

작부체계에 따른 잡초관리 연구 동향과 방향

이지현¹ · 신명나² · 구분일³ · 심강보⁴ · 전원태^{4,†}

Current Status and Direction of Weed Management According to Cropping Systems

Jihyun Lee¹, Myeong-Na Shin², Bon-Il Ku³, Kang-Bo Shim⁴, and Weon-Tai Jeon^{4,†}

ABSTRACT The present study was conducted to propose future research directions for weed management by examining the current trends of research on weed occurrence according to cropping systems. The cropping systems are developed for the efficient use of arable land, and the weed flora changes according to the management practices of a given cropping system. In particular, weed occurrence can be reduced by altering the soil environment. In addition, cultivation methods, such as tillage, affect the weed seed bank in the soil, thus altering the pattern of weed occurrence. Here, we propose three weed management practices according to the cropping system. First, it is necessary to develop a model that can classify weed species by analyzing young seedlings and can predict the flora in the field. Second, it is important to manage the cropping system history and establish a database of agricultural information, which can be linked to meteorological and geographic data. Third, it is critical to estimate the weed occurrence and soil seed bank dynamics, based on which a cropping system platform and digitalization technology can be developed. In the future, the prediction of weed occurrence and control according to the cropping system will contribute to sustainable agriculture by reducing the use of herbicides and solving the problems of resistant weeds.

Keywords : cropping system, prediction, soil seed bank, weed

우리나라의 경지면적은 2019년 기준 158만 천 ha로 1975년 224만 ha보다 65만 9천 ha (29.4%)가 줄었다(Statistics Korea, 2020). 이 중 논 면적이 44만 7천 ha, 밭 면적은 21만 2천 ha 감소하여 쌀을 생산하는 논 면적의 감소율이 높았다. 경지면적 감소 추세는 계속되어지고 있으며, 경지이용률 또한 1975년 140.4%에서 2019년에는 107.2%로 44년만에 33.2%가 감소되었다(Statistics Korea, 2020). 경지면적 감소와 경지이용률 하락은 식량자급률 감소로 이어지며 농업의 가장 큰 역할 중의 하나인 식량 안보 확보가 위협받을 가능성이 큼을 말해주고 있다. 최근 KREI (2021)이 발표한 자료에 따르면 2019년 기준으로 우리나라의 식량자급률은 45.8%, 곡물자급률은 21.8%를 기록했다. 주요 곡물 중 자급률이 92.1%인 쌀을 제외하고, 밀, 옥수수, 콩의 자급률이 각각 0.7, 3.5, 26.7%로 국제 곡물 수급 상황에 영향을 많이 받는 편이다.

따라서 전 세계적인 이상기후와 더불어 코로나 19 팬데믹 사태가 지속할 경우 국제사회의 식량 위기 상황에 대비할 지속가능한 작부체계 연구가 필요한 실정이다.

작부체계(作付體系; cropping system)란 일정한 포장에서 몇 종류의 작물을 해마다 바꾸어 윤작·다모작·자유작 등의 형태로 재배하거나 또는 같은 해에 여러 작물을 조합·배열하여 함께 간작·혼작·교호작·주위작 등의 형태로 재배 하는 방식을 말하며, 제한된 경지를 효율적으로 이용하기 위해 발달하였다(Chae *et al.*, 2006). 우리나라는 몬순(monsoon)의 영향으로 여름에 벼를 재배하고, 겨울철에는 보리를 생산하는 이모작이 발달 되어왔다. 1980년대 이후 통일벼 개발 이후 다수확 품종과 관련 재배기술이 개발되면서 주곡의 자급을 달성하였다. 그 후 국민 생활 수준이 높아짐에 따라 벼·채소작물 등 좀 더 다양한 작부체계가 개발 보급되

¹농촌진흥청 국립식량과학원 전문연구원 (Post-doc, Department of Central Area Crop Science, NICS, RDA, Suwon 16429, Korea)

²농촌진흥청 국립식량과학원 연구사 (Researcher, Department of Central Area Crop Science, NICS, RDA, Suwon 16429, Korea)

³농촌진흥청 국립식량과학원 연구사 (Researcher, Cheolwon Branch, NICS, RDA, Cheorwon-gun, 24010, Korea)

⁴농촌진흥청 국립식량과학원 연구관 (Senior Researcher, Department of Central Area Crop Science, NICS, RDA, Suwon 16429, Korea)

†Corresponding author: Weon-Tai Jeon; (Phone) +82-31-695-4005; (E-mail) jeon0tai@korea.kr

<Received 5 August, 2021; Revised 15 September, 2021; Accepted 16 September, 2021>

었다. 그리고 1999년 이후 정부에서는 쌀 생산량 조절을 위한 노력을 경주하기 시작했고, 2019년 이후 ‘논 타작물 재배 지원 사업’으로 지원금을 지급하고 있다. 다른 측면으로는 1997년 친환경농업육성법이 제정 등으로 유기농업에 대한 관심이 사회적, 기술적으로 높아졌다. 농약, 비료와 같은 화학제품의 사용을 줄이고 피복작물(뜻거름작물) 활용한 윤작으로 잡초·병해충 방제 및 양분관리를 하는 작부체계 연구가 다소 수행되었다(Lee *et al.*, 2012; Seo & Lee, 1998).

잡초관리의 개념은 작물의 경제적 피해 수준을 근거로 하여 판단으로 하고 있어 잡초와 작물의 생리·생태적 특성 차이를 이해하고 잡초에는 경합력이 저하되도록 유도하는 대신 작물에는 경합력이 높아지도록 재배관리하는 것이 중요하다.

