The Effects of Barley-Hairy Vetch Mixtures on Green Manure Productivity and Soil Phosphorus Solubilization

Cho-Rong Lee^{1*}, Kwang-Lai Park¹, Jeong-Lai Cho², Yura Oh³, Sang-Min Lee², and Nan-Hee An¹

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

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

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

*Corresponding author: echrong@korea.kr

ABSTRACT

Received: March 6, 2020

Revised: May 5, 2020

Accepted: May 7, 2020

ORCID

Cho-Rong Lee

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

Soil phosphate accumulation has been problems in some organic farmlands in Korea. This study was conducted to solubilize the accumulated phosphate in organic upland soils using green manure mixtures as substitute for chemical materials (EDTA etc.). We investigated the effects of barley-hairy vetch mixtures on the productivity of biomass and nutrient and the solubilization of soil phosphate. Treatments were barley single (B), hairy vetch single (H), mixtures of B and H at the ratio of 2:1 (B2H1), 1:1 (B1H1), 1:2 (B1H2), and control (CON). Green manures were cultivated on phosphate accumulated soils ($>1,000$ mg Lancaster P_2O_5 kg^{-1}) for 3 years. Mixtures were more effective for stable production of yields and nutrient than B or H, because dry matter yields of green manures were more variable in B and H single. The quality of B as green manure improved in mixtures, because the C/N ratio of B in mixture increased less than B single. In addition, H was effective for phosphate solubilization, as water soluble phosphate contents of H single (2017 and 2019) and mixtures (2019) were significantly higher than B single (2017 and 2019) and CON (2019) despite of phosphate uptake by green manures. Therefore, barley-hairy vetch mixtures could be useful considering green manure productivity and phosphate solubilization in phosphate accumulated upland soils.

Keywords: Barley, Green manure, Hairy vetch, Organic farming, Phosphate solubilization

Mean ($n = 3$) soil water soluble phosphate affected by green manure treatment ($kg\ ha^{-1}$); 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).

Introduction

비료의 3요소(N-P-K) 중 하나인 인산은 식물의 광합성, 호흡, 에너지 전달, 세포분열 등 다양한 생리적 기능을 갖는 필수 원소 중 하나이다(Karamesouti, 2017). 하지만 토양 내에서 토양 입자와 특이적으로 흡착되거나, 칼슘, 철, 알루미늄 등 양이온과 침전하여 식물이 이용하기 어려운 형태로 고정되기 때문에 작물이용률이 20% 정도로 매우 낮다. 농업현장에서는 낮은 이용률 때문에 일반적으로 과잉시비되는 경향이 있고(Yang, 2000), 농경지에 과잉 시비된 인산은 토양에 쉽게 집적될 수 있어 적절한 관리가 필요하다.

농경지에 인산이 집적되는 현상은 유기농경지에서도 발생하고 있다. 국내 유기농 밭 토양($n = 51$) 특성을 분석한 결과, 유효인산 평균 함량은 적정 범위($300 - 500 \text{ mg kg}^{-1}$)보다 높은 728 mg kg^{-1} 이었으며, $1,000 \text{ mg kg}^{-1}$ 이상인 농가도 27%이상으로 보고되었다(Lee, 2017). 화학 자재의 투입이 제한된 국내 유기농경지에서는 가축분퇴비나 시판되는 유기질비료 등을 이용하여 토양양분관리를 하고 있으며, 이 중에서도 인산함량이 높은 자재(가축분퇴비, 유기질비료 등)의 투입량이 많아 토양 인산집적이 발생하고 있다(Cho, 2009; Lee, 2017).

토양 내 인산 집적은 작물 생산성 뿐 아니라 토양, 수질 등 농업 환경에 영향을 줄 수 있어 적절한 관리가 필요하지만, 농경지에 집적된 인산을 효과적으로 제거하기는 쉽지 않으며 국내에서는 EDTA 등의 킬레이트제를 이용하여 난용성염을 가용화하는 방법(Kim, 2012)이 사용되고 있다. 하지만 유기농경지에서는 이러한 자재의 사용이 불가하여 대체 방안을 마련할 필요가 있다.

