

Research Article



CrossMark

Open Access

무기질비료의 장기연용이 토양생물 및 먹이연쇄에 미치는 영향

어진우^{1*}, 박기춘², 박진면³, 김명현¹, 최순군¹, 방혜선¹

¹국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과, ²국립원예특작과학원 인삼특작부 약용작물과,
³국립원예특작과학원 원예특작환경과

Effect of Continuous use of Inorganic Fertilizer on the Soil Organisms and Food Chain

Jinu Eo^{1*}, Kee-Choon Park², Jin-Myeon Park², Myung-Hyun Kim¹, Soon-Kun Choi¹ and Hea-Seon Bang¹ (¹Climate Change & Agroecology Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea, ²Department of Herbal Crop Research, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Eumsung 27709, Korea, ³Horticultural and Herbal Crop Environment Division, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Wanju 55365, Korea)

Received: 26 November 2015 / Revised: 29 February 2016 / Accepted: 14 March 2016
Copyright © 2016 The Korean Society of Environmental Agriculture

ORCID

Jinu Eo

<http://orcid.org/0000-0003-3577-9942>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

BACKGROUND: This study aimed to evaluate the combined effects of three components (NPK) of chemical fertilizers with basal application of compost on soil organisms.

METHODS AND RESULTS: The soil was treated with five treatments continuously for 15 years: control, PK, NK, NP and NPK. The application of N increased plant growth or biomass, and enhanced organic matter content in the soils. Levels of microbial phospholipid fatty acids (PLFAs) in the soils did not show marked differences among the soils treated with different treatments. However, the principal component analysis showed the changes in the structure of the microbial community in the soil, depending on treatments added. Nitrogen application caused a decrease of pH and an increase of EC in the soils, and these environmental stresses appeared to offset the promoting effect of increased organic matter content on microbial abundance. The abundance of bacterivorous nematodes

was the highest in the soils after treating NPK; however, the abundance of fungivorous nematodes was unaffected. There was no significant correlation between the abundances of microbial groups and their feeders. Organic matter content was significantly correlated with the abundance of nematodes in the soils.

CONCLUSION: Our results showed that chemical fertilizers affect the soil food chains through both biotic and abiotic factors, and a trophic cascade in the soils may not occur in response to long-term fertilization.

Key words: Collembola, Microarthropod, Nematode, PLFA

서론

토양 생태계의 지속성과 안정적인 작물생산을 유지하기 위해서는 적절한 시비관리가 필요하다. 무기질비료는 편리성이나 효율성에도 불구하고 과다사용에 의해 토양의 이화학성이 악화된다는 점들이 지적되어 왔다. 이를 경감시키기 위해서 유기질 비료와 무기질비료의 혼합사용이 시도되어 왔다. 이러한 시비법은 다양한 작부체계에서 효율적이라는 보고가 있으며(Ge *et al.*, 2010), 토양 생산성과 관련된 유기탄소, 양분이용성, 미생물의 밀도 등의 비생물적 및 생물적 요소를 개

*Corresponding author: Jinu Eo
Phone: +82-63-238-2507; Fax: +82-63-238-3823;
E-mail: eojinu@korea.kr

선시킬 수 있다(Ge et al., 2010; Chakraborty et al., 2011; Li et al., 2012). 하지만, 무기질비료를 구성하는 질소, 인, 칼륨 3요소의 조합이 토양의 생물적 환경에 미치는 연구는 미흡한 실정이다.

토양생물은 농경지에서 식물의 잔사나 퇴비와 같은 유기물의 분해에 참여하여 작물생산체계에서 양분공급을 담당하는 중요한 역할을 한다. 토양 생물의 밀도와 활성은 유기물 분해율과 상관적 관계가 있다 (Carrillo et al., 2011; Xin et al., 2012). 무기질비료는 유기질비료와 비교하여 미생물을 억제시키거나(Ramirez et al., 2010), 선충과 미소절지동물의 밀도를 감소시키는 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Kopeszki, 1993; Li et al., 2010). 따라서 무기질비료의 장기적 사용이 토양의 순기능을 담당하는 토양생물에 미치는 영향과 그 기작을 규명할 필요가 있다.