전 세계적으로 잡초를 방제하기 위하여 주로 제초제를 사용하고 있으며 사용되는 제초제의 판매량이 병해충 방제를 위해 사용되는 살충제나 살균제보다 월등히 높다는 것은(Atwood & Paisley-Jones, 2017) 잡초로 인해 농민에게 부담되는 노동력과 비용이 크다는 증거이다. 또한 제초제 저항성 잡초의 출현 등 생태환경적 문제를 유발하고 있는 실정이다. 이미 전 세계적으로 제초제 저항성 잡초는 263종(쌍자엽 152개, 단자엽 111개)이라고 보고되어지며(Heap, 2021), 우리나라에서는 14종의 논 잡초가 제초제 저항성으로 알려져 있다. 제초제 저항성 잡초는 초종이 늘어나고 있을 뿐 아니라 발생하는 면적이 지속적으로 증가에 대한 대책이 필요한 실정이다. 피복작물을 이용한 윤작은 농가 수익을 보전하는 이유 보다 친환경·생태적 재배체계를 위한 토양 유기물 공급이나 잡초방제 목적으로 도입되는 경우가 많다(Boydston & Hang, 1995; Elfstrand *et al.*, 2007). 그러나 작부체계 상 후작으로 작물이 재배 될 시 전작물의 종이나 관리 방법에 따른 잡초 발생 양상이 다름에도 불구하고 후작물 재배 시 잡초관리에 대한 연구가 미미한 현실이다.

따라서 이상적인 작부체계의 활용은 작물의 지속적 생산을 위한 생산 환경의 긍정적 변화 유도를 통한 잡초관리는 물론 토양 환경과 병해충 관리 등 농업생태계의 다양성과 건전성을 제고하는 역할을 할 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구는 작부체계에 따른 잡초 발생과 관련된 국내·외의 연구 동향을 고찰함으로써 향후 디지털 시대에 첨단 과학기술을 접목하여 잡초관리의 연구 방향 설정을 위한 기초자료로 제시하고자 한다.

윤작 작부체계 시 잡초 발생 양상

윤작은 오래전부터 잡초관리에 효과적인 것으로 알려져

있으며(Liebman & Dyck, 1993), 윤작하는 작물에 따라 잡초에 대한 반응이 달라진다. 경작지에 형성되는 잡초의 군락은 심어져 있는 작물이 무엇인지, 작물의 심는 순서가 무엇인지가 큰 영향을 미친다(Anderson *et al.*, 1998; Andrade *et al.*, 2017).

Koocheki *et al.* (2009)의 연구에서는 밀 윤작, 사탕무-밀 윤작, 옥수수-밀 윤작 중에서 밀 윤작에서 잡초 발생 밀도가 가장 높게 나타났으며, 밀 윤작에서는 화본과와 사초과 잡초의 비율이 90%, 광엽잡초가 9.4%의 비율로 발생되어 화본과 및 사초과의 잡초 비율이 월등히 높았다. 반면, 사탕무-밀 윤작구에서는 화본과와 사초과 잡초 비율이 43%, 광엽잡초가 55.2%로 광엽잡초의 비율이 높았는데, 작물과 잡초의 형태학적 유사성이 발생 잡초 중에 영향을 미친 것으로 보았다(Derksen *et al.*, 1993). Ku *et al.* (1985)의 결과에서는 벼 단작과 이모작을 처리한 논에서 발생한 잡초의 건물중이 벼-뜻베기 호밀 이모작 > 벼 단작 > 벼-보리 이모작 > 감자-벼 이모작 > 벼-완두 이모작 순으로 많았으며, 완두-벼 이모작에서 독새풀의 발생량이 가장 적었다. 전반적으로 윤작을 함으로써 잡초 발생이 감소하는 경향이었고 밭에서 밀 단작은 잡초 발생량이 많았으나 논에서 벼 단작은 잡초발생이 많지 않았다. 이러한 원인은 토양 환경 특히, 물이 매질로써 중요한 요인임을 시사하였다.

피복작물과 뜻거름작물은 유사한 작물로 토양 내 유기물 증진시키고, 화학 비료와 제초제를 대체하는 효과가 있다. 피복작물을 작부체계 도입 시 잡초 발생을 억제하는 기작은 첫 번째는 잡초와의 광, 양분, 수분에 대한 경합이며(Teasdale & Daughtry, 1993), 두 번째는 잡초의 발아와 생육을 억제하는 타감효과(allelopathy)에 의한 것이다(Calrk, 2007; Nagabhushana *et al.*, 2001). 배추과 식물은 대표적인 타감물질(allelochemical)인 glucosinolates를 많이 함유하고 있다(Creamer *et al.*, 1996; Haramoto & Gallandt, 2004; Putnam & DeFrank, 1983). 감자 재배 시 유채를 토양에 혼입하면 잡초 밀도를 73~85%를 감소시킨다는 보고도 있다(Boydston & Hang, 1995). 우리나라에서 피복작물(뜻거름작물)을 이용한 작부체계는 주로 월동이 가능한 피복작물을 심고 하계에 주작물을 심는 방식이다. 대표적인 콩과 작물로 중부에서는 헤어리베치(RDA, 2010), 남부에서는 자운영이 있다(RDA, 2009). 화본과 작물은 호밀이 있으며(Lee *et al.*, 2008), 토양을 피복하여 후작물의 생육초반까지 잡초를 제어하기 위한 목적이라면 예취를 하여 피복하거나 그대로 두고 파종 또는 이식을 한다(Lee *et al.*, 2010). 피복작물의 작부체계에 있어서 주의할 점은 잡초 방제 역할을 했던 잔존물 등에 의한 주작물 파종의 방해(Ngouajioa &

Mennanb, 2005)와 수확량 감소이다(Choung *et al.*, 2007; Jeon *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2011). 이러한 결과로 볼 때 피복작물 작부체계 시 피복작물 그 자체가 리빙 멀칭(living mulching) 효과가 있다. 또한 화분과인 호밀은 줄기 내에 함유되어 있는 리그닌 같은 분해가 잘되지 않은 잔존물의 피복으로 후작물 재배 시 잡초 방제 효과가 있다. 따라서 피복작물 작부체계에 있어서 잡초관리는 피복작물의 종(초종) 선택이 가장 중요한 요인으로 사료된다. 또한 윤작에서 새로운 개념으로 누적윤작(stacked crop rotation)이 연구되고 있는데, 한 작물을 1년 이상 재배하고 그 후 다른 작물을 같은 해 동안 재배하는 것을 하나의 주기로 하여 이 주기가 반복되는 것으로, 매년 주기로 하는 윤작 보다 잡초방제 측면에서 효과적이라는 결과가 있다(Garrison *et al.*, 2014)(Table 1). 또한 윤작 작물의 다양성이 잡초 발생량에 미치는 영향에 대한 메타분석 결과에 따르면 다양한 작부 조합의 윤작은 단순한 조합의 윤작보다 잡초 밀도를 49% 더 감소시켜 잡초 방제에 효과적이다(Weisberger *et al.*, 2019).

