Effects of Green Manure-Maize Rotation on Phosphorus Uptake of Crop and Decrease in Phosphorus Accumulation in Organic Upland Soil

Cho-Rong Lee^{1*}, Yura Oh², Kwang-Lai Park¹, Jeong-Lai Cho³, Nan-Hee An¹, and Sang-Min Lee³

¹Researcher, Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

²Assistant Researcher, Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

³Senior Researcher, Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: echrong@korea.kr

ABSTRACT

Received: May 8, 2020

Revised: July 20, 2020

Accepted: July 21, 2020

ORCID

Cho-Rong Lee

<https://orcid.org/0000-0002-4912-8035>

Phosphorus (P) easily accumulates in farmland soil due to their high affinity to cations and clay, and thus their use efficiency of crop is low. Green manure-maize rotation system might be an efficient measure to reduce P accumulation in organic farmland by improving P uptake of crops. This study was conducted to investigate the effects of green manure-maize rotation on P uptake of maize and excess P removal in organic upland soils. Maize mono cropping and green manure-maize rotation systems (barley (B), hairy vetch (H), mixture of B and H) were established in organic farmland, and the experiments were conducted for 2 years without additional nutrients application. Green manure had a significant impact on maize grain production. Maize P uptake increased with the increased rate of hairy vetch seeding. Water soluble P content in soil was further reduced in green manure-maize rotation systems compared to the mono cropping. The results suggest that green manure-maize rotation system (except barley) without nutrient supplement increases P uptake of maize and thus decreases soil P accumulation.

Keywords: Green manure, Green manure-maize rotation, Hairy vetch, Phosphate uptake

Maize P uptake significantly increased with the increased rate of hairy vetch seeding. Water soluble P content in soil was reduced more in green manure-maize rotation system than mono cropping system. CON is mono cropping (no green manure); B is barley single; B2H1, B1H1, and B1H2 were mixture of B and H at the ratio of 2:1, 1:1, and 1:2, respectively; H is hairy vetch single.

Introduction

인은 식물의 필수 원소 중 하나로 핵산, 인지질 등을 구성 (Kang and Choi, 1999)하며 물에 녹아 H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} 이온 형태로 식물에 흡수된다. 하지만 토양에 투입된 인산은 토양 입자와 특이적 흡착 또는 칼슘, 철, 알루미늄 등의 양이온과 침전하여 식물이 이용하기 어려운 난용성 화합물로 고정되기 때문에 작물이용률이 20% 정도로 매우 낮다 (Whitelaw et al., 1999). 인산은 낮은 작물이용률 때문에 일반적으로 농경지에서 과잉시비되고 있으며 (Yang et al., 2000), 토양에 쉽게 집적될 수 있어 적절한 관리가 필요하다.

국내 농경지 발 토양의 평균 유효인산 함량은 2001년 572 mg/kg에서 2012년 627 mg/kg으로 지속적으로 증가하고 있으며, 적정수준인 (300 - 500 mg/kg)보다 과잉 존재하는 농경지가 50%이상 분포 (NIAS, 2017)하여 인산 집적은 국내 농경지 대부분에서 발생하고 있다. 또한 화학비료를 사용하지 않는 국내 유기농경지에서도 인산 함량이 높은 가축분퇴비나 유기질비료의 과다 투입으로 토양 내 인산 집적이 발생 (Cho et al., 2009; Lee et al., 2017)하고 있으며, 이러한 토양 인산 집적은 삼투압 효과, 이온 독성, 미량원소 흡수 방해 등으로 작물 생육 저하 및 수량 감소를 유발할 수 있다 (Bingham and Garber, 1960). 또한 우리나라와 같이 여름철 강우가 집중되는 조건에서는 토양의 유거, 침식, 용탈 등을 통해 수계 부영양화 등 환경에 영향을 줄 수 있다.

인산의 작물이용률을 높이고 토양 집적을 저감하기 위해 질산화작용 억제제 (Chung and Kim, 2010), 규산질비료, 퇴비, 석회 등의 토양개량제 (Lee and Kim, 2006; Suh et al., 2008) 등 다양한 방법들이 연구되었으나, 이미 농경지에 집적된 인산을 효과적으로 제거하기는 쉽지 않다. 이미 집적된 인산의 작물 이용률을 높이기 위해서 합성 유기산이자 킬레이트제인 EDTA나 DTPA를 이용하여 난용성염을 가용화하는 방법 (Kim et al., 2012a)이 국내에 보급되고 있다. 하지만 이러한 화학자재 사용이 불가한 유기농경지에서 활용 가능한 방안을 마련할 필요가 있어 녹비작물을 이용한 윤작체계를 활용하고자 한다.

