

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2017.50.4.259>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Yield Potentials of Rice and Soybean As Affected by Cropping Systems in Mid-mountainous Paddy Soils of Korea

Ui-Gum Kang*, Jong-Seo Choi, Jeong-Ju Kim, and Ju-Sik Cho¹

National Institute of Crop Science, RDA, Wanju 55365, Korea

¹Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

*Corresponding author: kangug@korea.kr

ABSTRACT

Received: July 31, 2017

Revised: August 28, 2017

Accepted: August 30, 2017

To get some informations for sustainable paddy use, the productivities of soils with two years of cropping systems were estimated through pot experiment using two pretreated groups of not autoclaved 'natural'- and 'autoclaved'-soils without any fertilization. And then the relationship between the productivities, called yield potentials, and the characteristics of soils as affected by cropping systems, such as rice-rice (R-R), rice-barley-rice-barley (R-B-R-B), rice-barley-rice-wheat (R-B-R-W), soybean-barley-soybean-barley (S-B-S-B), of which barley and wheat were composted at a level of 10 MT ha⁻¹, and S-B-S-B without compost, was analyzed. These treatments were established in mid-mountainous loam paddy, which contained exchangeable Ca of 11.8 cmol_c kg⁻¹, located at the altitude of 285 m above sea level in Sangju of Korea. Crops for the estimation of soil productivity were rice cv. 'Seolemi' and soybean cv. 'Chamol'. As a result, under the natural soils condition, rice grain and straw were highly produced in composted S-B-S-B soils ($p < 0.05$) and lowly in R-R soils ($p < 0.05$). While soybean grain and stem were higher in R-R soils ($p < 0.05$) than other soils which not significantly different each other. In case of autoclaved soils, the yield potentials of rice and soybean were high together in either composted R-B-R-B/W or S-B-S-B soils compared to R-R and uncomposted S-B-S-B soils ($p < 0.05$). In especial, these yield potentials under the natural soils condition were commonly influenced by soil porosity showing negative correlation for rice ($p < 0.01$); positive for soybean ($p < 0.05$). And the porosity possibly reversed even the symbiotic contribution of indigenous *Bradyrhizobium japonicum* for soybean. Under autoclaved soils condition the potentials of rice and soybean showed negative correlations with soil C:N ratio ($p < 0.05$) similarly to the case of rice in the natural soils.

Keywords: Cropping system, Paddy soils, Yield potentials, Rice, Soybean

Yield potentials of rice and soybean as affected by two years of cropping systems in mid-mountainous paddy soils from June 2014 to June 2016.

| Cropping records [†] | Rice | | | | Soybean | | | |
|-------------------------------|----------------------------------|----------|----------------------------|----------|-----------------------------------|---------|---------------|---------|
| | No autocl. soils [‡] | | Autocl. soils [§] | | No autocl. soils | | Autocl. soils | |
| | Grain wt | Straw wt | Grain wt | Straw wt | Grain wt | Stem wt | Grain wt | Stem wt |
| | ----- g hill ⁻¹ ----- | | | | ----- g plant ⁻¹ ----- | | | |
| Rice (R)-R | 8.8 c* | 10.5 c | 43.3 b | 36.9 b | 14.2 a | 48.2 a | 12.1 bc | 31.2 b |
| R-Barley (B)-R-B | 22.7 a | 23.7 b | 54.6 a | 41.7 b | 9.9 b | 36.4 ab | 20.9 ab | 53.0 a |
| R-B-R-Wheat | 18.2 b | 21.8 b | 56.5 a | 50.2 a | 11.4 b | 34.0 bc | 24.3 a | 60.4 a |
| Soybean (S)-B-S-B | 23.2 a | 27.5 a | 53.2 a | 38.8 b | 7.9 b | 21.5 cd | 24.9 a | 61.2 a |
| S-B-S-B (No compost) | 19.1 b | 23.7 b | 39.5 b | 35.0 b | 7.0 b | 17.7 d | 6.0 c | 24.2 b |

[†]For barley and wheat commercial compost of 10 MT ha⁻¹ was applied except for the barley in S-B-S-B (No compost).

[‡]No autoclaving soils.

[§]Autoclaving soils.

*Numbers followed by the same letter within a column are not significantly different (Duncan test, $p < 0.05$).



Introduction

최근 우리나라의 벼농사는 쌀 소비량이 크게 줄면서 농가의 소득감소가 농촌의 경제문제로 비화되고 있다 (Choi et al., 2016). 그리고 콩, 밀 등의 많은 곡물과 조사료 수급의 해외 의존 현상은 (Statistics Korea, 2016) 국가 식량자급의 문제점으로 지적된 지 오래다. 이에 따라 논을 미래 식량안보와 기후변화 대응 측면에서 계속 보전하되 (Turrall et al., 2011) 농산물의 수급조절용으로 벼 이외 다양한 작물을 논에 재배하는 것이 권장되고 있다 (Kim et al., 2015). 뿐만 아니라, 농산물의 지속적인 생산전략으로서 농업환경 보전에 좋지 않은 화학농자재의 사용을 줄이고 지력증진에 도움이 되는 영농방식을 적극적으로 도입해야 할 필요성도 높은 상황이다 (Dias et al., 2015; Kang, 2007; Kang et al., 2016; Kim et al., 2014; Muthukumarasamy et al., 2007; Parr et al., 1992; Wang et al., 2010).

일반적으로 토양의 작물생산성으로 통칭되는 지력은 농경지를 논 또는 밭으로 사용함에 있어서 토양관리와 물관리, 재배작물, pH와 유기물 등의 영양성분, 그리고 미생물의 활동 등의 종합적인 영향을 받아 형성되는 것으로 알려져 있다 (Cook, 2006; Im, 1978; Lee et al., 2008; Muthukumarasamy et al., 2007; Olk et al., 2000; Power, 1987). 그리고 이러한 지력의 효과적인 관리를 위한 경종방법으로 거론되는 것이 작부체계이다 (Cook, 2006; Dias et al., 2015; Park et al., 1993). 우리나라 논토양의 생산성을 보면, 벼 연작지에서의 수량은 73~80%가 자연지력의 영향을 받으며 배수가 약간 양호한 하성평탄지에서 높은 것으로 알려져 있으며 (Ryu et al., 1971), 작부체계 논에서의 벼 수량은 논토양에 콩을 2년간 재배한 곳에서 높고 콩은 1년 단위로 논밭 돌려짓기 한 토양에서 높은 것으로 확인되었다 (Kim et al., 1993). 지력에 중요한 작물영양성분인 토양 질소 (Fang et al., 2009; Kang, 2007; Zhang et al., 2008)와 탄소 (Dias et al., 2015; Im, 1978; Olsson and Ardo, 2002)는 벼논을 콩밭으로 오래 사용할수록 표토에서 줄어드는 것으로 나타났다 (Nishida et al., 2013). 그리고 토양에서 작물과 토양미생물 상호간에 생존경합을 결정짓는 C:N 율에서의 (USDA, 2011) 질소는 토양 형태와 기후에 따라 다양하게 변하는 것으로 확인되었다 (Moroyu, 1983). 또한, 생물학적 지력관리의 한 축으로 작용하는 (Kang, 2007) 질소고정 근류균은 숙주식물을 재배한 토양에서 서식밀도가 높고 질소고정잠재능 또한 높은 것으로 밝혀졌다 (Kang, 1998; Kang et al., 1997; Kuykendall et al., 1982). 그러나 이러한 국내외의 많은 지력관련 연구에도 불구하고 우리나라에서의 작부체계를 통한 논 토양의 생산성향상 노력은 주로 평야지에 치우쳐 있고 (Ahn et al., 1992; Kim et al., 1993; Park et al., 1993; Yoo et al., 1995), 그나마 처리에 따른 수량성 변화 위주로 분석된 상황이다. 그러므로 논토양의 지속가능한 지력관리를 위해서는 농업입지에 따른 토양 이화학성과 미생물상의 작물영향 분석이 다양하게 이루어져야 할 것으로 생각된다.

이러한 측면에서 본 연구에서는 여름이 짧은 중산간지에서 벼 연작과 함께 벼·콩과 보리/밀을 이모작으로 작부 처리한 논토양이 갖는 벼와 콩의 잠재생산성을 토양의 이화학성과 미생물상 영향측면에서 분석하였다.

