

## 경남지역 논 토양 토성에 따른 미생물 군집 변화

이영한<sup>†</sup> · 안병구<sup>1†</sup> · 이성태 · 신민아 · 김은석 · 송원두 · 손연규<sup>2\*</sup>

경상남도농업기술원, <sup>1</sup>전라북도농업기술원, <sup>2</sup>국립농업과학원

## Impacts of Soil Texture on Microbial Community from Paddy Soils in Gyeongnam Province

Young-Han Lee<sup>†</sup>, Byung-Koo Ahn<sup>1†</sup>, Seong-Tae Lee, Min-A Shin, Eun-Seok Kim, Won-Doo Song, and Yeon Kyu Sonn<sup>2\*</sup>

Gyeongsangnam-do Agricultural Research and Extension Services, Jinju 660-370, Korea

<sup>1</sup>Jeollabuk-do Agricultural Research and Extension Services, Iksan 570-704, Korea

<sup>2</sup>National Academy of Agricultural Science, RDA, Suin-ro 150, Suwon, 441-707, Korea

The present study evaluated the soil microbial communities by fatty acid methyl ester (FAME) method in paddy soils at 11 sites for silt loam, 4 sites for sandy loam, and 5 sites for loam in Gyeongnam Province. The FAME content of fungi in loam ( $76 \text{ nmol g}^{-1}$ ) was higher than that of in sandy loam ( $45 \text{ nmol g}^{-1}$ ). Sandy loam had significantly lower ratio of cy19:0 to 18:1 $\omega$ 7c compared with that of silt loam ( $p < 0.05$ ), indicating that microbial stress decreased. In addition, actinomycetes community of loam was higher than that of sandy loam.

**Key words:** Paddy soil, Microbial community, Soil texture, FAME

### 서 언

토양은 1 g에 수억 마리의 생명체가 일정한 분포비율로 살고 있는 동적 자연체이다. 토양환경이 외부로부터 급격한 변화를 받게 되면 미생물의 군집은 영향을 받게 된다 (Lee and Kim, 2011; Lee and Yun, 2011). 미생물의 군집 비율은 fatty acid methyl ester (FAME) 방법을 사용하여 분석할 수 있다 (Kim and Lee, 2011; Lee et al., 2011; Macalady et al., 1998; Schutter and Dick, 2000). 경남지역 일반농경지에서 토성과 관련된 미생물의 군집은 밭 토양과 과수원 토양에서 보고된 바가 있지만 논 토양과 관련하여 토성별 미생물의 군집은 보고된 바가 없다. 경남지역 밭 토양 미생물의 군집은 Lee and Ha (2011b)에 따르면 총 세균 함량은 곰팡이 함량은 사양토에서  $51 \text{ nmol g}^{-1}$ 으로 미사질양토  $21 \text{ nmol g}^{-1}$ 에 비해 유의적으로 높았으며 양토는 총 FAME 함량이  $263 \text{ nmol g}^{-1}$ , 총 세균 함량이  $83 \text{ nmol g}^{-1}$ , 그람음성 세균  $38 \text{ nmol g}^{-1}$ , 그람양성 세균  $37 \text{ nmol g}^{-1}$ , 방선균  $5.0 \text{ nmol g}^{-1}$ , 내생균균군  $8.4 \text{ nmol g}^{-1}$ 으로 다른 토성에 비해

높았으나 유의적인 차이는 없었다. 또한, 경남 밭 토양 미생물체량은 양토에서  $318 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 미사질양토  $135 \text{ mg kg}^{-1}$  보다 유의적으로 높다고 하였다 (Lee and Ha, 2011a). 그리고 그람음성 세균과 그람양성 세균의 비율은 미사질양토 1.03, 양토 1.02 및 사양토 0.93으로 사양토에서 낮았으며 곰팡이와 세균의 비율은 사양토에서 0.71로 양토 0.54 및 미사질양토 0.51에 비해 높았다. 토성에 따라 미사질양토는 방선균 군집이 2.2%로 사양토 1.8%에 비해 유의적으로 높았으며 곰팡이 군집은 사양토에서 20.4%로 양토 16.4%와 미사질양토 15.4%에 비해 유의적으로 높았다 (Lee and Ha, 2011b). 경남지역 과수원 토양에서 토성별 총 FAME 함량은 미사질양토가  $386 \text{ nmol g}^{-1}$ 으로 가장 높았고 양토는  $318 \text{ nmol g}^{-1}$ 이었으며 사양토는  $193 \text{ nmol g}^{-1}$ 으로 낮았으나 유의적인 차이는 없었다 (Lee and Lee, 2011). 그리고 미사질양토는 내생균균군 3.6%, 사양토는 곰팡이 20.5%, 양토에서는 총 세균 28.8%, 그람음성 세균 13.8%, 그람양성 세균 13.0% 및 방선균 1.5%로 가장 높았으나 유의성은 없었다.

