을 90초 이상으로 한 경우 표면에서 9~16mm까지 잡초 종자 발아를 억제할 수는 있으나 서서히 뜨거워지는 관계로 시간이 많이 소요되고 IR(infra red)판이 기계적인 손상에 예민하여 화염제초기 보다는 비싼 단점이 있다(강 1997; 강 등 1996a, 1996b).

마이크로파 방사선은 가시광선보다 더 큰 파장을 가진 초고주파(UHF) 전자기 에너지를 이용한다. 사용하는 주파수는 산업용 마이크로파 장치에 할당하는 가정용 2450Mhz이다. 마이크로파에 대한 종자의 반응은 많은 요인에 의하여 결정되고 내성은 잡초의 종류에 따라 차이가 있다(김 2002).

전기적 잡초방제

전기적 잡초방제는 전기 에너지를 이용하는 전기충격(electrocution) 개념으로 작물보다 키 큰 잡초를 방제하기 위하여 19세기 후반에 미국에서 개발되었다. 토양을 교란하지 않는 이점은 있으나 많은 에너지

Fig. 5. Pneumatic weeding tool (OACC 2005) and electropneumatic components (Lawrence *et al.* 2007).

가 필요하고 고압전기의 위험성 때문에 대중화되지 못하였다(Vigneault 등 1990). 자연적으로나 인공적으로 발생하는 정전기 역시 유리하고 치명적인 효과는 관찰되지만 위험성 때문에 실용화되지 못했다(Diprose 등 1984).

압축공기이용 잡초방제

압축 공기를 이용한 잡초방제(pneumatic weed control)는 작물 곁에 있는 작은 잡초를 뿌리째 뽑기 위하여 토양에 압축공기를 주입하는 도구도 개발되었다(그림 5). 용도는 다르지만 그림 5의 우측과 같이 전기와 공기압력을 이용하는 천공제어장치(electropneumatic dibbling machine) 기술도 있다(Lawrence 등 2007).

자율로봇 잡초방제

농업용 로봇(robot)은 농업시스템의 중요한 물리적, 생물적 특성을 측정하는 검출계(sensing system)와 감지계(sensor system)로부터 정보를 조작하는 의사결정능력 농업체계를 적절히 조정하는 액추에이터 등의 3개의 기본구조로 구성된다(그림 6). 다목적 자율로봇방식의 잡초방제는 유도장치(Real-time kinematic global positioning systems : RTK GPS), 잡초감지와 확인(GPS가 지원하는 다중분광영상) 및 정밀도에 따라 이랑의 잡초방제 (마이크로 살포, 예취, 열, 전기 충격) 및 설정 등 4개 핵심기술이 있다(Slaughter 등 2008).

그러나 정확한 잡초감지와 확인은 잡초마다 생육

Fig. 6. Autonomous robot for weed control (<http://edepot.wur.nl/1099>).

단계별 생태적 특성이 다르기 때문에 기계적 시각으로 기억할 수 있도록 식물생태 내지는 잡초생리, 생태 전문가의 도움이 절대적으로 필요하다. 따라서 잡초방제용 자율로봇의 감지하고 확인하는 기술 분야는 잡초에 대한 집중적 연구로 해결해야 할 앞으로의 과제가 될 것이다. 이러한 로봇의 개발은 일본, 미국, 유럽에서 진행 중에 있으며, 특히 일본에서는 비군사민간용 헬리콥터를 사용한 농약 살포, 벼농사, 잡초 제거 및 과일의 적과에 활용하고 있다(임 2004).

경종적 잡초방제

경종적 잡초방제(cultural weed control)는 생태적 잡초방제(ecological weed control)라고도 하며 모든 잡초방제의 기반이다. 이 방법은 잡초와 작물의 생리, 생태적 특성 차이를 이용하여 잡초에는 경합력(competitive force)이 약해지도록 하고 작물은 경합

력이 높아지도록 재배관리를 해주는 것이다.

친환경농업에서의 잡초방제는 작물이 항상 잡초보다 먼저 성장하도록 하는 경작기술을 사용하고 작물의 전 생육기간 동안 잡초가 없도록 관리할 필요는 없지만 작물이 잡초에 대한 민감한 기간이 다르므로 잡초경합허용기간과 잡초경합한계기간을 고려한 잡초방제한계기간(critical period for weed control)을 결정하여 잡초방제를 할 필요가 있다(Mahmoodi와 Rahimi 2009).

멀칭

멀칭(mulching)을 하는 것은 토양의 침식방지, 수분유지, 지온조절, 잡초생장 억제, 토양전염성 병균의 감염방지 그리고 토양의 오염 방지 등 많은 이점이 있으며, 특히 잡초종자의 발아를 억제하거나 출아하는 잡초의 생장을 억제하여 잡초 밀도를 감소시킬 수 있다.

입자 피복재(particle mulches)는 짚, 나무껍질 등이 흩어져 있는 물질과 도시의 음식물 쓰레기로 만든 퇴비를 포함한다. 이들 피복재는 잡초를 효과적으로 방제하기 위한 필요한 퇴비층은 3cm이상으로 피복재의 두께가 증가할수록 잡초방제효과는 높다(Ligneau 등 1995). 또 다른 입체 피복재인 셀룰로오스는 생분해성으로 잡초를 효과적으로 질식사시키고 쉽게 퍼지는 과립형이다. 시트 피복재(sheeted mulches) 중에 검정 폴리에틸렌 피복재는 유기농과 전통적인 영농방법에서 잡초방제를 위해 널리 이용되고 있다. 투명한 시트 피복재는 토양의 온도를 올리지만 잡초방제를 위해서는 검정 시트 피복재가 좋다.