토양미생물을 기반으로 구성되는 토양생태계의 먹이망 구조는 토양생산성의 지표로 인식되어 왔으며, 세균과 곰팡이를 중심으로 하는 먹이연쇄로 구성되어 있다(Scheu, 2002). 토양미소동물의 대부분을 차지하는 선충과 미소절지동물은 분해자를 섭식하며, 분해자와의 상호작용은 분해과정과 양분순환에 영향을 미친다(Cragg and Richard, 2001). 시비가 선충에 미치는 영향을 섭식특성에 따라 반응을 비교하여 평가하려는 시도들이 있었으며(Liang et al., 2009; Pan et al., 2010), 생물들간의 먹이연쇄 관계를 조사하는 것이 한 종류의 생물만을 분석하는 것보다 다양한 장점을 갖는다(van der Wal et al., 2009).

생물들간의 먹이연쇄 관계를 규명하기 위한 연구에 있어서는 시비 효과에 대한 장기간 실험의 중요성이 강조되어 왔다(Chakraborty et al., 2011). 질소, 인, 칼륨 중 단일요소의 효과에 대한 장기간 연구는 많았으나, 이들 요소간 조합에 의한 효과를 연구한 사례는 적었다 (Li et al., 2010). 그러므로 본 연구는 무기질비료 조성이 미생물과 먹이연쇄에 미치는 영향을 평가하는 것을 목적으로 하였다. 미생물군집은 인지질 지방산(Phospholipid fatty acid, PLFA) 분석을 이용하여 조사하였고, 미생물을 중심으로 구성되는 먹이연쇄 변화를 분석하기 위하여 선충과 미소동물을 섭식습성에 따라 분류하였다.

재료 및 방법

실험 포장

본 연구는 경기도 수원에 위치한 실험포장에서 수행되었다. 콘크리트 블록(W 3.0 m × L 3.6 m × D 1.0 m)을 지중에 매설하여 토양(모래 68%, 미사 26%, 점토 6%)을 매립하여 1994년부터 동일한 시비처리를 지속하였다. 비료 3요소인 NPK를 조합하여 대조구, NPK, PK, NK, NP의 5처리를 난괴법 3반복으로 배치하여 실험하였다. 질소는 요소를 190 kg/ha로, 인은 과인산을 101.6 kg/ha로, 칼륨은 황산칼륨을 166.7 kg/ha로 투입하였다. 질소와 칼륨의 55%는 기비로 투입하였고 45%는 추비로 시비하였으며, 인은 모두 기비

로 처리하였다. 퇴비는 20 t/ha로 모든 처리구에 동일하게 투입하였으며, 기비와 퇴비의 시비는 매년 5월에 실시하였다. 이랑을 75 cm 간격으로 만들어 흑색멀칭을 한 후에, 고추 (*Capsicum annuum* cv. Gumtop) 유묘를 45 cm 간격으로 5월 초에 정식하였다. 식물 생장은 2009년 10월 초에 조사하였다.

토양화학성 분석

토양화학성과 생물을 분석하기 위하여 2009년 7월 30일에 0~15 cm 깊이의 토양을 auger로 채취하였다. 토양의 화학성 분석은 Rural Development Administration (RDA, 2002)분석법에 따라 실시하였다. 토양의 pH와 EC는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 하여 그 현탁액을 pH미터와 EC미터로 각각 측정하였다. 유효인산은 Acetate-lactate buffer로 추출하였고, 질산태 질소는 2M KCl로 추출 후 SmartChem autoanalyzer(Westco, Rome, Italy)를 이용하여 제조사의 매뉴얼에 따라 발색법으로 측정하였다. 치환성 양이온함량은 1 N NH₄OAc(pH7.0)으로 침출시킨 후 그 여과액을 ICP(Integra XL DUAL, GBC Scientific Equipment, Melbourne, Australia)를 이용하여 측정하였다.

인지질 지방산 (PLFA) 분석

인지질 지방산 분석을 통하여 토양미생물 군집을 분석하였다. 채취한 토양시료를 냉동건조하여 2 mm 체로 거른 후 인지질 지방산 추출에 이용하였다. 토양 5 g에 chloroform : methanol : buffer solution(1:2:0.8, v/v/v)의 혼합액을 넣고 지질을 추출한 후 silicic acid column으로 neutral-, glyco- 및 phospho-lipid로 분리하였다. 내부표준물질로는 fatty acid methyl ester 19:0를 사용하여 인지질을 메틸화한 지방산에 첨가하였다. 지방산의 정성 및 정량은 Sherlock Microbial Identification System(MIDI Inc., Newark, USA)을 이용하여 분석하였다. 전체 PLFA 중에서 주요 지표 지방산은 미생물 지방산 지표들을 이용하여 분류하였다(Li et al., 2006). 단불포화 지방산은 16:1 ω5c, 17:1 ω8c, 18:1 ω7c, 포화지방산은 14:0, 15:0, 16:0, 17:0, 18:0, 20:0을 지표지방산으로 이용하였다. 호기성균은 16:1 ω7t, 혐기성균은 cy19:0을 사용하였다. 그램 음성균의 지표 지방산은 18:1 ω7c, 19:0cy ω8c, 17:1 ω8c, 그램 양성균은 i14:0, i15:0, a15:0, i16:0, i17:0, a17:0, 세균은 그램 음성균과 양성균을 모두 이용하였다. 곰팡이는 18:2 ω6,9c, 방선균은 10Me16:0, 10Me17:0, TBSA10Me18:0을 지표로 이용하였다.