본 연구는 경남지역 논 토양에서 토성별 FAME 분석을 통한 토양 미생물 군집을 검토하였으며 주성분분석에 의한 주요 변동요인을 해석하여 친환경 토양관리를 위한 기초 자료를 제공하고자 수행하였다.

접수 : 2011. 11. 20 수리 : 2011. 12. 9

<sup>†</sup>공동 제1저자

\*연락저자 : Phone: +82312900337

E-mail: sonnyk@korea.kr

## 재료 및 방법

**논 토양 지점 선정 및 시료채취 방법** 경남지역 논 토양의 화학성분과 미생물상의 관계를 분석하기 위하여 2011년에 미사질양토 11개소, 사양토 4개소, 양토 5개소를 선정하였다. 토양은 비료를 사용하기 전인 3월부터 4월 사이에 표토를 0-15 cm 깊이에서 500 g 정도를 3반복으로 채취하였다.

**토양 시료조제 및 화학성분 분석방법** 채취한 토양은 실험실에서 7일간 풍건하여 2 mm 체를 통과된 것을 화학성분 분석에 사용하였다. 화학성분 분석은 농촌진흥청 농업과학기술원 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 2000)을 적용하여 분석하였다.

**토양 미생물 군집 분석** 미생물 군집 분석을 위해 채취한 토양은 -20 °C에 2일간 보관하여 동결건조 한 후 미생물 군집 분석에 사용하였다. 미생물 군집은 개별적으로 미생물이 가지고 있는 고유 세포벽 지방산을 분석하는 FAME 방법을 이용하였다 (Schutter and Dick, 2000). 또한, 미생물의 정량은 internal standard 19:0을 이용하여 분석하였다. 미생물 군집 분석은 GC Agilent 6890N (Agilent Technologies, USA)과 HP-ULTRA 2 capillary column (25 m × 0.2 mm × 0.33 μm film thickness, Agilent Technologies, USA)을 이용하였다. 칼럼 온도는 170°C에서 270°C가 될 때까지 분당 5°C씩 가온하였고 마지막 270°C에서 2분간 유지하였다. 분석된 미생물 세포벽 지방산은 MIDI software program package (MIDI, Inc., Newark, DE)을 이용하여 각각의 지방산에 대한 미생물 군집을 분석하였다 (Hamel et al., 2006). 총 세균은 i15:0, a15:0, 15:0, i16:0, 16:1ω9, 16:1ω7, i17:0, a17:0, 17:0, cy17:0, 18:1ω7c 및 cy19:0 함량을 합산하여 분석하였다 (Macalady et al., 1998; Schutter and Dick, 2000). 그람음성 세균은 지방산 16:1ω7c, 18:1ω7c, cy17:0 및 cy19:0을 합산하였고 (Zelles, 1997) 그람양성 세균은 지방산 i15:0, a15:0, i16:0, i17:0 및 a17:0을 합산하여 구하였다 (Zelles, 1997). 방선균은 지방산 10Me18:0을

사용하였고 (Schutter and Dick, 2000) 곰팡이는 지방산 18:1ω9c와 18:2ω6c를 사용하였다 (Bradley et al., 2006). 또한, 지방산 16:1ω5c는 arbuscular mycorrhizal fungi의 biomarker로 이용하였다 (Balsler et al., 2005; Frostegård et al., 1993; Olsson et al., 1998). 그리고 그람음성 세균과 그람양성 세균의 비율, 곰팡이와 총 세균의 비율을 구하였으며 cy17:0와 16:1ω7c 비율 및 cy19:0와 18:1ω7c 비율은 토양에서 미생물 스트레스 지표로 사용하였다 (Bossio and Scow, 1998).

**다변량 주성분 분석 및 통계분석** 분석된 미생물 특성은 SAS 프로그램 9.1.3 버전 (2006)을 사용하였다. 토성별 토양 미생물 특성과 화학성은 5% 수준에서 Tukey's studentized range test를 하였다. 또한, 토양 화학성분과 미생물 군집은 주성분 분석을 통하여 토양 유형에 따른 차이를 비교 검토하였다.