최근에는 선택적으로 광합성유효광(photosynthetically active radiation, PAR)을 여과, 제거한 플라스틱 멀칭 자재가 개발되었다. 적외선투과(infrared transmitting) 피복재는 잡초를 방제하는데 효과적인 것으로 보인다(Majek 등 1991). 또 전분인 아미돈(amidon)에 생분해성 플라스틱(biodegradable plastic)을 섞은 피복재는 잘 찢어지지 않는으나 적용 작물과 설치조건이 까다로운 단점을 동시에 가지고 있다. 부직포(woven fabric)는 내구성이 좋고 재사용할 수 있는 투수성 피복재이다(OACC 2005).

종이 피복재는 모내기 직전에 논바닥에 피복하고, 피복과 동시에 그 위에 파종 또는 이앙하여 잡초발생을 억제하는 재배기술로 생분해성이다. 벼농사에서 멀칭 직파와 멀칭 이앙에서는 종이 성분이 풀려지지 않도록 물의 침투를 차단하는 생분해성 폴리에스테르를 코팅한 종이를 멀칭자재로 사용하고 있다. 멀칭 이앙 재배를 하고 있는 나라는 한국, 일본, 중국, 대만 등이며 나라별로 그 목적이 다르지만 잡초방제를 목적으로 하고 있다(한 등 2007). 그러나 우리나라에서는 생분해성 종이 멀칭지를 사용하기 때문에 다소 비싼 관계로 사용이 제한적이다. 그러므로 제조제와 비료를 동시에 줄일 수 있는 헤어리베치 등 녹비작물을 이용한 친환경 작물재배 기술의 개발로 연구방향이 바뀌고 있다.

경운

불시 경운은 유기농업에서 최선의 제조방법으로 활용되고 있다(정 2002). 유기농업에서 잡초방제는 경운에 많이 의존하는 단점이 있지만 각종 형태의 토

Table 2. Amount of weed as affected by tillage methods (Park *et al.* 1996).

Treatment	Annual weeds (D.W. g m ⁻²)				Perennial weeds (D.W. g m ⁻²)		
	AK	EC	AA	BT	LJ	EK	SH
No-tillage	14.2	1.1	10.5	0.2	2.5	0.2	0.2
Tillage	0.1	1.4	0.1	0.3	0.1	0.6	0.4

AK; *Aneilema keisak*, EC; *Echinochloa crus-galli*, AA; *Alopecurus aequalis*, BT; *Bidens tripartita* LJ; *Leersia japonica*, EK; *Eleocharis kuroguwai*, SH; *Schirpus hotarui*.

Fig. 7. Diagram of false seedbed (Johnson and Mullinex 2005).

양 경운은 잡초를 방제하기 위한 수단으로 실행되어 왔다. 경운 방법, 깊이, 시기 및 횟수는 잡초 개체의 구성, 밀도와 장기 지속성에 영향을 끼칠 수도 있으며 (Mohler 1997), 잡초를 방제하거나 관리하는데 경운이 효과적이다(Håkansson 2003). 경운과 무경운에 의한 잡초 발생량 비교는 표 2와 같다. 즉 잡초 발생량은 무경운에서 경운보다 10배 많았으며, 발생 초종은 나도겨풀, 사마귀풀, 뚝새풀이 우점하였다(박 등 1996).

묘상 준비는 작물이 성장하고 있는 상태에서 잡초가 출아하는 개체수를 줄일 수 있으므로 잡초방제의 전통적인 방법인 헛묘상(false seedbed)과 묵힌묘상(stale seedbed) 기법을 활용한다(Johnson과 Mullinex 2005). 헛묘상은 그림 7과 같이 임시묘상으로 잡초 종자가 출아한 다음 잡초를 얇게 재경운하여 잡초를 제거한 후 잡초가 없는 토양에 작물을 파종하여 발아하고 출아하도록 한다(Ligneau와 Watt 1995).

묵힌묘상은 그림 8과 같이 작물을 심거나 이식하기 전 며칠, 몇 주 또는 심지어 몇 달 전에 준비된 묘판으로 정의된다(Johnson과 Mullinex 1995). 즉 묵힌묘상은 작물을 심기 전이나 직후에 출아한 잡초를 열이

Fig. 8. Diagram of stale seedbed (Johnson and Mullinex 2005).

용 제초기로 제거하고 토양의 표층에 있는 종자는 행을 격감시키며 계속적으로 잡초의 출현을 감소시키는 것이 기본원리이다. 이 기법은 유기농업에 적당한 방법으로 인식되어 널리 이용될 수 있다.

윤작

윤작(crop rotation)은 작부체계의 한 부분으로 작물의 시간적 배열을 의미한다. 그리고 윤작과 다른 재배적인 방법이 조합된 잡초방제는 물론 유해물과 병해방제를 돕고 최적 토양비옥도를 부여하는 유기농업 기법의 필수조건이다.

최근까지 잡초방제는 윤작과 다른 경종적 수단이 조합되어 크게 활성화되었다(Lee 1995). 윤작의 형태는 어떤 잡초 종이 다른 것 보다 다소 우위를 보일 수 있을 지라도 작물이 우세할 수 있는 종의 변화와 경종적 방법 변화와 관련된 작물로 최소화되었다. 불리한 조건과 방법을 윤작에 도입하여 특정 잡초종의 생장과 재생산을 활발하게 억제할 수 있다(Karlen 등 1994). 과거에는 감자와 같이 경쟁력이 약한 작물을 파종하기 전년도에 잡초문제를 감소시키기 위하여 사용되었다(Moursi 1955). 그리고 유기농업에서 호밀을 윤작하여 토양에 환원함으로써 잡초의 발생량을 줄이고 종 다양성은 증가시킬 수 있다. 이런 결과는 이 등(2009)이 파 유기재배에서 확인할 수 있다.

피복작물

피복작물(cover crops)은 생체 피복재(living mulch)라고도 부르며 작물은 적어도 생장기의 일부는 동시에 성장한다. 피복작물은 작물의 입모 이전에 일반적으로 고사하게 된다. 피복작물은 경지가 경작하지 않는 노지로 있을 때 토양비옥도를 유지하고 침식을 방지하며 더욱이 잡초생장을 억제하는 이점이 있다.

