

화학비료를 사용한 Arbuscular 내생균근 균의 포자증식에 관한 연구

이상선* · 엄안흠 · 이석구¹

한국교원대학교 대학원 생물학과,

¹충남 당진합덕여자중학교

A study on the production of arbuscular mycorrhizal fungal spores by using the commercial fertilizers and the pot culture techniques

Lee, Sang-Sun*, Ahn-Heum Eom and Seok-Koo Lee¹

Department of Biology, Graduate School, Korea National University of Education,

Chung Won Kun, Chung Puk, 363-791, and

¹Habduk Girl's Middle School, Chung Nam 343-900,

Republic of Korea

ABSTRACT: The productions of arbuscular mycorrhizal fungal(AMF) spores were observed by adding three different commercial fertilizers on AMF inhabiting soils. Various morphological features, vesicles, arbuscles, sporulations of spore, and flower-like-structures, were also found in the mycorrhizal roots during 80 days after transplanting. Spore productions of the employed AMF were observed to be periodically increased with the intervals of 40 days. Sorghum, green onion, hot pepper, and wild legume plants were appeared to be a good plant for productions of AMF and as the host of AMF. The productions of AMF spores was inversely related to phosphate fertilizer, and also observed to be low in the plant pots added with whole balanced fertilizers.

KEYWORDS: Pot cultures, AM, Arbuscular mycorrhizae, host plants, spore productions.

AMF(arbuscular mycorrhizal fungus)의 식물공생의 잇점이 알려진 후에, 농업 및 임업에서는 식물재배에 이용하려는 시도가 포자증식을 요구하게 되었다. 식물의 배양없이 인위적인 배지로서 AMF의 배양이 시도되었으나, 인공적인 포자생산은 아직 얻지를 못하였다(Louis and Lim, 1988 ; Mosse and Hepper, 1975 ; Mertz *et al.*, 1979). 이로써, AMF는 숙주식물과 필수적인 공생자(obligate symbionts) 관계(Lewis, 1973)로 알려졌으며, 정상적인 성숙에는 숙주식물을 통한 배양을 꼭 필요한 것으로 보고하였다(Koske and Polson, 1984).

식물과의 재배에서 AMF 포자의 생산은 다양한 토양의 조건 하에서의 실험이 이루어졌으며(Sreenivasa and Bagyaraj, 1988), 다양한 숙주식물들을

사용한 결과도 있다(Smith and Roncadori, 1986). 또한, 다른 실험에서는 토양의 pH에 따른 포자생산 및 감염율도 관찰하였다(Haymann and Tavares, 1985). 자연상태에서 계절에 따른 포자생산은 식물이 대사를 중단하는 10월에 가장 많은 포자 수가 관찰되었다(Gemma *et al.*, 1989). 외부 환경스트레스에 대한 연구에서는 염분농도에 따른 AMF 감염도와 포자증식의 상호영향이 관찰되었다(Daft and Hogarth, 1983 ; Wilson, 1984 ; Kim and Weber, 1985). 이러한 연구는 인위적인 배지를 이용한 AMF 포자생산보다는 숙주를 이용한 포자생산이 더 실용적으로 사용되고 있는 실정이다.

AMF 포자증식은 숙주식물을 달리 했을 때에도 다소간 변화가 있음을 보고하고 있는데, 벼과식물인 Bahiagrass(*Paspalum notatum*)에서 *Glomus* 종들의 포자생산이 가장 높고, 대두가 가장 낮은 포자생산을

*Corresponding author

나타났다고 보고하였다(Struble and Skipper, 1988). 비경작지인 두 지역 토양간의 AMF 종을 동정하고 식물과 AMF간의 숙주 특이성을 조사한 결과, 배추를 제외한 고추, 참깨, 수수, 강남콩 등의 식물에서 AMF 포자증식이 관찰되었다(가, 1991). 이러한 연구들은 AMF 포자증식에 대한 연구로 숙주식물의 중요성을 암시하였다.

따라서 많은 연구자들의 보고에 의하면 AMF 포자증식에 관여하는 요인은 크게 세가지로 대분해 볼 수 있다. 그 첫째가 계절적으로 주어지는 외부적 변인이고, 둘째는 숙주 식물의 변인이며, 셋째는 토양의 구성성분을 포함한 토양의 내부적 환경변인으로 생각되고 있다. 이러한 의미에서 본 실험은 인위적으로 변화시킬 수 있는 토양에 비료를 첨가함으로써 AMF 포자증식에 관련되는 실험을 하였다. 본 실험실 주변에 있는 알려진 토양을 이용하여, 네 가지의 식물들을 사용한 결과 포자가 증식되는 비료는 식물에 따라 다르게 나타났으며, 인산원 비료에 많이 좌우되는 것으로 나타났다.

材料 및 方法

토양의 채취

포트의 구성을 위한 토양채취는 1차 1991. 4. 30, 2차 1992. 7. 20의 2회에 걸쳐 실시하였다. 채취 장소는 모두 충북 청원군 강내면 한국교원대학교 주변의 토양으로 이미 본 실험실의 선행 연구에 의하여 AMF의 포자가 조사, 관찰된 토양(가, 1991; 이등, 1991; 엄과이, 1990)을 표면으로부터 약 40 cm 깊이까지의 토양을 채취하였다. 1차 채취한 토양은 토양내 환경 변화의 요인자로 인산을 이용하는 포트 구성용으로 사용하였으며, 2차 채취토양은 토양내 환경변화의 요인자로 농협에서 판매되고 있는 화학 비료를 이용하였다.

숙주식물의 발아 및 이식

숙주식물로는 1차 인산실험과 2차 비료실험의 경우 수수(*Sorghum bicolor*), 차풀(*Cassia mimosoides*), 참깨(*Sesamum indicum*), 고추(*Capsicum annuum*) 및 파(*Allium fistulosum*)로 모두 다섯 종류의 식물들을 이용하였다. 수수와 참깨의 씨앗은 1990년도에 충남 태안군의 농가에서 재배하여 수확한

것을 구입하여 이용하였고, 파와 고추는 충남 연기군 조치원의 종묘상에서 구입하여 이용하였으며, 차풀은 충북 청원군 한국교원대학교 주변에서 1990년 가을에 본 실험실에서 채집하여 보관하던 것을 이용하였다. 1차 인산 실험을 위한 각 숙주식물 씨앗의 발아는 Petri dish에서 실시하였는데, 지름 8.5 cm, 높이 1.5 cm의 Petri dish에 거름종이를 깔고 씨앗을 Petri dish 당 30-40개를 고루 배치한 다음 각 씨앗의 1/3 정도가 잠길 정도로 증류수를 채워 넣었다. 이를 항온기에 옮겨 25°C 를 유지하여 발아시킨 다음 이미 준비된 포트에 3개체씩 이식하였다. 이식 당시의 식물은 발아 3일 이내의 것을 이용하였다. 2차의 비료 실험의 경우 숙주식물의 씨앗은 포트에 직접 파종하여 발아시키고 파는 5개체, 기타 다른 숙주식물은 3개체씩으로 그 수를 조절하였다. 차풀 씨앗은 발아율이 비교적 낮기 때문에 발아율을 높이기 위하여 끓는 물에 1분 정도 열처리 하여 파종하였다.

