

전남 완도에 서식하는 동백나무와 그 주변 식물의 근권에 분포하는 수지상균근균의 다양성

이은화¹ · 가강현² · 엄안흠^{1*}¹한국교원대학교 생물교육과, ²국립산림과학원

Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Rhizospheres of *Camellia japonica* and Neighboring Plants Inhabiting Wando of Korea

Eun-Hwa Lee¹, Kang-Hyeon Ka² and Ahn-Heum Eom^{1*}¹Department of Biology Education, Korea National University of Education, Cheongwon 363-791, Korea²Division of Wood Chemistry and Microbiology, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

ABSTRACT : In this study, the community structures of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in rhizospheres of *Camellia japonica* and neighboring woody plants in Wando, Korea were investigated. Rhizospheres of *C. japonica* and other woody plants were dominated by the same species, *Acaulospora mellea*, but Shannon's index, species richness and total spore numbers of the AMF communities were higher in non-*C. japonica* than in neighboring plants. Regardless of host plant species, the frequency of *A. mellea* was significantly high comparing with other AMF species. The community similarity of AMF within *C. japonica* was significantly higher than between *C. japonica* and neighboring plants or neighboring plants ($p < 0.005$). Results showed that AMF fungal communities in rhizospheres of *C. japonica* have unique community structure and are different from that of neighboring host plants, suggesting that community structure of AMF could be influenced by host plant species.

KEYWORDS : AMF, Community structure, Diversity, Glomeromycota, Host plants, Mycorrhizas

서 론

수지상균근균(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)은 산림 생태계에서 가장 풍부한 미생물 가운데 하나로 식물의 뿌리에서 식물과 공생관계를 형성한다[1]. 80% 이상의 육상 식물이 AMF와 공생 관계를 형성하는 것으로 보고되었

으며 AMF의 기주식물은 선대식물에서부터 종자식물에 이르기까지 다양한 것으로 알려져 있다[2]. 식물과의 공생 관계를 통해 AMF는 식물로부터 광합성 산물을 공급받으며 대신 식물의 무기 양분, 특히 인산의 흡수를 증가시키고 뿌리 병원균이나 수분 스트레스, 중금속 오염 및 염도 등의 환경 스트레스에 대한 저항성을 증가시킴으로써 식물의 적응도를 높인다[3-8].

산림 생태계에서 AMF의 영향은 식물 개체에 제한되어 있지 않다. Van der Heijden 등은 근권의 AMF의 종 풍부도의 증가는 식물의 무기 양분의 흡수 및 식물 군집의 생산성을 증가시킬 뿐 아니라 토양 내 AMF의 종 다양성이 식물 군집의 다양성과 생산성을 결정하는 중요한 요소임을 밝혔다[9]. 뿐만 아니라 동일한 식물종이 서로 다른 AMF 종에 의해 성장 효과가 크게 달라질 수 있음이 밝혀지면서 식물 군집 및 개체군 연구에서 AMF가 중요한 요인으로 다루어져야 함을 시사하였다. 또한 AMF는 식물 군집의 천이 과정에도 중요한 역할을 하며[10,11], 외래 식물의 도입 과정에도 영향을 미칠 수 있음이 알려지면서[12], 산림 생태

Kor. J. Mycol. 2014 March, 42(1): 34-39
http://dx.doi.org/10.4489/KJM.2014.42.1.34
pISSN 0253-651X
© The Korean Society of Mycology

*Corresponding author
E-mail: eomah@knu.ac.kr

Received March 4, 2014
Revised March 22, 2014
Accepted March 24, 2014

©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.

계의 특성과 기능을 이해하기 위해서는 AMF 군집의 생태적 특성에 대한 이해가 중요함이 강조되고 있다.

AMF의 군집 구조에 영향을 미치는 요인은 다양하다. 온도 및 강수량과 같은 기후요인은 AMF의 포자의 생활사 혹은 기주식물의 생장 등의 직·간접적인 적인 경로로 AMF 군집에 영향을 미치며[13,14], 토양의 물리·화학적 특성 또한 AMF의 포자 형성 및 생리 활성화에 영향을 미치는 것으로 보고되었다[15-17]. 자연적 조건 이외에도 경작(tillage)과 같은 인간 활동은 토양 내 AMF의 군집 구조에 유의미한 변화를 가져올 수 있으며 유기농법과 같은 다양한 농법은 토양 내 AMF 군집의 종 다양성 및 종 풍부도에 영향을 미친다[18,19].