토양미소동물 조사

토양 미소동물의 밀도는 선충과 미소절지동물로 나누어 조사하였다. 선충은 채취한 20 g의 토양을 48시간 동안 베르만갈대기법을 이용하여 추출한 후 TAF 용액에 보관하여 개체수를 조사하였다. 선충의 섭식형태는 Yeates 등(1993)을 따라 세균섭식성, 곰팡이섭식성으로 구분하였다. 미소절지동물은 톨그렌장치를 이용하여 300 mL의 토양을 96시간 동안

Table 1. Chemical properties of soils affected by fertilization

	PH (1:5)	EC (dS/m)	OM (g/kg)	NO ₃ ⁻ (mg/kg)	Av. P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex. cation (cmolc/kg)		
						K	Ca	Mg
Control	7.1a	0.8c	15.2b	9.4b	218.3b	3.0a	6.9ab	1.5c
PK	7.2a	1.1bc	18.8ab	8.1b	644.0a	4.2a	6.4b	2.5b
NP	6.7ab	1.9ab	19.9a	147.9a	594.0a	0.1a	7.8a	3.1a
NK	5.9b	1.9ab	19.8a	123.9a	163.9b	4.1a	6.2b	1.7c
NPK	6.3b	2.4a	20.7a	135.7a	634.4a	0.6a	6.9ab	2.8ab

Means followed by different letters are significantly different from one another ($P < 0.05$) as determined by LSD (least significant difference) multiple comparison test.

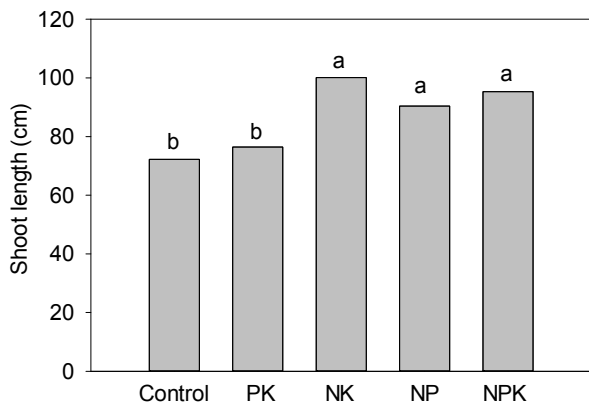


Fig. 1. Fruit yield and shoot length of pepper affected by application of chemical fertilizers. Means followed by different letters are significantly different from one another ($P < 0.05$) as determined by LSD (least significant difference) multiple comparison test.

추출 후 광학현미경을 이용해 토포기와 응애류로 분류하였다.

통계

시비가 토양 화학성 및 미생물 PLFA에 미치는 영향을 알아보기 위해 최소유의차(least significant difference, LSD) 방법을 이용하여 처리간 비교하였다. 식물 생장과 토양화학성의 관계를 알아보기 위하여 피어슨 상관계수를 계산하였다. 미생물 PLFA에 근거하여 주요인분석(least significant difference, PCA)를 실시하였다. 모든 통계과정은 SAS9.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 이용하여 수행하였다.