포트구성 및 배양

포트는 높이가 8.5 cm, 입구 구경이 9 cm, 하면의 지름이 6 cm의 비닐 포트를 이용하였다. 두번에 걸쳐 채취한 각 토양은 5×5 cm의 채를 이용하여 거친 자갈을 포함한 기타 이물질을 제거하였다. 채집 토양은 암소에 보관하였으며 가급적 짧은 시간(채취 후 3일 이내) 내에 포트를 구성하였다. 포트 내 토양의 구성은 1차 실험의 경우에는 채집된 모토양만을 사용하였고, 2차 실험의 경우에는 채집된 모토양, 모래 및 부엽토를 48.5 : 48.5 : 3(w/w/w)로 섞어 사용하였다. 포트 당 토양은 400 g 씩으로 구성하였고 그 토양내에 분포하고 있는 AMF 포자를 조사하였다. 각 포트는 온실에 옮겨져 1차의 인산을 이용한 실험은 1991. 5. 15부터 1991. 8. 3까지, 2차의 비료를 이용한 실험은 1992. 7. 29부터 1992. 9. 9까지 각각 80일과 42일간에 걸쳐 포트배양하였다. 이때 배양기간 동안 일체의 아래 언급된 비료외 다른 양분의 공급은 없었으며, 이틀에 한번씩 수도물로 충분한 수분을 공급하였다.

토양내 환경 변화의 요소

400 g 씩의 토양을 달아 구성한 각 포트들의 토양내 환경 변화의 요소로는 1차 인산실험에서는 그 재료원으로 KH_2PO_4 (Junsei Chemical Co., Ltd.)를

이용하였고, 2차 비료실험의 재료원으로는 농협협동조합을 통하여 농가에 보급되는 비료로 황산암모늄($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), 황산칼륨(K_2SO_4)을 주원료로 하여 배합된 N-P-K의 포함 비율이 N=18%, K=18%인 18-0-18(동상실업에서 제조한 수도이삭 거름용), 비료와 황산암모늄($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), 과인산(P_2O_5), 황산칼륨(K_2SO_4)을 주원료로 하여 배합된 N=21%, P=17%, K=17%인 21-17-17(남해화학주식회사) 비료 그리고 염화칼륨(KCl)을 주원료로 한 K=60%인 0-0-60(남해화학주식회사) 비료 등 세 종류를 이용하였다.

인산을 이용한 1차 실험에서는 KH_2PO_4 의 농도를 토양 g 당 50 μg 과 200 μg 으로 구분하여 실시하였다. 시비방법은 가급적 시비량의 오차를 줄이기 위하여 50 μg 용과 200 μg 용을 나누어 전자저울을 이용하여 각각 포트 전체량을 1 회에 측정하고 이를 물에 녹여 시비 대상 포트 수로 일정하게 나누어 포트 구성 초기에 1회 시비하였다. 비료를 이용한 2차 실험에서는 18-0-18과 21-17-17 비료의 경우 400 g 포트 당 각각 0.1 g, 0.2 g 그리고 0.4 g의 세가지 농도로 구분 시비하였으며, 0-0-60 비료의 경우에는 400 g 포트 당 0.1 g과 0.2 g의 두가지 농도로 구분하여 시비하였다. 시비의 시기와 방법에 있어서 위의 1차 인산 실험의 경우와는 달리 시비의 시기는 포트에 과중된 숙주식물 씨앗의 발아 후 7일이 경과되었을 때 1회로 실시하였으며, 18-0-18과 21-17-17 비료를 0.4 g 첨가하는 포트는 숙주식물 발아 7일 경과 후에 0.1 g을 시비하고 연속적으로 7일 경과시마다 0.1 g을 시비하여 4차례로 나누어 시비하였다.

조사방법

본 실험에서 채취한 토양 속에 있는 AMF 포자의 종류는 가(1991), 이등(1991), 및 업과 이(1990)의 연구에서 나온 자료로 구별하였으며, 이들의 중요한 특징들은 Table 1과 같다. 인산(KH_2PO_4)을 토양내 환경 변화의 재료원으로 이용한 실험에서는 80일간 포트배양을 하면서 10일 간격으로 나누어 포자의 변화상태를 현미경으로 조사하였다. 또한 비료를 재료원으로 한 2차 실험에서는 2주 간격인 14일째, 28일째, 42일째의 3회에 걸쳐 포자의 증별 변화 상태와 숙주식물의 생체량을 동시에 조사하였다. 각 숙주식물의 생체량은 뿌리와 줄기를 합쳐 계산하였

으며, 물로 뿌리의 흙을 씻어낸 다음 휴지로 물기를 흡수시키는 방법으로 물기를 제거하고 1시간 이내에 측정하였다. 생체량을 측정할 다음의 뿌리는 AMF 감염도를 조사하기 위해 시험관에 넣고, FAA(Formalin Acetic acid Alcohol) 용액을 채워 고정 보관하였다. 토양은 음지에서 2일간 건조시킨 다음 비닐봉지(Polyethylene bag)에 넣어 암소에 보관하면서, 필요에 따라 꺼내어 포자의 변화 상태를 조사하였다.

포자의 변화조사

포자수 변화 상태는 50%의 설탕용액을 이용한 원심분리 방법(705 g, 10 min, 15°C)을 이용하였다. 본 실험에서는 포자의 변화 상태를 10 g 속에 포함된 포자수를 헤아려 계산하였으며 각각 2회 반복한 평균값으로 나타내었다. 특별히 언급되지 않은 경우를 제외하고는, 포자수 측정은 3 반복 실험을 통하여 평균값으로 표시하였다.

結 果

채집토양

충북 청원군 한국 교원대학교 주변의 토양을 2 차례 걸쳐 채취하여 실험에 임했다. 각 토양에 포함된 AMF 포자를 50% 설탕용액을 이용한 원심분리법으로 분석하였다. 포자의 특징에 있어서는 *Scutellispora heterogama*와 *Sc. verrucosa*는 모양이 비슷한 구형이지만, 해부현미경상에서의 크기와 색깔 등이 다르게 나타났다(Table 1). 해부현미경상에서 밝은 선홍색을 띠는 것이 *Sc. heterogama*(157-300 μm)이며 불투명하고 검은색을 띠는 것이 *Sc. verrucosa*(310-490 μm)로 크기도 컸다(Table 1). *Sc. heterogama*와 *Sc. verrucosa*는 다른 *Sc. calospora*나 *Gigaspora margarita*와는 색깔에 있어서 다르게 나타났다. *Sc. calospora*와 *Gi. margarita*는 다 같이 구형 또는 타원형으로 해부현미경상에서 흰색 계통을 나타내지만 그 크기에 있어서나 포자를 깎을 때의 포자벽 구조의 수 등으로 쉽게 구분이 되었다(Table 1). *Sc. calospora*는 포자를 깨지 않고도 발아방패(Germination shield)가 광학현미경상에서 뚜렷이 구별되었다. *Acaulospora spinosa*와 다른 포자의 구별은 색깔과 크기 및 표면의 구조등이 다르게 나

Table 1. Characteristics of five arbuscular mycorrhizal spores employed under the light microscopes^a

Fungal species	Size (μm) ^b	Color	Subtending hyphae (μm)	Melzer's reaction ^c
<i>Sc. heterogama</i>	157-300	Red	bulbose/37-45	NO
<i>Sc. verrucosa</i>	310-490	Dark red	bulbose/60-70	NO
<i>Sc. calospora</i>	(200-) 230-290	transparent white	bulbose/25-45	Yes, red
<i>Gi. margarita</i>	255-510×340-410	white	bulbose/45-55	Yes, red
<i>Ac. spinosa</i>	140-170×160-200	yellowish brown	no subtending hyphae	NO

^aFive species of arbuscular mycorrhizae collected from the soils around the Korea National University of Education.