그러나 AMF의 군집에 영향을 미치는 중요한 요인 가운데 하나는 기주식물이다. 현재까지 기록된 240여종의 AMF가 25,000종 이상의 육상식물과 공생관계를 형성하는 것으로 미루어 보아 AMF는 기주 특이성이 없거나 매우 낮은 것으로 생각되지만[1], AMF 군집 구조는 기주식물의 다양성 및 종 구성에 따라 유의미하게 달라질 수 있음이 선행 연구를 통해 증명되었다[20-22]. 일부 연구에서는 AMF 종과 기주 식물간의 높은 수준의 특이성이 발견되기도 하였으며[23], 동일한 기주식물이라고 하더라도 서로 다른 AMF 군주에 대한 서로 다른 수준의 감수성(recptiveness)과 선택성(selectiveity)이 나타나는 것이 확인되었다[24].

산림 생태계에서 AMF는 토양 내 주요 미생물로 농업 및 임업 등에 이용가치가 높은 생물자원으로 평가 받고 있지만 AMF의 배양 및 분류·동정의 어려움으로 인해 다양한 환경 조건이나 서로 다른 기주식물의 근권에서 수집된 AMF에 대한 다양성에 관한 연구는 많이 부족하다. 특히 국내에서는 현재까지 산림 토양을 대상으로 한 AMF의 군집 구조 연구는 거의 없다. 그러나 AMF의 생태적 중요성과 산림자원으로서의 가치를 고려할 때 국내 산림 토양의 AMF의 다양성을 확인하고 식생구조에 따른 차이를 분석하는 것은 중요한 과제로 생각된다.

본 연구에서는 전남 완도 지역을 대상으로 우리나라 산림 토양 내 AMF의 군집 구조를 분석하여 AMF의 종 다양성과 군집 구조의 특성을 확인하고자 한다. 완도는 대표적인 동백나무(*Camellia japonica*) 자생지로 본 연구에서는 완도의 동백나무 자생지에서 수집한 근권 토양과 부근의 다른 기주 식물의 근권 토양을 수집하여 식생구조에 따른 AMF의 군집의 차이를 비교하였다.

재료 및 방법

기주식물 및 근권 토양의 채집. 기주식물 및 근권 토양의 수집은 2012년 4월 완도 오봉산 지역의 동백나무 자생지에서 선상법(line transect method)을 이용하여 수행되었다. 동백나무 자생지 내 3곳의 샘플링 지역(S1, S2, S3)을 설정하고 각 지역에서 3개체의 동백나무와 일반 기주식물

의 근권 토양을 수집하였다. S1(N34°20'05.67", E126°42'14")에서 수집한 일반 기주식물은 광나무(*Ligustrum japonicum*), 참식나무(*Neolitsea sericea*), 월계수(*Laurus nobilis*)이며 S2(N34°20'11", E126°42'14")에서 수집한 일반 기주식물은 월계수, 장딸기(*Rubus hirsutus*), 괴불나무(*Lonicera maackii*)이고 S3(N34°20'08.38", E126°42'11.05")에서 수집한 일반 기주식물은 두릅나무(*Aralia elata*), 국수나무(*Stephanandra incise*), 비목나무(*Lindera erythrocarpa*)이다.

토양 내 AMF 포자를 추출하기 위해 건조된 토양 10 g을 따로 덜어내어 wet sieving 및 sucrose density gradient centrifugation method [25]를 수행하였다. 300 µm, 150 µm, 90 µm 및 63 µm 크기의 pore가 있는 토양체를 이용하여 포자를 분리하여 해부현미경 상에서 관찰하며 크기, 색깔, 모양이 비슷한 포자를 모아 추출하여 동정에 이용하였다. 추출한 포자를 슬라이드 글라스에 두 군데로 나눠 올려 두고 PVLG(Polyvinyl alcohol-lactic acid-glycerol), PVLG와 Melzer's reagent를 1:1로 섞은 고정액을 각각 1방울씩 떨어뜨린 후 커버 글라스를 덮고 적당한 압력을 주어 포자를 깨뜨렸다. 슬라이드 글라스를 광학현미경 상에서 관찰하면서 포자 벽의 수, 구조, 두께, 부차균사의 특징, 표면 장식(ornamentation)을 관찰하고 Melzer's reagent에 대한 화학적 반응 등을 종합하여 종을 동정하였다.