동계 녹비작물은 일반적으로 가을에 파종하고 이듬해 봄에 토양에 환원하여 작물에 양분을 공급하기 위해 사용된다. 녹비작물은 크게 토양 유기물축적(Park, 2013)에 효과적인 화본과작물(예: 보리, 호밀, 수단그라스 등)과 질소고정능력(Hwang, 2015)이 있는 콩과작물(예: 헤어리베치, 자운영, 크로버 등) 2종류로 나눌 수 있다. 대기 중 질소를 고정하는 콩과작물을 농경지에 재배하면 토양 내 질소 함량이 증가(Galloway, 2004; Vitousek, 2013)하고, 증가된 질소를 양분으로 이용하여 토양 내 미생물활성이 증가할 수 있다(Breulmann, 2012). 그 중 인산가용화효소(Phosphatase)를 분비하는 미생물의 활성이 증가되면 토양에 존재하는 과잉의 유기태인산이 무기태인산으로 가용화될 수 있다. 인산가용화효소는 유기태 인산을 가수분해하는 효소를 말하며 그 중 Phosphodiesterase는 알콜, 페놀, 핵산기를 가진 유기태 인산을 가수분해하며 식물과 미생물이 분비한다(Leake, 1996; Turner, 2005). 또한 토양 내 핵산을 분해하는 능력이 있어 토양 내 인산 순환에 중요한 작용을 한다(Hayano, 1977; Margesin, 1994).

국내 녹비작물 관련 연구는 주로 녹비의 토양 환원에 따른 질소 공급 효과에 중점을 두고 있으며 녹비작물 재배에 따른 토양 인산의 변화에 대한 연구는 거의 수행된 바 없다. 국내에서 녹비작물 재배 시 겨울철 환경조건이 수량에 영향을 줄 수 있어 헤어리베치의 안정적인 수량 확보를 위하여 호밀이나 보리와 같은 화본과작물과 혼파를 추천(Jeon, 2009; Jeon, 2011; Kim, 2011)하고 있다.

본 연구는 인산이 집적된 유기농경지에서 헤어리베치와 보리의 혼파 재배가 녹비작물의 수량, 양분 생산성 및 인산가용화에 미치는 영향을 평가하여 집적된 인산을 효율적으로 활용하고자 하였다.

Materials and Methods

실험장소 선정 본 연구는 토양 유효인산(Lancaster- P_2O_5)이 $1,000 \text{ mg kg}^{-1}$ 이상 집적(Table 1)된 전라북도 진안군에 위치한 유기농 인증 포장에서 수행되었다. 해당 농가는 우분, 왕겨, 톱밥으로 자가제조한 무항생제 우분퇴비

와 시판 유기농업자재(유박류)를 이용하여 지속적으로 토양·양분 관리를 하고 있었으며 2004년부터 유기농업을 실천해왔다. 시험이 수행되기 전인 2016년 해당 농경지에서는 자색보리 재배 후 옥수수와 콩을 재배하였고, 녹비작물을 파종하기 전 11월에 콩과 옥수수 잔사를 제거하였다.

녹비작물 재배 시험에 사용된 녹비작물은 화본과작물인 보리(B)와 콩과작물인 헤어리베치(H)로, 보리(미향)는 국립식량과학원에서 시험연구용을 분양 받아 사용하였고 헤어리베치는 국내에 보급되는 일반 품종을 구매하여 사용하였다. 처리는 2개의 단파구(보리 단파(B), 헤어리베치 단파(H)), 보리와 헤어리베치를 각각 2:1(B2H1), 1:1(B1H1), 1:2(B1H2) 비율로 혼파한 3개 혼파구와 녹비작물을 재배하지 않은 무처리(CON) 등 총 6개로 구성하고, 난괴법 3반복으로 배치하였다. 녹비작물 파종은 별도의 양분 공급 없이 2016년 11월, 2017년 10월, 2018년 10월에 수행하였으며, 2년차인 2018년은 1 - 2월동안 녹비작물 월동이 저조하여 4월에 재파종을 실시하였다. 파종량은 보리 단파는 160 kg ha^{-1} (3년차는 140), 헤어리베치 단파는 90 kg ha^{-1} (3년차는 40)로, 혼파구는 각 작물의 단파 파종량을 기준으로 하여 혼파 비율만큼 감량하는 Replacement principle (de Wit, 1965)에 준하여 파종하였다 (Table 2).