피복작물의 특성은 선택하는 작물에 따라 의도하는 목적에 따라 다르다. 가을에 파종하는 대부분의 피복작물은 토양에서 질소의 용탈을 방지하고 후작물이 이용할 수 있도록 질산을 흡수하기 위한 것이다. 피복작물이 잡초방제를 위한 급속한 성장과 조밀하게 지면을 피복하는 것은 질산을 흡수하여 비옥도를 유지하고 잡초를 억제한다. 이 등(2009)에 의하면 피

Table 3. Comparison of ground covering capacity of cover crops with different seeding date (Lee *et al.* 2009).

Cover crops	Ground coverage (%)					
	Sep. 20	Sep. 27	Oct. 4	Oct. 11	Oct. 18	Oct. 25
Crimson clover	89.6	87.4	85.3	53.9	39.5	11.9
Alfalfa	94.5	83.6	62.6	46.2	42.7	23.9
Rye	95.6	97.6	88.1	90.8	89.4	90.9
Hairy vetch	100	100	100	100	100	98.7

복작물 중 호밀과 헤어리베치를 전년도 9월부터 10월 중순까지 파종한 후 이듬 해 4월 중순에 지피율을 조사한 결과, 파종시기에 관계없이 우수한 피복율을 보였다(표 3).

피복작물은 상호대립억제작용에 의하여 잡초의 성장을 감소시키기는 일부분 역할을 할 수도 있겠지만 주된 효과는 작물생장에 의한 경합 때문에 잡초를 억제하는 것이다(Grundy 등 1999). 한편 잡초도 자신이 다른 잡초의 성장을 억압할 수 있는 천연 피복작물이다. 멕시코에서는 *Ipomoea tricolor*는 잡초를 억압하기 위해 피복작물로 전통적으로 이용되어 왔다(Anaya 등 1990).

경합

작물은 경합력(competitive ability)이 높아지고, 잡초는 경합력이 낮아지도록 재배관리하는 방법을 말한다. 친환경농업에서의 잡초방제는 작물이 항상 잡초보다 먼저 성장하도록 하는 경작기술을 조합하여 잡초를 방제해야 한다(OACC 2005). 그러나 작물의 전 생육기간 동안 잡초가 없도록 관리할 필요는 없지만 작물이 잡초에 대해 민감한 기간이 다르므로 잡초허용기간과 잡초경합한계기간(critical period for weed competition)을 고려하여 잡초방제를 할 필요가 있다(Dawson 1965).

작물 종자의 활력은 빠른 작물의 입모 형성에 특히 중요하다. 작물의 빠른 생장은 잡초보다 우위를 차지하여 잡초제거의 최적시기에서 융통성을 증가시킬 수 있는 이점이 있다. 곡물재배에서 파종 밀도를 증가시켜서 잡초의 성장을 억제하는 연구결과도 있다(Welsh 등 2002). 기준 이상의 작물 종자 파종량을 증가시키므로써 잡초생장의 억제효과에 관한 연구는 유

기농업재배에서 확인되었다(Samuel과 Guest 1990). 작물을 좁은 간격으로 파종하는 것 그리고 작물 생장과 지피식물의 비율을 증가시키므로써 잡초의 생장이 억제된다고 하였다(Younie와 Taylor 1995).

생물적 방제

생물적 방제라는 용어는 천연 방제제의 신중한 적용으로 한정되어 있고 잡초에 대한 토종 천연 생물방제제의 사용을 권장할 가능성은 있지만 천적의 도입으로 인한 방제대상 이외의 생물이 멸종된 예와 공진화(coevolution) 같은 과거의 경험은 생물적 잡초방제의 적용에 어려움이 있다.

미생물 제초제에 의한 생물적 방제

곰팡이 병원체는 잡초의 고전적 생물학적 방제를 위해 가능성 있는 미생물 집단으로 가장 보편적인 미생물제제(mycoherbicide)는 표 4와 같다. 즉 병원균류를 배양한 Collogo는 자귀풀, Luboa2는 새삼, 점무늬 병원균류를 배양한 ABG 5003은 부레옥잠, Biomal은 둥근잎아욱, 역병균류를 배양한 Devine은 둥근잎아욱, 잎마름병원균류를 배양한 Casst는 결명자 방제용으로 실용화되었다.

미생물제초제로 알려져 있는 이들 유기체는 천연적 풍토성 병원체가 잡초의 특정한 생장단계에서 접종물을 다량 감염시켜 그 잡초 숙주를 완전하게 고사시킬 수 있다는 점 때문에 곰팡이를 이용하게 되었다. Bialaphos는 방선균인 *Streptomyces viridochromogenes* 과 *S. hygroscopicus*의 배양액으로 부터 분리한 tripeptide 물질인 phosphinothricin로 구성되었으며, 합

Table 4. Most popularly used mycoherbicides.

Mycoherbicide	Trade name	Country	Controlled weed
<i>Colletotrichum gloeosporoides</i>	Collego	USA	<i>Aeschynomene</i> sp. (자귀풀)
<i>Colletotrichum gloeosporoides</i>	Luboa2	China	<i>Cuscuta</i> spp. (새삼)
<i>Cercospora rodmanii</i>	ABG 5003	USA	<i>Eichhornia crassipes</i> (부레옥잠)
<i>Cercospora gloeosporoides</i>	Biomal	USA	<i>Malva pusilla</i> (둥근잎아욱)
<i>Phytophthora palmivora</i>	Devine	USA	<i>Malva pusilla</i> (둥근잎아욱)
<i>Alternaria cassiae</i>	Caset	USA	<i>Cassia obustifolia</i> (결명자)

Fig. 9. Structure of microbial phytotoxin, bialaphos.