형태적 특징을 이용하여 동정하기 어려운 종은 분자생물학적 방법을 이용하여 종을 동정하였다. 상태가 양호한 포자 한 개를 0.2 ml PCR 튜브에 넣고 70% 에탄올로 소독한 곤충핀을 이용하여 포자를 깨트린 후 direct PCR에 이용하였다. 1차 PCR은 universal primer인 NS1/NS4를 이용하였고 PCR 후 1% agarose gel에서 전기 영동 후 밴드를 확인하였다. 밴드가 확인된 PCR 산물은 2차 PCR의 주형으로 이용되었으며 2차 PCR은 AMF 특이 primer인 AML1/AML2를 이용하였다[26]. 반응이 끝난 후 PCR 산물은 전기 영동을 통해 밴드를 확인하고 염기 서열 분석을 의뢰하였다(Solgent, Korea). 분석된 염기 서열은 NCBI (National Center for Biotechnology Information)의 BLAST (Basic Local Alignment Search Tool)을 이용하여 종을 동정하였으며, 이를 통해 근권 내 AMF 종 다양성 지수(Shannon's index) 및 근권 간 AMF 군집의 유사도 지수(Similarity index)를 계산하였다.

결과 및 고찰

3개의 연구지역에서 9개체의 동백나무와 근권 토양이 수집되었고, 동일한 지역에서 9개체의 서로 다른 일반 기주식물과 근권 토양도 함께 채집하여 전체 18개 토양의 AMF 군집을 분석하였다. 동백나무의 근권 토양에서는 총 248개의 AMF 포자가 확인되었고 일반 기주식물의 근권에서는 353개의 AMF 포자가 확인되었다. 토양 내 AMF의 종 구성을 분석한 결과 샘플링 지역에서 수집된 AMF는 모두 20종

으로 이 가운데 동백나무의 근권 토양에서는 11종의 AMF가 확인되었고 일반 기주식물의 근권에서는 *Scutellospora* sp.를 제외한 19종의 AMF가 수집되었다(Table 1, 2). 수집된 AMF 포자 중 *F. geosporum*, *R. fasciculatum* 및 *Scutellospora* sp.는 포자벽의 형태 및 구조와 같은 형태적 특징을 바탕으로 종을 동정하였다. 두 종류의 근권 토양 모두에서 *Acaulospora mellea*가 가장 우점적인 AMF 종으로 확인되었으며 그 다음으로 *Rhizophagus clarus*가 높은 비율로 발견되었다. 두 종류의 근권에서 우점종은 동일하게 확인되었으나 동백나무의 근권에서는 훨씬 적은 수의 AMF종만 확인되었다(55%). 두 근권에서 수집된 AMF 종의 상대적인 빈도를 분석한 결과, 동백의 근권에서는 *A. mellea* (77.8%)와 *R. clarus* (66.7%)가 가장 높은 빈도로 출현하는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 일반 기주식물의 근권에서 가장 높은 빈도로 출현하는 종은 *A. mellea* (66.7%)이지만 *R. clarus* 보다는 *A. longula* (33.3)와 *A. leptoticha* (33.3)가 상대적으로 높은 빈도로 출현하는 것을 확인할 수 있었다. 분석된 토양 내 AMF는 *Acaulospora* 속에 속하는 종이 가장 많았으며 이는 두 근권 모두에서 동일하였다(동백나무 57.7%; 일반 기주식물 66.6%). 두 AMF 군집의 종 다양성 지수(Shannon's index)와 토양 내 포자의 수는 일반 기주식물의 근권에서 더 높았다(Table 2).