## 결과 및 고찰

**논 토양 미생물 함량 비교** 경남지역 논 토양의 토성별 미생물 함량을 FAME 방법으로 분석한 결과는 Table 1과 같다. 경남지역 논 토양 미생물 지방산 함량 평균값은 미사질양토에서 총 FAME 함량이 484 nmol g<sup>-1</sup>이었으며 총 세균 함량은 159 nmol g<sup>-1</sup>, 그람음성 세균은 84 nmol g<sup>-1</sup>, 그람양성 세균은 61 nmol g<sup>-1</sup>, 방선균은 6.0 nmol g<sup>-1</sup>, 곰팡이는 68 nmol g<sup>-1</sup>, 내생균근균은 6.9 nmol g<sup>-1</sup>이었다. 사양토는 총 FAME 함량이 331 nmol g<sup>-1</sup>이었으며 총 세균 함량은 101 nmol g<sup>-1</sup>, 그람음성 세균은 53 nmol g<sup>-1</sup>, 그람양성 세균은 39 nmol g<sup>-1</sup>, 방선균은 3.1 nmol g<sup>-1</sup>, 곰팡이는 45 nmol g<sup>-1</sup>, 내생균근균은 3.9 nmol g<sup>-1</sup>이었다. 곰팡이의 지방산 함량은 양토가 사양토에 비해 유의적으로 많았으나 (p<0.05) 나머지 다른 미생물 지방산 함량은 차이가 없었다. 이러한 결과는 벼 생육초기 논 토양 (Kim and Lee, 2011) 보다 높았으며 경남지역 밭 토양 (Lee and Ha, 2011b) 및 경남지역 과수원 토양 (Lee and Lee, 2011)에 비해 내생균근균 함량은 낮았으나 다른 미생물 군집은 높았다. 그리고 사양토에서 미

**Table 1. Microbial biomass in paddy soils as affected by soil texture.**

Soil texture	TF <sup>†</sup>	B	G(-)	G(+)	A	F	AMF	G(-)/G(+)	F/B	SMBC	DHA	G	Sample	
		nmol g <sup>-1</sup>									mg kg <sup>-1</sup>	μg TPF g <sup>-1</sup> 24 h <sup>-1</sup>	mg g <sup>-1</sup>	
Silt loam	484a	159a	84a	61a	6.0a	68ab	6.9a	1.38a	0.44a	1,076a	180a	0.93a	11	
Sandy loam	331a	101a	53a	39a	3.1a	45b	3.9a	1.37a	0.46a	458a	67a	0.64a	4	
Loam	505a	155a	78a	62a	6.7a	76a	7.1a	1.28a	0.49a	954a	143a	0.61a	5	

<sup>†</sup>TF, total FAMES; B, total bacteria; G(-), Gram-negative bacteria; G(+), Gram-positive bacteria; A, actinomycetes; F, fungi; AMF, arbuscular mycorrhizal fungi; SMBC, soil microbial biomass carbon; DHA, dehydrogenase activity; G, glomalin.

<sup>‡</sup>Tukey's studentized range test at 5% level.

**Table 2. Chemical properties of affected by soil texture.**

Soil texture	pH	EC	OM	Avail. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Exch. Cation				Avail. SiO <sub>2</sub>	CEC
					K	Ca	Mg	Na		
	(1:5)	dS m <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	-----	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	-----	mg kg <sup>-1</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	
Silt loam	6.5a	0.45a	30a	207a	0.37a	7.4a	1.8a	0.43a	192a	14.7a
Sandy loam	6.3a	0.51a	23a	275a	0.21a	5.9a	1.2a	0.47a	176a	11.8b
Loam	6.1a	0.98a	32a	308a	0.58a	6.4a	1.4a	0.39a	151a	14.0ab

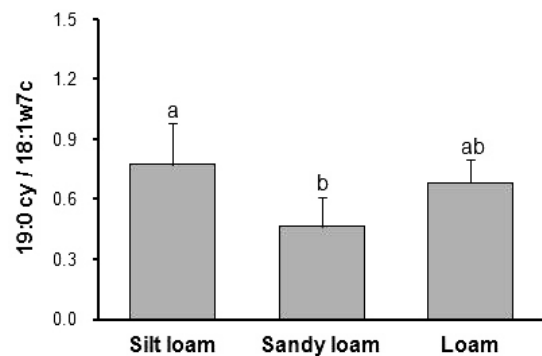
<sup>†</sup>Tukey's studentized range test at 5% level.