녹비작물은 생육기간 동안 토양 내 양분을 체내로 저장하고 이후 토양에 환원하여 후작물에 양분을 공급하기 위해 사용되며 (Vaughan and Evanylo, 1998), 공중 질소를 고정하는 콩과작물 (Hwang et al., 2015)과 토양 유기물 축적에 효과적인 화본과작물 (Park et al., 2013)이 있다. 각 작물의 장점을 극대화하고 단점을 최소화 하는 방법 (Crews and Peoples, 2005)으로 콩과작물과 화본과작물의 혼파 재배가 국내외에서 많이 활용되고 있으며, 혼파시 가장 큰 장점은 단위면적 당 생산량 증가 (Yoon et al., 2019)로 알려져 있다.

헤어리베치와 같은 콩과작물을 농경지에 재배하면 공중 질소 고정으로 토양 내 질소 함량이 증가 (Galloway et al., 2004; Vitousek et al., 2013)하고, 증가된 질소를 양분으로 이용하여 토양 내 미생물활성이 증가 (Breulmann et al., 2012)한다고 알려져 있다. 미생물이 분비하는 유기산, 인산가용화효소 등이 집적된 인산을 가용화 (Chauhan et al., 2017)하면 토양내 후작물이 이용할 수 있는 인산이 증가할 수 있다. 또한 녹비작물을 토양에 환원하면 유기물 투입에 의해 토양 미생물체량과 활성이 증가 (Manici et al., 2004; Elfstrand et al., 2007)하고 녹비 체내에 저장된 인산이 녹비작물 분해와 함께 토양으로 공급되면 후작물에 이용되는 양이 증가할 수 있다. 후작물의 인산 흡수량이 증가되면 토양 내 과잉 존재하는 인산 제거에도 기여할 것으로 보이며, 이에 후작물로 흡비력이 뛰어난 것으로 알려진 옥수수를 선정하였다. 본 연구는 유기농경지에서 녹비작물 - 옥수수 윤작 체계가 옥수수의 인산 흡수 증진 및 토양 집적 인산 저감에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행되었다.

Materials and Methods

시험장소 선정 및 녹비작물 재배 본 연구는 전라북도 진안군에 위치한 유기 인증 포장에서 수행되었다. 시험 전 토양 화학성은 pH 7.5, 유효인산 (Lancaster- P_2O_5) 1,773 mg/kg, 유기물 56.6 g/kg, 치환성 칼륨 $1.9\text{ cmol}^+/kg$, 칼슘 $11.2\text{ cmol}^+/kg$, 및 마그네슘 $4.1\text{ cmol}^+/kg$ 로, 인산을 포함한 양분이 집적되어 별도의 양분 공급 없이 녹비작물을 재배하였다.

녹비작물은 화본과작물로 보리 (B)와 콩과작물로 헤어리베치 (H)를 선정하여 2017년부터 2019년까지 2년간 재배하였다. 처리는 2개의 단파구 [보리 단파 (B), 헤어리베치 단파 (H)], 보리와 헤어리베치를 각각 2:1 (B2H1), 1:1 (B1H1), 1:2 (B1H2) 비율로 혼합한 3개 혼합구, 녹비작물을 재배하지 않은 무처리 (CON) 등 총 6개로 구성하고 난괴법으로 각 처리를 3반복씩 배치하였으며, plot size는 $2 \times 5\text{ m}^2$ 로 구성하였다. 녹비작물 파종량은 보리 단파는 160 kg/ha (2년차는 140), 헤어리베치 단파는 90 kg/ha (2년차는 40)로, 혼합구는 Replacement principle (de Wit and Van, 1965)을 따라 B2H1는 B 106 kg/ha + H 30 kg/ha (2년차는 93+13), B1H1는 B 80 kg/ha + H 45 kg/ha (2년차는 70+20), B1H2는 B 53 kg/ha + H 26 kg/ha (2년차는 47+26)로 파종하였다. 2년간 녹비작물 파종 및 토양 환원, 옥수수 정식 및 수확 일은 Table 1과 같으며, 1년차인 2018년은 1-2월 한파로 추파한 녹비작물의 생육이 저조하여 4월 20일에 다시 파종하였다.