따라서 효과적인 잡초 방제를 위해 윤작 작부체계에서 고려해야 할 사항은 전작물 잔존물이 물리적 특성뿐만 아니라 작물학적 분류상 근연관계보다 되도록이면 원연관계에 있는 작물을 배치하는 것이 유리할 것으로 판단되어진다. 이러한 효과는 작물육종학의 원연 교잡 시 하이브리드 효과와 유사한 개념으로 추정되나 이보다는 생태계 안정성 차원에서 설명하는 것이 용이할 것으로 보인다.

답전윤환 작부체계 시 잡초 발생 양상

답전윤환은 논을 몇 해마다 담수한 논(환원상태)과 배수한 밭(산화상태)으로 돌려가면서 이용하는 작부 방식이다. 답전윤환에 관한 연구는 일본에서 쌀 생산량을 조정하고 밭작물의 자급률을 향상시키기 위해 많은 연구가 실시되었는데, 벼-콩의 조합이 가장 대표적이다(Nishida *et al.*, 2013).

답전윤환을 하게 되면 토양공극률, 수분 등의 물리성뿐만 아니라, 질소, 인산 및 규산 등의 양분동태, 유기물 함량 등의 토양화학성도 변화한다(Ahn & Motomatsu, 1993). 환원과 산화라는 토양 환경의 큰 변화에 의해 잡초의 발생 양상이 확연히 달라지게 되는데, 논을 밭으로 윤환하면 습생잡초의 발생이 경감되고, 밭을 논으로 윤환하면 건생 잡초의 발생이 경감된다(Takahiro, 1992). Ku *et al.* (1997)의 결과에 따르면 콩을 밭에서 연작했을 때는 명아주, 바랭이, 피, 환삼덩굴, 메꽃, 닭의장풀, 여뀌 등 7초종이 발생하였으나 논으로 윤환하면 우점했던 명아주와 바랭이가 발생되지 않고 방동사니, 피, 마디꽃, 발뚝외풀, 여뀌, 올챙이고랭이의 발생이 많았다. 논 상태에서는 피, 올챙이고랭이, 마디꽃, 발뚝외풀, 방동사니가 발생하였으며, 논을 밭으로 윤환함으로써 피, 바랭이, 방동사니만 발생하였다. 또한 밭에서 논으로 윤환했을 때 초종수는 16%, 잡초 개체수는 78% 감소했으며 반대로 논에서 밭으로 윤환했을 때 초종수는 40%, 개체수는 74% 감소하였다. 그리고 답전윤환에 따른 초종별 유사성 계수(Similarity Coefficient)는 밭을 논으로 윤환함으로써 8, 논을 밭으로 윤환함으로써 64로 나타나 밭을 논으로 윤환했을 때 잡초 초종 감소 효과가 뛰어나며 답전윤환에 의해 특별한 초종의 우점도가 약화되어 군락내 다른 초종이 다양하게 분포되었다고 보고하였다. Yu *et al.* (2017)은 논에서 윤환한 2년 윤환 밭과 연작한 밭에 잡곡인 수수와 조를 재배한 결과 답전윤환 시 전반적으로 잡초 발생 초종수의 차이는 없으나, 잡초의 개체수와 건물중은 각각 42%, 40% 감소하고, 연작한 밭 대비 윤환 밭에서 건생잡초의 건물중은 53%, 습생잡초의 건물중은 35% 감소한다고 보고하였다. Kim *et al.* (1993)은 3년차 윤환 밭(논-밭-밭-밭)보다 매년 주기로 윤환한 밭(논-밭-논-밭)에서 콩, 옥수수, 울무 작물에 상관없이 잡초 초종과 개체수가 모두 감소되며, 연작 논보다 2년 동안 밭으로 윤환 후 다시 논을 윤환한 경우(논-밭-밭-논) 잡초 초종은 58%, 개체수는 92% 감소하여 밭에서 논으로 윤환했을 때 잡초 감소 효과가 더 크다고 하

Table 1. Illustration of stacking number for the maize-soybean-wheat crop rotation. Note that each crop appears the same number of times on average over a 12-yr period, but that the autocorrelation differs for the different stacking numbers.

Stacking number	Rotation length	Crop sequence ^a
S	Yr	
1	3	M-S-W-M-S-W-M-S-W-M-S-W
2	6	M-M-S-S-W-W-M-M-S-S-W-W
4	12	M-M-M-M-S-S-S-S-W-W-W-W

^aAbbreviations : M, maize; S, soybean; W, wheat.

Source : Garrison *et al.*, 2014.

였다. 윤환작물별 우점 잡초 양상이 달랐는데, 윤환 3년차 콩밭에서는 광엽잡초인 명아주가 우점(36%)하여 발생되었다. 하지만 매년 주기로 답전윤환한 콩밭에서는 명아주가 발생되지 않았다. 윤환 밭에서는 대부분 첫해에 잡초 발생량이 감소하다가 윤환 연수가 경과함에 따라 건생·광엽잡초의 발생량이 증가하는 경향이 있어 윤환에 의한 잡초방제 효과가 감소하였다(Kim *et al.*, 1995; Park *et al.*, 1998; Takahiro, 1992). Yoon *et al.* (2014)은 답전윤환에 있어서 적정 답전윤환 연수는 논-밭-논-밭-논 윤환과정에서 각각 3~4년 이상이 되면 지력이 저하되고, 병해충 및 잡초 방제에 대한 긍정적인 효과가 감소되어 밭 기간 3년, 논 기간 3년의 6년 1주기로 하는 것이 적합하다고 하였다. 위의 연구 결과로 볼 때 답전윤환도 단순한 논-밭의 윤환보다 종합적인 관리 차원에 다양한 작부체계 조합이 잡초관리 등에 유리할 것으로 판단되어진다.