식물체 분석 보리와 헤어리베치의 혼파가 녹비작물의 수량 및 양분 함량에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 영양생장이 다시 시작된 후 녹비작물을 채취하였다. 채취 시기는 2017년 4월 28일, 5월 4일, 5월 11일, 5월 19일, 6월 2일로 보리와 헤어리베치를 분리하여 T-C (%), T-N (%), T- P_2O_5 (%)을 분석하였다.

또한 3년간 녹비작물의 수량과 양분 함량을 분석하였다. 조사시기는 2017년 5월 11일, 2018년 6월 14일, 2019년 6월 17일로 처리 별로 일정 면적 내 녹비작물을 전량 수확하여 헤어리베치와 보리를 구분하여 생체량을 쟀 후 70°C 에서 2일 이상 건조하여 수분을 제거한 건물중을 측정하였다. 측정된 건조 무게를 채취 면적을 기준으로 환산하여 건물수량 (Mg ha^{-1})을 계산하였다. 이후 건조 시료를 곱게 갈아 원소분석기 (Elementar, Variomax, Germany)를 이용하여 T-C (%)와 T-N (%)를, 60% 질산으로 습식분해 후 UV-Vis spectrophotometer (SHIMADZU, UV-2600, Japan)를 이용하여 420 nm에서 흡광도를 측정하는 Vanadate법으로 T- P_2O_5 (%)을 정량 분석한 후 건물수량과 곱하여 양분함량 (kg ha^{-1})을 계산하였다.

Table 1. Soil characteristics at the experiment site.

pH	Organic matter	Available P_2O_5	Exchangeable cation ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)			Soil texture
	g kg^{-1}	mg kg^{-1}	K	Ca	Mg	
7.5	56.6	1,773	1.78	11.2	4.1	Sandy Loam

Soil pH was measured in a 1:5 wt/wt soil : water ; Organic matter was analyzed for total carbon concentration by combustion and then multiply 1.72 ; Available phosphate was extracted using Lancaster procedure ; Exchangeable cations were extracted with 1 N ammonium acetate (pH 7.0) and quantified using an inductively coupled plasma (ICP).

Table 2. Seeding rate of green manure in treatments (kg ha^{-1}).

Year (yyyy.mm.dd)	Control	Single		Mixture		
	CON	B	H	B2H1	B1H1	B1H2
1st (2016.11.04.)	0	160	90	106 + 30	80 + 45	53 + 60
2nd (2018.04.20.)	0	160	90	106 + 30	80 + 45	53 + 60
3rd (2018.10.19.)	0	140	40	93 + 13	70 + 20	47 + 26

토양 분석 녹비작물 재배가 토양 인산 가용화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 녹비작물 수확 당일 채취하여 7 일 이상 풍건한 토양을 2 mm 체별 후 분석에 사용하였다. 토양 내 총 인산 (Total P_2O_5 , T-P), 작물이 이용 가능한 인산을 나타내는 유효인산 (Available P_2O_5), 가용성 인산 중 물에 녹아 작물이 쉽게 이용되는 수용성 인산 (Water soluble P_2O_5 , W-P) 그리고 불용태 인산을 각각 분석하였다. 총 인산은 Vanadate법, 유효인산은 Lancaster법으로 분석하였다. 수용성 인산은 풍건 토양 2 g에 증류수 20 ml를 넣고 진탕 후 6,000 rpm에서 원심분리 및 0.45 μm 필터로 여과 후 720 nm에서 흡광도를 측정하였다. 불용태 인산은 총 인산함량에서 유효인산함량을 빼서 계산하였다. 단위 면적당 인산 함량은 토양 깊이 15 cm를 기준으로 용적밀도 1.25 $Mg\ m^{-3}$ 를 적용하여 환산하였다. 녹비작물 재배 후 토양 수용성 인산의 증가가 생물학적인 요소에 의한 것인지 알아보기 위하여 유기태 인산을 무기화시키는데 관여하는 효소 중 하나인 phosphodiesterase (PDE)의 활성을 분석 (Tabatabai, 1969)하였다. 녹비작물을 재배한 토양 내 존재하는 미생물의 난용성 인산 가용화능력을 측정하기 위해서 습토로 10^3 희석수를 만든 후 멸균한 액체 NBRIP배지 (Nautiyal, 1999)에 토양 희석수를 300 μl 넣고 30°C에서 160 rpm 교반하며 6일간 배양하였다. 이후 4°C, 10,000 rpm에서 원심 분리한 상등액을 720 nm에서 흡광도를 측정하여 토양 미생물에 의해 가용화 된 인산량을 측정하였다.