옥수수 재배 녹비작물을 수확한 후 트랙터 및 관리기를 이용하여 토양에 환원하였으며, 이후 옥수수를 윤작하였다. 옥수수 품종은 노지 유기 재배에 적합하다고 알려진 대학찰 (2018년)과 찰옥4호 (2019)를 선정하였다 (NIAS, 2014). 2018년은 춘파한 녹비작물을 6월 14일에 수확한 후 6월 19일에 옥수수를 재식 거리 ($60\text{ cm} \times 25\text{ cm}$)에 맞게 정식하고 8월 21일에 수확하였다. 이때 토양에 집적된 양분을 재활용하기 위해 옥수수 재배 전 별도의 시비관리는 수행하지 않았다. 2019년은 녹비작물을 6월 17일에 수확한 후 6월 25일에 옥수수를 정식하고 8월 29일에 수확하였다.

Table 1. Dates of green manure seeding, incorporation, maize planting, and harvest.

	Green manure seeding	Green manure incorporation	Maize planting	Maize harvest
1 st	20 April. 2018	14 Jun. 2018	19 Jun. 2018	21 Aug. 2018
2 nd	19 Oct. 2018	17 Jun. 2019	25 Jun. 2019	29 Aug. 2019

Fig. 1. Daily air temperature (°C) and precipitation (mm) from planting to harvest of maize.

옥수수 재배기간 동안 시험 장소의 평균 및 최고 기온과 강수량은 Fig. 1과 같다. 2018년 옥수수 재배 당시 이랑은 피복하지 않고 고랑만 검정부직포로 피복하고 별도의 관수 없이 재배하였으나, 7-8월 동안 지속적인 폭염과 가뭄으로 옥수수의 생육에 지장이 있을 것으로 판단하여 인위적으로 관수를 수행하였다. 이후 2019년은 검정 비닐로 이랑을 피복하고 고랑은 검정부직포로 피복 후 별도의 관수 없이 옥수수를 재배하였다. 포장 내 잡초 관리는 손 제초를 수행하였으며, 병해충관리는 별도로 수행하지 않았다.

식물체 시료 채취 및 분석 녹비작물의 수량 조사 및 양분 흡수량 분석방법은 다음과 같다. 처리 별로 헤어리베치와 보리를 구분하여 채취하고 70°C에서 2일 이상 건조한 무게를 채취 면적을 기준으로 환산하여 건물 수량(Mg/ha)을 계산하였다. 건조된 시료는 원소분석기(Elmemtar, Variomax, Germany)를 이용하여 T-N(%)를, 60% 질산으로 습식 분해 후 흡광도를 측정하는 Vanadate법으로 T-P(%) 함량을 정량 분석한 후 수량과 곱하여 양분 흡수량(kg/ha)을 계산하였다.

옥수수는 지면에서 5 cm 위를 절단하여 측정된 초장을 기준으로 중간 9주를 선별하였고, 수확한 옥수수는 총 생체량(Mg/ha)을 측정 한 후 포엽을 제거한 이삭을 분리하여 이삭 길이(cm) 및 이삭 수량(Mg/ha)을 측정하였다. 이후 plot 별 세 주씩을 선별하여 70°C에서 건조 후 건물물(%)을 계산 후 총 생체량에 곱하여 건물 수량(Mg/ha)을 계산하였다. 건조한 옥수수는 곱게 갈아 녹비와 동일한 방법으로 T-N(%) 및 T-P(%)을 측정하였다. 옥수수가 흡수한 인산량(kg/ha)은 건물 수량(Mg/ha) × T-P(%)을 이용하여 계산하였다. 옥수수의 인산이용률 지표로써 무처리 대비 녹비작물 처리구의 옥수수 순 인산 흡수량(처리구 인산 흡수량 - 무처리 인산 흡수량)을 계산하였다.

토양 분석 토양은 옥수수 수확 일에 채취하였으며, 7일 이상 풍건 후 2 mm로 체별하여 분석에 사용하였다. 토양 pH 및 유기물함량, 유효인산, 치환성 양이온 함량은 농촌진흥청 종합검정실 분석 매뉴얼(2013)에 준하여 분석하였다. 토양 내 총 인산(Total P_2O_5 , T-P), 작물이 이용 가능한 유효인산(Available P_2O_5), 가용성 인산 중 물에 녹아 작물이 쉽게 이용되는 수용성 인산(Water soluble P_2O_5 , W-P)을 각각 분석하였다. 총 인산은 60% 과염소산으로 습식 분해 후 흡광도를 측정하는 Vanadate법을 이용하여 각각 측정하였다. 수용성 인산은 토양과 증류수를 1:10 (wt:wt)로 희석 후 흡광도를 측정하였다. 측정된 인산의 농도는 토양 깊이 15 cm와 용적밀도 1.25 Mg/m^3 를 적용하여 ha당 무게로 환산하여 제시하였다.