^bThe observations under the light and dissection microscopes, 50, 128, 200, 320, and 800×

^cReactions with Melzer's reagent: "No" indicated not reacted, and "Yes, red" reacted and turn to red color.

Table 2. Populations of Arbuscular Mycorrhizal Fungal spores in the soils A and B used for this work^a

Arbuscular Mycorrhizal Fungi ^b	Number of Spores	
	A ^c	B ^d
<i>Scutellispora</i>		
<i>Sc. heterogama</i>	1.5±0.5	0.3±0.2
<i>Sc. verrucosa</i>	0.5±0.5	0 ^e
<i>Sc. calospora</i>	1.0±0.0	0.1±0.2
<i>Gigaspora</i>		
<i>Gi. margarita</i>	0	0
<i>Acaulospora</i>		
<i>Ac. spinosa</i>	0	0.7±0.6
Total	3.0±1.0	1.1±0.7

^aThe number of arbuscular mycorrhizal spores counted in the 10 gram of soils collected around Korea National University of Education.

^bArbuscular mycorrhizal fungi.

^cSoil used in the first experiment, average of 2 replications and their standard deviation.

^dSoils used in the second experiment, average of 15 replications and their standard deviation.

^eN.D means that the spores was not found.

타났다. *Ac. spinosa*는 황갈색을 띠며 포자의 크기에 있어서도 140-170×160-200 μm로 다른 4종에 비해 작게 나타났다. 이들을 기초로 하여 다음의 실험에 이용하였다. 채집된 토양을 조사한 결과 AMF 포자 구성은 Table 2와 같았다. 관찰된 포자들은 1차(1991. 4.30) 채집된 토양의 경우 *Sc. heterogama*, *Sc. verrucosa*, *Sc. calospora*, *Gi. margarita*

등의 2속 4종이었으며 그 빈도는 Table 2와 같았다. 이 토양은 직접 풋트를 만들어 실험에 사용하였으며, 두번째(1992. 7.20) 채집된 토양은 채집 모토양에 모래와 부엽토를 섞은 후에 사용하였다. 제 1차 실험에 사용한 모토양의 AMF 포자의 분포도 조사하였다. 그 결과 AMF는 *Sc. heterogama*, *Sc. calospora*, *Acaulospora spinosa* 등의 2속 3종으로 나타났다. 다른 어떤 *Glomus* 종들은 없었다.

AMF 감염

뿌리를 염색하여 현미경 관찰을 한 결과 AMF 균사가 식물체 내부로 침투하는 감염부위가 다수 관찰되었다(Fig. 1). 식물체 내부에 침투한 균사는 10-20일째는 세포외 균사(intercellular hyphae)가 주로 관찰되었으며 그 균사의 퍼짐 정도나 형태도 단순했다(Fig. 1ACH). 그러나, 시간이 지날 수록 세포외 균사들은 더 복잡하게 식물뿌리 세포에 분포되었으며(Fig. 1DEF), 세포내로 침투하여 세포내 균사(intracellular hyphae, Fig. 1GH)의 형태를 갖춘 특징들이 나타났다. 그 하나가 세포내로 침투한 균사가 꼬여서 형성되는 코일 균사체(coiling hyphae)인데, 이러한 코일 균사체가 여러 곳에서 발견되었으며, 특히 수수에서 많이 관찰되었다(Fig. 1A). 세포의 내부로 침투하여 나뭇가지 모양을 이루는 균사(arbuscle)들도 본 실험에 사용된 모든 숙주식물의 염색 뿌리로부터 관찰되었으며, 이와 비슷한 균사 형이 집단을 이루고 있는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 1GHI). 수수에 인산처리한 풋트에서 30일째 뿌리에서는 곤충의 알과 같은 균사체가 규칙성 있는