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

Results and Discussion

녹비작물 수량 3년 동안 녹비작물의 총 수량은 연차 간, 처리 간 변동이 컸다 (Fig. 1). 3년간 전체 녹비작물 처리의 평균 건물 수량은 4.8 $Mg\ ha^{-1}$ 로, 2019년에 7.4 $Mg\ ha^{-1}$ 로 가장 높았고, 2017년 4.4 $Mg\ ha^{-1}$, 2018년에 2.8 $Mg\ ha^{-1}$ 로 가장 낮았다. 겨울철 환경조건에 영향을 받는 녹비작물의 특성상 노지재배 시 매년 동일한 수량을 확보하기는 쉽지 않은 실정이다. 본 연구에서도 1 - 2월 최저기온이 평년대비 -6 ~ -9°C 낮았던 2018년 (Fig. 2)에 생육재생기 이후 녹비작물의 생육이 불량하였다. 이에 부득이 4월 20일 포장을 다시 조성하여 6월 14일까지 재배하였으며, 그 결과 녹비작물의 수량이 낮게 나타났다. 2017년 녹비작물 수량은 B와 B2H1에서 5.6 $Mg\ ha^{-1}$ 으로 가장 높고, H에서 2.4 $Mg\ ha^{-1}$ 로 가장 낮았다. Jeon (2009)이 보고한 결과에 따르면 헤어리베치는 5월 중순 이후 생체량이 급격히 증가한다고 하였는데, 2017년에 녹비작물 수확을 5월 상순에 수행하여 헤어리베치의 수량이 비교적 낮았던 것으로 판단된다. 반면, 2018년에는 H 및 혼파처리에서 수량이 2.9 - 3.6 $Mg\ ha^{-1}$ 로 높고, B에서 1.5 $Mg\ ha^{-1}$ 로 가장 낮았다. 2019년에는 B1H2에서 11.1 $Mg\ ha^{-1}$ 로 가장 높고, B1H1 및 B에서 3.9 - 4.2 $Mg\ ha^{-1}$ 로 가장 낮았다. 즉, 녹비작물 단파 시 연도별로 헤어리베치 (2017)와 보리 (2018, 2019)의 수량 감소가 크게 나타났으나, 혼파처리 (B2H1, B1H1, B1H2)에서는 매년 평균 수량과 유사한 수량이 확보 (2019-B1H1 제외)되었다. 이러한 결과로 겨울철 녹비작물 재배 시 헤어리베치와 보리를 혼파하는 것이 단파재배에서 발생할 수 있는 예기치 못한 수량 감소의 피해를 줄여 안정적인 수량 확보에 도움이 된다는 것을 알 수 있었다. 이는 헤어리베치와 보리 혼파재배 시 단파보다 안정적인 수량 확보가 가능했다 (Tosti, 2012; Tosti, 2014)는 결과와 일치한다. 또한 콩과작물과 화본과작물 혼파 시 두 종간의 상호작용으로 수량이 증가 (Jeon, 2009; Yoon, 2019)한다는 국내 사례와 달리 본 연구에서는 혼파재배 시 두 종의 균형 있는 생육증진보다는 특정 한 종 (2017-보리, 2018 및 2019-헤어리베치)의 생육이 높아 다른 한 종의 생육이 상대적으로 위축 (2017-헤어리베치, 2018,19-보리)되는 결과가 나타났다. Yoon (2019) 등이 보리와 헤어리베치 혼파 시 지상부 수량이 보리에

큰 영향을 받는다고 하였으나, 본 연구에서는 1년차에는 보리가, 2, 3년차에는 헤어리베치가 총 수량에 큰 영향을 주어 연차별 차이가 있었다. Tosti (2012)도 3년간 보리와 헤어리베치를 혼파재배한 결과 보리의 생육량이 연차 간 차이가 컸으며 생육기 온도 조건과 보리와 헤어리베치의 생육속도 차이에 의해 이러한 차이가 발생한다고 보고하였다. 이러한 결과를 볼 때, 녹비작물의 혼파재배 시 두 작물 간 균형 있는 수량 확보를 위한 재배적인 방법 마련이 필요할 것으로 보인다.