통계 분석 데이터의 통계처리는 SPSS를 이용한 분산분석으로 수행하였고, 95% 수준에서 Duncan's New Multiple Range Test로 유의성 정도를 분석하였다.

Results and Discussion

옥수수 수량 2년간 이삭 길이 및 총 건물 수량은 녹비작물 처리에 영향을 받지 않았으나 이삭 수량은 유의한 영향을 받았다(Table 2). 평균 이삭 길이는 2018년과 2019년에 각각 18.8 cm 및 20.0 cm 로 같은 품종인 대학찰을 유기 재배한 결과(Kim, 2012b)와 찰옥4호를 재배한 연구 결과(Kim et al., 2010; Kim, 2012b; Jung et al., 2012)와 유사하였다.

옥수수 이삭 수량은 2018년 H 단파와 B1H1에서 무처리와 B 단파 대비 유의하게 높았으며, 2019년은 B2H1,

Table 2. Mean (n=3) ear length and yields of maize as affected by green manure treatments; no green manure (CON), barley single (B), barley and hairy vetch 2:1 mixture (B2H1), 1:1 (B1H1), 1:2 (B1H2), and hairy vetch single (H).

Year	2018 (cultivar: <i>Daehakchal</i>)			2019 (cultivar: <i>Chalok-4-ho</i>)		
Contents	Ear length (cm)	Grain yield [†] (Mg/ha)	Total yield (Mg/ha)	Ear length (cm)	Grain yield (Mg/ha)	Total yield (Mg/ha)
CON	19.2ns	7.8b	6.9ns	20.6ns	17.7ab	16.7ns
B	19.4	7.9b	6.8	19.7	15.2b	15.7
B2H1	19.6	8.8ab	7.9	20.4	19.3a	17.2
B1H1	18.2	9.5a	8.3	19.5	18.8ab	17.2
B1H2	17.9	9.3ab	8.1	19.5	19.2a	17.1
H	18.7	9.5a	8.3	20.4	17.7ab	16.5
mean	18.8	8.8	7.7	20.0	18.0	16.7

[†] Grain yield (Mg/ha) is fresh yield of grains including cobs; total yield (Mg/ha) is dry matter yield of total shoots.

Values within columns for each parameter followed by the same lowercase letter were not significantly different based on DMRT significant difference ($\alpha=0.05$).

B1H2에서 B 단파보다 유의하게 높았다. 연차 별 평균 이삭 수량은 2019년 (18 Mg/ha)이 2018년 (8.8 Mg/ha)에 비해 2배 이상 높았으며, 이는 옥수수 재배 전 환원된 녹비의 양이 2018년 1.5 - 3.2 Mg/ha으로 2019년 3.9 - 11.1 Mg/ha 보다 1/3 수준으로 적어 옥수수 수량에 영향을 준 것으로 판단된다.

동일한 품종을 재배한 연구에서 이삭 수량은 대학찰이 8.9 Mg/ha (Kim, 2012b), 찰옥4호는 11.2 - 11.9 Mg/ha (Kim, 2012b; Jung et al., 2012)로 보고되었다. Kim (2012b)는 토양 유기물함량이 0.8%로 비교적 낮은 곳에서 재배 하였으며 Jung et al. (2012)는 토양 분석값을 제시하지 않았으나 수량으로 보아 Kim (2012b)와 유사할 것으로 판단 된다. 본 연구는 양분이 집적된 농경지에서 재배하여 선행 연구보다 높은 수량을 예측하였으나 수량이 높았던 2019년 과 달리 2018년에는 수량이 높지 않았다. 이는 2018년에 옥수수의 생육이 활발한 정식 1달 이후부터 29일간 33°C이 상의 폭염이 지속되었고, 같은 기간 강수량도 평년 강수량 (약 430 mm)의 약 1/9수준인 39 mm으로 낮아 (Fig. 1) 옥수수 생육에 영향을 준 것으로 판단된다. 국립식량과학원 (2015)에 따르면 옥수수 수이삭이 나와서 꽃가루가 날리는 시기에 35°C가 넘는 고온이 계속되면, 임실률이 떨어져 수량이 크게 감소하며, 해당기간 월평균 90 - 120 mm의 비가 와야 하며, 이 시기에 가뭄이 오면 전체적으로 옥수수 수량에 타격이 올 수 있다고 하였다. 이에 토양 내 양분 함량이 높음에도 2018년의 이삭 수량이 높지 않았던 것으로 보이며, 수분 관리를 위해 비닐 피복을 수행한 2019년은 기존 문헌들보다 높은 수량을 보여 추가적인 양분 공급 없이도 토양에 집적된 양분만으로 옥수수 생육이 양호하였음을 알 수 있었다.