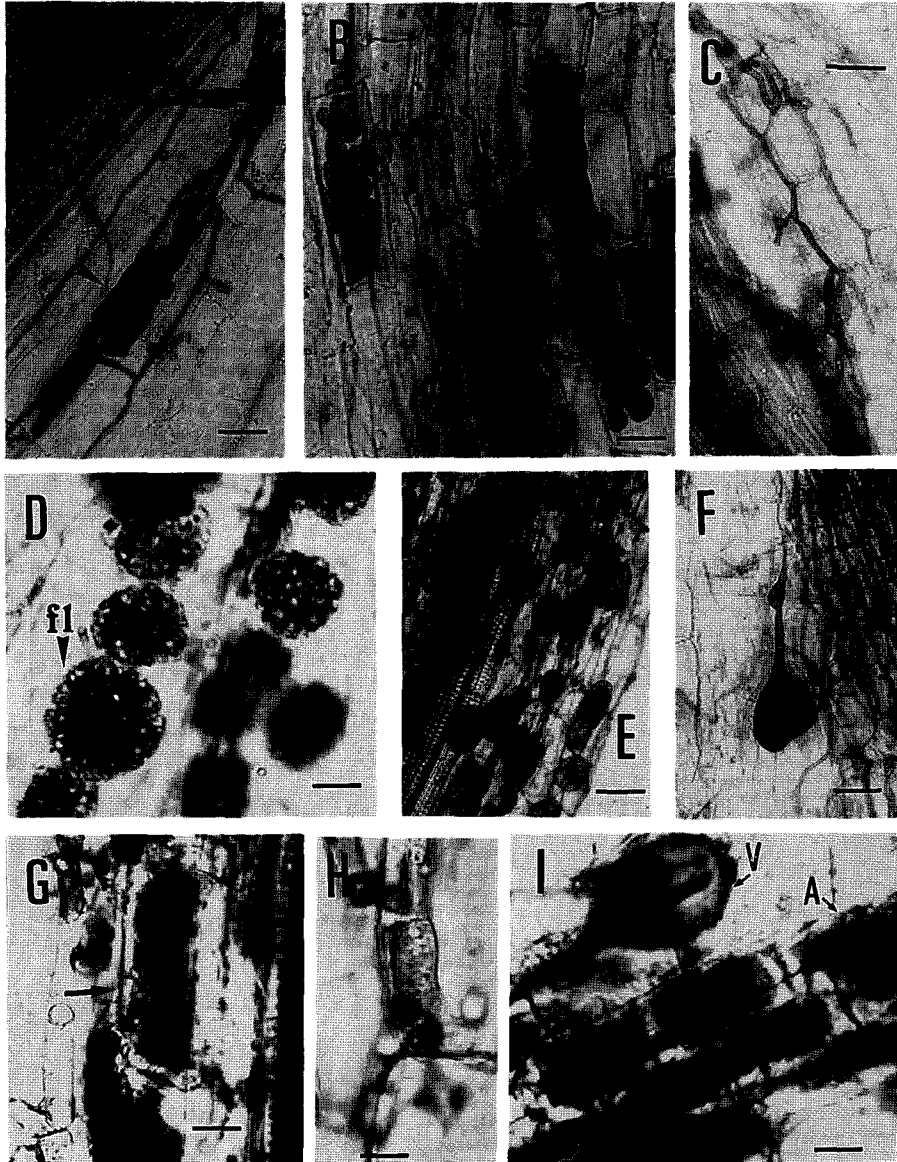


Fig. 1. Observations of arbuscular mycorrhizal hyphae infected in the roots of the host plants: The coiling, compacted, intercellular hyphae in *Sorghum bicolor* after 20 days' cultivation under addition of $50 \mu\text{g KH}_2\text{PO}_4/\text{g}$ of soil(A, the bar representing $50 \mu\text{m}$); The intracellular vesicles in the root cells of *Sorghum bicolor* after 30 days' cultivations under addition of $200 \mu\text{g KH}_2\text{PO}_4/\text{g}$ of soil(B, $50 \mu\text{m}$); The penetrating hyphae into the host root cells of *Capsicum annum* after 6 weeks' cultivation under addition of 0-0-60 commercial fertilizer(C, $100 \mu\text{m}$); flower like hyphae(fl) in the plant root cells of *Cassia mimosoides* after 4 weeks' cultivation under addition of 21-17-17 fertilizer(D, $\times 20 \mu\text{m}$); small vesicles in the plant root cells of *Sorghum bicolor* after 30 days' cultivation under addition of $50 \mu\text{g KH}_2\text{PO}_4/\text{g}$ of soil(E, $50 \mu\text{m}$); Sporulations of *Ac. spinosa* in the root cells of *Allium fistulosum* after 6 weeks' cultivation under addition of 21-17-17 fertilizer(F, $50 \mu\text{m}$); The arbuscles(\rightarrow) in the plant root cells of(G, $20 \mu\text{m}$); Internal compacted hyphae in the roots of(H, $20 \mu\text{m}$); the vesicles(v) and arbuscles(A) in the plant roots of(I, $20 \mu\text{m}$) *Cassia mimosoides* under addition of $200 \mu\text{g KH}_2\text{PO}_4/\text{g}$ of soil after 40 days' cultivations.

Table 3. Observations of arbuscular mycorrhizal fungal spores and biomass and plants after 42 days' cultivations in the small pots

Species ^a	Commercial fertilizers used for this works (Amount g/pot added)								N.F ^d
	18 - 0 - 18 ^c			21 - 17 - 17			0 - 0 - 60		
	0.1 ^e	0.2	0.4	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	
<i>Sorghum bicolor</i> (Plants)									
<i>Sc. heterogama</i>	10.0	24.0	5.0	16.5	5.5	3.5	11.5	7.5	12.0
<i>Sc. calospora</i>	1.5	2.5	2.0	1.5	0.0	0.5	1.5	1.0	1.5
<i>Ac. spinosa</i>	2.0	5.5	2.0	5.0	3.5	2.0	2.5	4.0	3.5
Total	13.5	32.0	9.0	23.0	9.0	6.0	15.5	12.5	17.0
Biomass ^f	2.16	7.38	12.81	8.20	11.17	20.96	1.04	0.49	0.71
<i>Cassia mimosoides</i> (Plants)									
<i>Sc. heterogama</i>	1.0	0.5	1.5	2.0	1.5	1.5	6.5	1.0	2.5
<i>Sc. calospora</i>	0.0	0.5	0.0	2.5	1.0	0.5	1.0	0.0	1.0
<i>Ac. spinosa</i>	2.0	2.5	1.5	4.0	1.5	1.5	3.5	2.0	2.5
Total	3.0	3.5	3.0	8.5	4.0	3.5	11.0	3.0	6.0
Biomass	0.34	0.50	0.69	0.40	0.42	0.57	0.34	0.40	0.28
<i>Allium fistulosum</i> (Plants)									
<i>Sc. heterogama</i>	2.0	1.5	0.5	5.0	4.0	0.5	4.0	2.5	7.5
<i>Sc. calospora</i>	7.0	3.5	1.0	4.5	2.0	0.0	0.0	4.0	3.5
<i>Ac. spinosa</i>	3.5	2.0	6.0	2.0	1.0	3.0	3.0	1.0	4.5
Total	12.5	7.0	7.5	11.5	7.0	3.5	7.0	7.5	15.5
Biomass	0.35	0.28	0.34	0.29	0.33	0.41	0.08	0.08	0.08
<i>Capsicum annuum</i> (Plants)									
<i>Sc. heterogama</i>	5.0	4.5	4.0	6.0	1.0	1.5	5.5	1.5	2.0
<i>Sc. calospora</i>	4.5	3.0	1.0	7.5	0.5	0.0	1.5	4.0	1.0
<i>Ac. spinosa</i>	2.5	3.0	3.0	2.5	2.0	3.5	2.5	3.0	2.0
Total	12.0	10.5	8.0	16.0	3.5	5.0	9.5	8.5	5.0
Biomass	0.57	0.70	0.80	0.71	0.89	0.93	0.09	0.10	0.12

^aSpore productions of Arbuscular mycorrhizal fungi on the plants.

^bThe populations of arbuscular mycorrhizal spores first counted before planting.

^cThe kind of fertilizers commercially used by "N-P-K" and see the Materials and Methods in detail.

^dNo fertilizer treatments.

^eThe grams of fertilizer per 400 g soil sprayed by the water containing the fertilizer.

^fThe grams per individual host plants.

배열을 하고 있는 것이 관찰되었다(Fig. 1D). 또한, 수수 40일째의 염색뿌리 관찰에서는 균사가 세포 내부에 침투하여 꽃송이 모양을 형성한 균사체의 집합이 발견되었다. 이렇게 감염된 숙주식물의 생체량은 다른 경우의 생체량과 비교하여 떨어지지

않는 것으로 관찰되었다(Table 3). 비료를 이용한 2차 실험에서 시비한 4주째의 차풀 뿌리에서 세포의 대부분이 그 내부에 꽃송이 형태의 균사체로 채워져 있는 것이 관찰되었다(Fig. 1D). 이것을 광학 현미경의 저배율로 관찰할 경우에는 arbuscle이 집단을

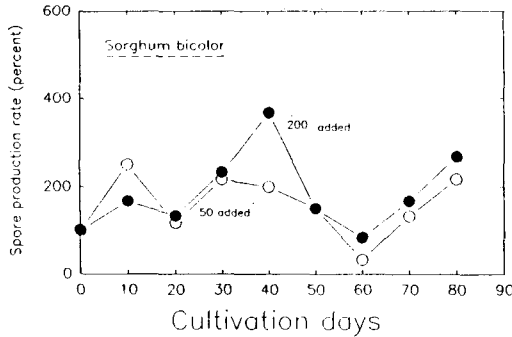


Fig. 2. Production percentages of arbuscular mycorrhizal spores on the different concentrations of 50 (open circles) or 200 μg (closed circles) $\text{KH}_2\text{PO}_4/\text{g}$ of soil artificially provided under the pot cultures of *Sorghum bicolor*.

이루고 있는 것같이 관찰되었다. 뿌리 염색의 현미경 관찰에서 포자의 형성(sporulation)도 관찰할 수 있었다(Fig. 1FG). 비료를 이용한 2차 실험에서 시비한 4주째 차풀에서는 뿌리 염색 결과 뿌리 내부에 함몰되어 관찰되는 보조세포(Auxiliary cell)가 관찰되었다(Fig. 1EH).