국내에서 수행된 AMF에 관한 대부분의 연구는 경작지를 중심으로 이루어졌으나 본 연구에서는 오랜 기간 교란되지 않은 동백 자생지 및 일반 기주식물의 근권 토양에서 AMF의 군집 구조를 확인하였다. 선행 연구에 따르면 우리나라

경작지의 AMF군집은 *Glomus* 속에 우점되어 있지만[18, 19] 본 연구 결과는 산림 토양 내 AMF군집 구조는 경작지와는 달리 *Acaulospora*속에 속하는 종이 우점하고 있음을 보여준다. 경작지의 주요 식생이 단순하고 대부분이 초본임을 고려해 볼 때 산림 토양 내에서 *Acaulospora*속의 종이 상대적으로 많이 출현하는 것은 *Acaulospora*속이 초본 보다는 목본 식물과의 공생 관계에 더 적응되어 있는 것으로 해석할 수 있다.

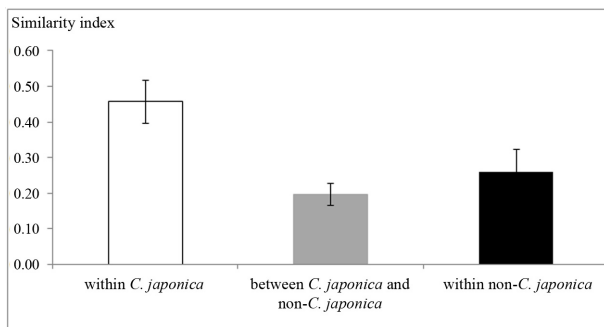
동백나무와 일반 기주식물의 근권 토양 내 AMF군집의 유사도 지수를 분석한 결과 동백나무의 근권에서 발견되는 AMF군집 간의 유사도는 일반 기주식물의 근권에서보다 유의미하게 높은 것으로 나타났다(Fig. 1). 종 다양성 및 토양 내 AMF포자 수는 두 근권에서 유의미한 차이를 보이지 않았으나 군집 유사도 분석은 동백나무의 근권이 다른 식물의 근권과는 달리 매우 편향적인 종 구성을 가지고 있음을 보여준다. 동백나무의 근권에서 발견된 AMF군집간 유사도 지수는 일반 기주식물의 근권에서 발견되는 AMF군집간 유사도 지수에 비해 높았으며($p < 0.05$), 두 근권에서 발견되는 AMF군집 간의 유사도는 동백 근권에 비해 낮은 것으로 나타났다($p < 0.05$). 따라서 동백 근권에서 발견되는 AMF군집이 다른 기주식물의 근권에서 발견되는 AMF군집과는 다른 특이적인 군집 구조를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 토양 내 AMF포자의 군집 구조는 기주식물의 종에 따라 영향을 받을 수 있으며, 특정 식물의 군락지역은 주변의 식생의 근권과는 다른 독특한 AMF군집 구조를 발달시킨다고 보여진다.

Table 1. BLAST results of AM fungal spore collected in Wando

AM fungal species	Sequenced based identification		
	Closest match	Similarity	Acc. No.
<i>Acaulospora</i> sp.1	<i>Acaulospora</i> sp.	748/761(99%)	KF386272
<i>Acaulospora</i> sp. 2.	<i>Acaulospora</i> sp.	742/752(99%)	Y17633
<i>Acaulospora brasiliensis</i>	<i>Acaulospora brasiliensis</i>	733/747(98%)	FN825900
<i>Acaulospora lacunosa</i>	<i>Acaulospora lacunose</i>	747/762(98%)	HE610427
<i>Acaulospora laevis</i>	<i>Acaulospora laevis</i>	742/752(99%)	Y17633
<i>Acaulospora longula</i>	<i>Acaulospora longula</i>	744/752(99%)	AJ306439
<i>Acaulospora mellea</i>	<i>Acaulospora mellea</i>	733/743(99%)	JN687473
<i>Ambispora leptoticha</i>	<i>Ambispora leptoticha</i>	681/725(94%)	AJ301861
<i>Archaeospora</i> sp.	uncultured <i>Archaeospora</i>	650/740(88%)	HQ258992
<i>Claroideoglossum claroideum</i>	<i>Claroideoglossum claroideum</i>	651/726(90%)	Y17636
<i>Claroideoglossum etunicatum</i>	<i>Claroideoglossum etunicatum</i>	754/760(99%)	AJ852598
<i>Claroideoglossum lamellosum</i>	<i>Claroideoglossum lamellosum</i>	763/770(99%)	FR750221
<i>Diversispora eburnea</i>	<i>Diversispora eburnea</i>	410/469(87%)	AM713431
<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Funneliformis mosseae</i>	734/746(98%)	NG_017178
<i>Glomus versiforme</i>	<i>Glomus versiforme</i>	743/748(99%)	X86687
<i>Glomus</i> sp.	Uncultured <i>Glomus</i>	606/682(89%)	KF386288
<i>Rhizophagus clarus</i>	<i>Rhizophagus clarus</i>	731/744(98%)	AJ852597