이상의 결과를 보면 산화에서 환원 상태로, 환원에서 산화 상태로의 토양 환경 변화는 잡초 발생 군락변화에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 전반적으로 윤환 연수가 경과할수록 차이는 있지만, 잡초의 개체수나 건물중이 감소하는 경향을 보인다. 이는 환경 변화에 따른 토양 속 잡초종자의 발아 및 출아의 생리·생태적 특성과 밀접한 관계가 있는 것으로 추정된다. 즉 일반적으로 논토양에서 우점하는 잡초와 밭토양에서 우점하는 잡초가 다른 것이 그 이유 중의 하나로 사료되어진다(Ha *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2015). 따라서 경작자는 이러한 상황을 알고 능동적으로 작부체계를 설계하고 적극적으로 토양 환경의 변화에 따른 잡초 발생 양상을 추정하는 선제적 잡초관리 기술이 필요한 것으로 사료된다. 또한, 이러한 기술은 영농현장마다 다르다. 특히 토양 환경 외에도 기상환경, 작물의 유전적 특성과 경작자의 관리기술에 따라 다르기 때문에 정밀한 기록과 장기간의 자료 축적이 필요하다.

작부체계 시 잡초관리를 위한 토양과 종자은행 관리

작부체계 내에서 경종 시 잡초관리에 있어서 가장 영향을 많이 미치는 토양관리 요인 중의 하나가 경운이다. 경운은 그 종류와 방법에 따라 차이는 있으나 잡초를 물리적으로 제거할 뿐 아니라, 토양 잡초 종자은행의 밀도와 분포 변화에 더 큰 영향을 미친다(Cardina *et al.*, 2002; Clements *et al.*, 1996; Haring & Flessner, 2018). 그리고 윤작에 의한 잡초 방제 효과는 경운보다 토양 교란이 적은 최소 경운이나 무경운 조건에서 효과가 더 큰데, 다양한 작부 조합은 무경운 조건에서 잡초방제 효과가 더 증가한다(Chauhan *et*

al., 2012; Nichols *et al.*, 2015; Weisberger, 2019). 이와 반대로 무경운 및 최소경운과 관련하여 종자 밀도와 잡초 개체수가 증가하고 경운 강도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다(Anderson *et al.*, 1998; Cardina *et al.*, 2002; Feldman *et al.*, 1997). 상반적 내용을 정리해 보면 무경운에서 잡초 종자은행 밀도가 관행 경운에 비해 현저히 낮으나(Ball & Miller, 1990; Swanton *et al.*, 2000) 종 다양성은 관행적인 경운에 비해 무경운과 최소경운에서 더 높을 것으로 생각된다(Cardina *et al.*, 2002; Feldman *et al.*, 1997).

이처럼 경운의 정도가 잡초발생에 영향을 미치는 원인은 토양 속 잡초종자 즉 종자은행(seed bank)에 직접적으로 영향을 받기 때문이다. 종자은행이라는 용어는 종자가 모이거나 발아할 때까지 남아 있는 장소를 말한다. 종자은행은 일년생 잡초 종자의 월동을 돕고, 불리한 환경에서 살아남을 수 있는 장소가 되며, 경작지에서의 환경이나 효과적인 방제 방법에 대해 완충 작용을 하여 수년에 걸쳐 발아 함으로써 종의 생존력을 지속시키는 역할을 한다(Gulden & Shirliffe, 2009). 종자은행은 일반적으로 두 가지 유형으로 나누는데 수명에 따라 일시적인(transient) 종자은행과 지속적인(persistent) 종자은행으로 구분한다(Thompson & Grime, 1979). 토양에 있는 잡초 종자은행 중에서 출현이 가능한 종자는 종자의 휴면 상태, 크기, 매몰 깊이, 경운 등 여러 요인에 의해 결정되며(Davis *et al.*, 2005; Honda, 2008), 종자은행 밀도와 실제 발생 잡초 밀도는 차이가 있다(Barberi *et al.*, 1998; Webster *et al.*, 2003). 즉 경운은 표토에 있는 잡초 종자를 깊은 곳으로 매몰시켜 표층 발아를 저지하고(동시에 종자은행으로 투입), 토양 속에 있던 종자를 표토로 노출시켜 잡초발생량을 증가시키기도(동시에 종자은행으로부터 분리)한다. 이러한 점을 고려해 잡초 종자를 장기간 매몰시켜 종자 수명을 다하게 할 것인지(Burnside *et al.*, 1986; Roberts, 1968; Schweizer & Zimdahl, 1984), 토양 표면에 제초제나 예취 등의 관리로 잡초 밀도를 감소시킬 것인지에 대한 전략적 접근이 필요하다(Ball, 1992; Hossain & Begum, 2016; Winkle *et al.*, 1981). 토양 속 잡초 종자은행은 잠재적인 잡초량을 예측하는 도구이며, 토양 및 작물 관리의 영향을 나타내는 지표로 간주되어 효율적인 잡초관리를 위한 중요한 자료이다(Buhler *et al.*, 2001).

그러나 토양에서 잡초를 분리한 연구는 다소 있으나(Ambrosio *et al.*, 2004; Mesgaran *et al.*, 2007) 분리한 종자의 동정, 잡초 종자의 활력 검정 등 종자은행의 잡초종자에 대한 생육 예측과 진단 연구는 미미한 실정이다.

따라서 종자에 대한 분자생물학적 분류와 진단(Dona *et al.*, 2013) 연구가 최근 증가하는 추세이고 날로 발전하는

영상분석 기술을 활용한 잡초의 초기 생장을 근거로 한 발생 예측 등의 기술이 필요할 것으로 생각된다.