생물 지방산 함량이 미사질양토 및 양토에 비해 낮았는데 이러한 결과는 Lee and Ha (2011b) 및 Lee and Lee (2011)의 결과와 유사하였다.

경남지역 논 토양의 그람음성 세균과 그람양성 세균의 비율은 미사질양토 1.38, 사양토 1.37, 양토 1.28로서 유의적인 차이는 없었으나 시설고추 재배지 0.75 (Lee et al., 2011), 논 초기 토양 1.0-1.3 (Kim and Lee), 밭 토양 0.98 (Lee and Ha, 2011b), 과수원 토양 1.20 (Lee and Lee, 2011) 보다 높았다. 토양 미생물체량은 미사질양토 1,076 mg kg<sup>-1</sup>, 양토 954 mg kg<sup>-1</sup>, 사양토 458 mg kg<sup>-1</sup>이었으나 유의적인 차이가 없었다. 탈수소효소 활성도 미사질양토가 180 μg TPF g<sup>-1</sup> 24h<sup>-1</sup>으로 양토 143 μg TPF g<sup>-1</sup> 24h<sup>-1</sup>, 사양토 67 μg TPF g<sup>-1</sup> 24h<sup>-1</sup> 보다 높았으나 유의적인 차이는 없었다. 토양 입단과 관련이 있는 글로말린 (Lee and Yun, 2011, Lee and Kim, 2011; Min et al., 2011; Wright et al., 1996) 함량은 미사질양토가 0.93 mg g<sup>-1</sup>으로 사양토 0.64 mg g<sup>-1</sup>, 양토 0.61 mg g<sup>-1</sup> 보다 많았으나 유의적인 차이가 없었다. 글로말린 함량도 미사질양토가 0.93 은 유의적인 차이가 없었다.

**논 토양 화학성분** 경남지역 논 토양의 토성별 화학성분은 Table 2와 같다. 토양 유기물 함량은 양토가 32 g kg<sup>-1</sup>으로 미사질양토 30 g kg<sup>-1</sup>, 사양토 23 g kg<sup>-1</sup> 보다 많았으나 유의적인 차이는 없었다. 토양 양이온 치환용량은 미사질양토가 14.7 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>으로 사양토 11.8 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> 보다 유의적으로 높았다 (*p*<0.05).

**미생물 스트레스 지표** 토양 환경과 영양적인 스트레스 지표로 사용되는 cy19:0과 18:1ω7c 비율은 Fig. 1과 같이 미사질양토가 0.77로 사양토 0.47 보다 유의적으로 높았다 (*p*<0.05). 일반적으로 cy19:0과 18:1ω7c 비율이 낮을수록 미생물이 받는 스트레스는 감소되는 것으로 알려져 있다 (Mechri et al., 2010). 이러한 경향은 산소 부족 등의 다양한 요인에 따라 cyclopropyl 지방산이 집적됨으로 세균의 스트레스가 증가되는 것으로 해석되었다 (Grogan and Cronan, 1997; Guckert et al., 1986).



**Fig. 1. Ratio of 19:0 cy to 18:1 ω7c in paddy soils. Mean with the same letter are not significantly different with Tukey's studentized range test at 5% level. Bars represent one standard deviation of the mean.**

**논 토양 미생물 군집 분석** 토양 미생물의 지방산 함량을 총 FAME 함량으로 나누어 미생물의 군집을 분석하였다 (Table 3). 논 토양 평균 미생물 군집은 미사질양토가 총 세균이 32.5%, 그람음성 세균은 17.0%, 그람양성 세균 12.5%, 곰팡이 14.1%, 내생균근균 1.43%로 사양토의 총 세균 30.3%, 그람음성 세균 16.2%, 그람양성 세균 11.7%, 곰팡이 13.6%, 내생균근균 1.19% 보다 많았으나 유의적인 차이는 없었다. 그러나 방선균 군집은 양토가 1.34%로 사양토의 0.92%에 비해 유의적으로 많았다 (*p*<0.05).