Table 2. Relative abundance of AM fungal spore in rhizosphere of *C. japonica* and non-*C. japonica*

AM fungal species	<i>C. japonica</i>		Non- <i>C. japonica</i>	
	Relative abundance (Mean±SE)	Frequency (%)	Relative abundance (Mean±SE)	Frequency (%)
<i>Acaulospora</i> sp. 1			0.65±0.65	11.1
<i>Acaulospora</i> sp. 2			2.08±2.08	11.1
<i>Acaulospora brasiliensis</i>			1.72±1.72	11.1
<i>Acaulospora lacunosa</i>	4.23±3.43	22.2	2.61±2.03	22.2
<i>Acaulospora laevis</i>			1.31±1.31	11.1
<i>Acaulospora longula</i>	11.11±11.11	11.1	7.83±5.26	33.3
<i>Acaulospora mellea</i>	34.26±8.87	77.8	43.73±12.18	66.7
<i>Ambispora leptoticha</i>	0.58±0.58	11.1	6.34±3.89	33.3
<i>Archaeospora</i> sp.			0.57±0.57	11.1
<i>Claroideoglomus claroideum</i>	0.54±0.42	22.2	1.19±1.19	11.1
<i>Claroideoglomus etunicatum</i>			1.59±1.59	11.1
<i>Claroideoglomus lamellosum</i>	1.85±1.85	11.1	11.51±11.51	22.2
<i>Diversispora eburnea</i>			0.15±0.15	11.1
<i>Funnelformis geosporum</i>			3.59±3.59	11.1
<i>Funnelformis mosseae</i>			0.74±0.74	11.1
<i>Glomus versiforme</i>	5.56±5.56	11.1	0.30±0.30	11.1
<i>Glomus</i> sp.	6.47±4.47	22.2	3.87±3.45	22.2
<i>Rhizophagus clarus</i>	30.88±11.36	66.7	9.82±6.80	22.2
<i>Rhizophagus fasciculatus</i>	0.41±0.41	11.1	0.40±0.40	11.11
<i>Scutellospora</i> sp.	4.09±82.74	22.2		
Shannon's index	0.742±0.14		0.817±0.16	
Spore number	27.56±7.61		39.22±12.03	

**Fig. 1.** Similarity index (Mean±SE) of AM fungal communities of rhizospheres of *C. japonica* and non-*C. japonica* in study sites.

동백나무의 근권에서 AMF군집의 유사도는 *A. mellea*와 *R. clarus*에 의한 강한 우점현상 때문인 것으로 생각된다. 동백나무의 근권에서는 한 곳을 제외한 나머지 모든 군집이 *A. mellea* 혹은 *R. clarus*에 의해 거의 완전히 우점되어 있다. 반면 동백나무가 아닌 일반 기주식물의 근권에서는 두 개의 군집에서만 *R. clarus*가 발견되었고, 세 개의 군집에서는 *A. mellea*가 발견되지 않았다. 따라서 *A. mellea*와