녹비작물내 양분 함량 생육시기 별 녹비작물의 화학적 특성은 다음과 같다. N농도(%), C/N율은 보리와 헤어리베치 간에 뚜렷한 차이를 보였다 (Fig. 3). 반면 C 및 P_2O_5 농도(%)는 시기별, 작물 별 뚜렷한 차이를 보이지 않았다 (데이터 미제시). 조사기간인 4월 28일부터 6월 2일까지 보리의 N농도(%)가 3.0에서 0.4로 급격하게 감소함에 따라 5월 이후 C/N율이 25 이상으로 증가하였다. 토양에 투입되는 유기물의 C/N율이 25 이상이면 일시적으로 작물에 질소 기아를 유발할 수 있어 보리 단파를 녹비작물로 활용할 경우 주의가 필요할 것으로 보인다. 하지만 헤어리베치와 혼파

Fig. 1. Mean ($n = 3$) dry matter yields of green manures in 3 years ($Mg\ ha^{-1}$).

Fig. 2. Air temperature ($^{\circ}C$) and precipitation (mm) for 3 years.

Fig. 3. N concentration (%) and C/N ratio of hairy vetch and barley with time.

한 보리는 조사기간 동안 보리 단파보다 C/N율이 낮게 유지되었다. 반면 헤어리베치의 N농도는 3.3에서 2.8로 감소 폭이 적고 C/N율도 12 - 17로 혼파 유무나 시기에 따라 C/N율의 차이가 크지 않았다. 이러한 결과는 헤어리베치와 혼파한 보리 (Tosti, 2012; Hwang, 2015), 호밀 (Zachary, 2014)에서도 동일한 경향을 보였으며 헤어리베치가 고정된 질소를 화분과작물이 흡수하여 질소 이용이 증가한다고 하였다.

이러한 혼파에 의한 보리의 C/N율 감소는 녹비작물을 토양에 환원한 2018년과 2019년에도 관찰되었는데, 수확기 보리의 C/N율은 2019년 보리단파에서 28로 다소 높았으나 헤어리베치와 혼파한 보리는 25이하로 낮았다 (Fig. 4). 같은 기간 헤어리베치의 C/N율은 10 - 16로 크게 증가하지 않았다. 따라서, 보리와 헤어리베치를 혼파하면 안정적인 녹비작물 수량 확보가 가능하고, 보리의 C/N율 상승을 줄여 녹비작물로 사용하기에 유리할 것으로 판단되었다.

3년간 녹비작물 체내로 동화된 양분 함량은 Table 3과 같다. 탄소 574 - 4,548 kg ha⁻¹, 질소 36 - 408 kg ha⁻¹, 인산 11.3 - 51.6 kg ha⁻¹가 녹비작물 체내에 동화되었다. 무처리에는 일부 잡초가 자랐으나 양분 함량으로 계산하지 않았다. 양분 함량은 수량에 영향을 받아 연차 간, 처리 간 변동이 컸으며, 녹비작물 수량이 저조했던 2018년은 2019년보다 양분 함량이 낮았다. 녹비작물 체내에 동화된 양분은 환원 후 토양으로 공급된다 (Thorup-Kristensen, 1998). 따라서 녹비작물에 저장된 양분이 많을수록 후작물에 양분 공급이 많아질 수 있기 때문에 동절기 동안 녹비작물의 양분 함량을 높이기 위해서는 수량 확보가 중요하다. 본 연구에서는 녹비작물 재배 전 추가적인 양분을 투입하지 않았기 때문에 작물은 대기 중의 이산화탄소를 광합성하여 탄소를 체내로 흡수하고, 질소는 토양 내 존재하는 질소와 헤어리베치 뿌리의 질소 고정균이 고정한 것을 이용한 반면, 인산은 토양 내 존재하는 가용성인산을 체내로 흡수하여 녹비작물의 재배기

Fig. 4. C/N ratio of barley affected by hairy vetch.