성 phosphinotricin은 비선택성 제초제인 glufosinate로 개발되어 사용되고 있다(그림 9). Tentoxin은 *Alternaria* 균으로부터 생성된 물질로 여러 잡초에서 황백화현상을 일으켜 잡초를 방제한다.

생물제초제(bioherbicide) 생산의 중요한 문제는 과학적 지식, 제조와 발효 기술 그리고 생산과 판매이다. 과학적 지식은 약제의 효능을 개선하기 위해 필요하며 면역학에 집중되어 있는 것이 문제이다. 제조와 발효기술에서는 지식재산권 문제가 종종 일어나고 있다. 따라서 생물제초제 연구를 선도하는 방법은 생물제초제의 발견, 개발 그리고 기업화의 배경을 가진 과학자와 사업자들이 많은 프로젝트에 협조하고 노력하는 연구 중심 또는 컨소시엄의 구성이 중요하다(Ash 2010). 그러나 미국과 캐나다에서 등록된 생물제초제 5종 모두 농약 개발과 관련이 없는 소기업 또는 자회사에 의해 개발되고 등록되었다.

대량증식 생물적 방제

생물적 방제의 대량증식 방법(inundative biological control)은 표적 잡초를 방제할 필요가 있는 지역 또는 노지에 생물방제제의 대량 배양과 방사를 하는 것이다. 토착의 유기체를 사용할 수 있으면 유리하나 숙주 특이성과 동일한 필요조건이 되어야 한다(Weidemann와 Tebeest 1990). 몇몇 제제, 특히 식물병원체인 진균제초제는 전통적인 제초제와 같은 방법

으로 살포할 수 있다. Wall(1995)은 생물제초제의 개발 역사와 미래 전망한 결과 진균제초제는 많은 성공 가능성이 있는 것으로 전망하였으나 생물 물질의 배양, 저장, 그리고 사용 문제를 극복하는데 많은 기술적인 어려움이 수반된다고 하였다. Munyaradzi 등(1990)은 영국에서 진균제초제의 제제화로 고사리 방제에 대한 가능성을 확인하였다. 진균제초제의 개발 성공은 개인, 공공과 민간부문간의 협력에 달려 있으며(Templeton 1988), 이들 상품의 실질적인 성공은 많지 않다(Bannon 1988; Greaves와 Maqueen 1990).

곤충을 이용한 생물학적방제 연구도 국내외적으로 많이 연구되었다. 1987년 소백산, 지리산, 와룡산, 경남 각지에서 잎벌레류와 메뚜기류가 잡초방제의 중요한 생물인자임을 밝혔다(추 등 1988). Palmer 등(2010)에 의하면 호주에서는 1996년부터 현재까지 호주에서 발생하는 돼지풀아재비, 나도곤단풀, 흰털박하 등 22종 잡초에 유효한 녹병균, 녹병곰팡이, 자나방류 등 43종의 생물방제제를 개발하여 이용하거나 등록시험 중에 있다고 보고하였다.

광역 생물적 방제

광역 생물적 방제(broad-spectrum biological control)의 가장 오래된 사례는 오리, 거위 등의 동물과 참게, 초어 등 자생물고기, 왕우렁이 등의 사용방법에서 찾아 볼 수 있다.

오리농법

오리는 잎이 부드럽고 둥글며 다육질인 잡초를 좋

아하여 유기농업의 논 잡초 방제를 위해 이용하는 것이다. 오리가 활동하게 되면 지나가는 자리에 꼴이 형성되고 벼 포기에는 미약하지만 약간의 복토가 되어 대부분이 햇볕을 받아 발아하는 잡초의 발아조건이 불량하게 되어 잡초 발생을 억제한다. 그러나 오리는 잎이 길쭉하거나 거칠면 잘 먹지 않아 피 등은 인력 제초가 필요하며 물이 낮거나 없는 곳은 잘 가지 않아 제초 효과가 떨어진다고(전남농업기술원 2005). 그러나 2008년도부터 조류독감의 확산으로 오리농법이 제한되어 최근에는 거의 이용되지 않고 있다.

참게농법

매운탕 재료로 잘 알려진 참게는 잡식성으로 닥치는 대로 해충뿐만 아니라 잡초를 먹으면서 왕성한 야간활동을 하여 토양을 뒤집어주는 등 오리농법과 비슷한 효과 있는 것으로 알려져 있다.

참게농법의 단점으로는 참게는 서로 싸워 먹이를 빼앗으며 상처를 입거나 탈피 직후의 연약한 참게를 골라 집중 공격하여 죽인다는 것이다. 또 탈피 후에는 5~10% 이상의 참게가 성장하지 못한다는 것이다. 그러나 수원이 풍부하고 수질 오염원이 적고 관배수가 편리한 지역과 염도 2% 이하, pH 7.5~8.5, 용존산소가 풍부한 물에서는 모두 효과가 있어 참게양식의 일환으로 참게농법을 이용할 수도 있다(전남농업기술원 2005).

왕우렁이 농법

왕우렁이(golden apple snail) 농법은 2008년도부터 조류독감의 전국적인 발생으로 오리농법의 사용을 자제하는 대신에 이를 대체할 농법으로 왕우렁이 농법이 권장됨으로써 증가하여 왔으나 왕우렁이가 '생태계 위해성 2등급'으로 분류되어 생태계에 대한 부정적 영향이 높아 왕우렁이 사용의 확대는 여러 가지 측면에서 고려하여야 할 것이다(서 2009). 그러나 왕우렁이는 수면 아래 잡초 등을 왕성히 섭취하여 놀라운 잡초방제효과를 보여 가장 널리 사용되고 있는 방법 중의 하나이다. 왕우렁이 치패는 썬레질 작업 직후 흙탕물 상태에서 살포하므로 잡초가 발아되기 전부터 활동하기 시작하기 때문에 잡초발생 초기부터

섭식이 가능하다.