Materials and Methods

작부처리 토양의 개황 작부체계 처리를 한 논토양은 해발 285 m의 경북 상주시 화서면에 자리한 국립식량과 학원 상주출장소 시험포장으로서, 오래 전에 석회암지대의 흙이 유입된 까닭에 칼슘함량이 일반 논보다 3배 이상 높고, 마그네슘은 2배 이상 높았다. 토성은 양토였으며 배수가 약간 불량하였다. 그리고 작부처리 전에 배수를 원활하게 할 목적으로 객토를 하였는데 객토용 흙에 규산이 많이 함유된 까닭으로 시험토양의 규산함량이 일반 논보다 (Kang et al., 2012) 3배 이상 높았다. 작부처리는 2014년 6월부터 2016년 6월까지 2년간 벼 연작, 벼-보리-벼-보리, 벼-보리-

벼-밀(이상 보리, 밀 재배에 퇴비사용), 보리재배에 퇴비를 사용하지 않은 콩-보리-콩-보리(이하 ‘퇴비 무사용 콩-보리-콩-보리’로 표기), 그리고 보리재배용으로 퇴비를 2014년 6월에는 사용하지 않았다가 2015년 6월에 사용한 콩-보리-콩-보리(이하 ‘콩-보리-콩-보리’로 표기) 작부형태의 5 처리로 하였다. 작물은 4.5 × 15 m 크기의 시험구에서 재배하였으며, 수확한 뒤에는 벼짚만 시험구에 되돌려 넣었고 콩대와 보릿짚은 모두 시험구 밖으로 들어내었다. 시험기간의 기온은 2014년의 경우 평균 11.0°C로써 월평균 -3.9°C (12월) ~ 23.6°C (7월), 2015년은 평균 11.5°C로 월평균 -2.0°C (1월) ~ 23.7°C (8월), 2016년도는 6월까지 평균 8.9°C로 월평균 -3.3°C (1월) ~ 21.7°C (6월) 범위로 분포하였다. 그리고 강우량은 2014년에 총 934.5 mm로써 5.0 (2월) ~ 213 mm (8월)의 분포를, 2015년은 총 663.0 mm로 0.0 mm (11월) ~ 146.5 mm (10월)의 분포를, 2016년 6월까지 총 417.9 mm로 20.2 mm (1월) ~ 161.0 mm (4월)의 분포를 각각 보였다.

작부도입 작물 재배 작부체계 처리에 사용된 벼 품종은 조생종 ‘설레미’, 콩은 올콩인 ‘참울’, 보리는 사료용 ‘유호’, 밀은 ‘조품’이었다. 2014년도 벼 이앙은 6월 10일에, 콩 파종은 6월 13일에 하였고, 뒷그루작물인 보리는 10월 10일에 파종하였다. 2015년도에는 벼 이앙과 콩 파종을 모두 6월 10일에 하였고 보리 파종은 10월 7일에 하였다. 작물재배를 위한 시비는 농촌진흥청 국립식량과학원 표준재배법에 (NICS, 2010) 준했는데, 질소(N)-인산(P₂O₅)-칼리(K₂O)의 시비는 벼의 경우 각각 9-4.5-5.7 kg 10a⁻¹, 콩은 3-3-3.4 kg 10a⁻¹, 보리는 11.8-7.4-3.9 kg 10a⁻¹, 밀은 9.1-7.4-3.9 kg 10a⁻¹의 표준량을 기준으로 시험 첫해에만 토양진단 시비량을 산출해서 사용하고 2년차에는 토양진단을 생략하면서 표준량을 사용하였다. 다만 벼 후작의 보리와 밀, 퇴비를 사용한 콩 후작의 보리 재배구는 이들 동작물을 파종하기 직전에 퇴비를 10a 당 1톤씩 사용하였다 (NICS, 2010).

토양 이화학성 분석 토양의 이화학성 분석시료는 15 cm 깊이의 표토를 사용하였다. 토양의 잠재생산성 시험에 사용된 작부처리토양은 동작물의 수확 직전에 채취하였고, 분석항목은 내수성입단, 공극률, pH, 총 질소, 유기물, 탄질율, 유효 인산과 규산, 그리고 치환성 칼슘과 칼리, 마그네슘 등이었다. 그리고 잠재생산성시험 토양은 벼와 콩을 수확한 직후에 채취하였으며 화학성 위주로 분석하였다. 토양분석은 농촌진흥청 국립식량과학원 식량작물환경 분석법 핸드북 (NICS, 2014)에 준하였다.

토양 미생물상 분석 미생물 분석용 시료는 화학성 분석시료와 같이 채취하였다. 세균, 방선균, 사상균의 서식 밀도 분석은 농촌진흥청 국립식량과학원 식량작물환경 분석법 핸드북 (NICS, 2014)에 준하였다. 그리고 세균 가운데 식물의 성장을 촉진시키는 것으로 알려진 중온성 *Bacillus* sp.와 형광성 *Pseudomonas* sp.는 (Kang et al., 2017) 시료를 냉장보관하면서 전자는 YG배지를, 후자는 형광성 *Pseudomonas* 전용배지 (KH₂PO₄ 1.0 g, MgSO₄ · 7H₂O 0.5 g, KCl 0.2 g, NaNO₃ 5.0 g, Deoxycholic acid · Na 1.0 g, Betaine 5.0 g, 한천 15.0 g, 증류수 1000 ml, pH 7.2~7.4)를 사용하여 분석하였다 (NICS, 2014). 콩 공생 근류균 *Bradyrhizobium japonicum*의 서식밀도는 Kang et al. (1991)의 방법에 따라 무균상태에서 발아시킨 ‘참울’콩의 유효를 질소가 결재된 양액을 넣은 ‘growth pouch’에 1본 (plant)씩 치상한 다음, 멸균수로 10배에서부터 10⁶배까지 희석한 토양시료 현탁액 1 ml씩을 4반복으로 접종하여 4주간 재배한 뒤 뿌리혹이 형성된 ‘growth pouch’의 개수로서 최확치법 (Most probable number method)으로 조사하였다 (Vincent, 1970).

작부토양의 잠재생산성 분석 잠재생산성 평가는 벼와 콩을 대상으로 하였다. 먼저 작부토양을 음지에서 말린 후 시험에 사용했는데, 각 작부처리 토양별로 5 kg씩을 내경 21.5 cm, 높이 18.5 cm의 원통형 Pot에 6반복으로 담아서 3반복은 121°C에서 30분간 멸균처리하고, 나머지 3반복은 멸균하지 않고 난괴법으로 배치하여 작물을 재배하였다. 벼는 ‘설레미’ 30일모를 2016년 6월 16일 Pot 당 1주 3본씩 이앙하고 콩은 ‘참울’을 벼 이앙 날에 4립을 파종한 뒤 잘 발아한 2본만 남겨서, 벼, 콩 모두 비료를 주지 않고 재배하였다. 시험용 관개수는 총 질소 (T-N) 2.086 mg L⁻¹, 칼리 (K) 1.66 mg L⁻¹, 칼슘 (Ca) 10.03 mg L⁻¹, 마그네슘 (Mg)을 2.74 mg L⁻¹ 함유하였고 인을 극미량 포함하였다. 수확된 벼와 콩의 생산성은 작부토양별로 비교평가하고, 이들 성적과 시험 전 작부토양의 이화학적 및 서식 미생물 밀도와의 상관관계성적을 중심으로 토양의 잠재생산성 관계요인을 분석하였다. 참고로, 작물 재배에 사용된 작부토양의 이화학적성을 보면 Table 1과 같다. 내수성입단 비율은 처리 간에 유의적인 차이가 없었다. 그러나 절대 값은 벼-보리-벼-보리 재배지에서 88.3%로 가장 높았고 다음으로 벼-보리-벼-밀 재배지 > 콩-보리-콩-보리 재배지 > 벼 연작지 논토양 > 퇴비무시용의 콩-보리-콩-보리 재배지 순으로 높았다. 공극률은 벼 연작지가 57.1%로 가장 높으면서 다른 작부토양 [51.4 (퇴비 무시용의 콩-보리-콩-보리 재배지) ~ 52.9% (벼-보리-벼-보리 재배지)]과 유의적인 차이를 보였다. pH는 6.6 (벼 연작, 벼-보리-벼-보리, 벼-보리-벼-밀, 퇴비 무시용의 콩-보리-콩-보리 재배지) ~ 6.7 (콩-보리-콩-보리 재배지), 총 질소는 0.14 (퇴비 무시용의 콩-보리-콩-보리 재배지) ~ 0.22% (벼-보리-벼-보리 재배지), 유기물은 18.8 (퇴비 무시용의 콩-보리-콩-보리 재배지) ~ 26.7 g kg⁻¹ (벼-보리-벼-밀 재배지), C:N율은 6.5 (콩-보리-콩-보리 재배지) ~ 7.9 (벼 연작지), 유효인산은 88 (퇴비 무시용의 콩-보리-콩-보리 재배지) ~ 168 mg kg⁻¹ (벼-보리-벼-밀 재배지), 치환성 칼리는 0.37 (퇴비 무시용 콩-보리-콩-보리 재배지) ~ 0.58 cmol_c kg⁻¹ (벼-보리-벼-보리, 벼-보리-벼-밀 재배지)의 함량을 나타내었다. 그러면서 총 질소와 유기물, 유효인산, 치환성 칼리는 벼 재배에 있어서 동작용로 보리나 밀을 재배한 작부토양에서 상대적으로 높았으며, 총 질소를 제외한 이들 성분은 다른 작부처리에서의 성적과 유의적인 차이를 보였다 (*p* < 0.05).