AMF 포자증식

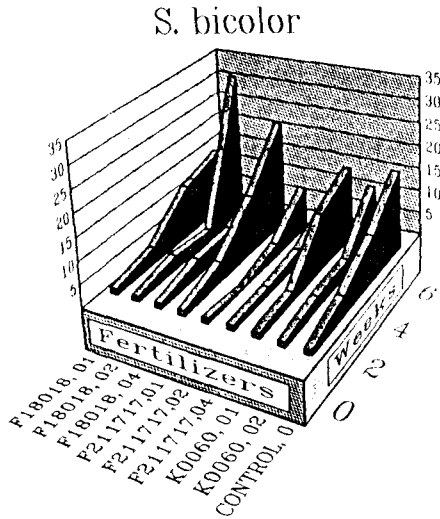
채취토양을 이용한 인산 실험에서는 토양 gm 당 인산(KH_2PO_4)의 처리량을 50 μg 과 200 μg 의 둘로 나누어 실시하였다. 숙주식물로는 수수, 차풀, 참깨를 이용하였고, 80일간 포트배양하면서 10일 간격으로 관찰하였다(Fig. 2). 여기서는 숙주식물들의 AMF 포자변화 상태를 처음 토양 속에 분포한 포자수에 대한 상대값으로 환산하여 그래프로 나타냈으며, 수수식물에 대한 자료만 제시하였다(Fig. 2). 수수의 참깨 및 차풀에서도 전체적인 포자의 증식은 증가했다가 감소하고 다시 증가하는 주기적(fluctuation) 경향성을 나타냈다. 인산의 농도에 관계없이 AMF 포자는 주기적으로 증감하였다가 40일 및 80일째 큰 폭으로 증가하고 있었다. 인산의 양에 따른 포자의 증식은 인산을 많이 넣은 시험구가 더 증폭이 컸으며, 그 차이점은 크게 나타나지 않았다(Fig. 2). 그러나, 40일째에 포자의 증식이 가장 큰 것으로 나타나서, 다음 실험은 AMF 첨가 후 42일에 모든 결과를 관찰하였다(Fig. 3).

화학비료 첨가

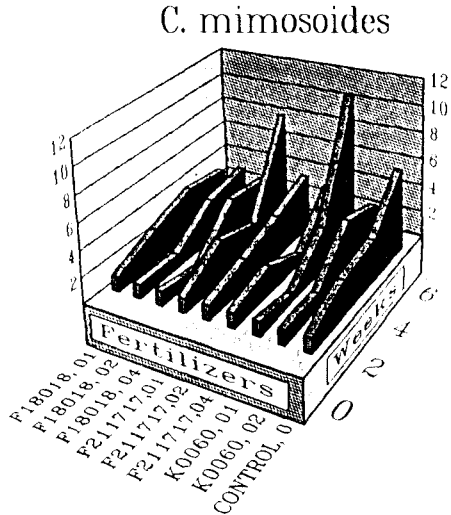
토양내 환경 변화의 요인자로는 농협을 통해 농가에 보급되는 N-P-K의 포함 비율이 각각 18-0-18, 21-17-17, 0-0-60의 세종류 비료를 이용하여, 가능한 토양의 변이로 생각하여 실험에 임하였다. 또한 비료를 시비하지 않은 대조군을 형성하여 비교 관찰하였다. 그 결과 숙주식물에 따라 포자 증가에 큰 차이를 보였으며, 비료의 종류와 농도에도 포자의 증가가 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 전체적인 포자증가가 가장 높게 나타난 것은 수수였고, 다음이 고추와 파 그리고 차풀 순으로 나타났다(Fig. 3). 2주째 관찰에서 숙주식물간 총 포자수는 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 3). 4주째의 관찰에서는 큰 차이를 보이고 있는데, 수수의 경우 비료의 종류에 관계없이 토양 400g 당 0.2g을 시비한 포트에서 높은 포자증가를 관찰했다. 비료를 시비하지 않은 포트의 포자증식과 비교할 때 수수는 이미 각 비료 0.1g에서 포자증식이 많이 되는 것을 관찰하였다(Fig. 3). 또한, 파의 경우는 비료를 시비하지 않은 포트에서는 높은 증가를 보였지만, 비료를 시비한 전 포트에서 포자 증가가 거의 없는 것으로 보아 여전히 비료에 의해 포자증식이 영향을 받고 있음을 관찰하였다(Fig. 3). 6주째가 되면서 모든 숙주식물에서 포자증식을 관찰할 수 있었으며, 이는 앞의 실험 결과와 부분적으로 일치함을 보였다(Fig. 3). 수수는 4주째의 AMF 포자증가 경향을 그대로 유지하면서 18-0-18 비료의 농도 0.2g에서 처음 토양내 총 포자수와 비교해 30배의 높은 포자 증가를 나타냈다(Fig. 3). 고추와 파의 경우도 수수에는 못 미치지만 처음 토양내 총 포자수와 비교해 볼 때 약 15배(21-17-17 비료의 농도 0.1g, 고추)와 14배(비료를 시비하지 않은 파)의 증가를 나타냈다(Fig. 3). 차풀은 최고 10배(0-0-60 비료의 농도 0.1g)를 나타내 다른 식물보다 총 포자수 증가가 가장 떨어지는 것으로 관찰되었다(Fig. 3). 이러한 총포자수 증가에 주로 작용한 것은 *Sc. heterogama*로 나타났으며, 처음 토양과 비교하여 최고 80배(18-0-18 비료의 농도 0.2g, 수수)의 증가를 관찰하였다(Table 3 and Fig. 3).

비료의 영향

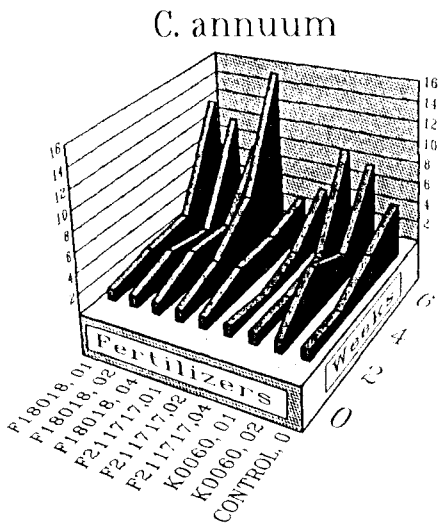
수수, 차풀, 파, 고추등의 숙주식물은 AMF 포자증식에 비료의 영향을 많이 받는 것이나, 식물의 생체량과는 관련이 없게 나타났다. 비료의 농도에



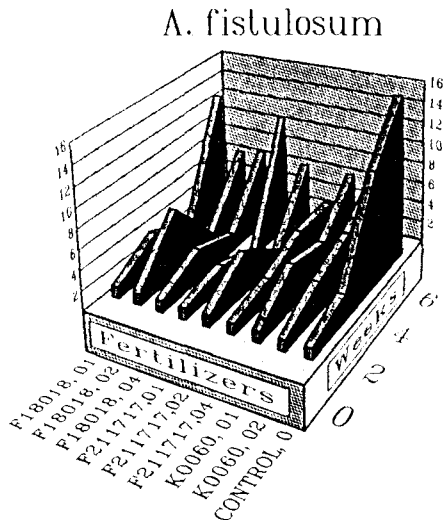
Productions of AMF spores with different fertilizers



Productions of AMF spores with different fertilizers



Productions of AMF spores with different fertilizers



Productions of AMF spores with different fertilizers

Fig. 3. The spore productions of arbuscular mycorrhizal spores on the different pot cultures of four plants with additions of three different commercial fertilizers(18-0-18, 21-17-17, 0-0-60) at the different levels(0.1 g, 0.2 g, 0.4 g per pot added) after two, four and six weeks' cultivations.

