

관행 논과 유기 재배 논의 토양 종자은행과 토양 특성 비교

방정환 · 박종호 · 이영미 · 장철이 · 홍성준[†]

국립농업과학원 유기농업과

Comparison of Soil seed bank and Soil characteristics in Conventional Paddy field and Organic Paddy field

Jeong Hwan Bang · Jong-Ho Park · Young-Mi Lee · Chul-Lee Chang · Sung-Jun Hong[†]

Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, Korea

(Received : 10 August 2023, Revised : 11 September 2023, Accepted : 11 September 2023)

요약

논은 다양한 생태계 서비스를 제공할 뿐만 아니라 생물다양성 보전에 중요한 서식지이며, 최근 생태학적 가치와 중요성이 점점 강조되고 있다. 따라서 본 연구는 영농 방식이 서로 다른 관행 논(Conventional Paddy field, CP)과 유기 재배 논(Organic Paddy field, OP)을 대상으로 토양 종자은행의 특성을 파악하고 토양 환경 요인과의 상관관계를 분석하였다. 연구결과 관행 논은 식생이 단순하여 종자은행의 식물 다양성이 낮은 반면에, 유기 논은 식생이 상대적으로 다양하여 종자은행의 식물 다양성이 높게 나타났다. 또한 토양 환경 특성도 유기 논 (K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, B ↓) 과 관행 논(K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, B ↑)의 명확한 차이를 보였다. 이러한 결과는 벼 재배 방식에 대한 영농 활동의 차이가 식생과 토양 종자은행의 구조와 다양성에 영향을 주었고 또한 토양 환경 요인에도 직간접적으로 영향을 준 것으로 판단된다. 본 연구결과는 농업생태계 생물다양성 보전과 생태계 복원 그리고 생태적 가치를 평가하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

핵심어 : 관행논, 식물다양성, 유기논, 유기농, 토양요인, 토양종자은행

Abstract

Paddy fields not only provide a variety of ecosystem services but also serve as crucial habitats for biodiversity conservation. Recently, their ecological value and significance have been increasingly emphasized. Therefore, this study aimed to investigate the characteristics of soil seed banks and analyze their correlation with soil environmental factors in Conventional Paddy field (CP) and Organic Paddy field (OP) with different farming practices. Our results revealed that the vegetation in CP was simple, resulting in low plant diversity in the soil seed banks. On the other hand, the vegetation in OP was relatively diverse, leading to higher plant diversity in the soil seed banks. Additionally, distinct differences in soil environmental characteristics were observed between OP (K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, B ↓) and CP (K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, B ↑). These results suggest that variations in agricultural practices for rice cultivation have influenced the structure and diversity of vegetation and soil seed banks. Furthermore, these agricultural practices have had both direct and indirect effects on soil environmental factors. Our findings can serve as fundamental data for evaluating biodiversity conservation in agricultural ecosystems, ecosystem restoration, and ecological value assessment.

Key words : Conventional Paddy field, Organic farming, Organic Paddy field, Plant diversity, Soil factor, Soil seed bank

[†]To whom correspondence should be addressed.
Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, Korea
E-mail : hongsj7@korea.kr

- Jeong Hwan Bang Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA / Post-Doc. (jhsang0909@korea.kr)
- Jong-Ho Park Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA / Researcher (jhpark75@korea.kr)
- Young-Mi Lee Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA/Researcher (youngmi13@korea.kr)
- Chul-Lee Chang Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA / Senior Researcher (changcl@korea.kr)
- Sung-Jun Hong Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA / Senior Researcher (hongsj7@korea.kr)

1. 서 론

농업생태계는 인류에게 필수적인 식량, 섬유, 목재 그리고 기타 농작물을 제공하는 중요한 생태계이다 (Swift et al., 2004). 농업생태계에서 생물다양성은 식량공급이나 양분 순환과 같은 생태계 서비스를 제공하는데 중요한 역할을 한다 (Chemini and Rizzoli, 2003; Baumgärtner, 2007). 예를 들어, 현화식물의 87.5%가 번식을 위해 수분 매개자의 도움이 필요하며 (Ollerton et al., 2011), 전 세계 주요 식량 작물들 또한 번식과 생산성 측면에서 농업생태계의 생물다양성 보전이 중요하다 (Klein et al., 2007).

지난 수십 년 동안 농약과 화학비료의 무분별한 사용과 토지이용 변화 등과 같은 인간활동으로 논생태계의 생물다양성이 위협받고 있다 (Lockwood, 1999; Tilman et al., 2001; Benton et al., 2003; Ratnadass et al., 2012). 논습지는 사람들에게 중요한 식량을 제공할 뿐만 아니라 조류, 어류, 무척추동물 등 다양한 야생 동식물의 중요한 서식지로서 생물다양성 보전에 중요한 역할을 수행하고 있다 (Luo et al., 2014; Kong, 2017). 랍사르 총회에서도 논습지는 작물의 생산뿐만 아니라 다양한 생물들이 서식하는 생물다양성 보고로서 생태학적 가치를 세계적으로 인정을 받아 논을 지속 가능한 습지 시스템으로 관리하자는 논습지 생물다양성 증진을 위한 결의문을 채택하였다 (Kong, 2017). 논습지의 생물다양성 보전의 중요성은 나날이 강조되고 있으며 많은 국가와 지역에서 친환경농업을 시행함으로써 환경 및 생물다양성 문제를 해결하기 위한 노력을 하고 있다 (Chappell and LaValle, 2011; Rasche and Steinhauser, 2022). 또한 화학 비료와 제초제, 살충제 등 유기 합성 농약을 사용하여 작물을 재배한 관행 농업은 농촌 환경 오염과 생물다양성 감소 등 생태계 파괴를 가져왔고, 최근 환경 이슈와 더불어 관심을 받고 있는 유기농업은 농업환경 보전, 생물다양성 증진, 생물학적 순환과정을 촉진시켜 농업생태계를 복원하여 기후변화에 대응할 수 있는 방안으로 고려되고 있다 (Gamage et al., 2023).

토양 종자은행(Soil seed bank)은 수년 동안 존재했던 과거 식생의 흔적이자 역사이며 토양 위 또는 토양 안에 있는 모든 생존 가능한 식물 종자를 의미한다 (Bigwood and Inouye, 1988; Yang et al., 2021). 토양 종자은행은 생물다양성 저장소로서 식생의 다양성과 훼손된 생태계를 관리하고 복원하는데 중요한 역할을 한다 (Chesson and Huntly, 1997; Brock and Rogers, 1998; Harwell and Havens, 2003; Choi and Kim, 2022). 따라서 농업생태계의 생물다양성과 생태계 관리 방안을 마련하기 위해서는 종자은행에 대한 이해가 필수적이다. 그러나 농업생태계에서 토양 종자은행에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 영농 방식이 서로 다른 관행 논과 유기 논을 대상으로 토양 종자은행의 규모와 다양성을 파악하고 토양 환경 요인과의 상관관계를 분석하고자 한다. 이를 통해 농업생태계의 생물다양성 보전과 환경생태적 측면에서 지속 가능한 농업을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 대상 지역과 식생조사 및 토양 샘플링

연구 대상 지역은 전남 진도군 의신면에 위치한 논으로 관행 재배 논(관행 논)과 유기 재배 논(유기 논)이 단지화되어 있는 농경지 (약 60 ha)이다. 현재 관행 논은 화학비료와 농약을 사용하고 유기 논은 합성 화학 물질을 사용하지 않고 생물학적 (왕우렁이 활용) 방제와 물리적 (잡초 뽑기나 예초기 사용) 방제를 통해 잡초를 관리하고 있어, 영농 방식이 다른 관행 논과 유기 논을 비교하기에 적합하다고 판단하여 본 연구의 대상 지역으로 선정하였다 (Fig. 1).