*R. clarus*는 동백나무의 근권에서 일반적으로 발견되는 AMF 종인 것으로 생각된다. AMF는 기주 식물에 대한 특이성이 거의 없어 한 종의 식물 뿌리에 다수의 AMF가 공생 관계를 형성할 수도 있는 것으로 알려져 있으나[1], 선행 연구에 따르면 특정한 식물 종은 특정한 AMF 종에 대한 선호가 존재하는 것으로 보인다[21,22]. 따라서 동백의 근권에서 발견되는 AMF 군집간 유사성은 기주식물에 의한 선택 효과로 볼 수 있다. 한편 일반 기주식물의 근권에서 발견되는 AMF 군집간의 유사도가 낮은 것은 다양한 기주식물에 의한 AMF 종 선택성이 감소한 결과로 생각된다. 즉 기주식물의 다양성이 증가할수록 토양 내 AMF 군집의 다양성도 함께 증가하는 것으로 볼 수 있다.

현재까지 보고된 바에 따르면 단일 지역에서 AMF의 종 다양성이 가장 높은 곳은 Panama의 열대 우림이다[27]. 그러나 열대 우림지역 외에도 온대 지역의 초지나 산림지역도 AMF 종 다양성이 높은 지역으로 알려져 있다[28-30]. 우리나라는 온대 기후대에 속하며 비교적 계절적 변화가 뚜렷하여 서로 다른 식물에게 각기 적합한 환경을 제공하여 높은 식물 다양성을 가지고 있다. 다양한 식생 환경을 유지하고 있는 국내 산림 생태계의 근권 토양 내 AMF 군

집은 지금까지 연구된 AMF의 다양성보다 더 높은 종 다양성을 보여줄 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원의 연구비(FP 0801-2010-01) 지원으로 수행되었습니다.

적 요

완도의 동백나무 자생지역에서 동백나무의 근권과 주변 일반 식물의 근권 토양을 수집하여 토양 내 수지상균근균(AMF)의 다양성 및 군집 구조를 확인하였다. 분석 결과 두 근권은 모두 *Acaulospora mellea* 포자로 우점되어 있지만 동백나무 근권에 비해 일반 기주식물의 근권에서 AMF 종 다양성 지수와 종 수 및 포자 수가 더 높게 나타나는 경향을 확인하였다. 기주식물의 종류에 상관없이 *A. mellea*가 높은 빈도로 출현하는 것으로 보아 *A. mellea*가 다른 AMF 종에 비해 산림 토양 및 목본 식물에 특이적으로 적응된 것으로 생각된다. 두 근권에서 발견된 AMF 군집간의 유사도를 분석한 결과 동백나무의 근권에서 발견된 AMF 군집간의 유사도가 동백나무 근권 AMF 군집 일반 기주식물 근권 AMF 군집 간의 유사도나 일반 기주식물 근권 AMF 군집간의 유사도에 비해 더 높은 것으로 나타났다. 이는 동백나무 근권이 다른 일반 기주식물의 근권과는 다른 독특한 AMF 군집 구조를 형성하고 있으며, 식물의 근권 주변의 AMF 군집은 기주식물에 의해 유의미한 수준으로 달라질 수 있음을 보여준다.