그리고 토양미생물의 서식밀도는 Table 2와 같이 세균의 경우 125.6 × 10⁵ (벼 연작지) ~ 348.2 × 10⁵ cfu g · soil⁻¹ (벼-보리-벼-보리 재배지), 방선균은 14.3 × 10⁴ (퇴비 무시용의 콩-보리-콩-보리 재배지) ~ 28.8 × 10⁴ cfu g · soil⁻¹ (콩-보리-콩-보리 재배지), 사상균은 37.6 × 10³ (벼-보리-벼-밀 재배지) ~ 79.0 × 10³ cfu g · soil⁻¹ (벼-보리-벼-보리 재배

Table 1. Physicochemical properties of soils used for crop-yield potentials due to two years of cropping in mid-mountainous paddy soils.

| Cropping records [†] | Water stable aggregates | Porosity | pH | T-N | O.M. | C:N | Av. P ₂ O ₅ | Av. SiO ₂ | Ex. cations | | |
|-------------------------------|-------------------------|----------|-------|---------|--------------------|---------|-----------------------------------|----------------------|--|--------|--------|
| | | | | | | | | | Ca | K | Mg |
| | % | % | 1:5 | % | g kg ⁻¹ | ratio | mg kg ⁻¹ | mg kg ⁻¹ | ----- cmol _c kg ⁻¹ ----- | | |
| R-R | 82.3 a [‡] | 57.1 a | 6.6 a | 0.17 bc | 23.0 b | 7.9 a | 103 b | 458 c | 12.8 a | 0.42 b | 3.4 bc |
| R-B-R-B | 88.3 a | 52.9 b | 6.6 a | 0.22 a | 26.0 a | 6.8 bc | 163 a | 632 ab | 11.9 a | 0.58 a | 3.4 c |
| R-B-R-W | 86.3 a | 52.2 b | 6.6 a | 0.22 a | 26.7 a | 7.1 abc | 168 a | 494 bc | 12.1 a | 0.58 a | 3.8 a |
| S-B-S-B | 83.0 a | 51.8 b | 6.7 a | 0.20 ab | 22.5 b | 6.5 c | 107 b | 602 abc | 11.4 a | 0.40 b | 3.1 d |
| S-B-S-B (No compost) | 77.3 a | 51.4 b | 6.6 a | 0.14 c | 18.8 c | 7.8 ab | 88 b | 715 a | 11.8 a | 0.37 b | 3.6 ab |

[†]R, Rice; B, Barley; W, Wheat; S, Soybean (for barley and wheat commercial compost of 10 MT ha⁻¹ was applied).

[‡]Numbers followed by the same letter within a column are not significantly different (Duncan test, *p* < 0.05).

Table 2. Some microbial populations and winter-crop yields due to two years of cropping in mid-mountainous paddy soils[†].

| Cropping records | Bacteria | Actinomycetes | Fungi | <i>Bacillus</i> sp. | <i>Pseudomonas</i> sp. | Winter crop yield |
|-------------------------|--|-------------------|-------------------|---------------------|------------------------|--------------------|
| | ($\times 10^5$) | ($\times 10^4$) | ($\times 10^3$) | ($\times 10^5$) | ($\times 10^5$) | |
| | ----- cfu g ⁻¹ soil ⁻¹ ----- | | | | | t ha ⁻¹ |
| R-R | 125.6 d | 21.6 ab | 58.5 ab | 16.1 c | 20.4 b | - |
| R-B-R-B | 348.2 a | 23.5 a | 79.0 a | 34.1 b | 54.1 a | 6.34 |
| R-B-R-W | 228.1 b | 25.9 a | 37.6 b | 67.9 a | 17.9 b | 2.83 |
| S-B-S-B | 186.3 c | 28.8 a | 59.8 ab | 40.2 b | 23.7 b | 6.13 |
| S-B-S-B (No compost) | 165.9 c | 14.3 b | 44.3 b | 35.2 b | 24.6 b | 4.25 |

[†] See foot notes to Table 1.

지) 이었다. 그리고 *Bacillus* sp.는 16.1×10^5 (벼-연작지) ~ 67.9×10^5 cfu g⁻¹ soil⁻¹ (벼-보리-벼-밀 재배지)로 벼에 이어 밀을 재배한 토양에서 가장 높았고 ($p < 0.05$), *Pseudomonas* sp.는 17.9×10^5 (벼-보리-벼-밀 재배지) ~ 54.1×10^5 cfu g⁻¹ soil⁻¹ (벼-보리-벼-보리 재배지)의 밀도를 보여 벼에 이어서 보리를 재배한 토양에서 가장 높은 편이었다 ($p < 0.05$). *B. japonicum*의 서식밀도는 Table 5와 같이 벼 중심의 작부토양에서 $17 \text{ cells g}^{-1} \text{ soil}^{-1}$ 이하였고 콩 중심의 작부 토양에서는 1.0×10^3 (콩-보리-콩-보리 재배지) ~ 5.8×10^3 cells g⁻¹ soil⁻¹ (퇴비무시용의 콩-보리-콩-보리 재배지) 범위였다.

한편, 작부처리 2년차 토양에서의 동작물 수량은 Table 2와 같이 벼 뒷그루 보리가 6.34 t ha^{-1} , 벼 뒷그루 밀은 2.83 t ha^{-1} , 퇴비를 넣고 재배한 콩 뒷그루 보리는 6.13 t ha^{-1} , 퇴비 무시용의 콩 뒷그루 보리는 4.25 t ha^{-1} 이었다.

작부토양 *Bradyrhizobium japonicum*의 질소고정잠재능 평가 *B. japonicum*의 질소고정 잠재능 분석은 Kang (1998)과 Kang et al. (1991)의 방법에 준했다. 먼저 질석을 넣은 1 L 들이 광구병에 무균상태로 발아시킨 올콩 인 ‘참을’과 늦콩인 ‘태산’의 유묘 2본을 치상한 다음, 작부처리 토양을 멸균증류수로 10배 희석한 토양현탁액을 각각 1 ml씩 3반복으로 접종하여서 질소가 결재된 양액으로 개화기까지 6주간 재배한 후 콩의 지상부와 뿌리혹을 수확하였다. 이렇게 수확한 식물체와 뿌리혹의 말린 무게 성적을 대상으로 해서 작부처리토양에 분포한 콩 근류균 *B. japonicum*의 질소고정효과를 토양의 질소고정잠재능으로 평가하였다. 이때 대조구로 무접종구와 *B. japonicum* YCK 213 (Kang et al., 1991) 접종구를 두었는데, 전자는 토양현탁액 대신 멸균증류수를 넣었고 후자는 ‘YCK 213’을 YEM배지 (Vincent, 1970)에서 배양하여 1.7×10^6 cells ml⁻¹ 수준으로 접종처리 하였다.

통계분석 SAS 프로그램 9.1.3 버전 (2006)으로 시험 성적을 상관분석과 분산분석 하였다.

Results

작부토양의 잠재생산성 중산간지 논에서 2년간 작부를 달리한 토양으로 재배한 벼와 콩의 생육 및 수량성은 Tables 3 and 4와 같았다. 벼는 Table 3과 같이 전체적으로 잎의 엽록소 함량을 나타내는 엽색도 수치가 시험토양의 멸균처리에 관계없이 파종 후 43일째보다 파종 후 27일째인 생육초기에 높았다. 그러면서 토양을 멸균하지 않은 자연

Table 3. Growth status and yield potentials of rice as affected by cropping systems in mid-mountainous paddy soils.

| Treatments | Soils Cropping records [†] | Leaf chlor. level [†] | | Culm length | No. of spike per hill | 1,000 - grain wt of rough rice | Grain wt per hill | Rice-straw wt per hill |
|----------------|--|--------------------------------|--------|---------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------|------------------------|
| | | 27 DAT | 43 DAT | | | | | |
| | | | | cm | | | | |
| No autoclaving | R-R | 30.1 | 23.9 | 41.0 b [§] | 8.3 c | 23.7 c | 8.8 c | 10.5 c |
| | R-B-R-B | 34.5 | 27.4 | 47.7 a | 15.7 ab | 24.9 ab | 22.7 a | 23.7 b |
| | R-B-R-W | 33.0 | 25.8 | 46.3 a | 13.7 b | 25.3 a | 18.2 b | 21.8 b |
| | S-B-S-B | 35.0 | 27.2 | 46.3 a | 16.3 a | 25.4 a | 23.2 a | 27.5 a |
| | S-B-S-B | 34.2 | 26.3 | 46.0 a | 15.7 ab | 24.4 bc | 19.1 b | 23.7 b |
| | (No compost) | Mean | 33.4 | 26.1 | 45.5 | 13.9 | 24.7 | 18.4 |
| Autoclaving | R-R | 37.6 | 33.1 | 52.3 a | 27.3 b | 26.0 a | 43.3 b | 36.9 b |
| | R-B-R-B | 37.6 | 34.7 | 52.0 a | 28.0 b | 26.2 a | 54.6 a | 41.7 b |
| | R-B-R-W | 37.7 | 34.8 | 51.3 a | 32.7 a | 25.9 a | 56.5 a | 50.2 a |
| | S-B-S-B | 37.2 | 33.7 | 52.3 a | 28.3 b | 26.0 a | 53.2 a | 38.8 b |
| | S-B-S-B | 36.2 | 33.4 | 50.7 a | 26.0 b | 25.7 a | 39.5 b | 35.0 b |
| | (No compost) | Mean | 37.3 | 33.9 | 51.7 | 28.5 | 26.0 | 49.4 |

[†] and [§] See foot notes to Table 1.

[†] Leaf chlorophyll contents level was tested with Minolta SPAD-502 27- and 43-day after transplanting.