식생조사와 토양 샘플링을 위한 현장조사는 관행 논 (Conventional Paddy field, CP)과 유기 논(Organic Paddy field, OP)을 대상으로 2022년 9월 20-21일에 수행하였다. 각각의 논은 서식지 유형별로 구분하였고 논습지 중에서 식물이 우점하는 서식지를 대상으로 본답(Rice paddy area, R) 서식지와 논두렁(Footpath area, F) 서식지로 구분하였다 (Nam et al., 2012; Choi et al., 2014). 본답 서식지는 논두렁 안쪽의 직사각형 모양으로 주로 벼를 재배하면서 일정 기간 물을 가두어 두는 곳이며, 논두렁 서식지는 논과 논 사이의 경계로 물이 넘치지 않게 흙으로 둘러막은 두둑이다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 4가지 형태의 서식지가 있다: 관행 논의 본답 서식지 [CP_R, Rice paddy area (R) in Conventional Paddy field (CP)]; 유기 논 of 본답 서식지 [OP_R, Rice paddy area (R) in Organic Paddy field (OP)]; 관행 논 of 논두렁 서식지 [CP_F, Footpath area (F) in Conventional Paddy field (CP)]; 유기 논 of 논두렁 서식지 [OP_F, Footpath area (F) in Organic Paddy field (OP)]. 식생조사는 관행 논(본

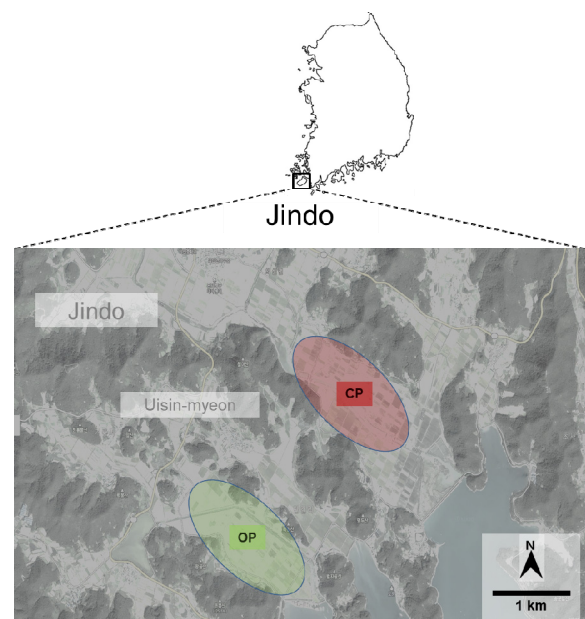


Fig. 1. A map of the study site in Jindo. Conventional Paddy field (CP), Organic Paddy field (OP).

답, 논두렁)과 유기 논(본답, 논두렁)을 비교하기 위해 방형구 조사를 하였고, 각각의 논에서 50 x 50 cm 방형구를 랜덤하게 6회 반복하여 (관행 논6, 유기 논6) 설치한 후 식생 조사와 토양 샘플링을 수행하였다. 각 방형구 내에서는 식물의 피도 (Plant coverage), 밀도 (Plant density), 초고 (Plant height)를 조사하였고 지상부 식물을 수확하여 실험실에서 건조 생물량 (Plant biomass)을 측정하였다 (70°C, 72 hr). 식생조사에서 본답 서식지는 주로 단일 식생(벼)으로 구성되어 있기 때문에 서식지 유형별 분석은 제외하였다.

2.2 토양 종자은행

관행 논(본답, 논두렁)과 유기 논(본답, 논두렁)의 토양 종자은행의 특성을 파악하기 위해 토양 샘플러 (Eijkkelkamp BV, Netherlands; corer dimensions = 5 cm diameter, 5 cm deep)를 이용하여 (Lee et al., 2014), 토양 샘플을 채취하였고 전체 12지점 방형구에서 24개의 토양을 샘플링 하였다 [12 (관행6 + 유기6) x 2 (종자은행용1 + 토양분석용1) = 24개]. 종자은행 분석을 위해 각 방형구 (50 x 50 cm)마다 4개(100 ml volume per sample x 4 = 400 ml)의 토양을 랜덤하게 샘플링하여 하나의 샘플로 혼합하여 고르게 섞어 주었다. 추가적으로 토양의 물리·화학적 특성을 분석하기 위해 4개의 토양을 동일한 방법으로 샘플링하여 실험 전까지 4°C 에서 보관한 후 분석에 사용하였다 (Lee et al., 2014).

토양 종자은행 실험을 위한 토양 샘플은 농과원 온실 (N35°49'38", E127°02'30")에서 밭아 실험에 사용하였다. 유리온실 내부에는 온도 데이터 로거 HOBO Optic USB base station (BASE-U-4, Onset, MA, USA)이 설치되어 실험 기간 중 매시간마다 측정하였다. 유식물의 출현은 15 주 동안 관찰하였고, 이 기간 동안 온실에 기록된 최저 및 최고 온도는 각각 8.6°C 및 34.6°C 이다. 각 토양 샘플들은 식물의 뿌리와 줄기 그리고 이물질 제거한 뒤 식물 종들의 발아에 적합한 환경을 만들어 주기 위해 종자 트레이 (54 x 28 x 5 cm)에 상토를 채우고 종자은행 토양을 약 1 cm 높이로 고르게 덮어주었다 (Zhao et al., 2022). 실험 기간 동안에는 1주일에 1번 이상 물을 주었다 (토양 표면에서 -2 ~ 0 cm의 수위 유지). 발아한 유식물은 Lee et al. (2014)에서 사용한 방법으로 동정 및 밀도 조사를 하였고, 동정이 불가능한 경우, 유식물을 별도의 화분에 옮겨서 동정이 가능할 때까지 재배하였다. 종자은행에서 출현한 모든 식물 종은 국가생물종 지식정보시스템(NATURE)의 데이터베이스를 이용하여 동정했다 (Korea National Arboretum, 2020). 모든 데이터는 R 프로그램을 통해 통계 분석하였고, 관행 논과 유기 논 토양 종자은행의 밀도를 비교하기 위해 T-test 를 수행하였다 (Bang et al., 2022). 토양 종자은행 실험을 통해 출현한 유식물의 밀도는 생활사 범주와 서식지 유형 간의 비교를 하기 위해 ANOVA test를 수행하였고 유의성이 있는 경우 (P < 0.05), Tukey 사후 검정을 하였다.

토양 종자은행의 종 다양성을 비교하기 위해 종 수를 나타내는 종 풍부도 (species richness)와, 종의 상대적 개체 수 비율을 나타내는 종 균등도 (species evenness), 그리고 종 수와 개체 수의 균등도를 동시에 표현하는 종 다양도 (species diversity)를 다음과 같은 지수를 사용하여 산출하였다. 다양도 지수(Diversity Index, H') = $-\sum_{i=1}^S P_i \times \ln(P_i)$ (S: 전체 종수, P_i: i 번째에 속하는 개체 수의 비율 (ni/N)로 계산, N: 군집 내의 전체 개체 수, ni: 각종의 개체 수), 균등도 지수(Evenness Index, E) = H'/Ln(S) (H': 다양도, S: 전체 종수), 그리고 풍부도 지수(Richness Index, RI) = (S-1)/Ln(N) (S: 전체 종수, N: 총 개체 수)를 산정하였다 (Bulla, 1994).