대해 가장 민감하여 포자증식이 억제되는 식물은 파로 관찰되었으며, 그 다음이 차풀과 수수였고, 비료의 농도에 가장 관용도가 높은 것은 고추로 관찰되었다(Table 3). 또한, N(질소원), P(인산원), K(加里원) 세종류의 성분 중에서 가장 낮은 농도에서

포자증식을 저해하는 것은 P이며 그 다음 N와 K 순으로 나타났다. 수수의 경우 4주째의 포자 증식을 보면 비료의 종류에 관계없이 저농도에서 높게 나타났다으며, 그 증가치는 비료를 시비하지 않은 포트 보다 높았다(Fig. 3 and Table 3). 모든 비료에서 토

양 400 g 당 0.2 g 이상을 시비한 포트에서는 2주째와 비교해서 증가되지 않은 것으로 관찰되어 고농도 비료의 억제 현상을 보였다(Fig. 3). 특히, 18-0-8 비료나 0-0-60 비료의 농도 0.2 g 이상을 시비한 포트에서 포자증가가 억제되는 것으로 보아, N와 K도 고농도에서 포자증가를 억제함을 관찰하였다(Fig. 3). 6주째는 18-0-18 비료 농도 0.2 g에서 포자증식이 다량으로 나타났으며, 비료를 시비하지 않은 포트에서 보다 약 두배나 많은 포자수였다(Fig. 3). 이로써 질소는 고농도에서 포자 증식을 억제하지만 적절한 농도에서는 오히려 포자증가를 촉진하는 것으로 나타났다. 인산이 함유된 21-17-17 비료에서는 농도 0.2 g에서 4주째보다 증가되었지만, 아직도 저해 현상이 강함을 관찰하였다(Fig. 3). 차풀의 경우는 다른 숙주식물과 비교하여 전체적으로 포자증식이 많이 떨어졌다(Fig. 3). 2주와 4주째는 거의 포자 증식을 관찰할 수 없었으며 6주째가 되어서야 21-17-17과 0-0-60 비료의 농도 0.1 g에서 처음 토양내 총 포자수에 비해 최고 10배 정도 증가된 것으로 나타났다(Fig. 3). 파의 경우는 2주, 4주, 6주째의 관찰 모두에서 비료를 시비하지 않은 포트에 비해 비료를 시비한 전 포트에서 포자증가가 낮게 나타났음을 보아, 비료의 억제 현상이 강하게 나타났음을 볼 수 있었다(Fig. 3). 고추의 경우에도 2주와 4주째 포자증식이 거의 나타나지 않았으나 6주째 수수를 제외한 다른 숙주식물에 비해 높은 포자증가를 나타냈다(Fig. 3). 또한, 차풀에 있어 6주째 포자 증식을 보았을 때, 18-0-18과 0-0-60 비료 전 농도에서 비료의 억제 현상을 벗어났음을 관찰하였으며 이로써 수수보다도 오히려 고농도 비료에 포자 증식이 억제되지 않음을 관찰하였다(Fig. 3).

식물과 AMF 종의 포자증식

식물의 성장과 AMF 포자증식은 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 비료 21-17-17를 처리한 식물에서는 대체적으로 잘자라고 있으나, 42일째 포자 증식에는 다른 부족한 비료에 비해 적었으며, 비료 0-0-60 처리보다 아주 적었다. AMF 종별 증식에서 살펴본다면, *Sc. heterogama* 포자증식은 비료가 없거나 적은 쪽에서는 파, 수수에 많이 증가되었으나, 고추 및 차풀에서는 다른 AMF 종에 비해 적었다. 차풀 및 고추 파에서는 *Ac. spinosa* 포자 증식이 많았다.

이러한 것을 볼 때, AMF 포자증식은 식물의 요구는 어떤 특이성이 없어도, 여러 종이 함께 있을 때는 식물 숙주에 따라 다르게 나타나는 것으로 관찰되었다(Table 3). 비료의 종류에서 본다면 역시 18-0-18 비료에서 수수에서는 *Sc. heterogama*, 고추에서는 *Sc. heterogama* 및 *Sc. calospora*의 포자 증식이 두드러지게 나타났으며, 비교적 모든 식물에서 0-0-60 비료에서 *Sc. heterogama*가 크게 증식됨이 나타났다. 그와 반면에, *Ac. spinosa*에서는 파 및 수수에 18-0-18 비료에서 포자증식이 크게 일어났다. 여기서 비료에 의한 AMF 종간 포자증식의 한 차이점보다는 숙주의 차이점에 많은 변화가 일어나는 것으로, 파의 경우는 비료가 적은 처리에서 크게 증식되었다. *Ac. spinosa*의 경우는 NPK 비료의 조화가 맞는 비료인 21-17-17 비료에서 증식이 많이 일어나는 것으로 관찰되었다.

考 察

AMF 감염특성

세계적으로 최근까지 보고된 AMF 포자는 총 126 종에 이르며, 그 중 *Glomus* 속에 속하는 것이 67 종으로 가장 많이 보고되어 있다(Morton, 1988). 우리나라에서 발견되는 AMF 종 중에서도 가장 많이 발견된 AMF 종은 *Glomus* 속의 종으로 26종이 동정되었다(이와 엄, 1993). 그러나 본 실험에 사용된 토양속에 포함된 AMF 포자는 *Sc. heterogama*, *Sc. verrucosa*, *Sc. calospora*, *Gi. margarita*, *Ac. spinosa* 등의 3속 5종으로 관찰되었으며(Table 2), *Glomus* 속에 포함되는 AMF 내생균근균은 발견되지 않았다. AMF는 거의 모든 토양에서 발생하지만, 종의 풍요도와 다양성 및 퍼짐의 정도는 토양들 사이에 다르다(Abbott and Robson, 1989 ; 1991). 토양의 성질 즉, pH, 수분, 온도 등에 따라서도 AMF 각 종간에는 그 증식이나 서식에 특이성 있는 것으로(Haymann and Tavares, 1985 ; Smith and Roncadori, 1986), 여러가지 AMF 종들이 있는 토양으로 실험에 임하였다. 이러한 사실들로 볼 때, 본 실험에 사용된 토양은 *Glomus* 종보다는 *Scutellispora*나 *Acaulospora* 종이 서식하기에 좋은 조건을 갖춘 토양이었던 것으로 생각된다.