결론 및 제언

최근 지속적으로 제초제 저항성 잡초 확산의 심각성이 대두되면서 미국, 스위스, 네덜란드, 뉴질랜드, 호주, 캐나다 등에서 종합적 잡초관리(IWM; Integrated weed management)와 작부체계에 따른 잡초 발생에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다(Harker & O'Donovan, 2013, Storkey *et al.*, 2021). 뿐만 아니라 기후 데이터 등의 요소들을 이용하여 작물과 잡초의 생장, 작물의 수확량을 예측하는 모델(ALMANAC) 연구 등(Debaeke *et al.*, 2008) 잡초 발생을 예측하는 모델링의 중요성이 강조되고 있다(Holst *et al.*, 2007; Storkey *et al.*, 2021).

따라서 작부체계 시 잡초발생의 원인을 파악하여 합리적인 잡초발생 예측을 모델화함으로써 제초제의 사용량을 줄이고 토양 환경을 보전하여 농업 지속가능성을 높일 수 있을 것으로 생각된다. 특히 최근 문제가 되고 있는 저항성 잡초 문제 등을 해결 할 중요한 변수로 추정된다. 실질적으

로 농업생태계의 작물학적 및 토양과 기상요인의 복합성과 경종자(농업인)의 관리 등의 원인으로 잡초 발생을 예측하기가 힘든 현실이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 각 요인들에 대한 관리기술을 도식화 해 봄으로써 향후 작부체계 시 잡초관리 기술의 방향을 제시하고자 한다(Fig. 1).

잡초 발생량 예측을 통한 정밀 잡초관리를 위해 종자은행의 잡초 진단·예측 기술과 작부체계 이력 관리 DB·플랫폼 구축이 선행되어야 될 것으로 생각된다. 본 기술은 세가지의 기술 방향으로 설명할 수 있다.

첫째, 종자은행 속의 잡초를 예측하기 위해선 우선 초기 잡초의 영상 분석으로 발생될 초종 구분과 분담 군락의 예측모델 개발이 필요하다. 일부 연구자들의 의해서 종자은행을 통해 잡초 발생을 예측하려는 시도(Jarry *et al.*, 1995)가 있었으며 이러한 기술은 간편하게 토양 속 잡초 종자의 분리과 동정 및 활력 검정 등의 진단기술 개발이 필요하다. 또한 영상식물학을 이용한 잡초 연구(Noh & Kim, 2018; Thorp & Tian, 2004)가 이루어지고 있어 앞으로 정밀 영상 기기와 분자생물학을 접목하면 초기 발아나 초기 생육시기에 현장에서 잡초 동정 예측이 가능한 기술도 개발될 수 있을 것으로 예상된다.

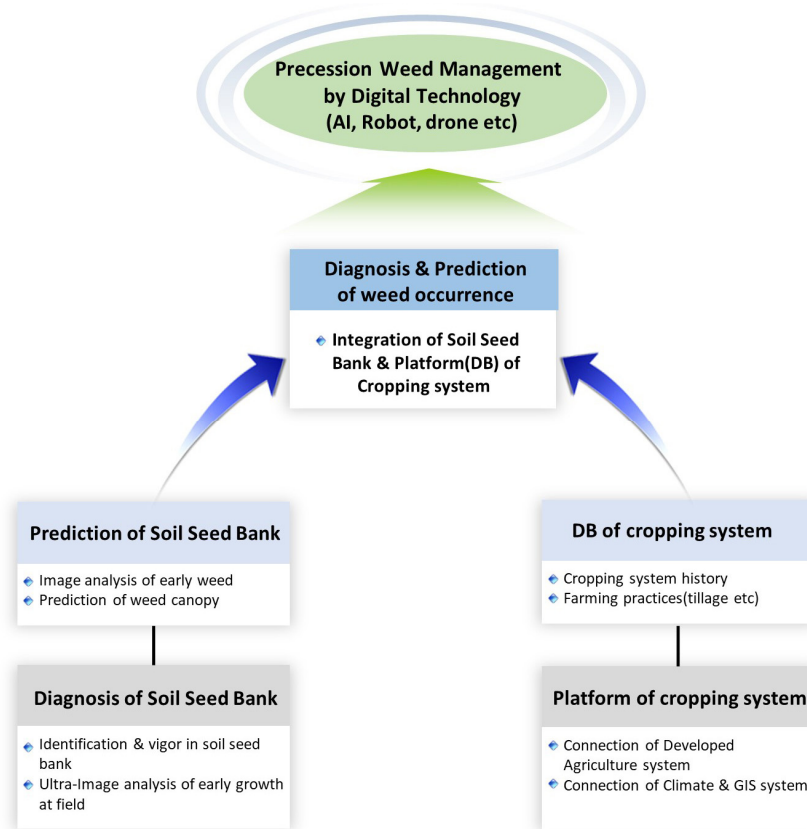


Fig. 1. Direction of weed management by cropping system.

둘째, 작부체계 이력 구축 및 이용이다. 작물이나 작부 방식에 따른 잡초 발생 양상이 다르다(Koocheki *et al.*, 2009). 따라서 잡초 발생 양상을 추정하기 위해서는 먼저 작부이력과 재배하고자 하는 작물과 품종 정보뿐만 아니라 잡초 발생에 중요한 요인 중의 하나인 경운과 관련된 영농정보의 DB화도 중요하다. 본 기술은 추후 농업 전문 서비스 시스템뿐만 아니라 기상 및 지리정보 플랫폼과 통합관리 될 때 효율적인 잡초관리가 될 것으로 추정된다.

셋째, 첫 번째와 두 번째 기술이 확립되면 발생량 예측 및 추정을 통한 정밀 잡초관리를 위하여 종자은행 잡초 발생 예측 진단 기술과 작부체계 데이터의 DB 및 플랫폼과의 융·복합화 기술 개발이 필요하다. 두 기술의 연결하여 종합될 때 인공지능(AI) 학습 기능을 탑재한 무인 로봇 기술과 연결로 잡초관리의 디지털화가 가능할 것으로 사료된다.