2.3 토양 특성

현장에서 채취한 토양 샘플들은 실험실 그늘에서 2주 이상 건조한 후 분쇄하여 2 mm 체에 통과시키는 전처리 과정을 진행하였다 (NIAS, 2000). 토양의 물리·화학적 특성을 분석하기 위해 전처리한 토양 시료는 농촌진흥청 국립농업과학원의 토양분석법을 적용하였다 (NIAS, 2000). 수분 함량 (Water Content, WC)은 건조 전과 건조 후의 토양 무게를 측정하여 산출하였고, pH와 전기전도도(Electrical Conductivity, EC)는 토양 시료와 3차 증수류를 1:5 비율로 혼합한 뒤 추출하여 pH 전극(Orion 8157BNUMD, Thermo scientific, US)과 EC 전극(Orion 013005MD, Thermo scientific, US)을 이용하여 측정하였다. 토양 시료 중 전질소(TN)와 전탄소(TC)는 원소분석기(LECO CN928 Analyser, Michigan, USA)를 이용하여 분석하였고, 유기물 함량(Organic Matter, OM)은 총탄소 함량에 1.724를 곱하여 산출했다 (Kong et al., 2020). 유효 인산(P₂O₅)은 Lancaster법을 사용하여 측정하였고, 치환성 양이온 (Ex. K, Ca, Mg, Na)은 ICP 장비(Optima 8300, Perkinelmer, US)를 이용하여 분석하였다. NH₄⁺는 Salicylate법을 사용하였고, NO₃⁻는 Auto Analyzer (QuAAtro, BLTEC Korea, Germany)를 이용하여 분석하였다. Fe, Mn, B는 마이크로웨이브 분해법을 사용하여 분석하였다. 서식지 유형별 토양의 물리·화학적 특성을 비교하기 위해 ANOVA test를 수행하였고 유의성이 있는 경우 (P < 0.05), Tukey 사후 검정을 하였다 (Bang et al., 2020). Ward의 방법을 사용한 군집 분석 (Cluster Analysis, CA)은 hclust 함수를 사용하여 서로 다른 서식지 유형을 4개 그룹으로 분류했고, 주성분 분석 (Principal Component Analysis, PCA)은 토양 특성과 서식지 유형 간의 관계를 조사하기 위해 사용하였다 (Bang and Lee, 2019).

3. 결과 및 고찰

3.1 식생조사

관행 논과 유기 논 토양의 식생의 구조는 상당한 차이를 보였다 (Table 1 and Fig. 2). 관행 논은 식생이 거의 없는 (낮

Table 1. Vegetation survey results in CP and OP.

Vegetation survey	†CP	OP
Plant coverage (%)	1.2±0.2	57.6±24.8
Plant biomass (g)	3.1±1.9	37.5±16.1
Plant height (cm)	53.4±28.4	118.2±50.0
Plant density (no. 0.25 m ⁻²)	2.8±0.9	92.0±43.3
Dominant Species (%)	<i>Portulaca oleracea</i> (50) <i>Echinochloa crus-galli</i> (33)	<i>Digitaria ciliaris</i> (59) <i>Commelina communis</i> (21)

† Conventional Paddy field (CP), Organic Paddy field (OP).

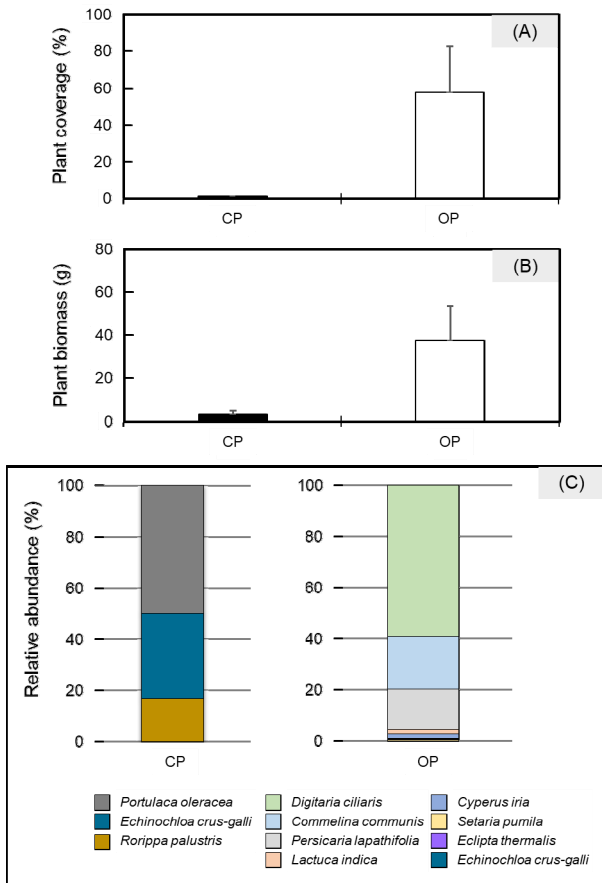


Fig. 2. Vegetation structure in CP and OP. (A) Plant coverage (%), (B) Plant biomass (g 0.25 m⁻²), (C) Relative abundance (%). Conventional Paddy field (CP), Organic Paddy field (OP).

은 피도) 서식지로 쇠비름(*Portulaca oleracea*)과 물피(*Echinochloa crus-galli*)가 주로 출현하였고, 유기 논은 식생의 피도 (Plant coverage), 밀도 (Plant density), 높이 (Plant height) 그리고 지상부 생물량 (Plant biomass)이 관행 논보다 높게 나타났다 (Table 1). 유기 논 의 식생의 구조 또한 상대적으로 복잡하게 나타났으며 (Fig. 2), 우점종은 바랭이(*Digitaria ciliaris*)와 닭의장풀(*Commelina communis*)이다. 관행 논과 유기 논 의 식생의 구조가 다른 것은 제초 방식의 차이일 것이다. 유기 논은 유기 인증을 받아야 하기 때문에 농약을 사용하지 않고 생물학적 방제인 왕우렁이 등을 활용하거나 물리적으로 잡초를 뽑거나 예초기를 사용하기 때문에 방제 후에는 대부분의 식물들이 기부에

남아 있는 양분을 이용하여 다시 성장할 수 있다. 그러나 관행 논은 제초제와 같은 화학 농약을 사용하여 잡초를 방제하기 때문에 제초제가 접촉한 부위가 죽거나 식물체 내로 흡수되어 잎에서부터 줄기와 뿌리까지 영향을 받아 식물의 대사와 생장 저하로 인해 고사하기 때문에 식생이 거의 없는 서식지를 형성한 것으로 보인다. 또한 관행 논에서 주로 출현한 쇠비름(*Portulaca oleracea*)과 물피(*Echinochloa crus-galli*)는 제초제 내성 혹은 저항성이 있는 식물로 추정된다 (Kang et al., 2011).

3.2 토양 종자은행

토양 종자은행의 종 구성과 크기는 관행 논(CP)과 유기 논(OP) 사이에 상당한 차이를 보였다 (Table 2). 관행 논에서는 8과 12종 그리고 34,510 seeds m⁻²가 포함되었고, 속속이풀(*Rorippa palustris*) 25%, 중대가리풀(*Centipeda minima*) 22%, 쇠비름(*Portulaca oleracea*) 18%, 비노리(*Eragrostis multicaulis*) 18% 순으로 출현하였다. 그러나 유기 논에서는 13과 24종 그리고 204,340 seeds m⁻²가 출현하였고 종 구성은 새포아풀(*Poa annua*) 33%, 벼룩나물(*Stellaria alsine*) 27%, 퉁새풀(*Alopecurus aequalis*) 14% 순으로 나타났으며, 관행 논보다 많은 종과 개체가 출현하였고 종 구성도 다르게 나타났다. 종자의 밀도는 관행 논과 유기 논에서 생활사 범주에 따라서 상당한 차이를 보였다 (Table 3). Annual plants의 경우, 토양 종자은행의 밀도는 유기 논에서 상당히 높게 나타났다 (P < 0.05). Perennial plants의 경우도, 토양 종자은행의 밀도는 Annual plants와 비슷한 경향을 보였다 (P < 0.01).