옥수수 양분 흡수량 옥수수의 질소 농도와 흡수량 (Table 3)은 녹비작물 처리에 유의한 영향을 받았다 ($p < 0.05$). B 단파는 2년 모두 H 단파 및 혼파처리에 비해 유의하게 낮은 질소 농도를 보였다. 이는 녹비작물에 의해 투입된 질소량 (Table 4)이 B 단파보다 H 단파 및 혼파처리 (2019년 B1H1 제외)에서 유의하게 높았고 질소 고정을 하는 헤어리베치 환원으로 공급된 질소를 옥수수가 더 많이 이용했기 때문으로 보인다.

옥수수의 인산 농도 (Fig. 2a)는 녹비작물 처리에 의해 유의한 영향을 받았다 ($p < 0.05$). 2018년에는 H 단파의 옥수수 인산 농도가 가장 높았으며, B1H2의 옥수수 인산 농도는 무처리 대비 유의하게 높았다. 2019년은 B1H2의 인산 농

Table 3. Mean (n=3) nitrogen concentration (g/kg) and uptake (kg/ha) of maizes as affected by green manure treatment; no green manure (CON), barley single (B), barley and hairy vetch 2:1 mixture (B2H1), 1:1 (B1H1), 1:2 (B1H2), and hairy vetch single (H).

Treatment	N concentration (g/kg)		N uptake (kg/ha)	
	2018	2019	2018	2019
CON	10.6ab	8.5ab	73bc	143ab
B	10.6b	7.8b	71c	122b
B2H1	11.0a	10.0a	87a	173a
B1H1	10.2a	9.7a	84abc	167a
B1H2	10.6a	10.1a	85ab	173a
H	9.9a	9.8a	81abc	163a

Values within columns for each year followed by the same lowercase letter were not significantly different based on DMRT significant difference ($\alpha=0.05$).

Table 4. Mean (n=3) dry matter yield (Mg/ha), nitrogen and phosphate contents (kg/ha) of green manure; barley single (B), barley and hairy vetch 2:1 mixture (B2H1), 1:1 (B1H1), 1:2 (B1H2), and hairy vetch single (H).

Year	2018			2019		
	dry matter (Mg/ha)	N (kg/ha)	P ₂ O ₅ (kg/ha)	dry matter (Mg/ha)	N (kg/ha)	P ₂ O ₅ (kg/ha)
B	1.5b	36b	12b	3.9b	57c	27ab
B2H1	2.9a	111a	17a	8.8ab	237b	41ab
B1H1	3.1a	115a	17a	4.2b	154bc	21b
B1H2	3.0a	113a	16a	11.1a	408a	52a
H	3.2a	122a	18a	8.9ab	223b	48ab

Values within columns for each nutrient followed by the same lowercase letter were not significantly different based on DMRT significant difference ($\alpha=0.05$).

도가 무처리에 비해 유의하게 높았다. 옥수수의 인산 농도는 2년 연속 헤어리베치 비율이 높은 처리에서 높은 경향을 보였다. 이는 녹비작물에 의해 투입된 인산량 (Table 4)이 2018년은 H 단파 및 혼파 (16 - 18 kg P₂O₅ /ha)가 B 단파 (12 kg/ha)에 비해 유의하게 높았으며, 2019년은 B1H2 (52 kg/ha)가 B1H1 (21 kg/ha)보다 유의하게 높았고, C/N률이 상대적으로 낮고 이분해성인 헤어리베치 (Choi, 2010)가 보리보다 빠르게 분해되어 옥수수 인산 농도에 영향을 준 것으로 보인다. 또한 같은 포장에서 수행된 연구결과에서 헤어리베치 재배 시 토양의 인산가용화효소 활성 증진에 의해 수용성인산 함량이 유의하게 증가 (Lee, 2020)하였는데, 토양내 증가한 가용성인산 역시 옥수수의 인산 농도 증가에 영향을 준 것으로 판단된다.

인산 흡수량은 녹비작물 처리에 유의하게 영향을 받았다 (Fig. 2b). 2018년에는 무처리보다 H 단파에서 유의하게 높았으며, H 단파는 무처리, B 단파, B2H1보다 유의하게 높았다. 2019년에는 무처리보다 B1H2에서 유의하게 높았으며, B1H2는 무처리, B 단파, B2H1보다 유의하게 높았다. 옥수수의 인산 흡수량 (kg/ha)은 녹비작물 재배로 가용화된 인산과 토양에 투입된 녹비가 분해되면서 공급한 인산을 옥수수가 더 많이 이용하였기 때문에 녹비작물 처리에서 증가한 것으로 보인다.