왕우렁이의 방사시기에 따른 논잡초 발생 경감효과는 이앙 후 1주일 방사가 98%로서 이앙 후 14일과 이앙 후 21일에 비해 제초효과가 높았다. 방사량은 5~8kg 10a⁻¹에서 잡초방제효과가 인정되었으며 잡초가 물위로 출엽하거나 수면과 비슷한 경우보다 잡초가 물속에 완전히 잠겼을 때 100% 잡초가 방제되었다. 또 잡초종류별 섭식순서는 포복형이면서 거의 물속에 잠겨 있는 올미, 올방개, 너도방사니, 가래, 벼풀 같은 다년생 잡초를 먼저 섭식하고, 그 다음으로 발췌외풀, 물옥잠, 마디꽃, 여뀌 같은 일년생잡초를 섭식하는 것으로 나타났다(정 등 1999). 친환경재배지에서 잡초방제효과, 벼 피해율, 왕우렁이 비용 등을 고려할 때 왕우렁이 치패를 1g 10a⁻¹ (2,000개) 썬레질 직후에 투입하는 것이 가장 적합하다고 하였다(권 등 2010b).

썰겨농법

썰겨에 함유된 아브시스산(abscisic acid, ABA) 물질이 종자의 휴면을 유도해 발아를 억제시키는 작용을 이용함과 동시에 썰겨가 썩으면서 발효되는 과정에서 주위의 산소를 빼앗아 토양을 환원상태로 만들어 잡초발생을 억제시킨다(안 등 2010).

기존 썰겨농법기술을 보완하기 위해 안 등(2010)은 썰겨와 대두박을 혼합하는 시험을 실시하였다. 그 결과 썰겨 관행구에서 잡초억제율이 높아 대두박을 썰겨와 같이 투입하는 것은 부적절한 반면에 중경제초를 병행하면서 썰겨 또는 대두박 시용의 경우는 관행에 비해 잡초방제효과가 높았다고 하였다.

한편 썰겨, EM당밀, 왕우렁이, 종이멸칭, 기계제초 등과 같은 유기자원 처리에 따른 초종별 방제효과를 조사한 결과, 왕우렁이에 의한 방제효과가 가장 우수하였으며 종이멸칭 및 기계제초는 유사하였으나 썰겨 및 EM당밀 처리에서는 살포량에 따라 잡초방제효과가 다르다고 하였다. 일반적으로 유기자원처리에 의한 잡초방제 효과는 왕우렁이 97~100% > 종이멸칭 93~98% > 기계제초 73~75% > 썰겨 15~80% > 당밀 7~31% 순이었다(권 등 2010a).

상호대립억제작용

생물적 방제의 확대 인식 속에 상호대립억제작용(allelopathy)은 생물적 방제의 한 요소로 간주되었다. 상호대립억제작용은 인접 식물의 발아, 성장, 또는 발달에 대한 한 식물의 직접 또는 간접적인 화학적 효과를 말하며, 성장하고 있는 식물 또는 잔류물에 의해 상호대립억제 물질(allelochemical)의 방출을 통해서 효과를 나타낸다. 상호대립억제물질의 대부분은 2차 대사산물, 테펜화합물(terpenoids), 페놀화합물과 지방산을 가지고 있다(Putnam 1988).

상호대립억제물질은 발아하는 종자 주위의 점액질, 식물의 지상부 또는 식물뿌리에서 분비 배출되는 휘발성 물질과 부속하는 식물잔류물에 있을 것으로 추정된다. 종자발아와 식물 추출물 그리고 침출물에서의 상호대립억제 효과에 대한 생화학적 연구가 많이 이루어 졌다(황 등 1999; 김 등 2003; 김과 백 2003; 천과 김 2007).

유우칼리나무에서 추출한 유우칼리오일에 함유된 테펜화합물 1,8-cineole로부터 얻은 1,8-cineole 유도체인 cinmethylin은 제초제로 개발되어 농가에서 사용되고 있다(그림 10). 한편 sorgoleone은 수수 뿌리의 근모에서 생성되는 benzoquinone물질은 광엽잡초에 효과는 큰 반면에 화본과잡초에는 효과가 다소 낮은 경향이다(Einheillig와 Souza 1992; Uddin 등 2010). 그러나 sorgoleone을 생물제초제로 실용화하려면 대량생산방법이 선행되어야 한다. Yang 등 (2004)이 SOR1유전자를 도입하여 sorgoleone함량을

1000배로 증대할 수 있다는 연구결과는 실용화 가능성을 높일 것으로 전망된다.

종합적 잡초관리

많은 선진국에서는 향후 농작물의 생산 및 관리를 정밀하게 국토환경을 보존하는 친환경농업을 영위하고자 지속적, 영속적인 고품질 안전수량성을 유지하는 지속적 농업(sustainable agriculture)을 목표로 설정하고 있다. 한편 잡초방제기술은 많은 경우 제초제에 의한 화학적 방제법에 의존하였으나 제초제의 연용으로 저항성잡초의 증가 등의 부작용이 있다. 따라서 제초제 사용량을 줄이기 위한 종합적 잡초관리(integrated weed management, IWM) 기술체제로 전환하여 수량 안정성, 환경생태계 보전, 고품질 안전농산물 생산 및 보급으로 전략을 추진할 필요가 있다.

종합적 잡초관리 기술은 그림 11에서와 같이 예방적 방제법, 인력 및 농기계를 이용한 물리적 방제법, 경종적 방제법, 화학적 방제법, 생물적 방제법 등을 조화롭게 병행하여 이용하는 것을 말한다(Gill 등 1997). 종합적 잡초관리는 한 종류의 잡초 방제법을 선택하지 않고 환경에 악영향을 주지 않으면서 반복적으로 실행할 수 있는 모든 방법을 총동원하는 것으로 둘 또는 그 이상의 방법을 포함하는 종합적인 시도로서 문제점을 관리하는데 가장 바람직하다(Buhler 2002).