토양 종자은행의 종 구성과 크기는 관행 논과 유기 논 의 서식지 유형에 따라서 상당한 차이를 보였다 (Table 4). 관행 논 의 본답 서식지(CP_R)에서는 5과 11종 그리고 9,010 seeds m⁻²가 출현하였고, 유기 논 의 본답 서식지(OP_R)에서는 8과 14종 그리고 152,150 seeds m⁻²로 가장 많은 유식물 개체가 나타났다. 관행 논 의 논두렁 서식지(CP_F)에서는 4과 8종 그리고 25,500 seeds m⁻²가 출현하여 가장 적은 종 수가 나타났고, 유기 논 의 논두렁 서식지(OP_F)에서는 12과 20종 그리고 52,190 seeds m⁻²가 출현하여 가장 많은 종 수가 나타났다. 종자은행의 종 구성은 관행 논 서식지(본답, 논두렁)에서는 비슷한 종들이 많이 출현하였고, 반면에 유기 논 서식지(본답, 논두렁)에서는 서로 다른 종들이 많이 출현하였다. 관행 논과 유기 논

의 서식지 유형 간에 토양 종자은행의 밀도 또한 차이가 있는 것으로 나타났다 (Table 5). Annual plants의 경우, 유기 논외 분담 서식지(OP_R)는 밀도가 가장 높게 나타났고 반면에 관행 논외 분담 서식지(CP_R)는 가장 낮은 밀도를 보였다 (F=10.082, P < 0.01). Perennial plants의 경우도, Annual plants와 비슷한 경향을 보였고 분담 서식지와 논두렁 서식지 모두 유기 논에서 종자의 밀도가 높게 나타났

다 (F=18.805, P < 0.001). 하천습지에서 토양 종자은행 연구를 수행한 연구결과에 따르면, 서식지 유형별 가장 높은 밀도는 Waterfront 서식지이며 80,900±24,315 seeds m⁻² (일년생 식물)와 23,400±8,225 seeds m⁻²(다년생 식물)가 나타나서 (Lee et al., 2014), 본 연구 결과 보다 약 2.4배 (일년생 식물, OP_R)와 1.4배(다년생 식물, OP_R) 많은 종자은행이 출현했다 (Table 5). 이러한 결과는 하천에는

Table 2. Comparison of soil seed bank in CP and OP.

Scientificname	†CP (%)	OP (%)	Lifespan
Oxalidaceae 켈이밥과			
<i>Oxalis corniculata</i> 켈이밥		1,020	Perennial
Asteraceae 국화과			
<i>Centipeda minima</i> 중대가리풀	7,650(22)	3,060	Annual
<i>Eclipta thermalis</i> 한련초	850	1,870	Annual
<i>Conyza canadensis</i> 망초	680	340	Annual
<i>Senecio vulgaris</i> 개쑥갓	340		Annual
<i>Pseudognaphalium affine</i> 떡쑥		340	Perennial
<i>Bidens tripartite</i> 가막사리		170	Annual
Rubiaceae 꼭두서니과			
<i>Galium spurium</i> 갈퀴덩굴		510	Perennial
Euphorbiaceae 대극과			
<i>Acalypha australis</i> 깨풀		1,360	Annual
Ranunculaceae 미나리아재비과			
<i>Ranunculus sceleratus</i> 개구리자리		170	Perennial
Onagraceae 바늘꽃과			
<i>Ludwigia epilobioides</i> 여뀌바늘		1,190	Annual
Brassicaceae 배추과			
<i>Rorippa palustris</i> 속속이풀	8,670(25)		Perennial
<i>Cardamine flexuosa</i> 황새냉이	1,870	3,570	Perennial
Poaceae 벼과			
<i>Poa annua</i> 새포아풀	1,530	66,470(33)	Annual
<i>Eragrostis multicaulis</i> 비노리	6,120(18)	340	Annual
<i>Digitaria ciliaris</i> 바랭이		3,740	Annual
<i>Alopecurus aequalis</i> 툇새풀	170	28,730(14)	Annual
<i>Eleusine indica</i> 왕바랭이	170	170	Annual
Cyperaceae 사초과			
<i>Fimbristylis littoralis</i> 바람하늘지기		5,440	Annual
<i>Cyperus iria</i> 참방동사니		2,380	Annual
<i>Cyperus difformis</i> 알방동사니	170		Annual
Caryophyllaceae 석죽과			
<i>Stellaria alsine</i> 벼룩나물		54,570(27)	Perennial
<i>Cerastium glomeratum</i> 유럽점나도나물		6,120	Perennial
Portulacaceae 쇠비름과			
<i>Portulaca oleracea</i> 쇠비름	6,290(18)	510	Annual
Fabaceae 콩과			
<i>Vicia villosa</i> 멧지		340	Perennial
Scrophulariaceae 현삼과			
<i>Mazus pumilus</i> 주름잎		19,040	Annual
<i>Lindernia procumbens</i> 발뚝외풀		2,890	Annual
Number of family	5	13	
Number of species	12	24	
Total Seed density (seeds m ⁻²)	34,510	204,340	

† Conventional Paddy field (CP), Organic Paddy field (OP). In parentheses, the percentage of emerging species (>10%) is indicated.

Table 3. Soil seed bank density of paddy fields by plant lifespan category.

Paddy field type	Annual plants (seeds m ⁻²)	Perennial plants (seeds m ⁻²)
CP [†]	7,990±597 ^a	3,513±1,303 ^a
OP	45,900±10,712 ^b	22,213±2,083 ^b

[†]Conventional Paddy field (CP), Organic Paddy field (OP). Different lowercase letters indicate significant differences between treatments (P < 0.05). Data are Mean ± SE.

다양한 식생이 넓은 면적을 차지하고 있어 논습지 보다 많

은 종자은행이 출현한 것으로 추정된다.

관행 논과 유기 논 그리고 서식지 유형(본답, 논두렁)에 따라 토양 종자은행의 구성과 밀도가 달라지는 것은 영농 방식의 차이로 인한 결과로 추정된다. 특히 제초제와 같은 화학물질의 사용은 식생의 구조뿐만 아니라 종자에도 악영향을 줄 수 있다 (Kremer et al., 2009; Myers et al., 2016; Gomes et al., 2019). Gomes et al. (2017)는 제초제 또는 제초제의 부산물이 토양에 남아 있으면 토양 종자 호흡률을 감소시켜 종자은행의 발아를 위협한다고 보고하였고 이러한 위험성은 자연생태계 식물군락에도 악영향을

Table 4. Comparison of soil seed bank by habitat type in CP and OP.