Table 4. Growth status and yield potentials of soybean as affected by cropping systems in mid-mountainous paddy soils[†].

| Treatments | Soils Cropping records | Leaf chlor. level | | Stem length | No. of pod per plant | 100- grain wt | Grain wt per plant | Stem wt per plant |
|----------------|---------------------------|-------------------|--------|-------------|----------------------|---------------|--------------------|-------------------|
| | | 27 DAT | 43 DAT | | | | | |
| | | | | cm | | | | |
| No autoclaving | R-R | 35.5 | 37.6 | 36.7 a | 66.4 a | 17.1 a | 14.2 a | 48.2 a |
| | R-B-R-B | 35.6 | 38.6 | 37.2 a | 41.4 b | 18.1 a | 9.9 b | 36.4 ab |
| | R-B-R-W | 35.2 | 38.3 | 34.7 a | 42.3 b | 18.4 a | 11.4 b | 34.0 bc |
| | S-B-S-B | 37.9 | 38.4 | 34.2 a | 30.4 b | 17.6 a | 7.9 b | 21.5 cd |
| | S-B-S-B | 35.6 | 37.9 | 31.7 a | 24.9 b | 17.8 a | 7.0 b | 17.7 d |
| | (No compost) | Mean | 36.0 | 38.2 | 34.9 | 41.1 | 17.8 | 10.1 |
| Autoclaving | R-R | 37.4 | 34.9 | 32.2 a | 36.0 b | 19.4 bc | 12.1 bc | 31.2 b |
| | R-B-R-B | 38.7 | 34.2 | 35.0 a | 62.5 a | 23.8 a | 20.9 ab | 53.0 a |
| | R-B-R-W | 38.7 | 35.4 | 38.0 a | 76.4 a | 19.5 bc | 24.3 a | 60.4 a |
| | S-B-S-B | 37.0 | 34.4 | 34.2 a | 76.2 a | 21.3 ab | 24.9 a | 61.2 a |
| | S-B-S-B | 36.1 | 33.9 | 36.5 a | 26.0 b | 17.2 c | 6.0 c | 24.2 b |
| | (No compost) | Mean | 37.6 | 34.6 | 35.2 | 55.4 | 20.2 | 17.6 |

[†] See foot notes to Table 3.

조건에서의 엽색도와 간장, 수수, 정조 1,000립 무게, 정조수량, 벧짚무게는 모두 벼 연작토양보다 벼에 이어 보리나 밀을 재배했거나 콩에 이어 보리를 재배했던 작부토양에서 더 높은 경향으로 나타났다. 이 가운데 정조수량이 높았던 토양은 벼-보리-벼-보리 작부와 콩-보리-콩-보리 작부토양이었으며 ($p < 0.05$), 벧짚을 가장 많이 생산한 토양은 콩-보리-콩-보리 작부토양이었다 ($p < 0.05$). 그 결과 시험토양 중에서 수량 및 수량구성요소 성적이 다 같이 가장 좋았던 토양은 퇴비사용의 콩-보리-콩-보리 작부토양이었으며 ($p < 0.05$) 가장 나빴던 것은 벼 연작토양이었다 ($p < 0.05$). 그리고 콩-보리-콩-보리 작부토양에서의 정조수량은 벼 연작토양에서보다 2.6배 더 높았다. 한편, 시험토양을 평균처리 하여 벼를 재배했을 때의 엽색도와 수수, 정조수량, 벧짚무게는 벼-보리-벼-밀 작부토양에서 가장 고르게 높았다. 다만 정조수량은 벼-보리-벼-보리, 벼-보리-벼-밀, 콩-보리-콩-보리 작부토양에서 다 같이 높았다 ($p < 0.05$). 그러나 자연토양 조건에서 퇴비를 넣지 않은 콩-보리-콩-보리 작부토양에서의 정조수량은 벼 연작토양보다 유의적으로 높았지만 ($p < 0.05$) 평균토양 조건에서는 벼 연작토양과 차이가 없었다. 그리고 작부토양의 평균처리여부에 따른 벼 정조수량과 벧짚무게는 평균처리 한 토양에서 재배한 것이 자연토양에서 재배한 것보다 각각 2.7배와 1.9배 더 높은 경향이었다.

콩은 엽색도 수치가 벼와 달리 자연적인 토양조건에서 파종 후 27일째보다 생육중기인 43일째에 더 높았고, 평균된 토양조건에서는 그 반대로 생육초기인 파종 후 27일째에 더 높았다. 자연조건에서의 콩 협수와 수량, 지상부 콩대의 무게는 벼 연작토양에서 고르게 높은 경향이었다 ($p < 0.05$). 그러나 다른 작부처리 토양에서의 콩 수량은 처리 간에 유의적인 차이가 없었고 절대 값만 벼-보리-벼-밀 > 벼-보리-벼-보리 > 콩-보리-콩-보리 > 퇴비무사용의 콩-보리-콩-보리 순으로 차이가 있었으며 유의성은 나타나지 않았다. 콩대의 무게는 벼-보리-벼-보리 > 벼-보리-벼-밀 > 콩-보리-콩-보리 > 퇴비 무사용의 콩-보리-콩-보리 작부토양 순으로 높았다. 그러면서 벼 연작토양에서의 콩 수량은 벼-보리-벼-밀 작부토양보다 1.2배, 벼-보리-벼-보리 작부토양보다는 1.4배, 퇴비사용의 콩-보리-콩-보리보다는 1.8배 더 높은 것으로 분석되었다. 그러나 작부토양을 평균한 조건에서의 수량은 벼-보리-벼-밀과 콩-보리-콩-보리의 작부토양에서 가장 높았고 ($p < 0.05$), 다음으로 벼-보리-벼-보리 작부토양이 높았으며 벼 연작토양과 퇴비무사용의 콩-보리-콩-보리 작부토양에서는 서로 유의적인 차이 없이 가장 낮았다. 협수와 콩대 무게는 벼에 이어 보리나 밀을 재배한 작부토양과 콩-보리-콩-보리 작부토양에서 서로 차이 없이 벼 연작토양이나 퇴비무사용의 콩-보리-콩-보리 작부토양에서보다 유의적으로 높았다 ($p < 0.05$). 100립 무게는 자연토양 조건의 시험에서 유의성이 없었던 것과 달리 벼-보리-벼-보리 작부토양에서 유의적으로 가장 높았다 ($p < 0.05$). 그리고 평균된 작부토양은 평균하지 않은 자연적인 작부토양에 비해서 콩의 수량과 콩대무게가 각각 1.7배, 1.5배 더 높았다.

작부토양 *B. japonicum*의 질소고정잠재능 *B. japonicum*을 함유한 작부토양을 희석접종해서 얻은 질소고정잠재능 성적은 Table 5와 같았다. 참울콩과 태선콩의 뿌리에 착생된 근류의 수와 무게 그리고 지상부의 건물량은 모두 *B. japonicum*의 밀도가 10^3 cells g \cdot soil $^{-1}$ 수준으로 높은 콩 중심의 작부토양이 10 cells g \cdot soil $^{-1}$ 수준인 벼 중심의 벼 연작, 벼-보리-벼-보리, 벼-보리-벼-밀 작부토양에서보다 유의적으로 높았다 ($p < 0.001$). 콩 중심의 작부토양 접종구 중에서는 태선콩에 퇴비 무사용의 콩-보리-콩-보리 작부토양 접종구에서 생산한 건물량만 퇴비를 넣은 콩-보리-콩-보리 작부토양 접종구보다 유의적으로 높았을 뿐 ($p < 0.001$), 근류수와 근류무게는 두 접종구 간에 유의적인 차이가 없었다. 그리고 시험구 가운데 태선콩에서 가장 높은 건물량을 보인 퇴비 무사용의 콩-보리-콩-보리 작부토양 접종구는 *B. japonicum* YCK 213 접종구보다 *B. japonicum* 접종균수가 $1/300$ 수준으로 적었음에도 근류 착생수만 적었고 근류무게와 지상부 건물량에서는 더 높은 성적을 나타내었다 ($p < 0.001$).

Table 5. Symbiotic potentials of *Bradyrhizobium japonicum* populations in 10-fold-diluted (10^{-1}) whole-soil inocula as affected by cropping systems on *G. max* cv. Chamol and Taesun[†].

| Cropping records | No. of rhizobia (cells g ⁻¹ soil ⁻¹) | cv. Chamol | | | cv. Taesun | | |
|-------------------------|---|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------------------------|---------------|--------------|
| | | No. of nodule | Nodule dry wt | Shoot dry wt | No. of nodule | Nodule dry wt | Shoot dry wt |
| | | ----- g plant ⁻¹ ----- | | | ----- g plant ⁻¹ ----- | | |
| R-R | 10 | 63 d | 0.48 b | 5.6 c | 73 c | 0.50 c | 5.5 cd |
| R-B-R-B | 17 | 97 cd | 0.56 b | 6.1 c | 79 c | 0.60 c | 6.7 c |
| R-B-R-W | 17 | 108 c | 0.60 b | 5.9 c | 86 c | 0.63 c | 6.9 c |
| S-B-S-B | 1.0×10^3 | 180 b | 1.05 a | 11.0 b | 216 b | 1.34 ab | 14.6 b |
| S-B-S-B (No compost) | 5.8×10^3 | 209 b | 1.07 a | 11.5 ab | 205 b | 1.46 a | 16.2 a |
| YCK 213 | 1.7×10^6 | 313 a | 1.19 a | 12.8 a | 353 a | 1.23 b | 13.5 b |
| Uninoculated | - | - | - | 3.0 d | - | - | 4.1 d |

[†]See foot notes to Table 1.