옥수수의 순 인산 흡수량은 헤어리베치 비율이 높아질수록 증가하는 경향을 나타냈다 (Fig. 3a). 순 인산 흡수량은

Fig. 2. P_2O_5 concentration (g/kg) and uptake (kg/ha) of maize as affected by green manure treatment; no green manure (CON), barley single (B), barley and hairy vetch 2:1 mixture (B2H1), 1:1 (B1H1), 1:2 (B1H2), and hairy vetch single (H).

Values for each year followed by the same lowercase letter were not significantly different based on DMRT significant difference ($\alpha=0.05$).

Fig. 3. Net P_2O_5 uptake of maize and cumulative P_2O_5 removal amount (kg/ha) by maize as affected by green manure treatment; no green manure (CON), barley single (B), barley and hairy vetch 2:1 mixture (B2H1), 1:1 (B1H1), 1:2 (B1H2), and hairy vetch single (H).

Values within each year for maize phosphate uptake and within each treatment for water soluble phosphate followed by the same lowercase letter were not significantly different based on DMRT significant difference ($\alpha=0.05$).

무처리 대비 녹비작물 재배에 의해 증가된 옥수수의 인산 흡수량으로 별도의 양분 투입 없이 녹비작물 - 옥수수 윤작 재배를 통해 기존에 토양에 존재하던 양분을 재활용하는 것만으로도 옥수수의 인산 흡수량을 최대 25 kg P_2O_5 /ha까지 증가시킬 수 있었다. 또한 2년 연속 녹비작물 - 옥수수 윤작 재배 시 옥수수 체내로 흡수된 인산을 누적하여 계산한 결과 (Fig. 3b), 옥수수를 단작한 무처리 (CON) 대비 녹비윤작구에서 최대 41.1 kg P_2O_5 /ha까지 증가하였으며 무처리와 B단파보다 B1H2, H단파에서 유의하게 높아 옥수수의 인산 흡수 증진에 효과적인 것으로 나타났다.

토양 인산 함량 2년간 녹비작물 - 옥수수를 윤작 재배한 결과, 토양의 pH, 치환성 칼륨 및 마그네슘 함량은 시험

Table 5. Mean (n=3) soil pH, contents of organic matter and exchangeable cation before experiment and after 2 years; no green manure (CON), barley single (B), barley and hairy vetch 2:1 mixture (B2H1), 1:1 (B1H1), 1:2 (B1H2), and hairy vetch single (H).

Treatment	pH	OM (g/kg)	Exchangeable cation (cmol+/kg)		
			K	Ca	Mg
before	7.5	56.6	1.9	11.2	4.1
CON	7.0 ^{ns}	58.5 ^{ns}	1.2 ^{ns}	12.0 ^c	3.4 ^{ns}
B	7.1	57.6	1.1	12.3 ^{bc}	3.3
B2H1	7.1	58.4	1.3	12.6 ^{bc}	3.5
B1H1	7.0	60.0	1.2	12.7 ^{bc}	3.8
B1H2	7.0	59.4	1.2	12.9 ^b	3.7
H	7.0	59.0	1.4	13.9 ^a	3.7

Values within column for each parameter followed by the same lowercase letter were not significantly different based on DMRT significant difference ($\alpha=0.05$).

Fig. 4. Mean (n=3) soil total and available P₂O₅ contents after green manure-maize rotation. Values within each treatment followed by the same lowercase letter were not significantly different based on DMRT significant difference ($\alpha=0.05$).

Fig. 5. Mean (n=3) soil water soluble P₂O₅ contents after green manure-maize rotation. Values within each treatment followed by the same lowercase letter were not significantly different based on DMRT significant difference ($\alpha=0.05$).

전에 비해 다소 감소하였으며, 이는 옥수수가 토양 내 양분을 흡수하였기 때문으로 보인다. 반면 토양 유기물 및 치환성 칼슘은 다소 증가하였는데, 이는 녹비 환원으로 토양내 유기물 함량이 증가한 것으로 판단된다 (Table 5).

같은 기간 토양 인산 함량 변화를 조사한 결과, 무처리는 연차 별로 총 인산과 유효 인산의 변화가 없었다. 반면 녹비작물 - 옥수수 윤작 처리는 총 인산 및 유효 인산이 최대 32.7%, 17.2% 감소하여 연차 별로 인산의 유의한 감소 (B1H2 제외)가 발생하였다 (Fig. 4). 또한 물에 녹아 수계로 유출되어 부영양화를 유발 할 우려가 있는 수용성인산은 B 단파에서 48%, 혼파처리에서 51 - 56%, H 단파에서 66% 감소 (Fig. 5)하여 녹비작물 - 옥수수 윤작 재배만으로 유기농경지에 집적된 인산을 효과적으로 제거할 수 있었다.