Scientificname	[†] CP_R (%)	OP_R (%)	CP_F (%)	OP_F (%)	Lifespan
Oxalidaceae 썩이밥과					
<i>Oxalis corniculata</i> 썩이밥				1,020	Perennial
Asteraceae 국화과					
<i>Centipeda minima</i> 중대가리풀	1,530(17)	1,020	6,120(24)	2,040	Annual
<i>Eclipta thermalis</i> 한련초	170	850	680	1,020	Annual
<i>Conyza canadensis</i> 망초	680	340			Annual
<i>Senecio vulgaris</i> 개쑥갓			340		Annual
<i>Pseudognaphalium affine</i> 떡쑥				340	Perennial
<i>Bidens tripartite</i> 가막사리		170			Annual
Rubiaceae 쪽두서니과					
<i>Galium spurium</i> 갈퀴덩굴				510	Perennial
Euphorbiaceae 대극과					
<i>Acalypha australis</i> 깨풀		680		680	Annual
Ranunculaceae 미나리아재비과					
<i>Ranunculus sceleratus</i> 개구리자리				170	Perennial
Onagraceae 바늘꽃과					
<i>Ludwigia epilobioides</i> 여뀌바늘		510		680	Annual
Brassicaceae 배추과					
<i>Rorippa palustris</i> 속속이풀	1,700 (19)		6,970 (27)		Perennial
<i>Cardamine flexuosa</i> 황새냉이	1,360 (15)	1,700	510	1,870	Perennial
Poaceae 벼과					
<i>Poa annua</i> 새포아풀	680	63,920(42)	850	2,550	Annual
<i>Eragrostis multicaulis</i> 비노리	1,360(15)		4,760(19)	340	Annual
<i>Digitaria ciliaris</i> 바랭이				3,740	Annual
<i>Alopecurus aequalis</i> 푯새풀	170	28,730(19)			Annual
<i>Eleusine indica</i> 왕바랭이	170			170	Annual
Cyperaceae 사초과					
<i>Fimbristylis littoralis</i> 바람하늘지기				5,440(10)	Annual
<i>Cyperus iria</i> 참방동사니				2,380	Annual
<i>Cyperus difformis</i> 알방동사니	170				Annual
Caryophyllaceae 석죽과					
<i>Stellaria alsine</i> 벼룩나물		48,110(32)		6,460(12)	Perennial
<i>Cerastium glomeratum</i> 유럽점나도나물		850		5,270(10)	Perennial
Portulacaceae 쇠비름과					
<i>Portulaca oleracea</i> 쇠비름	1,020(11)		5,270 (21)	510	Annual
Fabaceae 콩과					
<i>Vicia villosa</i> 벧지		340			Perennial
Scrophulariaceae 현삼과					
<i>Mazus pumilus</i> 주름잎		4,250		14,790(28)	Annual
<i>Lindernia procumbens</i> 발톱외풀		680		2,210	Annual
Number of family	5	8	4	12	
Number of species	11	14	8	20	
Total Seed density (seeds m ⁻²)	9,010	152,150	25,500	52,190	

[†]CP_R, Rice paddy area (R) in Conventional Paddy field (CP); OP_R, Rice paddy area (R) in Organic Paddy field (OP); CP_F, Footpath area (F) in Conventional Paddy field (CP); OP_F, Footpath area (F) in Organic Paddy field (OP). In parentheses, the percentage of emerging species (>10%) is indicated.

Table 5. Soil seed bank density of paddy fields by plant lifespan category and habitat type.

Habitat type	Annual plants (seeds m ⁻²)	Perennial plants (seeds m ⁻²)
CP_R [†]	1,983±397 ^a	1,020±340 ^a
OP_R	33,717±8,479 ^b	17,000±2,892 ^b
CP_F	6,007±409 ^a	2,493±963 ^a
OP_F	12,183±2,652 ^a	5,213±1,340 ^a

[†]CP_R, Rice paddy area (R) in Conventional Paddy field (CP); OP_R, Rice paddy area (R) in Organic Paddy field (OP); CP_F, Footpath area (F) in Conventional Paddy field (CP); OP_F, Footpath area (F) in Organic Paddy field (OP). Different lowercase letters indicate significant differences between treatments (P < 0.05). Data are Mean ± SE.

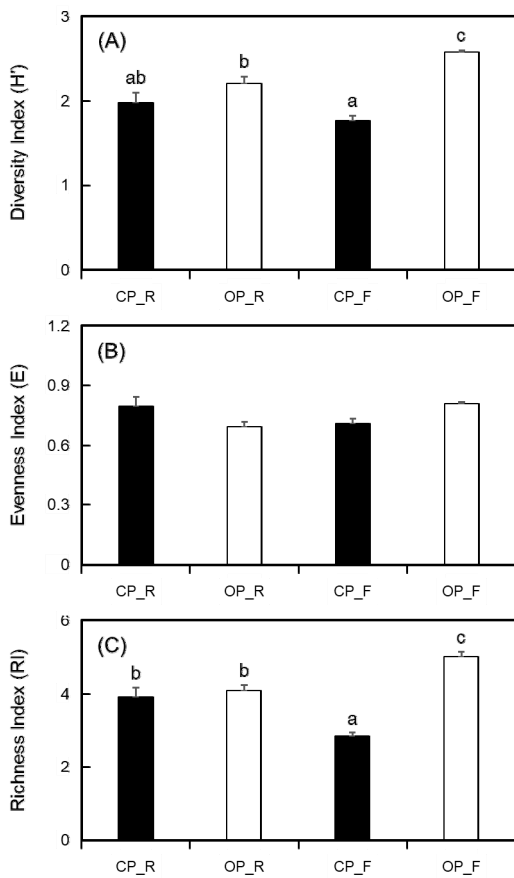


Fig. 3. Species diversity indices of soil seed banks by habitat type in CP and OP. (A) Diversity Index, (B) Evenness Index, (C) Richness Index. CP_R, Rice paddy area (R) in Conventional Paddy field (CP); OP_R, Rice paddy area (R) in Organic Paddy field (OP); CP_F, Footpath area (F) in Conventional Paddy field (CP); OP_F, Footpath area (F) in Organic Paddy field (OP). Different lowercase letters indicate significant differences between treatments (P < 0.05).

출 수 있어 생물다양성 보전이 필요한 서식지에는 Glyphosate와 같은 제초제의 사용을 피하는 것이 중요하다고 강조하였다. 또한, 최근 연구결과에서도 제초제 성분이 남아있는 토양(Glyphosate residues)에서 작물들의 발아 및

성장에 악영향을 준다고 보고하였다 (Helander et al., 2019).

따라서 관행 논 서식지에서는 제초제의 영향으로 종자은행의 밀도가 상대적으로 낮게 출현한 것으로 보이며 출현 식물 종의 구성이 비슷한 이유는 제초제 저항성이 있는 식물이 오랜 기간 살아남은 결과로 인해 식생의 구조가 단순화 되어가는 과정으로 보인다. 반면에 유기 논 서식지에서는 제초제의 영향이 없으므로 토양 종자은행 속에 있는 다양한 식물들이 출현 가능하며 유기 농업을 장기간 실천함에 따라 식물 다양성이 높아지는 방향으로 식물 군집이 형성될 것으로 보인다.

관행 논과 유기 논 서식지 유형에 따라 종자은행의 다양도, 균등도, 풍부도 지수가 다양하게 나타났다 (Fig. 3). 종자은행의 다양도와 풍부도는 유기 논 서식지(OP_F)에서 가장 높게 나타났고, 반면에 관행 논 서식지(CP_F)에서 가장 낮게 나타났다 (P < 0.001). 본답 서식지는 벼 (*Oryza sativa*)를 재배하기 위해 일정 기간 동안 침수 환경을 유지해야 하는 인공 습지이며, 단일(벼) 식생으로 구성된 서식지로 관행 논과 유기 논과의 종 다양성 지수는 비슷하게 나타난 것으로 보인다. 그러나 논두렁 서식지는 작물을 재배하지 않는 공간으로 다양한 식물 종들이 출현 가능하다. 특히 제초제를 사용하는 관행 논두렁에서는 대부분의 식물들이 고사하여 다양도와 풍부도 지수가 가장 낮게 나타났고, 반면에 유기 논두렁에서는 잡초 방제를 위해 화학 제품을 사용하지 않고 물리적 방법과 생물학적 방법으로 논 관리를 하기 때문에 다양한 식물 종들이 출현한 것으로 보인다. 최근 농업생태계의 야생 식물 다양성에 대한 제초제의 영향에 대해 리부한 논문 따르면 (Qi et al., 2016), 농업생태계에서 제초제를 사용하면 제초제에 민감한 식물 종은 감소하며 제초제에 내성이 있거나 저항성이 있는 식물 종은 증가하여 식물 군집의 종 조성을 변화시킨다. 또한, 농업생태계의 야생 식물에 대한 유전적 다양성과 종 다양성을 감소시키며, 식물 기능 그룹이 단순화되어 불안정한 식물 생태계를 형성한다고 보고하였다.