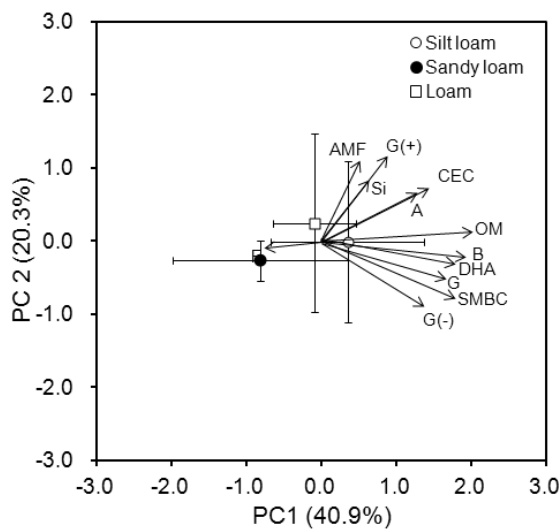
논 토양의 미생물 군집과 토양 유기물 함량, 양이온 치환용량 및 유효규산 함량을 포함한 토성에 따른 주성분 분석 결과는 Fig. 2와 같다. 주성분 분석은 토양 미생물 군집을 몇 가지의 성분으로 추출하여 설명하고 예측할 수 있다 (Lee and Kim, 2011; Lee and Yun, 2011; Lee et al., 2011). 주성분 분석결과 제1주성분이 40.9%, 제2주성분이 20.3%로서 전체 61.2%의 자료를 설명할 수 있었다. 주성분 분석결과 미사질양토, 사양토, 양토는 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 제1주성분은 토양 유기물 함량 (1.96)이 가장 크게 기여하였으며 총 세균 (1.88), 탈수소효소 활성 (1.80), 미생물체량 (1.79), 글로말린 함량 (1.66), 양이온 치환용량 (1.46), 그람음성 세균 (1.40)과 방선균 (1.29) 비율 순으로 정의를 기여를 하였으며 곰팡이 (-0.72)는 부의 기여를 하는 것으로 나타났다. 반면 제2주성분은 그람양성 세균 (1.16), 내생균

**Table 3. Microbial communities in paddy soils as affected by soil texture.**

Soil texture	B <sup>†</sup>	G(-)	G(+)	A	F	AMF	Sample
	----- % , nmol -----						
Silt loam	32.5a	17.0a	12.5a	1.18ab	14.1a	1.43a	11
Sandy loam	30.3a	16.0a	11.7a	0.92b	13.6a	1.19a	4
Loam	30.8a	15.5a	12.4a	1.34a	14.8a	1.39a	5

<sup>†</sup>B, total bacteria; G(-), Gram-negative bacteria; G(+), Gram-positive bacteria; A, actinomycetes; F, fungi; AMF, arbuscular mycorrhizal fungi.

<sup>‡</sup>Tukey's studentized range test at 5% level.



**Fig. 2. Principal component analysis between soil microbial communities and soil physicochemical properties. The variance explained by each principal component (PC) axis is shown in parentheses. PC analysis shows loading values for the individual microbial biomarkers. The bars represent one standard deviation of the mean. A, actinomycetes; AMF, arbuscular mycorrhizal fungi; B, bacteria; CEC, cation exchange capacity; DHA, dehydrogenase activity; G, glomalin; G(-), Gram-negative bacteria; G(+), Gram-positive bacteria; OM, soil organic matter; Si, soil available SiO<sub>2</sub>; SMBC, soil microbial biomass carbon. Mean with the same letter are not significantly different with Tukey's studentized range test at 5% level.**

근균 (1.10), 토양 유효규산 함량 (0.83) 순으로 정의 기여를 하였다.

### 요 약

경남지역 논 토양의 미사질양토 11개소, 사양토 4개소, 양토 5개소를 선정하여 FAME 분석기법을 적용하여 미생물 군집을 분석하였다. 곱팡이 지방산 함량은 양토가 76 nmol g<sup>-1</sup>로서 사양토 45 nmol g<sup>-1</sup>에 비해 유의적으로 많았다 (*p* < 0.05). 토양 양이온 치환용량은 미사질양토가 14.7 cmol<sub>c</sub>

kg<sup>-1</sup>으로 사양토 11.8 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>보다 유의적으로 높았다 (*p* < 0.05). cy19:0과 18:1ω7c 비율은 미사질양토가 0.77로 사양토 0.47 보다 유의적으로 높았다 (*p* < 0.05). 방선균 군집은 양토가 1.34%로 사양토의 0.92%에 비해 유의적으로 많았다 (*p* < 0.05).

### 사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ00690 6202011)의 지원에 의해 이루어진 것임.

### 인 용 문 헌

Balser, T., K.K. Treseder, and M. Ekenler. 2005. Using lipid analysis and hyphal length to quantify AM and saprotrophic fungal abundance along a soil chronosequence. *Soil Biol. Biochem.* 37:601-604.