결과 및 고찰

토양 화학성 및 식물 성장

시비는 토양생태계를 교란하는 요소로서 무기질비료의 효과는 시비기간에 따라 달라질 수 있으나(Moscatelli *et al.*, 2008), 15년간의 연용처리는 장기간의 효과를 반영한다고 생각된다. 반복적인 무기질비료의 사용은 토양화학성에 영향을

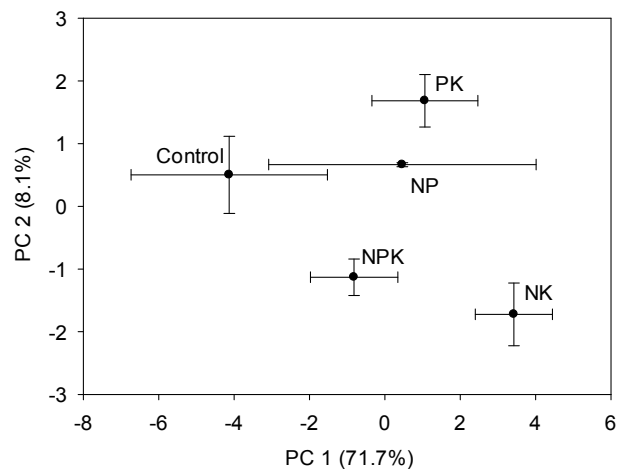


Fig. 2. Principal component analysis of phospholipid fatty acid in soils.

주었다 (Table 1). 질산태질소와 유효인산의 농도는 각각 질소와 인을 함유한 시비 조합에 의해 증가하였다. NPK처리구는 대조구에 비하여 토양 pH는 낮아졌고, EC는 증가하였다. 고추의 생장은 질소가 포함된 처리에 의해 증가하였다 (Fig. 1). 질소시비는 식물 성장을 촉진해 이차적으로 토양 유기물을 증가시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있으며 (Olsson *et al.*, 2005), 본 연구에서도 토양 유기물 함량이 초장과 유의적 상관관계가 있는 것으로 나타났다($r = 0.662$, $P < 0.01$). 수확 후 식물잔사를 제거하더라도 재배기간 중에 식물의 뿌리에서 기인하는 뿌리잔사나 분비액을 통하여 유기물이 공급된 것으로 판단된다.

미생물과 환경스트레스

인지질지방산 결과에 대한 주요인 분석에서 처리구들은 PC1과 PC2에 의하여 분리되었으며, 이것은 시비의 조성이 미생물 군집구조에 영향을 미쳤음을 나타낸다(Fig. 2). 하지만 세균, 곰팡이, 방선균의 밀도를 나타내는 미생물 PLFA 수치는 대조구와 시비한 처리구 사이에 유의적인 차이가 없었다(Table 2). 미생물의 밀도와 활성은 유기물함량과 상관관계가 있기 때문에(Antisari *et al.*, 2013), 유기물함량의 증가에

Table 2. Phospholipid fatty acid indicators of microbial groups and environmental stress

	Gram-/ Gram+	Aerobic/ Anaerobic	Saturated/ Unsaturated	Cyclo/ Precursors	Fungi	Bacteria	Actino	AM	Total
	(nmol PLFA/g soil)								
Control	0.5a	1.1a	1.8a	0.8b	1.0a	12.9a	2.8a	2.2a	27.8a
PK	0.5a	0.9a	2.0a	0.9b	0.8a	13.3a	3.3a	2.0a	30.2a
NP	0.5a	0.9a	1.7a	0.8b	1.0a	12.8a	2.9a	2.1a	30.3a
NK	0.6a	0.7a	2.0a	1.1a	1.2a	13.6a	2.4a	1.8a	25.3a
NPK	0.5a	1.1a	1.8a	0.8b	1.0a	12.9a	2.8a	2.2a	27.8a

Means followed by different letters are significantly different from one another ($P < 0.05$) as determined by LSD (least significant difference) multiple comparison test. actino, actinomycetes; AM, arbuscular mycorrhizal fungi, PLFA; Phospholipid fatty acid.

Table 3. Abundance of nematodes and microarthropods affected by fertilization

	Nematodes (ind/g)		Microarthropods (ind/100 mL)		
	Bacterivores	Fungivores	Collembola	Oribata	Mesostigmata
Control	1.0c	0.2a	0.4a	2.5c	0.5a
PK	1.6bc	0.2a	1.5a	12.7ab	1.9a
NP	2.1ab	0.3a	1.5a	13.3ab	1.3a
NK	1.5bc	0.2a	0.0a	3.9bc	0.4a
NPK	3.1a	0.3a	1.2a	16.4a	1.3a

Means followed by different letters are significantly different from one another ($P < 0.05$) as determined by LSD (least significant difference) test.