3.3 토양 특성

토양의 물리·화학적 특성은 관행 논과 유기 논 서식지 유형에 따라 다양하게 나타났다 (Table 6). OM, TN, TC의 값은 관행 논두렁에서 가장 낮았고, 반면에 유기 논두렁에서 가장 높았다 (P < 0.001). 선행연구에서는 습지 식물들은 습지 생태계의 양분 순환에 중요한 역할을 수행하며, 토양의 탄소와 질소 농도를 증가시킬 수 있다고 보고했다 (Sollie and Verhoeven, 2008; Sousa et al., 2010). 또한 식물이 없는 나지보다 습지 식물의 밀도와 피도가 높은 서식지에서 TN, TC의 값이 높게 나타났다 (Bang and Lee, 2019). 따라서 본 연구 결과에서 식생이 거의 없는 관행 논두렁에서 OM, TN, TC의 값이 가장 낮게 나타났고, 반면에 유기 논두렁에서는 식물이 상대적으로 많이 출현하여 OM, TN, TC의 값이 높게 나타난 것으로 판단된다. 이리

Table 6. Physico-chemical properties of soils by paddy habitat type.

Soil properties	†CP_R	OP_R	CP_F	OP_F
WC (%)	41.5±1.1 ^b	88.1±1.2 ^c	10.9±0.7 ^a	45.5±1.8 ^b
OM (g/kg)	44.1±1.1 ^{bc}	37.8±2.7 ^{ab}	34.9±1.4 ^a	50.6±0.4 ^c
pH	5.2±0.1	5.6±0.1	6.3±0.5	5.3±0.1
EC (dS/m)	6.8±0.2 ^c	0.8±0.05 ^a	1.7±0.3 ^b	0.9±0.1 ^{ab}
TN (%)	0.25±0.01 ^b	0.22±0.01 ^{ab}	0.21±0.01 ^a	0.28±0.01 ^c
TC (%)	2.6±0.1 ^{bc}	2.2±0.2 ^{ab}	2.0±0.1 ^a	2.9±0.02 ^c
NH ₄ ⁺ (mg/kg)	26.9±1.6 ^b	18.0±1.5 ^a	16.2±1.7 ^a	21.4±1.2 ^{ab}
NO ₃ ⁻ (mg/kg)	7.2±2.4 ^a	2.5±0.9 ^a	41.4±8.3 ^b	10.5±3.7 ^a
P ₂ O ₅ (mg/kg)	40±2.9 ^a	138±10.9 ^b	103±16.8 ^b	148±11.3 ^b
Ex. K (cmol _c /kg)	0.7±0.02 ^b	0.3±0.03 ^a	1.0±0.04 ^c	0.3±0.1 ^a
Ex. Ca (cmol _c /kg)	8.4±0.6 ^b	4.3±0.05 ^a	6.8±0.4 ^b	4.8±0.2 ^a
Ex. Mg (cmol _c /kg)	4.0±0.09 ^b	1.9±0.1 ^a	3.6±0.2 ^b	1.8±0.01 ^a
Ex. Na (cmol _c /kg)	3.5±0.2 ^c	0.4±0.05 ^a	1.7±0.4 ^b	0.3±0.01 ^a
Fe (%)	1.1±0.05 ^b	0.6±0.01 ^a	1.4±0.1 ^c	0.8±0.03 ^a
Mn (mg/kg)	270±7.5 ^c	138±5.2 ^a	374±7.5 ^d	194±6.5 ^b
B (mg/kg)	107±1.5 ^c	48±0.8 ^a	130±2.3 ^d	58±1.2 ^b

† CP_R, Rice paddy area (R) in Conventional Paddy field (CP); OP_R, Rice paddy area (R) in Organic Paddy field (OP); CP_F, Footpath area (F) in Conventional Paddy field (CP); OP_F, Footpath area (F) in Organic Paddy field (OP). Different lowercase letters indicate significant differences between treatments (P < 0.05).

한 결과는 유기물 공급원인 식물의 종류와 성장상태, 분해 정도에 따라 달라질 수 있지만, 식물이 거의 없는 서식지보다는 식물이 출현한 서식지가 유기물과 탄소, 질소 함량이 높게 나타난 것으로 판단된다 (Bang and Lee, 2019). K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, B의 값은 관행 논 서식지 (본답, 논두렁)가 유기 논 서식지(본답, 논두렁)보다 높게 나타났다 (P < 0.001). 이러한 결과는 관행 논 서식지에는 화학 농약과 화학 비료 등의 물질을 사용하지만, 유기 논 서식지는 합성 화학 물질을 사용하지 않고 자연적인 재료를 사용한 결과로 추정된다.

군집 분석(CA)을 통해 논 서식지 유형 간의 4개 그룹의 군집을 확인했다 (Fig. 4). 그룹 CP_R는 관행 논 본답 서식지를 대표하였고, 그룹 CP_F는 관행 논에서 식생이 거의 없는 논두렁 서식지로 구성되었다. 그룹 OP_R는 유기 논 본답 서식지를 포함하였고, 그룹 OP_F는 식생의 피도가 높은 유기 논 논두렁 서식지를 대표했다. 따라서 4개의 서식지는 서로 다른 토양 특성에 의해 군집을 형성하였다. PCA 분석 결과 토양 특성은 또한 4가지 서식지 유형별로 명확하게 분리가 되었다 (Fig. 5). PC1은 데이터 변동의 53.05%를 설명하였고 관행 논과 유기 논은 PC1축에 따라 명확하게 분리되었다. 유기 논 서식지(본답, 논두렁)는 WC, P₂O₅, TN, TC가 긍정적으로 로딩 되었고 반면에 관행 논 서식지(본답, 논두렁)는 NO₃, Mn, Fe, B, Mg, Ca, Na, EC가 긍정적으로 로딩 되었다. PC2는 데이터 변동의 27.51%를 설명하였고 서식지 유형이 다른 본답과 논두렁이 PC2 축에 따라 명확하게 분리되었다. 유기 논 본답

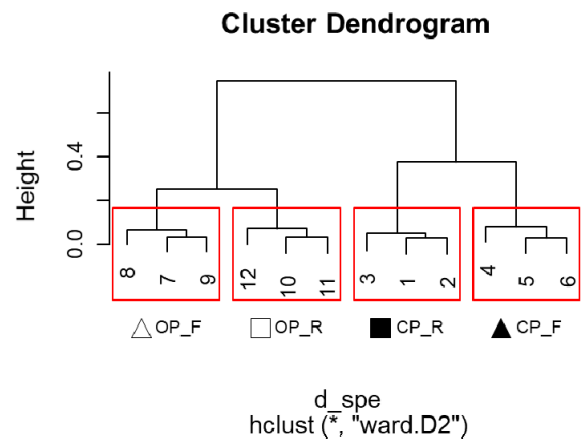


Fig. 4. Cluster Analysis of soil properties for habitat types at the rice paddies in South Korea. CP_R, Rice paddy area (R) in Conventional Paddy field (CP); OP_R, Rice paddy area (R) in Organic Paddy field (OP); CP_F, Footpath area (F) in Conventional Paddy field (CP); OP_F, Footpath area (F) in Organic Paddy field (OP).