본 실험에 이용된 숙주식물 뿌리에서 관찰된 균

사는 식물 세포내에 침투하여 나뭇가지 모양을 형성한 것, 꼬인 것, 곤충의 알과 같은 모양을 한 것, 꽃송이 모양을 한 것 등이 관찰되었다(Fig. 1). 나뭇가지 모양을 한 균사는 그 모양에 따라 branch hyphae(Brundrett *et al.*, 1984)라고 칭하였으나, AMF 균근에 중요한 특징의 하나로 Arbuscle로 생각되었다. 세포 내에 침투하여 꼬인 형태를 갖는 균사 역시 그 모양에 따라 Coiling hyphae(Brundrett *et al.*, 1984; Powell and Bagyaraj, 1984)로 일컬어지며 선행연구자들에 의해 자주 관찰되어 왔다. 일찌기 Furlan and Fortin(1973)은 파에 *Endogone calospora*를 접종시킨 후의 뿌리 관찰에서 빗 모양을 한 균사의 성장을 관찰하고 이를 Comb-like hyphae라고 부르기도 하였다. 그러나 곤충의 알과 같은 모양을 한 균사(Insect's egg-like hyphae), 꽃송이 모양을 한 균사(Flower-like hyphae) 등에 대한 보고는 아직 찾아 볼 수 없다. 이러한 곤충 모양, 꽃송이 모양의 균사에 감염된 식물체 생체량이 다른 것에 비하여 떨어지지 않는 것으로 볼 때 이는 본 실험에 이용된 숙주에는 모두 AMF가 잘 형성된 것으로 고려되며, 본 실험의 결과도 옳게 나온 것으로 판단된다.

포자증식의 주기성

AMF 포자 증식을 위한 실험에서 포자 증식이 계절적인 영향을 많이 받으며 포자 증식이 최대 되는 시기는 10월이라고 보고했다(Gemma *et al.*, 1989). 이러한 연구 결과들을 기초로 하여, 최근 AMF 포자 증식은 숙주식물의 생장기간 동안 한번에 걸쳐 일어나는 것으로 생각되어 왔다. 그러나 토양내 환경 변화의 요인자로 인산(KH_2PO_4)을 이용한 본 실험에서의 결과를 보면 포자증식이 한번에 걸쳐 일어나기 보다는 다단계적인 포자증식이 있는 것으로 나타났다. 수수를 숙주식물로 하고 인산의 농도를 달리 하였을 때($50 \mu\text{g KH}_2\text{PO}_4/\text{g soil}$ 과 $200 \mu\text{g KH}_2\text{PO}_4/\text{g soil}$), AMF 포자증가가 높게 나타나는 시기에 있어서 약간의 차이를 보이긴 하지만 공통적으로 증가를 했다가 감소하고 다시 증가하는 주기적(fluctuation) 포자증가를 보이고 있다(Fig. 2). 인산의 양을 적게 투여($50 \mu\text{g KH}_2\text{PO}_4/\text{g soil}$)한 풋트베양에서는 30일경에 1차 높은 포자 증가를 나타냈다가 60일경에는 처음 토양내 총 포자수의 1/3 정도로

감소되었고 다시 80일째 높은 포자증가를 나타냈다(Fig. 2). 이러한 결과는 AMF 포자증식은 식물의 성장과 관련될 것으로 생각된다.

AMF 포자증식

AMF의 포자를 생산하기 위해서는 무엇보다도 숙주식물의 선정이 중요하다(Powell and Bagyaraj, 1984; Struble and Skipper, 1988). 또한, AMF 포자증식이 숙주식물의 영향을 받는다고 하였으며, AMF과 숙주식물간에 어떠한 친화성의 존재가능성을 제시하였다(Daniels-Hetrick and Bloom, 1986). 본 실험에서는 숙주식물로 5과(Family), 다섯 종류의 식물(벼과의 수수, 콩과의 차풀, 참깨과의 참깨, 가지과의 고추, 백합과의 파 등)을 이용하였다. 그 결과 1차 인산(KH_2PO_4) 실험에서는 이용한 세종류의 식물(수수, 차풀, 참깨) 사이에 뚜렷한 포자 증식 정도의 차이를 볼 수 없었다. 그러나 2차 비료 실험에서는 각 숙주식물(수수, 차풀, 파, 고추)간 포자수 변동에 상당한 차이가 있었으며 포자증식에 있어서의 숙주간 특이성을 엿볼 수 있었다(Table 3). 즉, 수수에는 *Sc. heterogama*의 증가가, 파에는 *Ac. spinosa* 포자의 증가가 비료의 종류에 관계없이 나타났다. 비료의 종류에서는 고추에서는 *Sc. calospora* 및 *Ac. spinosa*가 증가하는 것으로 나타났다. 총 포자증식의 수로 볼 때 수수에서 가장 높은 AMF의 포자증가를 나타냈으며 그 다음에 고추, 파, 차풀의 순으로 나타났다. 이는 본 실험에 사용된 식물 파가 다른 식물에 대하여 AMF 포자증식에 좋은 결과를 얻었다. 또한, 식물간의 AMF 포자증식에서도 그 장점이 관찰되나, 어떤 친화성 혹은 숙주의 특이성은 크게 관찰되지 않았다.

무기양분

AMF가 숙주 식물에 주는 잇점 중의 하나는 무기양분의 공급을 통한 숙주 식물의 성장 개선이다. 이러한 무기 영양소는 AMF 내생균근의 뿌리감염도와 포자증식에 영향을 미치는 것으로 나타나 있는데, 특히 인산의 농도가 높으면 이들을 감소시키는 것(Holevas, 1966)으로 보고하고 있다. 질소는 포자 생산을 위하여 3-4개월 정도 공급이 필요하지만 아직 그 효과는 알려져 있지 않다(Powell, 1984). 그러나 NO_3^- 도 높은 농도에서는 뿌리의 AMF 감염도를 감

소시키는 것으로 알려져 있다(Powell and Bagyaraj, 1984). 본 실험의 1차 인산 실험 결과 인산(KH_2PO_4)의 농도가 높은 200 $\mu\text{g KH}_2\text{PO}_4/\text{g soil}$ 에서 50 $\mu\text{g KH}_2\text{PO}_4/\text{g soil}$ 의 경우보다 전 식물(수수, 차풀, 참깨)의 감염이 늦게 진행되는 것으로 나타나, 동일한 결과를 보였다. 2차 비료 실험에서도 무기 양분과 감염도는 뚜렷한 관련성을 보였다. 인산원은 뿌리의 AM 형성을 억제하는 것으로 생각된다. 그러나 질소원과 가리원은 AM 형성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 또한 1, 2차 실험의 결과로 볼 때 감염 정도와 포자의 증식량은 관련이 없는 것으로 나타나, AMF 감염과 포자증식은 별개의 것으로 생각된다. 2차 비료 실험의 결과로 볼 때 AMF 포자 증식은 무기 영양소의 영향을 대단히 민감하게 받는 것으로 생각된다. 질소, 인산, 가리 모두 고농도에서는 포자의 증식을 억제하는 것으로 생각되며 그 중에서도 인이 가장 낮은 농도에서 억제 현상을 나타내는 것으로 생각된다. 가리원인 0-0-60 비료가 시비된 포트에서의 차풀이나 고추, 수수 등의 포자 증식을 볼 때(Fig. 3), 포자 증식의 저해를 일으키는 농도가 질소나 인산보다는 훨씬 높은 것으로 생각된다. 질소는 고농도에서 포자증식을 저해 하기도 하지만 적정 농도에서는 오히려 포자의 증식을 촉진하는 효과를 나타내는 것 같다.