시험 후 토양의 화학성 먼저 자연 상태의 시험 전 토양을 기준으로 시험 후의 성적을 보면 (Tables 1 and 6) 벼를 재배했을 때는 pH와 총 질소, 유효인산, 치환성 칼슘이 증가했지만 C:N율과 치환성 칼리가 감소한 경향이었고, 콩 재배지에서는 유기물만 증가하였고 pH와 유효인산, 치환성 칼리와 마그네슘이 감소한 경향이였다. 그리고 시험토양의 사전 멸균여부에 관계없이 벼를 재배했을 때는 전반적으로 콩을 재배했을 때보다 pH와 유효인산, 치환성 칼슘·마그네슘의 함량이 유의적으로 높았지만 ($p < 0.05$) 치환성 칼리함량은 낮았고 ($p < 0.05$) 유기물 함량은 유의성 없이 절

Table 6. Chemical properties of soils after experiment for crop-yield potentials as affected by cropping systems in mid-mountainous area[†] (Continued).

| Soils | | Ex. cations | | | | | | | |
|------------------------|-------------------------------|-------------|---------|--------------------|--------|----------------------------------|--|---------|--------|
| Treatments | Cropping records [†] | pH | T-N | O.M. | C:N | Av.P ₂ O ₅ | Ca | K | Mg |
| | | 1:5 | % | g kg ⁻¹ | ratio | mg kg ⁻¹ | ----- cmol _c kg ⁻¹ ----- | | |
| After rice cultivation | | | | | | | | | |
| No autoclaving | R-R | 7.1 bc | 0.22 d | 23.2 c | 6.1 a | 133 b | 14.0 a | 0.15 a | 3.4 bc |
| | R-B-R-B | 7.0 c | 0.26 b | 26.0 b | 5.8 a | 179 a | 13.7 a | 0.17 a | 3.4 b |
| | R-B-R-W | 7.3 a | 0.27 a | 27.3 a | 5.9 a | 185 a | 13.5 a | 0.15 a | 3.6 a |
| | S-B-S-B | 7.2 ab | 0.25 b | 23.0 c | 5.4 b | 132 b | 11.9 c | 0.10 b | 3.2 c |
| | S-B-S-B (No compost) | 7.3 a | 0.24 c | 19.8 d | 4.8 c | 100 c | 12.8 b | 0.09 b | 3.7 a |
| | Mean | 7.2 a | 0.25 a | 23.9 a | 5.6 c | 146 a | 13.2 a | 0.13 b | 3.5 a |
| Autoclaving | R-R | 7.1 a | 0.25 b | 23.3 b | 5.4 c | 129 bc | 14.4 a | 0.06 b | 3.2 d |
| | R-B-R-B | 7.0 b | 0.36 a | 26.1 a | 4.2 d | 176 a | 13.7 b | 0.10 a | 3.6 b |
| | R-B-R-W | 7.0 b | 0.20 bc | 26.5 a | 7.6 a | 179 a | 12.7 c | 0.12 a | 3.6 b |
| | S-B-S-B | 7.1 a | 0.20 bc | 22.2 c | 6.4 b | 144 b | 11.8 d | 0.09 ab | 3.4 c |
| | S-B-S-B (No compost) | 7.1 a | 0.18 c | 19.0 d | 6.1 b | 108 c | 12.4 c | 0.08 ab | 4.0 a |
| | Mean | 7.1 a | 0.24 a | 23.4 a | 5.9 bc | 147 a | 13.0 a | 0.09 c | 3.6 a |

Table 6. Chemical properties of soils after experiment for crop-yield potentials as affected by cropping systems in mid-mountainous area[†] (Continued).

| Soils | | pH | T-N | O.M. | C:N | Av.P ₂ O ₅ | Ex. cations | | |
|---------------------------|-------------------------------|--------|---------|--------------------|--------|----------------------------------|--|--------|---------|
| Treatments | Cropping records [†] | | | | | | Ca | K | Mg |
| | | 1:5 | % | g kg ⁻¹ | ratio | mg kg ⁻¹ | ----- cmol _c kg ⁻¹ ----- | | |
| After soybean cultivation | | | | | | | | | |
| No autoclaving | R-R | 6.2 a | 0.22 ab | 26.7 b | 7.1 ab | 52 b | 11.5 a | 0.18 a | 2.6 a |
| | R-B-R-B | 6.1 a | 0.22 ab | 28.3 a | 7.5 a | 101 a | 11.4 a | 0.15 a | 2.9 a |
| | R-B-R-W | 6.1 a | 0.23 a | 28.2 a | 7.1 ab | 94 a | 11.3 a | 0.16 a | 2.8 a |
| | S-B-S-B | 6.1 a | 0.21 bc | 24.4 c | 6.8 b | 88 a | 11.6 a | 0.18 a | 2.8 a |
| | S-B-S-B | 6.3 a | 0.20 c | 21.0 d | 6.1 c | 65 b | 11.5 a | 0.16 a | 3.0 a |
| | (No compost) | Mean | 6.2 b | 0.22 a | 25.7 a | 6.9 a | 80 b | 11.5 c | 0.15 a |
| Autoclaving | R-R | 5.8 c | 0.22 b | 24.1 c | 6.3 ab | 64 b | 12.1 a | 0.18 a | 2.7 bc |
| | R-B-R-B | 5.8 c | 0.24 a | 26.3 b | 6.4 ab | 99 a | 12.0 a | 0.18 a | 2.9 ab |
| | R-B-R-W | 5.9 bc | 0.25 a | 28.5 a | 6.6 a | 107 a | 12.2 a | 0.18 a | 2.9 abc |
| | S-B-S-B | 6.6 a | 0.24 a | 25.6 b | 6.2 bc | 96 a | 12.0 a | 0.18 a | 2.6 c |
| | S-B-S-B | 6.5 ab | 0.20 c | 20.5 d | 5.9 c | 67 b | 12.4 a | 0.17 a | 3.1 a |
| | (No compost) | Mean | 6.1 b | 0.23 a | 25.0 a | 6.3 b | 87 b | 12.1 b | 0.18 a |

[†] See foot notes to Table 1.

대 값만 높았다. 세부적으로 보면, 자연 상태의 토양조건에서 벼를 재배했을 때는 벼 연작토양을 제외한 모든 처리토양에서 콩 재배지에 비해 총 질소량이 유의성 없이 높은 절대 값을 보였고 C:N율은 유의적으로 낮았다 ($p < 0.05$). 그러나 멸균토양 조건에서는 벼와 콩의 재배지 간에 전반적인 차이가 없었는데, 국부적으로 퇴비 사용 또는 무사용의 콩-보리-콩-보리 작부토양과 퇴비사용의 벼-보리-벼-밀 작부토양에서 벼를 재배했을 때는 C:N율이 더 높았고 콩을 재배했을 때는 총 질소함량이 더 높은 것으로 나타나 자연토양조건에서와 반대되는 경향을 보였다.

그리고 자연토양과 멸균토양의 성적차이를 보면, 벼 재배지의 치환성 칼리와 콩 재배지의 C:N율만이 자연토양에서 유의적으로 높았고 ($p < 0.05$) 나머지 화학성분들은 차이가 없었다.

Discussion

보고에 의하면 (Ahn et al., 1992; Kim et al., 1993; Motomatsu, 1990; Park et al., 1993; Yoo et al., 1995), 답전유환에 의한 작물의 생산성은 논을 밭으로 3년 이내로 사용한 후에 논으로 되돌리는 방법으로 경작했을 때 좋은 경향이 있다. 이에 따라 칼슘 함량이 일반논보다 3배 이상 높은 중산간지의 논에서 2년간 벼 연작, 벼-보리-벼-보리, 벼-보리-벼-밀, 콩-보리-콩-보리 (이상의 보리·밀 재배지에 퇴비사용), 퇴비무사용의 콩-보리-콩-보리로 작부처리 한 자연토양에서 벼와 콩을 재배한 결과, 이들의 생산성은 (Tables 3 and 4) Kim et al. (1993), Park et al. (1993), Yoo et al. (1995)의 보고와 마찬가지로 각각 콩 재배지와 벼 연작지에서 높았다 ($p < 0.05$). 그리고 이들의 생산성은 작부토양의 물리화학성과 이들의 변환에 관여하는 미생물의 종합적인 영향을 받은 것으로 나타났다. 특히 벼의 정조수량과 벼짚무게는

Table 7. Correlation coefficients between crop-yield potentials and soil characteristics as affected by two years of cropping systems in mid-mountainous paddy soils[†] (n = 15).