서식지는 P₂O₅의 값이 높게 나타났고 논두렁 서식지에서는 WC, OM, TN, TC 값이 높게 나타났다. 관행 논 본답 서식지는 EC, Na, Ca, NH₄⁺ 값이 높게 나타났으며 논두렁 서식지에서는 pH, NO₃⁻ 값이 높게 나타났다. 따라서 CA 분석과 PCA 분석 결과, 토양의 특성에 따라 4개의 서식지 유형으로 분리 가능하며 각각의 서식지는 서로 다른 토양 환경 요인에 의해 영향을 받는다는 것을 확인했다. 이러한 결과는 관행과 유기 재배에 따른 영농 활동이 토양 환경요인에 직간접적으로 영향을 준다는 것을 의미한다.

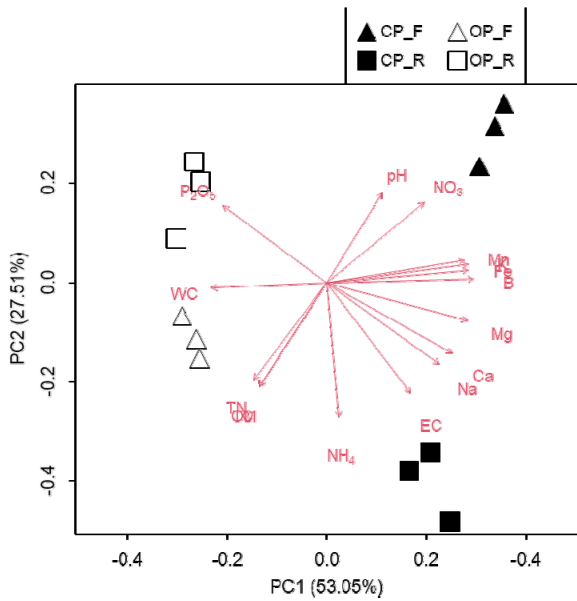


Fig. 5. Principal Component Analysis of soil properties for habitat types at the rice paddies in South Korea. CP_R, Rice paddy area (R) in Conventional Paddy field (CP); OP_R, Rice paddy area (R) in Organic Paddy field (OP); CP_F, Footpath area (F) in Conventional Paddy field (CP); OP_F, Footpath area (F) in Organic Paddy field (OP).

미국 농무부(United States Department of Agriculture, USDA)의 정의에 따르면, 유기농업이란 비료, 살충제, 제초제, 호르몬 등과 같은 합성 화학 물질을 사용하지 않는 농업 방식이다. 유기농업은 토양 환경, 생태계 그리고 인간의 건강을 유지시키려는 농업 생산 시스템으로 생태학적 과정, 생물다양성 보전, 그리고 지역적 환경에 적합한 순환에 기초한다 (NRDC, 2022). 최근 연구 결과에 따르면, 유기농업은 농업생태계 내의 회복탄력성을 증가시켜 기후변화에 대응하기 위한 대안으로 주목을 받고 있으며, 탄소 배출량을 줄이고 토양 환경을 개선하며 수질을 정화하는 등 다양한 생태계 서비스를 제공하고 있다고 보고하였다 (Gamage et al., 2023). 또한, 생물다양성 보전과 자연 순환 원리를 적용한 퇴비화 과정을 통해 건강하고 풍부한 농산물을 생산할 수 있다. 따라서 유기농업의 실천을 통해서 농업생태계를 보전하여 생물다양성 감소와 기후변화와 같은 환경 변화에 대체할 수 있는 방안을 마련할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구는 영농 방식이 다른 관행 논과 유기 논을 대상으로 식생조사와 토양 종자은행 실험을 수행한 결과, 관행 논 의 식생은 단순화되어 종자은행의 식물 다양성이 낮은 반면에, 유기 논 의 식생의 구조는 상대적으로 복잡하여 종자 은행의 식물 다양성이 높게 나타났다. 이러한 결과는 벼 재배 농가에서 유기농업을 오랫동안 실천한 결과가 반영된 것으로 보인다. 토양 특성도 유기 논과 관행 논의 명확한 차이를 보였으며 이러한 결과는 벼 재배 방식에 대한 영농

활동의 차이가 식생과 토양 종자은행의 구조와 다양성에 영향을 주었고 또한 토양 특성에도 영향을 준 것으로 판단 된다.

논습지의 다양한 식물들은 많은 생물들의 먹이와 휴식처를 제공할 수 있으며, 논 생태계 먹이 그물이 안정화되어 건강한 생태계를 조성할 수 있다. 또한 왕우렁이 농법을 통한 생물학적 방제의 경우, 식물 먹이가 부족한 경우 오히려 작물에게 피해를 줄 수 있지만, 다양한 식물 먹이는 왕우렁이뿐만 아니라 수서 생물의 종 다양성도 높일 수 있다. 따라서 논습지에서 유기농업의 실천은 제한된 자원을 순환하고 생태적인 관리를 통해 생물다양성이 보전되어 건강한 생태계를 조성하여 미래 세대들이 직면한 환경 문제들을 해결할 수 있는 방안이 될 수 있다. 본 연구결과는 농업생태계 생물다양성 보전과 생태계 복원 그리고 환경생태적 가치를 평가하기 위한 기초자료로 활용 가능하다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 고유연구개발사업 (과제번호: PJ01677004)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

Bang, J. H., and Lee, E. J. (2019). Differences in crab burrowing and halophyte growth by habitat types in a Korean salt marsh. *Ecological Indicators*, 98, pp. 599–607. [https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.029]

Bang, J. H., Joo, S., Lee, E. J., Kim, M. S., Jeong, S., and Park, S. (2020). Diet of the mud-flat crab *Helice tientsinensis* in a Korean salt marsh. *Wetlands*, 40, pp. 311–319. [https://doi.org/10.1007/s13157-019-01193-4]

Bang, J. H., Kim, M. K., Choi, S. K., Eo, J., Yeob, S. J., and Kim, M. H. (2022). Fish fauna and characteristics of *Misgurnus anguillicaudatus* and *Aphyocypris chinensis* populations in environmentally friendly and conventional paddy fields. *Korean Journal of Environmental Biology*, 40(2), pp. 138–147. [https://doi.org/10.11626/KJEB.2022.40.2.138]

Baumgärtner, S. (2007). The insurance value of biodiversity in the provision of ecosystem services. *Natural Resource Modeling*, 20(1), pp. 87–127. [https://doi.org/10.1111/j.1939-7445.2007.tb00202.x]

Benton, T. G., Vickery, J. A., and Wilson, J. D. (2003). Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in ecology & evolution*, 18(4), pp. 182–188. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00011-9]

Bigwood, D. W., and Inouye, D. W. (1988). Spatial pattern analysis of seed banks: an improved method and optimized sampling. *Ecology*, 69(2), pp. 497–507. [https://doi.org/10.2307/1940448]