Fig. 10. Structures of plant-derived phytotoxins.

Fig. 11. System of integrated weed management, IWM (Gill *et al.* 1997).

유기농 재배가 보편화되면서 물리적, 경종적, 생물적 방법이 결합된 종합적 잡초관리 개념이 다시 관심을 갖게 되었다. 유기농 재배에서 잡초종합방제는 예방적 방제법, 기계적 방제법, 경종적 방제법 및 생물적 방법을 포함한 모든 이용 가능한 잡초방제방법을 조화롭게 동원하는 것이 최선의 방법이다. 왜냐하면 유기농 재배에서 각 방제법의 어느 것도 독자적으로 만족할 만한 잡초방제를 한다고 할 수 없기 때문이다. 따라서 유기농 재배에서는 많은 잡초방제방법을 종합하여 잡초를 관리하는 프로그램을 실행할 때에만 성공할 수 있다.

종합적 잡초관리체계는 농가포장의 잡초발생 정도를 고려하여 예방적 방제법, 기계적 방제법, 멀칭, 경운방법(헛묘상, 묵힌묘상 개념), 윤작, 경합력 품종, 재식밀도, 파종량, 시비법, 피복작물 포함한 경종적 방제법과 생물적 방제법 등을 고려하여 종합적으로 다양하게 적용하여 작물의 수량을 높이고 잡초의 피해를 최소화할 수 있는 관리체계로 발전시켜야 할 것이다.

전 망

우리나라에서 유기농업 재배면적은 매년 증가되고 있는 추세이며, 유기농 재배에서 제초제를 사용하지 않는 비화학적인 잡초방제는 제초제를 사용한 방법에 비하여 매우 불편하고 노동력과 비용이 많이 소요되므로 경제적인 면에서도 어려움이 많은 실정이다.

따라서 유기농 재배에서 손쉽게 중경, 경운을 통하여 잡초를 물리적으로 방제할 필요성이 요구되므로 필요한 간편한 제초용 농기구와 농기계를 개발되어 이용되기를 기대한다. 그리고 멀칭, 피복작물, 헛묘상과 묵힌묘상 개념을 이용한 잡초방제, 윤작, 작물의 경합력을 높이는 생태적(경종적) 잡초방제법, 미생물 제초제, 왕우렁이, 참게, 찔거치리를 이용한 생물적 잡초방제 실용화, 그리고 상호대립억제물질의 대량생산과 유전자 조작에 의한 제초활성물질의 활성증대 연구를 통하여 실용적으로 사용이 가능한 생물제초제를 개발하여 유기농업에서 잡초방제에 활용될 수

있기를 기대한다. 그리고 종합적 잡초관리 개념에 입각하여 개발될 농기구와 농기계를 이용한 물리적 방제법을 기반으로 하여 경종적, 생태적 방제법과 앞으로 실용화하게 될 생물제초제를 포함한 생물적 방제를 서로 조합하여 유기농 재배농가의 여건에 맞게 적용하여 친환경적으로 제초하는 방법이 보편화될 수 있기를 전망한다. 앞으로 유기농업의 수요와 대중화 때문에 잡초방제학 연구도 영역을 넓혀 잡초관리 결정에 도움이 되는 모델의 개발을 비롯한 여러 잡초관리기술을 좀 더 주의깊게 고려하여 유기농업을 위한 잡초관리방안을 강구할 필요가 있다.

요 약

유기농 재배에서 이용되고 있는 잡초방제 기술 및 연구 동향을 검토하고 앞으로 방향을 제시하기 위하여 화학적 방제를 배제하고 기계적 방제, 경종적 방제, 생물적 방제를 포함한 종합방제 기술에 대한 문헌을 정리하고 분석하여 유기농업에서의 새로운 잡초관리방안을 전망하고자 하였다. 물리적 방법은 기계적 방법, 열, 광선, 전기충격, 압축공기, 로봇잡초방제 기술, 그리고 경종적 방법은 멀칭, 경운, 윤작, 피복작물, 경합을 이용한 방법이 포함된다. 생물적 방제는 미생물제초제, 대량증식 생물제제, 광역 생물제제, 상호대립억제물질 등이 개발되거나 또는 이용되고 있다. 유기농재배에서 성공적인 잡초방제를 위하여 물리적 방법과 경종적 방법은 제초제 사용이 제한된 조건에서 가장 중요한 잡초방제 수단이므로 기계적, 경종적 방법을 근간으로 하고 생물적 방법이 조화롭게 보완되는 종합잡초관리방법이 요구된다. 그리고 유기농 재배에서 수익을 창출하고 적합한 장기적 잡초관리 방안을 도출하기 위하여 잡초관리 결정에 도움이 되는 모델의 개발도 필요하다.

감사의 글

이 논문은 한국과학기술정보연구원(KISTI)이 수행

하고 있는 교육과학 기술부의 과학기술 진흥기금 및 복권기금 출연사업인 “고경력과학기술인을 활용한 지원사업(Reseat Program 2010)의 일부이다.