| Items | Rice | | | | Soybean | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|----------|----------------------------|----------|------------------|----------|---------------|----------|
| | No autocl. soils [‡] | | Autocl. soils [§] | | No autocl. soils | | Autocl. soils | |
| | Grain wt | Straw wt | Grain wt | Straw wt | Grain wt | Stem wt | Grain wt | Stem wt |
| Water-stable aggregates | 0.24 | 0.17 | 0.48 | 0.50 | -0.12 | 0.07 | 0.62 * | 0.69 ** |
| Porosity | -0.68 ** | -0.76 ** | -0.16 | -0.05 | 0.76 ** | 0.61 * | -0.22 | -0.27 |
| pH | 0.00 | 0.02 | 0.24 | 0.19 | 0.05 | 0.02 | 0.14 | 0.15 |
| T-N | 0.36 | 0.23 | 0.75 ** | 0.65 ** | 0.23 | 0.15 | 0.69 ** | 0.77 *** |
| O.M. | 0.09 | -0.07 | 0.74 ** | 0.76 ** | 0.35 | 0.43 | 0.57 * | 0.62 * |
| C:N ratio | -0.62 * | -0.58 * | -0.53 * | -0.34 | 0.05 | 0.32 | -0.59 * | -0.71 ** |
| Av. P ₂ O ₅ | 0.24 | 0.10 | 0.68 ** | 0.56 * | 0.15 | 0.22 | 0.38 | 0.51 |
| Av. SiO ₂ | 0.50 | 0.52 * | -0.14 | -0.40 | -0.49 | -0.50 | -0.18 | -0.14 |
| Ex. Ca | -0.73 ** | -0.76 ** | -0.15 | 0.19 | 0.44 | 0.56 * | -0.32 | -0.26 |
| Ex. K | 0.21 | 0.05 | 0.70 ** | 0.75 ** | 0.20 | 0.36 | 0.53 * | 0.52 * |
| Ex. Mg | -0.27 | -0.24 | -0.05 | 0.40 | 0.16 | 0.05 | -0.29 | -0.16 |
| Bacteria | 0.61 * | 0.45 | 0.57 * | 0.44 | -0.19 | 0.01 | 0.40 | 0.46 |
| Actinomycetes | 0.18 | 0.13 | 0.81 *** | 0.38 | 0.01 | 0.20 | 0.46 | 0.60 * |
| Fungi | 0.18 | 0.02 | 0.26 | -0.08 | 0.00 | 0.12 | 0.03 | 0.11 |
| <i>Bacillus</i> sp. | 0.45 | 0.51 | 0.55 * | 0.75 ** | -0.31 | -0.31 | 0.53 * | 0.57 * |
| <i>Bradyrhizobium japonicum</i> | 0.14 | 0.28 | -0.62 * | -0.47 | -0.46 | -0.65 ** | -0.62 * | -0.57 * |
| <i>Pseudomonas</i> sp. | 0.43 | 0.22 | 0.22 | -0.03 | 0.00 | 0.02 | 0.15 | 0.15 |

[†] Cropping systems were rice-rice, rice-barley-rice-barley, rice-barley-rice-wheat, soybean-barley-soybean-barley (for barley and wheat commercial compost was applied with 10 MT ha⁻¹), and soybean-barley- soybean-barley without compost.

[‡] No autoclaving soils.

[§] Autoclaving soils.

*, **, and *** mean significant at 5%, 1%, and 0.1% probability levels by DMRT, respectively.

Table 7의 상관관계 성적에서 알 수 있듯이 시험 전 토양의 (Tables 1 and 2) 총 질소 [0.15 (퇴비 무시용의 콩-보리 작부토양) ~ 0.22% (벼-보리/밀 작부토양)], 유효규산과 [458 (벼 연작토양) ~ 715 mg kg⁻¹ (퇴비무시용의 콩-보리 작부토양)] 함께 세균의 서식밀도 ($p < 0.05$)와 정의 상관관계 경향을 보이기도 했지만, 토양 공극률 ($p < 0.01$), C:N율 ($p < 0.05$), 칼슘 ($p < 0.01$), 마그네슘의 함량과는 부의 상관관계를 이루었다. 그러면서 벼 생산성은 벼 연작의 작부토양에서 가장 낮았고 퇴비무시용의 콩-보리 작부토양에서 가장 높았다. 이러한 결과는 벼 연작 토양이 다른 작부토양에 비해 총 질소와 유효인산 함량이 낮으면서 높은 공극률과 C:N율, 칼슘을 함유하였기 때문에 벼 뿌리활력이 감소되고 (Pezeshki and DeLaune, 2012; Ponnampuruma, 1984) 토양미생물과의 질소이용 경쟁관계에서 벼가 토양질소를 이용하기 어렵게 되고 (Cortez et al, 2007; USDA, 2011), 더불어서 인산 이용에 나쁜 토양환경이 조성되어 (AgSource, 2015) 일어난 것으로 추정되었다. 일반적으로 토양의 공극은 작물의 뿌리발달에 바람직한 것으로 알려져 있지만 (Colmer, 2003) 경우에 따라 부정적인 영향을 끼치기도 하는 데 (Pagliai et al., 1983), 본 시험에서 벼 생산성에 부정적인 영향을 끼친 것은 플라스틱 Pot의 토양공극에 채워진 물이 여름철에 가온되어 일어난 (Bunt and Kulwiec, 1970) 환원장해가 주된 원인이었을 것으로 생각되었다 (Pezeshki and DeLaune, 2012). 이와 반대로 퇴비를 1년만 넣은 퇴비무시용의 콩-보리 작부토양과 퇴비무시용의 콩-보리 작부토양은 퇴비를 2년간 사용한 벼-보리/밀 작부토양보다 총 질

소와 유기물, 유효인산이 낮았음에도 (Table 1) 이들에 못지않은 수량과 벧짚무게를 ($p < 0.05$) 보였다. 이러한 원인으로 낮은 값의 공극률을 주목할 수 있었으나 (Tables 1 and 7; Ahn et al., 1992; Park et al., 1992), 공극률이 벼 생산성과 뚜렷한 비례관계를 보이지 않은 것으로 볼 때 공극의 크기별 영향에 대한 연구가 더 필요할 것으로 생각되었다 (Pagliari and De Nobili, 1993). Ryu et al. (1971)은 우리나라 논에서의 벼 생산력은 배수불량 논인 경우 유기물 함량과 부의 상관을 보였다고 하였고, 화학성은 인산과 칼슘, 인산과 마그네슘의 함량 간에 부의 상관을 보인 경우가 많았다고 하였는데 본 시험에서도 부분적으로 비슷한 경향이였다.

콩의 생산성은 벼와 다르게 공극률과 높은 정의 상관을 보이면서 (Table 7; 수량, $p < 0.01$; 콩대, $p < 0.05$) 공극률이 가장 높은 벼 연작토양에서 가장 높은 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 그러나 식물의 성장을 촉진시키기도 하는 바실러스균 (Tables 1 and 2; Kang et al., 2017)과 질소고정 근류균인 *B. japonicum* 의 서식밀도는 콩의 생산성과 부의 상관 경향을 보였다. 그 원인은 이들이 콩의 생육을 저해했기 때문이라기보다 이들과 작부토양별로 상반된 성격분포 경향을 보이면서 콩의 생산성과 높은 정의 상관관계를 나타낸 공극률을 비롯한 유기물, 칼슘 등의 복합적인 영향이 컸기 때문이라고 해석되었다. 이러한 경향은 *B. japonicum*의 질소고정잠재능 성적에서도 (Table 5) 확인되었다. 즉, 퇴비 사용 또는 무사용의 콩-보리 작부토양은 벼 연작토양보다 *B. japonicum* 밀도가 100배 이상 높고 질소고정잠재능 또한 우수하였지만 ($p < 0.05$) 콩의 생산성은 이처럼 반대경향을 보였다 (Table 4). Table 7에서는 또 유효구산이 콩의 생산성에 부정적인 영향을 끼친 것으로 분석되었는데, 이는 Miyake and Takahashi (1985)의 보고처럼 작부토양 전체에서 602 (콩-보리-콩-보리 작부토양) ~ 715 mg kg⁻¹ (퇴비무사용의 콩-보리 작부토양) 범위로 높게 함유된 구산이 콩의 인산, 칼슘, 칼리, 마그네슘 흡수를 방해해서 일어났을 것으로 생각되었다. 그리고 작부토양 가운데 공극률과 함께 가장 높은 C:N율을 지닌 벼 연작토양에서 가장 많은 콩 수량과 콩대를 생산한 것은 C:N율이 콩과 질소고정 근류균과의 공생관계 생리에 긍정적으로 작용했음을 의미하며 (Kang et al., 1991; Kang et al., 1997), 따라서 콩이 아닌 다른 발작물은 벼 연작토양에서 이와 다른 생육양상을 보일 것으로 판단되었다 (Park et al., 1992).

한편 멸균처리토양에서는 벼와 콩의 평균수량이 전반적으로 자연토양에서보다 각각 2.7배와 1.7배 높았다. 작부토양별로는 공극률이 가장 높았던 벼 연작토양에서의 벼 정조수량 증가가 돋보였다. 이 같은 결과는 고온고압의 멸균처리로 인해 토양의 공극이 허물어지면서 (Hamza and Anderson, 2005) Table 7과 같이 공극의 부정적이거나 긍정적인 영향이 자연토양에 비해서 줄고 (벼, $r = -0.16$; 콩, $r = -0.22$) 견딜성이 강한 (Cosentino et al., 2006) 내수성입단의 긍정적 영향이 (Bartlova et al., 2015) 증대된 (벼, $r = 0.48$; 콩, $r = 0.62$) 효과와 함께, 작부토양에 간직된 식물 잔사 등의 유기물질과 토양생물 유기체의 무기화 특히, 작부토양의 건조 후 담수처리로 인한 유기태질소의 무기화 촉진효과 (Buresh et al., 2008; Kaiser et al., 2015) 영향 때문인 것으로 해석되었다. 이는 퇴비사용으로 이분해성 비료성분이 많았던 벼-보리/밀 작부토양과 콩-보리 작부토양에서의 벼와 콩의 수량이 벼 연작토양 및 퇴비무사용의 콩-보리 작부토양보다 높게 나왔다는 ($p < 0.05$) 점에서도 유추할 수 있었다. 실제로 멸균토양의 침출수에는 자연토양의 침출수에 비해 총 질소가 5.8 (벼 연작토양) ~ 8.9배 (벼-보리-벼-밀 작부토양), 총 인은 4.1 (벼 연작토양) ~ 5.1배 (벼-보리-벼-밀 작부토양) 높았다. 이 같은 멸균처리토양의 양분가용화 영향으로 콩의 엽색도가 공중질소 이용효과가 있기까지 시일이 걸렸던 자연토양과 다르게 생육초기부터 높은 값을 보이기도 하였다 (Table 4). 그리고 콩이 벼보다 생산성 확보 면에서 C:N율의 부정적 영향을 더 많이 받은 것은 (Table 7) 콩 재배토양이 벼 재배토양에 비해 유기태 질소의 무기화 여건이 좋지 않은데다가 (Kaiser et al., 2015) 콩의 공생근류균인 *B. japonicum*이 사멸된 상태에서 생육에 필요한 지력 질소마저 자연적으로 증식한 미생물에게 많이 빼앗겼기 때문이라 생각되었다 (Kang, 2007; Kim and Lee, 1992;

USDA, 2011). 또한 자연토양 대비 멸균토양에서의 콩 종자의 평균 증수율이 벼 정조수량 증수율의 63%에 불과한 것과 시험토양 중 C:N율이 가장 높았던 벼 연작토양에서 가장 낮은 콩 수량을 보인 것도 동일한 영향의 결과로 해석되었다.