- Brock, M. A., and Rogers, K. H. (1998). The regeneration potential of the seed bank of an ephemeral floodplain in South Africa. *Aquatic Botany*, 61(2), pp. 123–135. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770(98)00062-X]
- Bulla, L. (1994). An index of evenness and its associated diversity measure. *Oikos*, 70, pp. 167–171. [https://doi.org/10.2307/3545713]
- Chappell, M. J., and LaValle, L. A. (2011). Food security and biodiversity: can we have both? An agroecological analysis. *Agriculture and human values*, 28, pp. 3–26. [https://doi.org/10.1007/s10460-009-9251-4]
- Chemini, C., and Rizzoli, A. (2003). Land use change and biodiversity conservation in the Alps. *Journal of Mountain Ecology*, 7(1), pp. 1–7.
- Chesson, P., and Huntly, N. (1997). The Roles of Harsh and Fluctuating Conditions in the Dynamics of Ecological Communities. *The American Naturalist*, 150(5), pp. 519–553. [https://doi.org/10.1086/286080]
- Choi, S. H., Nam, H. K., and Yoo, J. C. (2014). Characteristics of population dynamics and habitat use of shorebirds in rice fields during spring migration. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 33(4), pp. 334–343. [http://dx.doi.org/10.5338/KJEA.2014.33.4.334]
- Choi, Y. S., and Kim, J. G. (2022). Seed bank has potential for the restoration of insectivorous plants in Janggun montane wetland. *Ecological Engineering*, 182, p. 106728. [https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106728]
- Gamage, A., Gangahagedara, R., Gamage, J., Jayasinghe, N., Kodikara, N., Suraweera, P., and Merah, O. (2023). Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. *Farming System*, 1(1), p. 100005. [https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100005]
- Gomes, M. P., da Silva Cruz, F. V., Bicalho, E. M., Borges, F. V., Fonseca, M. B., Juneau, P., and Garcia, Q. S. (2017). Effects of glyphosate acid and the glyphosate-commercial formulation (Roundup) on *Dimorphandra wilsonii* seed germination: Interference of seed respiratory metabolism. *Environmental Pollution*, 220, pp. 452–459. [https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.087]
- Gomes, M. P., Richardi, V. S., Bicalho, E. M., da Rocha, D. C., Navarro-Silva, M. A., Soffiatti, P., ... and Sant'Anna-Santos, B. F. (2019). Effects of Ciprofloxacin and Roundup on seed germination and root development of maize. *Science of the Total Environment*, 651, pp. 2671–2678. [https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.365]
- Harwell, M. C., and Havens, K. E. (2003). Experimental studies on the recovery potential of submerged aquatic vegetation after flooding and desiccation in a large subtropical lake. *Aquatic Botany*, 77(2), pp. 135–151. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770(03)00101-3]
- Helander, M., Pauna, A., Saikkonen, K., and Saloniemi, I. (2019). Glyphosate residues in soil affect crop plant germination and growth. *Scientific reports*, 9(1), p. 19653. [https://doi.org/10.1038/s41598-019-56195-3]
- Kang, C. K., Lee, S. B., Lee, B. M., Nam, H. S., Lee, Y. K., Jee, H. J., ... and Choi, J. S. (2011). Herbicidal Activity of Natural Compound Chrysophanic Acid Under the Greenhouse Condition. *Korean Journal of Weed Science*, 31(1), pp. 112–117.
- Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., and Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, 274(1608), pp. 303–313. [https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721]
- Kong, M., An, P., Jung, J., Lee, C., Lee, S., and An, N. (2020). The effect of organic materials application on soil chemical properties and yield of corn in organic upland soil. *Journal of Environmental Science International*, 29(12), pp. 1239–1248.
- Kong, R. K. (2017). A Study on Improving the Regulations for Conservation and Wise use in Rice Fields. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 29(1), pp. 51–63. [http://doi.org/10.13000/JFMSE.2017.29.1.51]
- Korea National Arboretum. (2020). Checklist of Vascular Plants in Korea (Native plants). Korea National Arboretum. Pocheon, Korea, p. 1006.
- Kremer, R. J., Yamada, T., de Camargo e Castro, P. R., and Wood, B. W. (2009). Glyphosate interactions with physiology, nutrition, and diseases of plants: Threat to agricultural sustainability? *European journal of Agronomy*, 31(3), pp. 111–176. [https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.06.004]
- Lee, H., Alday, J. G., Cho, K. H., Lee, E. J., and Marrs, R. H. (2014). Effects of flooding on the seed bank and soil properties in a conservation area on the Han River, South Korea. *Ecological engineering*, 70, pp. 102–113. [https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.04.014]
- Lockwood, J. A. (1999). Agriculture and biodiversity: Finding our place in this world. *Agriculture and Human Values*, 16, pp. 365–379. [https://doi.org/10.1023/A:1007699717401]
- Luo, Y., Fu, H., and Traore, S. (2014). Biodiversity conservation in rice paddies in China: toward ecological sustainability. *Sustainability*, 6(9), pp. 6107–6124. [https://doi.org/10.3390/su6096107]
- Myers, J. P., Antoniou, M. N., Blumberg, B., Carroll, L., Colborn, T., Everett, L. G., ... and Benbrook, C. M. (2016). Concerns over use of glyphosate-based herbicides and risks associated with exposures: a

- consensus statement. *Environmental Health*, 15(1), pp. 1–13. [<https://doi.org/10.1186/s12940-016-0117-0>]
- Nam, H. K., Choi, S. H., Choi, Y. S., and Yoo, J. C. (2012). Patterns of waterbirds abundance and habitat use in rice fields. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 31(4), pp. 359–367. [<http://dx.doi.org/10.5338/KJEA.2012.31.4.359>]
- NIAS. (2000). *Methods of analysis of soil and plant*. National Institute of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea
- NRDC. (2022). *Grow Organic: The climate, health and economic case for expanding organic agriculture*. Nat. Resour. Defence Council., pp. 1–68, USA.
- Ollerton, J., Winfree, R., and Tarrant, S. (2011). How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*, 120(3), pp. 321–326. [<https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18644.x>]
- Qi, Y., Li, J., Yan, B., Deng, Z., and Fu, G. (2016). Impact of herbicides on wild plant diversity in agro-ecosystems: a review. *Biodiversity Science*, 24(2), pp. 228–236. [<https://doi.org/10.17520/biods.2015208>]
- Rasche, L., and Steinhäuser, J. (2022). How will an increase in organic agricultural area affect land use in Germany? *Organic Agriculture*, 12(4), pp. 513–530. [<https://doi.org/10.1007/s13165-022-00405-2>]
- Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., and Habib, R. (2012). Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agronomy for sustainable development*, 32, pp. 273–303. [<https://doi.org/10.1007/s13593-011-0022-4>]
- Sollie, S., and Verhoeven, J. T. (2008). Nutrient cycling and retention along a littoral gradient in a Dutch shallow lake in relation to water level regime. *Water, air, and soil pollution*, 193, pp. 107–121. [<https://doi.org/10.1007/s11270-008-9671-6>]
- Sousa, A. I., Lillebø, A. I., Pardal, M. A., and Caçador, I. (2010). Productivity and nutrient cycling in salt marshes: contribution to ecosystem health. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87(4), pp. 640–646. [<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.03.007>]
- Swift, M. J., Izac, A. M., and Van Noordwijk, M. (2004). Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes—are we asking the right questions? *Agriculture, ecosystems & environment*, 104(1), pp. 113–134. [<https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.013>]
- Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'antonio, C., Dobson, A., Howarth, R., ... and Swackhamer, D. (2001). Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science*, 292(5515), pp. 281–284. [<https://doi.org/10.1126/science.1057544>]
- Yang, X., Baskin, C. C., Baskin, J. M., Pakeman, R. J., Huang, Z., Gao, R., and Cornelissen, J. H. (2021). Global patterns of potential future plant diversity hidden in soil seed banks. *Nature Communications*, 12(1), p. 7023. [<https://doi.org/10.1038/s41467-021-27379-1>]
- Zhao, Y., Wang, G., Zhao, M., Wang, M., and Jiang, M. (2022). Direct and indirect effects of soil salinization on soil seed banks in salinizing wetlands in the Songnen Plain, China. *Science of the Total Environment*, 819, p. 152035. [<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152035>]