지금까지 잡초관리는 방제 위주였다. 잡초 발생·진단·예측 연구는 작물의 작황 예측(Bastiaans *et al.*, 2000; Lybecker *et al.*, 1991), 병해충 예찰과 방제(Groeneveld *et al.*, 1990)와 달리 잡초는 작물과 생태적 경합 관계라는 특성 때문에 발달하지 못했다. 즉 잡초 발생에 대한 사전적, 과학적 판단 없이 제초제를 사용하는 것이 영농현장의 현실이었다. 첨단 영상 진단기술, 분자생물학적 기술, 작부체계의 DB화를 통해 데이터 근간의 잡초 발생 예측 및 추정이 가능할 것으로 생각된다. 지속적 데이터 수집으로 잡초관리도 데이터 기반 디지털화를 구축함으로써 AI 이용 제초로봇 등 첨단 기술 이용 잡초관리 시스템 구축으로 제초제의 남용을 막고 농업생태계의 건전성 증진으로 지속농업의 가능성을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

적 요

본 연구는 작부체계에 따른 잡초 발생의 연구 동향을 고찰함으로써 향후 잡초관리의 연구 방향을 제안하고자 수행하였다. 작부체계는 경지를 효율적으로 이용하기 위해 발달했으며, 작부체계에 따라 잡초 발생도 상이하였다. 특히 토양 환경을 변화시킴으로써 잡초 발생을 경감시킬 수 있다. 또한 경운 등 경종적 방법은 종자은행의 영향으로 잡초 발생 양상이 달라진다. 따라서 작부체계 시 세 가지 잡초관리 기술의 방향을 제안하고자 한다. 첫째, 초기 발생한 잡초를 영상 분석하여 초종을 구분하고, 본답 균락을 예측할 수 있는 모델 개발이 필요하다. 둘째, 작부체계 이력을 관리하고 영농정보의 데이터베이스를 구축하여 이를 기상·지리 정보 등의 정보들과 연계하는 것이 필요하다. 셋째, 잡초 발생량과 토양 종자은행 역학관계를 추정하고 작부체계

플랫폼과 디지털화 기술 개발이 필요하다. 향후 다양한 작부체계에서 잡초 발생량 예측 및 방제는 농약 사용량을 줄이고, 저항성 잡초 문제 해결의 가능성 등 지속 가능한 농업에 기여할 것으로 생각된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 작물시험연구(ATIS 과제 번호: PJ01438102)의 지원으로 수행된 결과입니다.

인용문헌(REFERENCES)

- Ahn, S. B. and T. Motomatsu. 1993. Effect of paddy-upland rotation system on soil chemical properties and rice yield. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 26 : 181-188.
- Ambrosio, L., L. Iglesias, C. Marin, and J. P. Del Monte. 2004. Evaluation of sampling methods and assessment of the sample size to estimate the weed seedbank in soil, taking into account spatial variability. *European Weed Research Society Weed Research.* 44 : 224-236.
- Anderson, R. L., D. L. Tanaka, A. L. Black, and E. E. Schweizer. 1998. Weed community and species response to crop rotation, tillage and nitrogen fertility. *Weed Technol.* 12 : 531-536.
- Andrade, J. F., E. H. Satorre, C. M. Ermacora, and S. L. Poggio. 2017. Weed communities respond to changes in the diversity of crop sequence composition and double cropping. *Weed Research.* 57 : 148-158.
- Atwood, D. and C. Paisley-Jones. 2017. Pesticides industry sales and usage: 2008-2012 market estimates. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA. pp. 4-11.
- Ball, D. A. and S. D. Miller. 1990. Weed seed population response to tillage and herbicide use in three irrigated cropping sequences. *Weed Sci.* 38 : 511-517.
- Ball, D. A. 1992. Weed seed bank response to tillage, herbicides, and crop rotation sequence. *Weed Sci.* 40 : 654-659.
- Barberi, P., A. Cozzani, M. Macchia, and E. Bonari. 1998. Sample size and composition of the weed seed bank under different management systems for continuous maize cropping. *Weed Res.* 38 : 319-334.
- Bastiaans, L., M. J. Kropff, J. Goudriaan and H. H. van Laara. 2000. Design of weed management systems with a reduced reliance on herbicides poses new challenges and prerequisites for modeling crop±weed interactions. *Field Crops Research.* 67 : 161-179.
- Boydston, R. A. and A. Hang. 1995. Rapeseed (*Brassica napus*) green manure suppresses weeds in potato (*Solanum tuberosum*). *Weed Technology.* 9 : 669-675.
- Buhler, D. D., K. A. Kohler, R. L. Thompson. 2001. Weed seed bank dynamics during a five-year crop rotation. *Weed Technol.*