REFERENCES

- Smith S, Read D. Mycorrhizal symbiosis. 3rd ed: Academic Press, San Diego; 2008.
- Wang B, Qiu YL. Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. *Mycorrhiza* 2006;16:299-363.
- Newsham K, Fitter A, Watkinson A. Arbuscular mycorrhiza protect an annual grass from root pathogenic fungi in the field. *J Ecol* 1995;99:1-1000.
- Ruiz-Lozano J, Azcón R, Gomez M. Effects of arbuscular-mycorrhizal *Glomus* species on drought tolerance: physiological and nutritional plant responses. *Appl Environ Microbiol* 1995;61:456-460.
- Göhre V, Paszkowski U. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. *Planta* 2006;223:1115-1122.
- Heggo A, Angle J, Chaney R. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal uptake by soybeans. *Soil Biol Biochem* 1990;22:865-869.
- Killham K, Firestone M. Vesicular arbuscular mycorrhizal mediation of grass response to acidic and heavy metal depositions. *Plant Soil* 1983;72:39-48.
- George E, Marschner H, Jakobsen I. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in uptake of phosphorus and nitrogen from soil. *Crit Rev Biotechnol* 1995;15:257-70.
- van der Heijden MG, Boller T, Wiemken A, Sanders IR. Different arbuscular mycorrhizal fungal species are potential determinants of plant community structure. *Ecology* 1998;79:2082-2091.
- Janos DP. Mycorrhizae influence tropical succession. *Biotropica* 1980;56-64.
- Gange A, Brown V, Sinclair G. Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi: a determinant of plant community structure in early succession. *Funct Ecol* 1993;616-622.
- Hartnett DC, Wilson GW. The role of mycorrhizas in plant community structure and dynamics: lessons from grasslands. *Plant Soil* 2002;244:319-331.
- Braunberger P, Abbott L, Robson A. Early vesicular-arbuscular mycorrhizal colonisation in soil collected from an annual clover-based pasture in a Mediterranean environment: soil temperature and the timing of autumn rains. *Aust J Agric Res* 1996;48:103-110.
- Matsubara YI, Harada T. Effect of constant and diurnally fluctuating temperatures on arbuscular mycorrhizal fungus infection and the growth of infected asparagus (*Asparagus officinalis* L.) seedlings. *J Jpn Soc Hort Sc* 1996;65.
- Redhead J. Endotrophic mycorrhizas in Nigeria: species of the Endogonaceae and their distribution. *Trans Br Mycol Soc* 1977;69:275-280.
- Gaur A, Adholeya A. Effects of the particle size of soil-less substrates upon AM fungus inoculum production. *Mycorrhiza* 2000;10:43-48.
- Saif S. The influence of soil aeration on the efficiency of vesicular-arbuscular mycorrhizae I. *New Phytol* 1981;88:649-659.
- Lee JE, Eom AH. Effect of organic farming on spore diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil. *Mycobiology* 2009;37:272-276.
- Lee SW, Lee EH, Eom AH. Effects of organic farming on communities of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycobiology* 2008;36:19-23.
- Bever JD. Host-specificity of AM fungal population growth rates can generate feedback on plant growth. *Plant Soil* 2002;244:281-290.
- Helgason T, Merryweather J, Denison J, Wilson P, Young J, Fitter A. Selectivity and functional diversity in arbuscular mycorrhizas of co-occurring fungi and plants from a temperate deciduous woodland. *J Ecol* 2002;90:371-384.
- Vandenkoornhuyse P, Ridgway K, Watson I, Fitter A, Young J. Co-existing grass species have distinctive arbuscular mycorrhizal communities. *Mol Ecol* 2003;12:3085-3095.
- Giovannetti M, Hepper CM. Vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in *Hedysarum coronarium* and *Onobrychis viciifolia*: Host-endophyte specificity. *Soil Biol Biochem* 1985;17:899-900.
- Douds Jr D, Galvez L, Bécard G, Kapulnik Y. Regulation of arbuscular mycorrhizal development by plant host and fungus species in alfalfa. *New Phytol* 1998;138:27-35.
- Daniels BA, Skipper HA. Methods for the recovery and quantitative estimation of propagules from soil. In: Schenck NC, editor. *Methods and principles of mycorrhizal research*. St. Paul, Minn: American Phytopathological Society; 1982. p. 29-35.

26. Lee J, Lee S, Young JPW. Improved PCR primers for the detection and identification of arbuscular mycorrhizal fungi. *FEMS Microbiol Ecol* 2008;65:339-349.
27. Husband R, Herre EA, Turner S, Gallery R, Young J. Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and patterns of host association over time and space in a tropical forest. *Mol Ecol* 2002;11:2669-2678.
28. Helgason T, Merryweather JW, Young JPW, Fitter AH. Specificity and resilience in the arbuscular mycorrhizal fungi of a natural woodland community. *J Ecology* 2007;95:623-630.
29. Vandenkoornhuyse P, Husband R, Daniell T, Watson I, Duck J, Fitter A, Young J. Arbuscular mycorrhizal community composition associated with two plant species in a grassland ecosystem. *Mol Ecol* 2002;11:1555-1564.
30. Saito K, Suyama Y, Sato S, Sugawara K. Defoliation effects on the community structure of arbuscular mycorrhizal fungi based on 18S rDNA sequences. *Mycorrhiza* 2004;14:363-373.