도 불구하고 미생물 밀도가 질소를 시비한 처리구와 대조구 간에 차이가 없었다는 것은 주목할 만하다. 또한, 양분이용도를 나타내는 그램 음성균/양성균 비율도 무기질비료의 시비에 의한 차이가 없었다. 이러한 결과는 시비가 식물생장의 증가를 통해 토양미생물에 미치는 긍정적 효과가 다른 작용에 의해 상쇄되었다는 것을 시사한다. 반복적인 질소비료의 사용은 토양 pH를 낮추고(Barak et al., 1997), 미생물의 성장을 억제한다(Wallenstein et al., 2006). 무기질비료에 의한 염도의 증가는 삼투압과 이온독성을 증가시켜 미생물에게 유해한 작용을 하며(Zahran, 1997), 질소는 형태와 상관없이 미생물의 호흡을 억제할 수 있다(Ramirez et al., 2010). 또한, 미생물은 탄소와 질소의 이용성에 영향을 받기 때문에(Zhang et al., 2008), 질소 시비는 탄소부족을 야기시켜 미생물에 부정적 영향을 줄 수 있다(Demoling et al., 2008). 본 연구에서도 질소시비에 의한 pH 저하와 EC 증가가 일부 관찰되었기 때문에 이러한 환경요소의 변화에 의해 미생물 증가가 억제되었을 것으로 추측된다. 또한, 질소를 포함하는 NK처리구에서 cyclopropyl/precursor 지방산 비율이 증가하였는데, 이 지수는 낮은 pH나 기질부족과 같은 스트레스 상태를 나타낸다(Kaur et al., 2005). 이러한 지수의 증가는 질소처리에 의해 환경스트레스가 증가했음을 부분적으로 나타낸다.

토양선충

시비가 자활성 선충의 밀도에 미치는 영향은 섭식특성에

따라 다르게 나타났다. 세균섭식성 선충의 밀도는 NP와 NPK 처리구에서 증가하였으나, 곰팡이섭식성 선충의 밀도는 처리간 차이가 없었다(Table 3). NPK 시비가 세균섭식성 선충의 밀도를 증가시킨다는 보고가 있었으며(Gruzdeva et al., 2007), 본 연구에서도 대조구에 비하여 이들의 밀도가 3.1배 증가하였다. 무기질비료가 선충에 나타내는 효과는 일정하지 않으며(Forge et al., 2005), 퇴비의 기초시비가 없을 경우 다른 효과를 나타낼 수 있다(Gruzdeva et al., 2007). 질소는 직간접적인 방법으로 선충에 영향을 미치며(Gruzdeva et al., 2007), 요소의 형태로 투입할 경우 암모니아를 형성하여 선충을 억제할 수 있다(Wei et al., 2012). 또한, Li 등(2010)은 질소 시비가 pH 저하와 EC 증가와 함께 세균섭식성 선충을 증가시키고 곰팡이섭식성 선충의 밀도를 감소시켰다고 보고하였다. 하지만, 본 연구에서는 요소처리에 의한 곰팡이섭식성 선충의 밀도 감소는 없었다.

토양미소동물

미소절지동물 중에서 톱토기의 밀도는 시비에 따른 차이가 없었지만, 날개옹애의 밀도는 PK, NP, NPK 처리구에서 증가하였다(Table 3). 옹애류의 밀도가 시비한 처리구에서 증가하였다는 점은 기존의 보고와 일치한다(Bird et al., 2004; van der Wal et al., 2009). 무기질비료는 유기물함량과 먹이량을 증가시켜 간접적으로 날개옹애의 밀도를 증가시킬 수 있으나(Cao et al., 2011), 본 연구에서는 먹이가 되는 미생