본 실험의 결과로 볼 때 동일 숙주식물 내에서 숙주식물의 생체량과 포자증식량은 관련이 없는 것으로 나타났다. 이러한 것은 식물 뿌리에서 AM 형성은 식물체 내에서 조절되는 것으로 생각되어 진다. 숙주식물이 서로 다른 경우에는 어느 정도 그 관련성을 찾아 볼 수 있었다. 즉 2 차의 비료 실험에서 얻어진 포자의 증식량은 수수에서 가장 높게 나타났는데, 이는 숙주식물의 생체량도 다른 식물에 비하여 높게 나타난 것과 일치한다. 그러나 차풀과 파를 비교하여 볼 때 차풀의 생체량이 파에 비하여 높게 나타났는데 반하여 포자의 증가 면에서는 오히려 파에서 높게 관찰되어 식물간에도 생체량과 AMF 포자 증가의 관련성은 찾아보기 힘들었다. 다만 식물간의 성장도 차이는 동일 농도로 주어진 토양내 무기 양분의 소모율이 다르고 결국 포자의 증식에도 간접적인 영향을 미칠 수 있다는 가능성은 충분하리라 본다.

摘 要

접합내생균근 균(AMF)이 있는 토양을 이용하여 여러 종류의 비료를 주면서 식물을 재배하여, AMF 포자 증식에 대하여 관찰하였다. 식물뿌리에서 AM화된 뿌리는 여러가지 형태가 현미경 관찰을 통하여 확인되었으며, 정상적인 Vesicles, Arbuscles 및 sporulation 과정도 관찰되었으며, 꽃송이와 같은 특수한 형태도 관찰되었다. 포자증식에 있어서의 80일간의 관찰과 뿌리염색을 통한 뿌리감염도의 관찰 결과, 40일 주기로 포자의 생산에 증감이 주기적으로 일어나는 것을 관찰하였다. 비료를 첨가한 토양에서 수수, 파, 고추 및 차풀의 순으로 포자 증식에 좋은 식물로 나타났으며, 그 포자 증식이 조건에 따라 다양하게 나타났다. 비료의 첨가에서는 인산이 없는 비료에서 포자증식이 크게 일어났으며, 21-17-17 비료에서는 포자증식 적었다. 식물별로 본다면, 수수, 고추, 파 등의 순으로 포자증식이 많이 되었다.

參考文獻

- Abbott, L. K. and A. D. Robson. 1982b. The role of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture and the selection of fungi for inoculation. *Aust. J. Agric. Res.* **33**: 389-408.
- Abbott, L. K. and A. D. Robson. 1989. Factors affecting the occurrence of Vesicular-arbuscular mycorrhizas. *Agric. Ecosystems Environ.* (In Press).
- Abbott, L. K. and A. D. Robson. 1991. Factors influencing the occurrence of vesicular-arbuscular mycorrhizas. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* **35**: 121-150.
- Brundrett, M. C., Y. Piche, and R. L. Peterson. 1984. A developmental study of the early stages in vesicular-arbuscular mycorrhiza formation. *Can. J. Bot.* **63**: 184-194.
- Daft, M. J. and B. G. Hogarth. 1983. Competitive interactions amongst four species of *Glomus* on maize and onion. *Trans. Br. mycol. Soc.* **80**: 339-345.
- Daniels-Hetrick, B. A. and J. Bloom. 1986. The influence of host plant on production and colonization ability of vesicular-arbuscular mycorrhizal spores. *Mycologia.* **78**: 32-36.
- Furlan, V. and J. A. Fortin. 1973. Formation of endomycorrhizae by *Endogone calospora* on *Allium cepa*

- under three temperature regimes. *Naturaliste can.* **100**: 467-477.
- Gemma, J. N., R. E. Koske and M. Carreiro. 1989. Seasonal dynamics of selected species of V-A mycorrhizal fungi in a sand dune. *Mycological Research* **92**: 317-321.
- Hayman, D. S. and M. Tavares. 1985. Plant growth responses to vesicular-arbuscular mycorrhiza. x v. Influence of soil pH on the symbiotic efficiency of different endophytes. *New Phytol.* **100**: 367-377.
- Holevas, C. D. 1966. The effect of vesicular-arbuscular mycorrhiza on the uptake of phosphorus by Strawberry (*Fragaria* sp. var Cambridge Favourite) *J. Hort. Sci.* **41**: 57-64.
- Johnson, P. N. 1977. Mycorrhizal Endogonaceae in a New Zealand forest. *New Phytol.* **78**: 161-170.
- Kim, C. K. and D. J. Weber. 1985. Distribution of VA-mycorrhiza on halophytes on inland salt playas. *Plant and Soil* **83**: 207-214.
- Koske, R. E. and J. N. Gemma. 1989. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. *Mycol. Res.* **92**: 486-505.
- Koske, R. E. and W. R. Polson. 1984. Are VA mycorrhizae required for sand dune stabilization? *BioScience* **34**: 420-424.
- Louis, I. and G. Lim. 1988. Observations on in vitro sporulation of *Glomus clarum*. *Trans. Br. mycol. Soc.* **91**(4).
- Mertz, S. M., J. J. Heithaus, and R. L. Bush. 1979. Mass production of axenic spores of the endomycorrhizal fungus *Gigaspora margarita*. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* **72**: 167-169.
- Morton, J. B. 1988. Taxonomy of VA-mycorrhizal fungi: Classification, nomenclature, and identification. *Mycotaxon* **32**: 267-324.
- Mosse, B. and C. M. Hepper. 1975. Vesicular-arbuscular mycorrhizal infections in root organ cultures. *Physiol. Pl. Path.* **5**: 215-223.
- Phillips, J. M. and D. S. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Brit. mycol. Soc.* **55**: 158-160.
- Powell, C. L. and D. J. Bagyaraj. 1984. *VA Mycorrhiza*. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida. pp. 35-234.
- Schenck, N. C. and Y. Perez. 1990. A unique code for each species of VA mycorrhizal fungi. *Mycologia* **82**: 256-260.
- Smith, G. S. and R. W. Roncadori. 1986. Responses of three vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi at four soil temperatures and their effects on cotton growth. *New Phytol.* **104**: 89-95.
- Sreenivasa, M. N. and D. J. Bagyaraj. 1988. Selection of a suitable substrate for mass multiplication of *Glomus fasciculatum*. *Plant and Soil* **109**: 125-127.
- Struble, J. E. and H. D. Skipper. 1988. Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungal spore production as influenced by plant species. *Plant and Soil* **109**: 277-280.
- Wilson, J. M. 1984. Competition for infection between vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytol.* **97**: 427-435.
- 가강현. 1991. 식물과 VA-mycorrhizae 간의 숙주 특이성. 한국교원대학교 대학원 석사학위논문 p70.
- 엄안흠, 이상선. 1989. 산림 및 해안지역에서 발견된 내생균근. *한국균학회지* **17**: 14-20.
- 엄안흠, 이상선. 1990. 고마리 군락의 토양에서 발견된 내생균근. *한국균학회지* **18**: 26- 42.
- 엄안흠, 이석구, 이상선. 1992. 한국에서 발견된 *Glomus*의 포자과를 형성하는 종. *한국균학회지* **20**: 85-94.
- 이상선, 가강현, 이석구, 백기영. 1991. 원예식물 및 재배식물에서 발견된 내생균근. *한국균학회지* **19**: 186-202.