인 용 문 헌

- 강화석. 1997. 더덕 및 참취 포장에서의 물리적인 방법을 이용한 잡초방제 I. 더덕 및 참 취 포장에서의 주요잡초 분포양상 및 잡초종자발아에 미치는 황산 및 열처리효과. 한국자원식물학회지 10(2): 169-174.
- 강화석, 문학수. 2001. 화염을 이용한 잡초방제연구. 한국농업기계학회 26(4):331-336.
- 강화석, 유창연, 강위수, 이귀현, 오재현. 1996a. 물리적인 방법을 이용한 잡초 및 병해충 방제 방법의 개발- 적외선 조사가 잡초종자의 발아율에 미치는 영향. 한국환경농학회지 15(1):86-90.
- 강화석, 유창연, 신현동, 강위수, 오재현. 1996b. 물리적인 방법을 이용한 잡초 및 병해충 방제 방법의 개발(1) - 적외선 조사에 의한 사양토의 가열 효과. 한국환경농학회지 15(1):91-104.
- 권오도, 박홍규, 안규남, 이인, 신서호, 신길호, 신해룡, 국용인. 2010a. 벼 친환경재배에서 다양한 유기자원별 잡초방제효과. 한국잡초학회지 30(3): 274-281.
- 권오도, 박홍규, 안규남, 이인, 신서호, 신길호, 신해룡, 국용인. 2010b. 벼 친환경에서 왕우렁이의 잡초방제효과 및 피해. 한국잡초학회지 30(3):282-290.
- 김건우, 백정규. 2003. 산초나무 열매로부터 제초활성물질의 분리 및 동정. 한국자원식물학회 2003년도 제10차 국제학술회의 및 추계정기 학술발표회 p. 58.
- 김기복. 2002. 마이크로파 비파괴 계측기술을 이용한 곡류의 유전율 측정. 비파괴검사학회지 22(4): 369-376.
- 김성문, 성주리, 김진현. 2003. 헛개나무 열수 추출물의 알코올 분해 및 간 보호 효과. 한국생물공학회 2003년도 생물공학의 동향(XII). 한국생물공학회 학술대회논문집 pp. 605-608.
- 박홍규, 김상수, 백남현, 석순중, 박건호, 이선용. 1996. 벼 무경운 재배시 재배양식에 따른 생육 및 수량. 한국작물학회지 41(4):420-428.
- 서영호, 문윤기, 최준근, 강안석. 2009. 쌀겨 펠렛을 이용한 친환경 논 잡초 방제. 한국환경농학회지 28(2):139-145.
- 안승현, 김선, 임일빈, 문윤희, 차영록, 박선태, 구본철, 서세정. 2010. 쌀겨이용 잡초관리시 대두박 혼합 및 중경제초기 병용효과. 한국잡초학회지 30(3):288-271.
- 이지현, 심상인, 강충길, 지형진, 이현복, 이병모. 2009. 파종 시기에 따른 피복작물의 월동 후 생존과 생장 변화. 한국작물학회지 54(2):218-224.
- 임창호. 2004. 세계 무인기. 산업동향항공우주산업기술동향 2(1):25-35.
- 전라남도농업기술원. 2005. 친환경 벼 재배매뉴얼. pp. 32-53.
- 정순재, 박홍식, 오주성, 최봉출, 최성관. 1999. 왕우렁이(*Ampullarius insularus*)의 섭생·생태 및 논잡초 방제효과에 관한 연구. 한국유기농업학회지 7(2):69-177.
- 정진영. 2002. 유기 벼 재배 기본규약의 기준. 한국유기농업학회지 10(4):1-7.
- 천상욱, 김영민. 2007. 생분해성 광활성 물질 5-aminolevulinic acid의 제초활성. 한국농약과학회지 11(1):38-45.
- 추호렬, 우건석, 이영인, 문수. 1988. 남부지방의 잡초 천적 곤충 조사. 한국응용곤충학회지 27(1):47-54.
- 한희석, 박정화, 윤경환, 최돈향, 양원하, 전원태, 양선목, 박종욱. 2007. 벼 종이멀칭 기계이앙 재배 기술. 작물과학연구논총 8:1095-1099.
- 황동용, 박성태, 김상열, 최해춘, 김순철. 1999. 벼 씨레질 동시 골직파재배의 안정성 및 경제성. 한국작물학회 1999년도 춘계학술대회지. pp. 86-87.
- 황동용, 박성태, 김호영, 문헌팔, 최해춘. 2000. 벼 씨레질 동시 골직파시 논군힘 및 파종 후 답수일수

- 에 따른 입모 및 벼 생육 영향. 한국작물학회 2000년도 춘계 학술대회지. pp. 230-231.
- 황인택, 최정섭, 고영관, 최용석, 김만호, 김대황, 조광연. 1999. 신규 benzenesulfonylurea계 화합물 KSC-13906의 제초활성. 한국농약과학회지 3(1): 1-12
- Anaya, A., M. R. Calera, R. Mata and M. Pereda. 1990. Allelopathic potential of compounds isolated from *Ipomoea tricolor* Cav. (*Convolvulaceae*). Journal of Chemical Ecology 16(7):2145-2152.
- Ash, G. J. 2010. The science, art and business of successful bioherbicides. Biological Control 52:230-40.
- Bannon, J. S. 1988. Casst herbicide (*Alternaria cassiae*): A case history of a mycoherbicide. American Journal of Alternative Agriculture 3:73-76.
- Bond, W., R. J. Turner and A. C. Grundy. 2003. A review of non-chemical weed management. [http : //www.organicweeds.org.uk](http://www.organicweeds.org.uk).
- Buhler, D. D. 2002. Challenges and opportunities for integrated weed management. Weed Science 50:273-280.
- Chancellor, R., J. D. Fryer and G. W. Cussans. 1984. The effects of agricultural practices on weeds in arable land. Proceedings of ITE Symposium No. 13, Agriculture and the environment, Monks Wood Experimental Station. pp. 89-94.
- Dawson, O. H. 1965. Competition between irrigated sugar beets and annual weeds. Weeds 13: 245-249.
- Diprose, M. F., F. A. Benson and A. J. Willis. 1984. The effect of externally applied electrostatic fields, microwave radiation and electric currents on plants and other organisms with special reference to weed control. The Botanical Review 50(2):171-223.
- Enheillig, F. A., and I. F. Souza. 1992. Phytotoxicity of sorgoleone found in grain sorghum root exudates. Journal of Chemical Ecology. 18: 1-11.
- Gill, K. S., M. A. Arshad and J. R. Moyer. 1997. Cultural control of weeds. pp. 343-345 in D. Pimental, ed. Techniques for Reducing Pesticide Use. Willey, New York.
- Greaves, M. P., and M. D. Maqueen. 1990. The use of mycoherbicides in the field. pp. 163-168 in Aspects of Applied Biology 24, The exploitation of micro-organisms in applied biology.
- Grundy, A. C., W. Bond, S. Burston and L. Jackson. 1999. Weed suppression by crops. in Proceedings 1999 Brighton Conference, Weeds, Brighton, UK, pp. 957-962.
- Håkansson, S. 2003. Weeds and weed management on arable land. An ecological approach. CABI Publishing, Cambridge, UK. pp. XIV+274.
- Johnson, W. C., and B. G. Mullinix. 1995. Weed management in peanut using stale seedbed techniques. Weed Science 43:293-297.
- Karlen, D. L., G. E. Varvel, D. G. Bullock and R. M. Cruse. 1994. Crop rotations for the 21st century. Advances in Agronomy 53:1-45.
- Katan, J, A. Greenberger, H. Alon and G. Grinstein. 1976. Solar heating by polyethylene mulching for the control diseases caused by soil-borne pathogens. Phytopathology 66:683-688.
- Lawrence, M. J., D. R. Buckmaster and W. J. Lamont. 2007. A pneumatic dibbling machine for plastic mulch. Applied Engineering in Agriculture 23(4):419-424.
- Lee, H. C. 1995. Non-chemical weed control in cereals. Proceedings Brighton Crop Protection Conference-Weeds, Brighton, UK. 1161-1170.
- Ligneau, L. A. M., and T. A. Watt. 1995. The effects of domestic compost upon the germination and emergence of barley and six arable