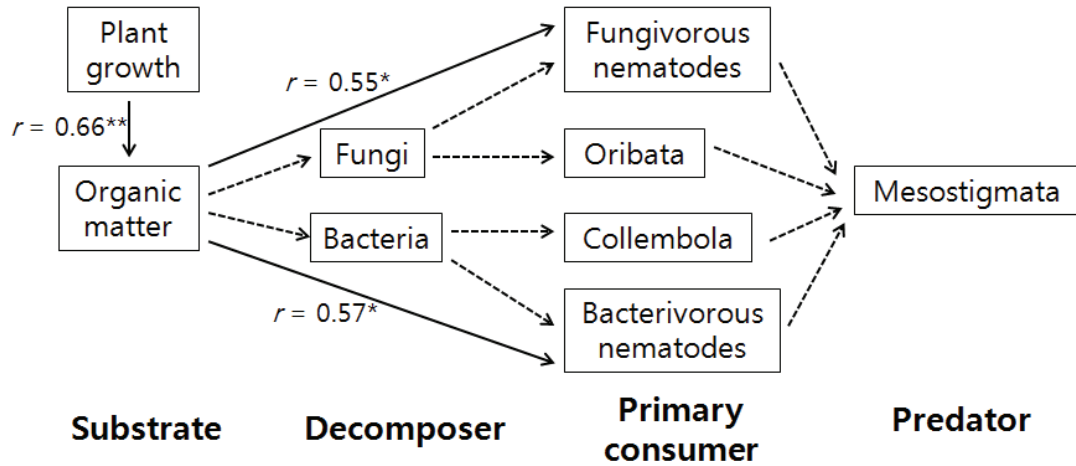


Fig. 3. Correlations between components of soil ecosystem. Solid lines indicate significant correlations and dotted lines indicate insignificant correlations.* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

물의 밀도와는 연관성은 적은 것으로 판단된다. 톱토기의 밀도는 차이가 없었는데, 기존에도 시비에 의한 긍정적인 효과 (Bird *et al.*, 2004)와 부정적 효과(Kopeszki, 1993)가 모두 보고되었다. 한편, 톱토기에 대한 미미한 효과는 날개응애의 우점에 의한 먹이경쟁이나 부적합한 환경에 기인할 수 있다 (Irmeler, 2000).

토양생태계 먹이연쇄

토양생태계를 구성하는 먹이연쇄는 유기물을 분해하는 세균과 곰팡이를 기점으로 이를 섭식하는 미소동물로 이루어진다. 먹이연쇄 기능의 유지는 토양 건강성에 중요하다고 제안되어 왔으며(Ferris and Matute, 2003), 무기질비료의 사용은 유기물분해와 관련한 먹이망 구조를 약화시킬 수 있다는 염려도 있다(Li *et al.*, 2010). 본 연구에서는 미생물과 이를 섭식하는 미소동물 사이에 먹이연쇄반응이 나타나지 않았다(Fig. 3). 미소절지동물인 톱토기와 응애는 미생물, 식물잔사, 다른 동물을 섭취하지만(Ruess *et al.*, 2005), 세균이나 곰팡이와 유의적 상관관계가 없었다. Alon과 Steinberger(1999)는 자활성 선충의 밀도가 질소 수준이 아니라 미생물 밀도에 의해 영향을 받는다고 하였으며, 저자들은 이것이 시비의 간접적인 효과라고 추측하였다. 하지만, 본 연구에서는 자활성 선충의 밀도도 미생물 PLFA 수치와 유의적 상관관계가 없었다.

세균섭식성 선충의 밀도가 대조구보다 NPK처리구에서 크게 높았지만 두 처리간 세균 밀도 차이가 적었다는 것에 주목할 필요가 있다. 이러한 결과는 질소 시비가 토양미생물과 선충에 대해 먹이연쇄반응 이외의 다른 기작으로 영향을 미쳤다는 것을 시사한다. Sarathchandra 등(2001)도 질소시비가 토양미생물 군집에 영향을 미치지 않고, 선충에만 영향을 미쳤다고 하였다. Forge와 Simard(2001)도 같은 결과를 보고하였고 이것은 미생물의 생산과 개체회전을 반영한다고 하였다. 먹이연쇄관계인 미생물과 섭식자간에 양적 상관관계가 항상 나타나는 것은 아니다(Eo *et al.*, 2012). van der

Wal 등(2009)도 시비에 의한 식물생산성 증가가 모든 토양동물의 밀도를 증가시키는 것은 아니라고 보고하였으며, 토양의 성질이나 생물간의 상호작용 등의 다른 요인에 의해 기인한다고 추측하였다. 본 연구에서는 유기물함량과 선충밀도간에 정의 상관관계가 있었다. 이것은 시비에 의한 유기물 증가가 토양이화학성과 같은 환경요인을 변화시켜 선충밀도에 영향을 미쳤다는 것을 시사한다.

요 약

장기간의 무기질비료 연용은 토양생태계의 비생물적 및 생물적 요소에 영향을 미쳤다. 질소 투입은 식물의 생장과 토양 유기물 함량을 증가시켰다. 하지만 이것이 토양미생물의 증가로 이어지지 않았으며, 토양 pH의 감소나 EC의 증가와 같은 환경스트레스 증가에 의한 것으로 판단된다. 한편 미생물 밀도는 처리간 차이가 있었지만, 이를 섭식하는 미소동물과의 상관관계는 없었다. 다만 동적평형에 의해 표면적으로 밀도변화가 나타나지 않았거나, 각 생물군의 군집조성이 변화했을 가능성에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다. 유기물함량과 선충밀도의 유의적 상관관계는 시비에 의한 토양 이화학성 변화가 직접적으로 미소동물에게 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여준다. 또한, 분해자인 미생물과 이를 섭식하는 미소동물간의 상관적 관계가 없었다는 것은 먹이연쇄에서 환경요소의 변화가 먹이양보다 더 큰 영향을 미칠 수 있다는 점을 보여준다.