Table 3. Mean (n = 3) carbon, nitrogen, and phosphate contents (kg ha⁻¹) in 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	1st (2017.5.11.)			2nd (2018.6.14.)			3rd (2019.6.17.)		
	C	N	P ₂ O ₅	C	N	P ₂ O ₅	C	N	P ₂ O ₅
B	2,323a	61 ^{ns}	20.3a	574b	36b	11.9b	1,601b	57c	26.8ab
B2H1	2,316a	87	22.8a	1,179a	111a	16.5a	3,494ab	237b	41.4ab
B1H1	1,718b	69	19.9a	1,229a	115a	17.4a	1,710b	154bc	20.7b
B1H2	1,772b	86	21.0a	1,204a	113a	16.0a	4,548a	408a	51.6a
H	999c	74	11.3b	1,311a	122a	17.8a	3,645ab	223b	48.3ab

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

간 동안 상당량의 가용성인산이 토양에서 제거되었을 것으로 판단하였다.

녹비작물의 인산가용화 효과 3년간 녹비작물 재배 후 토양 내 총 인산, 유효인산, 불용성인산 함량의 변화는 Table 4와 같다. 동일 연차 별로 처리 간 총 인산, 유효인산, 불용성인산 함량은 유의한 차이가 없었다 ($p < 0.05$). 토양 유효인산함량은 총 인산의 약 26 - 28%정도로 국내 밭 토양 내 유효인산의 함량이 총 인산 대비 26 - 30%라고 보고한 결과와 유사하였다 (Shi, 1988; Ryu, 2008). 반면에 작물이 쉽게 이용 가능한 인산인 수용성인산 (Kuo, 1996)은 녹비작물 재배에 유의한 영향 (2018년 제외)을 받았다 ($p < 0.05$). 2017년과 2019년에는 H를 단독으로 재배한 토양에서 수용성인산이 B대비 유의하게 높았고, 2019년에는 혼파처리 3개 모두 무처리와 B보다 수용성인산이 유의하게 높았다. B단파의 수용성인산은 3년 내내 무처리와 유의한 차이가 없었다 (Fig. 5). 다른 기간과 달리 2018년에 녹비작물에 의한 토양 수용성인산 함량의 차이가 발생하지 않았던 것은 녹비작물 재파종에 의해 생육기간이 약 60일정도로 짧았기 때문으로 판단된다. 녹비작물 생육이 원활했던 기간에 헤어리베치 (2017, 2019) 및 혼파 (2019) 재배한 토양에서 수용성인산 함량이 보리단파 대비 유의하게 높아졌다. 본 연구에서는 유기농경지에 이미 집적된 인산의 재활용을 위해 별도의 양분을 투입하지 않고 녹비작물을 재배하였다. 따라서 녹비작물이 토양 내 잔존하는 인산을 흡수 ($11.3 - 51.6 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)하여 토양 내 수용성인산이 제거되었음에도 불구하고 오히려 수용성인산 함량이 증대되었다. 이러한 결과로 녹비작물 재배 시 수용성인산이 가용화되어 증가하였고, 이 양이 녹비작물이 흡수한 양보다 많았음을 추정할 수 있었다. 하지만 3년 내내 보리단파 재배는 무처리와 수용성인산의 유의한 차이가 없었다. Maltais-Landry (2015)는 콩과작물을 재배하면 토양 pH가 감소하고 유기산 농도 및 인산가용화효소 활성이 높아져 인산 가용화 잠재력이 화본과작물 보다 높다고 보고하였다. 본 연구의 결과도 헤어리베치와 보리 모두 토양 내 수용성인산이 증가되어 인산 가용화가 발생하였지만 보리는 그 양이 상대적으로 적고, 헤어리베치가 토양 인산가용화에 가장 효과적이었다.