- 15 : 170-176.
- Burnside, O. C., R. S. Moomaw, F. W. Roeth, G. A. Wicks, and R. G. Wilson. 1986. Weed seed demise in soil in weed-free corn (*Zea mays*) production across Nebraska. *Weed Sci.* 34 : 248-251.
- Cardina, J., C. P. Herms, and D. J. Doohan. 2002. Crop rotation and tillage system effects on weed seedbanks. *Weed Sci.* 50 : 448-460.
- Chae, J. C., S. Z. Park, B. H. Kang, and S. H. Kim. *Crop Cultivation* (三稿 栽培學原論). Hyangmoonsa. Seoul. pp. 258-259.
- Chauhan, B. S., R. G. Singh, and G. Mahajan. 2012. Ecology and management of weeds under conservation agriculture: a review. *Crop Protection.* 38 : 57-65.
- Choung, J. I., J. R. Kang, J. T. Kim, J. C. Ko, N. H. Back, K. Y. Ha, S. Y. Kim, and J. W. Ahn. 2007. Study of mixed cultivation with rice and cover crops for weeds control in alpine area. *Kor. J. Intl. Agri.* 19(2) : 114-117.
- Clark, A. 2007. *Managing cover crops profitably 3rd edition.* Sustainable agriculture network. Maryland. pp. 98-105.
- Clements, D. R., D. L. Benott, S. D. Murphy, and C. J. Swanton. 1996. Tillage effects on weed seed return and seedbank composition. *Weed Sci.* 44 : 314-322.
- Creamer, N. G., M. A. Bennett, B. R. Stinner, J. Cardina, and E. E. Regnier. 1996. Mechanisms of weed suppression in cover crop-based production systems. *Horst science.* 31 : 410-413.
- Davis, A. S., K. A. Renner, and K. L. Gross. 2005. Weed seedbank and community shifts in a long-term cropping systems experiment. *Weed Sci.* 53 : 296-306.
- Derksen D. A., G. P. Lafond, A. G. Thomas, H. A. Loepky, and C. J. Swanton. 1993. Impact of agronomic practices on weed communities: tillage systems, *Weed Sci.* 41 : 409-417.
- Dona, M., A. Balestrazzi, A. Mondoni, G. Rossi, L. Ventura, A. Buttafava, A. Macovei, M. E. Sabatini, A. Valassi, and D. Carbonera. 2013. DNA profiling, telomere analysis and antioxidant properties as tools for monitoring ex situ seed longevity. *Annals of Botany.* 111 : 987-998.
- Elfstrand, S., B. Bath, A. Martensson. 2007. Influence of various forms of green manure amendment on soil microbial community composition, enzyme activity and nutrient levels in leek. *Applied soil ecology.* 36 : 70-82.
- Feldman, S. R., C. Alzugaray, P. S. Torres, and P. Lewis. 1997. The effect of different tillage systems on the composition of the seedbank. *Weed Res.* 37 : 71-76.
- Garrison, A. J., A. D. Miller, M. R. Ryan, S. H. Roxburgh, and K. Shea. 2014. Stacked crop rotations exploit weed-weed competition for sustainable weed management. *Weed Science.* 62 : 166-176.
- Groeneveld, E., M. Kovac, and T. Wang. 1990. PEST, a general purpose BLUP package for multivariate prediction and estimation. *Proceedings of the 4th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Edinburgh.* Vol. 13.
- Gulden, R. H. and S. J. Shirtliffe. 2009. *Weed Seed Banks: Biology and Management.* *Prairie Soils & Crops Journal.* 2 : 46-52.
- Ha, H. Y., K. S. Hwang, S. J. Suh, I. Y. Lee, Y. J. Oh, J. Park, J. K. Choi, E. J. Kim, S. H. Cho, O. D. Kwon, I. B. Im, S. K. Kim, D. G. Seong, Y. J. Chung, W. J. Lee, C. S. Kim, J. Lee, J. E. Park, and K. W. Park. 2014. A survey of weed occurrence on paddy field in Korea. *Weed Turf. Sci.* 3(2) : 71-77.
- Haramoto, E. R. and E. R. Gallandt. 2004. Brassica cover cropping for weed management : A review. *Renewable Agriculture and Food Systems.* 19(4) : 187-198.
- Haring, S. C. and M. L. Flessner. 2018. Improving soil seed bank management. *Pest Manag. Sci.* 74 : 2412-2418.
- Harker, K. N. and O'Donovan, J. T. 2013. Recent weed control, weed management, and integrated weed management. *Weed Technology.* 27 : 1-11.
- Heap, I. *The International Herbicide-Resistant Weed Database.* URL <http://weedsience.org> (updated July 25, 2021.).
- Holst, N., I. A. Rasmussen, and L. Bastiaans. 2007. Field weed population dynamics: a review of model approaches and applications. *Weed Res.* 47 : 1-14.
- Honda, Y. 2008. Ecological correlations between the persistence of the soil seed bank and several plant traits, including seed dormancy. *Plant Ecol.* 196 : 301-309.
- Hossain, M. and M. Begum. Soil weed seed bank: Importance and management for sustainable crop production. *J. Bangladesh Agric. Univ.* 13 : 221-228.
- Jarry, M., M. Khaladi, M. Hossaert-McKey, and D. McKey. 1995. Modeling the population dynamics of annual plants with seed bank and density dependent effects. *Acta Biotheoretica.* 43 : 53-65.
- Jeon, S. H., S. H. Lee, S. Y. Oh, Y. J. Kim, K. M. Kim, S. H. Kim, J. B. Hwang, S. T. Yoon, and S. I. Shim. 2011. Effects of hairy vetch and rye cover on weed occurrences and minor cereal growth. *Korean J. Crop Sci.* 56(2) : 136-139.
- Kim, J. I., K. H. Rhee, Y. B. Oh, Y. J. Oh, and J. K. Lee. 1993. Crop combinations and rotation years for paddy-upland cropping system in middle part of Korea. *J. crop Sci.* 38(4) : 304-311.
- Kim, K. U., D. H. Shim, S. J. Park, J. W. Jeong, and S. S. Hwang. 1995. Weed occurrence and control at soybean culture in rice-soybean rotated paddy field. *Kor. J. Weed Sci.* 15(4) : 313-320.
- Koocheki, A., M. Nassiri, L. Alimoradi, and R. Ghorbani. 2009. Effect of cropping systems and crop rotations on weeds. *Agron. Sustain.* 29 : 401-408.
- Korea rural economic institute. 2021. *Agricultural outlook 2021* I. Naju. pp. 223-225.
- Ku, Y. C., K. Y. Seong, D. Y. Song, S. B. Lee, and I. P. Huh. 1997. Change of weed community in paddy-upland rotation. *Kor. J. Weed Sci.* 17(2) : 157-162.
- Ku, Y. C., S. H. Yun, and S. H. Park. 1985. Difference in weed population as affected by a cropping pattern in paddy field. *Kor. J. Weed Sci.* 5(2) : 137-142.