Acknowledgment

This study was carried out with the support of “Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ010013)”, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Alon, A., & Steinberger, Y. (1999). Effect of nitrogen amendments on microbial biomass, above-ground biomass and nematode population in the Negev Desert soil. *Journal of Arid Environments*, 41(4), 429-441.
- Antisari, L. V., Falsone, G., Carbone, S., & Vianello, G. (2013). Short-term effects of forest recovery on soil carbon and nutrient availability in an experimental chestnut stand. *Biology and Fertility of Soils*, 49(2), 165-173.
- Barak, P., Jobe, B. O., Krueger, A. R., Peterson, L. A., & Laird, D. A. (1997). Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin. *Plant and Soil*, 197(1), 61-69.
- Bird, S. B., Coulson, R. N., & Fisher, R. F. (2004). Changes in soil and litter arthropod abundance following tree harvesting and site preparation in a loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation. *Forest Ecology and Management*, 202(1), 195-208.
- Cao, Z., Han, X., Hu, C., Chen, J., Zhang, D., & Steinberger, Y. (2011). Changes in the abundance and structure of a soil mite (Acari) community under long-term organic and chemical fertilizer treatments. *Applied Soil Ecology* 49, 131-138.
- Carrillo, Y., Ball, B. A., Bradford, M. A., Jordan, C. F., & Molina, M. (2011). Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(7), 1440-1449.
- Chakraborty, A., Chakrabarti, K., Chakraborty, A., & Ghosh, S. (2011). Effect of long-term fertilizers and manure application on microbial biomass and microbial activity of a tropical agricultural soil. *Biology and Fertility of Soils*, 47(2), 227-233.
- Cragg, R. G., & Bardgett, R. D. (2001). How changes in soil faunal diversity and composition within a trophic group influence decomposition processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(15), 2073-2081.
- Demoling, F., Nilsson, L. O., & Bååth, E. (2008). Bacterial and fungal response to nitrogen fertilization in three coniferous forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(2), 370-379.
- Eo, J., Park, K. C., & Park, B. B. (2012). Short-term effects of organic waste amendments on soil biota: responses of soil food web under eggplant cultivation. *Soil Research*, 50(5), 436-441.
- Ferris, H., & Matute, M. M. (2003). Structural and functional succession in the nematode fauna of a soil food web. *Applied Soil Ecology*, 23(2), 93-110.
- Forge, T. A., Bittman, S., & Kowalenko, C. G. (2005). Responses of grassland soil nematodes and protozoa to multi-year and single-year applications of dairy manure slurry and fertilizer. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(10), 1751-1762.
- Forge, T. A., & Simard, S. W. (2001). Short-term effects of nitrogen and phosphorus fertilizers on nitrogen mineralization and trophic structure of the soil ecosystem in forest clearcuts in the southern interior of British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*, 81(1), 11-20.
- Ge, G., Li, Z., Fan, F., Chu, G., Hou, Z., & Liang, Y. (2010). Soil biological activity and their seasonal variations in response to long-term application of organic and inorganic fertilizers. *Plant and Soil*, 326(1-2), 31-44.
- Gruzdeva, L. I., Matveeva, E. M., & Kovalenko, T. E. (2007). Changes in soil nematode communities under the impact of fertilizers. *Eurasian Soil Science*, 40(6), 681-693.
- Irmiler, U. (2000). Changes in the fauna and its contribution to mass loss and N release during leaf litter decomposition in two deciduous forests. *Pedobiologia*, 44(2), 105-118.
- Kaur, A., Chaudhary, A., Kaur, A., Choudhary, R., & Kaushik, R. (2005). Phospholipid fatty acid-A bioindicator of environment monitoring and assessment in soil ecosystem. *Current Science*, 89(7), 1103-1112.
- Kopeszki, H. (1993). Effects of fertilization on the mesofauna, especially Collembolan, in different forest habitats in the Bohemian woods. *Zoologischer Anzeiger*, 231(3-4), 83-98.
- Li, Q., Jiang, Y., Liang, W. J., Lou, Y. L., Zhang, E. P., & Liang, C. J. (2010). Long-term effect of fertility management on the soil nematode community in vegetable production under greenhouse conditions. *Applied Soil Ecology*, 46(1), 111-118.
- Li, W. H., Zhang, C. B., Jiang, H. B., Xin, G. R., & Yang, Z. Y. (2006). Changes in soil microbial community associated with invasion of the exotic weed, *Mikania micrantha* HBK. *Plant and Soil*, 281(1-2), 309-324.
- Li, X., Dong, C., Liu, Y., Liu, Y., Shen, Q., & Xu, Y. (2012). Interactive effects from combining inorganic and organic fertilisers on phosphorus availability. *Soil Research*, 50(7), 607-615.
- Liang, W. J., Lou, Y. L., Li, Q., Zhong, S., Zhang, X. K., & Wang, J. K. (2009). Nematode faunal response to long-term application of nitrogen fertilizer and organic