Olk et al. (2000)은 벼논에서 담수기간이 길어짐에 따라 humic acid는 수소를 많이 함유하게 되어 더 많은 아마이드와 아미노, 하이드록실 그룹 등을 갖게 되면서 산화 또는 부식화가 지연되는데 특히 이동성 humic acid는 이동이 잘 안 되는 calcium humate 보다 부식화가 늦고 C:N율이 낮으며 아마이드 농도가 높다고 하였고, Cheng et al. (2003)과 Vanotti and Bundy (1995)은 콩 밭에서는 벼논보다 유기물질의 부식화가 잘 된다고 하였는데, 본 시험의 자연토양에서는 이와 다른 경향을 보였다 (Table 6). 즉, 벼를 재배한 토양은 시험 전보다 C:N율이 낮아졌는데 반해서 콩을 재배한 토양에서는 유기물 함량이 높아지면서 C:N율이 벼 재배지보다 높았다 ($p < 0.05$). 이러한 현상은 작부토양 시료를 말리는 과정에 일어난 건조효과와 (Kaiser et al., 2015), Pot를 이용한 재배과정에서의 벼 담수관리에 의한 유기태질소의 무기화 (Buresh et al., 2008), 콩의 배수관리에 따른 무기태질소의 유실 (Alves et al., 2001; Pedersen and Lauer, 2004), 그리고 이들 작물의 양분이용 등의 영향에 의해 일어났을 것으로 해석되었다.

이상의 작부토양의 이화학적 및 미생물상과 잠재생산성과의 관계 분석결과로 볼 때, 자연토양에서 벼는 공극률과 C:N율, 칼슘의 부의 영향에 의해서, 콩은 공극률의 정의 영향에 의해서 생산성이 결정되는 경향이였다. 가용성 영양분이 풍부한 멸균토양에서는 벼와 콩 모두 토양의 물리·화학·생물적 요인의 상호작용으로 이루어진 (Cosentino et al., 2006; Regelink et al., 2015; Tisdall and Oades, 1982), 그러면서 정의 영향을 끼친 내수성 입단과 함께 부의 영향을 끼친 C:N율에 의해서 (USDA, 2011) 생산성이 결정되는 경향이였다. 결론적으로 배수가 약간불량한 중산간지 양토의 논에 작부처리 된 자연토양의 잠재생산성은 벼와 콩 모두 1차적으로 공극률에 의해 좌우되는 경향이였고, 멸균처리된 토양에서는 C:N율에 의해 결정되는 경향이었는데 내수성입단의 영향도 무시할 수 없었다. 그러므로 논토양에서 벼와 콩의 지속적인 생산성 향상을 위해서는 배수여건을 고려하여 이들을 우선적으로 관리하면서 (Pezeshki and DeLaune, 2012; Ryu et al., 1971) 토양의 화학성과 미생물상의 종합적인 관리에 힘써야 할 것으로 생각되었다 (Cameron et al., 2013; Dias et al., 2015; Im, 1978; Kang et al., 2016; Lee et al., 2008; Nishida, 2016; Regelink et al., 2015; USDA, 2011).

Conclusions

배수가 약간 불량하고 칼슘 함량이 일반논보다 3배 이상 높은 해발 285 m의 중산간지 논에서 2년간 작부처리 한 벼-벼, 벼-보리-벼-보리, 벼-보리-벼-밀, 콩-보리-콩-보리 (이상의 보리·밀 재배지에 퇴비사용), 퇴비무사용 콩-보리-콩-보리 재배토양의 5종을 고압멸균처리 한 것과 안한 것 (자연토양)의 두 집단으로 나누어 벼와 콩의 잠재생산성을 Pot 시험하였다. 그 결과, 자연토양조건에서는 벼의 정조수량과 벧짚무게가 퇴비를 사용한 콩-보리 작부토양에서 가장 높았고 벼 연작지에서 가장 낮았다 ($p < 0.05$). 반대로 콩의 수량과 콩대무게는 벼 연작토양에서 가장 높았고 ($p < 0.05$) 나머지 토양에서는 서로 유의적인 차이가 없었다. 멸균토양에서의 벼와 콩의 생산성은 퇴비를 사용한 벼-보리/밀 작부와 콩-보리 작부의 토양이 벼 연작토양 및 퇴비무사용의 콩-보리 작부토양보다 유의적으로 높았다 ($p < 0.05$). 그리고 자연토양에서의 벼 생산성은 토양의 공극률 ($p < 0.01$), C:N율 ($p < 0.05$), 치환성 칼슘 ($p < 0.01$)과 부의 상관을 보였고, 콩은 공극률과 정의 상관을 보이면서 ($p < 0.05$) 근류균 *B. japonicum*의 긍정적인 역할이 확인되지 않았다. 멸균토양에서는 벼의 정조수량과 벧짚무게 모두 총 질소 및 유기물, 치환성 칼리 등과 고도로 유의적인 정의 상관을 보였지만 ($p < 0.01$) C:N율과는 정조수량에서 부의 상관을 보였고 ($p < 0.05$), 콩의 수량과 콩대무게는 내수성입단 ($p < 0.05$), 총

질소 ($p < 0.01$), 유기물 ($p < 0.05$), 치환성 칼리와 ($p < 0.05$) 정의 상관관계를 보였으나 C:N율과는 부의 상관관계를 나타내었다 ($p < 0.05$). 그러므로 벼와 콩의 생산성은 공통적으로 자연토양에서는 토양의 공극률의 영향을 많이 받고, 멸균토양에서는 C:N율의 영향을 많이 받는 경향이였다.

Acknowledgement

This research was supported by Rural Development Administration (Project No. PJ010164032016), Republic of Korea.

References

- AgSource. 2015. Soil phosphorus reactions. Available at: <http://documents.crinet.com//AgSource-Cooperative-Services/Agronomy/F-10957-15-v2Phos-Rxn-FS-GENERIC.pdf>. Accessed in June 2017.
- Ahn, S.B., T. Motomatsu, Y.S. Kim, K.S. Lee, and S.W. Hwang. 1992. Studies on rice productivity and mineral nutrients on the paddy-upland rotation system. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 25:334-341.
- Alves, B.J.R., L. Zotarelli, W.A.R. Lara-Cabezas, E. Torres, M. Hungria, S. Urquiaga, and R.M. Boddey. 2001. Benefit of legume-fixed N in crop rotations under zero-tillage. *Nitrogen fixation: from molecules to crop productivity*. pp. 533-534.
- Bartlova, J., B. Badalikova, L. Pospisilova, E. Pokorny, and B. Sarapatka. 2015. Water stability of soil aggregates in different systems of tillage. *Soil Water Res.* 10:147-154.
- Bunt, A.C. and Z.J. Kulwiec. 1970. The effect of container porosity on root environment and plant growth: I. Temperature. *Plant Soil* 32:65-80.
- Buresh, R.J., K.R. Reddy, and C. van Kessel. 2008. Nitrogen transformations in submerged soils. pp. 401-436. *In* J.S. Sheper and W.R. Raun (ed.) *Nitrogen in Agricultural Systems*. Agron. Monogr. 49, ASA, CSSA, and SSSA. Madison, WI, USA.
- Cameron, K.C., H.J. Di, and J.L. Moir. 2013. Nitrogen losses from the soil/ plant system: a review. *Ann. Appl. Biol.* 162:145-173.
- Cheng, W., D.W. Johnson, and S. Fu. 2003. Rhizosphere effects on decomposition: controls of plant species, phenology, and fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1418-1427.
- Choi, S.C., J. Dyck, and N. Childs. 2016. The rice market in South Korea, RCS-16I-01, Economic Research Service/USDA.
- Colmer, T.D. 2003. Aerenchyma and an inducible barrier to radial oxygen loss facilitate root aeration in upland, paddy and deep-water rice (*Oryza sativa* L.). *Ann. Bot.* 91:301-309.
- Cook, R.J. 2006. Toward cropping systems that enhance productivity and sustainability. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103:18389-18394.
- Cortez, J., E. Garnier, N. Pérez-Haguindeguy, M. Debussche, and D. Gillon. 2007. Plant traits, litter quality, and decomposition in a Mediterranean old-field succession. *Plant Soil* 296:19-34.
- Cosentino, D., C. Chenub, and Y. Le Bissonnais. 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biol. Biochem.* 38:2053-2062.
- Dias, T., A. Dukes, and P.M. Antunes. 2015. Accounting for soil biotic effects on soil health and crop productivity in the design of crop rotations. *J. Sci. Food Agric.* 95:447-454.