녹비작물 재배 후 토양 내 유기태 인산을 분해하는 효소인 Phosphodiesterase 활성을 측정한 결과 (Fig. 6), 헤어리베치 비율이 높아질수록 효소 활성이 높아지는 경향을 보여 콩과작물 단파 및 혼파에서 높았던 Maltais-Landry (2015)의 결과와 일치하였다. 또한 녹비작물 처리 별로 토양 내 미생물을 난용성인산염이 든 배지에서 배양한 결과, 무처리 대비 난용성인산염을 가용화하는 양이 유의하게 증가 (Fig. 7)하였다. 따라서 녹비작물을 재배할 경우 토양 내 인산을 가용화하는 미생물의 활성이 증가하여 수용성 인산 함량이 증가했음을 확인할 수 있었다.

Table 4. Mean ($n = 3$) soil total, available, and unavailable phosphate (Mg ha^{-1}) 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	T-P ($\text{P}_2\text{O}_5 \text{ Mg ha}^{-1}$)				Avail. P ($\text{P}_2\text{O}_5 \text{ Mg ha}^{-1}$)				Unavail. P ($\text{P}_2\text{O}_5 \text{ Mg ha}^{-1}$)			
	Before exper.	2017	2018	2019	Before exper.	2017	2018	2019	Before exper.	2017	2018	2019
CON	10.6 ^{ns}	10.6 ^{ns}	9.2 ^{ns}	10.2 ^{ns}	2.9 ^{ns}	2.9 ^{ns}	2.7 ^{ns}	2.6 ^{ns}	7.7 ^{ns}	7.7 ^{ns}	6.5 ^{ns}	7.6 ^{ns}
B	10.9	10.8	9.3	10.1	3.1	3.0	2.8	2.6	7.8	7.8	6.5	7.5
B2H1	11.2	10.6	9.6	10.1	3.1	3.1	2.8	2.7	8.1	7.6	6.8	7.4
B1H1	11.0	10.9	9.3	10.8	3.1	3.1	2.8	2.9	7.9	7.8	6.5	7.9
B1H2	10.9	10.8	9.0	10.1	3.1	3.1	2.7	2.8	7.8	7.7	6.3	7.4
H	11.7	11.7	9.9	10.1	3.2	3.3	2.9	2.7	8.4	8.4	7.0	7.5

Values within columns for each year 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 phosphate affected by green manure treatment (kg ha^{-1}); 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).

Fig. 6. Mean ($n = 3$) soil phosphatase activity affected by green manure treatment ($\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1}$ wet soil hour^{-1}); 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).

Fig. 7. Mean ($n = 3$) solubilized phosphate affected by green manure treatment for 6 days incubation (mg L^{-1}); 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).

Conclusions

인산이 집적된 유기농경지에서 헤어리베치와 보리의 혼파 재배가 녹비작물의 수량과 양분 함량, 토양 인산가용화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 2016년부터 2019년까지 3년간 녹비작물을 재배한 결과는 다음과 같다. 첫번째, 3년간 녹비작물의 연차별 수량은 처리 간 변동이 컸으나, 혼파 재배 시 녹비작물 수량 및 양분 함량은 변동이 적었다. 두번째, 녹비작물의 시기별 화학적 특성을 조사한 결과, 보리는 N농도가 급격히 감소함에 따라 C/N율이 상승하였으나, 헤어리베치와 혼파한 보리는 N농도 감소 및 C/N율 상승이 지연되어 녹비작물로 활용 가능한 기간이 연장되는 효과가 있었다. 세번째, 녹비작물 재배 후 토양 수용성인산이 유의하게 증가하였으며, 헤어리베치 비율이 높을수록 증가하는 경향을 보였다. 이러한 인산가용화는 토양 내 인산가용화효소 활성과 난용성인산염을 가용화하는 능력과 관련이 있었다. 결론적으로 헤어리베치와 보리의 혼파 재배는 녹비작물의 안정적인 수량과 양분 함량 확보에 유리하였으며, 녹비작물을 재배하는 것 만으로도 토양내 인산이 가용화되었다. 추후 녹비작물 재배에 의해 가용화된 인산이 실제 작물에 얼마나 이용되는지에 대한 검토가 필요할 것으로 보인다.