- weeds. *Annals of Applied Biology* 126:153-162.
- Mahmoodi, S., and A. Rahimi. 2009. The critical period of weed control in corn in Birjand region. *International Journal of Plant Production* 3(2): 91-96.
- Majek, B. A., and P. E. Neary. 1991. Selective wavelength transmitting mulch for yellow nutsedge control. *Proceedings Brighton Crop Protection Conference-Weeds*, Brighton, UK. pp. 263-268.
- Mathiassen, S. K., T. Bak., S. Christensen and P. Kudsk. 2006. The effect of laser treatment as a weed control method. *Biosystems Engineering* 95(4):497-505.
- Mohler, C. L., and A. E. Galford. 1997. Weed seedling emergence and seed survival : Separating the effects of seed position and soil modification by tillage. *Weed Research* 37:147-155.
- Moursi, M. A. 1955. Effect of intensity, and width of inter-row tillage on the yield of the potato crop. *American Potato Journal* 32:211-214.
- Munyaradzi, S. T., M. Campbell and M. N. Burge. 1990. The exploitation of micro-organisms in applied biology. *Aspects of Applied Biology* 24, pp. 169-175.
- OSHSB. 1998. Proposed State Standard, 3456. Hand-Held Tools. [http : //www.dir.ca.gov/oshsb/handweeding15daynotice.pdf](http://www.dir.ca.gov/oshsb/handweeding15daynotice.pdf).
[http : //www.weedtwister.com/clk=ergpurch](http://www.weedtwister.com/clk=ergpurch).
- Organic Agriculture Centre of Canada (OACC). 2005. Weed control in organic vegetable cultivation OACC/FiBL Technical Guide.
- Palmer, W. A., T. A. Heard and A.W. Sheppard. 2010. A review of Australian classical biological control of weeds programs and research activities over the past 12 years. *Biological Control* 52: 271-287.
- Putnam, A. R. 1988. Allelochemicals from plants as herbicides. *Weed Technology* 2:510-518.
- Rasmussen, J. 1994. Mechanical weed control in cereals-a part of the future plant production. *Annual Report for 1993*, Danish Institute of Plant & Soil Science, Tjele, Denmark, pp. 58-61.
- Rasmussen, J., A. Nemming and J. Vester. 1989. Types of harrows and strategies for weed reduction by harrowing in spring crops. 6. *Danske Plantevaernskonference, Ukrudt*, Denmark, pp. 144-157.
- Rydberg, T. 1994. Weed harrowing - the influence of driving speed and driving direction on degree of soil covering and the growth of weed and crop plants. *Biological Agriculture and Horticulture* 10:197-205.
- Samuel, A. M., and S. J. Guest. 1990. Effects of seed rates and within crop cultivations in organic winter wheat. *BCPC-Monograph* 45. Crop protection in organic and low input agriculture. pp. 49-54.
- Slaughter, D. C., D. K. Giles and D. Downey. 2008. Autonomous robotic weed control systems : A review, *University of Computers and Electronics in Agriculture* 61:63-78.
- Templeton, G. E. 1988. Biological control of weeds. *American Journal of Alternative Agriculture*. 3(2):69-72.
- Uddin, M. R., Y. K. Kim, S. U. Park and J. Y. Pyon. 2009. Herbicidal activity of sorgoleone and its contents among sorghum cultivars. *Korean J. of Weed Science* 29:229-236.
- Vigneault C, Benoit D., and L. McLaughlin. 1990. Energy aspects of weed electrocution. *Reviews of Weed Science* 5:15-26.
- Wall, R E. 1995. Bioherbicides-promise and prospects. *Pesticide Outlook* 8(4):29-32.
- Weidemann, G. J., and D. O. Tebeest. 1990. Biology of host range testing for biocontrol of weeds. *Weed Technology* 4:465-70.

-
- Welsh, J. P., N. Tillett, M. Home and J. A. King. 2002. Inter-row hoeing and its associated agronomy in organic cereal and pulse crops-A review of knowledge. DEFRA Project Report (OF 0312).
- Yang, X., B. E. Scheffler and L. A. Weston. 2004. SOR1, a gene associated with bioherbicide production in sorghum root hairs. *Journal of Experimental Botany* 55:2251-2259.
- Younie, D., and B. R. Taylor. 1995. Maximizing crop competition to minimize weeds. New Farmer & Grower, Soil Association, Bristol, UK.(Winter 1995). pp. 18-24.