- Lee, B. M., H. J. Jee, K. Y. Rye, J. H. Park and J. H. Lee. 2008. Effects of rye sowing dates on weed occurrence in organic soybean field. *Kor. J. Weed Sci.* 28(2) : 111-116.
- Lee, B. M., J. H. Lee, Y. J. Oh, S. B. Lee, C. K. Kang, H. J. Jee, J. H. Lee. 2010. Weed occurrence as influenced by living mulch, soil incorporation and cutting treatment of rye in organic soybean field. *Kor. J. Weed Sci.* 30(2) : 164-170.
- Lee, I. Y., Y. J. Oh, S. H. Hong, J. K. Choi, S. J. Heo, C. Y. Lee, K. S. Hwang, K. W. Park, S. H. Cho, O. D. Kwon, I. B. Im, S. K. Kim, D. G. Seong, Y. J. Chung, C. S. Kim, J. Lee, H. A. Seo, and H. M. Jang. 2015. Weed flora diversity and composition on upland field of Korea. *Weed Turf. Sci.* 4(3) : 159-175.
- Lee, J. H., B. M. Lee, S. I. Shim, Y. Lee, and H. J. Jee. 2011. Effects of crimson clover, hairy vetch, and rye residue mulch on weed occurrence, soybean growth, and yield in soybean fields. *Kor. J. Weed Sci.* 31(2) : 167-174.
- Lee, S. M., B. M. Lee, Y. Lee, Y. H. Lee, J. K. Sung, Y. Lee, H. B. Yun, H. S. Choi. 2012. Effect of green-manure crop rotation on weed control. *Korean J. Org. Agric.* 20(2) : 201-209.
- Liebman, M. and E. Dyck. 1993. Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecological Applications.* 3(1) : 92-122.
- Lybecker, D. W., E. E. Schweizer, and R. P. King. 1991. Weed management decisions in corn based on bioeconomic modeling. *Weed Sci.* 39(1) : 124-129.
- Mesgaran, M. B., H. R. Mashhadi, E. Zand, and H. M. Alizadeh. 2007. Comparison of three methodologies for efficient seed extraction in studies of soil weed seedbanks. *European Weed Research Society Weed Research.* 47 : 472-478.
- Nagabhushana, G. G., A. D. Worsham, and J. P. Yenish. 2001. Allelopathic cover crops to reduce herbicide use in sustainable agriculture systems. *Allelopathy J.* 8 : 133-146.
- Ngouajio, M. and H. Mennanb. 2005. Weed populations and pickling cucumber(*Cucumis sativus*) yield under summer and winter cover crop systems. *Crop Prot.* 23 : 521-526.
- Nichols, V., N. Verhulst, R. Cox, and B. Govaerts. 2015. Weed dynamics and conservation agriculture principles: A review. *Field Crops Research.* 183 : 56-68.
- Nishida, M., H. Sekiya, and K. Yoshida. 2013. Status of paddy soils as affected by paddy rice and upland soybean rotation in northeast Japan, with special reference to nitrogen fertility. *Soil Science and Plant Nutrition.* 59 : 208-217.
- Noh, T. K. and D. S. Kim. 2018. Weed research using plant image science. *Weed Turf. Sci.* 7(4) : 285-296.
- Park, C. K., J. M. Lee, S. B. Song, H. T. Kim, J. D. Sung, S. B. Pae, and Y. H. Kwack. 1998. Weed occurrence on different cropping years at soybean culture in paddy-upland rotated field. *RDA. J. Crop Protec.* 40(2) : 135-142.
- Putnam, A. R. and J. DeFrank. 1983. Use of phytotoxic plant residues for selective weed control. *Crop Protection.* 2 : 173-181.
- Roberts, H.A. 1968. The changing population of viable weed seeds in an arable soil. *Weed Res.* 8 : 253-256.
- Rural development administration. 2009. Study on effective utilization of Chinese milkvetch as green manure crop for environmental friendly rice production. Suwon. pp. 5-16.
- Rural development administration. 2010. Hairy vetch. Standard farming textbook-175. Suwon. pp. 44-46.
- Schweizer, E. E. and R. L. Zimdahl. 1984. Weed seed decline in irrigated soil after six years of continuous corn (*Zea mays*) and herbicides. *Weed Sci.* 32 : 76-83.
- Seo, J. H. and H. J. Lee. 1998. Study on no-tillage silage corn production with legume hairy vetch (*Vicia villosa* Roth) cover II. Changes of yield and nitrogen uptake of corn by N fertilizer and hairy vetch cover. *J. Korean Grassl. Sci.* 18(2) : 123-128.
- Statistics Korea. 2020. Changes in the structure of agriculture in terms of statistics. The press release. Daejeon. p. 13.
- Storkey, J., J. Helps, R. Hull, A. E. Milne, and H. Metcalfe. 2021. Defining integrated weed management : A novel conceptual framework for models. *Agronomy.* 11(4) : 747.
- Swanton, C. J., A. Shrestha, S. Z. Knezevic, R. C. Roy, and B. R. Ball-Coelho. 2000. Influence of tillage type on vertical weed seedbank distribution in a sand soil. *Can. J. Plant Sci.* 80 : 455-457.
- Takahiro, O. 1992. Crop rotation technology theory. Toyoyama Fishing Village Cultural Association. 256-262.
- Teasdale, J. R. and Daughtry, C. S. T. 1993. Weed suppression by live and desiccated hairy vetch (*Vicia villosa*). *Weed Science.* 41(2) : 207-212.
- Thompson, K. and J. P. Grime. 1979. Seasonal variation in the seed banks of herbaceous species in ten contrasting habitats. *J. Ecol.* 67 : 893-921.
- Thorp, K. and L. Tian., 2004. A review on remote sensing of weeds in agriculture, *Precision Agriculture.* 5(5) : 477-508.
- Webster, T. M., J. Cardina, and A. D. White. 2003. Weed seed rain, soil seedbanks, and seedling recruitment in no-tillage crop rotations. *Weed Sci.* 51 : 569-575.
- Weisberger, D., V. Nichols, and M. Liebman. 2019. Does diversifying crop rotations suppress weeds? A meta-analysis. *PLoS ONE* 14(7): e0219847.
- Winkle, M. E., J. R. C. Leavitt, and O. C. Burnside. 1981. Effects of weed density on herbicide absorption and bioactivity. *Weed Sci.* 29 : 405-409.
- Yoon, S. T., E. K. Je, Y. J. Kim, I. H. Jeong, T. K. Han, T. Y. Kim, Y. S. Cho, and E. S. Yun. 2014. Survey and evaluation of paddy-upland rotation production system. *Korean J. Int. Agric.* 26(4) : 531-543.
- Yu, J. B., S. T. Yoon, J. Yang, and M. H. Ye. 2017. A comparison of the disease and insect damage, and growth characteristics of sorghum and foxtail millet between rotational upland and continuously cropped upland field in order to identify the optimum varieties for an organic paddy-upland rotation system. *Korean J. Crop Sci.* 62(3) : 224-232.