- Hamza, M.A. and W.K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82:121-145.
- Im, J.N. 1978. Soil physical properties and organic matter. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 11:145-160.
- Kaiser, M., M. Kleber, and A.A. Berhe. 2015. How air-drying and rewetting modify soil organic matter characteristics: an assessment to improve data interpretation and inference. *Soil Biol. Biochem.* 80:324-340.
- Kang, S.S., A.S. Roh, S.C. Choi, Y.S. Kim, H.J. Kim, M.T. Choi, B.K. Ahn, H.W. Kim, H.K. Kim, J.H. Park, Y.H. Lee, S.H. Yang, J.S. Ryu, Y.S. Jang, M.S. Kim, Y.K. Sonn, C.H. Lee, S.G. Ha, D.B. Lee, and Y.H. Kim. 2012. Status and changes in chemical properties of paddy soil in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:968-972.
- Kang, U.G. 1998. Symbiotic potential of *Bradyrhizobium japonicum* indigenous to arable land in the southern part of Korea. *J. Korean Agric. Chem. Biotechnol.* 41:247-252.
- Kang, U.G. 2007. Enhancement of soil productivity by soybean cultivation. *Korea Soybean Digest* 24:1-13.
- Kang, U.G., C.Y. Park, M.T. Youn, S.U. Choi, and H.S. Ha. 1997. relatedness of naturalized *Bradyrhizobium japonicum* populations with soil physico-chemical characteristics as affected by paddy-upland rotation. *J. Korean Agric. Chem. Biotechnol.* 40:438-441.
- Kang, U.G., H.M. Park, J.Y. Ko, J.S. Lee, W.T. Jeon, C.Y. Park, K.D. Park, and V.K. Chebotar. 2017. Isolation, root colonization and evaluation of some plant growth-promoting rhizobacteria in paddy rice. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50:135-149.
- Kang, U.G., P. Somasegaran, H.J. Hoben, and B.B. Bohlool. 1991. Symbiotic potential, competitiveness, and serological properties of *Bradyrhizobium japonicum* indigenous to Korean soils. *Appl. Environ. Microbiol.* 57:1038-1045.
- Kang, U.G., W.C. Shin, J.S. Choi, Y.B. Lee, and Y.H. Lee. 2016. Impacts of cropping systems on the distribution of soil microorganisms in mid-mountainous paddy. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:480-488.
- Kim, C.G, H.K. Jeong, D.H. Moon, and C. Tisdell. 2014. Establishment of sustainable agriculture system in Korea (Year 2 of 2). Krei research report R732. ISBN 978-89-6013-677-9 93520.
- Kim, H.S., G.S. Chae, S.E. Yoon, and Y.S. Lee. 2015. A study on improving dry-field farming competitiveness in response to the expansion of market opening (Year 1 of 3). KREI research report R760. ISBN 978-89-6013-821-6 93520.
- 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. *Korean J. Crop Sci.* 38:304-311.
- Kim, S.H. and S.K. Lee. 1992. Role of crops and residues, and fertilization to changes of population, soil chemical properties and plant growth I. Microbial population in the habitate. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 25:370-377.
- Kuykendall, L.D., T.E. Devine, and P.B. Cregan. 1982. Positive role of nodulation on the establishment of *Rhizobium japonicum* in subsequent crops of soybean. *Current Microbiol.* 7:79-81.
- Lee, C.H., U.G. Kang, K.D. Park, D.K. Lee, and P.J. Kim. 2008. Long-term fertilization effects on rice productivity and nutrient efficiency in Korean paddy. *Plant Nutr.* 31:1496-1506.
- Miyake, Y. and E. Takahashi. 1985. Effect of silicon on the growth of soybean plants in a solution culture. *Soil Sci. Plant Nutr.* 31:625-636.
- Moroyu, H. 1983. Change of physical and chemical properties of paddy soils under the cultivation of upland crops. *Jpn J. Soil Sci. Plant Nutr.* 54:434-441.
- Motomatsu, T. 1990. Strategic development in future and results of farmland cultivation project. Symposium of Agricultural Sciences Institute. pp. 161-183.
- Muthukumarasamy, R., U.G. Kang, K.D. Park, W.T. Jeon, C.Y. Park, Y.S. Cho, S.W. Kwon, J.Y. Song, D.H. Roh, and G. Revathi. 2007. Enumeration, isolation and identification of diazotrophs from wetland rice varieties grown with long-term application of N and compost and their short-term inoculation effect on rice plants. *J. Appl. Microbiol.* 102:981-991.

- NICS (National Institute of Crop Science). 2010. Practical research plan for 2010. National Institute of Crop Science, Suwon, Korea.
- NICS (National Institute of Crop Science). 2014. An analysis handbook for the environment of staple crop. National Institute of Crop Science, Suwon, Korea.
- Nishida, M. 2016. Decline in fertility of paddy soils induced by paddy rice and upland soybean rotation, and measures against the decline. *Jpn. Agric. Res. Q.* 50:87-94.
- 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 Sci. Plant Nutr.* 59:208-217.
- Olk, D.C., G. Brunetti, and N. Senesi. 2000. Decrease in humification of organic matter with intensified lowland rice cropping: A wet chemical and spectroscopic investigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1337-1347.
- Olsson, L. and J. Ardö. 2002. Soil carbon sequestration in degraded semiarid Agro-Ecosystems-Perils and potentials. *Ambio* 31:471-477.
- Pagliai, M. and M. De Nobili. 1993. Relationships between soil porosity, root development and soil enzyme activity. *Geoderma* 56:243-256.
- Pagliai, M., M. La Marca, and G. Lucamante. 1983. Micromorphometric and micromorphological investigations of a clay loam soil in viticulture under zero and conventional tillage. *J. Soil Sci.* 34:391-403.
- Park, C.Y., U.G. Kang, G.S. Hwang, and Y.T. Jung. 1993. Changes of crop yields according to cropping systems and fertilizing levels in paddy-upland rotation soils. *RDA J. Agric. Sci.* 35(S & F):281-288.
- Park, C.Y., Y.P. No, G.S. Hwang, Y.T. Jung, and S.K. Lee. 1992. Changes of soil characteristics by paddy-upland rotation and establishment of foundation for that rotation. Year 1992 NYCES (Yeongnam Crop Experiment Station) research report. pp. 609-620.
- Parr, J.F., R.I. Papendick, S.B. Hornick, and R.E. Meyer. 1992. Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *Am. J. Altern. Agric.* 7:5-11.
- Pedersen, P. and J.G. Lauer. 2004. Soybean growth and development response to rotation sequence and tillage system. *Agron. J.* 96:1005-1012.
- Pezeshki, S.R. and R.D. DeLaune. 2012. Soil oxidation-reduction in wetlands and its impact on plant functioning. *Biology* 1:196-221.
- Ponnamperuma, F.N. 1984. Effects of flooding on soils. In: T.T. Kozlowski ed. *Flooding and plant growth*. New York: Academic Press, pp. 9-45.
- Power, J.F. 1987. Legume: their potential role in agricultural production. *Amer. J. Altern. Agric.* 2:69-73.
- Regelink, I.C., C.R. Stoof, S. Rousseva, L. Weng, G.J. Lair, P. Kram, N.P. Nikolaidis, M. Kercheva, S. Banwart, and R.N.J. Comans. 2015. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. *Geoderma* 247-248:24-37.
- Ryu, I.S., Y.S. Kim, and C.S. Park. 1971. Studies on the relationship between productivity of paddy soils, and their physical and chemical properties. *RDA. J. Agri. Sci.* 14(S & F):1-16.
- Statistics Korea. 2016. Annual trends of food grain consumption, 2015. KOSTAT database. Available at: <http://kostat.go.kr/portal/english/surveyOutlines/8/4/index.static>. Accessed in June 2017.
- Tisdall, J.M. and J.M. Oades. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141-163.
- Turrall, H., J. Burke, and J.M. Faures. 2011. Climate change, water and food security. Available at: <http://www.fao.org/docrep/014/i2096e/i2096e.pdf>. Accessed in June 2017.
- USDA NRCS. 2011. Carbon to nitrogen ratios in cropping systems. Available at: http://www.nrcs.usda.gov/wps/PA_NRCSConsumption/download?cid=nrcs142p2_052823&ext=pdf. Accessed in June 2017.
- Vanotti, M.B. and L.G. Bundy. 1995. Soybean effects on soil nitrogen availability in crop rotations. *Agron. J.* 87:676-680.

- Vincent, J.M. 1970. A manual for the practical study of root nodule-bacteria. Blackwell Scientific Publication, Oxford.
- Wang, Q., Y. Li, and A. Alva. 2010. Cropping systems to improve carbon sequestration for mitigation of climate change. *J. Environ. Prot.* 1: 207-215.
- Yoo, C.H., C.H. Yang, K.B. Lee, J.G. Kim, T.Y. Uhm, J.D. So, and G.S. Rhee. 1995. Studies on paddy-upland rotation at fulvio-marine paddy soil 2. The change of yield and soil properties on cropping systems at paddy-upland rotation cultivation. *RDA. J. Agric. Sci.* 37(S & F):271-278.
- Zhang, J., A.M. Blackmer, and T.M. Blackmer. 2008. Differences in physiological age affect diagnosis of nitrogen deficiencies in corn fields. *Pedosphere* 18:545-553.