Conclusions

녹비작물 - 옥수수 윤작 재배가 옥수수의 인산 흡수 증진 및 토양 내 과잉 인산 저감에 미치는 영향을 조사하기 위하여 2018년과 2019년 2년동안 녹비작물로 B 및 H 단파, B와 H를 2:1, 1:1, 1:2 비율로 혼파 재배 후 옥수수를 윤작한 결과는 다음과 같다. 2년간 추가적인 양분 공급 없이 녹비작물을 이용하여 토양에 집적된 양분을 재활용하는 것 만으로도 옥수수 수량 확보가 가능하였으며, 녹비작물 처리는 옥수수 알곡 수량에 유의한 영향을 미쳤다 ($p < 0.05$). 옥수수의 인산 흡수량은 헤어리베치 혼파 비율이 높을수록 증가하는 경향을 보였으며, 이는 콩과작물인 헤어리베치 재배로 가용화 된 인산과 녹비 환원으로 공급된 인산 및 질소에 영향을 받은 것으로 보인다. 2년간 녹비작물 - 옥수수 윤작 재배 후 토양 내 총 인산 및 유효 인산은 유의하게 감소 (B1H2 제외)하였으며, 수용성인산의 제거율은 무처리보다 녹비 - 옥수수 윤작구에서 48 - 66%로 높았다. 결론적으로 보리와 헤어리베치를 활용한 녹비작물 - 옥수수 윤작 체계는 추가적인 양분 공급 없이 옥수수의 인산 흡수량을 높이고, 토양 내 과잉 인산 저감에 효과적이었으며 그 효과는 녹비종류별로 상이하였다. 이러한 결과는 인산이 집적된 유기농경지에서 화학자재의 사용 없이 녹비작물 - 옥수수를 윤작 재배함으로써 토양 내 존재하는 과잉 인산을 효과적으로 저감할 방안으로 활용될 것으로 기대된다.

Acknowledgement

This study was conducted by the support of “Research Program for Agricultural Science and Technology Development (Project No. PJ012684032019)”, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Bingham, F.T. and M.J. Garber. 1960. Solubility and availability of micronutrients in relation to phosphorus fertilization. *Soil Sci Soc Am J.* 24:209-213.
- Breulmann, M., E. Schulz, K. Weißhuhn, and F. Buscot. 2012. Impact of the plant community composition on labile soil organic carbon, soil microbial activity and community structure in semi-natural grassland ecosystems of different productivity. *Plant Soil.* 352:253-265.
- Chauhan, A., S. Guleria, P.P. Balgir, A. Walia, R. Mahajan, P. Mehta, and C.K. Shirkot. 2017. Tricalcium phosphate solubilization and nitrogen fixation by newly isolated *Aneurinibacillus aneurinilyticus* CKMV1 from rhizosphere