Bossio, D.A. and K.M. Scow. 1998. Impacts of carbon and flooding on soil microbial communities: phospholipid fatty acid profiles and substrate utilization patterns. *Microb. Ecol.* 35:265-278.

Bradley, K., A. Rhae, R.A. Drijber, and J. Knopsc. 2006. Increased N availability in grassland soils modifies their microbial communities and decreases the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol. Biochem.* 38:1583-1595.

Frostegård, Å., A. Tunlid, and E. Bååth. 1993. Phospholipid fatty acid composition, biomass and activity of microbial communities from two soil types experimentally exposed to different heavy metals. *Appl. Environ. Microbiol.* 59: 3605-3617.

Grogan, D.W. and J.E. Cronan. 1997. Cyclopropane ring formation in membrane lipids of bacteria. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 61:429-441.

Guckert, J.B., M.A. Hood, and D.C. White. 1986. Phospholipid ester-linked fatty acid profile changes during nutrient deprivation of *Vibrio cholerae*: increases in cis/trans ratio and proportions of cyclopropyl fatty acid. *Appl. Environ.*

- Microbial. 52:794-801.
- Hamel, C., K. Hanson, F. Selles, A.F. Cruz, R. Lemke, B. McConkey, and R. Zentner. 2006. Seasonal and long-term resource-related variations in soil microbial communities in wheat-based rotations of the Canadian prairie. *Soil Biol. Biochem.* 38:2104-2116.
- Kieft, T.L., E. Wilch, K. O'connor, D.B. Ringelberg, and D.C. White. 1997. Survival and phospholipid fatty acid profiles of surface and subsurface bacteria in natural sediment microcosms. *Appl. Environ. Microbiol.* 63: 1531-1542.
- Kim E.S. and Y.H. Lee. 2011. Response of soil microbial communities to applications of green manures in paddy at an early rice growing stage. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:221-227.
- Lee, Y.H. and H.D. Yun. 2011. Changes in microbial community of agricultural soils subjected to organic farming system in Korean paddy fields with no-till management. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 54(3): 434-441.
- Lee, Y.H. and H. Kim. 2011. Response of soil microbial communities to different farming systems for upland soybean cultivation. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 54(3):423-433.
- Lee, Y.H. and S.K. Ha. 2011a. Impacts of chemical properties on microbial population from upland soils in Gyeongnam Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(2):242-247.
- Lee, Y.H. and S.K. Ha. 2011b. Impacts of topography on microbial community from upland soils in Gyeongnam Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(3):485-491.
- Lee, Y.H. and S.T. Lee. 2011. Comparison of microbial community of orchard soils in Gyeongnam Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(3):492-497.
- Lee, Y.S., J.H. Kang, K.J. Choi, S.T. Lee, E.S. Kim, W.D. Song, and Y.H. Lee. 2011. Response of soil microbial communities to different cultivation systems in controlled horticultural land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(1):118-126.
- Macalady, J.L., M.E. Fuller, and K.M. Scow. 1998. Effects of metam sodium fumigation on soil microbial activity and community structure. *J. Environ. Qual.* 27:54-63.
- Mechri, B., H. Chehab, F. Attia, F.B. Mariem, M. Braham, and M. Hammami. 2010. Olive mill wastewater effects on the microbial communities as studied in the field of olive trees by analysis of fatty acid signatures. *Eur. J. Soil Bio.* 146:312-318.
- Min, S.G., S.S. Park, and Y.H. Lee. 2011. Comparison of soil microbial communities to different practice for strawberry cultivation in controlled horticultural land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(3):479-484.
- NIAST. 2000. Methods of analysis of soil and plant. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.
- Olsson, P.A., R. Francis, D.J. Read, and B. Söderström. 1998. Growth of arbuscular mycorrhizal mycelium in calcareous dune sand and its interaction with other soil micro-organisms as estimated by measurement of specific fatty acids. *Plant Soil* 201:9-16.
- SAS Institute. 2006. SAS Version 9.1.3. SAS Inst., Cary, NC.
- Schutter, M.E. and R.P. Dick. 2000. Comparison of fatty acid methyl ester (FAME) methods for characterizing microbial communities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1659-1668.
- Wright, S.F., M. Franke-Snyder, J.B. Morton, and A. Upadhyaya. 1996. Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. *Plant Soil* 181: 193-203.
- Zelles, L. 1997. Phospholipid fatty acid profiles in selected members of soil microbial communities. *Chemosphere* 35:275-294.