Acknowledgement

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

References

- 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.
- 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.
- de Wit, C.T. and Bergh. J.P. Van den. 1965. Competition between herbage plants. *Neth. J. Agric. Sci.* 13:212-221.
- 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.
- Hayano, K. 1977. Extraction and properties of phosphodiesterase from a forest soil. *Soil Biol. Biochem.* 9:221-223.
- 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.
- Jeon, W.T., K.Y. Seong, J.K. Lee, M.T. Kim, and H.S. Cho. 2009. Effects of seeding rate on hairy vetch - Rey mixtures for green manure production in upland soil. *Korean J. Crop Sci.* 54(3):327-331.
- Jeon, W.T., K.Y. Seong, M.T. Kim, I.S. Oh, B.S. Choi, and U.G. Kang. 2011. Effect of monoculture and mixtures of green manure crimson clover (*Trifolium incarnatum*) on rice growth and yield in paddy. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(5):847-852.
- Karamesouti, M. and D. Gasparatos. 2017. Sustainable management of soil phosphorus in a changing world. *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices*. DOI 10.1007/978-981-10-3638-5_9.
- Kim, M.S., Y.H. Kim, M.Y. Roh, S.S. Kang, H.B. Yoon, and H.Y. Lee. 2012. 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, S.W., Y.H. Seo, Y.B. Choi, M.S. Ahn, and A.S. Kang. 2011. Effect of mixed sowing of hairy vetch and rye on green manure yield in mountainous highland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(3):442-447.
- Kuo, S. 1996. Phosphorus. In *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods. Part 3*; Sparks, D.L., ed.; WASA and SSSA: Madison, WI. 869-919.
- Leake J.R. and W. Miles. 1996. Phosphodiesterases as mycorrhizal P sources: I. Phosphodiesterase production and the utilization of DNA as a phosphorus source by the ericoid mycorrhizal fungus *Hymenoscyphus ericae*. *New Phytol.* 132:435-443.
- 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.
- Maltais-Landry, G. 2015. Legumes have a greater effect on rhizosphere properties (pH, organic acids and enzyme activity) but a smaller impact on soil P compared to other cover crops. *Plant Soil.* 394:139-154.
- Margesin, R. and Schinner, F. 1994. Phosphomonoesterase, phosphodiesterase, phosphotriesterase, and inorganic pyrophosphatase activities in forest soils in an alpine area: effect of pH on enzyme activity. *Biol Fertil Soils.* 18:320-326.
- Nautiyal, C.S. 1999. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiology Letters.* 170:265-270.
- 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.
- Ryu, K.S. and J.S. Park. 2008. Use of NIR Technique for Determination of Total Phosphorus and Available Phosphorus in Korean Soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41(1):50-54.
- Shin, C.W., J.J. Kim, and J.H. Yoon. 1988. Studies on the characteristics of phosphorus in the upland soil I. Composition of accumulated phosphorus forms and available phosphorus. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 21(1):21-29.
- Tabatabai, M.A. and J.M. Bremner. 1969. Use of p-nitrophenol phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biol. Biochem.* 1:301-307.
- Thorup-Kristensen, K. and N.E. Nielsen. 1998. Modelling and measuring the effect of nitrogen catch crops on the nitrogen supply for succeeding crops. *Plant and Soil.* 203:79-89.
- Tosti, G., P. Benincasa, M. Farneselli, F. Tei, and M. Guiducci. 2014. Barley-hairy vetch mixture as cover crop for green manuring and themitigation of N leaching risk. *Europ. J. Agronomy.* 54:34-39.
- Tosti, G., P. Benincasa, M. Farneselli, R. Pace, F. Tei, M. Guiducci, and K. Thorup-Kristensen. 2012. Green manuring effect of pure and mixed barley - hairy vetch winter cover crops on maize and processing tomato N nutrition. *Europ. J. Agronomy.* 43:136-146.
- Turner, B.L. and P.M. Haygarth. 2005. Phosphatase activity in temperate pasture soils: Potential regulation of labile organic phosphorus turnover by phosphodiesterase activity. *Science of the total environment.* 344:27-36.
- 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.
- 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.
- Zachary, D.H., M. Ngouajio, and D.C. Brainard. 2014. Rye-Vetch Mixture Proportion Tradeoffs: Cover Crop Productivity, Nitrogen Accumulation, and Weed Suppression. *Agron. J.* 106:904-914.