- of *Valeriana jatamansi* and its growth promotional effect. *Braz. J. Microbiol.* 48:294-304.
- Cho, H.J., S.W. Hwang, K.H. Han, H.R. Cho, J.H. Shin, and L.Y. Kim. 2009. Physicochemical properties of upland soils under organic farming. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(2):98-102.
- Choi, B.S., J.A. Jung, M.K. Oh, S.H. Jeon, H.G. Goh, Y.S. Ok, and J.K. Sung. 2010. Effects of green manure crops on improvement of chemical and biological properties in soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(5):650-658.
- Chung, J.B. and B.H. Kim. 2010. Effect of nitrification inhibition on soil phosphate release and nutrient absorption and growth of rice plant. *Korean J. Environ Agric.* 29(4):336-342.
- Crews, T.E. and M.B. Peoples. 2005. Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer-based agroecosystem? A review. *Nutr Cycl Agroecosyst.* 72:101-120.
- de Wit, C.T. and J.P. Van den Bergh. 1965. Competition between herbage plants. *Neth. J. Agric. Sci.* 13:212-221.
- Elfstrand, S., K. Hedlund, and A. Martensson. 2007. Soil enzyme activities, microbial community composition and function after 47 years of continuous green manuring. *Appl Soil Ecol.* 35:610-621.
- Galloway, J.N., F.J. Dentener, D.G. Capone, E.W. Boyer, R.W. Howarth, S.P. Seitzinger, G.P. Asner, C. Cleveland, P. Green, and E. Holland. 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry.* 70:153-226.
- Hwang, H.Y., G.W. Kim, Y.B. Lee, P.J. Kim, and S.Y. Kim. 2015. Improvement of the value of green manure via mixed hairy vetch and barley cultivation in temperate paddy soil. *Field Crop Res.* 183:138-146.
- Jung, G.H., J.E. Lee, J.H. Seo, S.L. Kim, D.W. Kim, J.T. Kim, T.Y. Hwang, and Y.U. Kwon. 2012. Effects of seeding dates on harvesting time of double cropped waxy corn. *Korean J. Crop Sci.* 57(2):195-201.
- Kang, S.C. and M.C. Choi. 1999. Solid culture of phosphate solubilizing fungus, *Penicillium* sp. PS-113. *Korean J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* 27:1-1.
- Kim, M.S., Y.H. Kim, M.Y. Roh, S.S. Kang, H.B. Yoon, and H.Y. Lee. 2012a. Effect of chelating agents on the growth of chinese cabbage and availability of nutrients in plastic film house soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6):949-954.
- Kim, T.H. 2012b. Study on organic agriculture of fresh waxy maize by use of green manure crop. Master Thesis. Dankook University.
- Kim, S.K., T.W. Jung, Y.Y. Lee, D.Y. Song, H.S. Yu, C.W. Lee, Y.G. Kim, J.E. Lee, C.G. Kwak, and S.K. Jong. 2010. Effect of nursery stage and plug cell size on growth and yield of waxy corn. *Korean J. Crop Sci.* 55(1):24-30.
- Lee, C.R., J.H. Ok, M.S. An, S.B. Lee, K.L. Park, S.G. Hong, M.G. Kim, and C.B. Park. 2017. Soil chemical properties of long-term organic cultivation upland. *Korean J. Org. Agric.* 25(1):161-170.
- Lee, C.R., K.L. Park, J.L. Cho, Y.R. Oh, S.M. Lee, and N.H. An. 2020. The Effects of barley-hairy vetch mixtures on green manure productivity and soil phosphorus solubilization. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53(2):118-127.
- Lee, Y.B. and P.J. Kim. 2006. Effects of silicate fertilizer on increasing phosphorus availability in salt accumulated soil during Chinese cabbage cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(1):8-14.
- Manici, L.M., F. Caputo, and V. Babini. 2004. Effect of green manure on *Pythium* spp. population and microbial communities in intensive cropping systems. *Plant Soil.* 263:133-142.
- NIAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2014. Manual of organic soybean, wheat, corn cultivation. National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Suwon, Korea.
- NIAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2017. Monitoring project on agri-environmental quality in Korea. National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Jeonju, Korea.
- NICS (National Institute of Crop Science). 2015. Maize - agricultural technology guideline 35. National Institute of Crop Sciences, RDA, Jeonju, Korea.
- Park, J.H., S.T. Lee, D.C. Seo, S.H. Kim, H.C. Kim, S.W. Lee, J.S. Cho, and J.S. Heo. 2013. Effect of hairy vetch and

- crimson clover on the yield of carrot and soil physico-chemical properties in carrot-green manure crops rotation. *J. Agri. and Life Sci.* 47(6):101-109.
- RDA (Rural Development Administration). 2013. Comprehensive laboratory analysis manual. RDA, Suwon, Korea.
- Suh, J.S., H.J. Noh, and J.S. Kwon. 2008. Effects of amendments on the phosphate-solubilizing bacteria in rice paddy soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41(5):342-347.
- Vaughan, D.J. and G.K. Evanylo. 1998. Com response to cover crop species, spring desiccation time, and residue management. *Agron J.* 90:536-544.
- Vitousek, P.M., D.N. Menge, S.C. Reed, and C.C. Cleveland. 2013. Biological nitrogen fixation: rates, patterns and ecological controls in terrestrial ecosystems. *Philos Trans R Soc B Biol Sci.* 368:20130119.
- Whitelaw, M.A., T.J. Harden, and K.R. Helyar. 1999. Phosphate solubilization in solution culture by the soil fungus *Penicillium radicum*. *Soil Biol. Biochem.* 31:655-665.
- Yang, J.E., S.H. Lee, C.J. Park, J.J. Kim, and K.B. Lee. 2000. Utilization of residual phosphate in the plastic film house soils. *J. Agr. Sci.* 11:120-128.
- Yoon, Y.E., J.H. Kim, and Y.B. Lee. 2019. Evaluation of barley-hairy vetch mixed cropping as green manure for biomass and nitrogen production. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52(1):70-75.