- manure in Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(5), 883-890.
- Moscatelli, M. C., Lagomarsino, A., De Angelis, P., & Grego, S. (2008). Short-and medium-term contrasting effects of nitrogen fertilization on C and N cycling in a poplar plantation soil. *Forest Ecology and management*, 255(3), 447-454.
- Olsson, P., Linder, S., Giesler, R., & Högberg, P. (2005). Fertilization of boreal forest reduces both autotrophic and heterotrophic soil respiration. *Global Change Biology*, 11(10), 1745-1753.
- Pan, F. J., McLaughlin, N. B., Yu, Q., Xue, A. G., Xu, Y. L., Han, X. Z., Li, C. J., & Zhao, D. (2010). Responses of soil nematode community structure to different long-term fertilizer strategies in the soybean phase of a soybean-wheat-corn rotation. *European Journal of Soil Biology*, 46(2), 105-111.
- Ramirez, K. S., Craine, J. M., & Fierer, N. (2010). Nitrogen fertilization inhibits soil microbial respiration regardless of the form of nitrogen applied. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(12), 2336-2338.
- Ruess, L., Schütz, K., Haubert, D., Häggblom, M. M., Kandeler, E., & Scheu, S. (2005). Application of lipid analysis to understand trophic interactions in soil. *Ecology*, 86(8), 2075-2082.
- Sarathchandra, S. U., Ghani, A., Yeates, G. W., Burch, G., & Cox, N. R. (2001). Effect of nitrogen and phosphate fertilisers on microbial and nematode diversity in pasture soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(7), 953-964.
- Scheu, S. (2002). The soil food web: structure and perspectives. *European Journal of Soil Biology*, 38(1), 11-20.
- Van der Wal, A., Geerts, R. H. E. M., Korevaar, H., Schouten, A. J., Jagers, O. P., Akkerhuis, G. A. J. M., Rutgers, M., & Mulder, C. (2009). Dissimilar response of Plant Soil biota communities to long-term nutrient addition in grasslands. *Biology and Fertility of Soils*, 45(6), 663-667.
- Wallenstein, M. D., McNulty, S., Fernandez, I. J., Boggs, J., & Schlesinger, W. H. (2006). Nitrogen fertilization decreases forest soil fungal and bacterial biomass in three long-term experiments. *Forest Ecology and Management*, 222(1), 459-468.
- Wei, C., Zheng, H., Li, Q., Lü, X., Yu, Q., Zhang, H. Y., Chen, Q. X., He, N. P., Kardol, P., Liang, W. J., & Han, X. G. (2012). Nitrogen addition regulates soil nematode community composition through ammonium suppression. *PloS one*, 7(8), e43384.
- Yeates, G. W., Bongers, T., De Goede, R. G. M., Freckman, D. W., & Georgieva, S. S. (1993). Feeding habits in soil nematode families and genera—an outline for soil ecologists. *Journal of nematology*, 25(3), 315.
- Zahran, H. H. (1997). Diversity, adaptation and activity of the bacterial flora in saline environments. *Biology and Fertility of Soils*, 25(3), 211-223.
- Zhang, N., Wan, S., Li, L., Bi, J., Zhao, M., & Ma, K. (2008). Impacts of urea N addition on soil microbial community in a semi-arid temperate steppe in northern China. *Plant and Soil*, 311(1-2), 19-28.
- Xin, W. D., Yin, X. Q., & Song, B. (2012). Contribution of soil fauna to litter decomposition in Songnen sandy lands in northeastern China. *Journal of Arid Environments*, 77, 90-95.